



SOLUTIONS
POUR
**NOTRE
AIR**

**Mesures et
perceptions de
la qualité de l'air
en Île-de-France**

Octobre 2025

MESURES **PERCEPTIONS &**

**Une expérimentation inédite pour les
franciliens :
Mesures et perceptions de la qualité de
l'air en Île-de-France**

Octobre 2025

*Porteur du projet : Conseil Régional d'Île-de-France
Avec le soutien de*

SOMMAIRE

SYNTHESE	1
INTRODUCTION	9
VOLET 1	11
EXPERIMENTATION DE SYSTÈMES-CAPTEURS FIXES ET MOBILES	11
1. PRESENTATION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL	12
1.1. POLLUANTS MESURES	12
1.2. MOYENS DE MESURE	12
1.2.1. Définitions	12
1.2.2. Matériels.....	14
1.3. PLAN D'ECHANTILLONNAGE / DISPOSITIF MIS EN PLACE	15
1.3.1. Sites fixes	15
1.3.2. Sites en mobilité.....	16
1.3.3. Couverture spatiale et temporelle	16
1.3.4. Dispositif de surveillance d'Airparif comme référence	17
1.4. VERIFICATION METROLOGIQUE DES CAPTEURS AVANT DEPLOIEMENT SUR LE TERRAIN.....	18
1.4.1. Dioxyde d'azote.....	19
1.4.2. Particules PM ₁₀ et PM _{2.5}	20
1.4.3. Ammoniac NH ₃	21
1.5. RECUPERATION DES DONNEES / MISE EN BASE	21
1.6. SUIVI DES MESURES.....	23
2. PRE-TRAITEMENT DES DONNEES ISSUES DES SYSTEMES-CAPTEURS	24
2.1. CORRECTION DES DONNEES	24
2.1.1. Dioxyde d'azote (NO ₂)	24
2.1.2. Particules PM ₁₀ et PM _{2.5}	25
2.1.3. Ammoniac (NH ₃)	29
2.2. VALIDATION DES DONNEES CORRIGEEES (PM ₁₀ /PM _{2.5})	30
2.2.1. Objectifs de la validation	31
2.2.2. Validation des données des systèmes-capteurs fixes	31
2.2.2.1. Etape 1 : Calcul du taux de disponibilité des données	31
2.2.2.2. Etape 2 : Calcul d'indicateurs statistiques	31
2.2.2.3. Etape 3 : Croisement des indicateurs statistiques pour qualifier les données	32
2.2.2.4. Etape 4 : Post-traitement sur les données en « warning » après l'étape 3	33
2.2.2.5. Etape 5 : Post-traitement manuel pour traiter les données en « warning » suite à l'étape 4	33
2.2.3. Validation automatique des données des systèmes- capteurs en mobilité	34
3. QUEL USAGE DU RESEAU EXPERIMENTAL DE SYSTEMES-CAPTEURS DANS UN DISPOSITIF DE SURVEILLANCE	35
3.1. USAGE DU RESEAU EXPERIMENTAL DE SYSTEMES-CAPTEURS FIXES DANS DES ZONES AVEC PEU DE STATIONS DE REFERENCE.....	35
3.1.1. Tests de sensibilité de la performance de correction au nombre de stations de référence	35
3.1.1.1. Ecart de performance de la correction sur les PM ₁₀	36
3.1.1.2. Ecart de performance de la correction sur les PM _{2.5}	37

3.1.2. Exploitation des données des systèmes-capteurs corrigées avec un nombre minimal de stations de référence	38
3.1.2.1. Evaluation de la variabilité temporelle des concentrations.....	38
3.1.2.2. Evaluation de la variabilité spatiale.	40
3.1.2.3. Evaluation des dépassements des seuils réglementaires.....	41
3.1.3. Exploitation des données brutes des systèmes-capteurs en l'absence de réseau de surveillance	42
3.1.3.1. Evaluation de la variabilité temporelle des concentrations.....	42
3.1.3.2. Evaluation de la variabilité spatiale des concentrations	44
3.1.3.3. Evaluation des dépassements des seuils réglementaires.....	45
3.1.3.4. Conclusion	48
3.2. APPORT DES DONNEES ISSUES DU RESEAU EXPERIMENTAL DE SYSTEMES-CAPTEURS DANS LES CARTOGRAPHIES PRODUITES PAR AIRPARIF	49
3.2.1 Principes méthodologiques	49
3.2.2. Assurer une comparaison mesure/modèle qui ait du sens	51
3.2.3. Améliorer les temps de calcul : reconstruction de cartographies par combinaison de composantes positives	52
3.2.4. Méthodologies de correction des modélisations brutes	54
4. APPORT DES MESURES EN MOBILITE.....	57
4.1. METHODOLOGIE	57
4.2. ANALYSE DES NIVEAUX SUR UNE ANNEE	60
4.2.1. Analyse des niveaux moyens	60
4.2.2. Variabilité des niveaux selon la période de la journée	62
4.2.3. Variabilité des niveaux selon la typologie d'axe	64
4.2.4. Synthèse	69
4.3. RECHERCHE DE FACTEURS D'INFLUENCE A L' AIDE DES CAMERAS EMBARQUEES	69
4.3.1. Analyse des mesures de qualité de l'air pendant les tournées.....	70
4.3.2. Analyse des données de trafic issues des caméras embarquées.....	73
4.3.3. Croisement des mesures de qualité de l'air et des données de trafic	77
5. IMPACT ENVIRONNEMENTAL	79
5.1. DUREE DE VIE DES CAPTEURS.....	79
5.2. BILAN ENVIRONNEMENTAL	85
6. ENSEIGNEMENTS DE L'EXPERIMENTATION ET PERSPECTIVES.....	85
6.1. SYNTHESE DE L'EVALUATION METROLOGIQUE DES SYSTEMES-CAPTEURS ET DES PRE-TRAITEMENTS REALISES SUR LES DONNEES	85
6.1.1. Recettage et évaluation métrologique	85
6.1.2. Calibration des appareils et correction des données.....	86
6.1.3. Mise en œuvre de l'expérimentation	87
6.2. SYNTHESE DES ENSEIGNEMENTS APRES VALIDATION ET CORRECTION DES DONNEES	87
6.3. BILAN ENVIRONNEMENTAL	88
6.4. PERSPECTIVES	89
6.5. A RETENIR	89
VOLET 2	91
ENQUETE DE PERCEPTION DES FRANCILIENS	91
1. DISPOSITIF MIS EN PLACE	92

2. RESULTATS DE L'ENQUETE.....	92
3. PERCEPTIONS ET NIVEAUX REELS.....	94
VOLET 3	97
SIGNALEMENTS D'EVENEMENTSIMPACTANT LA QUALITE DE L'AIR.....	97
ANNEXES	99
ANNEXE 1 : RESULTATS DES TESTS METROLOGIQUES REALISES SUR LES SYSTEMES-CAPTEURS	99
ANNEXE 2 : RESULTATS DES TESTS REALISES SUR LES CAPTEURS NH ₃ - LOT 5	109
ANNEXE 3 : STOCKAGE DES DONNEES.....	113
ANNEXE 4 : CALIBRATION PAR POINTS DE RENDEZ-VOUS	114
ANNEXE 5 : RESULTATS DES TESTS DE CORRECTION REALISES AVEC LA METHODE XGBOOST SUR LA PERIODE DU 1 ^{ER} FEVRIER AU 30 AVRIL 2021	116
ANNEXE 6 : RESULTATS COMPLEMENTAIRES SUR LES APPORTS SUR UNE ZONE SANS OU AVEC PEU DE SURVEILLANCE PERMANENTE	117
ANNEXE 7.1 : RECONSTRUCTION DE CARTOGRAPHIES PAR COMBINAISON DE COMPOSANTES POSITIVES	122
ANNEXE 7.2 : METHODOLOGIES D'ASSIMILATIONS DE DONNEES UTILISANT L'ESTIMATEUR BLUE	125
ANNEXE 8 : RESULTATS COMPLEMENTAIRES SUR LE CROISEMENT DE MESURE EN MOBILITE ET DE DONNEES DE CAMERAS EMBARQUEES	131
ANNEXE 9 : COMPORTEMENT A LONG TERME DES CAPTEURS	149
ANNEXE 10 : PREOCCUPATION DES FRANCILIENS A LA QUALITE DE L'AIR.....	158
REFERENCES.....	166

SYNTHESE

A la faveur du développement de la miniaturisation des équipements et de la démocratisation de l'Internet des objets, de nombreuses solutions technologiques miniaturisées sont aujourd'hui disponibles dans le domaine de la mesure de la qualité de l'air, sous la forme de systèmes-capteurs. Le projet « Mesures et Perceptions » a été lancé afin de mener une expérimentation de grande ampleur avec ce type d'équipement.

Cette expérimentation, portant sur l'ensemble de l'Ile-de-France, avait deux objectifs principaux :

- Réaliser des mesures expérimentales dans le flux de circulation et étudier leurs utilisations potentielles pour renforcer les connaissances sur les niveaux de pollution au cœur du trafic
- Mieux connaître les perceptions des Franciliens sur la qualité de l'air, les croiser avec les mesures de terrain et recueillir leurs attentes.

Ce projet, financé par la Région Île-de-France, a été piloté par AIRLAB, la plateforme d'innovation d'Airparif et de ses partenaires. Après une procédure d'appel d'offres, le groupement porté par Geoptis (filiale du groupe La Poste) - réunissant La Poste, Geoptis et 42 Factory, concepteur des systèmes-capteurs AtmoTrack - a été désigné lauréat du projet par Airparif.

600 systèmes-capteurs, dont 500 embarqués sur les flottes de véhicules du groupe La Poste et 100 en positions fixes sur ses bâtiments pour calibrer les instruments de mesure, ont mesuré sur une durée d'un an et demi la qualité de l'air en Ile-de-France en parallèle du dispositif de référence mis en place par Airparif. D'une ampleur inédite en termes de nombre de capteurs, de variété de polluants mesurés et de surface territoriale, l'expérimentation « Mesures et Perceptions » représentait de nombreux défis relevés dans l'étude par des approches innovantes (défis logistiques notamment pour la vérification métrologique des systèmes-capteurs avant installation, défis de gestion des données (développement d'une base pour récupérer, stocker, visualiser et assurer un suivi du bon fonctionnement en temps réel), défis d'évaluation des performances des données délivrées par les systèmes-capteurs et de calibration au regard des méthodes de référence et défis d'interprétation des données, notamment sur leur intégration des données au dispositif de surveillance déjà existant).

Le volet 2 du projet Mesures et Perceptions reposait sur le croisement des cartographies produites par Airparif avec la perception que se font les Franciliens de la qualité de l'air. C'est dans cette perspective que des dizaines de facteurs ont été formés pour recueillir le ressenti des Franciliens sur l'air qu'ils respirent au travers d'un questionnaire coproduit par Airparif et la Région.

Dans le même souci d'associer les citoyens à cette vaste opération, un troisième volet a consisté en la mise en œuvre d'une application mobile permettant aux citoyens de signaler des anomalies ayant un impact sur l'air et leur environnement. Une application a été développée et lancée pour recenser les attentes, les perceptions et les signalements des citoyens.

EXPERIMENTATION DE SYSTÈMES-CAPTEURS FIXES ET MOBILES

1. Synthèse de l'évaluation métrologique des systèmes-capteurs et des pré-traitements réalisés sur les données

Recettage et évaluation métrologique

La mise en œuvre d'un réseau de systèmes-capteurs¹ nécessite impérativement une phase de vérification métrologique ayant pour objectif d'identifier les capteurs défectueux et de faire un constat à réception sur la qualité de fabrication du lot et l'homogénéité des caractéristiques métrologiques afin de les calibrer si nécessaire. Il s'agit principalement de s'assurer de la justesse, de la reproductibilité des capteurs et de la sensibilité de ces derniers.

Dans le cadre de cette expérimentation, les performances des capteurs ont été testées au regard des méthodes de référence mises en œuvre sur les stations d'Airparif. Le Tableau 31 résume les conclusions de l'évaluation métrologique des systèmes-capteurs mis en œuvre dans le cadre de l'expérimentation « Mesures et perception ». **Cette évaluation met en avant que les algorithmes de calcul des concentrations de polluants permettent d'atteindre des performances conformes à l'état de l'art attendu en termes de reproductibilité pour les différents paramètres testés. La justesse reste en revanche la grande difficulté de ce type de matériel pour l'ensemble des polluants.**

	PM ₁₀ et PM _{2.5}	NO ₂	NH ₃
Reproductible	oui	non	oui
Justesse	Ne reproduit pas de manière complètement satisfaisante la mesure de référence	Très variable d'un capteur à l'autre	Ne reproduit pas de manière satisfaisante la mesure de référence
Facteurs de sensibilité	Changement de la nature des particules, température, humidité	Température, Taux d'ozone, humidité, taux de NO	Vraisemblablement influencé par des facteurs environnementaux
Durée de vie	Aucune détérioration des performances du capteur durant la campagne de mesures liée à la durée de vie des composants	Détérioration des performances des capteurs semi-conducteurs a pu être observée	Non étudiée
Remarques	Moins performant en saison froide	Moins performant en saison chaude	Changement de comportement des capteurs étudiés à mi-année (sous-estimation puis surestimation)

Tableau 1 : synthèse de l'évaluation métrologique des systèmes-capteurs

Calibration des appareils et correction des données

Les mesures en PM₁₀ et PM_{2.5} ont montré des bonnes corrélations et une bonne reproductibilité des systèmes-capteurs, mais nécessitent des corrections pour que les résultats soient comparables aux mesures de référence. Une correction spécifique, basée sur les écarts observés entre les systèmes-capteurs et les mesures de référence sur l'ensemble des stations du réseau Airparif, a dû être élaborée pour que les données issues des systèmes-capteurs puissent être exploitées à des fins de diagnostic.

¹ matériel intégrant au moins un capteur (ou un élément sensible) et un logiciel pour détecter une quantité et/ou mesurer une concentration de composés (gaz, aérosol) sur un pas de temps prédéfini.

Les tests de sensibilité de la correction au nombre de stations ont montré qu'une correction basée sur les écarts à la méthode de référence d'une seule station donnait des performances comparables à celle calculée sur l'ensemble des stations du réseau. **Ces résultats montrent que la méthode des ratios peut être adoptée sans perte de performance de la correction dans une zone où le dispositif de surveillance est limité (1 à 2 stations de fond).** Ces résultats sont valables avec les modèles de systèmes-capteurs Atmotrack testés dans cette expérimentation, et sur le territoire francilien, qui présente des niveaux en particules relativement homogènes en situation de fond, et ne sont pas forcément généralisables à tous les territoires.

Pour déployer ce type d'approche sur des territoires ne disposant pas réseau de surveillance dense. Il semble donc important de suivre les étapes ci-dessous :

- s'assurer de la reproductibilité des données issues des systèmes-capteurs en les comparant tous à une station de référence.
- Déployer les systèmes-capteurs si ces derniers sont reproductibles pour s'assurer de la relative homogénéité des niveaux de particules en fond sur le territoire.
- mettre en place le système de correction par ratio à partir des données colocalisées système capteur – station de référence.

En ce qui concerne les systèmes-capteurs NO₂, leur comportement est très variable d'un site de mesure à un autre et n'est pas stable dans le temps. **De ce fait, une correction unique pour tous les sites n'est pas envisageable et une correction spécifique pour chaque système-capteur devrait être étudiée.** Cela demanderait néanmoins un travail spécifique capteur par capteur qui n'a pu être réalisé dans le cadre de ce projet compte-tenu du nombre de capteurs déployés et de l'ampleur de l'expérimentation.

Mise en œuvre de l'expérimentation

Le nombre très important de systèmes-capteurs (100 fixes + 500 en mobilité) a rendu la mise en œuvre de l'expérimentation plus complexe :

- la vérification exhaustive de tous les capteurs n'était pas envisageable. Il a donc été décidé de tester un échantillon de capteurs par lot de fabrication. Cinq lots de capteurs ont été testés de juin à décembre 2020. Cela représente 84 capteurs, soit 14 % du parc mis en œuvre.
- l'installation des capteurs, réalisée par la Poste, a demandé beaucoup d'unités d'œuvre
- le nombre très important de données générées par ce dispositif a nécessité la construction d'une base de données ad hoc pour le stockage, la visualisation et la validation des données qui soit exploitable dans des temps de calcul raisonnables. Ce dispositif a également nécessité le développement d'une méthode de validation automatique des données au fil de l'eau.
- le nombre de capteurs NO₂ n'a pas permis de développer une correction site par site.
- du fait du volume de données générées par le dispositif, les différentes phases de pré-traitement se sont avérées conséquentes au regard de la phase d'interprétation. Ces analyses ont dû être complétées et approfondies hors du cadre de l'expérimentation, par une étude spécifique. Ce retour d'expérience incite à une prise en compte potentiellement importante de ces phases de pré-traitement.

2. Enseignements après validation et correction des données

L'exploitation des données brutes issues des systèmes-capteurs, sans aucune correction, peut permettre de réaliser une analyse qualitative de la variabilité des niveaux, mais ne permet pas en aucun cas une analyse quantitative, compte-tenu des forts écarts constatés par rapport à la mesure de référence.

Les phases de pré-traitement des résultats (validation et correction) améliorent fortement les comparaisons entre les données PM₁₀ et PM_{2,5} issues de systèmes-capteurs et les résultats mesurés sur les stations de mesure, avec néanmoins des écarts qui persistent.

Pour les systèmes-capteurs fixes en situation de fond (loin de l'influence directe des axes routiers), les systèmes-capteurs PM₁₀/PM_{2.5} corrigés permettent globalement une bonne description des variabilités temporelles. Les niveaux moyens sont cohérents avec les stations de référence, avec malgré tout une légère surestimation des PM_{2.5}. **A proximité du trafic routier**, la description des variabilités temporelles est correcte, mais moins performante qu'en fond, avec une tendance à la sous-estimation.

Les systèmes-capteurs reproduisent correctement les variabilités spatiales et permettent d'identifier les zones et les périodes les plus polluées. Ils peuvent ainsi être utilisés en pré-diagnostic pour affiner la surveillance sur une zone non couverte par des mesures.

En revanche, il faut être prudent sur l'utilisation de ces systèmes-capteurs pour une évaluation réglementaire, compte-tenu de leur tendance à sous-estimer les niveaux à proximité du trafic routier.

Pour les capteurs en mobilité, les nombreuses données de qualité de l'air relevées durant la campagne de mesures permettent de retrouver globalement la même hiérarchie des axes en termes de qualité de l'air que lors des précédentes expérimentations au cœur du trafic. Le ratio PM_{2.5}/PM₁₀ observé est néanmoins significativement plus faible dans le cadre de cette campagne de mesures et globalement confirmé par les données issues du système Cartes temps réels et des observations issues des stations d'Airparif. L'exploitation des données des caméras implantées sur les véhicules n'a toutefois pas permis d'identifier les facteurs d'influence en lien avec le trafic routier, notamment du fait de la limite des données fournies par les capteurs sur les véhicules environnants.

L'intégration des données d'un tel dispositif, comprenant un grand nombre de systèmes-capteurs dont 500 en mobilité et mesurant sur des pas de temps très courts, constituait un défi technique pour aboutir à des cartographies urbaines haute résolution utilisables pour l'analyse. Plusieurs verrous techniques devaient au préalable être levés pour s'assurer que les cartes ne soient pas biaisées, qu'elles aient un sens physique, que les cartographies produites soient effectivement améliorées, et enfin que les ressources nécessaires pour exécuter l'algorithme soient raisonnables. **Les développements menés lors de ce projet sur ces différentes pistes n'ont pas permis d'aboutir à cette succession optimale de traitements de données, mais ont ouvert des perspectives intéressantes.** Ils ont en effet permis le développement de la méta-modélisation du modèle urbain fine-échelle d'Airparif Cartes temps réel et la reconstruction rapide de cartographies fine-échelle ayant un sens physique via les données des stations de référence ou des données de systèmes-capteurs (et ce malgré le grand volume de données intégrées). Ils ont également montré la capacité de la méthodologie étudiée dans ce projet à intégrer de nombreuses données de mesures, qui pourraient trouver une application pour l'amélioration des cartographies à fine échelle en fonction de l'amélioration de la justesse des systèmes-capteurs.

3. Bilan environnemental

L'étude de la durée de vie des capteurs a montré un comportement stable des capteurs de particules et de NO₂ électrochimique au cours de la campagne de mesures. L'analyse réalisée n'a pas mis en avant de détérioration des performances des systèmes-capteurs pour ces deux mesures au cours de cette étude menée sur 15 mois. En revanche, en ce qui concerne le capteur NO₂ semi-conducteur, l'analyse montre une baisse des performances du capteur en fin de campagne indiquant probablement une durée de vie moindre que les deux capteurs cités précédemment.

Une étude du cycle de vie du capteur a été réalisée avec un bureau d'étude indépendant. Cette étude a mis en évidence que **la fabrication des composants électroniques représente les trois quarts des impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie. Il est également intéressant de constater que le temps d'archivage et d'utilisation des données mises en base peut être prédominant en termes d'impact environnemental au-delà de 15 ans de mesures.**

4. Perspectives

Les travaux menés dans le cadre de l'expérimentation Mesures et Perceptions ont permis d'ouvrir un large champ d'utilisations potentielles pour de futurs projets.

Les méthodologies, organisations et outils développés lors des étapes clés (tests du matériel en laboratoire, automatisation du plan d'échantillonnage, déploiement par lots de capteurs sur le terrain, surveillance du fonctionnement des capteurs pendant la campagne de mesures...) pourront être repris dans de futures études, permettant de ce fait de réduire la phase de pré-traitement qui ne doit pas être sous-estimée lors de l'installation d'un tel dispositif. C'est également le cas de l'algorithme de correction des positions GPS des véhicules en mouvement pour corriger les erreurs de positionnement dues à l'imprécision du GPS, et récupérer les positions GPS dans les tunnels.

Le défi informatique de la construction d'une base de données exploitable dans des temps de calcul raisonnables qui a été relevé dans le cadre du projet pourra servir d'exemple pour les futurs projets, avec la volonté d'améliorer les outils mis en place. Une telle base pourra être réutilisée dans d'autres projets.

La base de données ainsi constituée par 18 mois de mesures sera ouverte à la recherche et à nos partenaires. Cette accessibilité permettra d'alimenter les travaux de recherche qui compléteront les analyses menées par Airparif sur les thématiques telles que la compréhension du comportement des systèmes-capteurs, l'évolution de leurs durées de vie, la validation des niveaux mesurés, la correction apportée aux données produites, l'intégration de ces données corrigées et validées dans les systèmes de modélisation, le calcul d'incertitudes... Les travaux pourront également être menés sur les concentrations de particules de diamètre inférieure à 1 μm (PM_{10}), mesurées mais non étudiées dans le cadre de cette étude.

Les tests de correction réalisés ouvrent des perspectives encourageantes pour des projets de diagnostic et d'appui au développement de dispositif de surveillance à l'international, plus spécifiquement pour les particules, à condition toutefois de disposer a minima d'une station de référence pour la calibration.

L'étude de cycle de vie montre l'importance d'optimiser le nombre et la durée de vie des composants utilisés dans la fabrication des capteurs afin de diminuer leur impact environnemental. Un défi de taille est lancé aux concepteurs et fabricants des capteurs afin que la durée de vie des capteurs soit allongée de manière significative, sans perte de qualité de mesures. Le temps d'utilisation et de stockage des données doivent également être pris en compte afin de diminuer l'impact environnemental.

5. A retenir

D'une ampleur inédite en termes de nombre de capteurs, de variété, de polluants mesurés et de surface territoriale, l'expérimentation « Mesures et Perceptions » a montré que :

- Une vérification métrologique des systèmes-capteurs en comparaison d'une mesure de référence est indispensable avant utilisation et régulièrement.
- Dès que le nombre de systèmes-capteurs est important, la gestion des données produite nécessite une grande attention ; le développement d'une base pour récupérer, stocker, corriger le cas échéant et assurer le suivi du bon fonctionnement en temps réel est préconisé.
- **L'exploitation des données brutes issues des systèmes-capteurs, sans aucune correction, peut permettre de réaliser une analyse qualitative de la variabilité des niveaux, mais ne permet pas en aucun cas une analyse quantitative, compte-tenu des forts écarts constatés par rapport à la mesure de référence.**

- Les phases de pré-traitement des résultats (validation et correction) améliorent fortement les comparaisons entre les données PM₁₀ et PM_{2,5} issues de systèmes-capteurs et les résultats mesurés sur les stations de mesure, avec néanmoins des écarts qui persistent.
 - o **Pour les systèmes-capteurs fixes en situation de fond** (loin de l'influence directe des axes routiers), les systèmes-capteurs PM₁₀/PM_{2,5} corrigés permettent globalement une bonne description des variabilités temporelles.
 - o **A proximité du trafic routier**, la description des variabilités temporelles est correcte, mais moins performante qu'en fond, avec une tendance à la sous-estimation.
 - o Les systèmes-capteurs reproduisent correctement les variabilités spatiales et permettent d'identifier les zones et les périodes les plus polluées.
 - o **Il n'est pas recommandé d'utiliser ces systèmes-capteurs pour une évaluation réglementaire, compte-tenu de leur tendance à sous-estimer les niveaux à proximité du trafic routier.**
 - o **Pour les capteurs en mobilité**, les nombreuses données de qualité de l'air relevées durant la campagne de mesures permettent d'évaluer globalement la hiérarchie des axes en termes de qualité de l'air
- La technologie de mesure du dioxyde d'azote est moins mature que celle des PM, sans correction unique pour tous les systèmes capteurs utilisés dans cette expérimentation.
- L'intégration des données d'un grand nombre de systèmes-capteurs dont 500 en mobilité et mesurant sur des pas de temps très courts pour aboutir à des cartographies urbaines haute résolution constituait un défi technique. **Les développements menés lors de ce projet sur ces différentes pistes n'ont pas permis d'aboutir à cette succession optimale de traitements de données, mais ont ouvert des perspectives intéressantes.** Les travaux menés pour la reconstruction rapide de cartographies fine-échelle ayant un sens physique via les données des stations de référence ou des données de systèmes-capteurs ont été notamment utilisés ultérieurement pour le développement de la méta-modélisation du modèle urbain fine-échelle d'Airparif Cartes temps réel. Ils ont également montré la capacité de la méthodologie étudiée dans ce projet à intégrer de nombreuses données de mesures, qui pourraient trouver une application pour l'amélioration des cartographies à fine échelle en fonction de l'amélioration de la justesse des systèmes-capteurs.

ENQUETE DE PERCEPTION DES FRANCILIENS

1. Dispositif mis en place

Dans le cadre de ce volet du projet, une enquête de perception de la qualité de l'air auprès des Franciliens visait à recueillir leurs ressentis sur l'air qu'ils respirent.

Au démarrage du projet, cette enquête devait être menée exclusivement aux domiciles des franciliens ainsi qu'au sein de certains bureaux de Poste. Le contexte sanitaire lié à l'épidémie de Covid-19 a obligé l'équipe projet à repousser la mise en œuvre de l'enquête terrain. Afin de ne pas être dépendant du contexte sanitaire, il a été décidé en octobre 2020 de réaliser l'enquête en ligne via une plateforme de participation citoyenne. L'amélioration du contexte sanitaire en juin 2021 a permis la sollicitation de 1 100 franciliens lors d'une enquête à domicile.

2. Résultats de l'enquête

2500 personnes enquêtées étaient visées en début de projet. Seules 694 réponses de franciliens ont pu être recueillies (446 ont répondu en ligne et 248 franciliens ont souhaité répondre en présentiel). D'après la société Cap collectif qui a mis en place la consultation et malgré le peu de réponses reçues par

rapport au nombre de franciliens, ce chiffre de 694 participants au sondage correspond aux standards des consultations et permet l'interprétation des résultats.

Parmi les répondants, l'enquête a majoritairement rassemblé des parisiens (29,5%), de la catégorie socio-professionnelle (CSP) « Cadre et professions intellectuelles supérieures » (53,4%), entre 36 et 55 ans (42%).

Une grande majorité des répondants affirment être concernés par la question de la pollution de l'air depuis longtemps. Il semble donc que la crise sanitaire vécue depuis 2020 ne soit pas la raison de cette perception.

Les différents modes de transport utilisés au quotidien sont assez équilibrés entre les répondants. Les transports en commun sont utilisés régulièrement par plus de 28 % des répondants et les modes actifs, vélo et marche par plus de 43 % d'entre eux dont 28 % pour le vélo. La voiture thermique est utilisée par 25 % des répondants.

Les Yvelines et l'Essonne sont les départements dans lesquels la voiture est le mode de déplacement le plus utilisé au quotidien. Les usagers du vélo et de la trottinette sont particulièrement présents à Paris ; mais quasiment absents en Seine et Marne ou en Essonne.

Sur les 277 participants ayant répondu être des utilisateurs réguliers de véhicules motorisés, 80 % ont déclaré « être prêts » ou « songer » à modifier leur mode de déplacement principal. Les réponses des 635 répondants à la question « qu'est-ce qui vous inciterait à changer votre mode de transport pour réduire la pollution de l'air » (plusieurs réponses possibles) les plus nombreuses ont été précisées ci-après. Le développement des transports en commun (297 répondants) est l'incitation au changement de mode de déplacement la plus sollicitée, notamment à Paris et chez les 26-35 ans. La deuxième est la réalisation de pistes cyclables et de stationnements vélo sécurisés (289 répondants). L'aide financière à l'achat d'un véhicule électrique recueille 279 réponses.

Il est à noter que 255 répondants affirment avoir déjà modifié leur mode de déplacement ou avoir changé leur véhicule. Ils affirment utiliser régulièrement les transports en commun (36 %), la marche (36 %), le vélo ou la trottinette (23 %). Les utilisateurs de véhicules électriques sont moins nombreux.

3. Perceptions et niveaux réels

La préoccupation des franciliens à la Qualité de l'Air a été évaluée par la question « La pollution de l'air est-il un sujet qui vous préoccupe ? ». Disposant des informations concernant la commune d'habitation du répondant (nom et code INSEE), les réponses à cette question ont pu être agrégées à l'échelle régionale, départementale et communale.

A l'échelle régionale, 75 % des répondants au sondage ont répondu être préoccupés par la pollution de l'air (« Oui j'y suis attachés »). Globalement, la quasi-totalité des répondants (plus de 95 %) sont plus ou moins préoccupés par la pollution de l'air (« un peu » ou « Oui, j'y suis attaché »). Environ 1/3 des répondants habitent à Paris, 1/3 en Petite Couronne (départements 92, 93 et 94) et 1/3 en Grande Couronne (départements 77, 78, 91 et 95). La préoccupation à la pollution de l'air est plus forte en se rapprochant du cœur dense de l'agglomération parisienne.

Ces résultats ont été croisés aux cartographies régionales et départementales des niveaux moyens de dioxyde d'azote (NO₂) en 2019 (représentative de la situation pré COVID-19). La part des répondants qui ne sont pas préoccupés par la qualité de l'air représente pour chaque département moins de 10 % des répondants.

Les départements de Paris (75), Seine-Saint-Denis (93), Hauts-de-Seine (92), Val-de-Marne (94), Yvelines (78) et de l'Essonne (91) montrent une préoccupation forte vis-à-vis de la pollution de l'air pour environ 70 % des répondants ou plus. Les répondants habitant au sein du département de Seine-et-Marne (77),

semblent moins préoccupés par la pollution de l'air (réponses « Oui, j'y suis attaché » inférieur à 60 %). Il est à noter que la majorité des répondants pour l'Essonne et les Yvelines proviennent de la zone la plus dense de ces départements, ce qui rend les comparaisons délicates.

Pour Paris (75), une forte majorité de la population sondée est préoccupée par ce sujet (84 %) et cela dans chaque arrondissement, en accord avec des niveaux de dioxyde d'azote qui peuvent être proches voire supérieurs à la valeur limite en moyenne annuelle sur l'ensemble du territoire en 2019. Pour les autres départements, la population préoccupée par la pollution de l'air habite globalement au sein de communes traversées par des axes de circulations majeurs sur lesquels les teneurs de dioxyde d'azote en moyenne annuelles sont relativement fortes sur le territoire, voire qui sont en dépassement de la valeur limite sur certains axes.

Cet exercice de croisement de données qualité de l'air et de la réponse de franciliens comporte des limites. La première concerne la notion de « préoccupation » : est-ce une préoccupation personnelle, relative à des proches ou bien d'ordre général ? Est-ce une préoccupation quotidienne ? La deuxième limite concerne l'analyse des résultats communaux. En effet, le faible nombre de répondants par commune (notamment pour les communes hors Paris pour lesquelles le nombre de répondants est inférieur à 10) et l'absence de localisation plus précise (quartier ou adresse) permettent difficilement de retranscrire fidèlement le lien entre la perception des répondants et leurs niveaux d'exposition.

SIGNALEMENTS D'ÉVÉNEMENTS IMPACTANT LA QUALITÉ DE L'AIR

L'objectif de ce volet de l'étude « Mesures et perception » était de permettre à chaque Francilien de signaler des anomalies et de connaître le ressenti des habitants sur la pollution en temps réel via l'application Signal'Air, développée par l'ensemble des AASQA (Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air). Cet outil Signal'Air n'a malheureusement pas eu le succès escompté auprès du public francilien lors de cette expérimentation malgré une communication active sur l'outil opérée par La Région Ile-de-France, Airparif, La Poste et sa filiale Geoptis.

Bien que la question de la qualité de l'air soit un sujet de plus en plus préoccupant pour les franciliens, et que l'intérêt porté aux communications d'Airparif sur ce sujet soit de plus en plus important, l'émergence d'une communauté engagée sur le signalement d'événements impactant la qualité de l'air semble difficilement atteignable rapidement. En revanche l'utilisation de l'outil Signal'Air, sur un domaine particulier avec des spécificités environnementales, comporte un intérêt pour les associations, entreprises, riverains avoisinants et peut apporter rapidement des résultats concrets sur l'amélioration de la qualité de l'air. En effet, l'outil permettrait d'objectiver certaines nuisances environnementales et de fluidifier la communication entre les différentes parties prenantes.

Ce type de collaboration a pu être menée dans le passé dans le cadre d'une étude réalisée sur le port de Bonneuil-sur-Marne, la deuxième plateforme multimodale francilienne. Airparif a mis à disposition du public une plateforme de recensement participatif en ligne des odeurs de mai 2016 à fin octobre 2017 pour caractériser la fréquence et l'intensité perçue des odeurs en fonction des signalements postés par les utilisateurs géo-référencés. Cette démarche s'est effectuée en partenariat avec HAROPA – Ports de Paris et les entreprises implantées sur le port de Bonneuil-sur-Marne. Ainsi, le recensement des odeurs au sein et autour de la zone portuaire a permis de récolter un total de 423 signalements sur un an et demi avec une participation de 115 personnes.

Un autre exemple d'utilisation pourrait être celui de la surveillance des chantiers, générateurs d'envolées de poussière, ou le suivi d'activités générant des poussières ou favorisant leur remise en suspension, telles que le stockage de matériaux pulvérulents et leur manutention.

INTRODUCTION

Airparif met en œuvre un dispositif de surveillance et d'information basé sur la complémentarité de différents outils (réseau de stations de mesure, inventaire des émissions, outils de modélisation, campagnes spécifiques de mesure) qui permet de délivrer des cartographies rue par rue, heure par heure, sur l'ensemble de la région et pour les polluants critiques, d'apporter un diagnostic, d'évaluer l'impact de politiques publiques et d'informer les franciliens sur la pollution actuelle et les enjeux émergents.

A la faveur du développement de la miniaturisation des équipements et de la démocratisation de l'Internet des objets, de nombreuses solutions technologiques miniaturisées sont aujourd'hui disponibles dans le domaine de la mesure de la qualité de l'air, sous la forme de systèmes-capteurs. Le projet « Mesures et Perceptions » a été lancé afin de mener une expérimentation de grande ampleur avec ce type d'équipement. Cette expérimentation, portant sur l'ensemble de l'Ile-de-France, avait deux objectifs principaux :

- Réaliser des mesures expérimentales dans le flux de circulation et étudier leurs utilisations potentielles pour renforcer les connaissances sur les niveaux de pollution au cœur du trafic
- Mieux connaître les perceptions des Franciliens sur la qualité de l'air, les croiser avec les mesures de terrain et recueillir leurs attentes.

Ce projet, intégralement financé par la Région Île-de-France à hauteur de 1,7 million d'euros, a été piloté par AIRLAB, la plateforme d'innovation d'Airparif et de ses partenaires. Après une procédure d'appel d'offres à laquelle 7 consortiums ont concouru, le groupement porté par la société Geoptis – filiale du groupe La Poste – a été désigné lauréat du projet par Airparif. Le groupement réunit La Poste, sa filiale Geoptis et 42 Factory, concepteur des systèmes-capteurs AtmoTrack.

600 systèmes-capteurs, dont 500 embarqués sur les flottes de véhicules du groupe La Poste et 100 en positions fixes sur ses bâtiments pour calibrer les instruments de mesure, ont permis, sur une durée d'un an et demi, de caractériser la qualité de l'air en Ile-de-France d'une façon complémentaire et innovante au dispositif de référence mis en place par Airparif. Les systèmes-capteurs AtmoTrack ont équipé une flotte de véhicules déjà opérationnelle (vélos, Véhicules légers, utilitaires et poids lourds), évoluant dans différents environnements caractéristiques : tunnels, routes en zone rurale, autoroutes urbaines, grands boulevards urbains... ainsi que différentes zones géographiques : cœur dense de l'agglomération, zone périurbaine et zone rurale.

D'une ampleur inédite en termes de nombre de capteurs, de variété de polluants mesurés et de surface territoriale, l'expérimentation « Mesures et Perceptions » représentait de nombreux défis :

- Défis logistiques pour le choix des emplacements, l'installation des systèmes-capteurs par Geoptis et la vérification métrologique des systèmes-capteurs avant installation
- Défis de gestion des données, avec le développement d'une base pour récupérer, stocker, visualiser et assurer un suivi du bon fonctionnement en temps réel.
- Défis d'évaluation des performances des données délivrées par les systèmes-capteurs et de calibration au regard des méthodes de référence.
- Défis d'interprétation des données, notamment sur leur intégration des données au dispositif de surveillance déjà existant. Ces informations ont notamment permis de travailler sur leur intégration dans les cartographies de la pollution de l'air avec un focus spécifique sur les niveaux de pollution dans le flux de circulation.

L'approche innovante du projet Mesures et Perceptions reposait également sur le croisement des cartographies produites par Airparif avec la perception que se font les Franciliens de la qualité de l'air.

C'est dans cette perspective que des dizaines de facteurs ont été formés pour recueillir le ressenti des Franciliens sur l'air qu'ils respirent au travers d'un questionnaire coproduit par Airparif et la Région. Dans le même souci d'associer les citoyens à cette vaste opération, un troisième volet a consisté en la mise en œuvre d'une application mobile permettant aux citoyens de signaler des anomalies ayant un impact sur l'air et leur environnement. Une application a été développée et lancée pour recenser les attentes, les perceptions et les signalements des citoyens. Son déploiement s'est appuyé notamment sur des interlocuteurs de proximité pour aller à la rencontre des franciliens et mieux comprendre leur perception de la qualité de l'air, des mesures mises en œuvre et identifier les accompagnements nécessaires pour faciliter les changements de comportements nocifs à la qualité de l'air.

VOLET 1

EXPERIMENTATION DE SYSTÈMES-CAPTEURS FIXES ET MOBILES

1. PRESENTATION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

L'expérimentation Mesures et Perception a nécessité la mise en place d'un dispositif de mesure de grande ampleur et de protocoles spécifiques, décrits dans ce chapitre.

1.1. Polluants mesurés

La majorité des systèmes-capteurs étant installés sur une flotte de véhicules, les polluants d'intérêt retenus sont les polluants représentatifs des émissions du trafic routier :

- Le dioxyde d'azote (NO_2), dont la source principale est le trafic routier.
- Les particules en suspension PM_{10} et $\text{PM}_{2.5}$, particules dont le diamètre est inférieur respectivement à $10\text{ }\mu\text{m}$ et $2,5\text{ }\mu\text{m}$, c'est-à-dire les particules inhalables, dont le trafic routier est également une source d'émission.
- L'ammoniac (NH_3) est également d'un grand intérêt, étant un précurseur de particules secondaires. Le trafic routier en est l'une des sources. Ce projet était une opportunité pour expérimenter la mesure de ce polluant à l'échelle du territoire francilien, les capteurs équipés de cellules NO_2 étant aussi équipés de cellules NH_3 .

Le dioxyde d'azote ainsi que les particules PM_{10} et $\text{PM}_{2.5}$ sont de plus réglementés dans l'air ambiant.

1.2. Moyens de mesure

1.2.1. Définitions

Ce paragraphe vise à définir le vocabulaire spécifique lié aux systèmes-capteurs qui sera utilisé dans la suite du rapport. Les définitions sont issues du document AFNOR « FD X43-121 version publiée – Atmosphères ambiantes – capteurs pour la qualité de l'air – Concepts relatifs à l'utilisation de dispositifs de type » en date du 3 janvier 2022.

Système-capteur : matériel intégrant au moins un capteur (ou un élément sensible) et un logiciel pour détecter une quantité et/ou mesurer une concentration de composés (gaz, aérosol) sur un pas de temps prédéfini.

Il convient qu'un système-capteur comporte les éléments (ou fonctions constitutives) de base suivants, à adapter selon l'usage :

- le dispositif de prélèvement ;
- la partie nécessaire à l'alimentation ;
- le traitement des données ;
- le stockage de données ;
- la transmission et/ou la visualisation ou la restitution de données
- le boîtier.

Un système-capteur peut être disponible sur le marché et prêt à l'usage ou à monter par soi-même. Les informations métrologiques (ex : caractéristiques de performance) peuvent indépendamment porter sur le système-capteur, sur les capteurs constitutifs ou sur les éléments sensibles pris séparément. Les termes suivants sont également utilisés pour désigner un système-capteur : « système mono/multi capteur(s) », « mini station », « pod », « sensor node », « module ».

Élément sensible : Dispositif transformant une grandeur physique observée en une grandeur utilisable de type signal électrique dont l'amplitude est relative notamment à la concentration d'un polluant recherché dans l'air.

Le terme « sensor » est généralement utilisé pour désigner l'élément sensible. Le terme « élément sensible » peut parfois être abusivement remplacé par le terme « capteur ». Dans le cas des particules, l'élément sensible consiste généralement en un assemblage plus élaboré (optique, électronique, prélèvement...).

Le Tableau 2 résume les différentes technologies utilisées actuellement pour les éléments sensibles. Il est à noter que les technologies « Semi-conducteur » et « Cellule électrochimique » permettent également la mesure du NH_3 .

Technologie	Composés mesurés	Avantages	Inconvénients	Niveau de coût
Semi-conducteur commerciaux	NO_2 , O_3 , CO , COV, COVT	<ul style="list-style-type: none"> — Bonne sensibilité (du $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au mg/m^3). — Temps de réponse assez rapide (de quelques secondes à quelques minutes). 	<ul style="list-style-type: none"> — Généralement non sélectif. — Interférence avec le CO_2 pour la mesure des COVT et inversement. — Instabilité à long terme. — Consommation électrique liée à l'élément chauffant 	€
Cellule électrochimique	NO , NO_2 , SO_2 , O_3 , CO	<ul style="list-style-type: none"> — Bonne sensibilité (du $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au mg/m^3). — Consommation électrique faible. 	<ul style="list-style-type: none"> — Forte interférence des conditions ambiantes comme l'humidité et/ou la température. — Sensibles aux interférents chimiques dans une même famille d'espèce (e.g. interférence de l'O_3 sur la mesure du NO_2). — Temps de réponse plutôt lent (de plusieurs minutes à plusieurs dizaines de minutes). — Durée de vie directement liée à la concentration d'exposition. 	€€
Mesure optique	CO , CO_2	<ul style="list-style-type: none"> — Bonne sensibilité (de quelques centaines à quelques milliers de ppm). — Temps de réponse rapide (de 20 à 120 s). — Faible dérive dans le temps. 	<ul style="list-style-type: none"> — Sensibles aux conditions ambiantes (température, humidité et pression). 	€€
PID (détecteur à photo-ionisation)	<ul style="list-style-type: none"> — Composés inorganiques (NH_3, Cl_2) — COV (liste variable en fonction de la lampe UV qui couramment est une lampe à 10,6 eV) 	<ul style="list-style-type: none"> — Bonne sensibilité (jusqu'au mg/m^3 voire la dizaine de $\mu\text{g}/\text{m}^3$). — Temps de réponse rapide (quelques secondes). 	<ul style="list-style-type: none"> — Non sélectif : détection simultanée des composés organiques dont l'énergie d'ionisation est inférieure à l'énergie de la lampe UV. — Sensibilité aux fortes humidités ($\text{HR} > 70\%$). — Dérive rapide de la réponse dans le temps. 	€€€
Comptage optique	Particules	<ul style="list-style-type: none"> — Bonne sensibilité (jusqu'au $\mu\text{g}/\text{m}^3$). — Temps de réponse rapide (de l'ordre de la seconde). — Capable de donner une information pour les fractions particulières principales : PM_{10}, $\text{PM}_{2,5}$ et/ou PM_{10}. 	<ul style="list-style-type: none"> — Conversion des concentrations en nombre de particules en concentrations massiques basée sur un modèle théorique. — Signal dépendant de plusieurs paramètres (forme de la particule, couleur, densité, humidité, index de réfraction...). 	€€€

Tableau 2 : récapitulatif des différentes technologies utilisées actuellement pour les éléments sensibles (source : AFNOR – FD X43-121 version publiée – Atmosphères ambiantes – capteurs pour la qualité de l'air – Concepts relatifs à l'utilisation de dispositifs de type »

Capteur : Dispositif équipé d'au moins un élément sensible servant à la prise d'informations relatives à la grandeur à mesurer ainsi que d'un système électronique pour l'acquisition et le traitement de données. La partie « transmission et visualisation de données » relève généralement du système-capteur. La notion d'acquisition n'intègre pas la fonction d'enregistrement de données.

1.2.2. Matériels

L'expérimentation a été réalisée avec des systèmes-capteurs AtmoTrack. Ce choix a été réalisé par le groupement retenu pour ce marché. Ces capteurs ont été évalués par deux organismes indépendants sur la mesure des particules fines, le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA) et Airparif (Challenge microcapteurs de l'année 2018, 2019, 2021).

L'ensemble des 600 systèmes-capteurs est équipé de comptage optique permettant la mesure des particules PM₁₀, PM_{2,5} et PM₁. Ces capteurs optiques comptent et classent les particules en fonction de leur taille, de 0,3 à 10 µm. Un ventilateur à débit constant vient forcer le flux d'air entrant dans le capteur, ce qui permet d'obtenir la concentration en nombre de particules. La concentration massique en µg/m³ est obtenue en appliquant une formule qui associe chaque taille de particule à une densité. L'exploitation des données PM₁ n'a pas été réalisée au sein de cette étude.

Les concentrations en NO₂ et NH₃ sont mesurées à l'aide d'une technologie miniaturisée (MEMS) à base de silicium poreux (semi-conducteur). Certains de ces systèmes-capteurs disposaient également de cellules électrochimiques en complément du semi-conducteur. Les deux éléments sensibles sont donc présents dans ces systèmes-capteurs. Ces deux technologies ont des temps de réponse et de stabilisation différents. Pour les capteurs disposant de la cellule électrochimique, le fabricant préconise une utilisation uniquement en position fixe du fait de la sensibilité de ces cellules aux vibrations. Ces recommandations ont été appliquées dans le cadre de la campagne de mesure.

Pour le NO₂, 200 systèmes-capteurs en mobilité sont équipés de semi-conducteurs plus adaptés à la résolution temporelle de 10 secondes utilisée dans cette étude. 95 systèmes-capteurs sur les 100 sites fixes sont également équipés de semi-conducteur et d'une cellule électrochimique.

En ce qui concerne la mesure de NH₃, 25 systèmes-capteurs en mobilité et 5 systèmes-capteurs fixes, équipés de cellules électrochimiques, avaient été prévus. Comme précisé par la suite, seuls les systèmes-capteurs équipés de semi-conducteurs et évalués en laboratoire seront étudiés sur la période de la campagne de mesures.

	en mobilité	fixe
Nombre de capteur	500	100
mesure de particules (PM ₁₀ et PM _{2,5})	500	100
mesure de NO ₂ (semi-conducteur)	200	100
mesure de NO ₂ (cellule électrochimique)		95
mesure de NH ₃ (semi-conducteur)	200	95
mesure de NH ₃ (cellule électrochimique)	20	5

Tableau 3 : récapitulatif des systèmes-capteurs mis en œuvre dans le cadre de l'expérimentation

1.3. Plan d'échantillonnage / dispositif mis en place

Compte-tenu des objectifs du projet, le plan d'échantillonnage a été construit de façon à :

- réaliser des mesures sur le plus grand nombre de communes franciliennes, à la fois au cœur de l'agglomération et en zone rurale,
- mesurer sur la plage horaire la plus large possible.

500 véhicules de La Poste et 100 sites de La Poste et stations d'Airparif ont été instrumentés de systèmes-capteurs AtmoTrack.

1.3.1. Sites fixes

100 systèmes-capteurs ont été placés sur des sites fixes implantés, en grande majorité, sur des établissements appartenant à La Poste (voir exemple Figure 1). Ces sites ont été choisis essentiellement dans la zone d'influence des axes routiers, et répartis de manière homogène sur la région Île-de-France (Figure 2). La recherche des sites de mesures a été réalisée conjointement avec les équipes du groupement Geoptis.



Figure 1 : système-capteur AtmoTrack implanté sur le bureau de poste de Mitry-Mory (encadré en rouge) - source : La Poste

Douze sites fixes ont été instrumentés sur des stations de mesure d'AIRPARIF, équipées de mesures de référence de PM_{10} et/ou $PM_{2.5}$ ou de NO_2 , selon le site. Ces stations sont implantées soit loin de l'influence directe des sources de pollution, pour évaluer le niveau de pollution général d'une zone (typologie fond), soit à proximité immédiate du trafic routier (typologie trafic).

Ces sites permettent une comparaison des résultats fournis par les systèmes-capteurs avec ceux des analyseurs de référence. Pour ce faire, les sites équipés de capteurs ont été classés selon ces deux typologies. Néanmoins, il est à noter que certains sites de La Poste proches des axes routiers ont été classés « Trafic » mais ne respectent pas le critère d'implantation européen très exigeant (implantation à 10 mètres de la première voie de circulation).

Certains de ces sites de référence ont été instrumentés avec deux systèmes-capteurs permettant d'obtenir des éléments de répétabilité et reproductibilité pour l'exploitation des résultats.

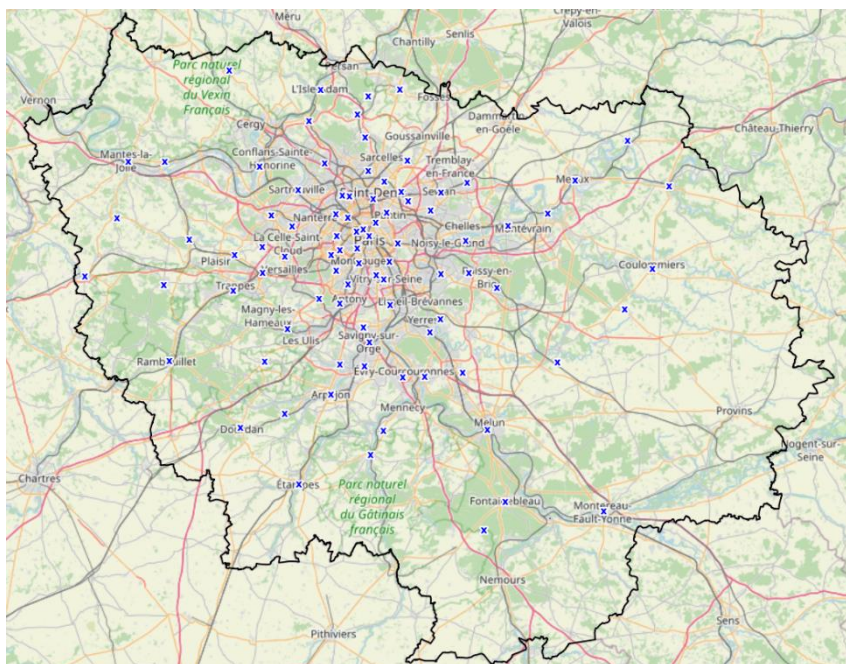


Figure 2 : répartition des 100 sites équipés de capteurs fixes

1.3.2. Sites en mobilité

La majeure partie des systèmes-capteurs (500) ont été implantés en mobilité, sur des véhicules du groupe La Poste. Les sites en mobilité (tournées postales) ont été répartis de la façon suivante : 40 vélos de la société Stuart, 20 camions permettant la répartition distribution du courrier sur les différents sites de tri de La Poste et 440 véhicules effectuant les tournées de distribution.

Un taxi de la société HYPE, fonctionnant à l'Hydrogène, a également été instrumenté.

La Figure 3 présente un véhicule de La Poste équipé avec un système-capteur AtmoTrack.



Figure 3 : Illustration d'un système-capteur AtmoTrack installé sur un véhicule de La Poste – source : La Poste

1.3.3. Couverture spatiale et temporelle

Ce dispositif a permis de couvrir l'ensemble de la région francilienne, seules 2 communes n'ont fait l'objet d'aucun relevé de qualité de l'air. La Figure 4 présente le nombre de relevés de données de qualité de l'air par commune ainsi que le nombre de relevés (données brutes reçues toutes les 15 secondes) par commune et par unité de surface sur la période de la campagne de mesures.

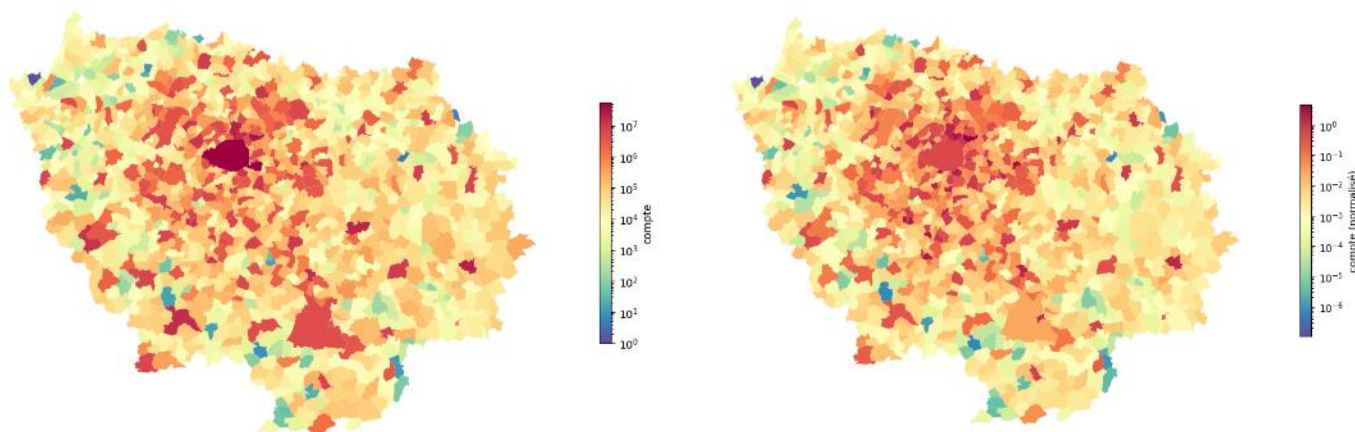


Figure 4 : Décomptes de relevés de données brutes de qualité de l'air par commune sur la campagne de mesures

La Figure 4 montre un nombre de relevés de données brutes de qualité de l'air plus important dans le cœur dense de l'agglomération parisienne. En s'éloignant de l'agglomération parisienne, le nombre de relevés diminue. Cette répartition est corrélée avec la densité de la population francilienne.

Cette expérimentation inédite s'est déroulée de fin juin 2020, date de l'installation du premier capteur, au 31 décembre 2021. Le dernier système-capteur a été installé début février 2021.

Les capteurs installés sur les sites fixes fournissent des données de qualité de l'air sur l'ensemble des heures de la journée. La couverture temporelle des données mesurées en mobilité dépend des heures de distribution du courrier. Les camions roulent de 5h à 20h et les véhicules utilisés pour les tournées de distribution sont en service sur un créneau horaire du matin ou de l'après-midi ou parfois les deux (8h à 14h et 14h à 16h). Les véhicules de la Poste réalisent des trajets récurrents.

1.3.4. Dispositif de surveillance d'Airparif comme référence

L'expérimentation s'appuie également sur le dispositif d'Airparif pour valider et corriger les données issues de systèmes-capteurs.

Le dispositif de surveillance est dimensionné pour assurer la surveillance réglementaire et pour fournir des niveaux de polluants atmosphériques en tout point de l'Île-de-France. Il comprend :

- un réseau de plus de 50 stations permanentes, réparties sur l'ensemble du territoire francilien, équipées de mesures de référence, conformément aux exigences réglementaires
- un système de modélisation (Cartes temps réel) permettant de décrire les niveaux horaires de polluants en situation de fond (éloignée des sources de pollution), en proximité au trafic routier et dans sa zone d'influence. Les cartographies produites couvrent l'Île-de-France, et sont la somme des sorties de la chaîne de modélisation de la pollution de fond d'Airparif (Plateforme Esmeralda opérée en partenariat avec d'autres AASQA), et des sorties d'ADMS-Urban, modélisant l'impact du trafic routier en Île-de-France. ADMS-Urban est un modèle anglais de dispersion urbaine développé par une unité de recherche de Cambridge (CERC) et commercialisé en France par la société Numtech. Ce modèle est, entre autres, alimenté par le modèle de trafic Heaven, qui estime en temps quasi réel l'état du trafic dans la région à travers un réseau routier modélisé. C'est une estimation robuste qui s'appuie notamment sur les données de boucles de comptage (nombre de véhicules étant passés à tel brin pendant telle heure) dont on dispose en temps quasi réel. A partir des sorties du modèle de trafic, les émissions du trafic routier sur chaque axe modélisé sont calculées en fonction des données du parc roulant (pourcentage de deux roues, voitures particulières, ...) et du parc technologique (type de motorisation) ainsi que les facteurs d'émissions issues de la base

COPERT. Ce système intègre également les observations issues des stations de référence d'Airparif, permettant de corriger le modèle brut par une technique dite d'assimilation de données. Le système produit donc une donnée de référence sur laquelle s'appuyer afin de valider les données issues des systèmes-capteurs. Les cartographies sont réalisées à fines échelle (12.5 mètres dans Paris, 25 m en petite couronne et 50 m en grande couronne). Les systèmes de modélisation utilisés à Airparif prennent en compte l'ensemble des sources d'émissions recensées en Ile-de-France. C'est ce système « Cartes temps réel », qui après assimilation des données des stations automatiques de référence d'Airparif, alimente les cartographies fine-échelle des bilans annuels.

- Ces outils sont validés régulièrement par des campagnes de mesure complémentaires menées dans certains secteurs géographiques pour affiner la précision des cartographies. Ils sont également validés une fois par an en confrontant les données produites aux stations de référence. Cette validation se fait station par station en s'assurant de ne pas prendre en compte les données mesurées lors de l'assimilation ce qui biaiserait le résultat.

1.4. Vérification métrologique des capteurs avant déploiement sur le terrain

Avant la mise en œuvre de la campagne de mesure, une vérification métrologique du matériel de mesure a été effectuée. Ces essais avaient pour objectif de faire un constat à réception sur la qualité de fabrication du lot et l'homogénéité des caractéristiques métrologiques et d'identifier les capteurs défectueux. Vu le nombre de capteurs à mettre en œuvre, la vérification exhaustive de tous les capteurs n'était pas envisageable. Il a donc été décidé de tester un échantillon de capteurs par lot de fabrication. Cinq lots de capteurs ont été testés de juin à décembre 2020. Cela représente 84 capteurs, soit 14 % du parc mis en œuvre.

Les systèmes-capteurs ont été testés sur des stations fixes. Les données mesurées ont été comparées aux valeurs de références observées sur 2 stations du réseau de mesures d'Airparif situées à proximité du trafic routier : BP EST, en bordure du boulevard périphérique au niveau de la Porte Dorée et Porte d'Auteuil (AUT), en bordure du Boulevard Périphérique Porte d'Auteuil.

Les systèmes-capteurs ont également été testés en mobilité dans l'air ambiant et comparés aux observations issues des appareils de références installés dans un véhicule d'Airparif. Cet exercice a été réalisé principalement sur les axes majeurs de la région, à savoir le Boulevard Périphérique et l'autoroute A86.



Figure 5 : Capteurs AtmoTrack sur la station BP Est



Figure 6 : Niveaux de pollution observés lors de la vérification métrologique des capteurs en mobilité

Un important travail, conjoint entre 42 Factory, développeur des systèmes-capteurs et Airparif, a permis d'améliorer la performance des systèmes-capteurs de lots en lots, au fur et à mesure des tests. L'appui technique apporté par Airparif a consisté à :

- comparer les concentrations mesurées aux sites de références d'Airparif,
- rechercher des corrélations permettant d'expliquer les écarts constatés,
- apporter un contrôle de cohérence sur les niveaux obtenus et attendus,
- détecter des dysfonctionnements dans l'algorithme de calcul des concentrations de polluants et paramètres GPS.

Les lots 1 et 2 ont permis d'identifier les pistes d'amélioration des algorithmes. Lors de la recette du lot 3, des améliorations des algorithmes ont été réalisées par Atmotrack, qui ont permis d'améliorer la reproductibilité des systèmes-capteurs, notamment en particules. Ces travaux ont porté leurs fruits et les améliorations se sont stabilisées sur les lots 4 et 5. Le rapport des tests métrologiques du lot 3 et la synthèse des différents rapports de recettage sont disponibles en Annexe

A l'issue du recettage, les algorithmes de calcul des concentrations de polluants permettent d'atteindre des performances conformes à l'état de l'art attendu en termes de reproductibilité pour les différents paramètres testés. La justesse reste la grande difficulté de ce type de matériel. Les corrélations sont satisfaisantes voire très satisfaisantes dans certains cas mais globalement nécessitent des corrections pour que les résultats puissent être comparés directement à des mesures de référence. **Les paragraphes suivants détaillent les performances par polluants.**

1.4.1. Dioxyde d'azote

Le Tableau 4 présente le bilan pour les essais des systèmes-capteurs NO₂ en situation statique à proximité du trafic sur BP-EST et AUT et en mobilité.

	SITES FIXES		MOBILITE	
	NO ₂ semi-conducteur	NO ₂ EC (électrochimique)	NO ₂ semi-conducteur	NO ₂ EC (électrochimique)
A1	0%	0%	0%	-
A2	94%	88%	82%	-
A3	0%	0%	0%	-
A4	6%	12%	18%	-

A1 : résultat entièrement satisfaisant (justesse et reproductibilité)

A2 : bonne reproductibilité avec les autres capteurs, mais justesse insuffisante

A3 : justesse satisfaisante mais mauvaise reproductibilité avec les autres capteurs

A4 : mauvaise reproductibilité avec les autres capteurs et justesse insuffisante → inutilisable.

Tableau 4 : Bilan des tests métrologiques pour les systèmes-capteurs NO₂.

Pour le NO₂ en site fixe, l'évaluation initiale montre des performances assez proches entre les capteurs semi-conducteurs et électrochimiques (Tableau 4). Aucun système-capteur ne présente de résultats satisfaisants en termes de justesse. Environ 90 % des systèmes-capteurs testés sont cohérents avec l'état de l'art en termes de reproductibilité. La reproductibilité sur le NO₂ est cependant moins bonne que pour les PM₁₀. Le nombre d'éléments sensibles testés en dysfonctionnement et inutilisables (A4) est respectivement de 6 % pour les semi-conducteurs et 12 % pour les cellules électrochimiques. Les travaux menés pour améliorer la justesse des capteurs ne se sont pas avérés concluants pour les systèmes-capteurs équipés de semi-conducteurs. **Pour la suite du projet, seuls les systèmes capteurs dotés de cellules électrochimiques sont étudiés pour les sites fixes. En mobilité, dans des conditions de concentrations plus élevées, les capteurs NO₂ semi-conducteurs s'avèrent mieux adaptés.** Néanmoins, le pourcentage de systèmes-capteurs en dysfonctionnement est plus important qu'en situation fixe.

Après modification des algorithmes, les performances sont conformes à l'état de l'art. Néanmoins, la limite de ce type de matériel demeure la justesse des concentrations, qui peuvent présenter des écarts importants par rapport à la mesure de référence.

1.4.2. Particules PM₁₀ et PM_{2.5}

Les tests des premiers lots ont mis en évidence une forte sous-estimation des données issues des systèmes-capteurs par rapport aux mesures de référence en PM₁₀ et PM_{2.5}. L'élément sensible des systèmes-capteurs de particules est basé sur une mesure optique qui permet de compter le nombre de particules et d'en déduire, à l'aide d'algorithme, la masse de ces dernières en µg/m³. La technologie des analyseurs de référence en particules se base sur une pesée. Ce résultat dépend de nombreux facteurs. Les facteurs d'influence de la mesure optique, tels que la nature des particules, la température et l'humidité sont connus et précisés dans le Tableau 2 (source AFNOR).

Avant d'exploiter les données issues des systèmes-capteurs, il est donc important d'analyser le comportement de ces derniers vis-à-vis des mesures réalisées via les appareils de référence. **Cette phase importante du projet permet de juger de la justesse des systèmes-capteurs et d'identifier les paramètres de sensibilité qui influent sur leur comportement.**

Le Tableau 5 présente le bilan pour les essais des systèmes-capteurs PM₁₀ et PM_{2.5} en situation statique sur BP-EST et AUT et en mobilité.

	SITES FIXES		MOBILITE	
	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}
A1	35%	43%	79%	56%
A2	64%	53%	13%	33%
A3	1%	1%	3%	0%
A4	0%	3%	5%	10%

A1 : résultat entièrement satisfaisant (justesse et reproductibilité)

A2 : bonne reproductibilité avec les autres capteurs, mais justesse insuffisante

A3 : justesse satisfaisante mais mauvaise reproductibilité avec les autres capteurs

A4 : mauvaise reproductibilité avec les autres capteurs et justesse insuffisante.

Tableau 5 : Bilan des tests métrologiques pour les systèmes-capteurs PM₁₀.

Pour les PM₁₀ et les PM_{2.5}, les systèmes-capteurs présentent de meilleures performances que pour le NO₂ : respectivement 99 % et 96% des systèmes-capteurs testés sont cohérents à l'état de l'art en termes de reproductibilité (A1), dont 35 et 43 % sont également cohérents en termes de justesse. Seuls 3% des éléments sensibles testés sont en dysfonctionnement pour les PM_{2.5}.

En mobilité, les scores de performance sont améliorés par rapport à la situation fixe : 79 et 56 % des systèmes-capteurs sont à la fois reproductibles et cohérents en termes de justesse. Deux hypothèses sont possibles :

- une différence de pertinence des algorithmes FIXE et MOBILE
- la nature des particules plus homogène au sein du trafic.

En revanche, le pourcentage d'éléments sensibles en dysfonctionnement est légèrement plus important respectivement 5 et 10 % pour les PM₁₀ et PM_{2.5}.

La très bonne reproductibilité des systèmes-capteurs Particules permet d'envisager des corrections pour améliorer la justesse.

1.4.3. Ammoniac NH₃

Pour les analyseurs de NH₃, l'ensemble des systèmes-capteurs équipés d'élément sensible NO₂ - NH₃ ont été installés sur le site de BP Est, en parallèle d'un analyseur de référence de mesure automatique de NH₃. Les essais ont montré que les capteurs NH₃ électrochimiques ne donnaient pas satisfaction. La limite de quantification du NH₃ par les systèmes-capteurs, annoncée à 5 ppm par Atmotrack, est largement supérieure aux niveaux rencontrés en air ambiant. Les systèmes-capteurs NH₃ semi-conducteurs ont, quant à eux, donné satisfaction durant les essais en laboratoire. Ces capteurs n'ont pas été testés en mobilité.

Les résultats des mesures réalisées lors de la vérification montrent une bonne variabilité temporelle entre les systèmes-capteurs, soit une reproductibilité encourageante. Cependant, les écarts de mesure par rapport à la référence montrent un défaut de justesse pour l'ensemble des systèmes-capteurs. L'ensemble des résultats issus de la recette est présenté en annexe 2.

1.5. Récupération des données / mise en base

Comme indiqué au paragraphe 1.2.2, un système-capteur (fixe ou mobile) peut être composé de plusieurs éléments sensibles permettant de mesurer les particules PM₁₀, PM_{2.5} et PM₁, le NO₂ et le NH₃. Pour chaque polluant, l'élément sensible associé permet de mesurer la concentration en moyenne 10 secondes. Le système-capteur est également équipé de capteurs permettant de mesurer la température ambiante et le taux d'humidité. Il est également pourvu d'un GPS permettant d'indiquer ses coordonnées géographiques. Ceci permet d'évaluer la vitesse du véhicule équipé d'un système-capteur. Le Tableau 2 résume les différents paramètres mesurés par les systèmes-capteurs.

Paramètres	Paramètres	Unités
NO ₂	Concentration en masse	ppb
PM ₁	Concentration en masse	µg/m ³
PM _{2.5}	Concentration en masse	µg/m ³
PM ₁₀	Concentration en masse	µg/m ³
NH ₃	Concentration en masse	ppb
T	Température	°C
HYG	Hygrométrie	%HR
LIT03	Concentration en nombre de particules > 300 nm	Pt/dm ³
LIT05	Concentration en nombre de particules > 500 nm	Pt/dm ³
LIT10	Concentration en nombre de particules > 1 µm	Pt/dm ³
LIT25	Concentration en nombre de particules > 2.5 µm	Pt/dm ³
LIT50	Concentration en nombre de particules > 5 µm	Pt/dm ³
LIT100	Concentration en nombre de particules > 10 µm	Pt/dm ³
Long/Lat	Coordonnées géographiques	Lambert 93

Pt/cm³ : nombre de particules par cm³
Tableau 6 : Paramètres mesurés lors de la campagne.

L'utilisation des 600 systèmes-capteurs sur plus d'un an a donc généré un très grand nombre de données qu'il a fallu stocker. Ce stockage a été fait dans une base PostgreSQL.

A cette base, pour les besoins de traitements et d'analyses, ont été ajoutés :

- les concentrations corrigées (cf. paragraphe 2.2. Correction des données) ;
- la vitesse des véhicules corrigée (afin de tenir compte de la perte du signal GPS dans les tunnels par exemple) ;
- le type de capteur (fixe ou mobile) ;
- la qualité de la donnée (cf. paragraphe 2.3. Validation des données corrigées).

Dans le cadre du projet M&P, AtmoTrack (42 Factory) a développé un script permettant de corriger les positions GPS des véhicules en mouvement. Ce script, exécuté en post-traitement sur les données et utilisant les données d'Open Street Map pour calculer les trajets et données de route, est constitué de 2 étapes principales :

- Un algorithme de map matching permettant de corriger les erreurs de positionnement dues à l'imprécision du GPS. Ce processus raccorde chaque position à la route la plus proche, tout en gardant une cohérence par rapport au trajet du véhicule.
- La récupération des positions GPS lorsqu'un capteur était incapable de lire le GPS, par exemple sous un tunnel. En se basant sur les positions, vitesse et orientation du véhicule avant et après la perte de signal puis en combinant ces informations au trajet prévisionnel, l'algorithme est capable de retrouver la géolocalisation des données mesurées.

L'intégration des données dans la base est réalisée une fois par jour, à partir de fichiers au format csv déposés par 42 Factory sur le site FTP d'Airparif (Figure 7). Un ensemble d'outils a été développé afin de permettre une intégration la plus rapide possible, avec une intégration d'une journée complète en 20 mn environ.

Quelques statistiques sur la base de données à la fin du projet sont présentées dans le tableau 3 :

Nombre de lignes de la table « mesures »	~ 13,8 milliards
Nombre de lignes de la table « positions_appareils »	~ 985 millions
Taille de la base de données sur disque (données + indexes)	2,5 To

Tableau 7 : Statistiques sur la base de données de la campagne de mesures

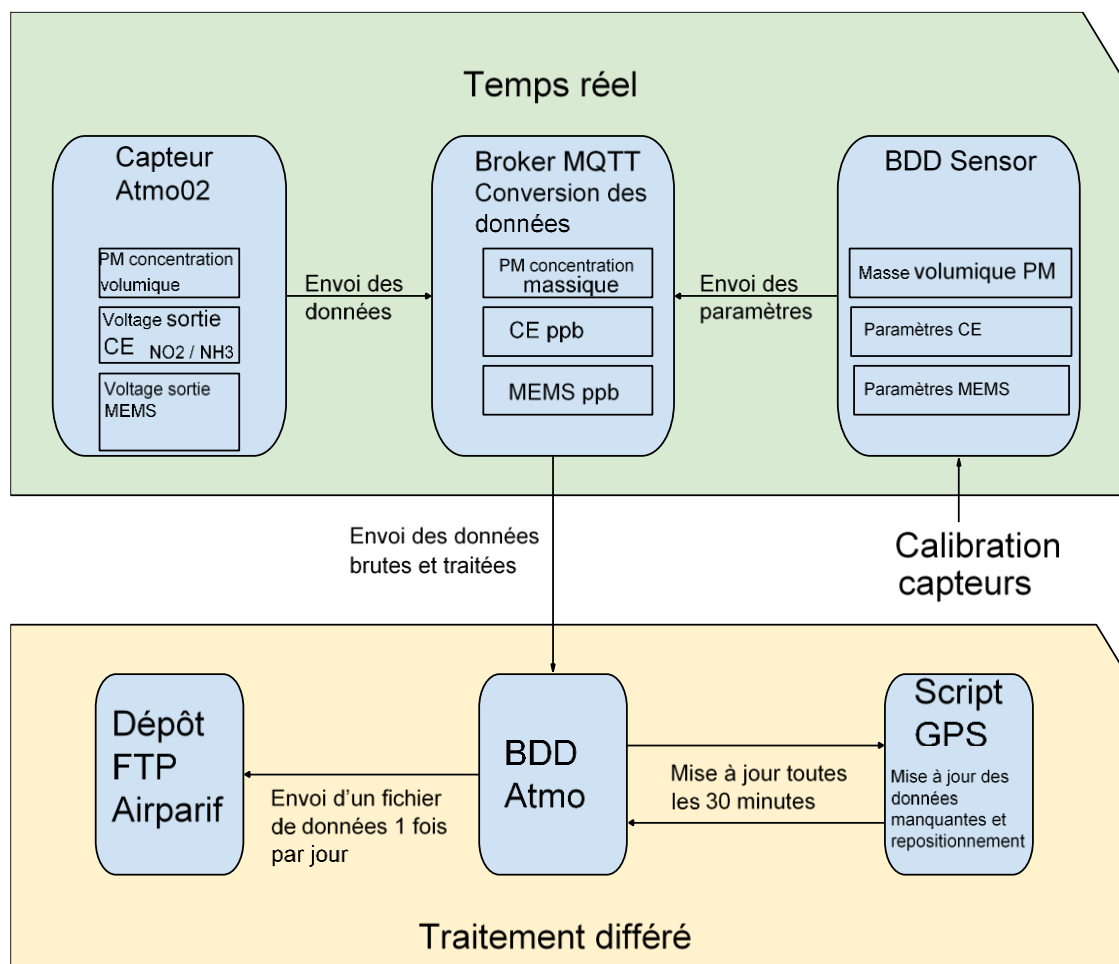


Figure 7 : Trajet des données observées de la mesure à la base de données d'Airparif

L'utilisation des données issues de la base PostgreSQL peut engendrer des temps de calculs conséquents. Un système de fichiers compressés et structurés de manière à pouvoir récupérer les données très rapidement a été mis en place. Plus d'explications sont disponibles en annexe 3.

1.6. Suivi des mesures

Les systèmes-capteurs AtmoTrack sont conçus pour être contrôlés à distance et limiter ainsi les interventions sur site. Le fabricant des capteurs garantit une mesure embarquée fiable sur des véhicules jusqu'à une vitesse de 80 km/h et en fixe sur des bâtiments ou du mobilier urbain. Les systèmes-capteurs peuvent être exposés sans risque aux conditions météorologiques (neige, pluie, canicule, rafales de vent).

Le suivi du bon fonctionnement de 600 systèmes-capteurs a nécessité une organisation spécifique. Ainsi, un point hebdomadaire a été réalisé entre les équipes de 42 Factory et les équipes d'Airparif pendant la période de la campagne de mesures. Le suivi de l'état des systèmes-capteurs est réalisé via un tableau de bord qui a été spécifiquement développé dans le cadre de ce projet. Il permet de s'assurer de la mise à disposition des données en base. Un contrôle du bon fonctionnement de chaque paramètre (PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂ et NH₃) est également indispensable. En effet, chaque capteur est équipé d'éléments sensibles indépendants (un élément sensible par polluant). Toute anomalie relevée est retransmise par Airparif à 42 Factory pour intervention si nécessaire. Seuls les dysfonctionnements ont été détectés à cette étape, tels que la perte de transmission, un élément sensible hors service, une mesure

aberrante, etc. Chaque mois, un rapport du nombre de données disponibles par système-capteur a été transmis par 42 Factory.

Airparif a souhaité automatiser le plus possible cette étape de suivi des capteurs qui peut être très consommatrice de temps. Un tableau de bord a permis ainsi de fournir un rapport synthétique sur l'état des données en base en regardant pour chaque capteur le temps écoulé depuis les dernières données transmises. Un rapport pouvait être édité afin de faciliter la communication avec 42 Factory. Le tableau de bord fournit également une information sur la qualité des données par l'intermédiaire de critères statistiques. C'est ainsi que les mesures issues des capteurs ont été comparées aux données issues des stations de référence ainsi qu'aux plateformes de modélisation de la qualité de l'air développées par Airparif. L'interface permet également de comparer les capteurs entre eux lorsqu'ils sont proches les uns des autres, ce qui permet de détecter rapidement les capteurs défectueux.

Enfin, le tableau de bord permet de visualiser l'évolution temporelle des niveaux enregistrés par les capteurs ainsi que d'afficher les concentrations mesurées sur un fond de carte. Il est également possible d'invalider manuellement les données de capteurs erronées.

2. PRE-TRAITEMENT DES DONNEES ISSUES DES SYSTEMES-CAPTEURS

2.1. Correction des données

2.1.1. Dioxyde d'azote (NO₂)

Les essais métrologiques réalisés, avant déploiement, sur les capteurs NO₂ fixes et mobiles (paragraphe 1.4.1) ont mis en évidence des difficultés à reproduire les niveaux mesurés par les appareils de référence.

Ces résultats sont confirmés une fois les systèmes-capteurs installés sur les stations pour la campagne de mesure, comme l'illustre la Figure 8.

Les données issues des systèmes-capteurs installés sur les stations de mesure surestiment fortement les niveaux observés par rapport aux appareils de référence. De plus, les systèmes-capteurs peinent à reproduire l'évolution temporelle des niveaux de NO₂.

De plus, le comportement des capteurs NO₂ est très différent d'un appareil à l'autre. La comparaison de chaque capteur au site de référence est un cas particulier. En effet, comme le montre la Figure 8, les écarts observés entre le système-capteur et la référence ne surviennent pas au même moment sur l'ensemble des sites et des changements de comportement apparaissent au cours du temps sur le même site pour un même capteur. En particulier, une augmentation des niveaux mesurés est observée à compter de fin mai 2021 sur le système-capteur de Paris 1^{er} Les Halles, et non sur celui d'Hausmann. **Cet exemple montre que les systèmes-capteurs NO₂ ne sont pas reproductibles, ce qui est généralisé sur les autres sites. De ce fait, une correction unique pour tous les sites n'est pas envisageable. Une correction spécifique pour chaque système-capteur devrait être étudiée.** Cela demanderait néanmoins un travail spécifique capteur par capteur qui n'a pu être réalisé dans le cadre de ce projet compte-tenu du nombre de capteurs déployés et de l'ampleur de l'expérimentation.

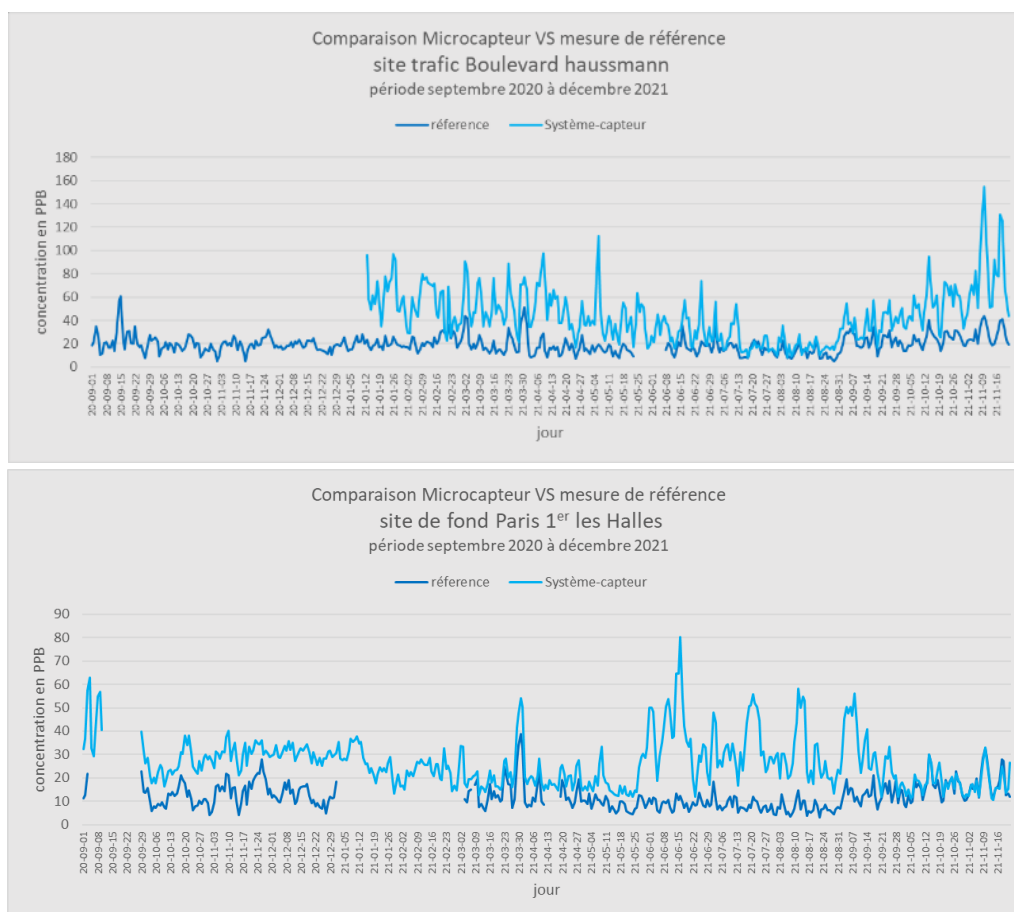


Figure 8 : Exemple d'évolution des concentrations en NO₂ enregistrées par les capteurs installés sur deux sites fixes de référence – septembre 2020 à décembre 2021

Sur l'ensemble des systèmes-capteurs utilisés en mobilité, 200 capteurs ont été instrumentés en mesure NO₂. En mobilité, seule la cellule NO₂ semi-conducteur est utilisée et présentée ici.

Dès les premières semaines, **les données retransmises par les capteurs ne correspondent pas aux niveaux habituellement rencontrés. Les valeurs de concentrations sont trop élevées et très éloignées des données relevées lors de la phase de vérification métrologique des capteurs.** Une recherche plus poussée sur la technologie du système-capteur a montré que le traitement du signal électrique de sortie de la cellule de mesure est non seulement dépendant du mode d'utilisation (mobile ou fixe) mais aussi de la durée d'utilisation du capteur. En effet, en mode mobilité, pour des durées allant jusqu'à la semaine (période générale de test), le comportement du système-capteur répond aux caractéristiques techniques du fournisseur, au-delà celui-ci répond à un autre mode de transformation du signal.

2.1.2. Particules PM₁₀ et PM_{2.5}

Les tests métrologiques ont mis en évidence des problèmes de justesse pour les systèmes-capteurs de particules, ne permettant pas l'exploitation directe des résultats bruts. Néanmoins, la bonne reproductibilité de ces capteurs permet d'envisager une correction permettant de réajuster la valeur de concentration, afin de mieux reproduire les mesures de référence (paragraphe 1.4.2.). Ces résultats sont confirmés sur les résultats mesurés une fois les systèmes-capteurs installés sur les stations de mesure de référence.

A titre d'exemple, la Figure 9 présente les concentrations horaires en PM₁₀ mesurées à l'aide de la méthode de référence et les systèmes-capteurs sur le premier trimestre 2021, en situation de fond, sur le site de Vitry-sur-Seine ainsi qu'en situation proche du trafic routier, sur le site de RN2-Pantin.

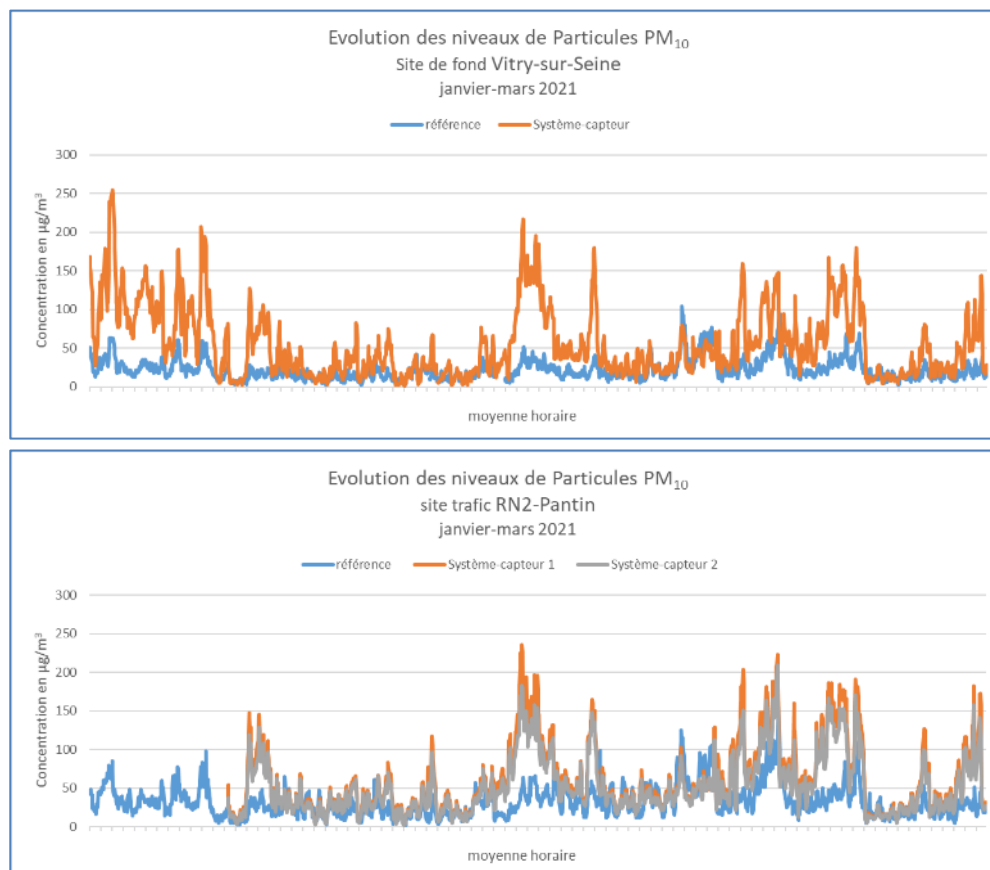


Figure 9 : Évolution des niveaux de PM₁₀ relevés sur deux sites à l'aide de la méthode de référence en bleu et des systèmes-capteurs en orange et gris - 1^{er} trimestre 2021

Compte-tenu de la longueur de l'expérimentation et des performances des systèmes-capteurs, il était nécessaire de disposer rapidement d'une correction en temps réel, de manière à pouvoir exploiter les données au fil de l'eau. **De ce fait, la correction a été développée sur la base des premiers mois de données de l'expérimentation, sans attendre d'avoir le jeu de données complet.**

Deux pistes ont été explorées :

- Une correction des résultats des systèmes-capteurs à l'aide des sites de référence : « méthode des ratios ». Cette méthode est basée sur le fait que les capteurs sont reproductibles, c'est-à-dire qu'ils se comportent de la même façon au même moment. Sur l'ensemble de la campagne de mesure, plusieurs sites de référence (sites de fond, sites trafic) ont été équipés d'un système-capteur. Pour chaque site de référence, un ratio horaire entre la mesure de référence et la donnée capteur est calculé, puis la médiane horaire des ratios de l'ensemble des sites de référence est déterminée. Ce ratio médian est ensuite appliqué aux concentrations horaires de chaque système-capteur.
- Une correction des résultats à l'aide des mesures de référence associées aux conditions de température et d'humidité mesurées par le capteur (« méthode XGBoost ») (eXtreme Gradient Boosting) en régression relie des variables explicatives à une variable cible en ajustant un modèle de régression basé sur des arbres de décision. Les arbres de décision divisent le jeu de données en sous-ensembles et prédisent les valeurs de la variable cible en fonction des variables explicatives. Ils sont ensuite combinés pour améliorer la précision des prédictions, ce qui permet de modéliser des relations complexes entre les variables explicatives et la variable cible (Chen et al., 2016).

Suite à une série de test des deux méthodes, le choix s'est porté sur une correction de l'ensemble des données PM₁₀ et PM_{2,5} fixes et en mobilité avec la « méthode des ratios ». Cette dernière reproduit mieux les données de référence que « la méthode XGBoost ». L'application d'une même correction sur l'ensemble des capteurs de particules est possible car les systèmes-capteurs sont reproductibles et les corrections s'appuient sur des mesures de référence effectuées en simultanée. La suite du paragraphe montre les résultats apportés par la méthode de correction des « ratios ». Les résultats obtenus avec « la méthode XGBoost » sont disponibles en annexe 5.

Le Tableau 8 indique les scores statistiques obtenus avec la méthode des « ratios » du 1^{er} février au 30 avril. Ces scores sont comparés à ceux obtenus sans correction. Les scores ont été obtenus en comparant, sur une station donnée, les valeurs de concentrations en PM₁₀ relevées par le capteur et celles relevées par l'analyseur de référence installé sur la station de mesure d'Airparif.

Le biais exprime l'écart moyen entre la mesure de référence et le niveau relevé par le capteur. L'amplitude moyenne de la sur/sous-estimation du système-capteur est ainsi estimée. **La RMSE** fournit une indication par rapport à la dispersion ou la variabilité des mesures du capteur au regard des valeurs de référence. Etant donné que les erreurs importantes sont fortement pondérées (au carré) dans la formulation de la RMSE, les écarts importants entre la mesure de référence et les données du système-capteur auront plus de poids. **La corrélation** permet d'estimer la capacité du système-capteur à reproduire l'évolution temporelle des concentrations mesurées par le capteur de référence.

Cette analyse est effectuée sur des stations de différentes typologies à savoir des stations de fond (Gennevilliers, Paris 1^{er} Les Halles et Vitry-sur-Seine) et des stations situées à proximité d'axe de circulation (Boulevard Périphérique Est, Autoroute A1 à Saint-Denis, RN2 et RN6). Il est à noter que pour cette analyse, ces scores n'ont pas été évalués en « validation croisée », à savoir la non prise en compte de la station évaluée dans la méthode de correction.

		Paris 1 ^{er} Les Halles	Vitry-sur- Seine	Gennevilliers	BP Est	A1	RN2	RN6
Biais (µg/m³)	Brut	27.3	27.1	34.3	15.0	52.8	31.8	23.0
	Corrigé	0.3	1.7	7.3	-11.2	6.3	-1.8	-2.8
RMSE (µg/m³)	Brut	39.7	41.4	46.3	32.7	66.8	48.9	38.7
	Corrigé	6.0	6.3	10.2	14.6	16.5	9.8	9.4
Corr	Brut	0.66	0.59	0.66	0.53	0.55	0.56	0.58
	Corrigé	0.92	0.92	0.93	0.87	0.81	0.89	0.85

Tableau 8 : Scores obtenus en PM₁₀ avant et après application de la correction des « ratios » sur les capteurs installés sur les stations de référence d'Airparif du 1^{er} février au 30 avril 2021

La méthode de correction améliore les scores par rapport aux données brutes. Des biais subsistent néanmoins après correction, avec une tendance moyenne à une légère surestimation sur les sites de fond et une sous-estimation des sites trafic.

Pour illustration, la Figure 10 présente l'évolution horaire des niveaux de PM₁₀ de l'année 2021 relevés par le capteur avant et après correction, au regard de ceux de l'appareil de mesures de référence installé sur la station de Paris 1^{er} Les Halles.

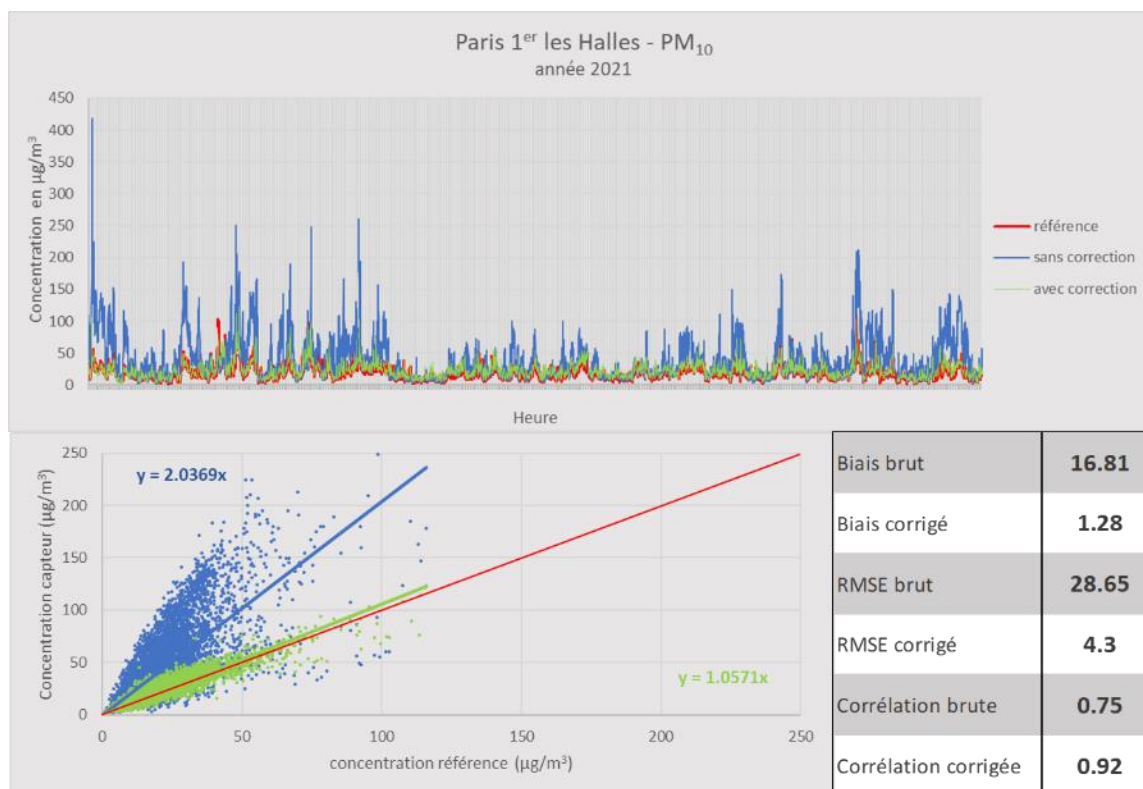


Figure 10 : Evolution temporelle des niveaux horaires en PM₁₀ du système-capteur situé à la station de Paris 1^{er} les Halles (sortie brute, courbe en bleu / sortie corrigée courbe en vert) et des niveaux mesurés par l'appareil de référence (courbe en rouge) ainsi que les statistiques associées pour l'année 2021.

La Figure 10 montre néanmoins que les données corrigées ont tendance à sous-estimer les valeurs les plus fortes, et que des écarts importants peuvent demeurer dans les valeurs inférieures à 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, qui sont les valeurs les plus fréquemment enregistrées.

De la même manière, le Tableau 9 présente les scores statistiques pour les particules PM_{2.5}. La correction améliore l'ensemble des scores.

		Paris 1 ^{er} Les Halles	Vitry-sur-Seine	Gennevilliers	BP Est	A1	RN6
Biais ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Brut	11.2	11.9	16.6	7.9	26.4	12.4
	Corrigé	- 1.6	- 0.29	3.0	- 5.1	8.3	0.2
RMSE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Brut	15.3	17.6	22.0	14.1	31.7	18.0
	Corrigé	3.4	3.6	4.8	6.8	13.2	3.8
Corr	Brut	0.91	0.86	0.91	0.83	0.77	0.90
	Corrigé	0.96	0.92	0.94	0.89	0.72	0.92

Tableau 9 : Scores obtenus en PM_{2.5} avant et après application de la correction des « ratios » sur les capteurs installés sur les stations de référence d'Airparif du 1^{er} janvier au 31 décembre 2021

Comme pour les PM₁₀, le Tableau 8 montre que la correction améliore les résultats. **Le biais résiduel est très faible pour les stations de fond, il est plus variable pour les stations trafic.**

2.1.3. Ammoniac (NH₃)

Les tests métrologiques ont montré que les capteurs NH₃ présentait des écarts importants par rapport à la mesure. Ces résultats sont confirmés sur les données mesurées par les capteurs sur les stations de mesure d'Airparif.

La Figure 11 présente l'évolution des concentrations journalières en NH₃ enregistrées sur les sites de Paris 1^{er} les Halles (situation de fond) et BP-Est (à proximité du trafic routier) sur l'année 2021, par le système-capteur (en bleu) et par l'analyseur de référence (en rouge).

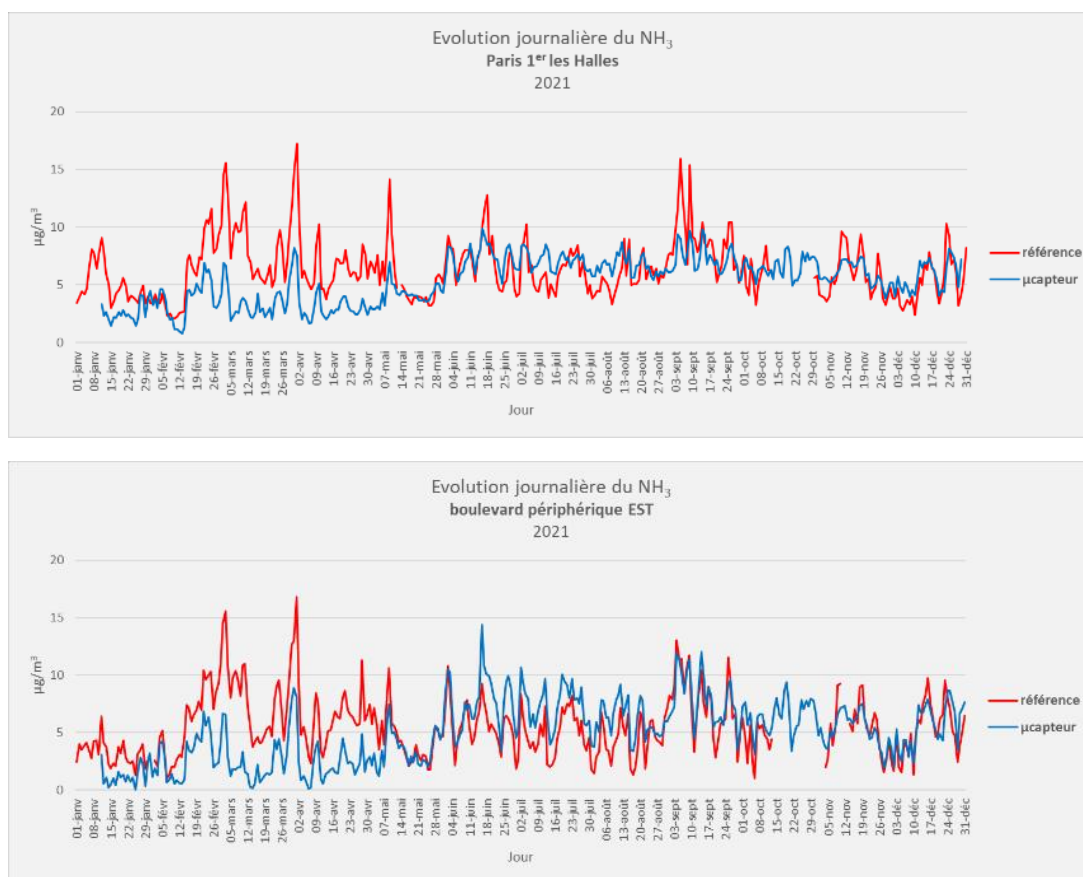


Figure 11 : Evolution journalière des niveaux d'ammoniac relevés à Paris Les Halles et sur le boulevard périphérique sur l'année 2021 (l'appareil de mesure de référence en rouge et l'élément sensible en bleu)

Sur le site de fond (Paris 1^{er} Les Halles), comme sur le site à proximité immédiate du trafic (BP Est), un écart parfois important (jusqu'à 3 fois plus sur le site trafic et jusqu'à 2 fois plus sur le site de fond) est constaté entre le système-capteur et la mesure de référence. Deux périodes de fonctionnement se distinguent : en début d'année (janvier-avril), les concentrations de référence sont supérieures à celles de l'élément sensible et, dès mi-mai jusqu'en fin d'année 2021, la tendance s'inverse. Une des explications possibles est que la mesure à l'aide d'un semi-conducteur peut être non sélective, c'est-à-dire que cette technologie peut mesurer d'autres polluants que le NH₃. Un impact des conditions météorologiques peut également influencer le bon fonctionnement du capteur. Ce changement de comportement a également été relevé sur les concentrations de NO₂ à la même période et sur l'ensemble des éléments sensibles.

La Figure 12 présente les profils moyens mensuels obtenus, en 2021, sur le site trafic de BP-Est.

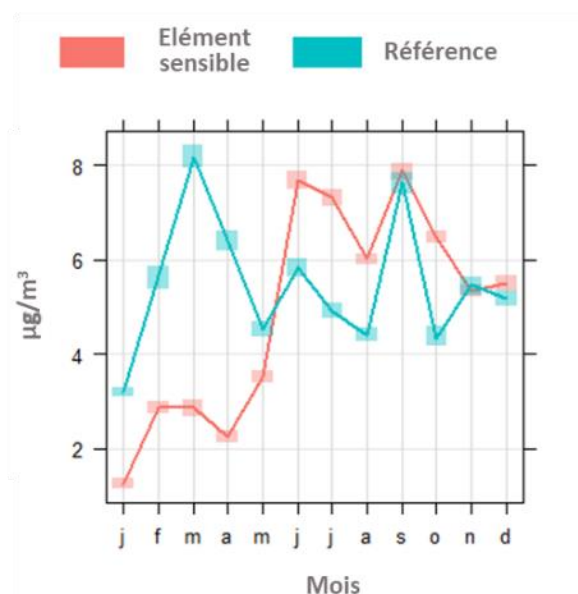


Figure 12 : Profil moyen mensuel des concentrations d'ammoniac relevées sur le site référence BP-Est via l'élément sensible et l'analyseur de référence sur l'année 2021 avec l'intervalle de confiance.

Ces graphiques illustrent d'une autre manière les problèmes de justesse importants identifiés précédemment, avec des écarts de concentration par rapport à la mesure de référence. Ces écarts ne sont pas constants, ils sont négatifs les quatre premiers mois et positifs les mois suivants, du fait du changement de comportement des capteurs à compter de la mi-mai.

Ces observations confirment que **les éléments sensibles NH₃ présentent des problèmes de justesse ne permettant pas d'utiliser les résultats bruts pour évaluer les concentrations en NH₃**. De plus, la stabilité de ligne de base au cours du temps est problématique pour des observations de longue durée.

2.2. Validation des données corrigées (PM₁₀/PM_{2.5})

Une fois les données corrigées, une phase de validation des données est obligatoire pour éliminer les potentielles données aberrantes et disposer d'une base de données de qualité de l'air cohérente techniquement et représentative de la zone géographique autour des sites de mesure. Ce travail, réalisé quotidiennement sur les données issues des stations de référence d'Airparif, se base sur un jugement expert tant sur le plan technique et métrologique que sur le plan comportemental et environnemental des concentrations relevées selon le type de station et de polluant, mais aussi selon la météorologie. Les causes de données invalides peuvent être de différentes natures : dysfonctionnement d'un appareil de mesure, évènement particulier engendrant des niveaux de polluants non représentatifs de la typologie du site de mesure (ex : panache de fumée lié à un feu autour d'une station de fond) ...

Dans le cadre de l'expérimentation, compte tenu du nombre conséquent de données à valider, un outil de validation semi-automatique des données issues des capteurs a été développé. Le cœur de cette méthodologie se base sur l'évaluation des niveaux enregistrés par les systèmes-capteurs fixes par comparaison aux données de référence (stations de mesure et données issues des « cartes temps réel »). Un travail important a été réalisé afin d'obtenir le meilleur compromis possible entre les critères de validation des données habituellement utilisés par Airparif et la nature des données étudiées ici (grand nombre de capteurs, disparité géographique importante, données mobiles et fixes...). Avec cet outil, une grande majorité du traitement des données est automatique, permettant de trier des grandes quantités de données dans un temps limité. L'expertise humaine affine ensuite la validation.

2.2.1. Objectifs de la validation

L'outil de validation permet, en s'appuyant sur des critères statistiques, de classer les données de capteurs en 3 classes :

- « Valide » : la donnée répond aux critères souhaités et peut être exploitée.
- « Invalide » : la donnée, au regard des critères de validité définis, n'est pas satisfaisante et ne doit pas être utilisée.
- « **Douteuse/à investiguer** » (ou « **warning** ») : un ou plusieurs critères définis ne sont pas complètement satisfaisants et une analyse supplémentaire humaine doit être réalisée. Suite à cette analyse supplémentaire, les données en « warning » ont vocation à être classées, au final, en « valide » ou en « invalide ».

2.2.2. Validation des données des systèmes-capteurs fixes

La partie « automatique » de la validation (étapes 1 à 4 décrites ci-dessous) est opérée toutes les semaines, et permet donc de classer les données horaires des 7 derniers jours. L'étape 5 est manuelle, a été réalisée une fois l'ensemble des données récoltées.

2.2.2.1. Etape 1 : Calcul du taux de disponibilité des données

Le premier filtre appliqué aux données mesurées est basé sur leur **taux de disponibilité, calculé sur des périodes de 7 jours consécutifs** :

- Si le taux de disponibilité horaire est supérieur à 75 % sur la période considérée, les données peuvent poursuivre le circuit de validation.
Ce taux de 75% correspond au taux réglementaire de disponibilité des données utilisé pour la validation des données de référence Airparif : par exemple une moyenne journalière est représentative, et donc valide, si au moins 75 % des données horaires de la journée sont disponibles.
- Si le taux de disponibilité horaire est supérieur à 50 % et inférieur à 75 % sur la période considérée, les données sont considérées en « warning » mais peuvent poursuivre le circuit de validation. Ce taux de 50% est un taux intermédiaire permettant une plus grande tolérance que celle utilisée pour les données de référence, de manière à explorer les données expérimentales tout en garantissant une représentativité relative des données mesurées.
- Si le taux de disponibilité horaire est inférieur à 50 % sur la période considérée, les données sont considérées « invalides » car insuffisantes pour être représentatives de l'environnement mesuré, et aucune autre analyse n'est réalisée.

2.2.2.2. Etape 2 : Calcul d'indicateurs statistiques

La deuxième étape consiste à calculer des indicateurs statistiques pour classer les systèmes-capteurs selon leur justesse et leur dynamique. Deux de ces indicateurs s'appuient sur les données horaires des « cartes temps réel » d'Airparif, de résolution 50 m, extraites aux emplacements des différents capteurs. Ce système de modélisation, alimenté par les stations de mesure, permet de fournir une donnée en tout point du domaine d'étude.

Pour chaque capteur, les indicateurs suivants sont calculés :

- **Le Z-score.** Il est calculé heure par heure et fournit donc un score par heure et par capteur. Le Z-score permet de quantifier l'écart de la mesure par rapport à la moyenne des mesures des autres capteurs et s'exprime en nombre d'écarts-types par rapport à cette moyenne. Ainsi, une mesure horaire dont l'écart à la moyenne est supérieur à 3 écarts-types (3σ) n'est généralement pas

représentative et doit être classée en "invalidé". Si cet écart est observé sur plusieurs heures, il doit être étudié plus finement pour juger de sa représentativité, il est alors classé « Warning ».

Le Z-score permet de mettre en évidence les valeurs aberrantes.

- **La corrélation avec la donnée de référence.** Elle est calculée sur la période de 7 jours et fournit donc un score par semaine et par capteur. **La corrélation permet de s'assurer que la dynamique du capteur est cohérente avec celle de la donnée de référence.**
- **La justesse**, via la comparaison avec la donnée de référence : une donnée est considérée juste si elle se situe dans l'intervalle suivant : $[0.5 \times \text{donnée de référence}, 1.5 \times \text{donnée de référence}]$. Elle est calculée heure par heure et fournit donc un score par heure et par capteur. Cet indicateur est appelé **intervalle CTR (Carte Temps Réel)** dans la suite. **Cet indicateur permet de contrôler l'exactitude des données délivrées par les systèmes-capteurs**, tout en laissant une tolérance importante par rapport aux données de référence, de manière à prendre en compte les incertitudes de mesure et de modélisation et permettre la mise en évidence d'éventuelles situations atypiques liées à des facteurs locaux.

Chaque indicateur statistique donne une information sur la qualité des données afin de les classer en 3 catégories : « valide », « warning » ou « invalide ». Le principe général est de ne disqualifier des données que dans le cas où la valeur de l'indicateur est trop pénalisante. Les critères utilisés pour établir cette classification sont décrits dans le tableau 9. Leur usage pour la validation des données des systèmes-capteurs est décrit dans l'étape 3.

	Valide	Warning	Invalide
Z-score	$< 3\sigma$	$> 3\sigma$ sur plusieurs heures consécutives	$> 3\sigma$ sur une seule heure
Corrélation	> 0.7	$0.5 < X < 0.7$	< 0.5
Intervalle Carte Temps Réel (CTR)	$0.5 \text{ CTR} < X < 1.5 \text{ CTR}$	$> 1.5 \text{ CTR}$ plusieurs heures consécutives Ou $< 1.5 \text{ CTR}$ plusieurs heures consécutives	$> 1.5 \text{ CTR}$ sur une seule heure Ou $< 1.5 \text{ CTR}$ sur une seule heure

Tableau 10 : Critère de qualification des données PM₁₀ et PM_{2.5}

2.2.2.3. Etape 3 : Croisement des indicateurs statistiques pour qualifier les données

Les critères définis pour le Z-score permettent d'invalider les données dites aberrantes ($Z\text{-score} > 3\sigma$). Les données classées « valide » ou « warning » par le Z-score sont ensuite qualifiées par le croisement des deux autres indicateurs (corrélation et intervalle CTR) selon les règles définies dans le tableau 10.

Corrélation/CTR	Valide	Warning	Invalide
Valide	Valide	Valide	Invalide
Warning	Valide	Warning	Invalide
Invalide	Invalide	Invalide	Invalide

Tableau 11 : Critère de validation des données PM₁₀ et PM_{2.5}

Le Tableau 11 présente l'ensemble des cas possibles de qualification des données. De manière générale, si un des deux indicateurs considère la donnée « invalide », elle est invalidée. Dans les autres cas, elle est classée « valide » si au moins l'un des deux indicateurs l'est. Ce choix a été effectué de manière à conserver le plus d'informations possible, même dans le cas où un des indicateurs n'est que moyennement satisfaisant. En effet, si une donnée n'est pas juste, elle peut néanmoins apporter une information sur la dynamique globale du capteur, et inversement. Quand les deux indicateurs classent

la donnée en « warning », la donnée est considérée « warning ». Ces données sont celles qui restent à classer après ces différentes étapes.

Le Tableau 12 présente les pourcentages de données qualifiées « valides », « invalides » et « warning » sur l'ensemble de l'année 2021, après l'étape 3 de validation automatique. Pour les PM₁₀ comme pour les PM_{2.5}, 7% des données restent en « warning » après cette étape. L'étape suivante (étape 4) fait un zoom sur ces données et permet d'en classer une grande partie en « valide » et « invalide ».

% de données	Valide	Warning	Invalide
PM ₁₀	77	7	16
PM _{2.5}	81	7	12

Tableau 12 : Pourcentage de données en « valide », « invalide » et « warning » suite à la troisième étape

2.2.2.4. Etape 4 : Post-traitement sur les données en « warning » après l'étape 3

Afin de qualifier les données identifiées comme « warning » après l'étape 3, une comparaison supplémentaire de ces données est effectuée. Elle consiste à comparer ces données aux mesures des stations de référence d'Airparif :

Une donnée horaire en « warning » est requalifiée en « valide » si :

- elle est inférieure au maximum horaire des stations de référence d'Airparif
- et elle est supérieure au minimum horaire des stations de référence Airparif.

Ce critère permet de conserver les données ayant une dynamique correcte (corrélation entre 0.5 et 0.7) mais dans des situations où les niveaux sont plus élevés que ceux estimés par la « Carte Temps Réel ». Ce choix a été effectué afin de potentiellement mettre en évidence des zones de fortes concentrations liées à des situations topographiques spécifiques ou à des émissions locales, dites « hot-spots », sur l'Ile-de-France.

Cette quatrième étape permet de diminuer le pourcentage de données en « warning » de 7 % à 1 %. Les 1 % de données restantes sont traitées manuellement dans la cinquième étape, faisant appel à un opérateur.

2.2.2.5. Etape 5 : Post-traitement manuel pour traiter les données en « warning » suite à l'étape 4

La cinquième étape de la validation s'attache à expertiser manuellement les données qualifiées en warning suite à l'étape 4. Pour cela, un outil a été développé par Airparif pour permettre à l'expert de visualiser les données des systèmes-capteurs selon leur qualité (valide, warning, invalide), de les comparer à d'autres données, notamment les stations de référence Airparif, puis de classer ces données en warning en données valides ou invalides. Celles-ci sont ensuite requalifiées dans la base de données du projet.

Cet outil propose plusieurs interfaces :

- La première permet de sélectionner le capteur, visualiser les données et le nombre d'entre elles qui sont à classer par l'expert.
- La seconde permet la visualisation des données sélectionnées, la mise en évidence des données en warning à classer et la validation de celles-ci. Cette validation s'enregistre directement dans la base de données.

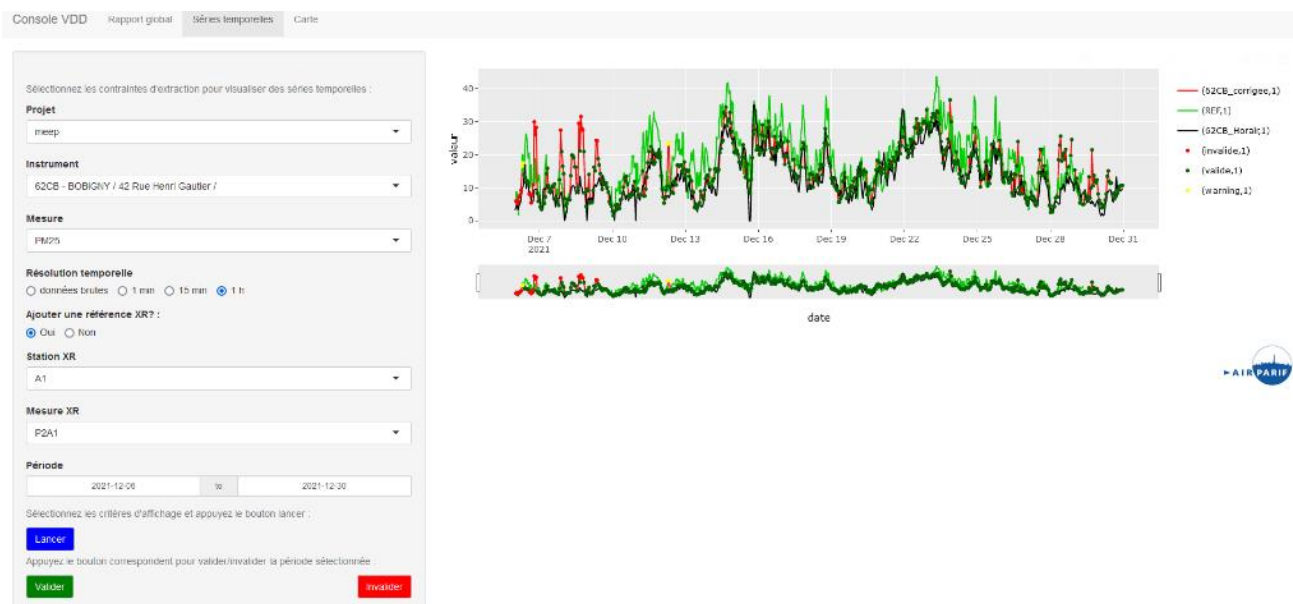


Figure 13 : Interface de l'outil développé par Airparif permettant de visualiser, comparer et classer les données issues des capteurs (onglet séries temporelles).

L'utilisation de la méthode décrite ci-dessus a permis de valider, d'abord automatiquement puis à l'aide d'un expert, l'ensemble des données PM10 et PM2.5 issues des systèmes-capteurs fixes et de les qualifier en « valide » ou en « invalide ». Seules les données « valides » sont utilisées dans les travaux d'analyse. Le Tableau 13 présente les pourcentages de données qualifiées « valides » ou « invalides ».

% de données	Valide	Invalide
PM ₁₀	83	17
PM _{2.5}	87	12

Tableau 13 : Pourcentage de données qualifiées « valides » et « invalides » sur l'ensemble de l'année 2021 – capteurs fixes

2.2.3. Validation automatique des données des systèmes- capteurs en mobilité

Les données issues des capteurs mobiles ont été validées par un outil entièrement automatique. La variabilité des concentrations au cœur du trafic routier étant plus importante que pour les capteurs fixes, situés à proximité du trafic, la validation a été conçue de manière à conserver le maximum d'informations.

Les données sont considérées valides si elles remplissent les deux critères suivants :

- 1) Données supérieures au minimum des mesures de référence Airparif sur l'ensemble de l'IDF
- 2) Données inférieures à 1000 µg/m³. Ce seuil, qui peut être atteint en donnée 10 secondes, correspond à la borne supérieure des gammes permises par les appareils de référence.

3. QUEL USAGE DU RESEAU EXPERIMENTAL DE SYSTEMES-CAPTEURS DANS UN DISPOSITIF DE SURVEILLANCE

L'expérimentation a montré que les données issues des systèmes-capteurs PM_{10} et $PM_{2.5}$ présentent des problèmes de justesse et doivent être corrigées avant de pouvoir être utilisées. Une correction basée sur le dispositif de surveillance d'Airparif permet d'améliorer la justesse des résultats fournis par les capteurs.

Compte-tenu de la longueur de l'expérimentation et des performances des systèmes-capteurs, il était nécessaire de disposer rapidement d'une correction en temps réel pour pouvoir exploiter les données au fil de l'eau. De ce fait, la correction a été construite sur la base des premiers mois de données de l'expérimentation, sur l'ensemble des stations de mesure du réseau Airparif. Une évaluation de la sensibilité de cette correction au nombre de stations utilisées a été réalisée sur le jeu de données complet. En effet, ce type de systèmes-capteurs peut être utilisé dans des zones n'ayant pas un dispositif de mesures de référence aussi dense qu'en Ile-de-France.

Même après correction, des écarts demeurent par rapport aux données fournies par les mesures de référence. Une analyse des données corrigées a été réalisée afin de voir les enseignements tirés en termes d'information sur la qualité de l'air en Ile-de-France au regard des connaissances actuelles sur la région dégagées avec le dispositif de surveillance d'Airparif. Une évaluation de la capacité des capteurs à reproduire les variabilités temporelles et spatiales a été réalisée. En particulier, le dispositif de surveillance de la qualité de l'air permet l'évaluation réglementaire de l'exposition chronique de la population à la pollution atmosphérique, sur la base d'indicateurs annuels, ainsi qu'une caractérisation de l'exposition à court-terme lors d'épisodes de pollution sur une base journalière. Ces indicateurs ont été calculés à partir des données corrigées et comparés à ceux du dispositif de surveillance francilien.

Enfin, ces systèmes-capteurs peuvent être utilisés en l'absence totale de dispositif de mesure notamment dans des pays émergents. **Les mêmes indicateurs ont ainsi été calculés sur les données brutes, afin d'évaluer le risque à utiliser les données non corrigées pour ce type d'évaluation réglementaire.**

3.1. Usage du réseau expérimental de systèmes-capteurs fixes dans des zones avec peu de stations de référence

3.1.1. Tests de sensibilité de la performance de correction au nombre de stations de référence

La méthode de correction des données PM_{10} et $PM_{2.5}$ déployée (« méthode des ratios », cf. paragraphe 2.2.2) mise en œuvre dans le cadre de ce projet repose sur la disponibilité de plusieurs stations permanentes de référence, où des mesures par systèmes-capteurs sont également mises en place. La sensibilité de la méthode au nombre de stations de référence disponibles est étudiée dans ce paragraphe, afin d'évaluer sa pertinence dans une zone dont le dispositif de surveillance serait restreint.

Plusieurs scénarios ont été évalués pour la correction des mesures en PM₁₀ :

- 1 seule station de fond disponible : ratios évalués à Paris 1er Les Halles à partir du système-capteur L7BV par rapport à la mesure de référence, pour corriger l'ensemble des système-capteurs (fond comme trafic)
- 2 stations disponibles : 1 station de fond (Paris 1er les Halles et système-capteur L7BV) pour corriger les système-capteurs installés en fond et une station trafic (choix parmi 6 stations) pour les système-capteurs installés à proximité à proximité du trafic routier
- 2 stations de fond disponibles : les ratios sont des moyennes entre les ratios obtenus sur Paris 1er les Halles et une 2^{ème} station de fond (choix parmi 4 stations)
- exploitation de l'ensemble des stations disponibles, pour calculer les ratios médians applicables aux systèmes-capteurs sans distinction de typologie (15 stations dont 7 de fond) (correction appliquée dans le cadre de l'expérimentation, voir paragraphe 2.2).

La performance de la correction est évaluée sur 17 systèmes-capteurs, installés au niveau de stations de référence, par le calcul des écarts quadratiques moyens et des coefficients de corrélation entre les données des systèmes-capteurs et les mesures de référence.

3.1.1.1. Ecart de performance de la correction sur les PM₁₀

La Figure 14 présente les écarts quadratiques moyens entre les données de référence et les données corrigées pour les scénarios '1 station', '2 stations (fond et trafic)' et 'toutes les stations disponibles'. A titre de comparaison, les écarts entre la mesure de référence et les données brutes des systèmes-capteurs sont également indiqués. Pour le scénario '2 stations (fond et trafic)', la valeur de la barre correspond au RMSE moyenné sur l'ensemble des corrections testées (i.e. avec en prenant alternativement chacune des 6 stations trafic comme référence) et la barre d'erreur donne la gamme de valeurs obtenues avec chaque correction individuellement.

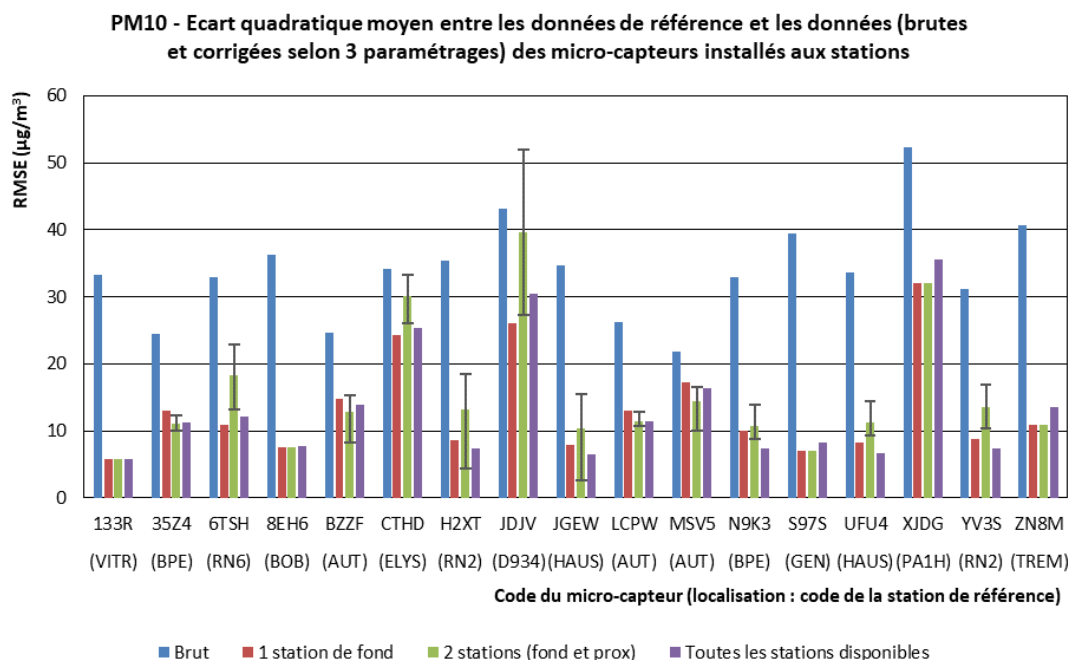


Figure 14 : PM₁₀ – écart quadratique moyen entre les données de référence et les données (brutes et corrigées selon 3 paramétrages) des systèmes-capteurs installés aux stations

La correction des données à l'aide d'une station de référence de fond permet de réduire significativement l'écart quadratique moyen. La correction des données de trafic par un ratio trafic (scénario '2 stations (fond et trafic)') produit des résultats variables d'un système-capteur à l'autre et d'une station trafic à l'autre (Figure 14). Des résultats similaires sont obtenus sur les corrélations (cf. Annexe 6.C)

Par rapport à la correction à 1 station, **la correction à 2 stations (fond et trafic)** dégrade la performance de la correction en moyenne (Tableau 14). Seul le choix de la station trafic RN2 apporte un léger gain : en moyenne 3 % sur le RMSE et 1 % sur la corrélation, sur les données des systèmes- capteur en site trafic. Les performances de la correction sont nettement dégradées avec le choix d'une autre station trafic. **Le possible gain sur le RMSE et la corrélation par l'ajout d'une référence trafic à la correction est associé à des incertitudes fortes liées au choix de la station de référence. Une station trafic sera représentative de son axe routier et les ratios calculés ne sont pas nécessairement transférables à d'autres localisations.**

Station trafic utilisée pour la correction	Différence de performance sur la RMSE	Différence de performance sur les corrélations
BPE	-49%	-7%
AUT	-29%	-2%
RN6	-13%	-9%
ELYS	-42%	-20%
RN2	3%	1%
HAUS	-3%	-10%

Tableau 14 : PM₁₀ – Ecart de performance de la correction sur les systèmes-capteurs trafic avec une correction par 2 stations (prox et fond) par rapport à une correction par 1 station

La correction avec 2 références de fond a également été évaluée par rapport à la correction à 1 seule référence de fond (Tableau 15). (Cf. résultats détaillés en Annexe 6.C). Il n'y a pas d'écart significatif de performance de la correction : entre -2% et 5% de gain sur le RMSE et -1 à 2% de gain sur les corrélations.

Station de fond utilisée pour la correction	Différence de performance sur la RMSE	Différence de performance sur les corrélations
VITRY-SUR-SEINE	5%	0%
BOBIGNY	2%	-1%
GENNEVILLIERS	2%	2%
TREMBLAY-EN-FRANCE	-2%	0%

Tableau 15 : PM₁₀ – Ecart de performance de la correction sur les systèmes-capteurs avec une correction par 2 stations de fond) par rapport à une correction par la station de Paris 1^{er} les Halles seule

Le scénario 'toutes les stations disponibles' présente des performances assez similaires au scénario '1 station de fond' : gain moyen sur le RMSE de 3 % et absence de gain moyen sur la corrélation.

3.1.1.2. Ecart de performance de la correction sur les PM_{2.5}.

Les mêmes scénarios de correction ont été évalués au niveau des mesures en PM_{2.5} : la correction à l'aide d'une station de fond (Paris 1^{er} Les Halles) permet de réduire significativement les écarts quadratiques moyens et d'améliorer les corrélations avec la mesure de référence (résultats détaillés en Annexe 6.A).

Par rapport au scénario '1 station de fond' :

- l'ajout d'une référence trafic – 2 stations (fond et trafic) – dégrade globalement les performances moyennes de la correction en RMSE et en corrélation [Tableau 16] ;
- le scénario '2 stations de fond' est susceptible d'améliorer le RMSE (jusqu'à 10%) en dégradant légèrement la corrélation [Tableau 17].
- le scénario 'toutes les stations disponibles' améliore en moyenne le RMSE (5%) mais dégrade la corrélation (- 4%)

Station trafic utilisée pour la correction	Différence de performance de correction sur le RMSE	Différence de performance de correction sur les corrélations
BP EST	-24%	-7%
BP AUTEUIL	-2%	-5%
AUTOROUTE A1	-24%	-9%
RN6	-31%	-10%

Tableau 16 : PM_{2.5} – Ecart de performance de la correction sur les données des systèmes-capteurs trafic avec une correction par 2 stations (prox et fond) par rapport à une correction par 1 station

2 ^e station de fond utilisée pour la correction	Différence de performance de correction sur le RMSE	Différence de performance de correction sur les corrélations
VITRY-SUR-SEINE	7%	-1%
BOBIGNY	3%	-3%
RURALE SE	-16%	-4%
RURALE N	7%	-2%
GONESSE	7%	-2%
GENNEVILLIERS	10%	0%

Tableau 17 : PM_{2.5} – Ecart de performance de la correction sur les données des systèmes-capteurs avec une correction par 2 stations de fond par rapport à une correction par 1 station de fond

Ces résultats montrent que la méthode des ratios peut être adoptée sans perte de performance de la correction dans une zone où le dispositif de surveillance est limité (1 à 2 stations de fond). Ces résultats sont valables avec les modèles de systèmes-capteurs Atmotrack testés dans cette expérimentation, et sur le territoire francilien, qui présente des niveaux en particules relativement homogènes en situation de fond (écarts de l'ordre de 3 µg/m³ en PM₁₀ et de 1 µg/m³ en PM₁₀ dans l'agglomération parisienne), et ne sont pas forcément généralisables à tous les territoires.

3.1.2. Exploitation des données des systèmes-capteurs corrigées avec un nombre minimal de stations de référence

Dans ce paragraphe, les données des systèmes-capteurs PM₁₀ et PM_{2.5} sont analysées, après correction par la méthode des ratios par 1 station de fond : Paris 1^{er} Les Halles.

3.1.2.1. Evaluation de la variabilité temporelle des concentrations.

Les données en PM₁₀ et PM_{2.5} issues des systèmes-capteurs corrigées ont été exploitées afin d'évaluer leur capacité à reproduire les variabilités temporelles des concentrations. Des profils journalier et annuel, pour chaque polluant, sont obtenus en moyennant les données de tous les capteurs par typologie : mesure fixe de fond, mesure fixe à proximité du trafic routier, mesure mobile au cœur du trafic. Ces profils sont comparés aux profils de référence calculés à partir des mesures du dispositif de surveillance d'Airparif pour les typologies fond et proximité au trafic routier (Figure 15). Les profils des systèmes-capteurs en mobilité sont indiqués ici à titre indicatif. En effet, l'analyse qui suit a été réalisée sur l'ensemble des données issues des capteurs en mobilité, y compris sur des phases où les capteurs n'étaient pas en déplacement, ce qui peut conduire à une sous-estimation des niveaux. Les mesures en mobilité sont exploitées plus finement au paragraphe 4.

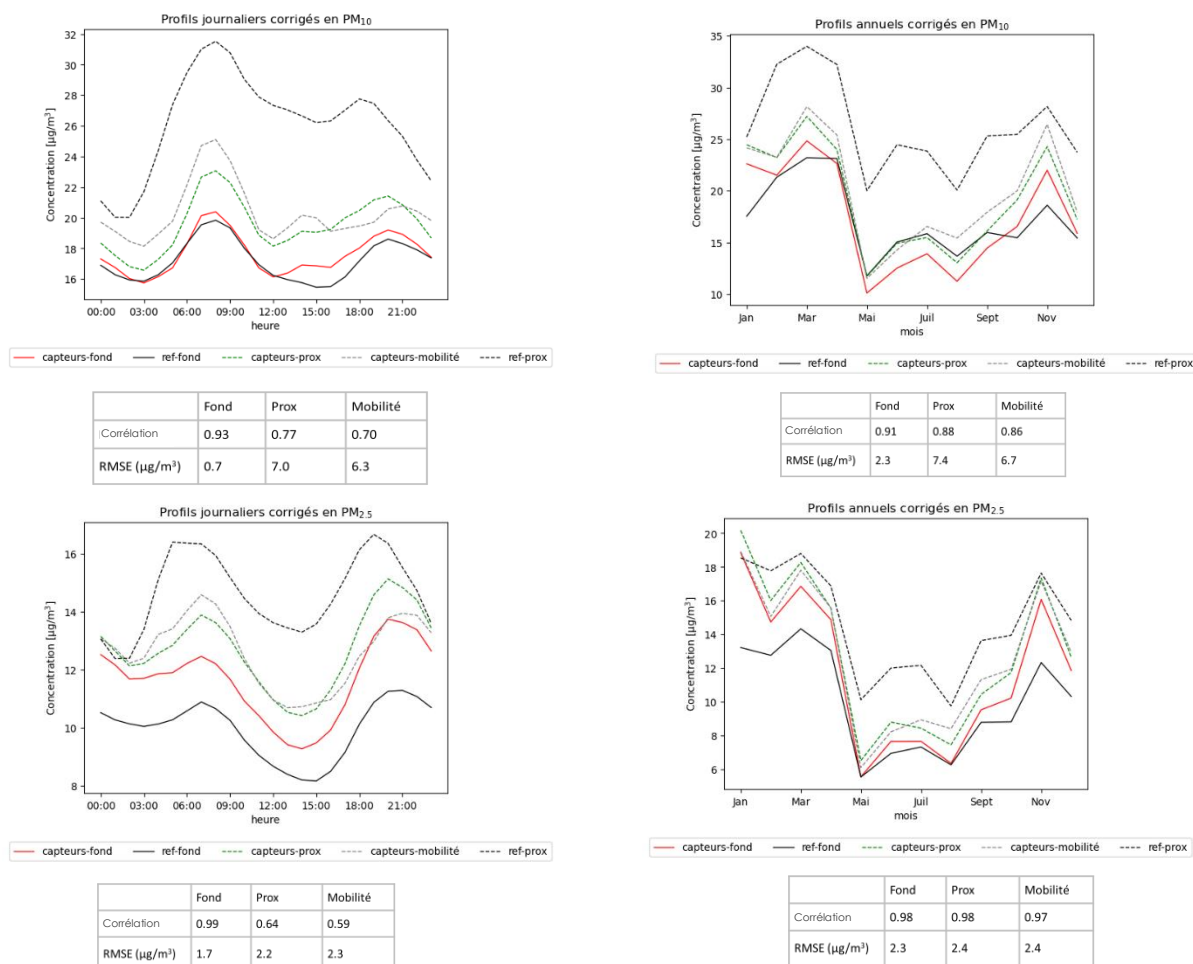


Figure 15 : Profils moyens journaliers et annuels issus des données corrigées des systèmes-capteurs et des données de référence pour les particules PM_{10} et $\text{PM}_{2.5}$

Pour les PM_{10} , les profils moyens de fond issus des systèmes capteurs corrigés montrent des niveaux comparables et une bonne corrélation avec les profils de fond de référence, à la fois en journalier et en annuel (R respectivement de 0.93 et 0.91). A l'échelle annuelle, les systèmes-capteurs montrent une tendance à légèrement sous-estimer les niveaux minima mesurés en été. A proximité du trafic routier, la corrélation reste satisfaisante, bien que plus faible qu'en fond (R de 0.77 en journalier et 0.88 en annuel). **En revanche, une forte sous-estimation est observée par rapport au profil de référence sur les capteurs à proximité du trafic.** La sous-estimation observée est supérieure à celle évaluée aux stations de mesure (cf. 2.2.2). Cette sous-estimation peut s'expliquer en partie par le fait que certains capteurs classés en typologie trafic peuvent être implantés plus loin des voies de circulation que les capteurs de référence (cf. paragraphe 1.3.1.). De plus, de nombreux bureaux de poste sont implantés sur des axes de moindre importance que les stations de mesure utilisées pour calculer la référence. Cela peut être également lié à la technologie de mesure qui ne prend pas en compte les particules les plus fines ($< 0.3 \mu\text{m}$) émises par le trafic routier. De ce fait, même si les capteurs relèvent bien des niveaux plus élevés à proximité du trafic qu'en situation de fond, l'écart entre ces deux environnements est fortement atténué par rapport aux observations de référence.

Pour les $\text{PM}_{2.5}$, les profils moyens journaliers et annuels présentent de très bonnes corrélations en fond (R respectivement de 0.99 et 0.98). Le biais est un peu plus important que pour les PM_{10} , mais reste faible, de l'ordre de $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne sur la journée. A l'échelle annuelle, le biais le plus important est observé sur les mois d'hiver, avec une tendance à la surestimation des $\text{PM}_{2.5}$. A proximité du trafic, le biais est un peu plus important qu'en fond, avec une tendance à la sous-estimation, comme constaté lors de la validation des données corrigées aux stations de mesure. Les profils journaliers et annuels restent néanmoins assez représentatifs des variations temporelles.

3.1.2.2. Evaluation de la variabilité spatiale.

En Ile-de-France, les informations issues du dispositif de surveillance montrent que les niveaux de particules PM₁₀ et PM_{2.5} sont relativement homogènes, avec des niveaux légèrement plus forts au centre et dans le Nord de l'agglomération parisienne (Figure 16).

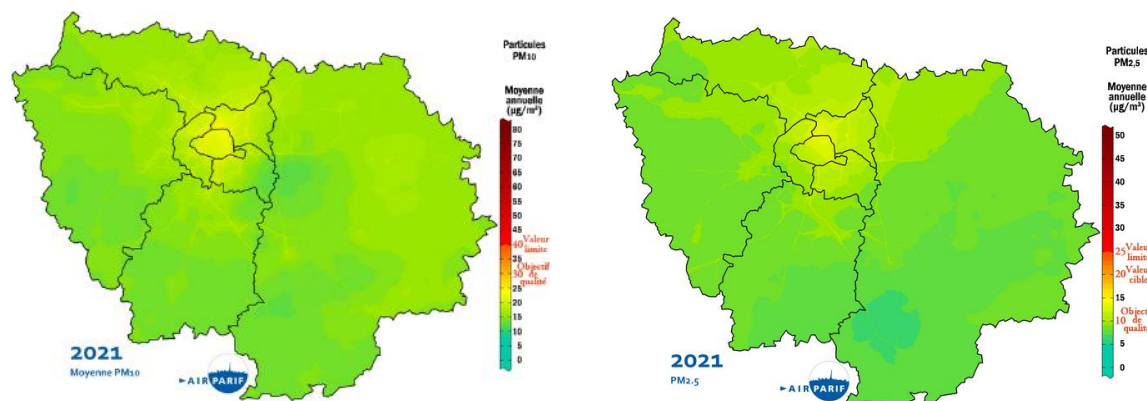


Figure 16 : cartographie de la concentrations moyenne annuelle en PM₁₀ (gauche) et PM_{2.5} (droite) en 2021

Les données ont été évaluées par Zones Administratives de Surveillance (ZAS). Conformément à la réglementation, l'Ile-de-France est divisée en deux ZAS : la Zone Agglomération (ZAG) et la Zone Régionale (ZR). Les niveaux de la zone ZAG sont généralement plus élevés que ceux de la ZR, en raison d'émissions plus importantes, du fait d'une plus grande densité de l'urbanisation et du réseau routier.



Figure 17 : découpage de l'Ile-de-France en 2 ZAS

Le Tableau 18 présente les plages de concentrations des données issues des systèmes-capteurs, après correction, au regard des données de référence issues du dispositif de surveillance d'Airparif, par ZAS. Les indicateurs annuels aux points de mesures, en fonction de leur localisation et typologie sont détaillés en annexe 6.B.

		PM ₁₀		PM _{2.5}	
		DONNEES CORRIGEEES ISSUES DES SYSTEMES- CAPTEURS	DISPOSITIF DE SURVEILLANCE (DONNEES DE REFERENCE)	DONNEES CORRIGEEES ISSUES DES SYSTEMES- CAPTEURS	DISPOSITIF DE SURVEILLANCE (DONNEES DE REFERENCE)
FOND	ZAG	12 - 21	12 - 24	9 - 14	7 - 14
	ZR	9 - 14	12 - 18	9 - 14	6 - 11
PROX	ZAG	10 - 34	17 - 31	8 - 22	9 - 20
	ZR	13 - 27	14 - 30	9 - 18	7 - 18

Tableau 18 : Particules - plages de concentrations des données corrigées en moyenne annuelle en comparaison des données issues du dispositif de surveillance (en µg/m³)

Le Tableau 18 montre que les systèmes-capteurs permettent bien de documenter des concentrations maximales en PM₁₀ légèrement plus élevées dans la ZAG qu'en Zone Régionale. Ces résultats confirment que, bien que la correction améliore fortement les résultats, les systèmes-capteurs sous-estiment légèrement les valeurs de PM₁₀.

En revanche, le gradient observé sur le dispositif de référence de PM_{2.5} en situation de fond n'est pas reproduit par les systèmes-capteurs.

3.1.2.3. Evaluation des dépassements des seuils réglementaires.

Evaluation au regard des valeurs limites

En Ile-de-France, les concentrations moyennes annuelles de particules mesurées sont largement inférieures aux valeurs limites annuelles fixées par la réglementation (40 µg/m³ pour les PM₁₀ et 25 µg/m³ pour les PM_{2.5}). Les données issues des systèmes-capteurs après correction ne montrent pas de concentration moyenne sur l'année supérieure à ces valeurs. **Le diagnostic du dépassement des valeurs limites par zones de surveillance réalisé à partir des données issues des systèmes-capteurs après correction est conforme à celui du bilan annuel 2021.**

Ce résultat est à nuancer au regard des concentrations qui sont largement inférieures aux valeurs limites actuelles, notamment en situation de fond. L'évaluation a également été réalisée par rapport aux valeurs limites fixées par la réglementation européenne à l'horizon 2030. L'évaluation réalisée avec les systèmes-capteurs après correction est globalement conforme à celle réalisée à partir du dispositif de surveillance (Tableau 19). Cette évaluation

		PM ₁₀		PM _{2.5}	
		DONNEES BRUTES ISSUES DES SYSTEMES-CAPTEURS	DISPOSITIF DE SURVEILLANCE (DONNEES DE REFERENCE)	DONNEES BRUTES ISSUES DES SYSTEMES-CAPTEURS	DISPOSITIF DE SURVEILLANCE (DONNEES DE REFERENCE)
FOND	ZAG	Dépassement VL2030	Dépassement VL2030	Dépassement VL2030	Dépassement VL2030
	ZR	Respect de la VL2030	Respect de la VL 2030	Dépassement VL2030	Dépassement VL2030
PROX	ZAG	Dépassement VL2030	Dépassement VL2030	Dépassement VL2030	Dépassement VL2030
	ZR	Dépassement VL2030	Dépassement VL2030	Dépassement VL2030	Dépassement VL2030

Tableau 19 : Particules - situation au regard des futurs valeurs limites à l'horizon 2030 (VL2030)

Evaluation au regard des seuils d'information (épisode de pollution)

En 2021, les stations de référence en situation de fond du réseau Airparif ont enregistré entre 0 et 10 jours cumulés de dépassement du seuil d'information en particules PM₁₀ (50 µg/m³ en moyenne journalière) (hors prise en compte des critères de l'arrêté des mesures d'urgence). La procédure d'information et d'alerte a été déclenchée 10 jours au regard des critères de l'arrêtés inter-préfectoral.

Les systèmes-capteurs fixes en situation de fond ont identifié entre 0 et 25 jours de dépassement détectés par au moins un des 27 systèmes-capteurs) du seuil journalier en PM₁₀ (Figure 18 et Figure 19). Parmi les 10 jours d'épisodes constatés sur le dispositif de référence au regard des critères de l'arrêté, 7 ont bien été détectés par au moins 4 systèmes-capteurs (représentés par les barres grises dans la Figure 18), mais 3 journées n'ont été détectées par aucun capteur. Parmi les 18 dépassements détectés par les systèmes-capteurs hors-épisodes (barres orange), 6 concernent des journées où les concentrations mesurées sur le réseau étaient supérieures à 40 µg/m³, correspondant à des conditions météorologiques étaient peu favorables à la dispersion des émissions locales de polluants. En revanche, 4 dépassements ont été détectés par au moins un système-capteur alors que les conditions étaient très dispersives (concentrations mesurées inférieures à 20 µg/m³ sur le réseau de référence), dont un jour vu par 7 capteurs.

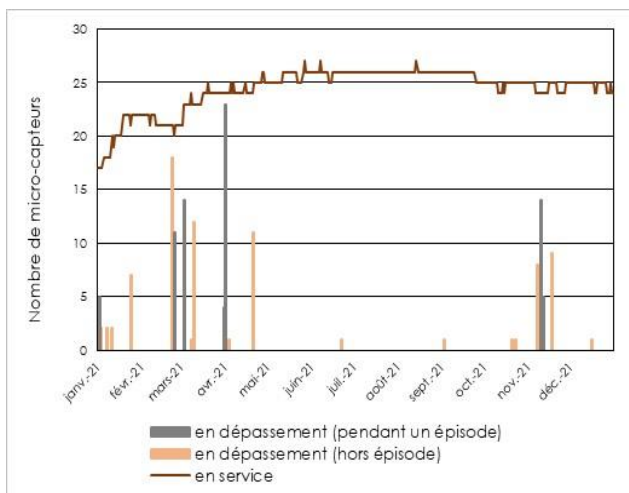


Figure 18 : Détection des jours de dépassements en PM₁₀ par les systèmes-capteurs

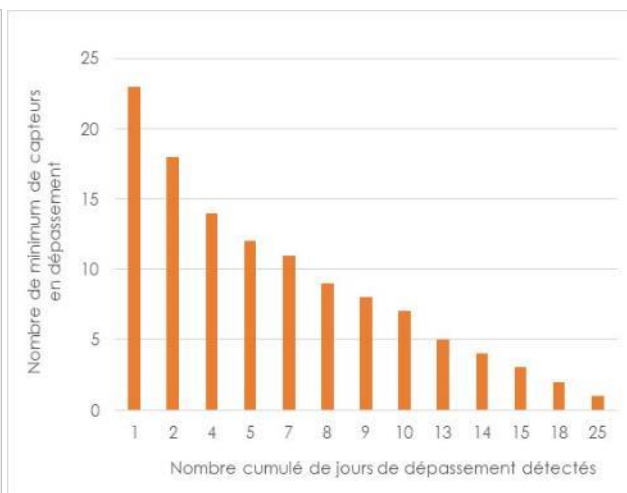


Figure 19 : Nombre minimum de capteurs en dépassement en fonction du nombre cumulé de jours de dépassement détectés

3.1.3. Exploitation des données brutes des systèmes-capteurs en l'absence de réseau de surveillance

Les analyses de données réalisées au paragraphe précédent ont été reproduites en utilisant les données brutes issues des systèmes-capteurs sans correction préalable, afin d'évaluer le risque à utiliser les données non corrigées, notamment pour une évaluation réglementaire. En effet, ce type de systèmes-capteurs peuvent être utilisés dans des zones ne disposant pas de dispositif de surveillance opérationnel ou sans lien avec le dispositif existant sur le territoire. Les profils journalier et annuel ont été comparés aux profils réalisés à partir des données issues du dispositif de référence. Le travail a été réalisé à la fois pour les particules et pour le NO₂.

3.1.3.1. Evaluation de la variabilité temporelle des concentrations

Tous les profils établis sur la base des données brutes des systèmes-capteurs montrent des biais importants avec les profils de référence, avec une surestimation importante des niveaux par les systèmes-capteurs, que ce soit en fond ou à proximité du trafic routier (Figure 20 et Figure 21). Ces résultats sont cohérents avec les évaluations réalisées en début d'expérimentation (cf. 2.1.2), qui ont conduit à la mise en place d'une correction. Néanmoins, pour certains polluants, les variations journalières et/ou annuelles présentent des coefficients de corrélation bons à très bons avec les profils de référence.

En PM₁₀ (Figure 20), le profil journalier de fond issu des capteurs bruts (rouge) montre bien des niveaux plus faibles que les profils trafic (en vert). L'écart entre les deux profils est néanmoins beaucoup moins important que sur les profils de référence (en noir). Ce profil a une corrélation moyenne avec le profil de fond de référence (0.59). Les profils trafic issus des capteurs ne parviennent pas à représenter les variations horaires, avec des coefficients de corrélation de - 0.10 (mobile) et - 0.08 (fixe).

Quant aux profils annuels, ils parviennent à refléter les variations inter-mensuelles, avec des bonnes corrélations avec les profils de référence (0.74 à 0.77). En revanche, les valeurs mesurées sont très largement surestimées, que ce soit en fond ou à proximité du trafic routier.

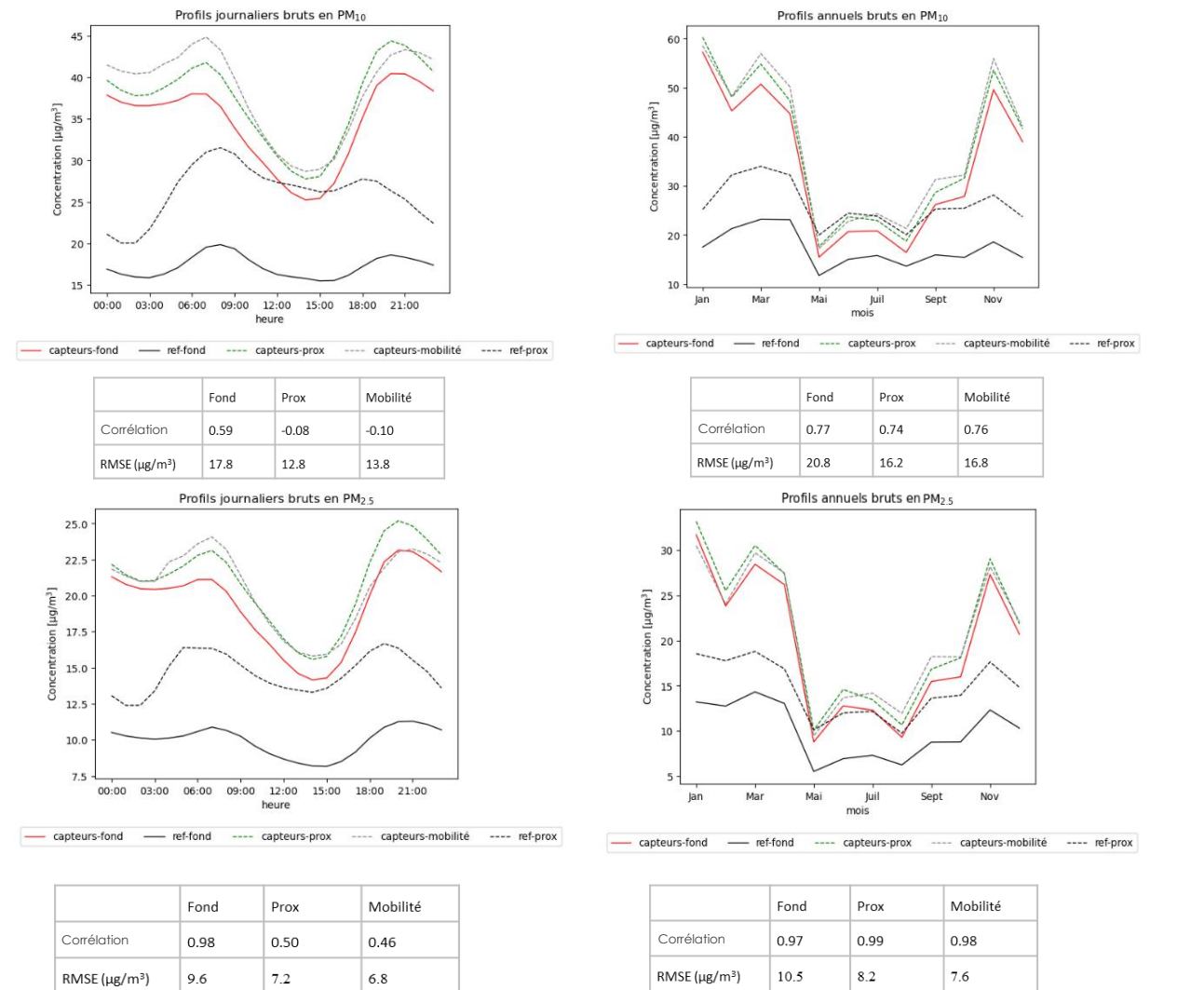


Figure 20 : Profils moyens journaliers et annuels issus des données brutes des systèmes-capteurs et des données de référence pour les particules PM₁₀ et PM_{2.5}

En NO₂ (Figure 21), on constate une forte surestimation des concentrations mesurées par les systèmes-capteurs en fond. Seul le profil journalier de fond présente une corrélation satisfaisante avec le profil de fond de référence (0.73). Le profil journalier des systèmes-capteurs trafic fixes présente des concentrations supérieures au profil de fond, mais reste très mal corrélé avec le profil trafic de référence (0.02).

Concernant les profils annuels, un changement de comportement de certains systèmes-capteurs en juin (cf 2.1.1) n'a pas permis de reconstituer des variations inter-mensuelles cohérentes avec les références.

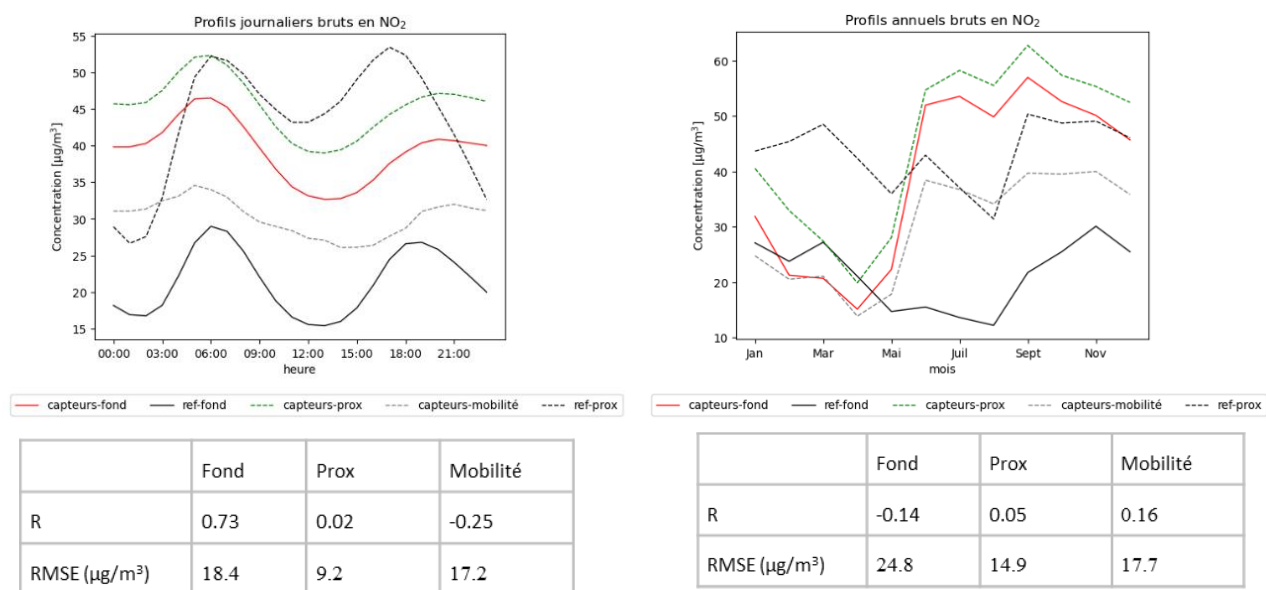


Figure 21 : Profils moyens journaliers et annuels issus des données brutes des systèmes-capteurs et des données de référence pour le NO₂

3.1.3.2. Evaluation de la variabilité spatiale des concentrations

Le Tableau 20 présente les plages de concentrations en particules des données brutes issues des systèmes-capteurs fixes, au regard des données de référence issues du dispositif de surveillance d'Airparif, par ZAS. Les indicateurs annuels aux points de mesures, en fonction de leur localisation et typologie sont détaillés en annexe 6.B.

		PM ₁₀		PM _{2.5}	
		DONNEES BRUTES ISSUES DES SYSTEMES-CAPTEURS	DISPOSITIF DE SURVEILLANCE (DONNEES DE REFERENCE)	DONNEES BRUTES ISSUES DES SYSTEMES-CAPTEURS	DISPOSITIF DE SURVEILLANCE (DONNEES DE REFERENCE)
FOND	ZAG	25 - 40	12 - 24	15 - 23	7 - 14
	ZR	27 - 40	12 - 18	15 - 23	6 - 11
PROX	ZAG	20 - 67	17 - 31	13 - 35	9 - 20
	ZR	26 - 49	14 - 30	14 - 58	7 - 18

Tableau 20 : Particules - plages de concentrations des données brutes en moyenne annuelle en comparaison des données issues du dispositif de surveillance (en µg/m³)

Contrairement aux données corrigées, les données brutes issues des systèmes-capteurs ne permettent pas de mettre en évidence la décroissance des niveaux de particules PM₁₀ en ZR par rapport à la ZAG mais mesurent des niveaux plus soutenus à proximité du trafic. (Tableau 21). Ces résultats confirment la forte surestimation des concentrations en particules par les systèmes-capteurs.

Le Tableau 21 présente les plages de concentrations en NO₂ des données brutes issues des systèmes-capteurs, au regard des données de référence issues du dispositif de surveillance d'Airparif, par ZAS. Les systèmes-capteurs mesurent bien des niveaux de fond plus élevés en NO₂ au sein de l'agglomération, mais ne montrent pas de différence de niveau claire entre les points de fond et les points à proximité du trafic. Les concentrations maximales sont largement surestimées, à la fois en situation de fond et à proximité du trafic routier.

NO ₂		DONNEES BRUTES ISSUES DES SYSTEME-CAPTEURS	DISPOSITIF DE SURVEILLANCE (DONNEES DE REFERENCE)
FOND	ZAG	17 - 132	7 - 35
	ZR	9 - 47	4 - 21
PROX	ZAG	11 - 124	14 - 80
	ZR	15 - 50	4 - 40

Tableau 21 : NO₂ - plage de concentrations mesurées en moyenne annuelle (en µg/m³)

3.1.3.3. Evaluation des dépassements des seuils réglementaires

Evaluation au regard des valeurs limites

La Figure 22 représente les concentrations moyennes annuelles en PM₁₀ et PM_{2.5} mesurées par les systèmes-capteurs. Les données brutes des systèmes-capteurs pointent de nombreuses valeurs supérieures ou très proches des VL annuelles en PM₁₀ (40 µg/m³) et en PM_{2.5} (25 µg/m³) à proximité du trafic. Or, les VL étaient en 2021 en dépassement limité pour les PM₁₀ et largement respectées en PM_{2.5}, sur l'ensemble de l'Île-de-France (Tableau 22).

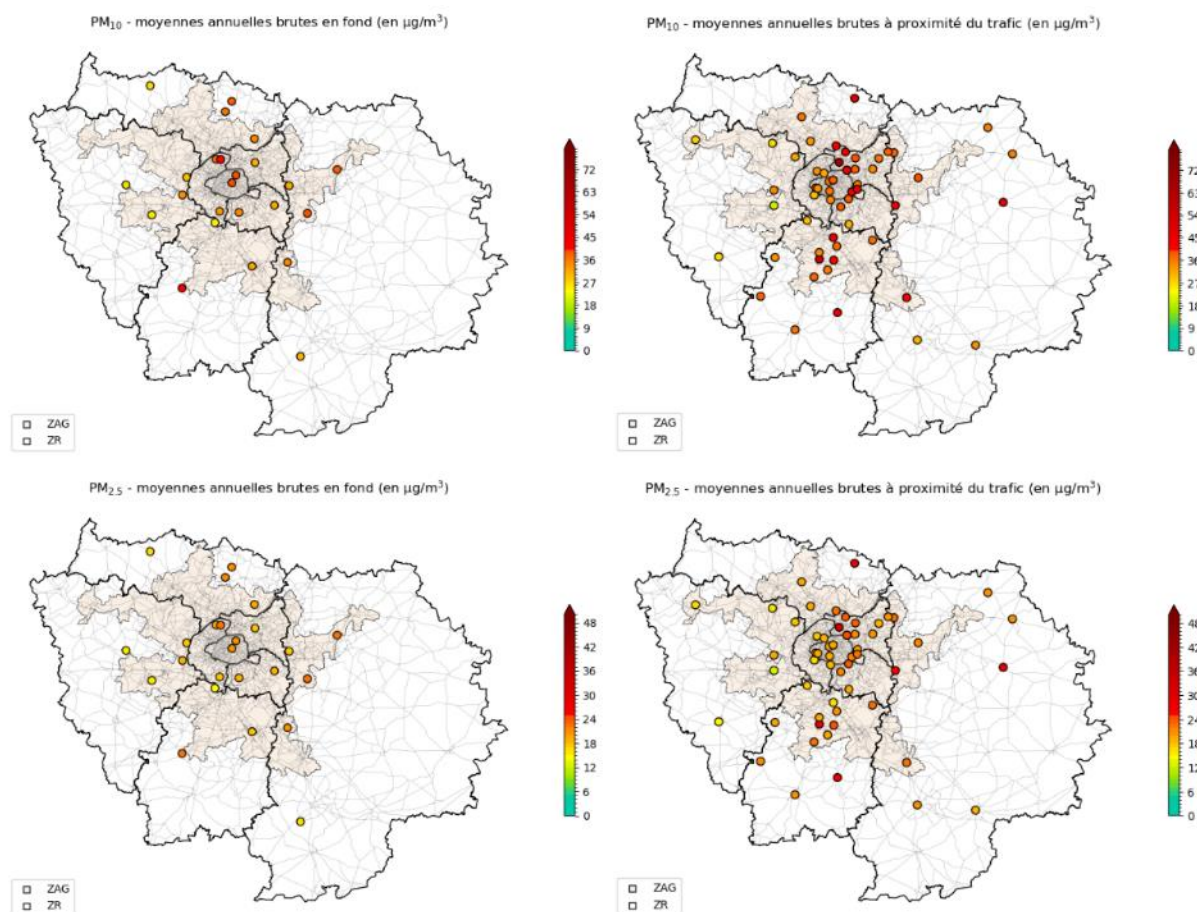


Figure 22 : Moyennes annuelles en PM₁₀ et PM_{2.5} en fond et à proximité du trafic issues des données brutes des systèmes-capteurs

Le Tableau 22 présente l'évaluation de la situation au regard des valeurs limites par les données brutes issues des systèmes-capteurs et par les données issues du dispositif de référence.

Dans la ZAG, l'évaluation réalisée à partir des données brutes des systèmes-capteurs est cohérente avec celle du bilan. Néanmoins, la Figure 22 montre des concentrations maximales qui atteignent le seuil de la VL (40 µg/m³) et sont très au-dessus des valeurs observées avec le dispositif de surveillance (Figure 16).

		PM ₁₀		PM _{2.5}	
		DONNEES BRUTES ISSUES DES SYSTEMES-CAPTEURS	DISPOSITIF DE SURVEILLANCE (DONNEES DE REFERENCE)	DONNEES BRUTES ISSUES DES SYSTEMES-CAPTEURS	DISPOSITIF DE SURVEILLANCE (DONNEES DE REFERENCE)
FOND	ZAG	Respect de la VL	Respect de la VL	Respect de la VL	Respect de la VL
	ZR	Respect de la VL	Respect de la VL	Respect de la VL	Respect de la VL
PROX	ZAG	Dépassement de la VL	Dépassement limité	Dépassement de la VL	Respect de la VL
	ZR	Dépassement de la VL	Respect de la VL	Dépassement de la VL	Respect de la VL-

Tableau 22 : Particules - situation au regard des valeurs limites (VL)

La Figure 23 représente les concentrations moyennes annuelles en NO₂ mesurées par les systèmes-capteurs.

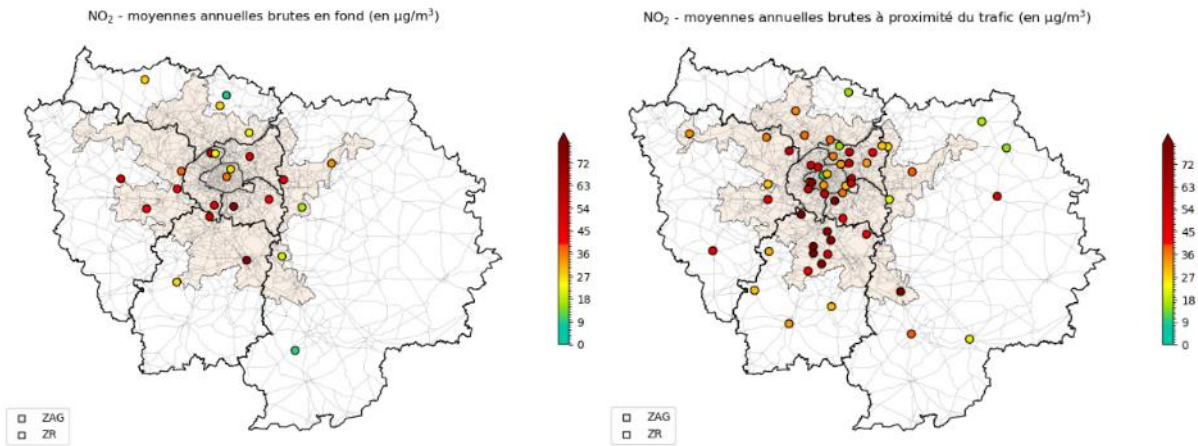


Figure 23 : Moyennes annuelles de NO₂ en fond et à proximité du trafic issues des données brutes des système-capteurs

En NO₂, les données systèmes-capteurs montrent des concentrations supérieures à la valeur limite (VL) annuelle (40 µg/m³) sur 36 des 90 points de mesures, à la fois en fond et à proximité du trafic, au sein de l'agglomération (ZAG) ainsi qu'en zone régionale (ZR). L'exposition au dépassement de la VL est nettement surestimée au vu des données de référence (Tableau 23), pour lesquelles les dépassements se limitaient en 2021 à des zones à proximité du trafic routier², la valeur limite étant largement respectée en situation de fond (≤ 28 µg/m³ aux stations) (Figure 24).

NO ₂		DONNEES BRUTES ISSUES DES SYSTEME- CAPTEURS	DISPOSITIF DE SURVEILLANCE (DONNEES DE REFERENCE)
FOND	ZAG	Dépassement de la VL	Respect de la VL
	ZR	Dépassement de la VL	Respect de la VL
PROX	ZAG	Dépassement de la VL	Dépassement de la VL
	ZR	Dépassement de la VL	Dépassement de la VL

Tableau 23 : NO₂ - situation au regard de la valeur limite

² AIRPARIF. (2022). Bilan de la qualité de l'air - Année 2021 - Surveillance et information (bilan de la qualité de l'air en Île-de-France). <https://www.airparif.asso.fr/bilan/2022/bilan-2021-de-la-qualite-de-lair>

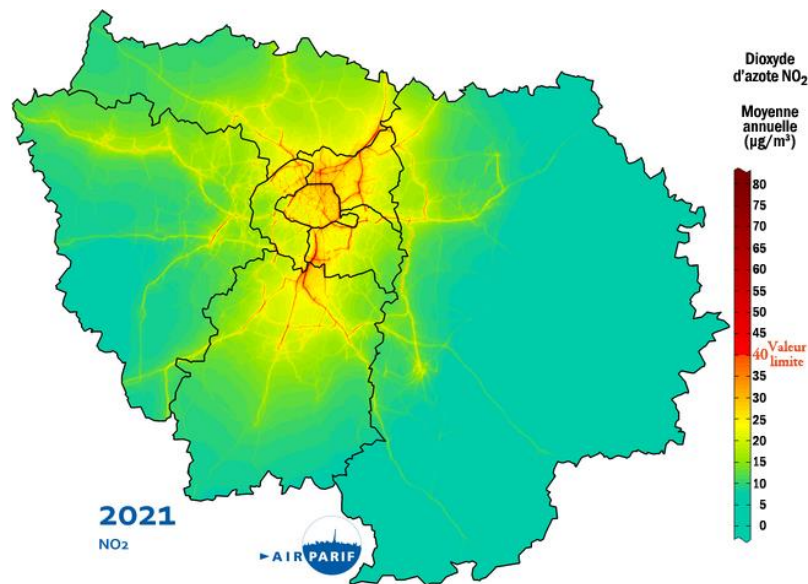


Figure 24 : cartographie de la concentrations moyenne annuelle en NO₂ en 2021

Evaluation au regard des seuils d'information (épisode de pollution)

Les systèmes-capteurs fixes en situation de fond identifient entre 0 et 135 jours de dépassement (détectés par au moins un des 27 systèmes-capteurs). Les 10 jours d'épisodes réellement constatés font partie des 135 jours détectés par les systèmes-capteurs et sont représentés par les barres grises dans la Figure 25.

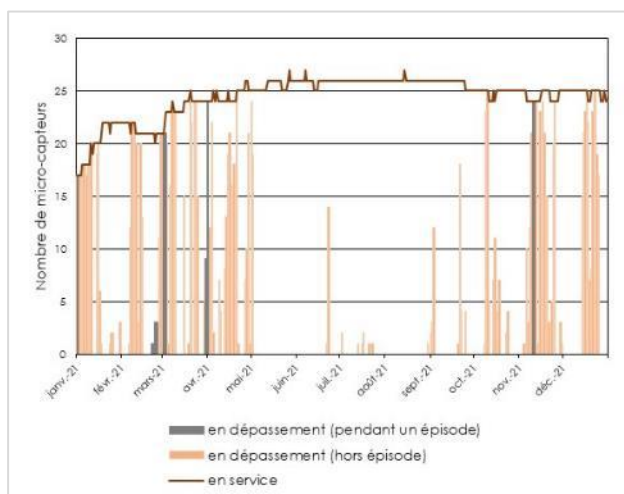


Figure 25 : Détection des jours de dépassement en PM₁₀ par les systèmes-capteurs

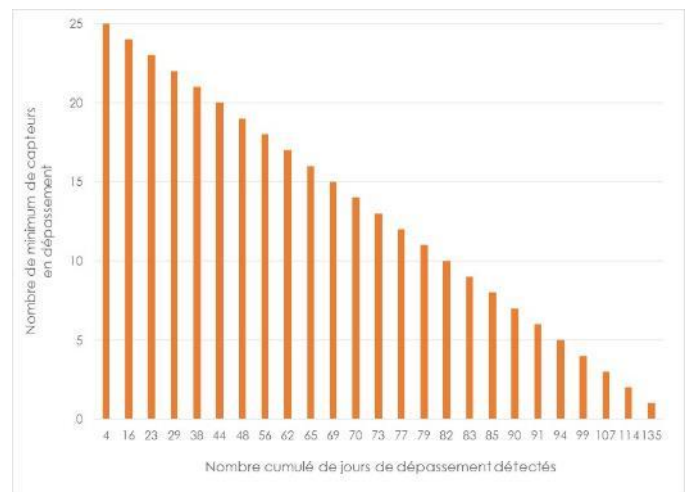


Figure 26 : Nombre minimum de capteurs en dépassement en fonction du nombre cumulé de jours de dépassement détectés

Compte-tenu de la très faible diminution du nombre de capteurs en dépassement en fonction du nombre de jours de dépassement détectés (Figure 26), il n'est pas possible d'établir un nombre minimal de capteurs suffisant pour assurer la bonne détection d'un épisode. Pour s'approcher du nombre d'épisode réel, il faudrait baser la détection sur 24 à 25 capteurs. Or, certains de ces capteurs sont installés en dehors des zones géographiques en dépassement. **Il y a donc un risque de forte surestimation du nombre de dépassement du seuil d'information-recommandation en s'appuyant sur les moyennes journalières brutes des systèmes-capteurs.**

3.1.3.4. Conclusion

En conclusion, la correction des données, en s'appuyant sur la station Paris 1^{er} les Halles, a permis de diminuer significativement les biais sur les concentrations annuelles et d'améliorer la corrélation des profils journaliers et annuels.

La « méthode des ratios » est envisageable dans une zone où le dispositif de surveillance est limité. En effet, elle présente, pour les mesures réalisées en Ile-de-France, de bonnes performances pour la correction des données PM₁₀ et PM_{2,5}, lorsque le nombre de stations de référence est limité (1 à 2 stations de fond). En revanche, il n'y a, le plus souvent, pas de gain à s'appuyer sur des stations trafic.

Le paragraphe 3.1.2. a montré que l'utilisation des données issues des systèmes-capteurs corrigés avec une seule station de référence permet globalement de bien reproduire la variabilité temporelle des PM₁₀ et PM_{2,5} en situation de fond. La variabilité spatiale des concentrations franciliennes est globalement reproduite pour les PM₁₀, mais pas pour les PM_{2,5}, en raison d'une surestimation des valeurs faibles. L'évaluation des dépassements des valeurs limites réalisée avec les données des capteurs corrigées est cohérente avec celle réalisée à partir du dispositif de surveillance. En revanche, à proximité du trafic routier, les systèmes-capteurs après correction présentent une forte sous-estimation de valeurs par rapport au dispositif de surveillance.

La détection des épisodes en PM₁₀ à partir des données corrigées reste fragile : le réseau de systèmes-capteurs a détecté 7 épisodes sur les 10 déclenchés sur la base du dispositif de surveillance d'Airparif. En revanche, 25 jours de dépassements ont été détectés par au moins un système-capteur, dont 4 jours marqués par des conditions météorologiques dispersives et des concentrations en PM₁₀ faibles sur l'ensemble du réseau Airparif.

Dans une zone sans dispositif de surveillance, un diagnostic uniquement basé sur des mesures réalisées avec les systèmes-capteurs telles que celles menées dans le cadre de l'expérimentation francilienne :

- permet d'identifier partiellement les variations temporelles des niveaux :

- La variabilité annuelle des concentrations est cohérente pour les Particules. Ce n'est pas le cas pour le NO₂.

- L'identification des variations des concentrations journalières est possible en situation de fond tant pour les particules que pour le NO₂. Ce n'est pas le cas à proximité du trafic routier.

- ne permet de hiérarchiser les zones selon leurs concentrations, dans notre expérimentation :

- la décroissance entre les sites de fond de la Zone Agglomérée et de la Zone Régionale n'est pas identifiée pour les PM₁₀.

- les niveaux plus soutenus à proximité du trafic routier sont identifiés pour les particules mais pas pour le NO₂, le système-capteur utilisé dans l'expérimentation surestimant fortement les niveaux en fond et sous-estimant ceux à proximité du trafic routier ;

- ne permet pas d'évaluer les niveaux de concentrations sans biais et induit, dans le cadre des mesures de l'expérimentation francilienne pour tous les polluants, une forte surestimation des dépassements de Valeurs Limites.

- surestime largement le nombre de jours de dépassement des seuils journaliers d'information-recommandation pour les PM₁₀.

Ces enseignements sont valables avec le réseau expérimental de systèmes-capteurs testés dans le cadre de cet expérimentation, dans la région Ile-de-France, et ne sont pas forcément généralisables à tous les systèmes-capteurs, ni à tous les territoires.

3.2. Apport des données issues du réseau expérimental de systèmes-capteurs dans les cartographies produites par Airparif

Cette partie présente les réflexions méthodologiques et développements préalables nécessaires pour pouvoir prendre en compte les données des systèmes-capteurs dans les cartes horaires de qualité de l'air. Les résultats des modélisations bruts de la qualité de l'air sont en effet affinés à partir de données de mesures fixes. Il s'agit ici d'identifier les possibilités de prendre en compte dans les cartographies horaires un nombre très important de données temps réel avec des systèmes-capteurs fixes et mobiles. L'expérimentation n'a pas permis d'aboutir à un système opérationnel mais de nombreux verrous techniques ont été levés pour une utilisation ultérieure.

Ces travaux, de l'ordre de la recherche, font appel à des notions mathématiques relativement complexes.

3.2.1 Principes méthodologiques

L'intégration de données produites par des systèmes-capteurs dans les cartographies de la qualité de l'air est d'ores et déjà possible. Les différentes techniques de krigeage dont les AASQA sont familières (krigeages simple, ordinaire, universel et surtout à dérive externe) permettent de corriger des cartographies produites par des modèles déterministes (Baillargeon (2005)). Le LCSQA, dans son rapport investiguant une telle intégration cartographique avec des données capteurs à Nantes, utilise ainsi une cartographie de la moyenne annuelle (2016) en PM_{10} , qui sert de dérive externe à un krigeage des données de systèmes-capteurs fixes et mobiles (LCSQA (2019)). Le rapport fait ainsi varier une unique carte (*time-invariant basemap*) selon les données disponibles heure par heure, données ayant été filtrées au préalable selon des critères statistiques de répétabilité. C'est une méthodologie qui permet effectivement de produire des cartes, et que l'on retrouve également chez Schneider et al (2017).

Il faut cependant aller plus loin dans l'exigence requise pour une telle intégration cartographique, c'est-à-dire qui ne soit pas qu'un démonstrateur, mais réellement utilisable pour l'analyse de cartographies urbaines fine-échelle.

Un tel système d'intégration doit s'assurer :

- Que **les données observées assimilées ne soient pas biaisées**. C'est une hypothèse fondamentale de l'estimateur BLUE (Best Linear Unbiased Estimator), que l'on retrouve au cœur des diverses techniques de krigeage, mais également d'autres techniques d'assimilation de données. Il est important de respecter cette hypothèse et doit au choix :

- Être vérifiée statistiquement à l'aide de comparaisons *in situ* avec des stations de référence, mais sans oublier qu'elles ne peuvent pas forcément refléter les niveaux en mobilité.
- Être assurée par des corrections statistiques (linéaire ou non) préalables. Avec l'hypothèse d'une répétabilité totale des systèmes-capteurs, une correction statistique des comparaisons *in situ* systèmes-capteurs / stations de référence (une correction propre à chaque polluant) peut être déduite ; elle est appliquée de manière homogène à la flotte de capteurs. Cette correction peut être un traitement du signal mesuré seul, comme il peut intégrer d'autres paramètres (météorologiques par

exemple, afin de répondre à des biais de mesure induits par l'humidité, la température, autres). L'homogénéité de cette correction, tant inter-capteurs que dans le temps, est cependant discutable.

- Être assurée par une calibration par points de rendez-vous des capteurs, comme décrit en annexe 4, en veillant à mettre en œuvre l'algorithme assurant une calibration dynamique temporellement (i.e. corriger les dérives temporelles des capteurs).

- Que **les cartographies assimilées aient un sens physique**. L'intégration des données ne doit pas créer des motifs physiquement invraisemblables, comme des bulles de concentration, des gradients de concentration sans explication physique, des concentrations trafic inférieures aux concentrations de fond environnantes, etc. L'intégration de données 15~20s au sein de cartographies qui représentent des moyennes horaires (voire même plus pour les AASQA n'ayant pas la possibilité de faire tourner un modèle de dispersion type ADMS-Urban, SIRANE... sur toutes les heures concernées par une campagne par systèmes-capteurs) est forcément discutable. En l'absence de formalisation d'un opérateur d'observation (le procédé mathématique qui permet de comparer le modèle aux observations) qui rend compte de cela, la technique d'assimilation de donnée mise en œuvre n'a pas forcément à rendre compte des variations les plus locales des données des systèmes-capteurs.

- Que **les cartographies assimilées soient effectivement améliorées**. Intégrer des données mesurées de systèmes-capteurs n'est pas forcément le gage d'une amélioration des cartographies. Il convient de qualifier s'il y a gain ou non, et si oui quantifier son amplitude. De la même manière que dans le cadre de l'assimilation des données des stations de référence, une validation croisée (assimiler seulement une fraction des stations de référence et évaluer les performances du modèle assimilé aux stations restantes), permet d'évaluer si le modèle n'assimilant que des données issues de systèmes-capteurs est effectivement meilleur aux stations de référence (meilleur au sens de paramètres statistiques comme la RMSE, le biais, la corrélation).

- Que **le coût algorithmique ne soit pas exorbitant**. En effet, si le but du projet est de produire des réanalyses d'un grand nombre de cartes horaires (la campagne se déroulant sur plus d'un an, donc l'ordre de grandeur est de plusieurs milliers), ou bien à moyen/long terme d'être assimilées en quasi-temps réel, les besoins en temps de calcul et accessoirement en mémoire utilisée doivent être raisonnables. Si l'on reprend les exemples des articles scientifiques présentant l'application de krigeages, ceux-ci ne s'appliquent qu'à des volumes de données limitées, loin des 600 capteurs de ce projet. Ce nombre de capteurs produisant une information toutes les 10~20s, plus de 130 000 données de concentration géoréférencées pour une seule heure sont produites, soit un volume hors d'atteinte des algorithmes de krigeages (qui pour n observations doivent résoudre un système linéaire d'équations de taille $n \times n$). Il faudrait alors se tourner vers des krigeages par blocs, mais au détriment alors de la cohérence spatiale de la cartographie.

La littérature portant sur le sujet reste encore assez inadaptée pour traiter de bout en bout les divers défis évoqués ci-dessus, et encore moins avec le niveau d'exigence requis par une utilisation opérationnelle (et non seulement comme un démonstrateur). Ainsi, il est très commun de lire des articles scientifiques se désintéressant complètement des questions de cohérence cartographique, d'intérêt final (l'assimilation améliore-t-elle les performances du modèle brut ?), ou encore des articles scientifiques ne se confrontant pas à la réalité des données de systèmes-capteurs et leur complexité (ou ne pouvant pas faute d'accès aux données) en choisissant d'utiliser comme substitut directement des données du modèle à assimiler auxquelles un bruit a été ajouté (bruit souvent d'une structure invraisemblablement simple).

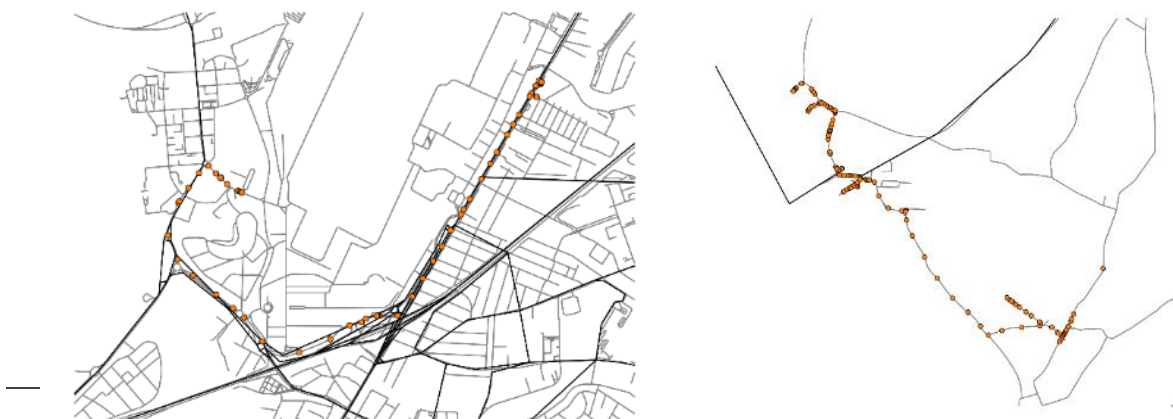
Il convient cependant de s'appuyer sur cette littérature et sa diversité pour bâtir la succession de traitements de données de systèmes-capteurs fixes et mobiles pour une intégration dans les cartographies. **Les développements menés lors de ce projet n'ont pas permis d'aboutir à cette succession optimale de traitements de données, mais ont le mérite de proposer des pistes qui ont chacune leurs intérêts.**

Le modèle urbain fine-échelle d'Airparif (système « Cartes temps réel ») est utilisé dans le cadre de ces travaux. C'est donc à ce système (**sans assimilation des données de référence**) que l'on cherchera à intégrer les données systèmes-capteurs du projet selon le cahier des charges défini, et ce possiblement sur toutes les heures concernées par la campagne de mesure du projet.

3.2.2. Assurer une comparaison mesure/modèle qui ait du sens

Le motif lié au trafic routier des cartes de concentration produites par un système de modélisation fine-échelle dépend largement du réseau routier (et ses émissions linéiques associées) pris comme données d'entrée. Par conséquent, assimiler une observation mobile ayant été réalisée au cœur du trafic mais sur un axe qui n'est pas couvert par le réseau modélisé peut amener à des non-sens. Le cœur de l'assimilation de données en qualité de l'air est de propager spatialement l'erreur du modèle uniquement disponible ponctuellement. Il est donc essentiel de s'assurer que des mailles du modèle modélisant du fond influencé ne sont pas comparées avec des observations au cœur du trafic. Le réseau routier modélisé n'intègre pas 100 % des axes routiers, les données de trafic n'étant pas disponibles pour chaque morceau d'axe francilien, notamment les rues à faible trafic³. Pour comparer des résultats de capteurs en mobilité et des résultats de modélisation, il convient de s'assurer qu'ils représentent la même situation (modélisations sur l'axe routier). La

Figure 27 présente deux exemples de trajets superposés aux réseaux routiers. En noir est représenté le réseau routier modélisé Heaven qui alimente le modèle de dispersion urbaine ADMS-Urban, en gris est représenté une excellente approximation du réseau routier réel fournie par Open Street Map. En orange sont représentées les données géoréférencées d'un système-capteur mobile. Si à gauche les relevés sont assez bien superposés avec les axes modélisés, à droite les relevés ont suivi un chemin réel se situant hors du réseau Heaven, correspondant à des situations courantes.



³ Les émissions liées à ces axes routiers sont prises en compte de manière diffuse, c'est-à-dire non finement spatialisées sur les axes routiers eux-mêmes.

Figure 27 : Deux exemples de trajets, superposés au réseau routier modélisé Heaven en noir et au réseau Open Street Map en gris

Deux solutions sont envisageables. La première est de garder les relevés qui se situent à moins d'une certaine distance du réseau modélisé. Cela garantit d'avoir une comparaison mesure / modèle qui ait du sens, mais diminue le volume de données utilisables. La deuxième est de projeter la position des données mobiles géoréférencées sur le brin le plus proche du réseau modélisé. Cette solution permet de traiter le jeu de données observées dans son intégralité, mais son artificialité peut interroger : possiblement des données mesurées sur un axe mineur peu fréquenté peuvent être projetées sur un axe plus important ; les données sont également disposées par construction au cœur du trafic, ce qui écrase une éventuelle variabilité de la distance à l'axe (sur le trottoir / au cœur de l'axe).



Figure 28 : Les deux prétraitements décrits, à gauche par projection, à droite par sélection selon un buffer

Sur les deux illustrations, les positions brutes des relevés sont représentées en orange, et en vert les positions après pré-traitement : à gauche les positions sur le réseau modélisé sont projetées (projection orthogonale sur le brin le plus proche), et à droite seules celles étant à moins d'une distance seuil du réseau modélisé sont retenues, ici prise à 50 m (en rouge le buffer de 50 m associé).

La solution illustrée à droite a été retenue pour ce projet.

Comme l'illustration de gauche le présente, la technique de projection peut provoquer des « discontinuités » de chemin dans les trajets traités, alors que les relevés bruts pouvaient être continus (régularité des relevés qui laisse deviner aisément le chemin). Des algorithmes de projection plus sophistiqués, non testés durant l'expérimentation, peuvent être mis en œuvre, en visant notamment une cohérence cartographique du chemin projeté.

3.2.3. Améliorer les temps de calcul : reconstruction de cartographies par combinaison de composantes positives

Afin de permettre des temps de calcul suffisamment raisonnables pour assimiler un nombre important de données de systèmes-capteurs, de nouvelles méthodologies de calcul sont nécessaires. Cette méthodologie se propose de reconstruire des cartographies fine-échelle urbaines à partir de données de mesures et des résultats de la décomposition d'un ensemble de cartographies élémentaires relativement indépendantes. Ces cartographies élémentaires, nommées composantes, et construites par apprentissage, sont produites de telle manière que chaque sortie du modèle fine échelle de la base d'apprentissage puisse être approximée avec une erreur contrôlée par une combinaison linéaire de ces composantes. Cette approche est inspirée des travaux de méta-modélisation menée par J.K. Hammond et al sur les chaînes de modélisation urbaine de la qualité de l'air. Des détails de la méthode sont présentés en Annexe 7.1.

Les travaux se sont focalisés sur le NO₂ parce que ce polluant est fortement impacté par le trafic routier et que l'assimilation de données menée en s'appuyant sur l'estimateur BLUE (Best Linear Unbiased Estimator) est parfaitement maîtrisée pour ces situations.

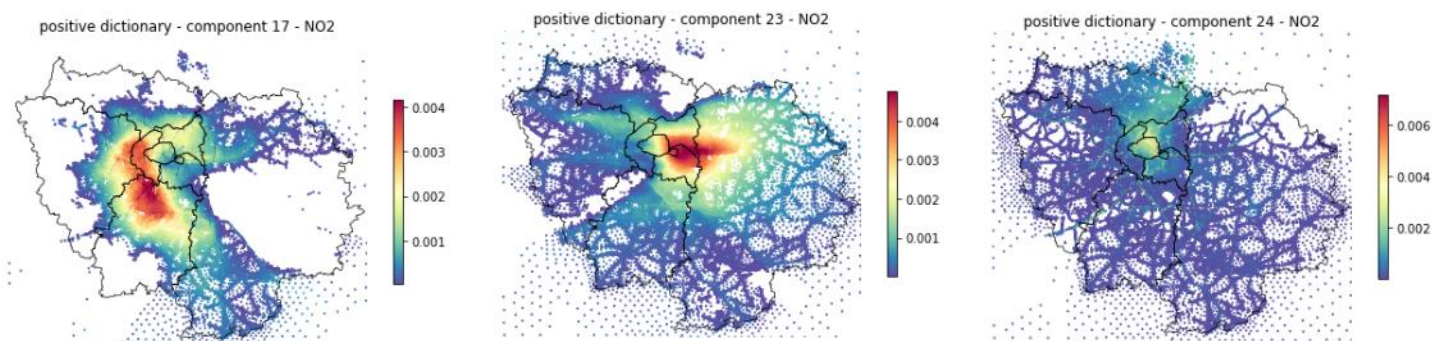


Figure 29- 3 exemples de composantes résultant d'une factorisation sur un an consécutif de sorties fine-échelle NO₂

Chaque composante prise séparément ne constitue pas une cartographie ayant du sens. Le but est en revanche que des combinaisons linéaires pertinentes le soient. Reconstruire une carte correspondant à un pas de temps, ou un ensemble de pas de temps, passe par :

- le chargement des observations systèmes-capteurs (mobiles et fixes) sur ce ou ces pas de temps
- l'extraction des valeurs de chaque composante à tous les emplacements où il y a eu observation
- l'optimisation d'une régression linéaire sous contrainte de coefficients positifs entre les composantes extraites aux observations et les observations
- la combinaison linéaire des composantes selon les coefficients positifs calculés à l'étape précédente.

L'objectif de ces travaux exploratoires étant d'évaluer la faisabilité de la méthodologie avec l'utilisation de nombreux capteurs, les résultats de NO₂ des systèmes-capteurs, bien que non exploitables comme décrit précédemment, ont été utilisés.

L'examen des composantes montrent que les motifs associés ne sont pas des motifs locaux (à l'échelle de la rue), mais s'étendent plutôt sur une fraction du domaine. Par construction, les cartes produites par cette méthodologie ne peuvent pas refléter les variations les plus locales observées par les systèmes-capteurs, et c'est peut-être paradoxalement un des points forts. En effet, dans la mesure où il n'est pas possible de « faire confiance » aux observations prises individuellement, ce « moyennage » spatial à travers ce mélange de composantes s'avère prometteur.

La mise en œuvre de cette méthodologie avec les données du projet a donné naissance à des cartes reconstruites ayant physiquement du sens, que ce soit en NO₂ ou en PM₁₀, ce qui constitue un succès en soi (Figure 30).

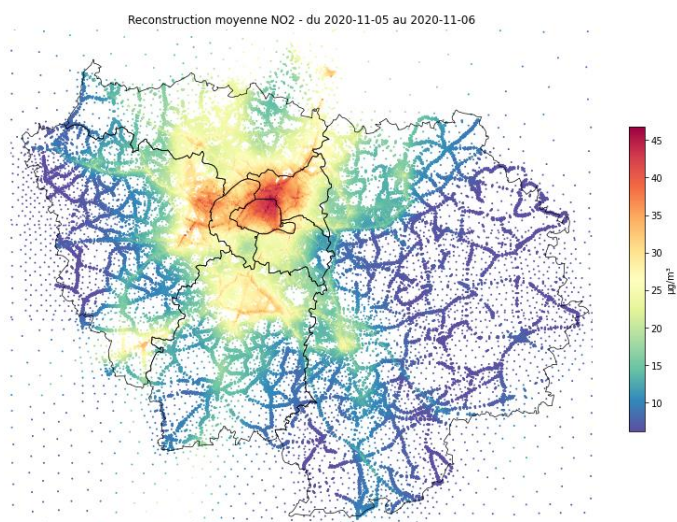


Figure 30 - reconstruction par composantes positives utilisant les données des systèmes-capteurs (mobiles et fixes) de la campagne Mesures & Perceptions

Ces travaux exploratoires ont permis le développement de la méta-modélisation du modèle urbain fine-échelle d’Airparif Cartes temps réel et la reconstruction rapide de cartographies fine-échelle ayant un sens physique via les données des stations de référence ou encore des données de systèmes-capteurs (et ce malgré le grand volume de données intégrées). Moyennant une amélioration des performances de la factorisation produisant les composantes, ce qui demande un investissement important et un examen de la parcimonie (*sparseness*) des composantes, ces travaux pourraient être utilisés pour produire des cartographies plus rapidement et notamment pour faire de la prévision fine échelle horaire de la qualité de l’air.

Ils ont également montré **la capacité de cette méthodologie à intégrer de nombreuses données de mesures, qui pourraient trouver une application pour l’amélioration des cartographies à fine échelle en fonction de l’amélioration de la justesse des systèmes-capteurs.**

3.2.4. Méthodologies de correction des modélisations brutes

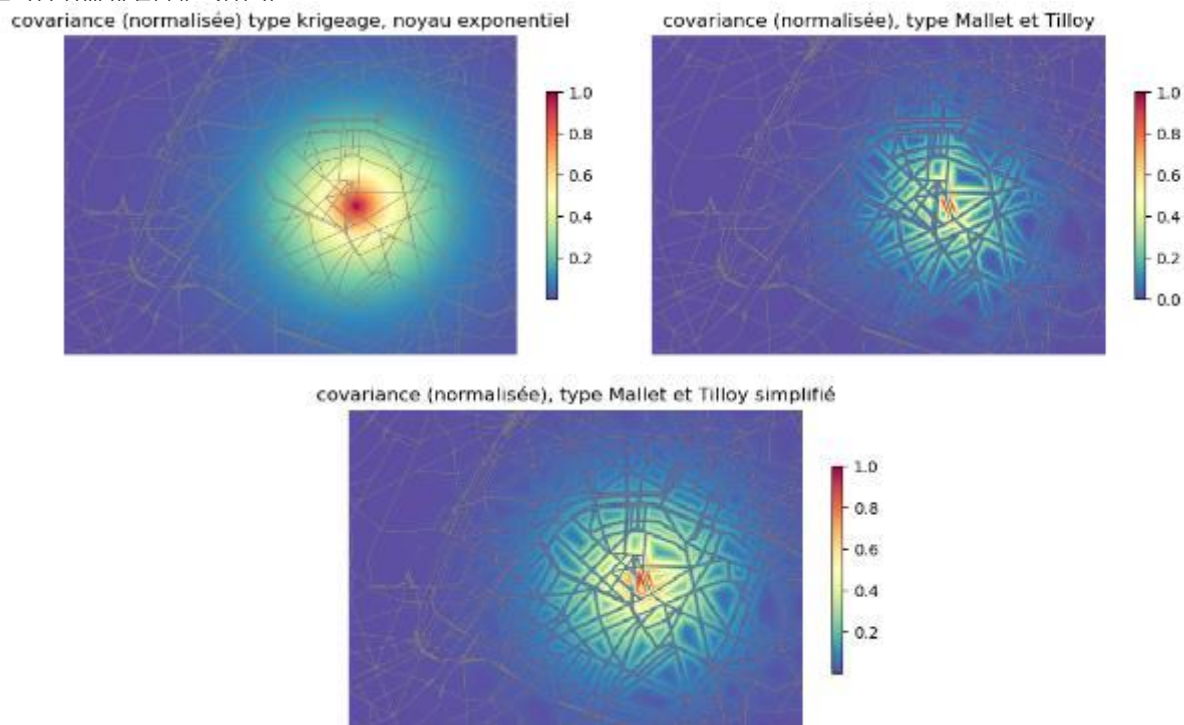
Différentes méthodologies d’assimilations des modélisations brutes avec des données de mesure ont été explorées, que ce soit le krigeage, la covariance empirique sur une période d’apprentissage ou la covariance géométrique. Elles s’appuient toutes sur l’estimateur BLUE (Best Linear Unbiased Estimator), le cœur mathématique se cachant derrière la régression linéaire ; les formulations de la covariance d’erreur du modèle diffèrent selon chacune de ces méthodes. Des précisions sur les méthodes et tests effectués sont fournies en annexe 7.2. Les avantages et inconvénients de chacune sont résumées dans le Tableau 24.

	Avantages	Inconvénients
Krigeage	Génération de la covariance d’erreur aisée (paramètres estimés par le semi-variogramme) Librairies de calcul disponibles en python et R	Possible manque de sens physique de la propagation des erreurs, et donc de la carte assimilée Incertitudes des mesures fixées par le semi-variogramme (effet pépité), et donc possiblement très différentes d’un pas de temps à un autre Difficile d’attribuer des incertitudes différentes entre le réseau de mesures de référence et les données μ -capteurs avec l’utilisation d’une librairie usuelle
Covariance empirique sur une période d’apprentissage	Sens physique élevé des cartes assimilées Calibration des incertitudes (modèles et observations) par validation croisée	Pas réalisable pour des emplacements de capteurs non-connus à l’avance
Covariance géométrique	Sens physique des cartes assimilées	Peut être coûteux algorithmiquement selon les formulations

Tableau 24 : Avantages et inconvénients pour différentes formulations de la covariance d’erreur.

En résumé, BLUE avec une génération à la volée des matrices de covariance d’erreur semble être le meilleur compromis dans le cas de l’assimilation d’un modèle urbain avec des données observées dont l’emplacement ne peut être connu à l’avance (mesures en mobilité). Le krigeage et la covariance géométrique le permettent. Les travaux se sont poursuivis en ce sens avec deux méthodes de

covariance géométriques : « type Mallet et Tilloy » et « type Mallet et Tilloy simplifié » (voir exemple en Figure 31) (Tilloy et al., 2013)



Les covariances d'erreur représentées sont celles entre une maille en particulier et le reste des mailles du domaine
Figure 31 : Comparaison de formulations de covariance d'erreur. Dans cette figure sont représentées les covariances d'erreur entre une maille en particulier et le reste des mailles du domaine

La Figure 32 présente une comparaison des assimilations BLUE de données systèmes-capteurs en utilisant diverses formulations de la covariance d'erreur. Les cartographies représentent la journée du 7 décembre 2020 à 10h pour les particules PM_{10} . Pour cette heure, environ 1500 données de systèmes-capteurs ont été assimilées. Les temps de calcul associés à la génération des trois cartographies sont respectivement de 2, 4 et 40 s pour les méthodologies de « krigeage », « Mallet et Tilloy simplifié » et « Mallet et Tilloy complet ».

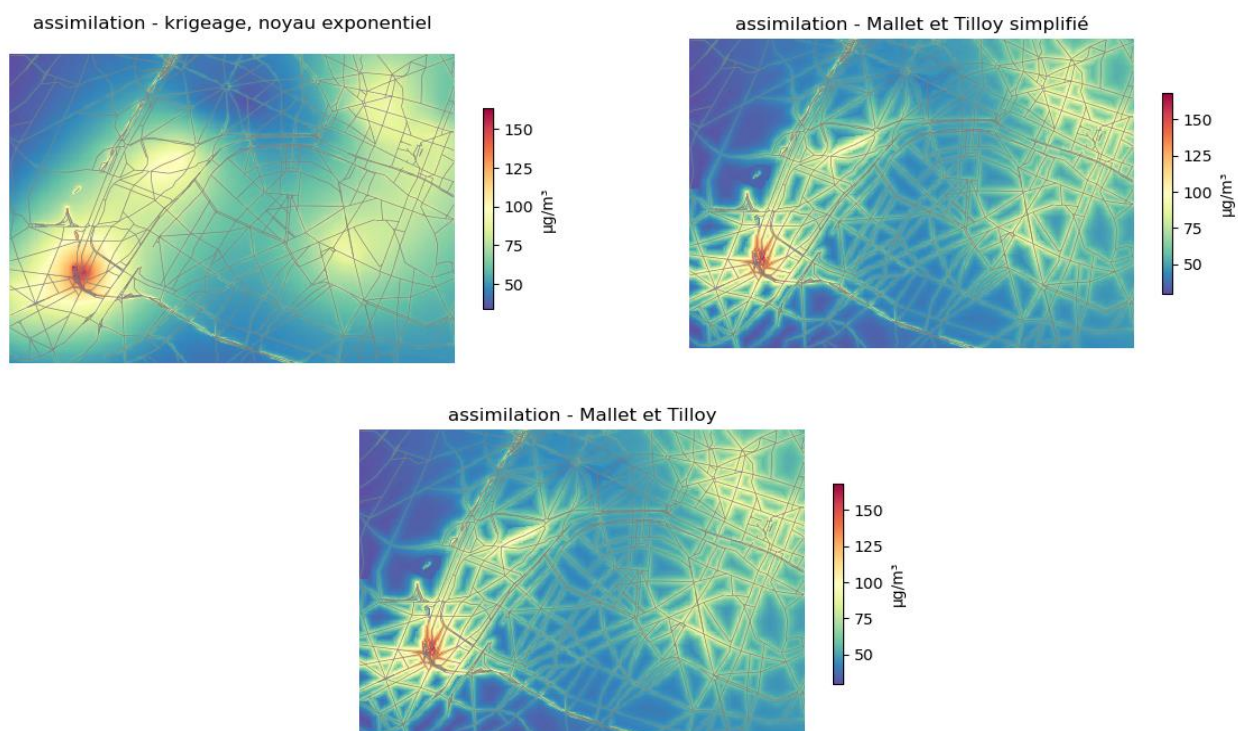


Figure 32 : Comparaisons des assimilations BLUE de données capteurs brutes PM_{10} utilisant diverses formulations de la covariance d'erreur pour la journée du 7 décembre 2020 à 10h

La formulation de la covariance d'erreur a un impact crucial sur la cartographie analysée produite, au moins sur le plan du sens physique et du réalisme visuel. Cependant, les questions algorithmiques liées au grand nombre d'observations possibles disponibles doivent encore être discutées. **Les derniers développements du projet ont permis de produire une nouvelle formulation des covariances d'erreur.** Celle-ci s'appuie directement sur la sortie du modèle à assimiler pour générer les covariances dont BLUE a besoin pour spatialiser les erreurs du modèle. Cette modélisation de covariance a l'avantage :

- d'être simple à calculer (pas de parcours de graphe routier comme chez Tilloy et Mallet)
- ne nécessite pas d'apprentissage, et ouvre donc la voie à l'assimilation de données mobiles aux positions non-connues à l'avance
- d'être physiquement réaliste, la propagation des erreurs respecte la dispersion vue par le modèle brut à assimiler (alors que la formulation de Tilloy et Mallet considère tous les axes routiers de la même manière, ce qui amène en pratique à corriger de manière exagérée les petits axes).

Cette formulation est la candidate principale pour une poursuite ultérieure des travaux. Une illustration en est présentée Figure 33.

La contrainte du nombre de relevés systèmes-capteurs assimilables heure par heure subsiste, des approches pour contourner cette difficulté seront à développer. La modélisation des incertitudes des mesures avec la différenciation de l'amplitude des incertitudes des mesures du réseau automatique d'Airparif de celles des systèmes-capteurs est également à travailler.

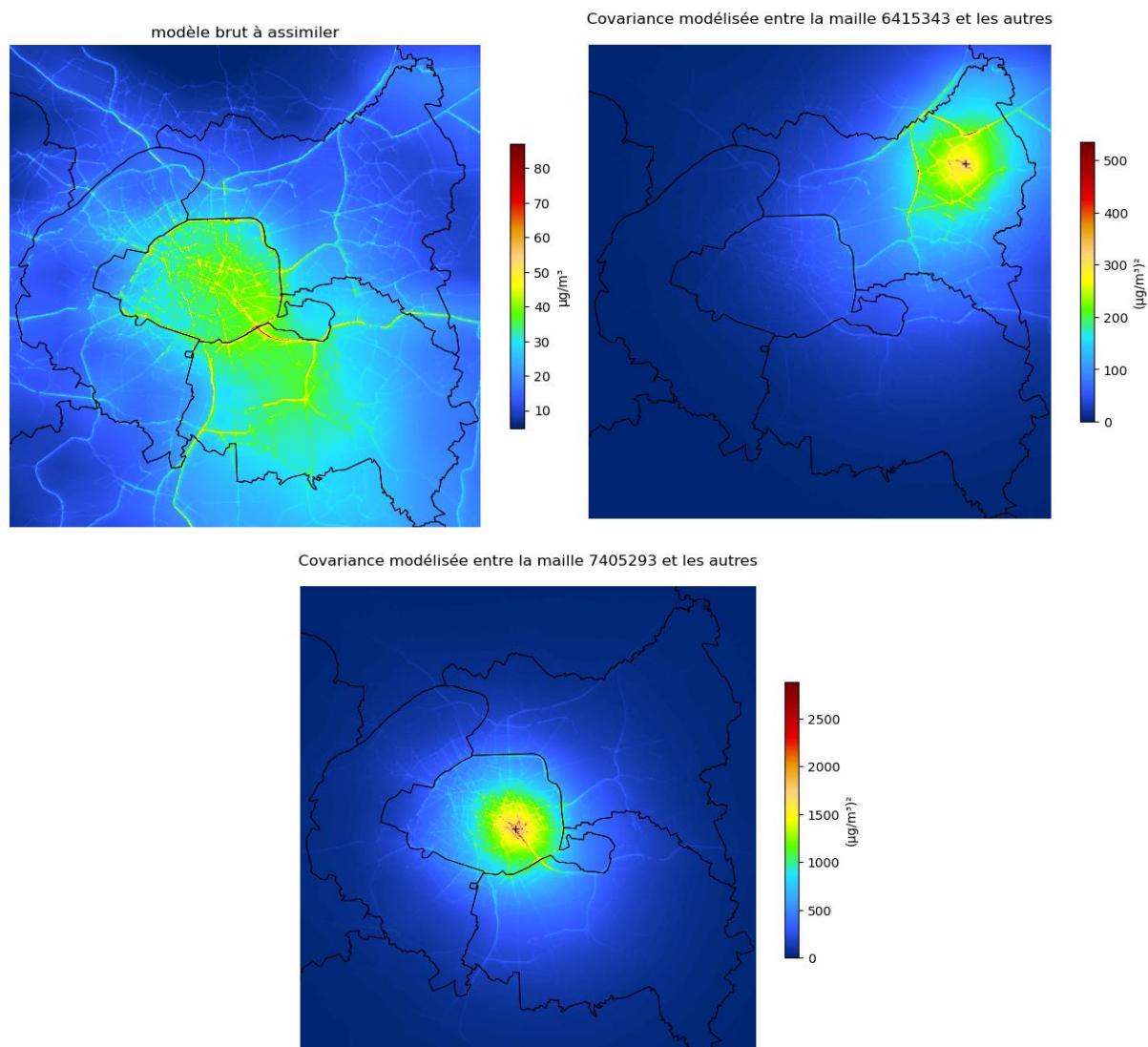


Figure 33: Exemple de deux cartes de covariances générées à la volée à partir de la carte à assimiler

Les travaux d'assimilation menés dans le cadre de l'expérimentation ont permis d'appliquer tel quel, sans séparation de domaines l'estimateur BLUE à un nombre d'observations raisonnable (plusieurs dizaines de milliers, mais inférieur à une centaine de milliers) avec une nouvelle méthode de génération de covariances d'erreur à la volée selon la géométrie du réseau routier sous-jacent.

Les perspectives pour une mise en œuvre opérationnelle d'une telle méthode sont une optimisation des paramètres géométriques, une optimisation des paramètres d'incertitudes, que ce soit l'incertitude modèle a priori (pré-assimilation) ou l'incertitude des observations (quelle amplitude d'incertitude pour les données systèmes-capteurs par rapport aux stations de référence) et d'identifier les solutions algorithmiques pour prendre en compte jusqu'à 150 000 données systèmes-capteurs présentes dans le domaine pour une heure donnée).

4. APPORT DES MESURES EN MOBILITE

L'objectif de cette partie est d'évaluer la qualité des enseignements obtenus à partir des données de concentrations en PM₁₀ et PM_{2.5} issues des systèmes-capteurs mobiles. Leurs variabilités selon la période de la journée (pointe de trafic routier du matin, heures creuses en journée, pointe du soir), et selon la

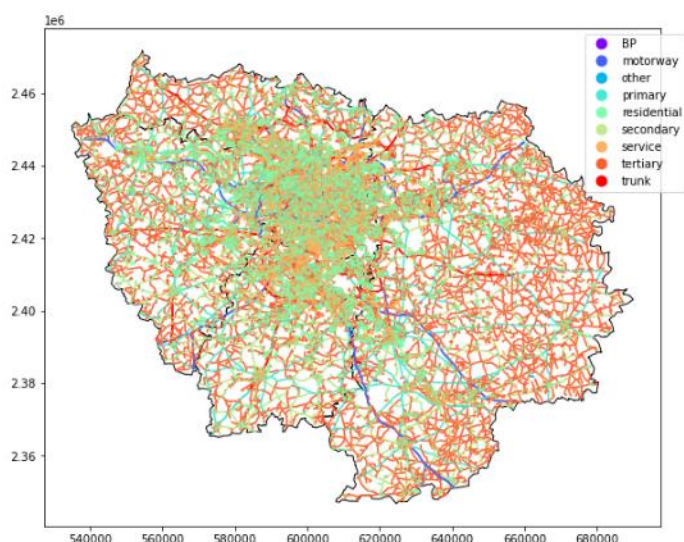
typologie d'axe routier (autoroute, axe principal, axe secondaire, axe tertiaire, axe résidentiel, Boulevard Périphérique, etc.) ont été étudiées.

4.1. Méthodologie

L'étude « Mesures et Perception » repose sur un nombre de capteurs déployés plus important, avec une mesure à un pas de temps plus fin (dizaine de secondes). Les comparaisons sont menées en prenant en compte les différences d'appareils et de périodes de mesure. Le pourcentage de données issues des systèmes-capteurs varie en fonction de l'utilisation des véhicules. Le temps d'utilisation des véhicules varie d'un véhicule à l'autre. Pour certains, ils sont utilisés le weekend.

Afin d'analyser la variabilité des niveaux selon la typologie d'axe et la vitesse du véhicule, un pré-traitement de la base de données « Mesures et Perception » a été nécessaire pour associer ces deux variables d'intérêt à la mesure du système-capteur. Pour les deux variables, la donnée GPS associée à la mesure du système-capteur a été utilisée comme donnée d'entrée. L'axe le plus proche identifié à partir du réseau routier Open Street Map (OSM) ainsi que le calcul de la vitesse du véhicule ont été associés à la mesure en mobilité dans la base de données. Le réseau routier OSM permet d'obtenir différentes informations associées aux axes routiers, dont sa typologie.

Un travail spécifique sur le réseau OSM a été réalisé afin de classer les axes selon 9 typologies : « autoroute » (« motorway »), « voie rapide » (« trunk »), « Boulevard Périphérique » (« BP »), voie principale (« primary »), « voie secondaire » (« secondary »), « voie tertiaire » (« tertiary »), « voie résidentielle » (« residential »), « voie de service » (« service ») et « autres » (« other »). La définition et quelques exemples d'axes sont présentés Figure 34. Ce travail spécifique a notamment permis de considérer les brins routiers du Boulevard Périphérique comme une typologie d'axe à part entière.



a) échelle régionale



b) échelle Paris

Figure 34 : Cartes des typologies d'axe du réseau routier issues d'Open Street Map et d'un post traitement d'Airparif

Les données issues des systèmes-capteurs récoltées lors de la campagne de mesure représentent un volume de données important ne permettant pas d'analyser toutes les données à une échelle temporelle fine.

Un échantillon d'heures représentatives de l'année 2021 a été construit, à partir d'une analyse sur les mesures PM_{10} des stations trafic du réseau d'Airparif, de 6h à 20h (heure locale) du lundi au samedi.

Pour l'analyse à l'échelle annuelle, des tests statistiques permettent de définir une taille d'échantillon de 500 heures pour être représentatif de l'échantillon total. Ceci correspond à environ 33 millions de données 10 secondes issues des systèmes-capteurs.

Les données analysées sont les données corrigées et validées (processus de correction et de validation des données détaillés au paragraphe 2) auxquelles ont été enlevées les valeurs aberrantes dites « outliers ». Sont considérées comme « outliers » les données des systèmes-capteurs inférieures au percentile 0.99 pour les 4 variables d'analyse : la mesure PM_{10} , la mesure $PM_{2.5}$, le ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ (concentration en $\mu g/m^3$) et la vitesse du véhicule (en km/h). La donnée (PM_{10} , $PM_{2.5}$, le ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$

et la vitesse du véhicule) est retirée si au moins une valeur parmi les 4 variables est supérieure au percentile 0.99 associé. Ainsi, pour chaque champ, 99 % des données sont conservées.

La validation des données des systèmes-capteurs mobiles est complexe, car il n'était pas possible d'équiper chaque véhicule avec des mesures de référence embarquées. Les résultats ont été comparés avec ceux du projet de recherche « CAPTIHV⁴ » auquel AIRPARIF a participé. A travers plusieurs campagnes de mesures en mobilité (durant l'été et l'hiver des années 2016 et 2017, ainsi que durant l'hiver 2018 pour une des tournées de véhicule), l'étude « CAPTIHV » a caractérisé les niveaux de différents polluants dont les particules en masse, à l'aide de capteurs Dust-Track. Cette comparaison a pour objectif de valider les ordres de grandeur obtenus. En effet, **les techniques de mesure sont différentes entre les deux études, et les mesures ont été réalisées à plusieurs années d'intervalle et lors de conditions météorologiques différentes, ce qui ne permet pas une comparaison fine des résultats obtenus.**

Le Tableau 25 présente la correspondance entre les 9 typologies d'axes avec celles utilisées dans l'étude « CAPTIHV ».

	Mesures et Perception	Définition et exemples	CAPTIHV
1	Motorway	Autoroute (Duplex A86, Autoroute du Nord, etc.)	Autoroute
2	Trunk	Voie rapide autre qu'Autoroute (ex : RN20, Tunnel de Boissy, etc.)	Voie rapide
3	BP	Boulevard Périphérique	Périphérique
4	Primary	Axe principal (ex : RN19, Boulevards, Avenues)	Voie principale
5	Secondary	Axe secondaire (ex : Boulevard Magenta, Paris)	Voie secondaire
6	Tertiary	Rues avec fréquentations plus importantes que la typologie résidentielle	Voie tertiaire
7	Residential	Axe desservant des zones résidentielles (ex : rues, impasses, passages, chemins, etc.)	Autre
8	Service	Axe au sein de structure à accès restreint (ex : zones industrielles, complexes d'entreprise, etc.)	
9	Other	Autres types d'axe	

Tableau 25 : Définitions et exemple des typologies d'axe utilisées au sein du projet et de l'étude CAPTIHV

La Figure 35 présente la part de chaque typologie d'axe au sein du réseau routier régional (en rouge) et la part de chaque typologie des axes sur lesquels ont été mesurées les données des systèmes-capteurs dans l'échantillon étudié (en bleu).

⁴ Projet « CAPTIHV », CORTEA 2015 (janvier 2019) <https://bibliothèque.ademe.fr/cadic/759/rapport-cortea2015-polluants-automobiles-habitacles-vehicules-2019.pdf?modal=false>

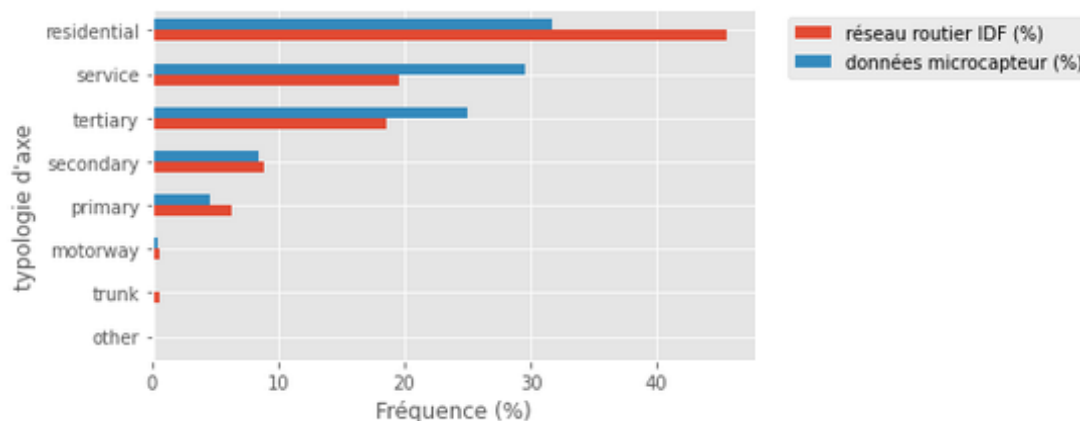


Figure 35 : Fréquence de chaque typologie d'axe (hors Boulevard Périphérique) au sein du réseau routier et fréquence des données capteurs pris en compte

- Sur l'échantillon étudié : les axes de type « résidentiel », « service » et « tertiaire » sont majoritaires. Ils représentent respectivement 31 %, 29 % et 25 % des axes parcourus.
- les axes secondaires, principal, autoroute (« motorway »), voie rapide (« trunk »), et autres, représentent collectivement moins de 15 % des axes parcourus.
- Les axes autoroute (« motorway »), voie rapide (« trunk »), où la vitesse maximale autorisée de circulation est plus élevée, représentent par ailleurs moins de 1 % des axes parcourus. La proportion de ces axes est initialement faible au sein du réseau routier.
- Concernant le Boulevard Périphérique (« BP »), 21 systèmes-capteurs ont des données associées à cette typologie d'axe. Ces données sont réparties sur un total de 182 heures différentes, néanmoins cela représente un nombre total de mesures PM₁₀ et PM_{2.5} associées au Boulevard Périphérique inférieur à 0.01 % du nombre total de données analysées.

C'est un résultat attendu car les zones des tournées de La Poste sont plutôt les zones desservies par des axes de type « tertiaire », « résidentiel » et « service ». Les autres axes de circulation sont utilisés pour rejoindre les différentes zones de tournées et aller/venir du centre de dépôt ; le temps de trajet cumulé sur ces axes peut ainsi être plus court.

L'évaluation des niveaux de PM₁₀ et PM_{2.5} sur les axes avec un faible nombre de mesures, notamment sur le Boulevard Périphérique présente une incertitude significative.

4.2. Analyse des niveaux sur une année

4.2.1. Analyse des niveaux moyens

Le Tableau 26 présente les statistiques descriptives des niveaux mesurés sur l'échantillon (valeur minimale, 1^{er} percentile, 1^{er} quartile, moyenne, médiane, 3^{ème} quartile, 99^{ème} percentile, maximum), comparées à celles de l'étude « CAPTIHV », pour les particules PM₁₀ et PM_{2.5}. Les données de l'étude « CAPTIHV » étant des données au pas de temps minute, les données Mesures et Perception (données 10 secondes) sont agrégées à la minute.

	PM ₁₀		PM _{2.5}	
	Mesures et Perception	CAPTIHV	Mesures et Perception	CAPTIHV
Min	3	4	1	4
1 ^{er} percentile	7	6	3	5
1 ^{er} quartile	17	14	7	12
Médiane	23	21	10	19
Moyenne	25	28	12	25
3 ^{ème} quartile	31	35	14	32
99 ^{ème} percentile	67	114	35	96
Max	85	1760	42	1760

Tableau 26 : Statistiques descriptives des concentrations moyennes minute ($\mu\text{g}/\text{m}^3$, arrondies à l'unité) en PM₁₀ et PM_{2.5} relevées sur un échantillon de 500 heures représentatives d'une année

Hormis la valeur maximale et celle du 99^{ème} percentile, les concentrations en PM₁₀ sont cohérentes entre les deux études. Néanmoins, les niveaux maxima sont nettement plus faibles dans l'étude Mesures et Perception. Ces écarts peuvent s'expliquer en partie par les différences sur la méthode de mesure et la méthode de validation, les outliers n'ayant pas été enlevés sur les données CAPTIHV. De plus, les niveaux mesurés en PM_{2.5} sur Mesures et Perception sont largement inférieurs à ceux de l'étude « CAPTIHV » (deux fois plus faibles en moyenne).

Les baisses des concentrations moyennes de PM₁₀ et PM_{2.5} entre l'étude « CAPTIHV » (2016 à 2017) et l'étude « Mesures et Perceptions » (2020 et 2021) pourraient également s'expliquer par la baisse des niveaux en Ile-de-France entre ces deux périodes. Une baisse est en effet observée sur la plupart des stations trafic de référence d'Airparif, comme le montrent les concentrations moyennes annuelles ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) dans le Tableau 27. Elle est liée à la baisse des émissions de particules issues du trafic routier ces dernières années. En effet, entre les années 2015 et 2019, on note une baisse de 34 % des émissions de PM₁₀ et une baisse de 46 % des émissions de PM_{2.5} pour le trafic routier.

	PM ₁₀				PM _{2.5}			
	BP EST	BP AUTEUIL	A1	RN6	BP EST	BP AUTEUIL	A1	RN6
2015	34	38	42	28	20	20	25	17
2016	31	35	42	27	18	19	21	16
2017	29	34	43	26	16	16	20	13
2018	29	40	41	25	16	17	18	14
2019	29	36	42	26	15	16	16	14
2021	29	31	NA	22	15	15	17	11

Tableau 27 : Concentrations moyennes annuelles ($\mu\text{g}/\text{m}^3$, arrondies à l'unité) en PM₁₀ et PM_{2.5} relevées sur les stations automatiques d'Airparif situées à proximité du trafic routier entre 2015 et 2021

L'année 2020 n'a pas été utilisée ici car trop atypique, compte tenu de l'impact des restrictions d'activité liées à la pandémie Covid sur les concentrations.

Les concentrations en PM₁₀ ont diminué de 6 à 20 % entre 2016 et 2021 sur les stations trafic de référence d'Airparif. Cette diminution est cohérente avec la différence observée entre les deux études (28 à 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Pour les PM_{2.5}, une baisse de 20 à 30 % est observée sur les stations de référence. C'est sensiblement moins que la différence de 50 % constaté entre les deux études.

Le Tableau 28 présente le ratio PM_{2.5} / PM₁₀ rencontré lors des campagnes de mesures « Mesures et Perceptions » et « CAPTIHV ».

	Ratio PM _{2.5} /PM ₁₀	
	Mesures et Perception	CAPTIHV
Min	0.05	0.22
1 ^{er} percentile	0.13	0.52
1 ^{er} quartile	0.39	0.85
Médiane	0.51	0.93
Moyenne	0.51	0.90
3 ^{ème} quartile	0.62	0.99
99 ^{ème} percentile	0.97	1.0
Max	1.0	1.0

Tableau 28 : Statistiques descriptives du ratio PM_{2.5}/PM₁₀ (µg/m³) en moyenne minute

Le ratio moyen PM_{2.5}/PM₁₀ obtenu sur les 500 heures d'étude est nettement inférieur à celui de l'étude « CAPTIHV ». L'analyse des ratios PM_{2.5}/PM₁₀ effectuée aux stations trafic de référence Airparif sur les 500 heures d'étude est de 0.46, ce qui est très proche de la valeur obtenue grâce aux systèmes-capteurs Atmotrack.

Un facteur explicatif de l'évolution du ratio PM_{2.5}/PM₁₀ entre les deux études, au-delà des technologies de mesure utilisées, pourrait être l'évolution de la nature des particules émises par le trafic routier. En effet, les deux sources importantes d'émission de particules (PM₁₀ et PM_{2.5}) liées au transport routier sont : la combustion des moteurs et l'abrasion des routes, pneus et freins. Les particules de plus petites tailles (PM_{2.5} et PM₁) sont principalement émises par combustion et les particules plus grossières sont davantage liées à l'abrasion. Une part plus faible des PM_{2.5} au sein des PM₁₀ indique une contribution des émissions à l'échappement (liées à la combustion) qui baisse.

Les ratios moyens PM_{2.5}/PM₁₀ sur les 4 stations de référence, présentés dans le Tableau 29, sont en effet en diminution entre 2016 et 2021. La diminution moyenne observée sur les stations de référence n'est néanmoins pas du même ordre de grandeur que celle observée entre les deux études.

	BP EST	BP AUTEUIL	A1	RN6
2015	0.60	0.52	0.59	0.62
2016	0.58	0.55	0.49	0.61
2017	0.55	0.47	0.46	0.48
2018	0.57	0.45	0.44	0.59
2019	0.56	0.45	0.39	0.55
2021	0.55	0.50	na	0.51

Tableau 29 : Ratios PM_{2.5}/PM₁₀ des niveaux annuels (µg/m³) observés sur les stations automatiques d'Airparif situées en proximité au trafic routier entre 2015 et 2021

4.2.2. Variabilité des niveaux selon la période de la journée

La variabilité des niveaux de particules au cœur du trafic routier en fonction de la période de la journée est étudiée dans ce paragraphe. La majorité des données des systèmes-capteurs ont été mesurées lors des heures creuses (55 %), celles mesurées lors de la pointe du matin représentent 27 % et celles mesurées lors de la pointe du soir représentent 18 %.

Les heures disponibles dans la base de données et affichées au sein des graphiques dans la suite du rapport sont exprimées en TU (Temps Universel). La période 6h – 20h en heure locale correspond à 4h – 18h TU en heure d'été et 5h – 19h TU en heure d'hiver.

La Figure 36 représente le profil moyen journalier des niveaux de particules sur la période de 4h à 18h TU, mesurés par les systèmes-capteurs et les stations de référence d'Airparif. Les périodes de pointe de trafic du matin (4h-7h TU) et du soir (15h-18h TU) sont colorées en mauve. La Figure 37 résume les statistiques selon les périodes de la journée.

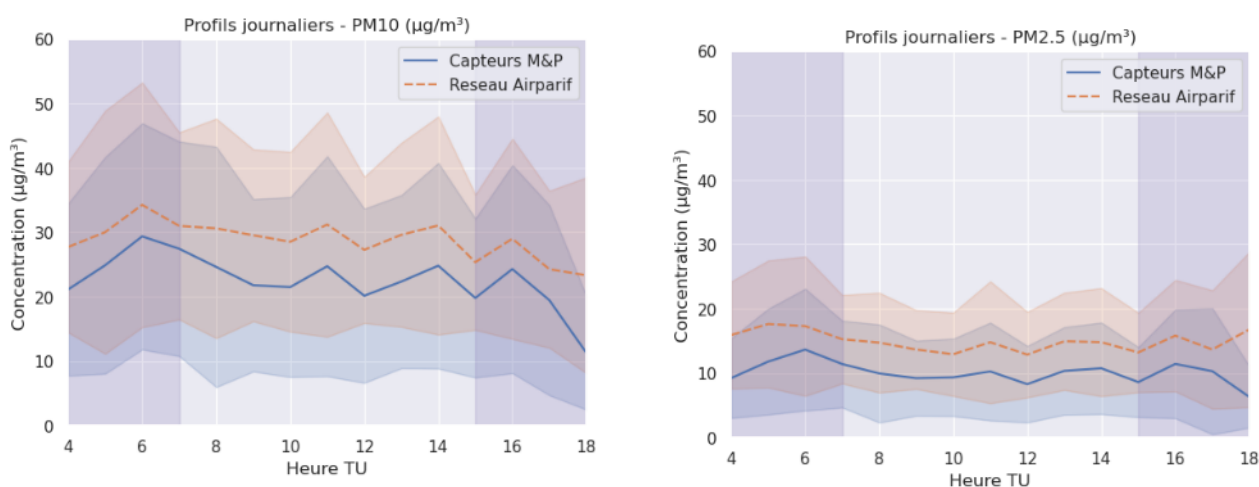


Figure 36 : Profils moyens journaliers en particules observés par les systèmes-capteurs mobiles et la moyenne des stations de référence d'Airparif à proximité du trafic (moyennes horaires et écarts-types)

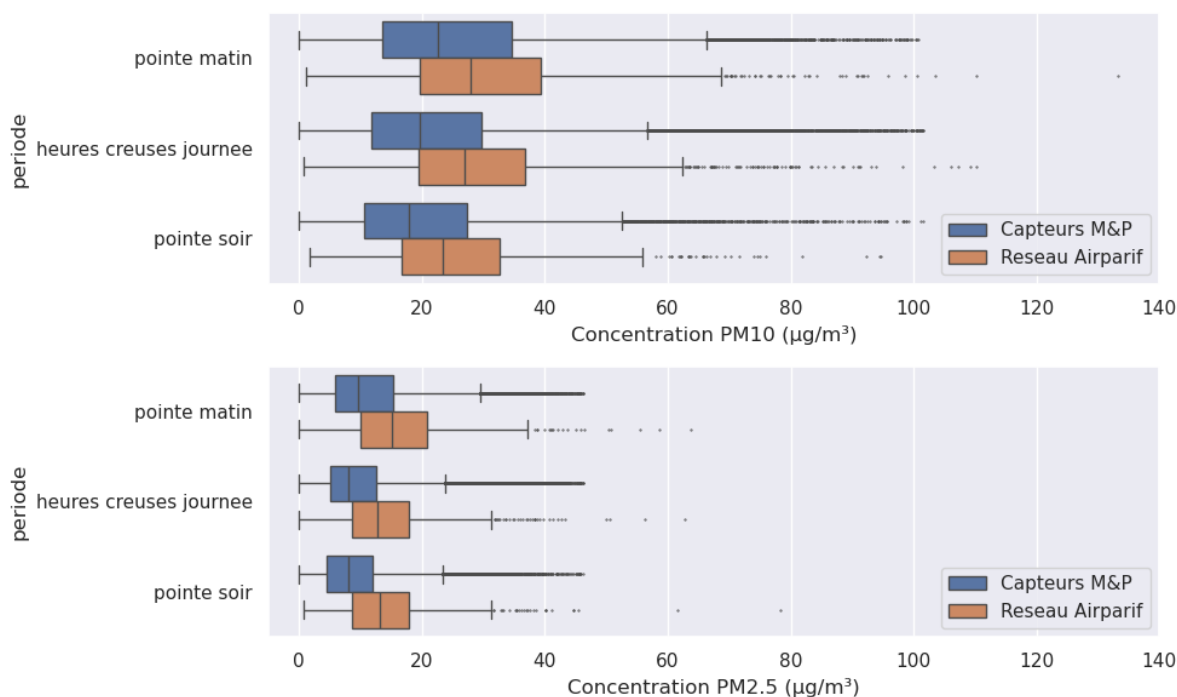


Figure 37 : Boîtes à moustache des concentrations en PM₁₀ et PM_{2.5} (en µg/m³) mesurées par les systèmes-capteurs mobiles et les stations de référence d'Airparif à proximité du trafic, en fonction de la période de la journée pour l'étude 1

L'analyse montre que la **variabilité des niveaux de particules au cours de la journée mesurés au cœur du trafic est cohérente avec celle observée aux stations de référence** : la corrélation horaire est satisfaisante, les niveaux sont plus forts le matin (particulièrement en PM_{2.5}) et les concentrations ne remontent pas le soir, voire continuent à décroître (PM₁₀).

Les statistiques montrent une grande disparité entre les niveaux mesurés par les systèmes-capteurs et par les stations de référence Airparif. Ces données étant issues de nombreux environnements (axes routiers plus ou moins chargés, distance à l'agglomération), les statistiques agrégées qui en sont issues

doivent être étudiées avec prudence. En effet, la répartition des typologies d'axes rencontrées par les systèmes-capteurs est différente de celle des stations de référence Airparif : les concentrations des systèmes-capteurs ont été mesurées sur plus de 85% d'axes de type résidentiel, « service » et « tertiaire » (Figure 34) alors que les stations de référence Airparif comporte peu de stations implantées sur ce type d'axes, et davantage de sites en bordure d'axes majeurs (BP Est, BP Auteuil, Autoroute A1...). Sur les 500 heures d'échantillonnage, les niveaux moyens heure par heure, et la distribution des valeurs par période de la journée, montrent une différence importante entre les deux sources de données ; les niveaux mesurés aux stations de référence Airparif sont globalement plus élevés que les niveaux moyens mesurés par les systèmes-capteurs mobiles. Une analyse par type d'environnement est nécessaire.

4.2.3. Variabilité des niveaux selon la typologie d'axe

Les niveaux de particules en fonction de la typologie des axes routiers est présentée en Figure 38. Dans l'ensemble des analyses suivantes, le nombre de mesures obtenues respectivement sur les typologies Boulevard Périphérique (« BP »), autoroute (« motorway ») et voie rapide (« trunk ») est nettement plus faible que pour les autres typologies. Ainsi, les différences de concentrations mises en évidence doivent être analysées avec cette considération.

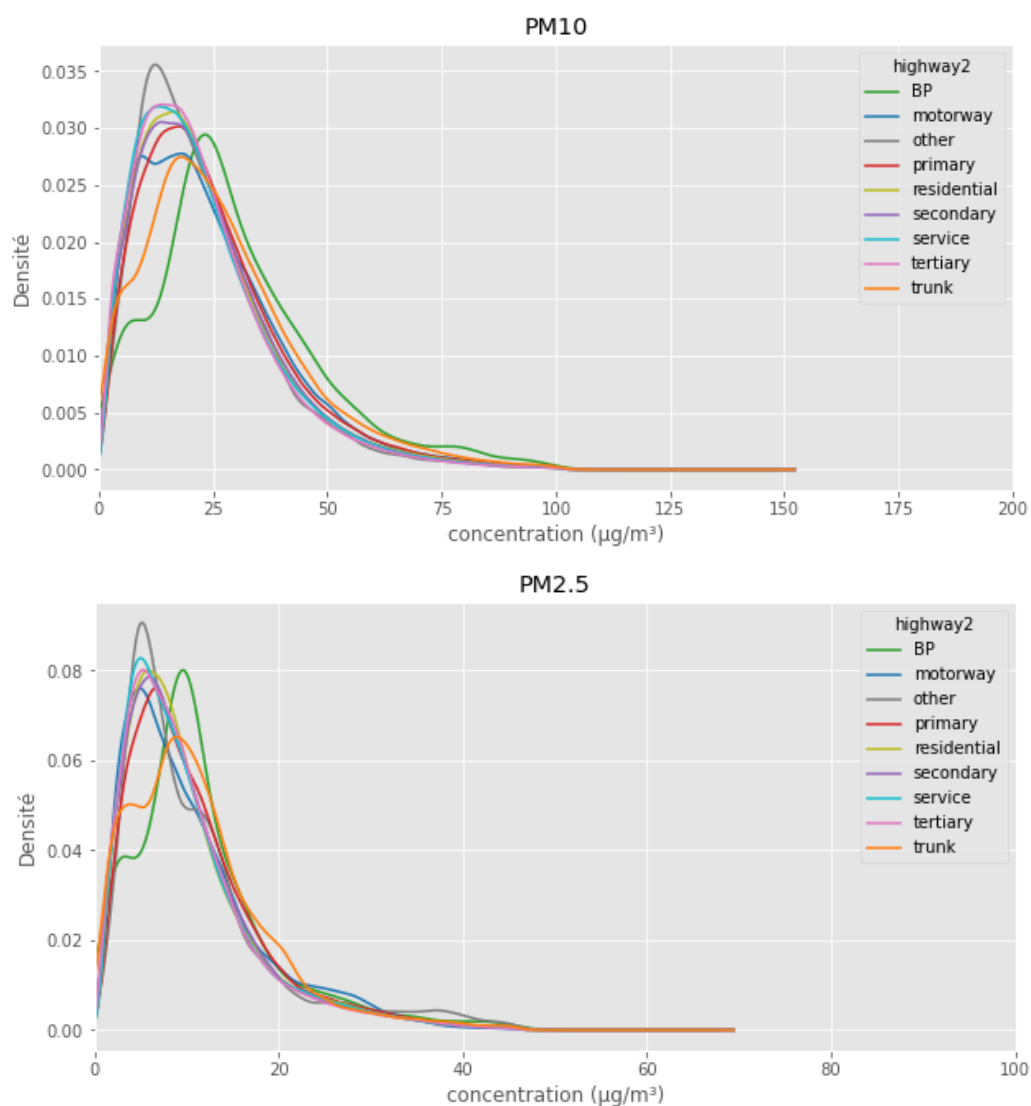


Figure 38 : Distribution (fonction de densité) des niveaux de concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en PM_{10} et $\text{PM}_{2.5}$ en fonction de la typologie d'axe

Le « mode », c'est-à-dire la concentration (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) associée au plus grand nombre de données (valeur de densité forte), est différent selon les typologies d'axe :

- Pour les axes « service », « tertiaire », « secondaire » et « résidentiel », le mode se trouve entre 5 et 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM_{10} et se trouve autour de 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les $\text{PM}_{2.5}$.
- Pour les axes de type principal, autoroute (« motorway »), voie rapide (« trunk ») et le Boulevard Périphérique (« BP ») (vitesses maximales de circulation et densités potentiellement plus élevées), le mode principal pour les PM_{10} est davantage décalé vers des niveaux de concentrations plus forts (un peu moins de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM_{10} pour le Boulevard Périphérique). De plus, des modes secondaires sont observés, notamment pour les axes de type voie rapide (« trunk ») et le Boulevard Périphérique (« BP ») pour les PM_{10} comme pour les $\text{PM}_{2.5}$.

La hiérarchisation des typologies d'axe selon les niveaux de polluants mesurés (du plus fort au plus bas) est comparée entre les études « Mesures et Perception » et « CAPTIHV ». La hiérarchie pour « Mesures et Perception » concerne les niveaux en PM_{10} et $\text{PM}_{2.5}$, et celle de « CAPTIHV » concerne les niveaux de particules en nombre ainsi que les niveaux en dioxyde d'azote.

	Mesures & Perception			CAPTIHV
	hiérarchie	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$	hiérarchie
1	Boulevard Périphérique	35	14	Boulevard Périphérique
2	Voie rapide	32	14	Autoroute
3	Autoroute	29	13	Voie rapide
4	Voie principale	27	12	Voie principale
5	Voie tertiaire	26	12	Voie secondaire
6	Voie secondaire	26	11	Voie tertiaire

Tableau 30 : Hiérarchisation des 6 typologies d'axe communes aux deux études selon les niveaux moyens de polluants mesurés (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, arrondies à l'unité).

La hiérarchie des 6 typologies selon le niveau moyen mesuré par axe entre les deux études est globalement conservée. On retrouve ainsi les niveaux les plus élevés sur les typologies « Boulevard périphérique », « Voie rapide » et « Autoroute », et des niveaux moins élevés sur les typologies « principale », « tertiaire » et « secondaire ».

L'étude de cette hiérarchie a été complétée par une analyse statistique qui s'appuie sur des tests dont l'objectif est de vérifier si les concentrations mesurées sont significativement différentes, en termes de moyenne et de distribution. Pour les PM_{10} , les tests statistiques ont montré que les catégories présentées ont des valeurs significativement différentes ce qui vient conforter la hiérarchie des résultats obtenus dans le cadre du projet « Mesures et Perception ». Pour les $\text{PM}_{2.5}$, les catégories d'axes « secondaire » et « tertiaire » ne présentent pas de différence significative, ainsi leur hiérarchie n'est pas significative.

L'analyse qui suit présente la comparaison des profils journaliers observés avec les systèmes-capteurs à ceux observés par les stations Airparif, afin de mettre en évidence si la variabilité observée par typologie d'axe grâce aux systèmes-capteurs est semblable à celle observée par les mesures de référence. Cette analyse est menée pour la typologie Voie principale (« primary »), pour laquelle des stations de référence sont disponibles (RN2, RN6, RD934 et RN20).

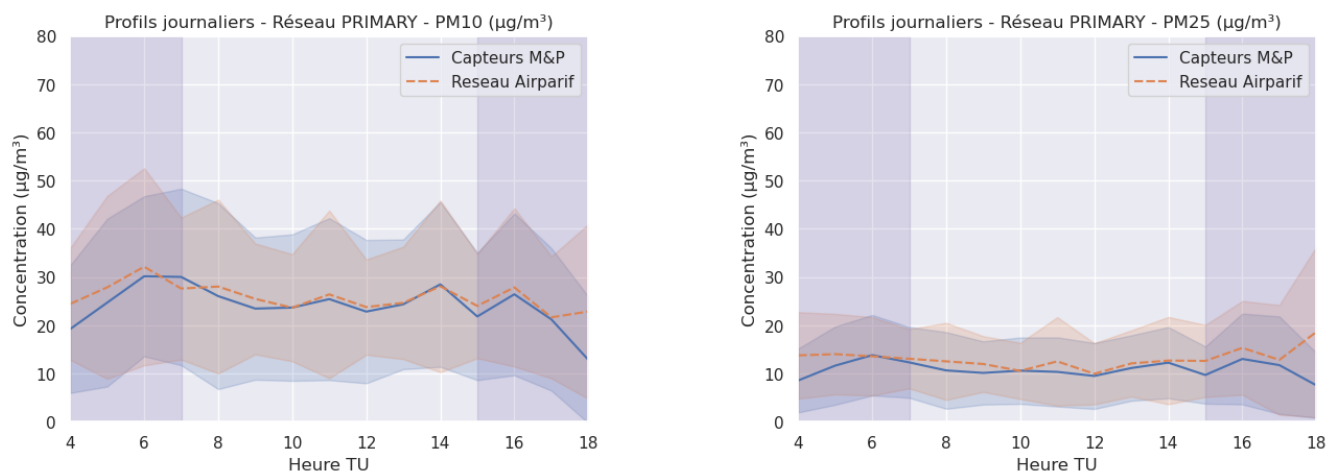


Figure 39 : Profils moyens journaliers (et écarts-types) en particules observés par les systèmes-capteurs mobiles de type primary et les stations de référence d'Airparif à proximité du trafic de même typologie

La comparaison avec les stations situées sur les axes de type « primary » (voie principale), où beaucoup de données sont mesurées par les capteurs en mobilité montrent des résultats plus cohérents que la Figure 36. En effet, les profils journaliers sont très proches.

Afin d'affiner l'analyse sur cette typologie, les données des systèmes-capteurs mesurées autour de la station RN6, située à Melun, sont comparées aux données modélisées par le système de cartographie Temps réel (chaîne de calcul Hor'air) et aux valeurs de la station, sur les heures de la journée pour le mois de janvier 2021 et juin 2021 (Figure 40). Les mailles sélectionnées sont celles où des données de systèmes-capteurs en mobilité ont été mesurées dans un rayon de 100 m autour de la station RN6 Melun, ce qui correspond à la zone où les données issues des appareils de références sont représentatives.

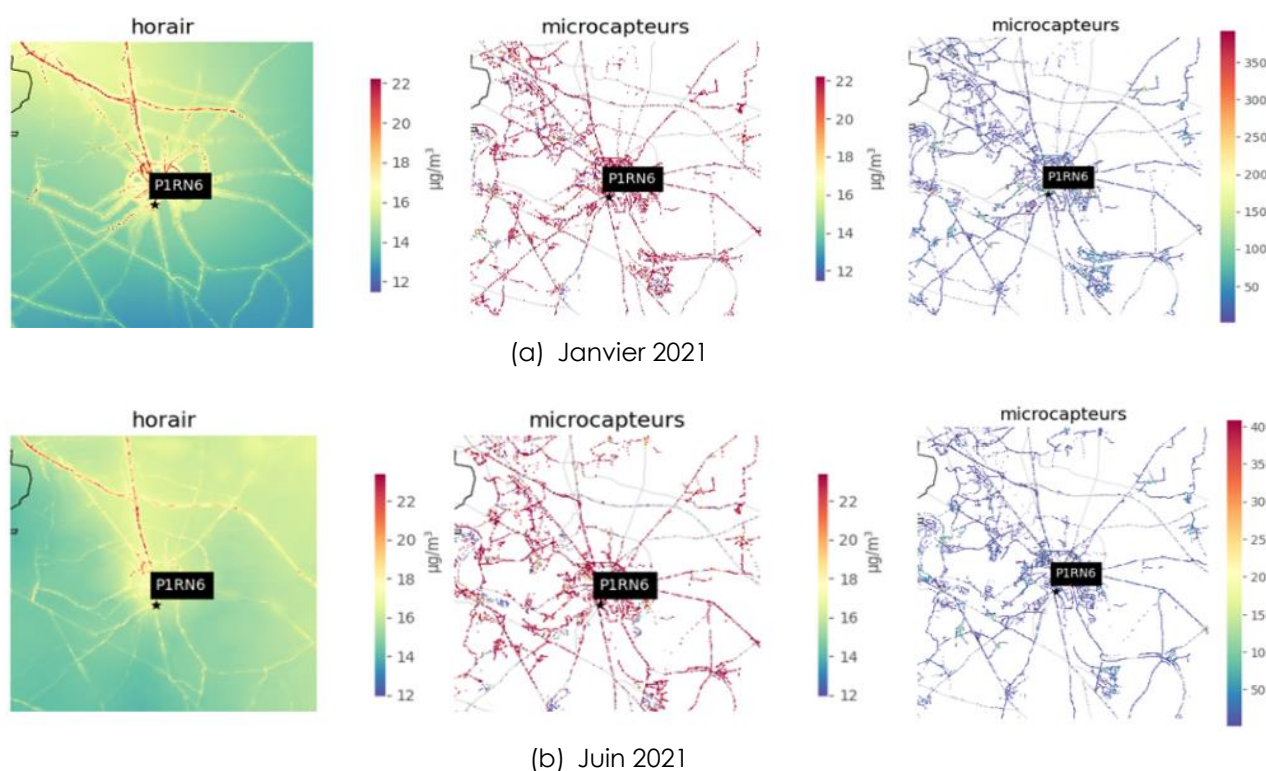


Figure 40 : Cartes des niveaux en PM_{10} modélisés par le système Cartes temps réel (Hor'air), mesurés par les systèmes-capteurs et le nombre de données capteurs par maille pour les mois de janvier et juin 2021 autour de la station RN6

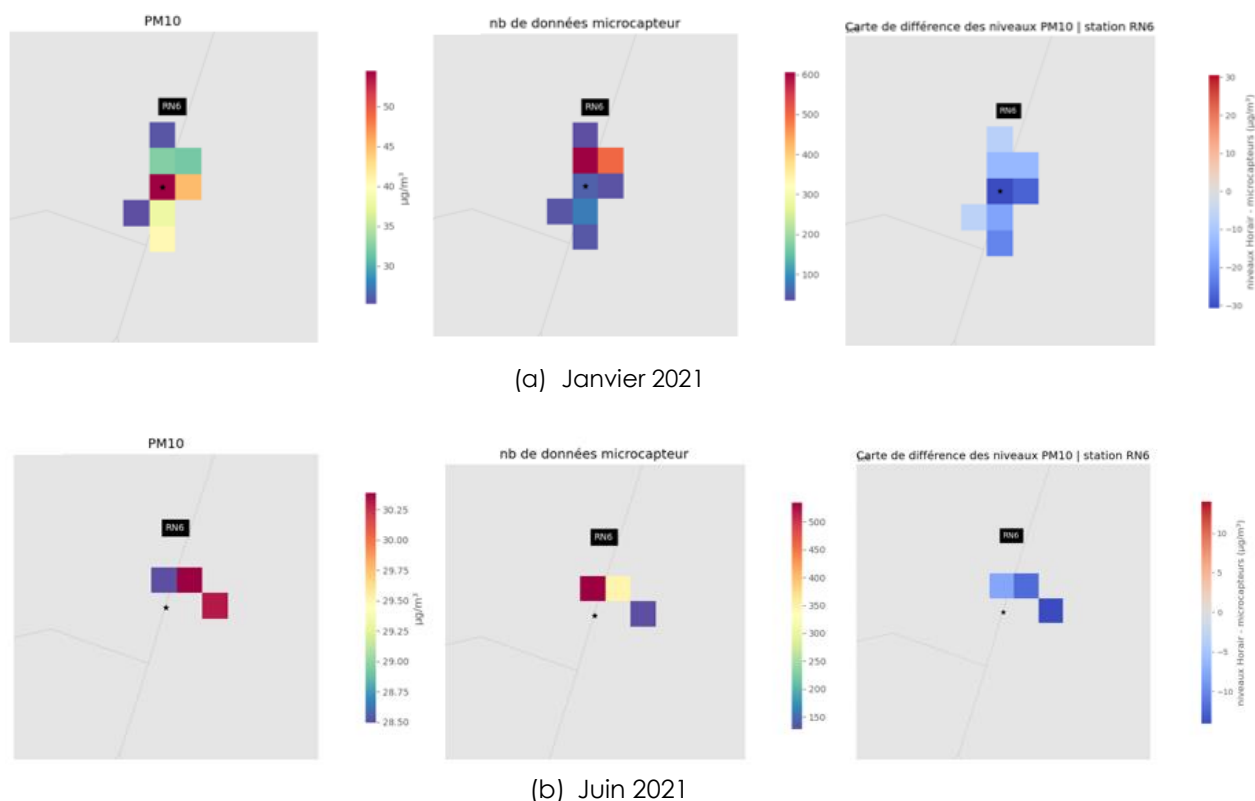


Figure 41 : Données en PM_{10} des systèmes-capteurs relevées dans un rayon de 100 mètres autour de la station RN6 et différence au système Cartes temps réel (Hor'air)

Pour le mois de janvier, le niveau moyen en PM_{10} mesuré par les systèmes-capteurs est de $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Celui modélisé par le système Cartes temps réel est de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, et le niveau mesuré par la station RN6 est de $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Pour le mois de juin, le niveau moyen en PM_{10} mesuré par les capteurs est de $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Celui modélisé par le système Cartes temps réel est de $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$, il est très cohérent avec celui mesuré par la station RN6, qui est de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Ainsi, sur le mois de janvier comme sur le mois de juin, les systèmes-capteurs relèvent autour de la station RN6 des niveaux plus forts au cœur du trafic que les niveaux modélisés par le système Cartes temps réel, et que les niveaux mesurés à la station de référence RN6. Sur la station RN6, le biais associé au système-capteur fixe installé à la station étant très faible ($1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne sur l'année 2021), les niveaux mesurés par les systèmes-capteurs en mobilité pourraient montrer la différence de concentration au cœur du trafic et au droit de l'axe.

Compte-tenu du nombre de données de systèmes-capteurs disponibles pour la typologie « Motorway », il n'est pas possible de comparer les profils moyens journaliers avec la station de référence Autoroute A1. En revanche, la comparaison au système Cartes Temps Réel peut être réalisée sur des périodes ponctuelles. Comme pour la typologie « voie principale », un zoom sur la station A1 est présenté sur la Figure 42.

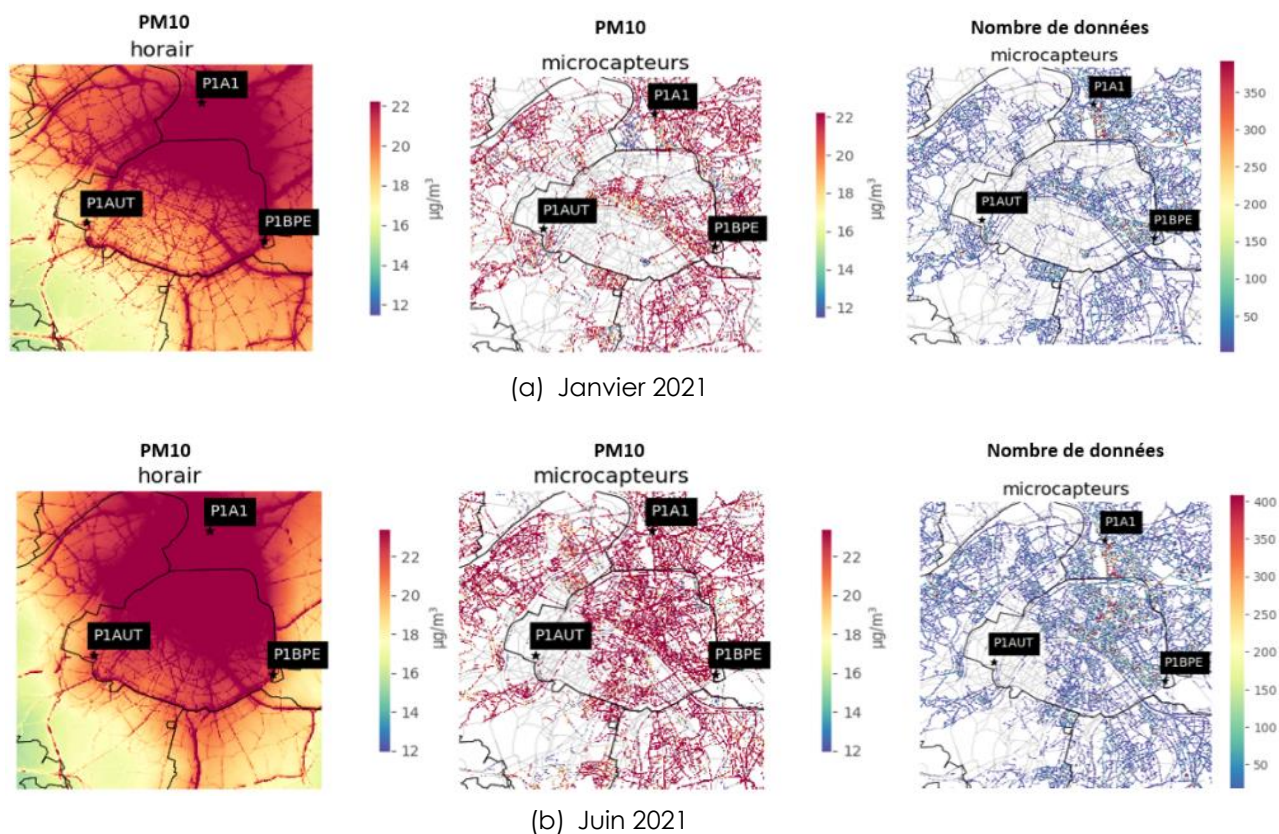


Figure 42 : Cartes des niveaux PM₁₀ modélisés par le système Cartes temps réel (Hor'air), mesurés par les systèmes-capteurs et le nombre de données capteurs par maille pour les mois de janvier et juin 2021

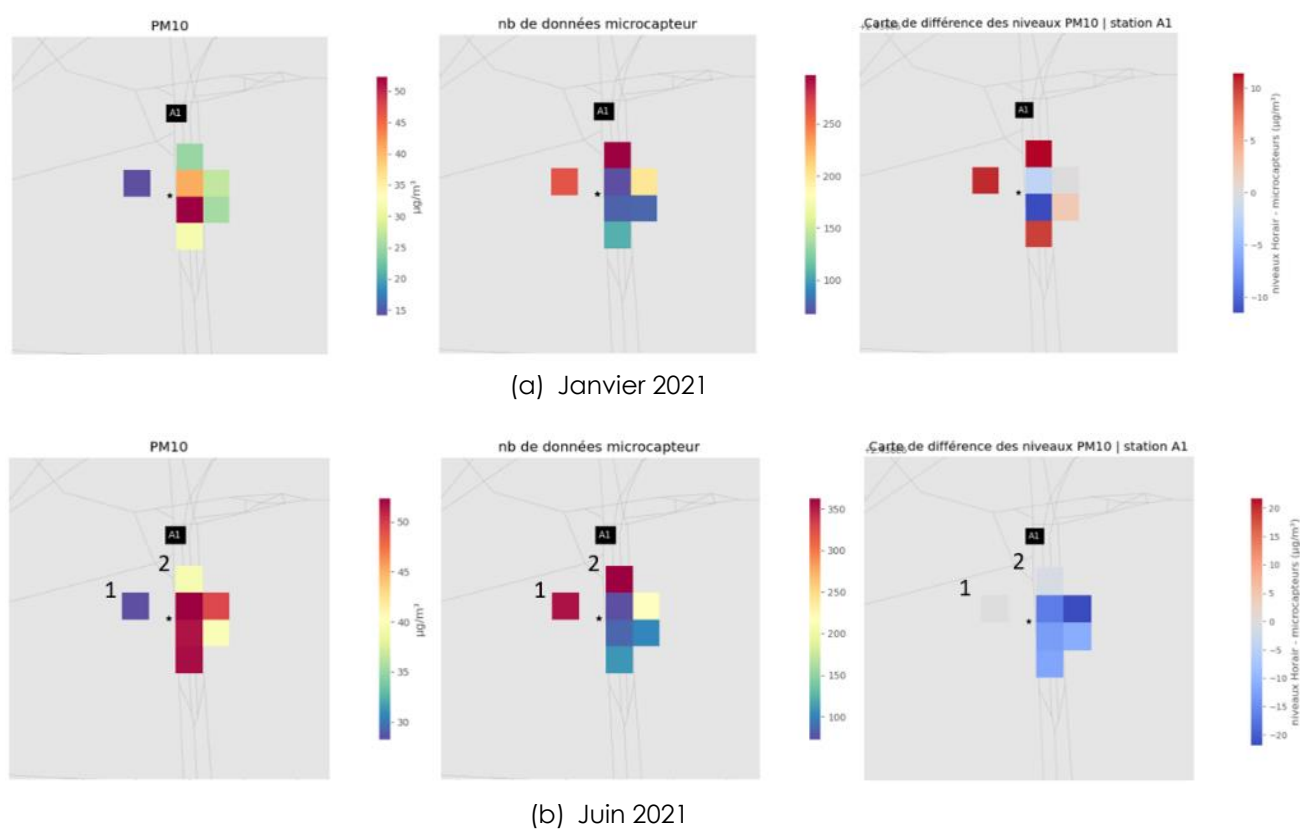


Figure 43 : Données de PM₁₀ des systèmes-capteurs relevées dans un rayon de 100 mètres autour de la station A1 et différence au système Cartes temps réel (Hor'air)

L'analyse sur le mois de janvier et celle sur le mois de juin montrent des résultats différents.

Pour le mois de janvier, les systèmes-capteurs ont relevé des mesures sur 7 mailles (résolution 50m) autour de la station A1. Les niveaux de PM_{10} sont caractérisés par une grande variabilité dans un périmètre restreint. Le niveau moyen en PM_{10} mesuré par les systèmes-capteurs dans ce périmètre est de $26 \mu g/m^3$ (moyenne pondérée par le nombre de mesures par maille) et celui modélisé par le système Cartes temps réel sur ces mêmes mailles est de $34 \mu g/m^3$. Le niveau mesuré par la station A1 sur le mois de janvier est de $38 \mu g/m^3$. Sur cette période, les systèmes-capteurs ont tendance à sous-estimer les niveaux.

Pour le mois de juin, le niveau moyen en PM_{10} mesuré par les systèmes-capteurs autour de la station A1 est de $41 \mu g/m^3$, avec des niveaux montrant moins de variabilité que pour le mois de janvier. Par ailleurs, des niveaux soutenus (supérieurs à $50 \mu g/m^3$) sont mesurés sur trois mailles consécutives. Le niveau moyen en PM_{10} estimé par le système Cartes temps réel est de $34 \mu g/m^3$, ce qui est cohérent avec le niveau mesuré par la station A1 ($35 \mu g/m^3$). Ainsi, sur le mois de juin, où les niveaux mesurés par les capteurs sont plus cohérents entre eux, les systèmes-capteurs mesurent autour de la station A1 des niveaux au cœur du trafic qui sont supérieurs à la fois aux niveaux modélisés, et à ceux mesurés par les appareils de référence à la station. Par ailleurs, les mailles associées à un grand nombre de données (mailles 1 et 2) montrent les écarts les plus faibles avec le système Cartes temps réel. Compte-tenu du faible nombre de données, il est néanmoins difficile de conclure sur cette typologie.

4.2.4. Synthèse

Les données issues des systèmes-capteurs corrigées ont pu être mesurées sur l'ensemble des typologies d'axe routier, avec néanmoins un nombre de données variable. Le faible nombre de données sur les typologies « autoroute », « voie rapide » et particulièrement sur le Boulevard Périphérique, limite la caractérisation des niveaux sur ces axes. Les nombreuses données relevées sur les typologies d'axe « principal » permettent globalement de retrouver les niveaux observés sur les stations de référence d'Airparif de même typologie. La comparaison aux résultats de l'étude CAPTIHV permet de retrouver globalement la même hiérarchie des axes, avec trois informations importantes :

- Une variabilité temporelle cohérente par rapport aux données des stations de référence du réseau.
- Des niveaux moyens PM_{10} en baisse, ce qui est cohérent avec la tendance constatée sur les stations d'Airparif ces dernières années.
- Un ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ significativement plus faible constaté dans le cadre de la campagne de mesures Mesures et Perception et globalement confirmé par les observations issues des stations de référence d'Airparif.

4.3. Recherche de facteurs d'influence à l'aide des caméras embarquées

Les mesures embarquées réalisées précédemment (Airparif, 2009) ont montré que les niveaux mesurés au cœur du trafic routier sont très dépendants des véhicules circulant autour. Une expérimentation sur l'apport de caméras embarquées a été réalisée dans le projet Mesures et Perception avec un couple de systèmes-capteurs et de caméras embarquées sur un véhicule pendant une tournée. Ce chapitre présente la méthodologie employée pour croiser les résultats des mesures des systèmes-capteurs avec des données de trafic afin de rechercher des facteurs d'influence en lien avec le trafic routier permettant d'expliquer plus avant les concentrations mesurées.

Trois campagnes de trois semaines ont été réalisées dans différents environnements :

- Tournée des Ulis, du 15 mars au 7 avril 2022, localisée dans un environnement de Grande Couronne avec passage sur autoroute ;
- Tournée de La Chapelle, du 9 avril au 6 mai 2022, en environnement parisien ;
- Tournée de Créteil, du 11 mai au 31 mai 2022, en Petite Couronne avec passage sur Boulevard Périphérique et A86.

Les données de qualité de l'air analysées sont les concentrations corrigées en particules PM₁₀ et PM_{2.5}.

Les images des caméras ont été traitées par une start-up spécialisée en méthode d'apprentissage, Probayes. Le traitement a permis d'identifier la présence, sur les images, de véhicules et de feux de circulation situés dans l'environnement. Les véhicules sont classés en 4 catégories : véhicule léger, poids lourd, deux-roues motorisé, vélo. Leur vitesse et leur position relative par rapport au véhicule effectuant la tournée sont estimées. L'état des feux de circulations (vert, orange, rouge, hors service) est également précisé.

4.3.1. Analyse des mesures de qualité de l'air pendant les tournées

Pour chaque campagne, le véhicule de la tournée est équipé de 3 systèmes-capteurs (Numéro de référence BK9Y, Q4BS, TTMT). Chacun communique des données de qualité de l'air à un pas de temps d'environ 10 secondes, de façon désynchronisée avec les autres capteurs.

La redondance de la mesure a permis d'assurer une bonne disponibilité des données, en palliant les cas de dysfonctionnement d'un système-capteur, comme observé sur la tournée de la Chapelle (pas de communication de TTMT) et sur la tournée de Créteil (dysfonctionnement de Q4BS suite à un redémarrage à mi-campagne).

Pour caractériser la qualité de l'air sur le parcours des tournées, des profils journaliers moyens ont été calculés, sur les jours de tournées, à partir des mesures PM₁₀ et PM_{2.5} des systèmes-capteurs. Ces profils sont comparés à des profils de référence (calculés les mêmes jours sur des stations de surveillance) en situation de fond et à proximité du trafic.

Les profils journaliers pour les PM_{2.5} sur la **tournée des Ulis** sont présentés en Figure 44. Le profil de vitesse permet d'identifier les moments où le véhicule est dans le trafic routier. Des profils similaires sont obtenus pour les PM₁₀ (cf. Annexe 8.A).

Ces graphes montrent :

- une bonne corrélation entre les mesures des 3 capteurs qui se traduit par des variations moyennes journalières très similaires sur les profils moyens. Cette bonne corrélation est confirmée par le calcul des coefficients de Pearson sur les séries temporelles au pas de temps 1 min : coefficients très élevés pour les PM_{2.5} (≥ 0.99) et élevés pour les PM₁₀ (≥ 0.95). Ces résultats confirment les observations du chapitre 4.3.2.;
- l'existence d'un biais entre les capteurs ;
- des niveaux plus soutenus lors de la pointe du matin (pendant que le véhicule est en tournée) et une accumulation dans la nuit (difficile à interpréter, l'environnement du véhicule pendant ses temps d'arrêt n'étant pas connu (possiblement en air intérieur)).

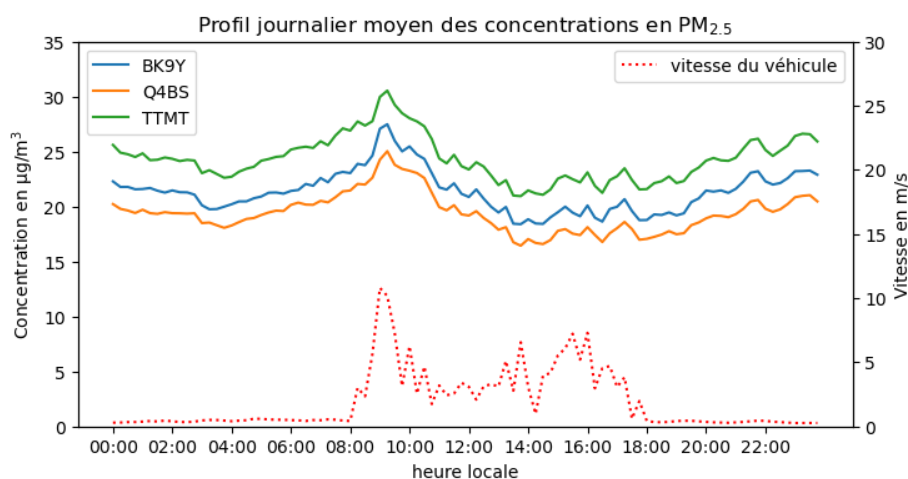
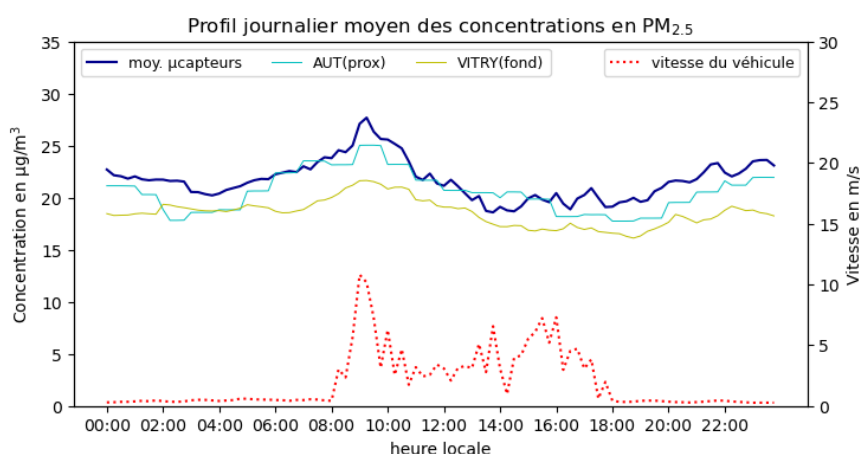


Figure 44 : Tournée des Ulis - profils journaliers moyens des concentrations en PM_{2.5} en tournée et à l'arrêt

Un profil journalier unique moyen est calculé à partir des profils donnés par les 3 capteurs et comparé à des profils issus des stations de mesures permanentes : deux stations en proximité trafic (Boulevard Périphérique Auteuil et/ou Boulevard Haussmann, selon la disponibilité des données) et une station de fond urbaine (Vitry-sur-Seine). Les résultats pour les PM_{2.5} sont présentés en Figure 45 et ceux pour les PM₁₀ en Annexe 8.

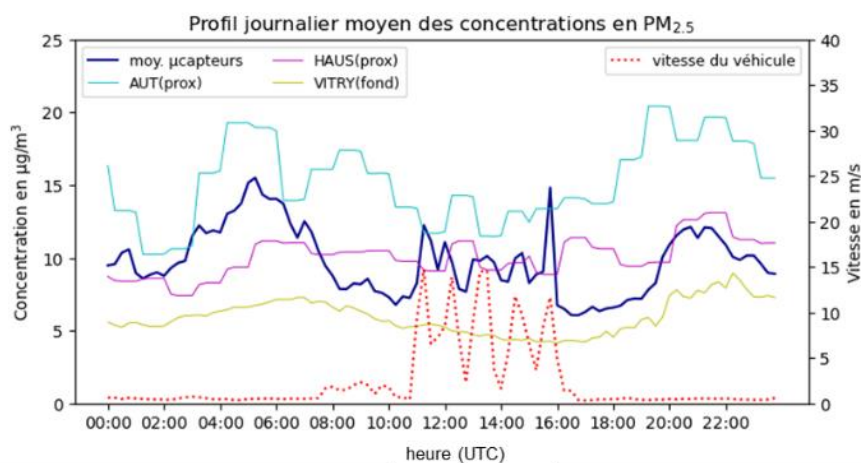


PM _{2.5}	Profil journalier		En tournée (8h-18h exclusivement)		Hors tournée	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
Moy. Systèmes-capteurs	22	1.9	22	2.7	22	1.2
BP Auteuil (trafic)	21	1.9	21	2.1	20	1.8
Vitry-sur-Seine (fond)	19	1.3	19	1.8	18	0.9

Figure 45 : Tournée des Ulis – comparaison des profils journaliers en PM_{2.5} avec des stations de référence

Le profil journalier moyen issu des systèmes-capteurs présente des niveaux et des variations similaires à une typologie de station trafic.

Les profils journaliers moyens issus des systèmes-capteurs **sur la tournée de Créteil** sont également comparés aux profils issus des stations de référence. Les profils pour les PM_{2.5} sont présentés en Figure 46 et ceux pour PM₁₀ en annexe 8. Sur cette tournée, les 3 capteurs ont fonctionné simultanément uniquement sur la première période (11 au 18 mai).



PM _{2.5}	Profil journalier		En tournée		Hors tournée	
	Moy.	Ecart-type	Moy.	Ecart-type	Moy.	Ecart-type
Moy. µcapteurs	10	2.3	9	1.7	10	2.4
Auteuil (prox)	15	2.9	14	1.9	16	3.1
Hausmann (prox)	10	1.3	10	0.8	10	1.6
Vitry-sur-Seine (fond)	6	1.2	5	0.9	6	1.1

Figure 46 : Tournée de Créteil – comparaison des profils journaliers en PM_{2.5} avec des stations de référence

Les niveaux issus des systèmes-capteurs sont plus proches des niveaux de la station trafic Hausmann que de BP Auteuil. Le profil moyen des systèmes-capteurs est plus stable lorsque le véhicule est à l'arrêt et suit des variations proches des profils des stations permanentes : augmentation des niveaux à la pointe du matin et à la pointe du soir. Lorsque le véhicule est en tournée, le profil moyen des systèmes-capteurs présente une plus forte variabilité, en lien avec les émissions du trafic routier. Hors tournée, le véhicule est probablement garé en extérieur en environnement influencé.

Sur la 2^{ème} période de la tournée de Créteil (23 au 31 mai), seul le capteur BK9Y conserve son comportement : le capteur Q4BS n'a pas communiqué et le capteur TTMT présente un signal très perturbé pendant les phases de tournées (variations d'amplitudes 2 fois supérieures BK9Y mais néanmoins corrélées avec BK9Y). Les niveaux et variations mesurés par les capteurs embarqués, au cœur de la circulation, sont globalement cohérents avec des profils à proximité du trafic.

Sur la **tournée de la Chapelle**, deux difficultés ont été rencontrées : l'absence de communication du capteur TTMT et l'absence de données lors des phases d'arrêt du véhicule. Les mesures des systèmes-capteurs étant très partielles sur la journée, il est difficile de tirer des enseignements en termes de profil journalier.

4.3.2. Analyse des données de trafic issues des caméras embarquées

Pour les trois campagnes, le véhicule en tournée a été équipé de caméras embarquées. Le traitement des vidéos a été réalisé par les équipes de Probayes, à l'aide de méthodes d'apprentissage. A l'issue de ce traitement, chaque ligne des fichiers de sortie correspond à la détection d'un véhicule situé dans l'environnement, et pour lequel sont notamment précisés :

- l'instant de détection
- un identifiant unique
- une classification parmi 4 catégories : véhicule léger, poids lourd, deux-roues motorisé, vélo
- la position relative et la distance par rapport au véhicule de tournée
- sa vitesse.

D'autres sorties, agrégées à chaque pas de temps, sont également calculées et indiquent le nombre de véhicules et de feux de circulation dans l'environnement du véhicule de tournée. Les images des caméras ne sont traitées que lorsque le véhicule est en mouvement.

Les données sont obtenues avec un pas de temps très fin (environ 3 images décrites par seconde). En vue de leur croisement avec les données de qualité de l'air (au pas de temps de 10 s), les données d'environnement sont agrégées au pas de temps 5 s, ce qui permettra d'associer chaque mesure issue des capteurs aux événements situés dans l'environnement du véhicule dans les 5 secondes précédant la mesure. Cette agrégation au pas de temps 5 secondes a été possible au niveau des véhicules, qui disposaient d'un identifiant unique évitant leur double comptage. Ce traitement n'a pas pu être réalisé sur les données de feux de circulation, en l'absence de labélisation par un identifiant.

Les données au pas de temps 5 secondes obtenues contiennent :

- le nombre total de véhicules, par catégorie motorisée (véhicule léger, poids lourd, deux-roues motorisé), à trois périmètres : 5, 15 et 30 mètres, qui ont été identifiés autour du véhicule de tournée pendant 5 s ;
- la vitesse moyenne de ces véhicules, par catégorie et par périmètre.

Ces données agrégées de trafic sont analysées pour chaque campagne, et les résultats sont présentés dans ce paragraphe pour la tournée de Ulis et en annexe 8.B pour les deux autres tournées.

Les données des caméras ne sont disponibles que pendant les phases de déplacement du véhicule, la couverture des plages des tournées par les données est par conséquent assez faible. Les plages de disponibilité des données caméra sur la tournée des Ulis sont présentées Figure 47. Sur cette tournée, les données au pas de temps 5 s, représentent 30 h. Les tournées ayant lieu de 8 h 45 à 17 h (heure locale) sur 14 jours, les données des caméras couvrent 26% des plages des tournées (50 % sur la tournée de Créteil).

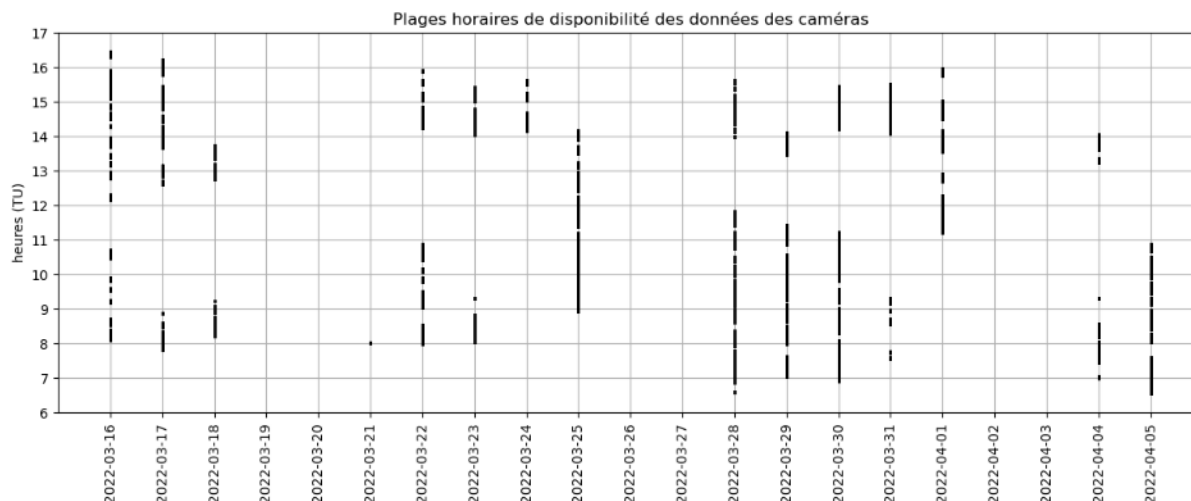


Figure 47 : Tournée des Ulis – plages horaires de disponibilité des données des caméras

Pour chaque catégorie de véhicule et pour chaque périmètre, les histogrammes du nombre d'occurrences des valeurs prises par les grandeurs *Nombre de véhicules / Vitesse moyenne des véhicules* sont représentés Figure 48 et Figure 49 pour la tournée des Ulis et en Annexe 8.B pour les autres tournées.

La situation la plus fréquente est la présence d'aucun ou d'un véhicule autour du véhicule de tournée. Les véhicules les plus représentés sont les véhicules légers : il y a en moyenne 4.0 véhicules légers dans un périmètre de 30 m, 2.1 véhicules légers dans un périmètre de 15 m et 0.4 véhicules légers à moins de 5 m. Les véhicules de l'environnement ont en moyenne des vitesses relativement faibles : 2.8 à 6.1 m/s.

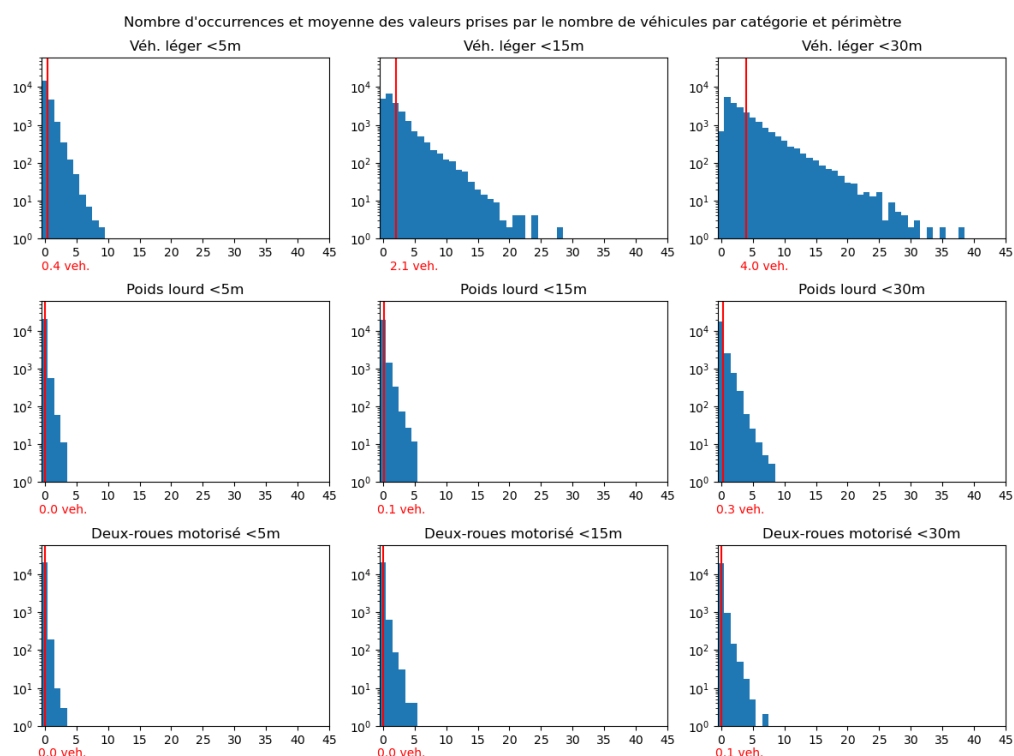


Figure 48 : Tournée des Ulis - nombre d'occurrences et moyenne des valeurs prises par la variable de nombre de véhicules par catégorie et par périmètre

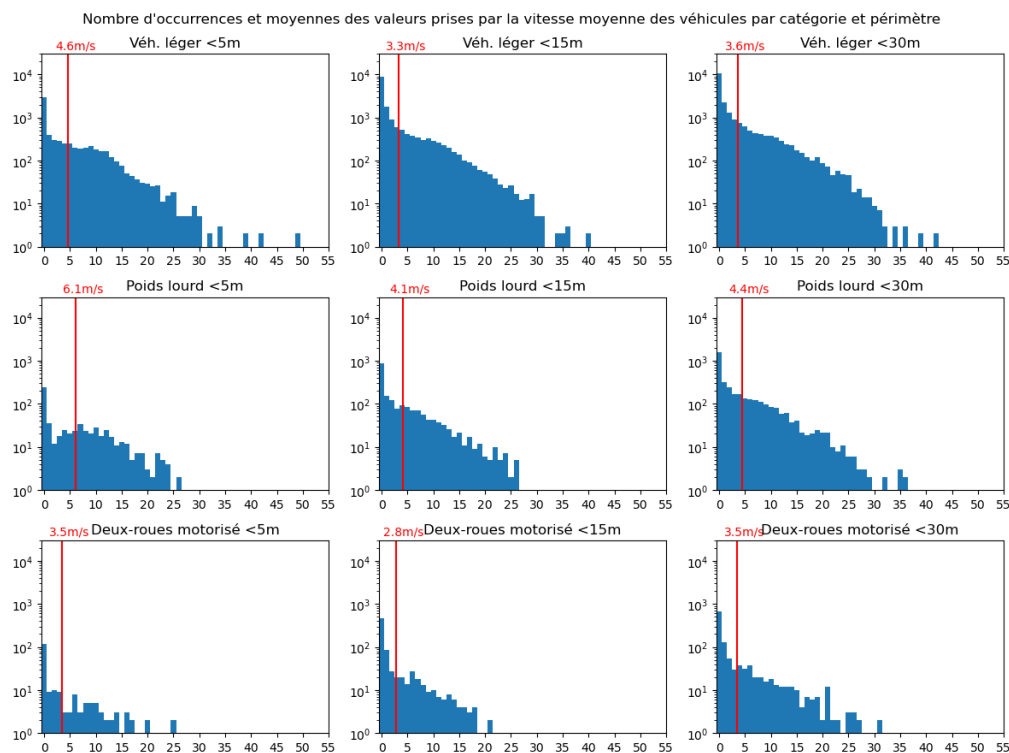


Figure 49 : Tournée des Ulis - nombre d'occurrences et moyenne des valeurs prises par la variable de vitesse moyenne des véhicules par catégorie et par périmètre

Les profils moyens journaliers (Figure 50) confirment que les véhicules légers sont en moyenne plus fréquents dans l'environnement du véhicule que les poids-lourds et les deux-roues motorisés. Les profils temporels présentent peu de variabilité sur la durée de la tournée, avec des moyennes légèrement plus faibles en milieu de journée.

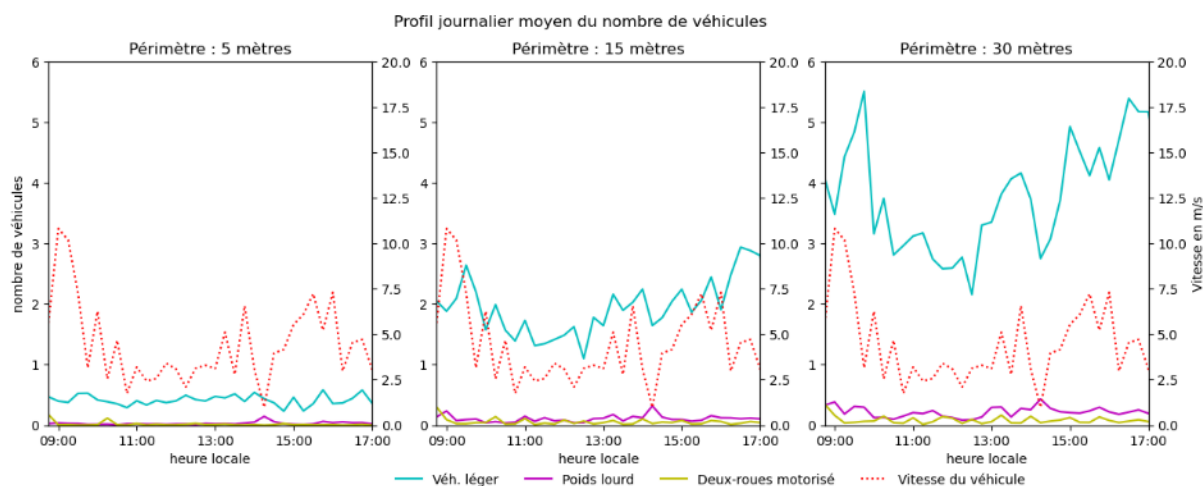


Figure 50 : Tournée des Ulis – profils journaliers moyens du nombre de véhicules par catégorie et par périmètre

Les données de nombre de véhicules légers et leur vitesse moyenne dans un périmètre de 30 m sont projetées sur une grille de résolution 50 m x 50 m. Les cartes obtenues (Figure 51) sont cohérentes spatialement, avec l'identification de zones plus denses en véhicules légers au niveau :

- des centres-villes des Ulis et de Palaiseau ;
- des axes N118, D988.

Les zones à plus faibles vitesses se retrouvent dans les cœurs de villes et à vitesses plus élevées sur les axes N118 et D35.

Les conclusions sur les 2 autres campagnes, dont les résultats sont détaillés en annexe 8.B, sont similaires à la campagne des Ulis :

- la couverture des plages des tournées par les données est assez faible : 26% à 50% ;
- le type de véhicule le plus fréquemment détecté est le véhicule léger. Les poids-lourds et les 2-roues motorisés sont les moins représentés, sauf pour la tournée de la Chapelle où les deux-roues motorisés sont davantage représentés sur les après-midis ;
- les profils moyens journaliers présentent peu de variabilité sur la journée, si ce n'est un léger creux en milieu de journée ;
- sur les cartes, les zones à fortes vitesses correspondent bien aux grands axes de circulations et à faibles vitesses aux centres-villes. Les zones à forte densité de véhicules coïncident soit avec les grands axes soit avec les centres-villes.

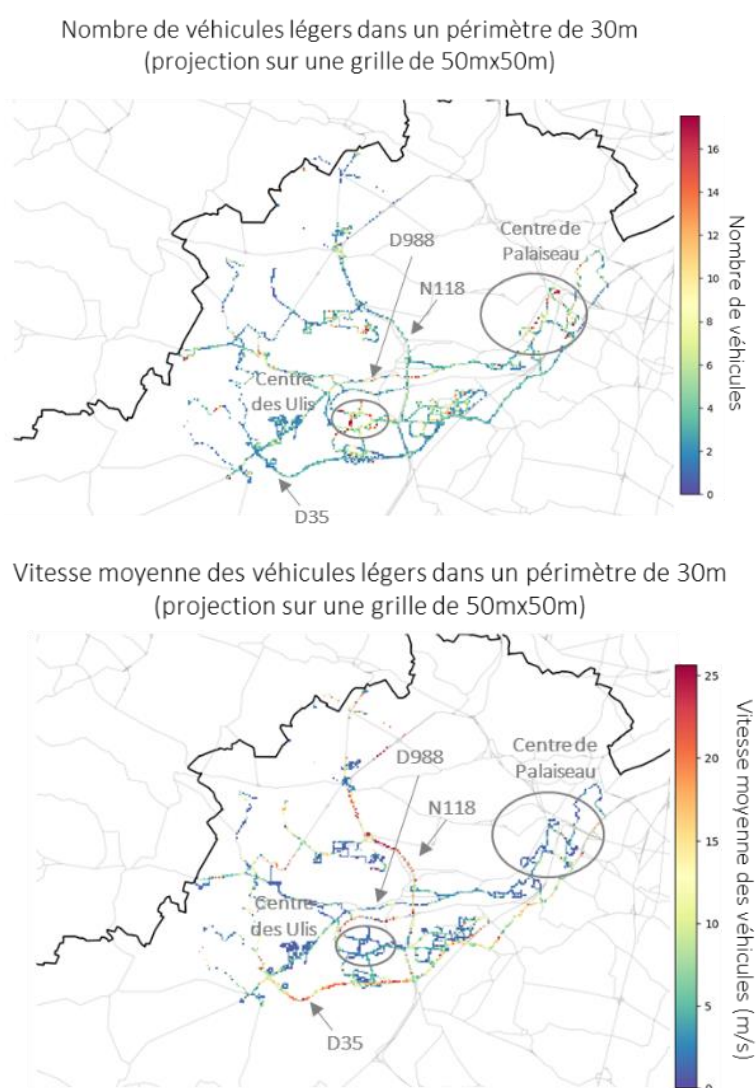
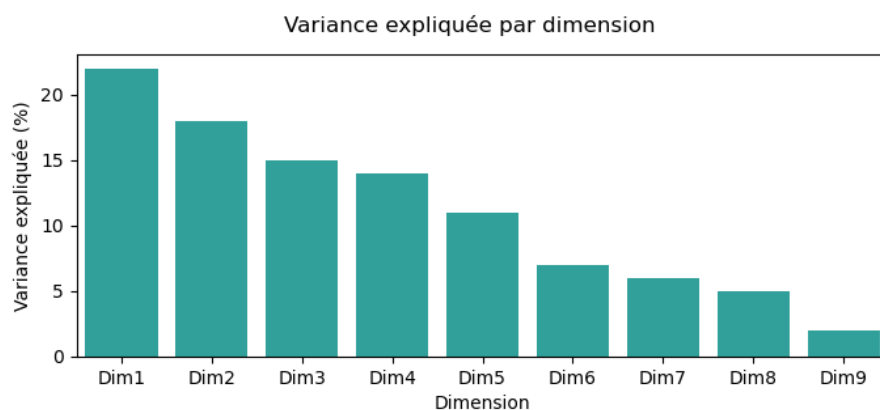


Figure 51 : Tournée des Ulis - projection des variables de trafic sur une grille de résolution 50mx50m

4.3.3. Croisement des mesures de qualité de l'air et des données de trafic

La recherche de facteur d'influence sur l'ensemble du jeu de données n'a pas donné de résultats satisfaisants. Les Analyses en Composantes Principales (ACP) – qui permettent de visualiser les relations entre variables – n'ont pas permis de lier les variables des systèmes-capteurs et des caméras.

A titre d'exemple, sur la tournée des Ulis, l'ACP est menée sur les données du système-capteur BK9Y en PM₁₀ et PM_{2.5} et les paramètres de trafic à 30 mètres (nombre et vitesse des véhicules par type). Les 5 premières dimensions expliquent, de façon cumulée, 80% de la variance du jeu de données.



	Dim1	Dim 2	Dim 3	Dim 4	Dim 5
nb_Car_30m	-0.29	-0.05	0.18	-0.05	0.93
nb_Truc_30m	-0.34	0.27	0.46	-0.59	-0.08
nb_Moto_30m	0.05	0.10	0.65	0.48	-0.09
v_Car_30m	-0.37	0.65	-0.38	0.29	-0.08
v_Truc_30m	-0.37	0.47	0.30	-0.51	-0.15
v_Moto_30m	-0.02	0.18	0.60	0.53	-0.03
vitesse_corrigeée	-0.50	0.59	-0.31	0.28	0.11
BK9Y_PM25	0.81	0.47	0.01	-0.11	0.12
BK9Y_PM10	0.78	0.52	-0.01	-0.10	0.15

Figure 52 : ACP – explication de la variance et matrice des composantes

Les données qualité de l'air (variables BK9Y_PM10 et BK9Y_PM25) sont bien représentées par la 1^{ère} dimension, mais ne sont que très peu représentées par les autres dimensions (Figure 52). Les cercles de corrélation sur les 5 premières dimensions sont disponibles en Annexe 8.C. Des résultats similaires sont obtenus aux périmètres 15 m et 5 m et au niveau des autres tournées.

Néanmoins, en restreignant la recherche de facteur d'influence aux plages de concentrations les plus fortes, il est possible d'associer les situations de niveaux élevés en PM_{2.5} aux moments où la densité de véhicules dans l'environnement est plus importante.

Pour cette analyse, la distribution des variables de trafic (nombre de véhicules dans un périmètre de 30 m et de 15 m) dans deux situations sont retenues :

- sur l'ensemble des plages de concentration en PM_{2.5} (ensemble des points de la Figure 53)

- uniquement sur les niveaux soutenus en $PM_{2.5}$: concentration $> 60 \mu g/m^3$ (points rouges de la Figure 53)

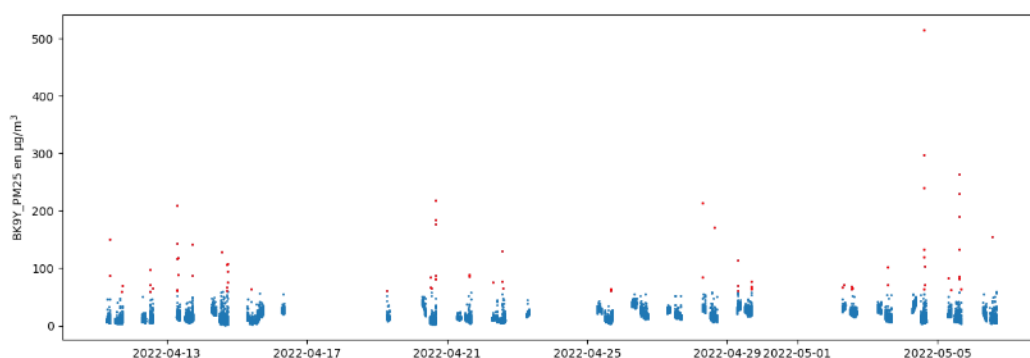


Figure 53 : Série temporelle en $PM_{2.5}$ (capteur BK9Y) : en rouge les concentrations $> 60 \mu g/m^3$

Les boxplots correspondant à la répartition des variables *nombre de véhicules* dans ces 2 situations sont présentés en Figure 54. Les boxplots indiquent que **les concentrations élevées en $PM_{2.5}$ sont associées à des densités de véhicules plus importantes dans les périmètres 30 m et 15 m autour du véhicule de tournée.**

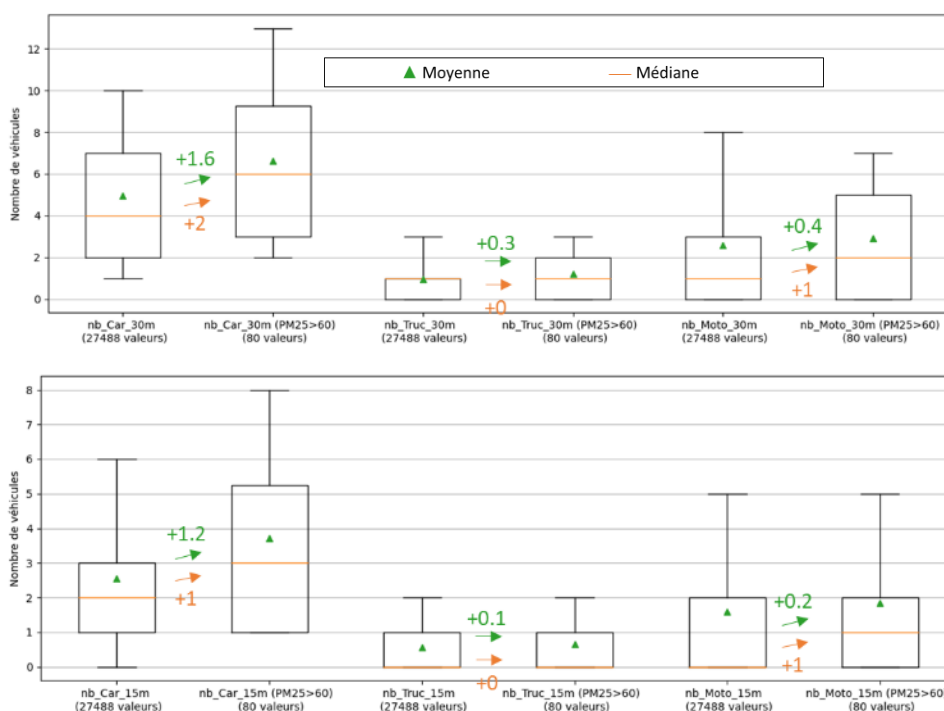


Figure 54 : Boxplot des variables de trafic (nombre de véhicules par type) correspondant à l'ensemble des concentrations $PM_{2.5}$ et aux concentrations élevées ($>60 \mu g/m^3$)

Les mêmes analyses sont réalisées sur les PM_{10} avec des résultats moins marqués. Les mêmes analyses sont réalisées sur les vitesses, sans montrer de tendance. Les résultats, similaires pour les autres tournées, sont présentés en Annexe 8.C.

Les données de qualité de l'air, les données de trafic et leur association présentent un certain nombre de limites, qui ont restreint la portée de la recherche de facteur d'influence :

- les particules étant un polluant multi-sources, elles ne sont pas uniquement un marqueur de trafic routier ;
- la mesure des particules par méthode optique ne couvre ici que les particules de diamètre supérieur à 250 nm ; alors que le nombre majoritaire de particules associées aux émissions de motorisation se situe dans des classes granulométriques inférieures à 50 nm ;
- les catégories de véhicules sont limitées (pas de distinction de gabarits dans les véhicules légers, pas de catégorie spécifique pour les autobus et autocar) et mélangent les motorisations ;
- il n'est pas possible de distinguer au niveau des données de trafic un véhicule à l'arrêt en stationnement d'un véhicule à l'arrêt dans un embouteillage.

5. IMPACT ENVIRONNEMENTAL

5.1. Durée de vie des capteurs

Afin d'étudier le comportement à long terme, les données des 16 systèmes capteurs déployés au niveau des stations de mesure d'Airparif ont été exploitées (BP Porte d'Auteuil, Paris 1^{er} Les Halles, Bd Haussmann, Gennevilliers, RUR-Nord, RN2, Vitry-sur-Seine, Autoroute A1, RN6, Gonesse, Tremblay-en-France, Champs Elysées, RD934, RN20, RUR-Sud Est). Elles présentent les séries parmi les plus longues de la campagne.

L'analyse est effectuée pour les capteurs de particules (PM_{2,5} et PM₁₀) et pour les deux technologies de capteurs pour la mesure du NO₂ (électrochimique et semi-conducteur). Afin d'identifier une éventuelle perte de performance des unités de capteur dans le temps, l'évolution des différentes métriques suivantes a été analysée : corrélation, erreur absolue et relative, pente et ordonnée à l'origine pour une régression linéaire et rapport des écarts interquartiles par rapport aux mesures de référence des stations de mesure d'Airparif correspondantes. Les définitions de ces métriques peuvent être consultées dans l'annexe 9. Les résultats sont présentés dans les paragraphes suivants.

Afin de compléter cette analyse et d'en tirer des conclusions générales, le nombre de systèmes-capteurs déployés sur les stations Airparif étant relativement faible par rapport à la taille du déploiement complet, la même analyse statistique a été effectuée sur l'ensemble des capteurs déployés, en utilisant les sorties du système « Cartes temps réel » pour chacun de leurs emplacements comme donnée de référence. Les résultats obtenus par ces deux approches sont cohérents entre eux. Les résultats pour les statistiques utilisant les stations de référence et les sorties de modélisation sont répertoriés dans l'annexe 9.

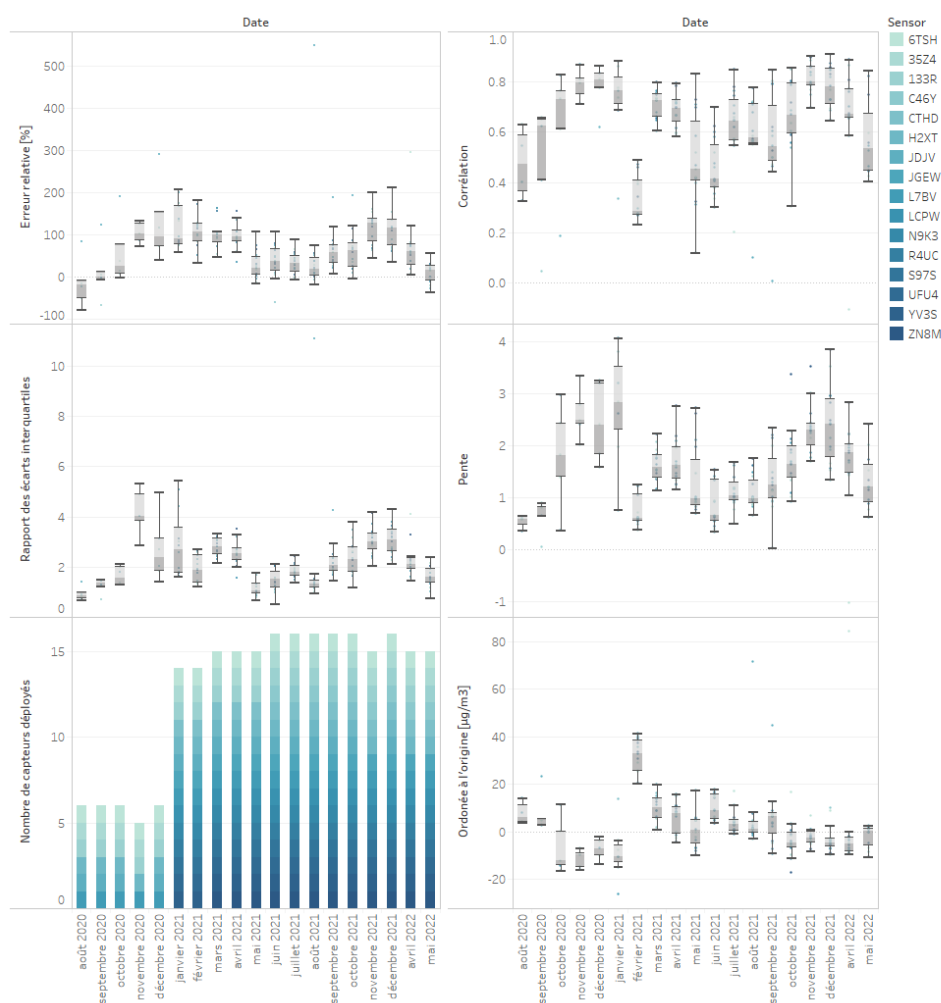


Figure 55 : Résultats statistiques des métriques considérées pour les systèmes-capteurs PM₁₀ déployés sur les stations de référence par rapport aux mesures de référence.

Aucune détérioration de performance statistiquement significative n'a été observée pour les capteurs de particules PM₁₀, toutes les mesures étudiées conservant des niveaux similaires entre le début et la fin de la campagne de mesure, en tenant compte des effets saisonniers des facteurs d'influence (par exemple, l'humidité et la nature des sources d'émission). Les facteurs d'influence environnementaux sont la principale source de variation de performance à moyen terme avec tous les capteurs, quelle que soit la date initiale de leur déploiement, subissant une perte relative de performance pendant la saison froide et récupérant de la même manière pendant la saison chaude (voir Figure 55). Les déviations par rapport aux mesures de référence (et aux sorties des modèles) se caractérisent par une surestimation des niveaux de concentration plus importante sur les mois froids par rapport aux mois chauds, illustrée le plus visiblement par le rapport des écarts interquartiles et la pente de régression.

Les résultats pour les PM_{2.5} sont similaires et peuvent être consultés dans l'annexe 9.

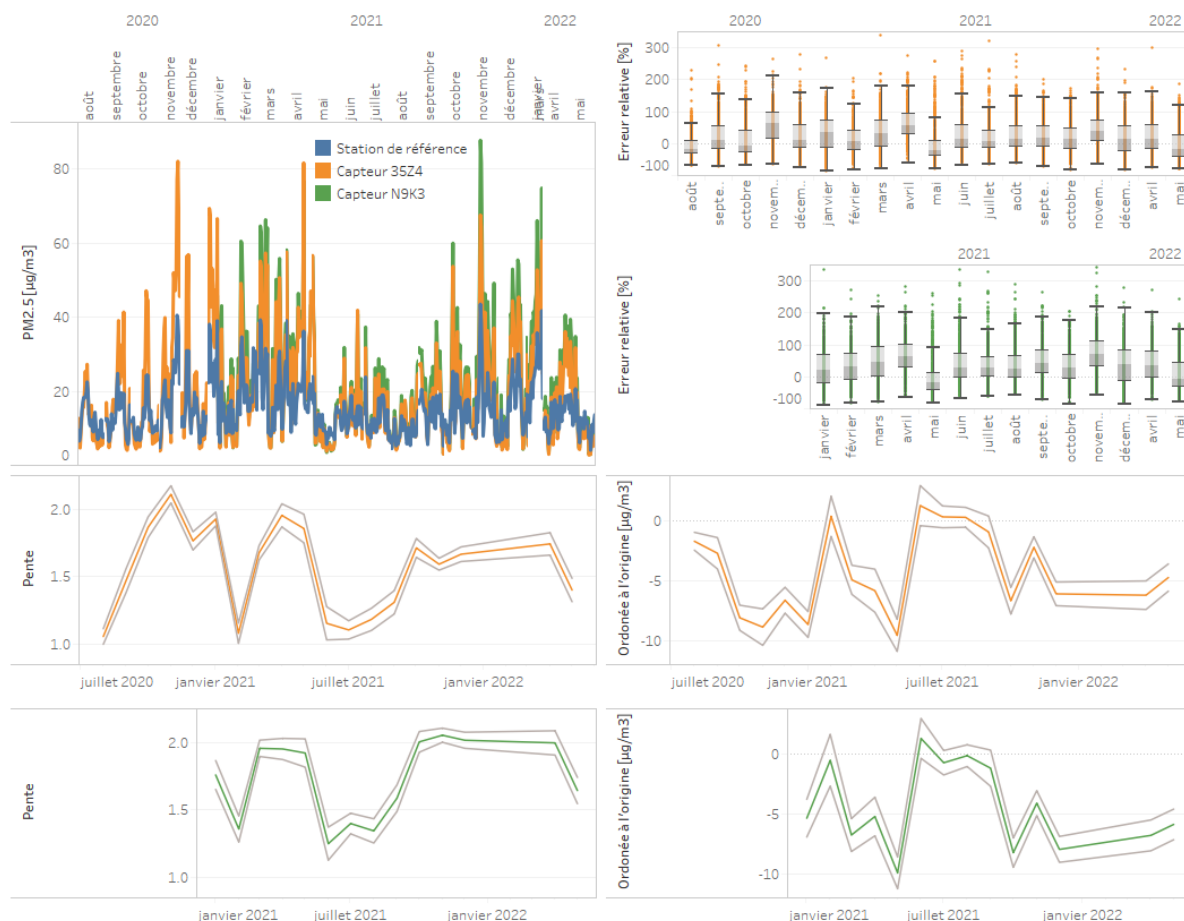


Figure 56 : Comparaison des performances des capteurs 35Z4 et N9K3 déployés sur la station BP-Est sur les particules PM_{2.5}. Les courbes grises représentent l'intervalle de confiance (2.5% – 97.5%) de l'estimation de la pente et de l'ordonnée à l'origine.

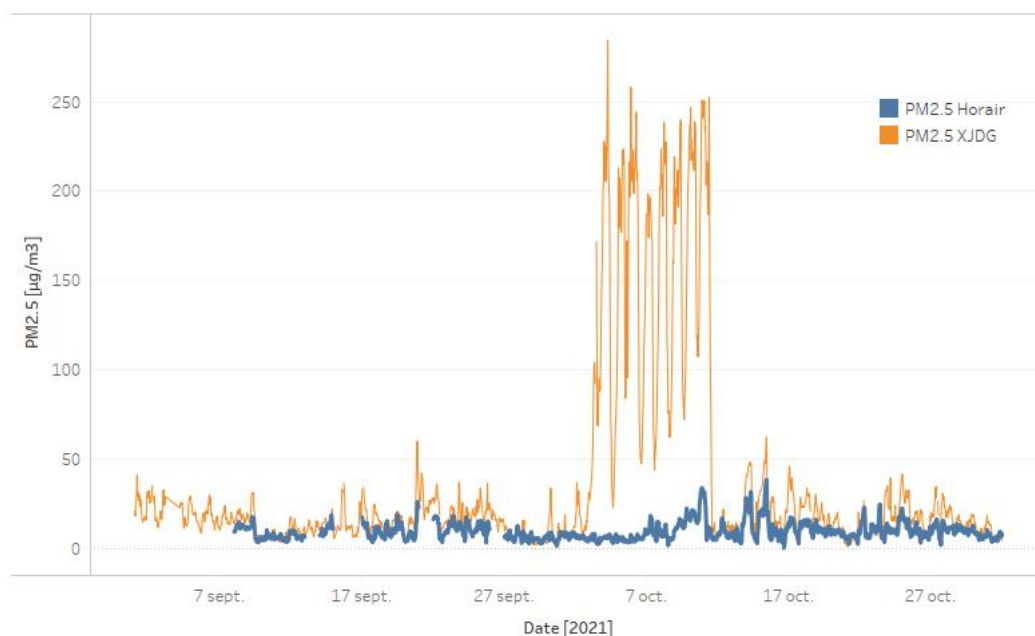


Figure 57 : Dysfonctionnement transitoire observé sur le capteur XJDG PM_{2.5} sur une période d'une semaine.

L'absence d'impact de l'âge du déploiement du capteur sur ses performances sur la période observée est mieux illustrée par les capteurs déployés par paires sur une même station de référence. Un exemple est présenté dans la Figure 56, pour les deux capteurs (35Z4 et N9K3) déployés sur la station de surveillance BP-Est avec près de 6 mois de différence de déploiement. Bien que déployés sur la station

BP-Est avec plus de cinq mois d'écart, les capteurs 35Z4 et N9K3 affichent des écarts très similaires par rapport à la mesure de référence, indiquant une cause environnementale montrant l'absence de dérive liée au vieillissement des capteurs.

Hormis leur variation saisonnière de performances, le seul autre problème notable sur le long terme, observé sur un nombre limité d'appareils (environ 10%), sont des états de panne transitoires sur des périodes pouvant aller de quelques jours à une semaine qui se résolvent sans intervention (voir exemple en Figure 57). Pendant ces périodes, le résultat produit par le capteur devient très élevé et complètement décorrélié des mesures de référence. Les causes potentielles de ce type de comportement peuvent être des problèmes de flux d'air ou de chemin optique (possiblement dû à un encrassement).

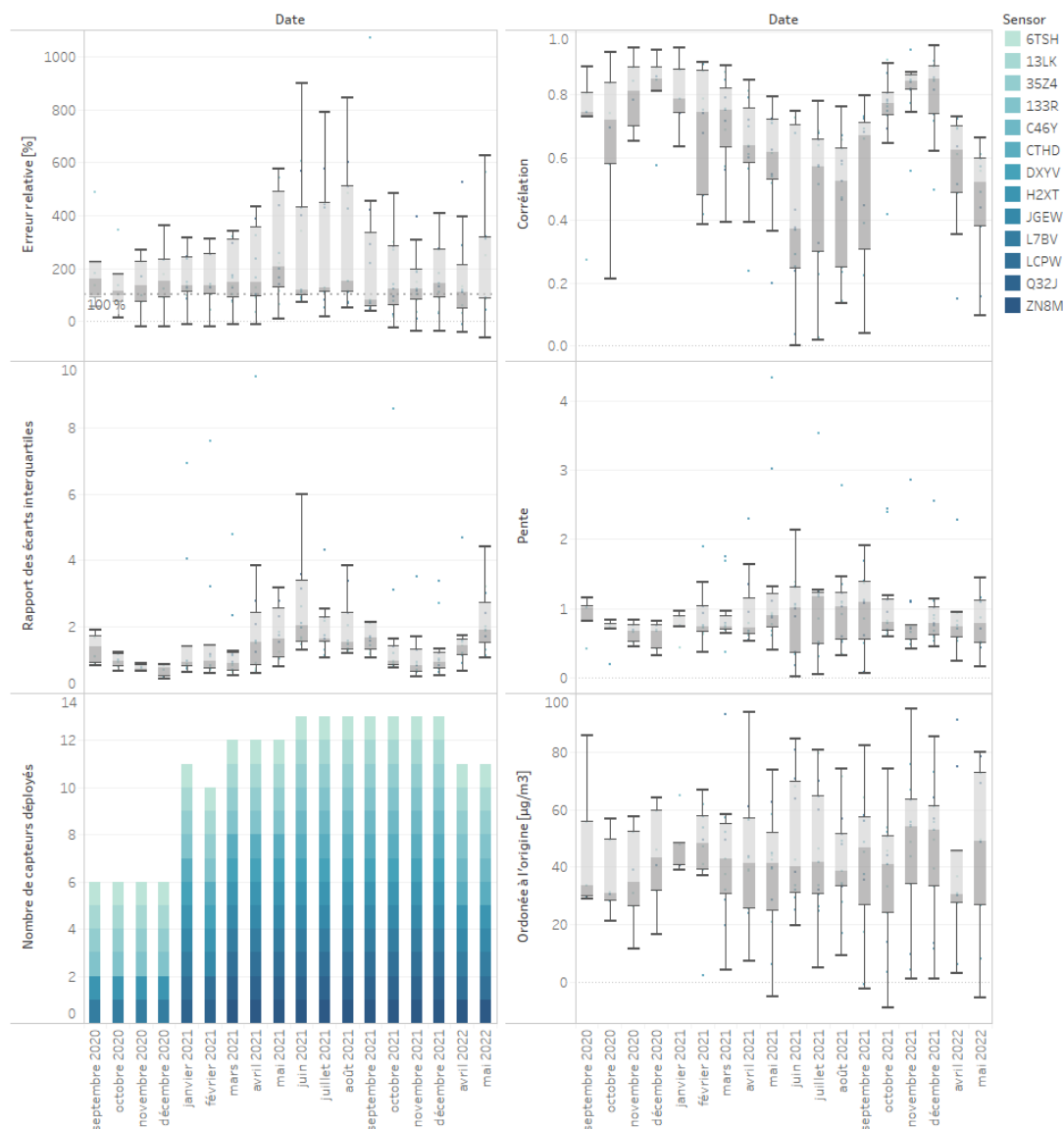


Figure 58 : Résultats statistiques des métriques considérées pour tous les capteurs électrochimiques pour le NO₂ déployés sur les stations de référence par rapport aux mesures de référence.

Les deux technologies de systèmes-capteurs utilisées pour la mesure du NO₂ (électrochimique et semiconducteur) sont aussi majoritairement impactées par des facteurs d'influence à forte composante saisonnière (voir Figure 58 et Figure 60). Contrairement aux capteurs de particules, pour les deux technologies NO₂, les écarts les plus importants par rapport aux valeurs de référence sont observés pendant la saison chaude. Dans les deux cas, le facteur d'influence le plus important est la

température mesurée localement par le capteur, car elle produit les corrélations les plus élevées avec l'erreur de mesure absolue parmi les paramètres considérés (y compris l'ozone et l'humidité).

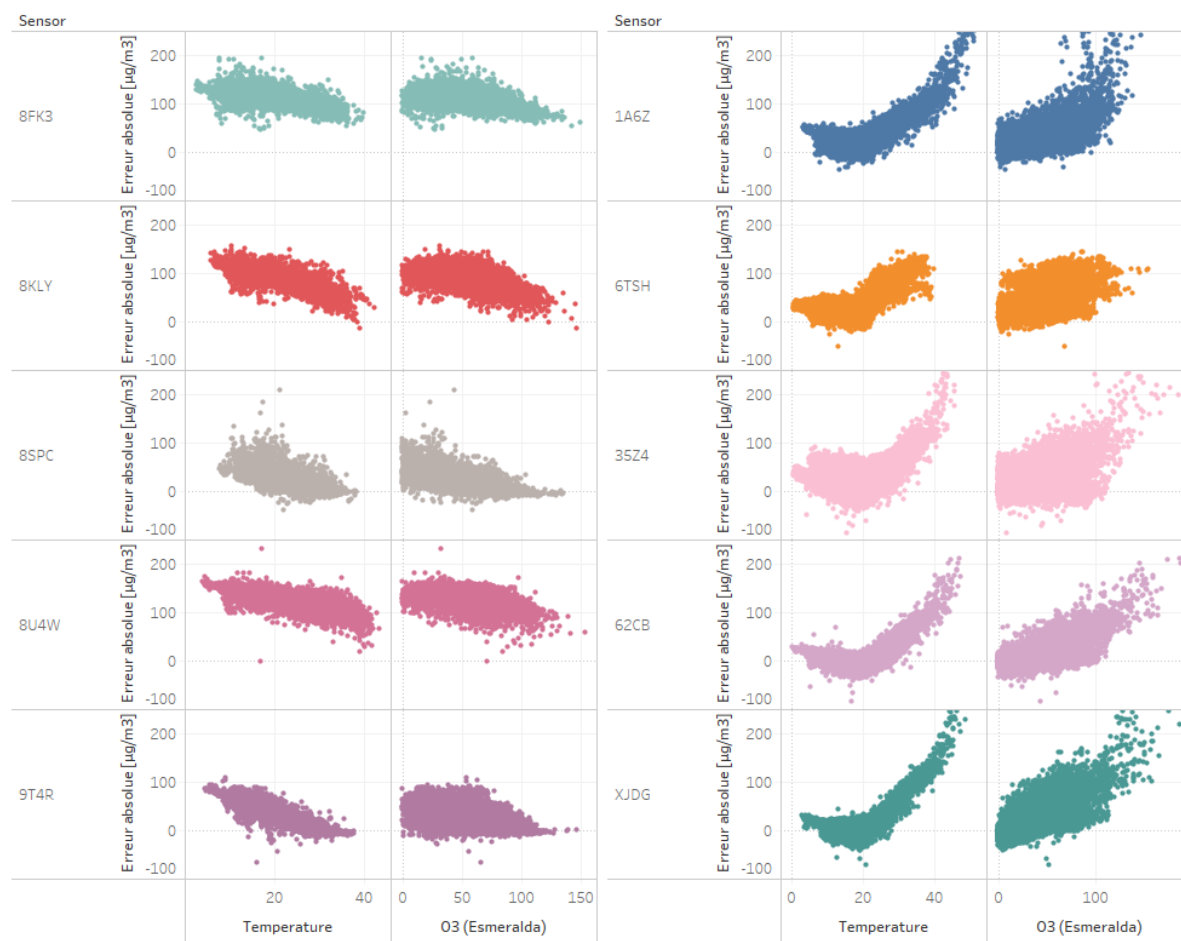


Figure 59 : Exemples des deux types de comportements présentés par les capteurs électrochimiques : les erreurs de mesure sont négativement corrélées avec la température (à gauche) et en relation bimodale avec la température, tandis que positivement corrélées avec l'ozone (à droite).

Dans le cas des cellules électrochimiques, la corrélation avec la température est normalement négative (57 sur les 94 capteurs équipés de cette technologie). Cependant, pour 37 unités de capteur, une relation différente et non monotone avec la température est observée. Plus précisément pendant les mois froids, la corrélation entre les erreurs de mesure et la température reste négative, mais pendant la saison estivale, les corrélations deviennent fortement positives. L'explication de ce comportement bimodal peut être comprise en examinant également les corrélations entre les erreurs et l'ozone (voir Figure 59). Celles-ci suggèrent un dysfonctionnement des filtres d'ozone dont ces capteurs sont normalement équipés pour être sélectifs pour le NO_2 . Étant donné que la concentration d'ozone est également fortement, et de façon positive, corrélée avec la température, cela pourrait expliquer pourquoi la corrélation de l'erreur de mesure avec la température devient positive pendant les mois où les niveaux d'ozone sont élevés et redevient négative lorsque les concentrations en ozone sont plus modérées dans l'air ambiant. L'épuisement du filtre à ozone est généralement dû à une surexposition à l'ozone et peut être dû à l'âge du capteur. Cependant, dans le cas de cette expérimentation, le moment où cette défaillance des filtres s'est produite n'a pas pu être identifié, car pour le nombre limité de capteurs qui ont déjà été déployés en juillet-août 2020, le comportement bimodal était déjà présent.

En comparant les métriques considérées sur le long terme, aucune perte nette de performance n'a pu être détectée pour les capteurs électrochimiques entre la saison froide de 2020 et la saison froide de 2021, leurs niveaux restants comparables.

Enfin, en ce qui concerne les **capteurs NO₂ semi-conducteurs**, la température (positivement corrélée aux erreurs de mesure) a représenté un facteur d'influence modérément important pendant les mois d'été, mais moins impactant que pour les cellules électrochimiques. Cependant, dans le cas de cette technologie, **une dégradation des performances a pu être observée entre le début et la fin de la campagne, les distributions de toutes les métriques présentant des distributions dégradées après l'été 2021**, notamment en termes de dispersion (voir Figure 60).

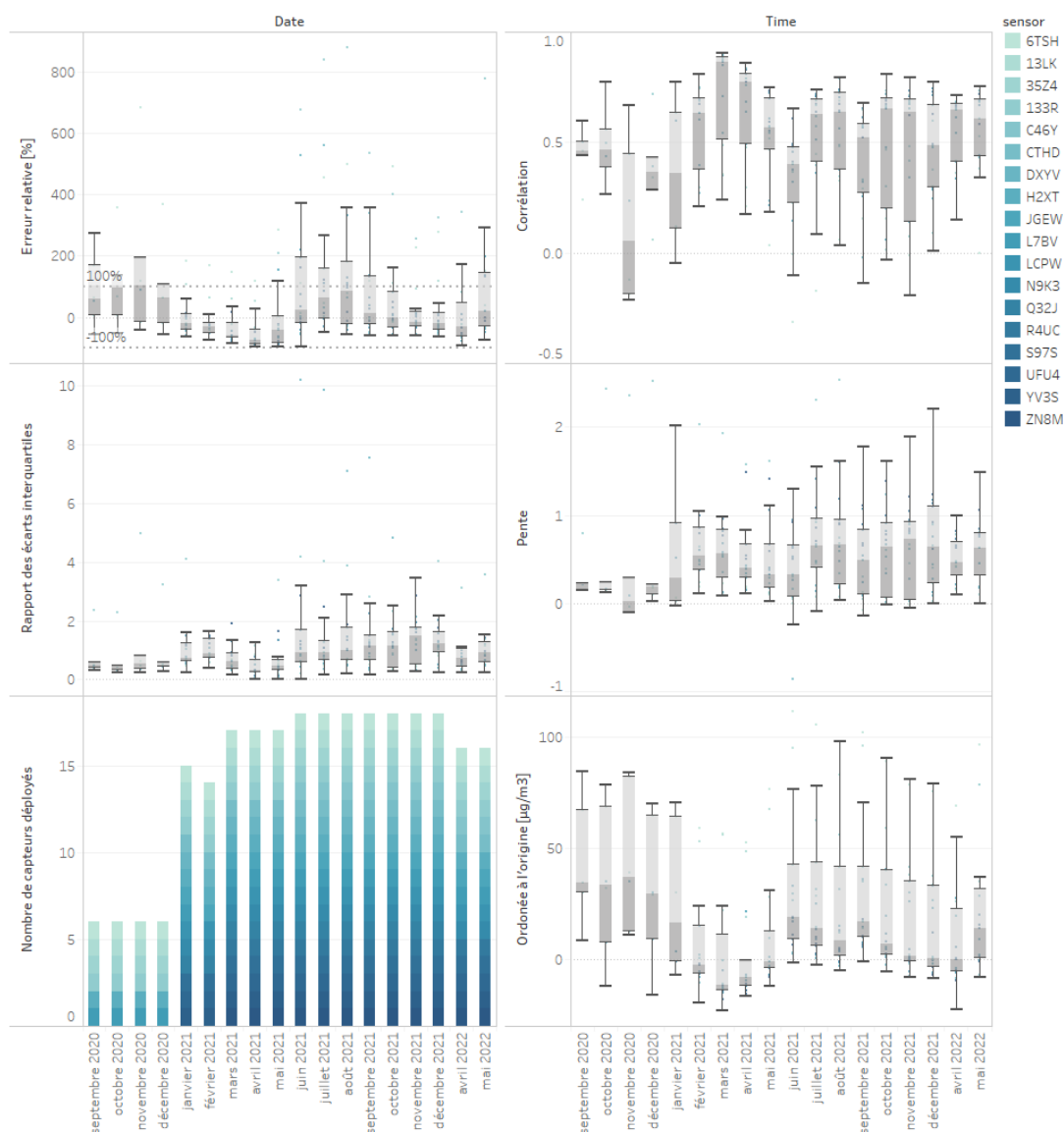


Figure 60 : Résultats statistiques des métriques considérées pour tous les capteurs semiconducteurs pour le NO₂ déployés sur les stations de référence par rapport aux mesures de référence.

5.2. Bilan environnemental

Soucieux de l'impact environnemental qu'un tel dispositif de mesures pourrait avoir, Airparif, par l'intermédiaire du groupement Geoptis, a sollicité la société Eeva pour mener un bilan environnemental. Il a pour objectif de quantifier l'impact environnemental du déploiement d'un capteur et de mettre en perspective les impacts générés par ce déploiement avec les résultats des mesures effectués pendant l'expérimentation.

L'étude du cycle de vie a montré que la fabrication des composants électroniques représente les trois quarts des impacts sur l'ensemble du cycle de vie. Poursuivre la miniaturisation ou déployer le juste nécessaire, en termes de nombre de composants par fonction, permettrait une baisse conséquente des impacts sur l'ensemble du cycle de vie. Lors de l'étape d'essais des capteurs, un impact environnemental a été relevé du fait que les véhicules d'Airparif aient été sollicités spécifiquement dans le cadre d'évaluation des capteurs en mobilité. Une réflexion sur l'organisation de cette phase pourrait être menée afin de réduire son impact. A noter, que l'utilisation des véhicules de La Poste lors de la campagne de mesures n'a pas engendré d'impact environnemental supplémentaire car les véhicules ne sont pas utilisés spécifiquement pour la campagne mais pour la distribution du courrier. La durée de vie des capteurs est également un élément qu'il ne faut pas négliger dans une démarche environnementale. Il ne s'agit pas de construire des capteurs dont les composants électroniques représentent la plus grande partie de l'impact environnemental et de les utiliser sur une courte durée.

Enfin, une étude de sensibilité a montré que le temps d'archivage et d'utilisation des données mises en base peut avoir un impact environnemental plus élevé que la fabrication des composants électroniques, au-delà de 15 ans pour notre étude.

6. ENSEIGNEMENTS DE L'EXPERIMENTATION ET PERSPECTIVES

6.1. Synthèse de l'évaluation métrologique des systèmes-capteurs et des pré-traitements réalisés sur les données

6.1.1. Recettage et évaluation métrologique

La mise en œuvre d'un réseau de systèmes-capteurs⁵ nécessite impérativement une phase de vérification métrologique ayant pour objectif d'identifier les capteurs défectueux et de faire un constat à réception sur la qualité de fabrication du lot et l'homogénéité des caractéristiques métrologiques afin de les calibrer si nécessaire. Il s'agit principalement de s'assurer de la justesse, de la reproductibilité des capteurs et de la sensibilité de ces derniers.

⁵ matériel intégrant au moins un capteur (ou un élément sensible) et un logiciel pour détecter une quantité et/ou mesurer une concentration de composés (gaz, aérosol) sur un pas de temps prédéfini.

Dans le cadre de cette expérimentation, les performances des capteurs ont été testées au regard des méthodes de référence mises en œuvre sur les stations d'Airparif. Le Tableau 31 résume les conclusions de l'évaluation métrologique des systèmes-capteurs mis en œuvre dans le cadre de l'expérimentation « Mesures et perception ». **Cette évaluation met en avant que les algorithmes de calcul des concentrations de polluants permettent d'atteindre des performances conformes à l'état de l'art attendu en termes de reproductibilité pour les différents paramètres testés. La justesse reste en revanche la grande difficulté de ce type de matériel pour l'ensemble des polluants.**

	PM ₁₀ et PM _{2.5}	NO ₂	NH ₃
Reproductible	oui	non	oui
Justesse	Ne reproduit pas de manière complètement satisfaisante la mesure de référence	Très variable d'un capteur à l'autre	Ne reproduit pas de manière satisfaisante la mesure de référence
Facteurs de sensibilité	Changement de la nature des particules, température, humidité	Température, Taux d'ozone, humidité, taux de NO	Vraisemblablement influencé par des facteurs environnementaux
Durée de vie	Aucune détérioration des performances du capteur durant la campagne de mesures liée à la durée de vie des composants	Détérioration des performances des capteurs semi-conducteurs a pu être observée	Non étudiée
Remarques	Moins performant en saison froide	Moins performant en saison chaude	Changement de comportement des capteurs étudiés à mi-année (sous-estimation puis surestimation)

Tableau 31 : synthèse de l'évaluation métrologique des systèmes-capteurs

6.1.2. Calibration des appareils et correction des données

Les mesures en PM₁₀ et PM_{2.5} ont montré des bonnes corrélations et une bonne reproductibilité des systèmes-capteurs, mais nécessitent des corrections pour que les résultats soient comparables aux mesures de référence. Une correction spécifique, basée sur les écarts observés entre les systèmes-capteurs et les mesures de référence sur l'ensemble des stations du réseau Airparif, a dû être élaborée pour que les données issues des systèmes-capteurs puissent être exploitées à des fins de diagnostic.

Les tests de sensibilité de la correction au nombre de stations ont montré qu'une correction basée sur les écarts à la méthode de référence d'une seule station donnait des performances comparables à celle calculée sur l'ensemble des stations du réseau. **Ces résultats montrent que la méthode des ratios peut être adoptée sans perte de performance de la correction dans une zone où le dispositif de surveillance est limité (1 à 2 stations de fond).** Ces résultats sont valables avec les modèles de systèmes-capteurs Atmotrack testés dans cette expérimentation, et sur le territoire francilien, qui présente des niveaux en particules relativement homogènes en situation de fond, et ne sont pas forcément généralisables à tous les territoires.

Pour déployer ce type d'approche sur des territoires ne disposant pas réseau de surveillance dense. Il semble donc important de suivre les étapes ci-dessous :

- s'assurer de la reproductibilité des données issues des systèmes-capteurs en les comparant tous à une station de référence.
- Déployer les systèmes-capteurs si ces derniers sont reproductibles pour s'assurer de la relative homogénéité des niveaux de particules en fond sur le territoire.
- mettre en place le système de correction par ratio à partir des données colocalisées système capteur – station de référence.

En ce qui concerne les systèmes-capteurs NO₂, leur comportement est très variable d'un site de mesure à un autre et n'est pas stable dans le temps. **De ce fait, une correction unique pour tous les sites n'est pas envisageable et une correction spécifique pour chaque système-capteur devrait être étudiée.** Cela demanderait néanmoins un travail spécifique capteur par capteur qui n'a pu être réalisé dans le cadre de ce projet compte-tenu du nombre de capteurs déployés et de l'ampleur de l'expérimentation.

6.1.3. Mise en œuvre de l'expérimentation

Le nombre très important de systèmes-capteurs (100 fixes + 500 en mobilité) a rendu la mise en œuvre de l'expérimentation plus complexe :

- la vérification exhaustive de tous les capteurs n'était pas envisageable. Il a donc été décidé de tester un échantillon de capteurs par lot de fabrication. Cinq lots de capteurs ont été testés de juin à décembre 2020. Cela représente 84 capteurs, soit 14 % du parc mis en œuvre.
- l'installation des capteurs, réalisée par la Poste, a demandé beaucoup d'unités d'œuvre
- le nombre très important de données générées par ce dispositif a nécessité la construction d'une base de données ad hoc pour le stockage, la visualisation et la validation des données qui soit exploitable dans des temps de calcul raisonnables. Ce dispositif a également nécessité le développement d'une méthode de validation automatique des données au fil de l'eau.
- le nombre de capteurs NO₂ n'a pas permis de développer une correction site par site.
- du fait du volume de données générées par le dispositif, les différentes phases de pré-traitement se sont avérées conséquentes au regard de la phase d'interprétation. Ces analyses ont dû être complétées et approfondies hors du cadre de l'expérimentation, par une étude spécifique. Ce retour d'expérience incite à une prise en compte potentiellement importante de ces phases de pré-traitement.

6.2. Synthèse des enseignements après validation et correction des données

L'exploitation des données brutes issues des systèmes-capteurs, sans aucune correction, permet de réaliser une analyse qualitative de la variabilité des niveaux, mais ne permet en aucun cas une analyse quantitative, compte-tenu des écarts importants constatés par rapport à la mesure de référence.

Les phases de pré-traitement des résultats (validation et correction) améliorent fortement les comparaisons entre les données PM₁₀ et PM_{2.5} issues de systèmes-capteurs et les résultats mesurés sur les stations de mesure, avec néanmoins des écarts qui persistent.

Pour les systèmes-capteurs fixes en situation de fond (loin de l'influence directe des axes routiers), les systèmes-capteurs PM₁₀/PM_{2.5} corrigés permettent globalement une bonne description des variabilités temporelles. Les niveaux moyens sont cohérents avec les stations de référence, avec malgré tout une légère surestimation des PM_{2.5}.

A proximité du trafic routier, la description des variabilités temporelles est correcte, mais moins performante qu'en fond, avec une tendance à la sous-estimation. Les systèmes-capteurs reproduisent correctement les variabilités spatiales et permettent d'identifier les zones et les périodes les plus polluées. Ils peuvent ainsi être utilisés en pré-diagnostic pour affiner la surveillance sur une zone non couverte par des mesures.

En revanche, il n'est pas recommandé d'utiliser ces systèmes-capteurs pour une évaluation réglementaire, compte-tenu de leur tendance à sous-estimer les niveaux à proximité du trafic routier.

Pour les capteurs en mobilité, les nombreuses données de qualité de l'air relevées durant la campagne de mesures permettent de retrouver globalement la même hiérarchie des axes en termes de qualité de l'air que lors des précédentes expérimentations au cœur du trafic. Le ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ observé est néanmoins significativement plus faible dans le cadre de cette campagne de mesures et globalement confirmé par les données issues du système Cartes temps réels et des observations issues des stations d'Airparif. L'exploitation des données des caméras implantées sur les véhicules n'a toutefois pas permis d'identifier les facteurs d'influence en lien avec le trafic routier, notamment du fait de la limite des données fournies par les capteurs sur les véhicules environnants.

L'intégration des données d'un tel dispositif, comprenant un grand nombre de systèmes-capteurs dont 500 en mobilité et mesurant sur des pas de temps très courts, constituait un défi technique pour aboutir à des cartographies urbaines haute résolution utilisables pour l'analyse. Plusieurs verrous techniques devaient au préalable être levés pour s'assurer que les cartes ne soient pas biaisées, qu'elles aient un sens physique, que les cartographies produites soient effectivement améliorées, et enfin que les ressources nécessaires pour exécuter l'algorithme soient raisonnables. **Les développements menés lors de ce projet sur ces différentes pistes n'ont pas permis d'aboutir à cette succession optimale de traitements de données, mais ont ouvert des perspectives intéressantes.** Ils ont en effet permis le développement de la méta-modélisation du modèle urbain fine-échelle d'Airparif Cartes temps réel et la reconstruction rapide de cartographies fine-échelle ayant un sens physique via les données des stations de référence ou des données de systèmes-capteurs (et ce malgré le grand volume de données intégrées). Ils ont également montré la capacité de la méthodologie étudiée dans ce projet à intégrer de nombreuses données de mesures, qui pourraient trouver une application pour l'amélioration des cartographies à fine échelle en fonction de l'amélioration de la justesse des systèmes-capteurs.

6.3. Bilan environnemental

L'étude de la durée de vie des capteurs a montré un comportement stable des capteurs de particules et de NO_2 électrochimique au cours de la campagne de mesures. L'analyse réalisée n'a pas mis en avant de détérioration des performances des systèmes-capteurs pour ces deux mesures au cours de cette étude menée sur 15 mois. En revanche, en ce qui concerne le capteur NO_2 semi-conducteur, l'analyse montre une baisse des performances du capteur en fin de campagne indiquant probablement une durée de vie moindre que les deux capteurs cités précédemment.

Une étude du cycle de vie du capteur a été réalisée avec un bureau d'étude indépendant. Cette étude a mis en évidence que **la fabrication des composants électroniques représente les trois quarts des impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie. Il est également intéressant de constater que le temps d'archivage et d'utilisation des données mises en base peut être prédominant en termes d'impact environnemental au-delà de 15 ans de mesures.**

6.4. Perspectives

Les travaux menés dans le cadre de l'expérimentation Mesures et Perceptions ont permis d'ouvrir un large champ d'utilisations potentielles pour de futurs projets.

Les méthodologies, organisations et outils développés lors des étapes clés (tests du matériel en laboratoire, automatisation du plan d'échantillonnage, déploiement par lots de capteurs sur le terrain, surveillance du fonctionnement des capteurs pendant la campagne de mesures...) pourront être repris dans de futures études, permettant de ce fait de réduire la phase de pré-traitement qui ne doit pas être sous-estimée lors de l'installation d'un tel dispositif. C'est également le cas de l'algorithme de correction des positions GPS des véhicules en mouvement pour corriger les erreurs de positionnement dues à l'imprécision du GPS, et récupérer les positions GPS dans les tunnels.

Le défi informatique de la construction d'une base de données exploitable dans des temps de calcul raisonnables qui a été relevé dans le cadre du projet pourra servir d'exemple pour les futurs projets, avec la volonté d'améliorer les outils mis en place. Une telle base pourra être réutilisée dans d'autres projets.

La base de données ainsi constituée par 18 mois de mesures sera ouverte à la recherche et à nos partenaires. Cette accessibilité permettra d'alimenter les travaux de recherche qui compléteront les analyses menées par Airparif sur les thématiques telles que la compréhension du comportement des systèmes-capteurs, l'évolution de leurs durées de vie, la validation des niveaux mesurés, la correction apportée aux données produites, l'intégration de ces données corrigées et validées dans les systèmes de modélisation, le calcul d'incertitudes... Les travaux de recherche également être menés sur les concentrations de particules de diamètre inférieur à 1 μm (PM_{10}), mesurées mais non étudiées dans le cadre de cette étude.

Les tests de correction réalisés ouvrent des perspectives encourageantes pour des projets de diagnostic et d'appui au développement de dispositif de surveillance à l'international, plus spécifiquement pour les particules, à condition toutefois de disposer a minima d'une station de référence pour la calibration.

L'étude de cycle de vie montre l'importance d'optimiser le nombre et la durée de vie des composants utilisés dans la fabrication des capteurs afin de diminuer leur impact environnemental. Un défi de taille est lancé aux concepteurs et fabricants des capteurs afin que la durée de vie des capteurs soit allongée de manière significative, sans perte de qualité de mesures. Le temps d'utilisation et de stockage des données doivent également être pris en compte afin de diminuer l'impact environnemental.

6.5. A retenir

D'une ampleur inédite en termes de nombre de capteurs, de variété, de polluants mesurés et de surface territoriale, l'expérimentation « Mesures et Perceptions » a montré que :

- Une vérification métrologique des systèmes-capteurs en comparaison d'une mesure de référence est indispensable avant utilisation et régulièrement.
- Dès que le nombre de systèmes-capteurs est important, la gestion des données produites nécessite une grande attention ; le développement d'une base pour récupérer, stocker, corriger le cas échéant et assurer le suivi du bon fonctionnement en temps réel est préconisé.

- **L'exploitation des données brutes issues des systèmes-capteurs, sans aucune correction, peut permettre de réaliser une analyse qualitative de la variabilité des niveaux, mais ne permet pas en aucun cas une analyse quantitative, compte-tenu des forts écarts constatés par rapport à la mesure de référence.**
- Les phases de pré-traitement des résultats (validation et correction) améliorent fortement les comparaisons entre les données PM₁₀ et PM_{2.5} issues de systèmes-capteurs et les résultats mesurés sur les stations de mesure, avec néanmoins des écarts qui persistent.
 - o **Pour les systèmes-capteurs fixes en situation de fond** (loin de l'influence directe des axes routiers), les systèmes-capteurs PM₁₀/PM_{2.5} corrigés permettent globalement une bonne description des variabilités temporelles.
 - o **A proximité du trafic routier**, la description des variabilités temporelles est correcte, mais moins performante qu'en fond, avec une tendance à la sous-estimation.
 - o Les systèmes-capteurs reproduisent correctement les variabilités spatiales et permettent d'identifier les zones et les périodes les plus polluées.
 - o **Il convient d'être prudent sur l'utilisation de ces systèmes-capteurs pour une évaluation réglementaire, compte-tenu de leur tendance à sous-estimer les niveaux à proximité du trafic routier.**
 - o **Pour les capteurs en mobilité**, les nombreuses données de qualité de l'air relevées durant la campagne de mesures permettent d'évaluer globalement la hiérarchie des axes en termes de qualité de l'air
- La technologie de mesure du dioxyde d'azote est moins mature que celle des PM, sans correction unique pour tous les systèmes capteurs utilisés dans cette expérimentation.
- L'intégration des données d'un grand nombre de systèmes-capteurs dont 500 en mobilité et mesurant sur des pas de temps très courts pour aboutir à des cartographies urbaines haute résolution constituait un défi technique. **Les développements menés lors de ce projet sur ces différentes pistes n'ont pas permis d'aboutir à cette succession optimale de traitements de données, mais ont ouvert des perspectives intéressantes.** Les travaux menés pour la reconstruction rapide de cartographies fine-échelle ayant un sens physique via les données des stations de référence ou des données de systèmes-capteurs ont été notamment utilisés ultérieurement pour le développement de la méta-modélisation du modèle urbain fine-échelle d'Airparif Cartes temps réel. Ils ont également montré la capacité de la méthodologie étudiée dans ce projet à intégrer de nombreuses données de mesures, qui pourraient trouver une application pour l'amélioration des cartographies à fine échelle en fonction de l'amélioration de la justesse des systèmes-capteurs.

VOLET 2

ENQUETE DE PERCEPTION DES FRANCILIENS

1. DISPOSITIF MIS EN PLACE

Dans le cadre du projet « mesures et perception », une enquête de perception de la qualité de l'air auprès des Franciliens visait à recueillir leurs ressentis sur l'air qu'ils respirent.

Au démarrage du projet, cette enquête devait être menée exclusivement aux domiciles des franciliens ainsi qu'au sein de certains bureaux de Poste. Le contexte sanitaire lié à l'épidémie de Covid-19 a obligé l'équipe projet à repousser la mise en œuvre de l'enquête terrain. Afin de ne pas être dépendant du contexte sanitaire, il a été décidé en octobre 2020 de réaliser l'enquête en ligne via une plateforme de participation citoyenne. Cette dernière a été développée par la société Cap Collectif. L'amélioration du contexte sanitaire en juin 2021 a permis la sollicitation de 1 100 franciliens lors d'une enquête à domicile.

Le questionnaire, composé de 11 questions avec 9 questions fermées et 2 questions ouvertes est présenté en annexe 10. Aucune des questions n'étant obligatoire, les répondants avaient le choix de répondre à toutes les questions ou uniquement aux questions les intéressant, que ce soit en ligne ou en présentiel, avec les facteurs.

2. RESULTATS DE L'ENQUETE

2500 personnes enquêtées étaient visées en début de projet. Seules 694 réponses de franciliens ont pu être recueillies :

- 446 ont répondu en ligne
- 248 franciliens ont souhaité répondre en présentiel sur les 1 100 prises de contact opérées préalablement.

Parmi les répondants, l'enquête a majoritairement rassemblé des parisiens (29,5%), de la catégorie socio-professionnelle (CSP) « Cadre et professions intellectuelles supérieures » (53,4%), entre 36 et 55 ans (42%).

D'après la société Cap collectif qui a mis en place la consultation et malgré le peu de réponses reçues par rapport au nombre de franciliens, ce chiffre de 694 participants au sondage correspond aux standards des consultations et permet l'interprétation des résultats. Le rapport en annexe 10 complète les enseignements précisés ci-dessous.

Une grande majorité des répondants affirment être concernés par la question de la pollution de l'air depuis longtemps. Il semble donc que la crise sanitaire vécue depuis 2020 ne soit pas la raison de cette perception.

Les différents modes de transport utilisés au quotidien sont assez équilibrés entre les répondants comme l'illustre la Figure 61.

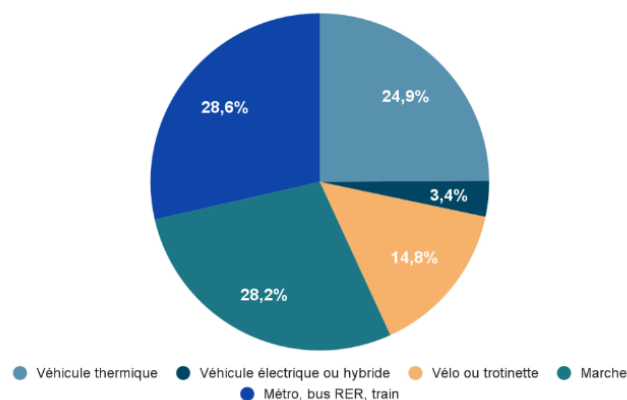


Figure 61 : Répartition des modes de transport utilisés au quotidien par les répondants.

Les transports en commun sont utilisés régulièrement par plus de 28 % des répondants et les modes actifs, vélo et marche par plus de 43 % d'entre eux. La voiture électrique ou hybride est de loin le mode de transport le moins utilisé.

Les Yvelines et l'Essonne sont les départements dans lesquels la voiture est le mode de déplacement le plus utilisé au quotidien. Les usagers du vélo et de la trottinette sont particulièrement présents à Paris ; mais quasiment absents en Seine et Marne ou en Essonne.

Sur les 277 participants ayant répondu être des utilisateurs réguliers de véhicules motorisés, 80 % ont déclaré « être prêts » ou « songer » à modifier leur mode de déplacement principal. Afin d'inciter les utilisateurs quotidiens à modifier leur mode de déplacement ou changer leur véhicule, ce qui semble le mieux convaincre est l'aide financière à l'achat d'un véhicule électrique (32 % des utilisateurs quotidiens de véhicules motorisés) suivi par le développement des transports en communs (26 %). Les réponses des 635 répondants à la question « qu'est-ce qui vous inciterait à changer votre mode de transport pour réduire la pollution de l'air » (plusieurs réponses possibles), se répartissent comme suit :

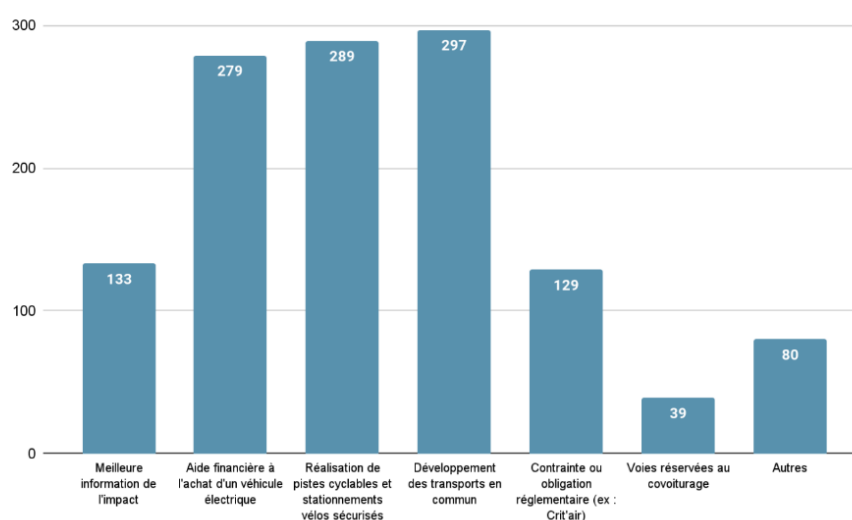


Figure 62 : Répartition des motivations susceptibles de changer le mode de transport des répondants pour réduire la pollution de l'air.

Le développement des transports en commun est l'incitation au changement de mode de déplacement la plus sollicitée parmi les répondants, notamment à Paris et chez les 26-35 ans.

De manière générale, parmi les différentes options proposées par le questionnaire, le covoiturage semble être la solution alternative la moins sollicitée par les participants.

255 répondants affirment avoir déjà modifié leur mode de déplacement ou avoir changé leur véhicule. Ils affirment utiliser régulièrement les transports en commun (36 %), la marche (36 %), le vélo ou la trottinette (23 %). Les utilisateurs de véhicules électriques sont moins nombreux.

3. PERCEPTIONS ET NIVEAUX REELS

La préoccupation des franciliens à la Qualité de l'Air a été évaluée par la question « La pollution de l'air est-il un sujet qui vous préoccupe ? ». Disposant des informations concernant la commune d'habitation du répondant (nom et code INSEE), les réponses à cette question ont pu être agrégées à l'échelle régionale, départementale et communale. Le Tableau 32 résume le nombre de répondants à la question « La pollution de l'air est-il un sujet qui vous préoccupe ? » par département.

Département	Non	Un peu	Oui, j'y suis attaché	Total
75	6	25	167	198
92	5	18	72	95
93	5	16	40	61
94	1	18	49	68
77	1	15	22	38
78	2	15	54	71
91	3	14	42	59
95	4	17	39	60

Tableau 32 : Nombre de répondants à la question « La pollution de l'air est-il un sujet qui vous préoccupe ? » par département.

A l'échelle régionale, 75 % des répondants au sondage ont répondu être préoccupés par la pollution de l'air (« Oui j'y suis attachés »). Globalement, la quasi-totalité des répondants (plus de 95 %) sont plus ou moins préoccupés par la pollution de l'air (« un peu » ou « Oui, j'y suis attaché »).

Environ 1/3 des répondants habitent à Paris, 1/3 en Petite Couronne (départements 92, 93 et 94) et 1/3 en Grande Couronne (départements 77, 78, 91 et 95). La préoccupation à la pollution de l'air est plus forte en se rapprochant du cœur dense de l'agglomération parisienne.

Ces résultats ont été croisés aux cartographies régionales et départementales des niveaux de pollutions réalisées chaque année par Airparif. Les cartes choisies sont celles des niveaux moyens de dioxyde d'azote (NO₂) en 2019, car ce polluant est caractéristique de la pollution atmosphérique liée au trafic routier, qui était l'objet principal de ce sondage. Les cartes 2019 ont été choisies, afin d'être représentatif de la situation pré COVID-19 (Figure 63).

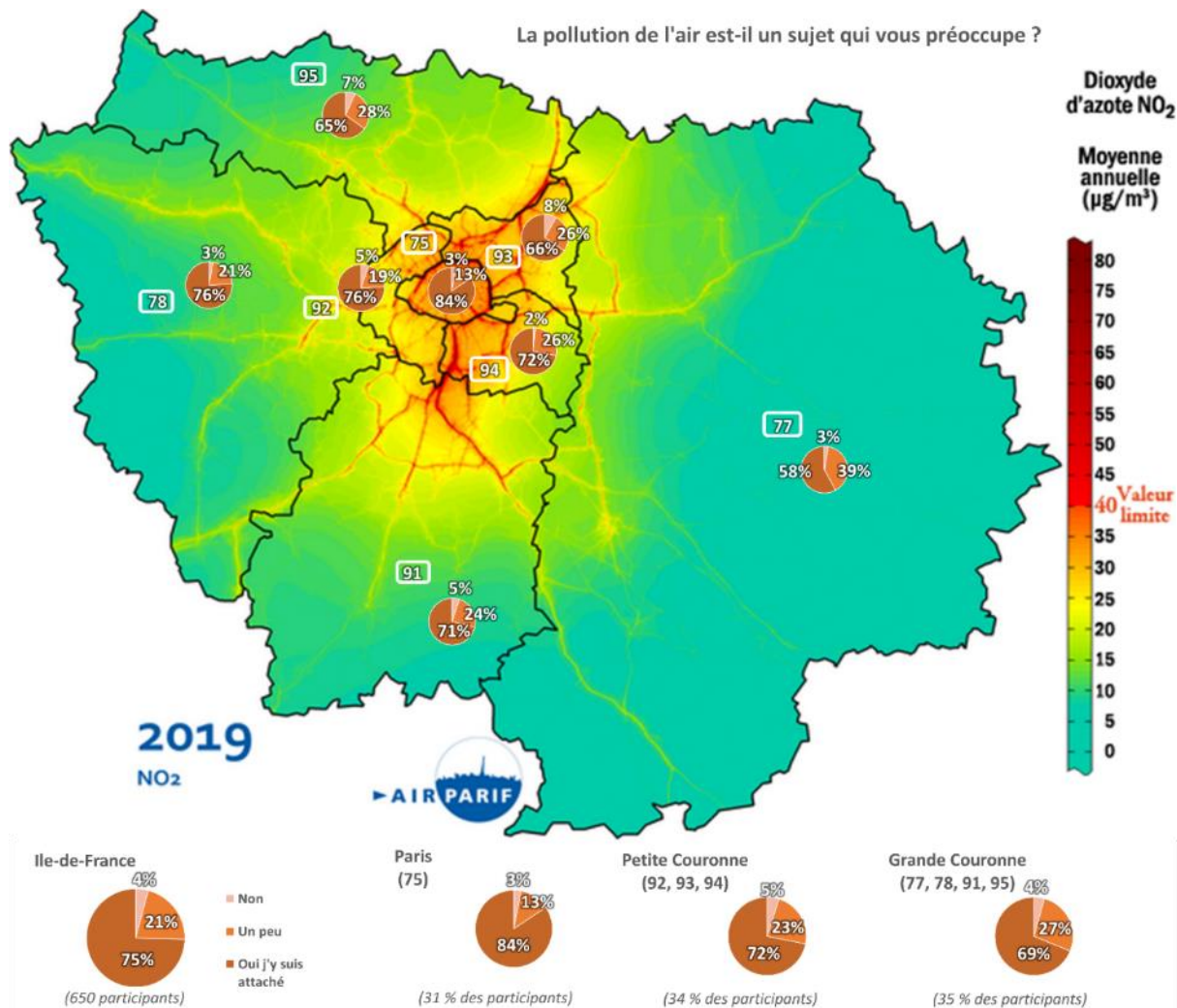


Figure 63 : Préoccupation des franciliens à la Qualité de l'Air à l'échelle départementale et cartographie des niveaux de dioxyde d'azote (NO₂) en moyenne annuelle

Les résultats à l'échelle départementale (Figure 63) permettent de détailler la différence entre les départements : la part des répondants qui ne sont pas préoccupés par la qualité de l'air représente pour chaque département moins de 10 % des répondants.

Les départements de Paris (75), Seine-Saint-Denis (93), Hauts-de-Seine (92), Val-de-Marne (94), Yvelines (78) et de l'Essonne (91) montrent une préoccupation forte vis-à-vis de la pollution de l'air pour environ 70 % des répondants ou plus. Les répondants habitant au sein du département de Seine-et-Marne (77), semblent moins préoccupés par la pollution de l'air (réponses « Oui, j'y suis attaché » inférieur à 60 %). Il est à noter que la majorité des répondants pour l'Essonne et les Yvelines proviennent de la zone la plus dense de ces départements, ce qui rend les comparaisons délicates.

Les cartographies zoomées sur chaque département sont présentées en annexe 10.

Pour Paris (75), une forte majorité de la population sondée est préoccupée par ce sujet (84 %). On retrouve une partie de cette population dans chaque arrondissement répondant, ce qui semble en accord avec les niveaux de dioxyde d'azote qui peuvent être proches voire supérieurs à la valeur limite en moyenne annuelle sur l'ensemble du territoire, notamment sur le Boulevard Périphérique.

Pour les autres départements, la population préoccupée par la pollution de l'air habite globalement au sein de communes traversées par des axes de circulations majeurs sur lesquels les teneurs de dioxyde d'azote en moyenne annuelles sont relativement fortes sur le territoire, voire qui sont en dépassement de la valeur limite sur certains axes.

Cet exercice de croisement de données qualité de l'air et de la réponse de franciliens à la question « La pollution de l'air est-il un sujet qui vous préoccupe ? » comporte des limites.

La première concerne la notion de « préoccupation » : est-ce une préoccupation personnelle, relative à des proches ou bien d'ordre général ? Est-ce une préoccupation quotidienne ?

La deuxième limite concerne l'analyse des résultats communaux. En effet, le faible nombre de répondants par commune (notamment pour les communes hors Paris pour lesquelles le nombre de répondants est inférieur à 10) et l'absence de localisation plus précise (quartier ou adresse) et l'absence de localisation plus précise (quartier ou adresse) permettent difficilement de retranscrire fidèlement le lien entre la perception des répondants et leurs niveaux d'exposition.

VOLET 3

SIGNALEMENTS D'ÉVÉNEMENTS IMPACTANT LA QUALITÉ DE L'AIR

L'objectif de ce volet de l'étude « mesures et perception » était de permettre à chaque Francilien de signaler des anomalies et de connaître le ressenti des habitants sur la pollution en temps réel. Il va plus loin encore dans l'implication des Franciliens avec la mise en place d'une application participative, qui leur permet de signaler des nuisances ayant un impact sur l'air qu'ils respirent (odeurs, panache de fumée...).

L'application utilisée dans ce cadre est l'application Signal'Air, développée par l'ensemble des AASQA (Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air). L'application est disponible en téléchargement sur les stores depuis février 2021. Une vidéo expliquant le fonctionnement de l'application a été produite par la société « Litchi Vidéo ».

L'outil Signal'Air a été pensé pour répondre à trois objectifs :

- L'utilisation en temps réel pour une surveillance à court terme, permettant la détection d'incident ou accident impactant la qualité de l'air.
- L'exploitation des données de signalement sur du long terme afin de compléter l'expertise des AASQA sur la qualité de l'air sur son domaine d'intérêt.
- Favoriser la participation du public à signaler tout type d'événements impactant la qualité de l'air. L'idéal est qu'Airparif puisse constituer une communauté engagée autour de cet outil.
- L'outil Signal'Air a été développé en s'appuyant sur les plateformes régionales de signalement déjà existantes au sein des AASQA à savoir ODO une plateforme de signalement participatif des odeurs et Pollin'air une plateforme participative de signalement géolocalisés de l'état de floraison d'espèces allergisantes pour améliorer l'information des personnes allergiques aux pollens. Signal'Air est utilisable sur téléphone, tablette et ordinateur.

Une illustration de l'interface de l'application est disponible en Figure 64.



Figure 64 : Illustrations de l'application Signal'Air

L'outil Signal'Air n'a malheureusement pas eu le succès escompté auprès du public francilien lors de cette expérimentation. Depuis la mise en ligne de l'application, peu de téléchargements de l'application ont été réalisés et moins de 30 signalements ont été remontés. Malgré une communication active sur l'outil opérée par La Région Ile-de-France, Airparif, La Poste et sa filiale Geoptis, les franciliens se sont peu intéressés à cet outil.

Bien que la question de la qualité de l'air soit un sujet de plus en plus préoccupant pour les franciliens, et que l'intérêt porté aux communications d'Airparif sur ce sujet soit de plus en plus important, l'émergence d'une communauté engagée sur le signalement d'événements impactant la qualité de l'air semble difficilement atteignable rapidement. La constitution d'une telle communauté nécessite plusieurs années et une communication forte sur les enjeux d'une telle application. Le passage d'un citoyen observateur à un citoyen engagé et pleinement impliqué, quel que soit le sujet d'ailleurs, ne peut être atteint en quelques mois.

En revanche l'utilisation de l'outil Signal'Air, sur un domaine particulier avec des spécificités environnementales, comporte un intérêt pour les associations, entreprises, riverains avoisinants et peut apporter rapidement des résultats concrets sur l'amélioration de la qualité de l'air. En effet, l'outil permettrait d'objectiver certaines nuisances environnementales et de fluidifier la communication entre les différentes parties prenantes. Par exemple, certaines activités industrielles peuvent engendrer une dégradation locale de la qualité de l'air ou des odeurs désagréables pour la population avoisinante. Ce type de collaboration a pu être menée dans le passé dans le cadre d'une étude réalisée sur le port de Bonneuil-sur-Marne, la deuxième plateforme multimodale francilienne. Suite à une étude spécifique réalisée en 2016 sur un diagnostic de la qualité de l'air, Airparif a mis à disposition du public une plateforme de recensement participatif en ligne des odeurs de mai 2016 à fin octobre 2017. L'objectif était de caractériser la fréquence et l'intensité perçue des odeurs en fonction des signalements postés par les utilisateurs géo-référencés et classés selon différents critères (intensité, gêne, ressentie, type d'odeurs). Cette démarche s'est effectuée en partenariat avec HAROPA – Ports de Paris et les entreprises implantées sur le port de Bonneuil-sur-Marne. Ainsi, le recensement des odeurs au sein et autour de la zone portuaire a permis de récolter un total de 423 signalements sur un an et demi avec une participation de 115 personnes. Cette campagne de recensement des odeurs a permis de suivre l'évolution des signalements sur la zone portuaire, en même temps que la mise en place d'un certain nombre d'améliorations techniques apportées sur les deux centrales à enrobés.

A l'image de l'utilisation de la plateforme de recensement participatif sur le domaine d'étude du port de Bonneuil-sur-Marne, l'outil Signal'Air pourrait s'inscrire dans une telle démarche citoyenne sur une problématique spécifique. Un exemple d'utilisation pourrait être celui de la surveillance des chantiers, générateurs d'envolée de poussière, ou le suivi d'activités générant des poussières ou favorisant leur remise en suspension, telles que le stockage de matériaux pulvérulents et leur manutention.

ANNEXES

Annexe 1 : Résultats des tests métrologiques réalisés sur les systèmes-capteurs

A. Recettage du lot 3

Contexte : A la suite de la recette du lot n°3, plusieurs travaux d'amélioration des concentrations obtenues par les capteurs d'ATMOTRACK ont été entrepris. Ce lot a permis de conforter, consolider et statuer sur les corrections possibles.

Site FIXE – Mesure NO₂ avec une technologie électrochimique :

Après la recette du premier lot, une première version d'un algorithme de correction en temps réel a été mise en place afin de corriger les mesures par rapport à la variation de température. Cette version a montré son efficacité à améliorer la justesse des mesures pour des températures variables.

Une optimisation a été apportée sur ce lot afin d'augmenter l'amplitude de la dynamique du capteur. Les résultats obtenus au cours de la période de la recette ont été satisfaisants, avec une corrélation médiane de 0,83 et des niveaux d'erreur RMSE et MASE acceptables, performances qui ont été maintenues également dans la période suivant la recette (voir Figure 1).

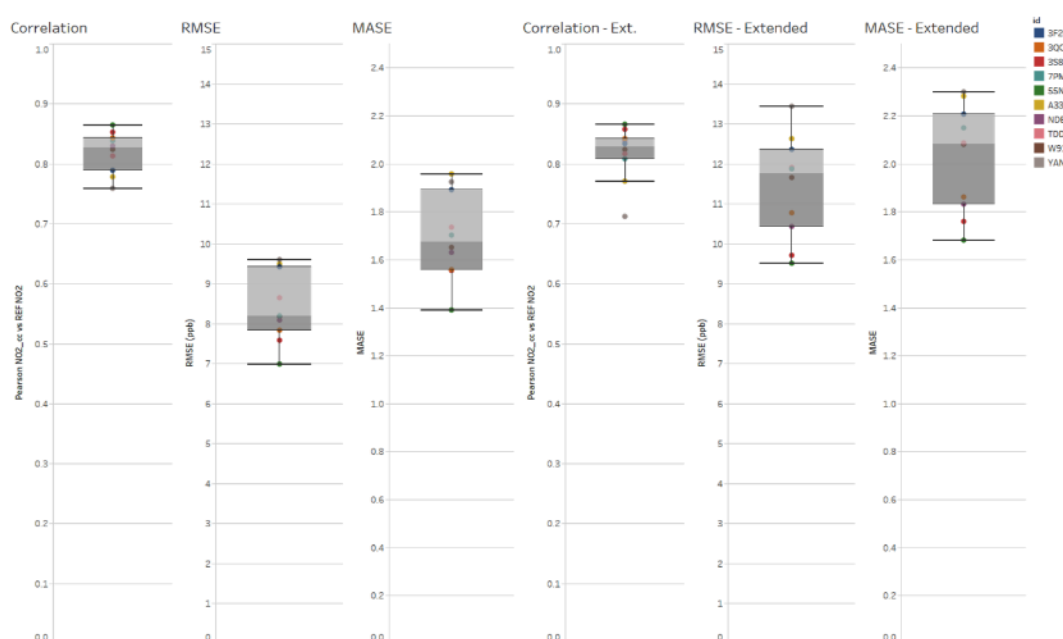


Figure 1 : Statistiques des performances pendant la période de la recette, 23/08/2020 – 04/09/2020 (à gauche), et sur une période prolongée, 23/08/2020 – 28/09/2020 (à droite).

Décision : Déploiement de cet algorithme de correction sur l'ensemble des données (A partir du 1er juillet)

A la suite du problème rencontré lors des recettes, notamment l'impact de la concentration élevée du NO, le signal de sortie a perdu considérablement sa réactivité face aux concentrations de NO₂. Sur les lots 1 et 2, les niveaux de concentration de NO et leurs impacts sur la mesure du NO₂ étaient moindres, compte tenu des congés et du déconfinement progressif ayant conduit à une diminution des émissions d'oxydes d'azote dans l'agglomération parisienne.

Les résultats obtenus pendant la période de la recette ne sont pas satisfaisants avec une corrélation médiane de 0,21 et une dispersion relativement importante. Les métriques RMSE et MASE sont également nettement pires que pour les capteurs électrochimiques. Bien que la corrélation soit légèrement améliorée lorsque l'on considère une période prolongée après la recette, les performances globales des capteurs semi-conducteurs dans des conditions statiques restent médiocres (voir Figure 2).

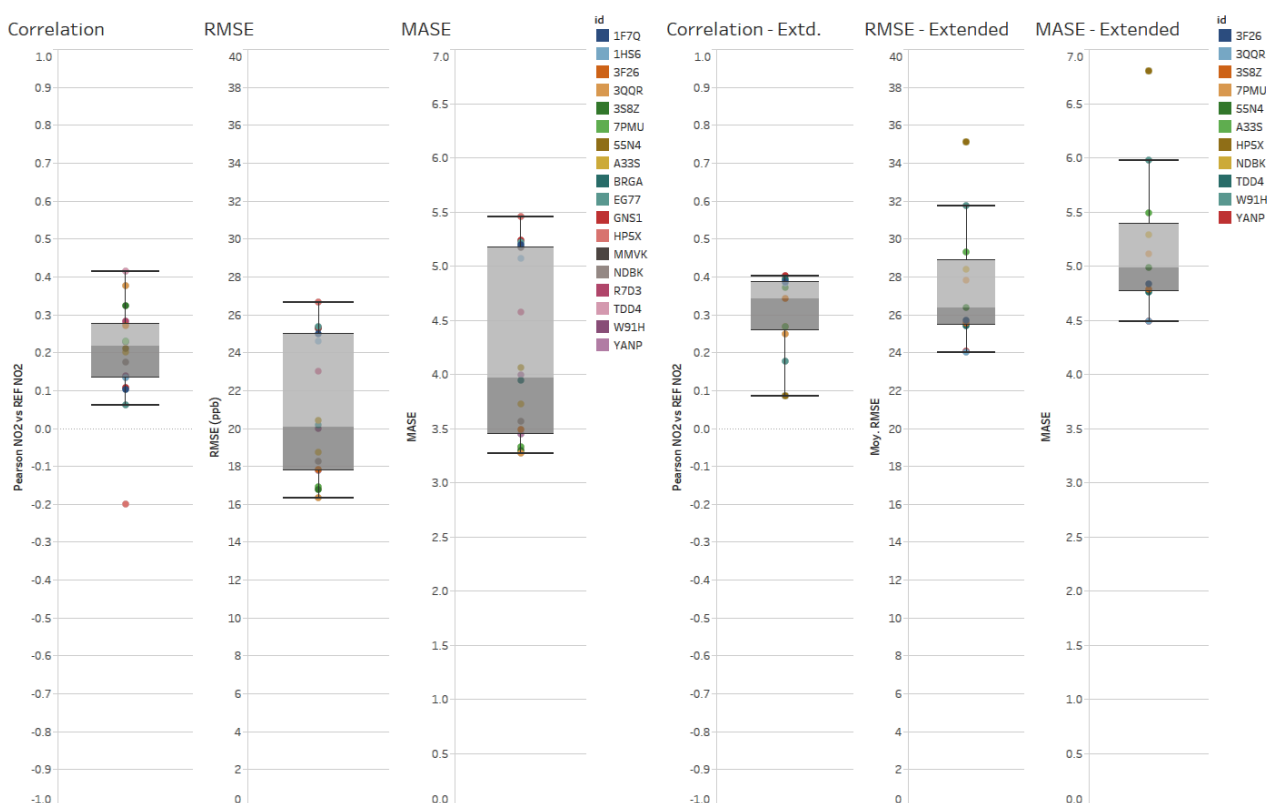


Figure 2 : Statistiques des performances pendant la période de la recette, 23/08/2020 – 04/09/2020 (à gauche), et sur une période prolongée, 23/08/2020 – 28/09/2020 (à droite).

Avec ATMOTRACK, la possibilité de corriger le signal de sortie NO₂ en utilisant les deux autres sorties NH₃ et CO a également été étudiée. Les résultats ne sont pas robustes et ne permettent pas de construire une correction fiable.

La seule amélioration envisageable pour le moment est d'optimiser au maximum le calibrage, choisir les meilleures conditions (en évitant les périodes marquées par des fortes concentrations en NO et en optimisant l'algorithme et l'équation de conversion).

Décision : Renoncement au déploiement d'un algorithme de correction sur l'ensemble des données. Dans la situation fixe, seules les concentrations issues des cellules électrochimiques seront utilisées.

Lors des premières recettes, les données d'Atmotrack étaient en très forte sous-estimation par rapport aux mesures de référence en PM_{10} et $PM_{2.5}$.

Les deux principales pistes explorées pour résoudre cette sous-estimation sont :

- la concentration calculée à partir des nombres de particules et le facteur de densité servant à la conversion en concentration massique.
- la marge d'erreur du comptage pour chaque canal du compteur optique.

La correction évaluée utilise seulement le facteur lié à l'environnement de mesure sans tenir compte de l'erreur de comptage. Cet algorithme est une transformation linéaire qui n'affecte pas les corrélations qui ont une médiane de 0,71 pour la mesure de PM_{10} et de 0,63 pour le $PM_{2.5}$. En revanche, les métriques de RMSE et MASE sont significativement améliorées avec une baisse de 40% et, respectivement, de 43%, pour la mesure de PM_{10} et une baisse de 26% et, respectivement, de 35%, pour le $PM_{2.5}$.

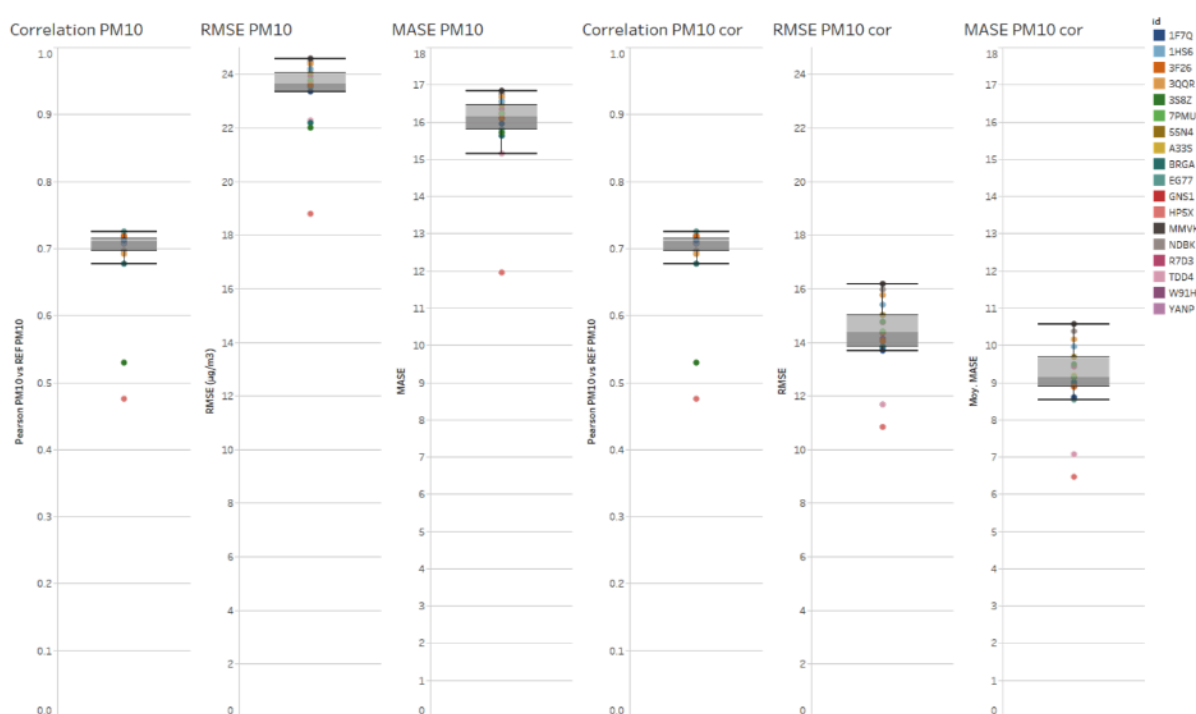


Figure 3 : Statistiques des performances pendant la période de la recette, 23/08/2020 – 04/09/2020 pour le PM_{10} avant correction (à gauche) et après correction (à droite).

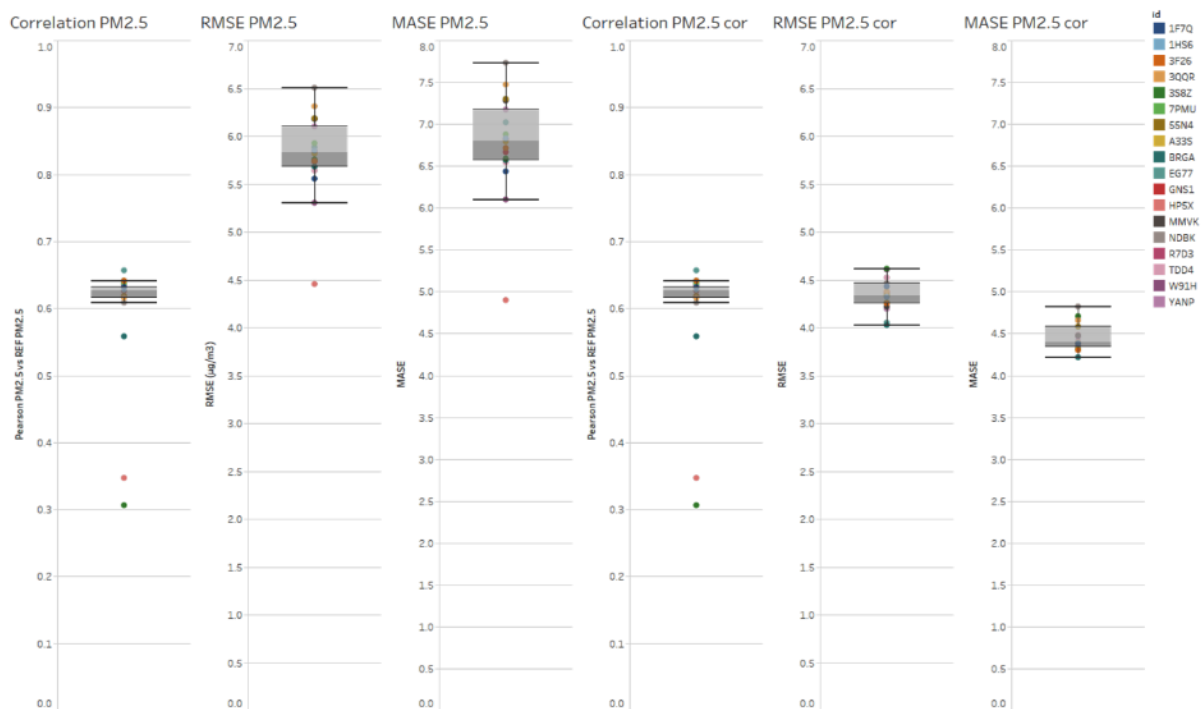


Figure 4 : Statistiques des performances pendant la période de la recette, 23/08/2020 – 04/09/2020 pour le PM2.5 avant correction (à gauche) et après correction (à droite).

Afin de valider la fiabilité de cette correction, elle a été appliquée sur les capteurs déployés sur d'autre site A1, BPEST, PA01H, Gennevilliers, Vitry, RN2, et RN6. Pour les mesures de PM₁₀, le bénéfice de la correction est évident (voir Figure 5). Pour les mesures de PM_{2.5}, en revanche, un bénéfice global n'est pas observé (voir Figure 6). Les performances pour certains sites baissent (voir en particulier le site de fond de Gennevilliers) pendant que pour les autres elles montent.

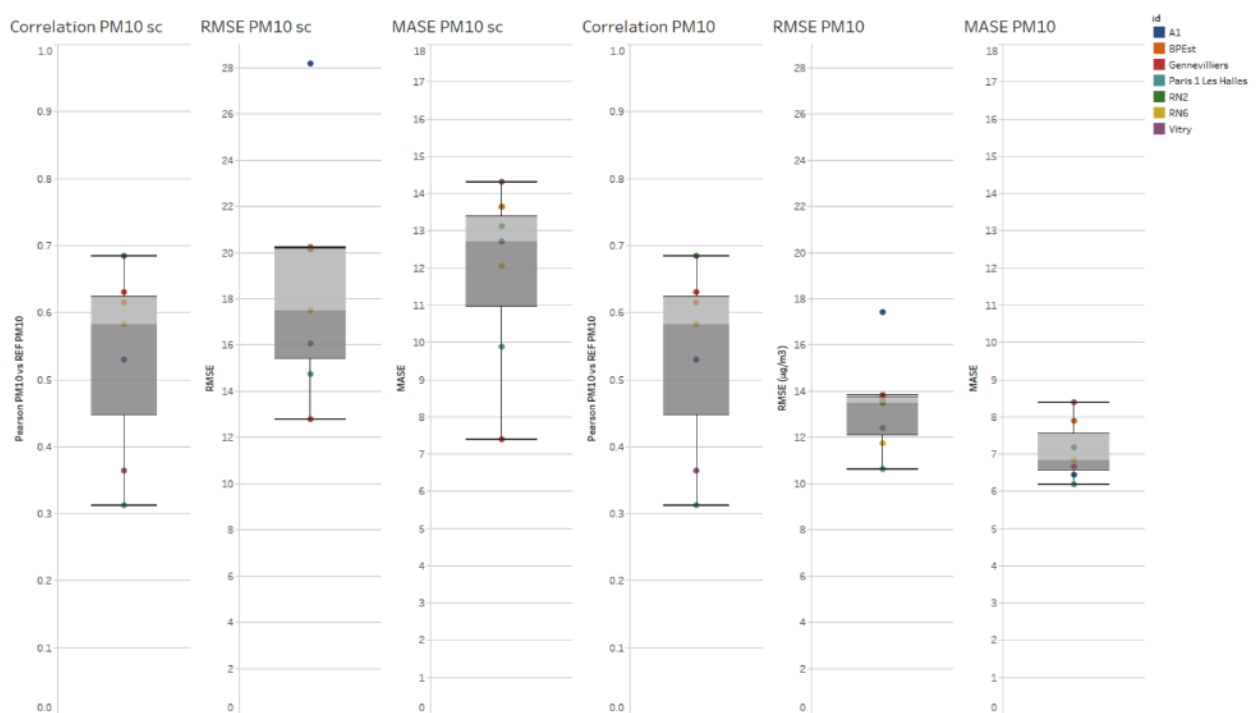


Figure 5 : Statistiques des performances pendant la période 01/07/2020 – 22/09/2020 pour le PM10 avant correction (à gauche) et après correction (à droite).

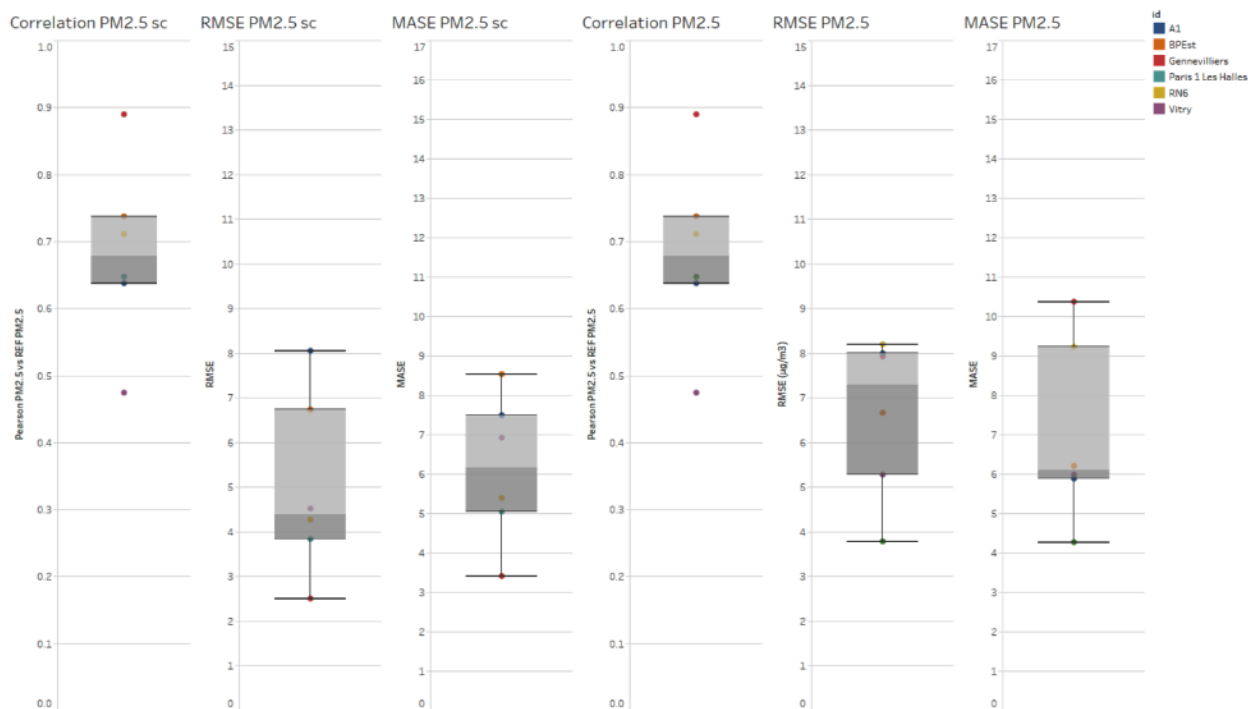


Figure 6 : Statistiques des performances pendant la période 01/07/2020 – 22/09/2020 pour le PM2.5 avant correction (à gauche) et après correction (à droite).

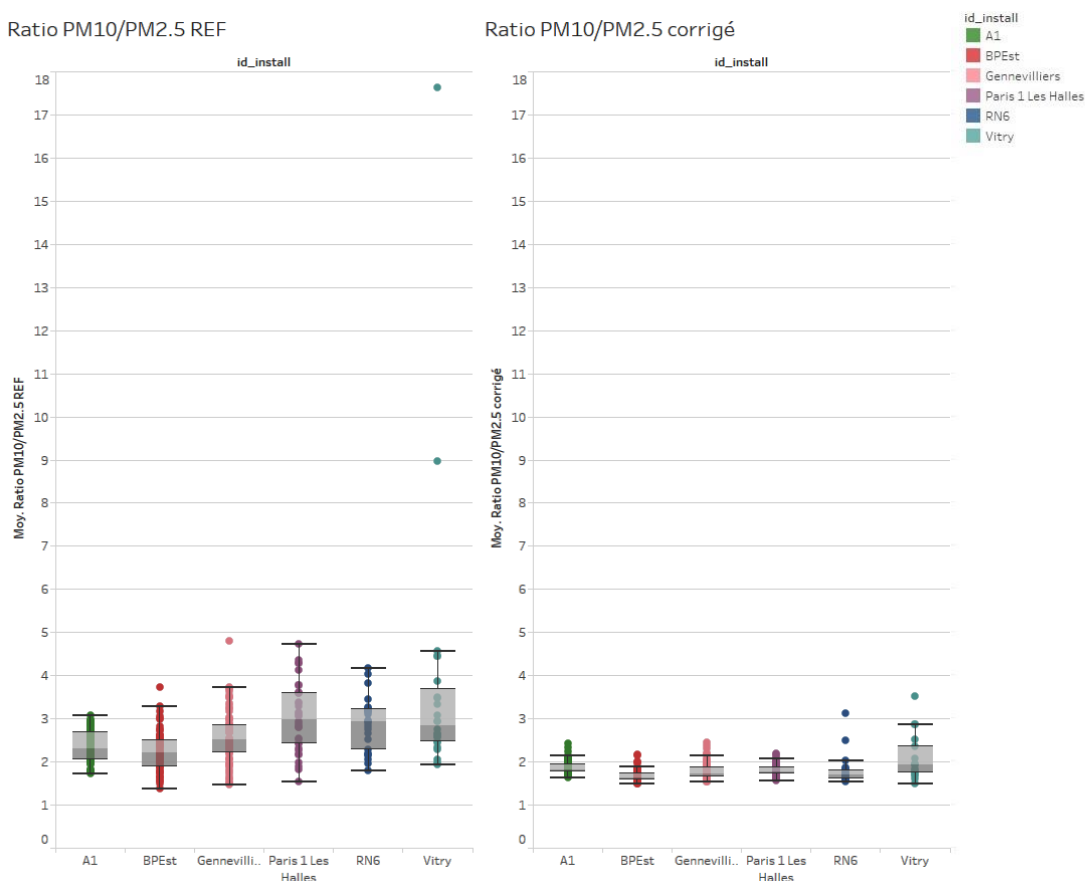


Figure 7 : Ratios PM10/PM2.5 pour les différents sites de référence (à gauche) et les capteurs installés sur ces mêmes sites (à droite).

Décision : Déploiement de cet algorithme de correction sur l'ensemble des données des sites fixes et mobiles (A partir du 1^{er} juillet).

Site MOBILE – Mesure NO₂ avec une technologie semi-conducteur :

Les concentrations en mobilité sont supérieures aux concentrations observées en site fixes, ce qui permet d'obtenir de meilleures corrélations avec la mesure de référence qu'en situation fixe. Les performances sont conformes à l'état de l'art.

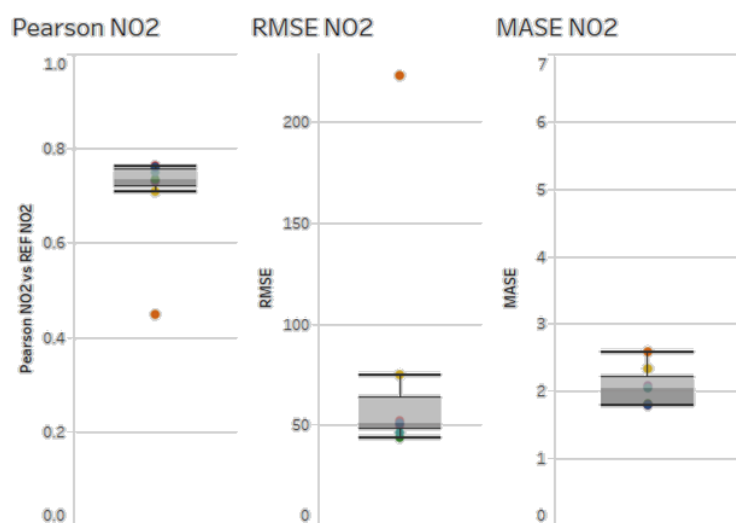


Figure 8 : Statistiques des performances des capteurs NO₂ semi-conducteurs en mobilité lors de la recette.

Décision : Pas de modification de l'algorithme de correction sur les données en mobilité.

Site MOBILE – Mesure des particules :

L'amélioration envisagée sur les données en situation fixe, ne dégrade pas les corrélations en mobilité sur les concentrations de PM₁₀ et PM_{2.5}.

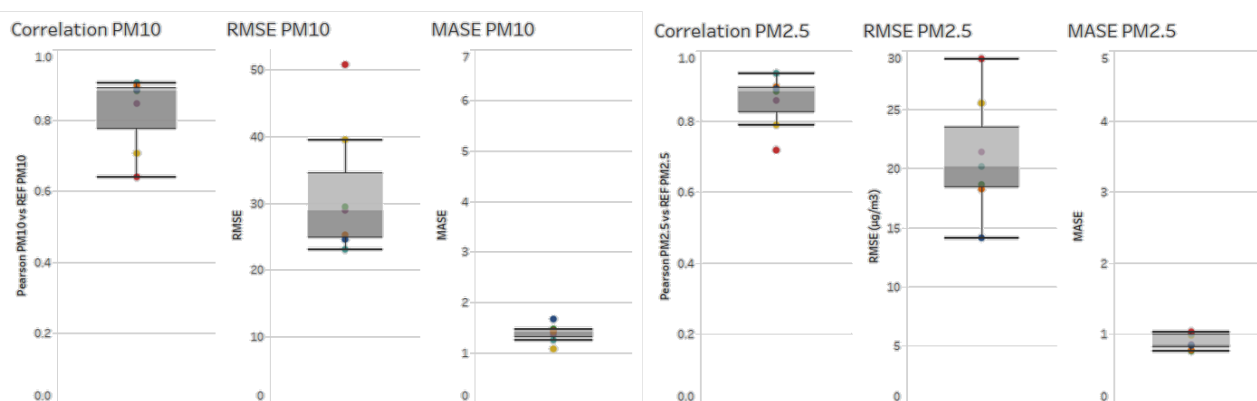


Figure 9 : Statistiques des performances des capteurs PM₁₀ (à gauche) et PM_{2.5} (à droite) en mobilité lors de la recette.

Décision : Déploiement de cet algorithme de correction sur l'ensemble des données des sites fixes et mobiles (A partir du 1^{er} juillet)

Conclusions

En conditions statiques, les capteurs NO₂ électrochimiques testés à la station BP Auteuil ont bénéficié d'une double correction (pour supprimer l'influence de la température et améliorer la dynamique de la réponse). Les performances observées résultantes étaient conformes à l'état de l'art. Ces corrections ont ensuite été déployées pour tous les capteurs, y compris sur les données historiques, et une vérification de leur robustesse a été effectuée pour les autres sites de référence disponibles.

Dans les mêmes conditions statiques, les capteurs NO₂ semi-conducteurs testés ont des performances faibles et inadéquates à une exploitation directe. Les différents efforts pour améliorer ces mesures ont été malheureusement infructueux et la décision a été prise de se baser exclusivement sur les mesures de capteurs NO₂ électrochimiques pour les sites fixes. En mobilité, en revanche, dans des conditions avec des niveaux de concentration plus élevés, les capteurs NO₂ semi-conducteurs s'avèrent beaucoup mieux adaptés avec des performances satisfaisantes pour ce type d'utilisation.

Les mesures PM brutes en site fixe présentent une sous-estimation des niveaux de concentration sur le site d'Auteuil pour les PM_{2.5} et en particulier pour les PM₁₀. Une correction linéaire a été appliquée à la fonction de conversion des comptages en concentration massique qui a permis une amélioration significative des métriques d'erreur des données acquises à Auteuil. La robustesse de cette correction a été testée sur d'autres sites de référence qu'Auteuil. Pour les mesures de PM₁₀, l'amélioration des performances s'est maintenue, tandis que pour les PM_{2.5} les résultats n'ont pas été concluants, quelques sites présentant une dégradation des performances. En mobilité, la correction a amélioré les performances des mesures de PM₁₀ et de PM_{2.5}. Il a été décidé d'appliquer ces corrections à tous les capteurs, y compris les données historiques, car cela fournirait une base uniforme pour le traitement ultérieur des données.

Les tests de robustesse ont mis en évidence la faiblesse de l'utilisation d'un seul ensemble statique de paramètres de correction pour tous les sites. De plus, l'état de la technique sur l'utilisation expérimentale des capteurs optiques pour les mesures de particules a montré que les facteurs de conversion des capteurs optiques de particules ne sont pas statiques et doivent souvent être adaptés dans le temps. Comme déjà indiqué, l'utilisation de ces corrections fournira une bonne base pour l'exploitation de ces capteurs, cependant à long terme nous devons développer les algorithmes appropriés afin d'adapter les facteurs de conversion pour les différents sites et les effets saisonniers sur la nature des particules.

Néanmoins, cette base de données d'un an et demi de mesure, inédite en France, constituée de 100 capteurs fixes et 200 capteurs en mobilité en NO₂ pourra faire l'objet d'exploitations dans le cadre d'autres projets. Elles permettront, peut-être, une amélioration de la compréhension du comportement des capteurs et une correction statistique permettant de mieux reproduire les niveaux absolus en NO₂.

B. Synthèse des recettages

Lot 1

Ces essais ont pour objectifs de faire un constat à réception sur la qualité de fabrication du lot et l'homogénéité des caractéristiques métrologiques.

Globalement, les capteurs sont cohérents avec la reproductibilité de l'ensemble des capteurs. Cette reproductibilité est nettement meilleure en PM qu'en NO₂. Certains capteurs ont des limites de quantification plus hautes que d'autres. Des solutions d'amélioration ont été initiées par 42Factory (ligne de base et sensibilité des sensors).

Seul le capteur 20010112 a été identifié en dysfonctionnement.

La justesse est la grande difficulté de ce type de matériel. Les corrélations sont satisfaisantes, voire très satisfaisantes dans certains cas mais demandent globalement des corrections pour pouvoir comparer directement les données à la mesure de référence.

Chaque paramètre a été traité et fait l'objet d'une annexe à ce document.

Ce premier lot a servi à clarifier les règles de réception et servira de référence pour les futurs lots.

Lot 2

Globalement les capteurs sont cohérents avec la reproductibilité obtenue lors du lot 1 et l'état de l'art attendu pour ces paramètres. Cette reproductibilité est nettement meilleure en PM qu'en NO₂.

Certains capteurs ont des limites de quantification plus hautes que d'autres. Des solutions d'amélioration devront être initiées par 42Factory (ligne de base et sensibilité des sensors).

Seul le capteur 20020107 a été identifié en dysfonctionnement en NO₂.

La justesse est la grande difficulté de ce type de matériel. Les corrélations sont satisfaisantes, voire très satisfaisantes dans certains cas mais demandent globalement des corrections pour pouvoir comparer directement les données à des mesures de référence.

Chaque paramètre a été traité et fait l'objet d'une annexe à ce document.

Lot 3

Globalement, les capteurs sont cohérents et en amélioration avec la reproductibilité obtenue lors du lot 1 et 2. Nous atteignons l'état de l'art attendu pour ces paramètres. Cette reproductibilité est nettement meilleure en PM qu'en NO₂.

Seul le capteur 20020176 a été identifié en dysfonctionnement en NO₂ et PM. Le capteur 20020171 a été réparé.

Certains capteurs ont des limites de quantification plus hautes que d'autres. Des solutions d'amélioration ont été initiées par 42 Factory.

La justesse est la grande difficulté de ce type de matériel. Les corrélations sont satisfaisantes, voire très satisfaisantes dans certains cas mais demandent globalement des corrections pour pouvoir comparer directement les données à des mesures de référence.

Chaque paramètre a été traité et fait l'objet d'une annexe à ce document.

Lot 4

Globalement, les capteurs sont cohérents et en amélioration avec la reproductibilité obtenue lors du lot 1 et 2. Les travaux sur le lot 3 ont porté leurs fruits et ces améliorations sont stabilisées : Nous atteignons l'état de l'art attendu pour ces paramètres. La reproductibilité est nettement meilleure en PM qu'en NO₂. Aucun capteur n'a été identifié en dysfonctionnement.

Certains capteurs ont des limites de quantification plus hautes que d'autres. Des solutions d'amélioration ont été initiées par 42 Factory.

La justesse est la grande difficulté de ce type de matériel. Les corrélations sont satisfaisantes, voire très satisfaisantes dans certains cas mais demandent globalement des corrections pour pouvoir comparer directement les données à des mesures de référence.

Chaque paramètre a été traité et fait l'objet d'une annexe à ce document.

Lot 5

Globalement, les capteurs sont cohérents et en amélioration avec la reproductibilité obtenue lors du lot 1 et 2. Les travaux sur le lot 3 ont porté leurs fruits et ces améliorations sont stabilisées : Nous atteignons l'état de l'art attendu pour ces paramètres. La reproductibilité est nettement meilleure en PM qu'en NO₂. Toutefois, la mesure du NH₃ à l'aide de cellule électrochimique ne donne pas satisfaction. La limite de détection est supérieure aux concentrations rencontrées en air ambiant. Aucun capteur n'a été identifié en dysfonctionnement.

Certains capteurs ont des limites de quantification plus hautes que d'autres. Des solutions d'amélioration ont été initiées par 42 Factory.

La justesse est la grande difficulté de ce type de matériel. Les corrélations sont satisfaisantes, voire très satisfaisantes dans certains cas mais demandent globalement des corrections pour pouvoir comparer directement les données à des mesures de référence.

Chaque paramètre a été traité et fait l'objet d'une annexe à ce document.

Lot 6

Les matériels évalués sont les suivants :

id_install	N° de série	PM	NO2	NH3	NO2 EC	NH3 EC
BD8A	20010008	X	X		SPEC-NO2	
D4PV	20010010	X	X		SPEC-NO2	
LGNX	99999972	NEXT PM	X		SPEC-NO2	
P3WE	20010048	SPS-30	X			
N1VW	20020235	GCJA5	X			

Pour l'intégration de nouveaux éléments sensibles pour les PM :

- Le Next PM est du groupe TERA
- Le SPS-30 est de chez SENSIRION
- Le SN-GCJA5 est de chez PANASONIC

Les éléments sensibles dits « classiques » : NO₂ semi-conducteur et les PM des capteurs BD8A et D4PV sont cohérents avec les 5 lots de recette précédents.

La limite de détection des éléments sensibles SPEC-NO2 ne permet pas une analyse. Cette limite de qualification est supérieure aux concentrations observées. Aucune corrélation n'est observée avec la mesure de référence.

Pour les capteurs PM innovants, l'ensemble des capteurs est cohérent avec l'état de l'art de cette technologie. L'incertitude de reproductibilité est excellente entre les capteurs de technologie similaire. Le NEXT PM diffère du fait du chauffage de l'aérosol, ce qui améliore la mesure des PM₁₀ et détériore sensiblement la corrélation avec la mesure de référence des PM_{2.5}.

Le N1VW a un taux de fonctionnement de 45 % en situation fixe. Les capteurs P3WE et N1VW ont eu des pertes importantes et des dysfonctionnements lors des essais de mobilité.

La justesse est la grande difficulté de ce type de matériel. Les corrélations des 3 éléments sensibles nouveaux ne montrent pas d'amélioration substantielle sur les capteurs historiques

d'ATMOTRACK. Les éléments SPS-30 et GCJA5 sont similaires aux capteurs historiques. Dans certaines conditions, le capteur NEXT-PM se comporte différemment.

Chaque paramètre a été traité et fait l'objet d'une annexe à ce document.

Conclusion générale sur les recettes

Ces essais avaient pour objectifs de faire un constat à réception sur la qualité de fabrication du lot et de l'homogénéité des caractéristiques métrologiques.

Globalement, les capteurs sont cohérents et en amélioration avec la reproductibilité obtenue lors du lot 1 et 2. Lors de la recette du Lot 3, des améliorations des algorithmes ont été réalisées par ATMOTRACK. Les travaux sur le lot 3 ont porté leurs fruits et ces améliorations se sont stabilisées sur les lots 4 et 5.

Nous atteignons l'état de l'art attendu pour ces paramètres. Cette reproductibilité est nettement meilleure en PM qu'en NO₂.

Le bilan pour les essais en situation fixe sur BP-EST et AUT est :

	NO2	NO2 EC	PM25	PM10
A1	0%	0%	43%	35%
A2	94%	88%	53%	64%
A3	0%	0%	1%	1%
A4	6%	12%	3%	0%

Synthèse site FIXE

Jusqu'à 12 % des éléments sensibles des lots peuvent être en dysfonctionnement et inutilisable. Pour le NO₂, environ 90 % sont cohérent avec l'état de l'art en termes de reproductibilité mais non juste. L'étude d'une correction possible sera à étudier lors du projet

Pour les PM₂₅ et les PM₁₀, environ 53 à 64 % sont cohérent avec l'état de l'art en termes de reproductibilité mais non juste, toutefois environ 35 à 43 % répondent de façon cohérente d'un point de vue justesse. Des corrections sont envisageables.

	NO2	PM25	PM10
A1	0%	56%	79%
A2	82%	33%	13%
A3	0%	0%	3%
A4	18%	10%	5%

Synthèse site MOBILE

En mobilité, la mesure NO₂ est plus défavorable qu'en situation fixe. Dans le cas des PM la situation est améliorée par rapport à la situation fixe, 2 hypothèses possibles :

- Différence de pertinence des algorithmes FIXE et MOBILE
- La nature des particules est plus homogène au sein du trafic

La mesure du NH₃ à l'aide de cellule électrochimique ne donne pas satisfaction. La limite de détection est supérieure aux concentrations rencontrées en air ambiant. L'élément semi-conducteur pour le NH₃ est prometteur sans toutefois avoir été étalonné.

Annexe 2 : Résultats des tests réalisés sur les capteurs NH₃ - lot 5

Les essais consistent à évaluer et caractériser les 15 capteurs échantillonnés. Les solutions sont comparées à des appareils de mesure de référence pour le NH₃. Pour cela, les capteurs Atmo02 sont disposés sur notre station de référence BP-EST (Boulevard Périphérique – Porte dorée) en parallèle des mesures de référence réalisées. Les capteurs n'ont pas été évalués en mobilité.

Les concentrations de référence mesurées sont issues d'un analyseur Picarro G2103.

Cet essai a été réalisé du 26 novembre au 14 décembre 2020.

Les matériels évalués sont les suivants :

id_install	N° de série	NH3	NH3 EC
WFPN	20020563	X	
M836	20020274	X	
J5AL	20020329	X	
Y2P5	20020333	X	
74Y4	20020543	X	X
LQK9	20020545	X	X
NDBK	20020549	X	
1F7Q	20020560	X	
EG77	20020554	X	
Z6PX	20020546	X	X
QJ1Q	20020544	X	X
WVN3	20020542	X	X
RWWS	20020337	X	
2ZGL	20020328	X	
3F26	20020307	X	

Les statistiques de performance utilisées sont le Z-SCORE et l'écart normalisé En (Selon la norme NF ISO 13528)

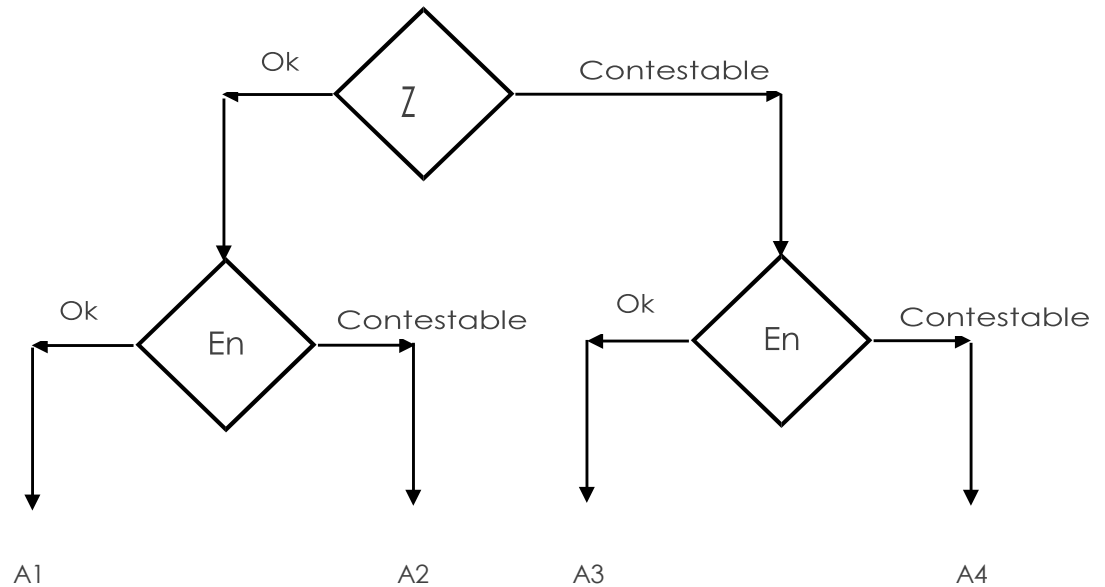
La classification des résultats se fera en 4 catégories distinctes de :

A1 : Le résultat est entièrement satisfaisant.

A2 : Le résultat est satisfaisant mais l'incertitude rapportée n'intègre pas l'ensemble des sources présentes lors de l'exercice (Incertainité trop petite).

A3 : Le résultat n'est pas satisfaisant dû à sa grande incertitude. Il est toutefois utilisable.

A4 : Le résultat est peu satisfaisant et ne peut être utilisé



Les outils statistiques pris en compte sont les suivants :

o Score Z (Selon la norme NF ISO 13528) :

Si ces critères statistiques sont utilisés, il convient que les estimations de la variabilité soient fiables, c'est-à-dire basées sur un nombre suffisant d'observations.

$$Z = \frac{(x - X)}{s}$$

où X = Valeur de référence (Pour des cas simple la médiane, ou la moyenne robuste est conseillée)

x = Valeur d'un mesurage (Un capteur)

s = Ecart type pour l'évaluation de l'aptitude.

Critère d'acceptation $Z \leq 2$

o Nombres E_n (Selon la norme NF ISO 13528):

Cette statistique de performance est calculée comme suit :

$$E_n = \frac{(x - X)}{\sqrt{u_{\text{capteur}}^2 + u_{\text{ref}}^2}}$$

où

X = Valeur de référence

x = Valeur d'un mesurage

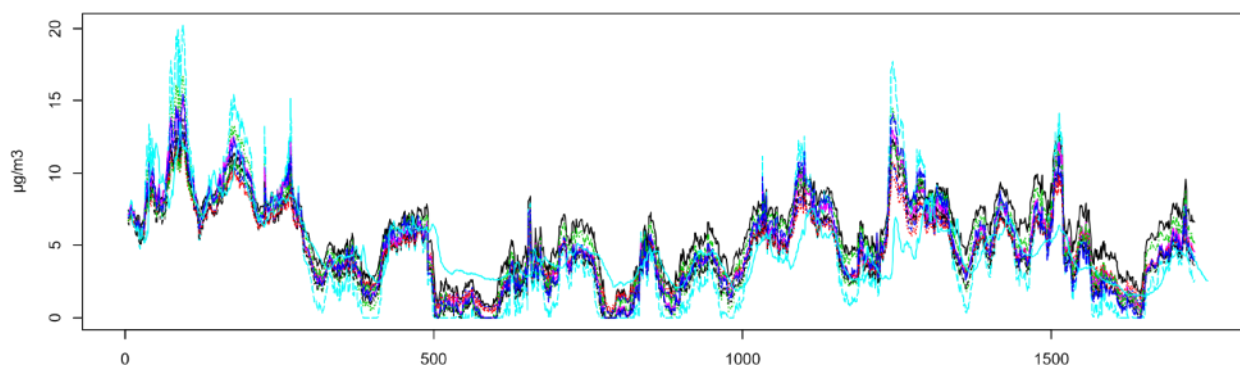
U_{Capteur} = Incertitude élargie du résultat x d'un μ Capteur (30%/50%). U_{ref} = Incertitude élargie de X (Référence 15%/25%).

Critère d'acceptation $E_n < 1$. Contrairement au Score Z le seuil critique est de 1 car le calcul est fait à partir d'incertitude élargie.

Les résultats des 15 matériels sont comparés à la médiane avec une agrégation en quart-horaire.

En fixe – semi-conducteur :

Les concentrations de NH₃ des capteurs semi-conducteurs (Paramètre : nh3) obtenus sur les 10 matériels Atmo02 sont les suivantes :



Concentrations de NH₃ en µg/m³

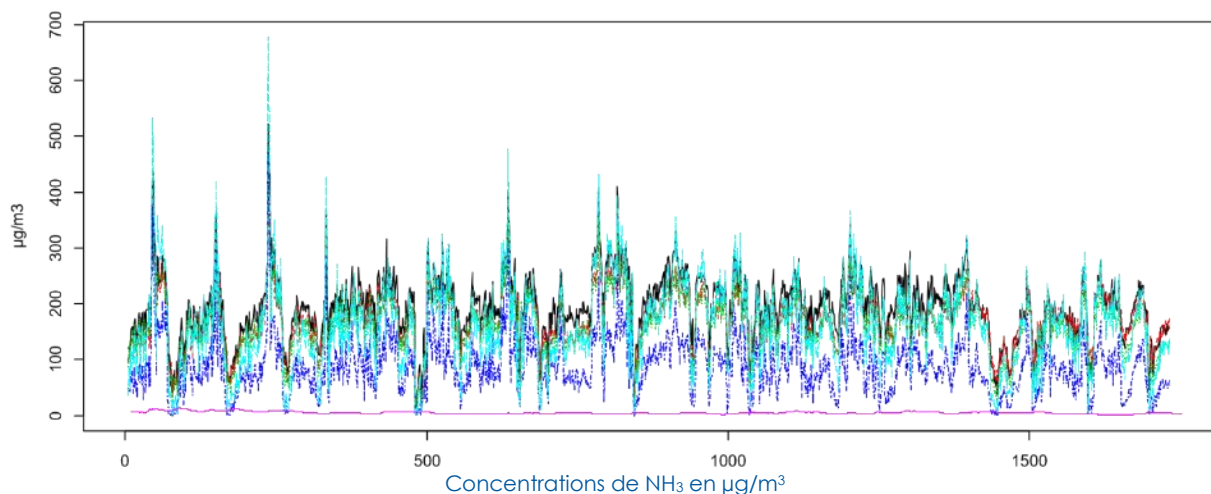
id_install	N° de série	Z-SCORE	Ecart normalisé	Catégorie
WFPN	20020563	OUI	OUI	A1
74Y4	20020543	OUI	NON	A2
LQK9	20020545	OUI	NON	A2
NDBK	20020549	OUI	NON	A2
1F7Q	20020560	OUI	NON	A2
EG77	20020554	OUI	NON	A2
Z6PX	20020546	OUI	NON	A2
QJ1Q	20020544	OUI	NON	A2
WVN3	20020542	OUI	NON	A2
3F26	20020307	OUI	NON	A2

Résultat des statistiques de performance

L'ensemble des capteurs est cohérent avec l'état de l'art de cette technologie. La reproductibilité obtenue pour ce polluant est conforme aux attentes. Ils sont dans la zone d'incertitude (Z-score entre -3 et 3). La comparaison avec la mesure de référence est conforme aux attentes (En entre -1 et 1) jusqu'à 80 % des concentrations observées. La corrélation de 0,76 à 0,81 permet d'envisager une correction des concentrations. Une grande partie de ces concentrations sont proches des limites de quantification de ce type de capteur. Des solutions d'amélioration peuvent être explorées par 42Factory et AIRPARIF dans l'avenir. Ce lot pour ce polluant est accepté.

En fixe – cellule électrochimique

Les concentrations de NH₃ des capteurs électrochimiques (Paramètre : nh3) obtenus sur les 5 matériels Atmo02 sont les suivantes :



id_install	N° de série
74Y4	20020543
LQK9	20020545
Z6PX	20020546
QJ1Q	20020544
WVN3 2	2002054

Z-SCORE	Ecart normalisé	Catégorie
OUI	NON	A2
OUI	NON	A2
OUI	NON	A2
OUI	NON	A2
OUI	NON	A2

Résultat des statistiques de performance

Les tests montrent que les capteurs sont tous reproductibles, mais qu'ils présentent des problèmes de justesse. Les limites de quantification sont beaucoup trop hautes (30 fois supérieures aux concentrations attendues). La comparaison avec la mesure de référence n'est pas conforme aux attentes. Seulement 1% des concentrations observées sont entre -1 et 1. Les corrélations sont très mauvaises (< 0.20) et ne permettent pas d'envisager une correction des concentrations. Ce lot pour ce polluant n'est pas accepté.

Ces essais ont pour objectifs de faire un constat à réception sur la qualité de fabrication du lot et d'homogénéité des caractéristiques métrologiques. La mesure du NH_3 à l'aide de cellule électrochimique ne donne pas satisfaction. La limite de détection est supérieure aux concentrations rencontrées en air ambiant. Aucun capteur n'a été identifié en dysfonctionnement. Les résultats obtenus à l'aide des capteurs semi-conducteurs ont donné satisfaction. Notons que la justesse est la grande difficulté de ce type de matériel.

Annexe 3 : Stockage des données

L'utilisation au quotidien de la base de données relationnelle stockant les données géoréférencées du projet a montré ses limites. Telle qu'elle a été structurée, requêter les données d'une journée, sans filtre sur les capteurs, prend quelques minutes (plus de trois). Si cette durée n'est pas exorbitante en soi, elle peut être assez rédhibitoire lors de développements intensifs, d'essais de code, de parcours de l'intégralité des données pour calculer des données synthétiques, etc.

Des développements liés à cette mise à disposition ont été réalisés en fin de projet. Si le principe d'une base de données relationnelle peut être conservé, dans le pipeline de réception des données depuis les μ -capteurs par exemple, il peut être intéressant de mettre en opérationnel en parallèle un système de fichiers compressés et structurés de manière pouvoir récupérer les données très rapidement.

Plus concrètement, ce système de fichiers est composé de csv, avec chaque csv contenant l'intégralité des données d'une journée. Ce csv est composé de colonnes time, x, y, sensor (un id propre à chaque μ -capteur) ainsi que des champs mesurés (NO₂, PM₁₀, PM₂₅, NH₃, T, HYG, etc), et adopte donc l'idée « un relevé géographique et ses mesures = une ligne ». Une telle structuration permet de « factoriser » l'indexation temporelle et spatiale à tous les champs relevés et induit un gain de place (moins de données redondantes).

	sensor		x	y	NO2	PM10	PM25	PM01	NH3	T	HYG
date											
2020-10-15 03:17:34	VGR1	578050.354280	2.423659e+06	13.76	29.60	19.83	9.60	0.00	13.34	60.5	
2020-10-15 03:59:02	L7BV	600504.681456	2.429280e+06	19.03	45.24	31.11	14.83	37.90	15.63	53.1	
2020-10-15 20:24:13	47TP	607020.146318	2.395991e+06	14.00	13.31	7.78	3.99	31.56	16.55	45.5	

On aboutit donc à un système de fichiers, pouvant être mis à disposition sur un serveur. Chaque fichier de données journalières comporte dans son nom la date du jour concerné : requêter au serveur les données d'une journée revient donc à localiser un fichier parmi plusieurs centaines d'autres, ce qui est une opération très rapide, et à le télécharger. Cette indexation temporelle par noms de fichiers est simple sur le principe, mais participe grandement aux performances du système décrit.

Les csv se prêtent de plus bien à la compression / décompression à la volée via le package python pandas (les méthodes `to_csv` et `read_csv` sont capables de décompresser directement selon plusieurs standards). Plusieurs algorithmes sont mis à disposition, et après un rapide benchmark (entre gzip, bz2, zip, xz et zst), c'est le standard de compression zst (zstandard) qui a été retenu. Il offre en effet le meilleur compromis ratio de compression, temps d'écriture, temps de lecture / décompression.

Annexe 4 : Calibration par points de rendez-vous

Les données mobiles permettent l'identification de points de rendez-vous, ou bien entre elles, ou bien avec le réseau de stations fixes de référence d'Airparif. Ces points de rendez-vous sont définis selon deux paramètres Δt et Δd qui permettent de définir une discrétisation du temps et de l'espace (ex : 50m et 5mn). Une telle discrétisation sur une période définie est appelée scène. Δt et Δd ont bien évidemment une influence sur la scène et les rendez-vous déduits. Des petits paramètres de discrétisation induisent une grande finesse de comparaison mais réduit sensiblement le nombre de rendez-vous, des paramètres plus grands augmentent le nombre de rendez-vous mais réduisent la qualité des comparaisons deux à deux.

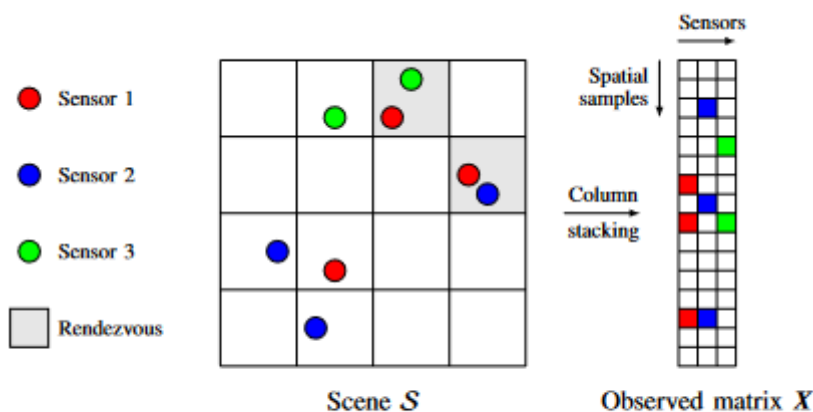


Fig. 1. From a scene S (with $n = 16$ spatial samples, $m + 1 = 3$ sensors and 2 rendezvous) to the data matrix X (white pixels mean no observed value).

Ces points de rendez-vous sont alors exploitables par un ensemble d'algorithmes développés par Clément Dorffer, Matthieu Puigt, Gilles Delmaire, et Gilles Roussel (Université du Littoral Côte d'Opale) : IN-Cal et ses variantes plus sophistiquées (AC-Cal, Sp-Cal, SpA-Cal). Cet ensemble d'algorithmes partagent un même cœur mathématique, basé sur la factorisation de matrices non-négatives. IN-Cal est une calibration linéaire, qui pour une scène donnée produit des coefficients de calibration propre à chaque capteur (un *offset* et un *gain*). Plusieurs remarques :

- Seuls les μ -capteurs ayant fait rendez-vous avec au moins un autre et rentrent dans la calibration
- Tous les μ -capteurs ne sont pas forcément interconnectés : si l'on analyse le graphe de connectivité produit (un rendez-vous ou plus signifie que deux μ -capteurs sont connectés / adjacents dans le graphe), celui-ci n'est pas forcément *connexe* (d'un seul tenant). On peut alors isoler les μ -capteurs en k ensembles interconnectés, et dont les k calibrations sont indépendantes
- Sans mesures de référence, la calibration produite est *relative*, c'est-à-dire que l'ensemble des offsets et gains produits sont définis à un coefficient près. Autrement dit la calibration déduite vise à remettre en cohérence les données des capteurs mobiles entre elles, mais sans ancrage avec les données de référence. L'introduction du réseau de référence permet une calibration qui ne soit plus relative : l'information constituée des mesures dont on soit sûr est propagée. Les stations de référence sont alors traitées dans l'algorithme comme les autres capteurs, à la différence qu'un forçage est opéré afin que leurs gains valent 1 et leurs offsets 0 : elles rentrent ainsi dans la calibration mais ne sont pas calibrées

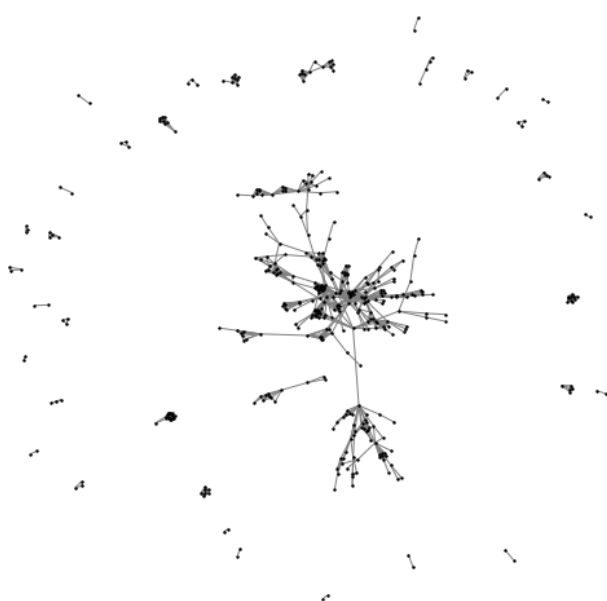
Plusieurs interrogations se posent alors autour de ces rendez-vous stations de référence / μ -capteurs. Puisque les données μ -capteurs de ce projet sont des concentrations produites toutes les 10~20s, et que les données des stations de références les plus fines auxquelles on a accès sont des moyennes 15min, on peut légitimement se demander si la comparaison est valide. Interrogation renforcée dans le cas des particules, puisqu'il a été montré que le « spectre » des diamètres des particules mesurables diffère sensiblement d'une technologie à une autre. En s'autorisant ces approximations, on peut alors pré-traiter les données de référence en les sur-échantillonnant dans le temps de manière à avoir au moins une donnée tous les Δt (qui dans la pratique est inférieure à 15min). Cela

permet de ne pas avoir de « trous » de données de référence dans la discrétisation temporelle. Ce suréchantillonnage est réalisé en dupliquant la valeur de référence.

Dès lors, l'application d'IN-Cal est possible en se donnant un Δd et un Δt de discrétisation, et une période d'analyse. Pour des questions de coût algorithmique (temps de calcul et mémoire utilisée), on peut alors créer la scène, en déduire un graphe de connectivité, mettre de côté les μ -capteurs n'ayant fait rendez-vous avec aucun autre, mettre de côté les ensembles interconnectés de μ -capteurs n'ayant pas fait rendez-vous avec au moins une station (ou un nombre seuil de stations à définir pour plus de robustesse), et lancer IN-Cal sur chacun des ensembles interconnectés restants.

Le choix de la période couverte par la calibration doit également être un compromis. Choisir une large période permet d'augmenter le nombre de rendez-vous, le nombre de liens dans le graphe de connectivité global, et donc d'élargir le nombre de μ -capteurs calibrables de manière absolue. Cependant, IN-Cal n'étant pas une calibration dynamique dans le temps (mêmes gains et mêmes offsets pour toute la période), on se retrouve alors avec une calibration moyenne qui peut ne pas rendre compte des dérives qui peuvent altérer au cours du temps les signaux des capteurs. C'est à ces problématiques que les algorithmes variantes d'IN-Cal sont chargés de répondre.

Graphe de connectivité du 05/03/2021 au 06/03/2021, $\Delta d=35m$, $\Delta t=5min$



Exemple de graphe de connectivité d'une scène. Un point représente un capteur, un lien représente au moins un rendez-vous (une cellule spatio-temporelle en commun)

Acquis :

- Algorithme de création de scène (discrétisation spatio-temporelle) mêlant données μ -capteurs et données de référence
- Algorithme IN-Cal (calibration linéaire et fixe dans le temps d'une flotte de μ -capteurs dont une fraction est mobile et dans un domaine où l'on dispose de mesures de référence)

Perspectives :

- Viser la maîtrise de AC-Cal, Sp-Cal et SpA-Cal, pour des calibrations robustes et proches de la réalité physique des capteurs, à savoir des dérives de capteurs dynamiques dans le temps, et probablement sensibles à des paramètres météo (principalement l'humidité)
- Améliorer la discrétisation spatiale des scènes servant de support à la calibration, et avoir non pas un quadrillage régulier, mais un mesh adaptatif créé selon le réseau routier ; intérêt à discuter

Références :

-Dorffer et al. Blind mobile sensor calibration using an informed non negative matrix factorization with a relaxes rendez-vous model, https://www.lisic.univ-littoral.fr/~puigt/Publications/cdmpgdgr_ICASSP16.pdf

Annexe 5 : Résultats des tests de correction réalisés avec la méthode XGBoost sur la période du 1^{er} février au 30 avril 2021

#	level_0	level_1	BPE	A1	RN2	GEN	PA1H	RN6	VITR
0	Biais	Brut	15.03	52.84	31.75	34.29	27.34	23.04	27.11
1	Biais	Corrigé	1.07	5.79	-4.17	-1.64	-2.38	0.05	-2.52
2	RMSE	Brut	32.72	66.75	48.89	46.28	39.66	38.69	41.36
3	RMSE	Corrigé	15.8	17.53	16.33	9.97	10.95	13.59	10.36
4	Corrélation	Brut	0.53	0.55	0.56	0.66	0.66	0.58	0.59
5	Corrélation	Corrigé	0.57	0.6	0.69	0.78	0.71	0.58	0.68

Scores obtenus en PM₁₀ avant (Brut) et après (Corrigé) application de la correction XGBoost sur les capteurs installés sur les stations de référence d'Airparif du 1^{er} février au 30 avril 2021

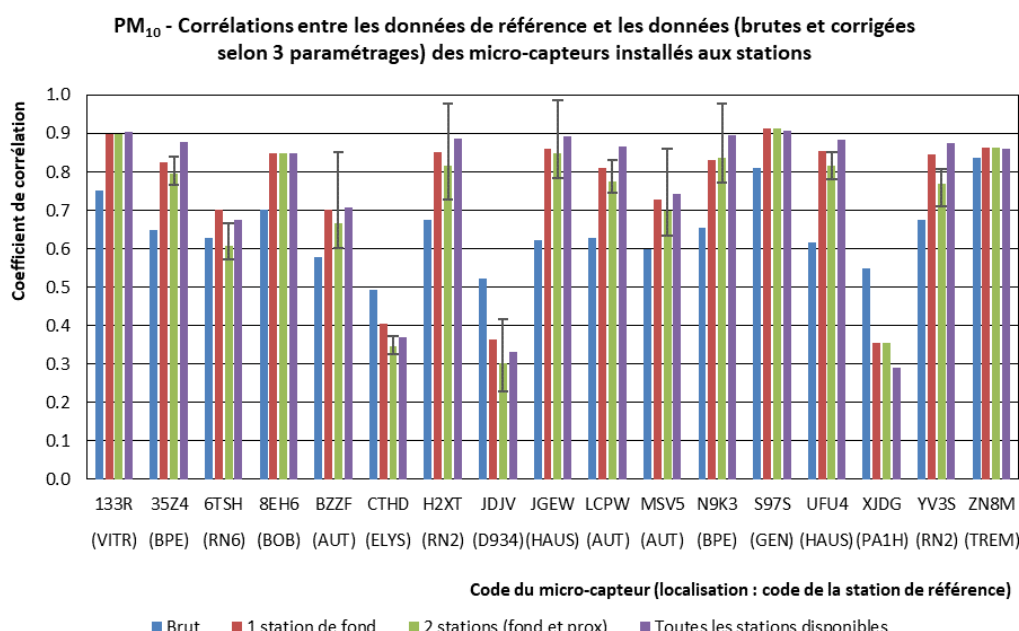
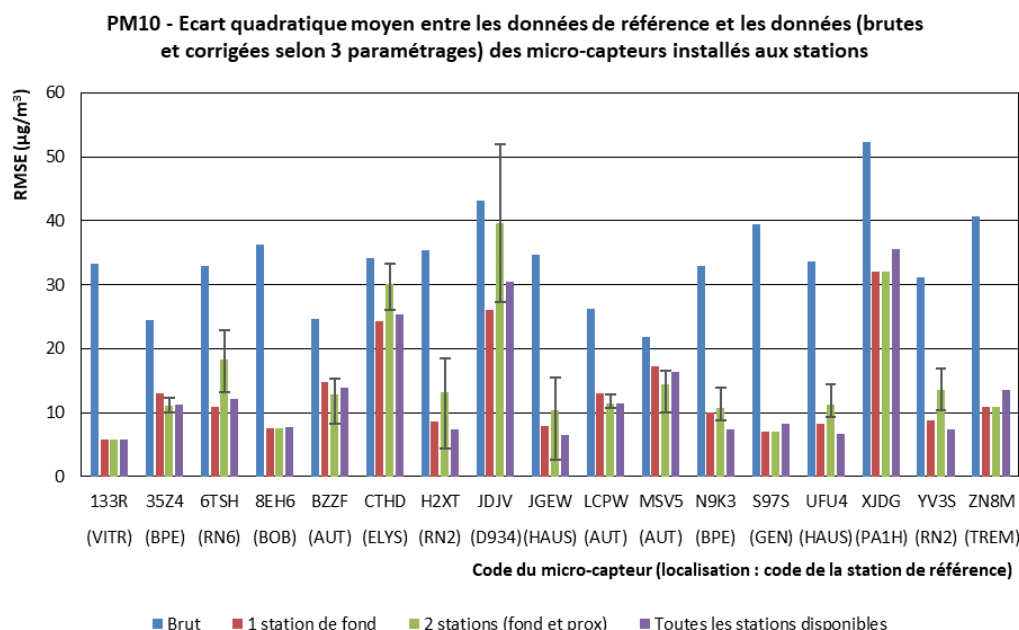
#	level_0	level_1	BPE	A1	GEN	PA1H	RN6	VITR
0	Biais	Brut	7.88	26.4	16.58	11.18	12.35	11.87
1	Biais	Corrigé	-0.82	6.59	-1.09	-1.67	-0.44	-1.01
2	RMSE	Brut	14.13	31.68	21.97	15.29	18.01	17.63
3	RMSE	Corrigé	5.76	9.32	3.78	4.84	3.85	4.23
4	Corrélation	Brut	0.83	0.77	0.91	0.91	0.9	0.86
5	Corrélation	Corrigé	0.81	0.74	0.93	0.89	0.9	0.86

Scores obtenus en PM_{2.5} avant (Brut) et après (Corrigé) application de la correction XGBoost sur les capteurs installés sur les stations de référence d'Airparif du 1^{er} février au 30 avril 2021

Annexe 6 : Résultats complémentaires sur les apports sur une zone sans ou avec peu de surveillance permanente

A. Performance de la correction par méthode des ratios en fonction du nombre de mesures de référence disponibles

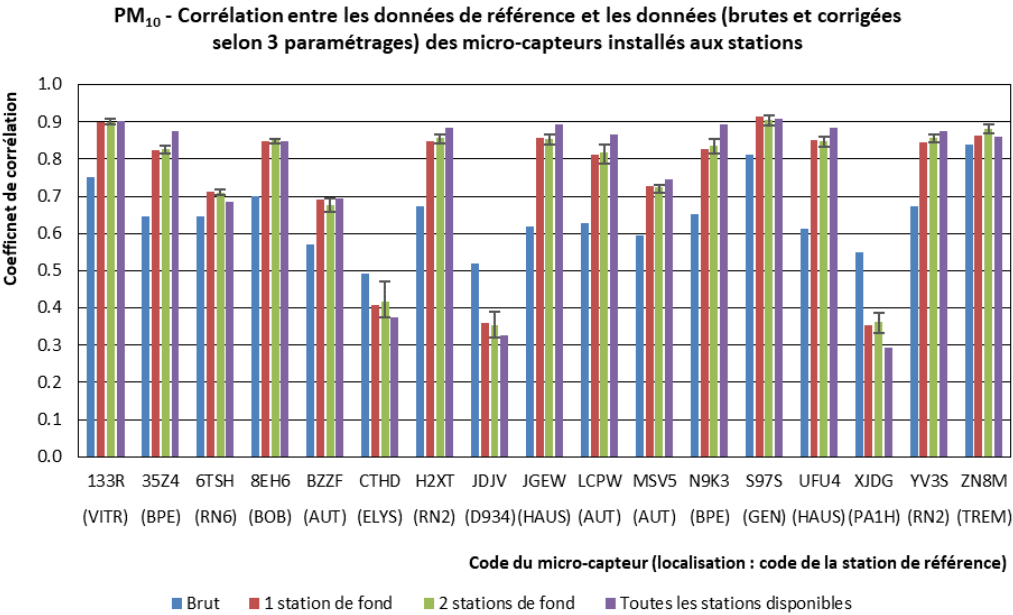
A1. Performance de la correction des mesures PM_{10} avec ajout d'une référence trafic (correction à 2 stations – fond et trafic) en comparaison avec les données brutes et la correction à 1 station de fond ou avec toutes les stations disponibles



Ecart de performance de la correction sur les système-capteurs trafic avec une correction par 2 stations (prox et fond) par rapport à une correction par 1 station

Station trafic utilisée pour la correction	Différence de performance sur la RMSE	Différence de performance sur les corrélations
BPE	-49%	-7%
AUT	-29%	-2%
RN6	-13%	-9%
ELYS	-42%	-20%
RN2	3%	1%
HAUS	-3%	-10%

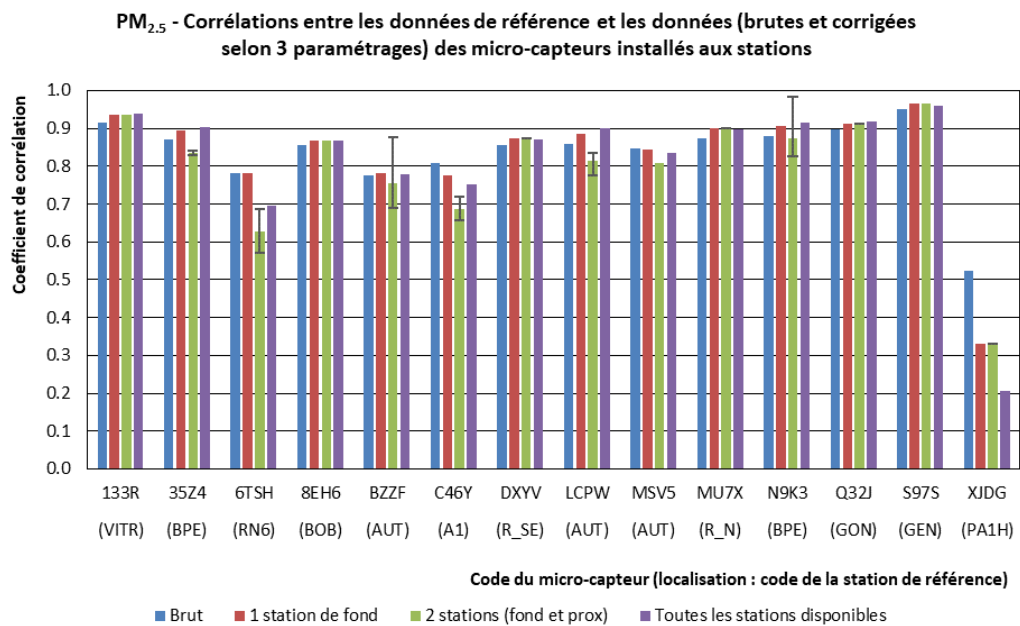
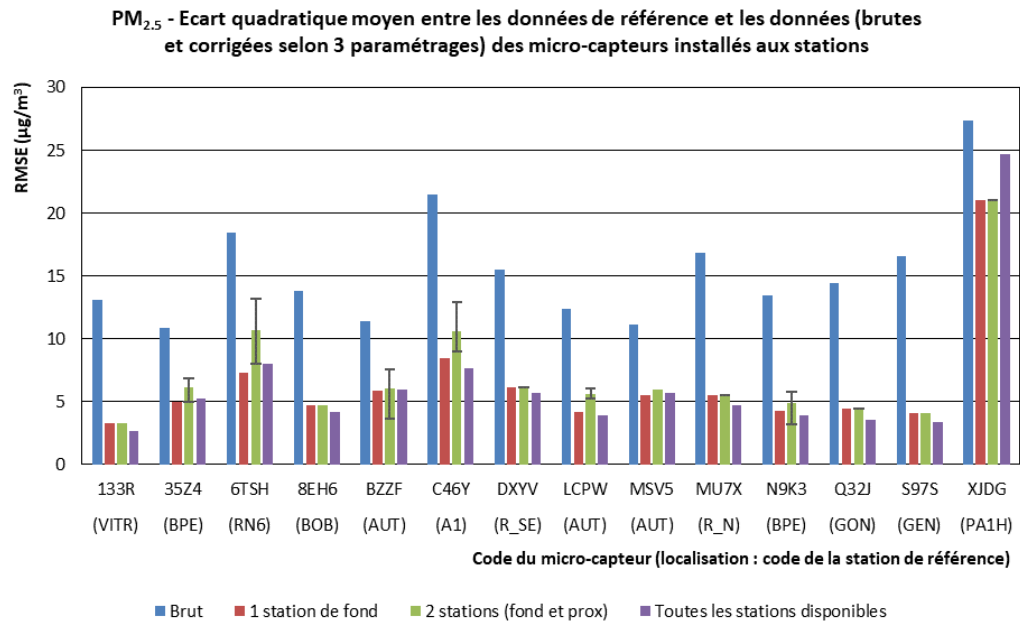
Performance de la correction des mesures PM₁₀ avec ajout d'une référence fond (correction à 2 stations de fond) en comparaison avec les données brutes et la correction à 1 station de fond ou avec toutes les stations disponibles, sur les corrélations



Ecart de performance de la correction sur les données des système-capteurs avec une correction par 2 stations de fond par rapport à une correction par 1 station de fond

Station de fond utilisée pour la correction	Différence de performance sur la RMSE	Différence de performance sur les corrélations
VITR	5%	0%
BOB	2%	-1%
GEN	2%	2%
TREM	-2%	0%

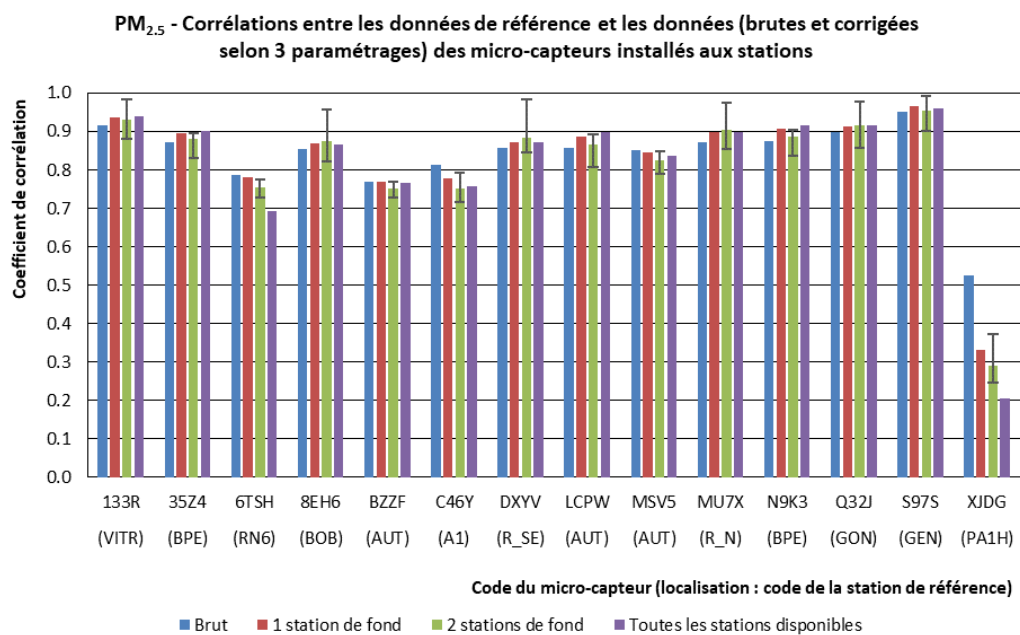
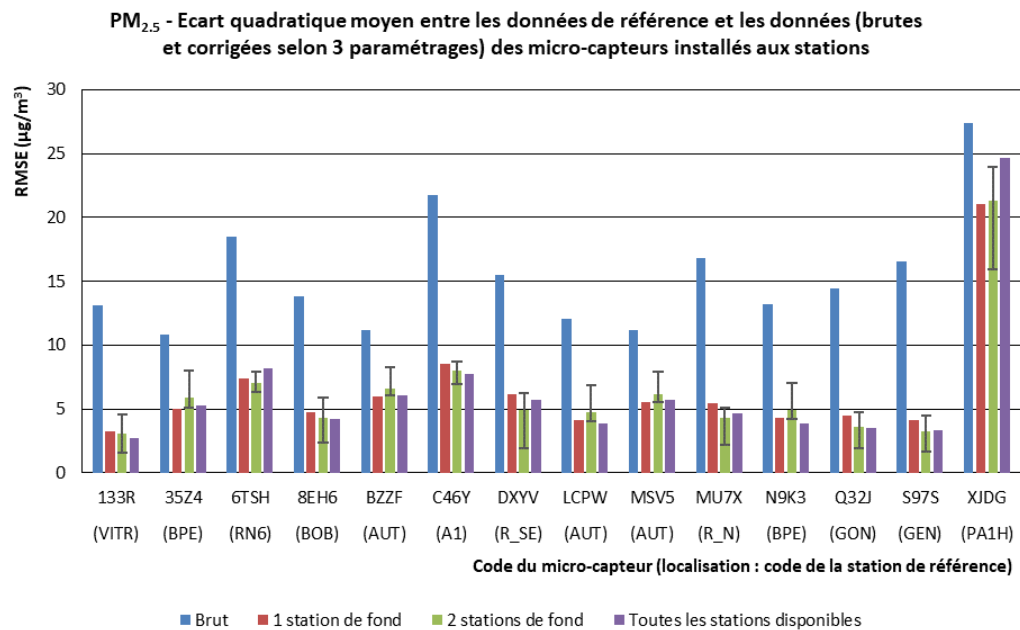
A2. Performance de la correction des mesures PM_{2.5} avec ajout d'une référence trafic (correction à 2 stations – fond et trafic) en comparaison avec les données brutes et la correction à 1 station de fond ou avec toutes les stations disponibles sur les corrélations



Ecart de performance de la correction sur les système-capteurs trafic avec une correction par 2 stations (prox et fond) par rapport à une correction par 1 station

Station trafic utilisée pour la correction	Différence de performance de correction sur le RMSE	Différence de performance de correction sur les corrélations
BPE	-24%	-7%
AUT	-2%	-5%
A1	-24%	-9%
RN6	-31%	-10%

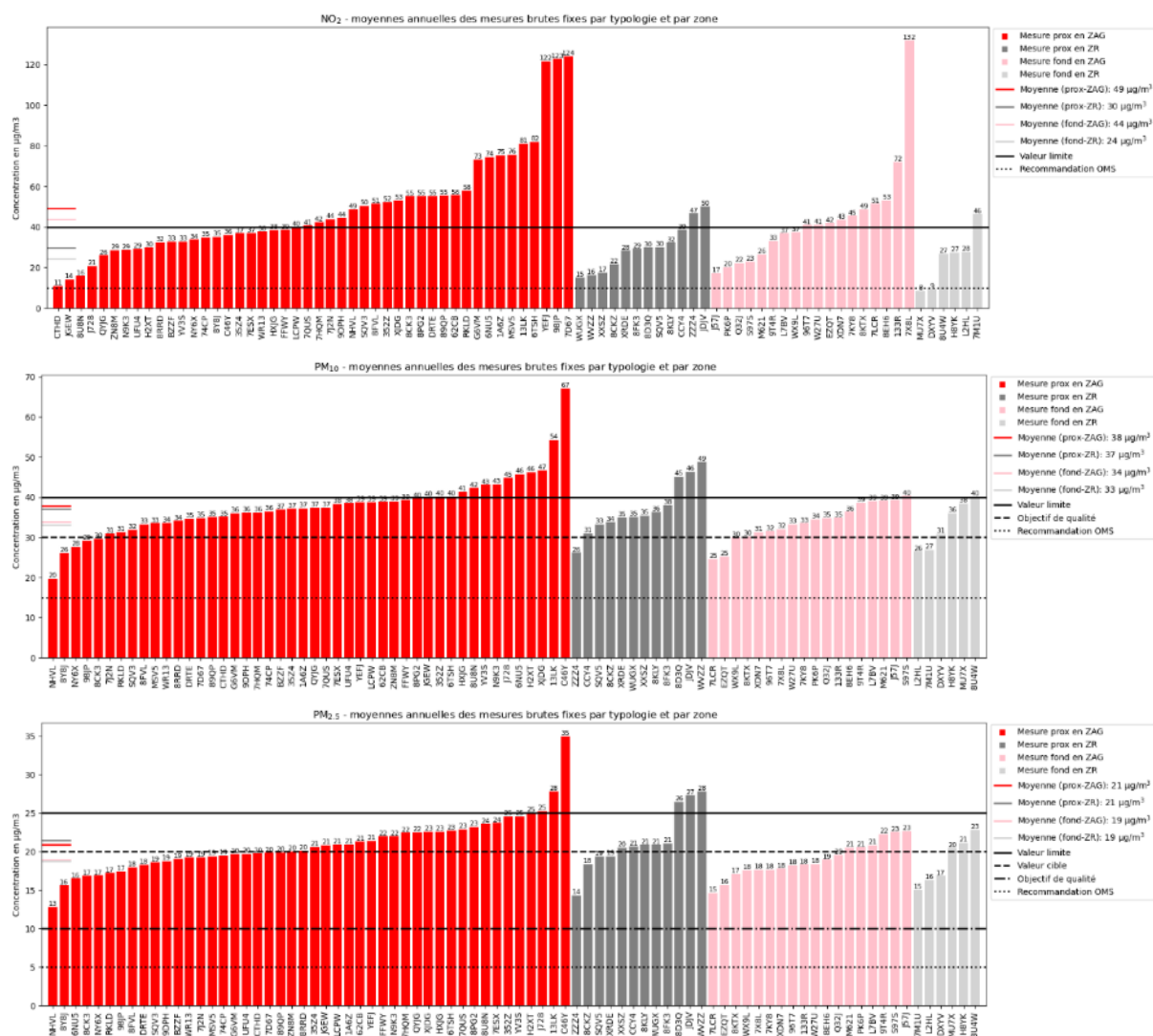
A3. Performance de la correction des mesures PM_{2.5} avec ajout d'une référence fond (correction à 2 stations de fond) en comparaison avec les données brutes et la correction à 1 station de fond ou avec toutes les stations disponibles



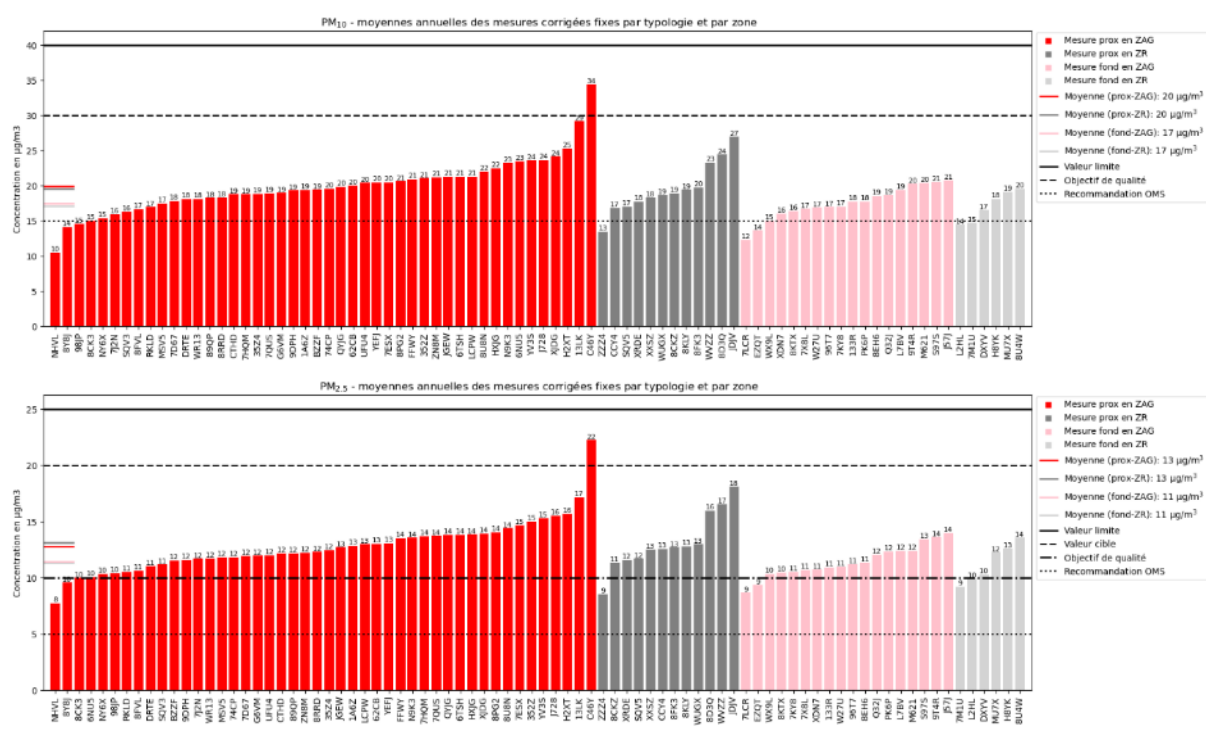
Ecart de performance de la correction sur les données des système-capteurs avec une correction par 2 stations de fond par rapport à une correction par 1 station de fond

Station de fond utilisée pour la correction	Différence de performance de correction sur le RMSE	Différence de performance de correction sur les corrélations
VITR	7%	-1%
BOB	3%	-3%
R_SE	-16%	-4%
R_N	7%	-2%
GON	7%	-2%
GEN	10%	0%

B. Moyennes annuelles issues des mesures brutes des systèmes-capteurs fixes par typologie et par zone de surveillance



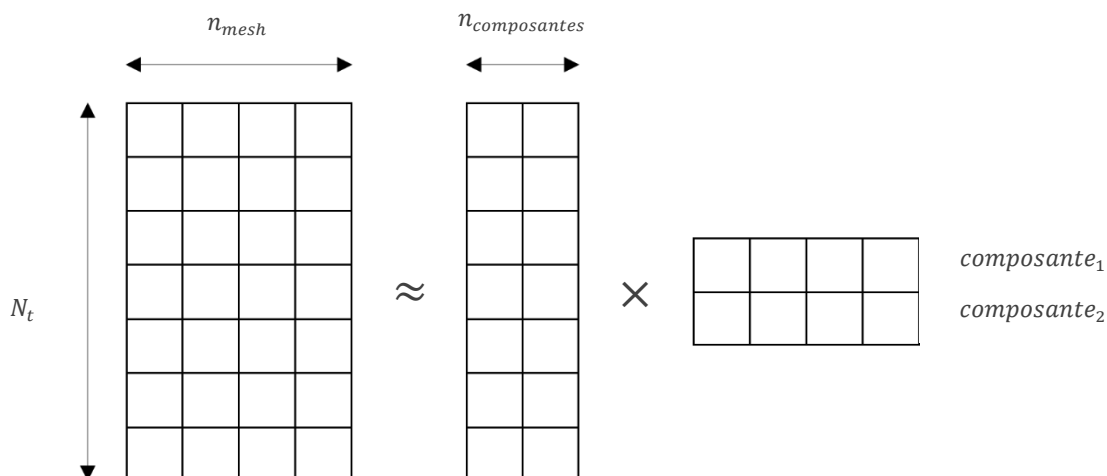
Moyennes annuelles issues des mesures corrigées des systèmes-capteurs fixes par typologie et par zone de surveillance



Annexe 7.1 : Reconstruction de cartographies par combinaison de composantes positives

Cette méthodologie se propose de reconstruire des cartographies fine-échelle urbaines à partir de données de systèmes-capteurs et des résultats de la décomposition d'un ensemble de cartographies en composantes positives creuses. De la même manière que certains articles proposent de moduler une cartographie moyenne annuelle en utilisant un krigeage à dérive externe et des données μ -capteurs, cette méthode propose de moduler la combinaison linéaire (positive) de n cartographies, qui ne sont pas des cartographies moyennes mais des cartographies élémentaires relativement indépendantes. Cette approche est inspirée des travaux de méta-modélisation menée par J.K. Hammond et al sur les chaînes de modélisation urbaine de la qualité de l'air.

Ces cartographies élémentaires, nommées composantes, et construites par apprentissage non supervisé, sont produites de telle manière à ce que chaque sortie du modèle fine échelle de la base d'apprentissage puisse être approximée avec une erreur contrôlée par une combinaison linéaire de ces composantes. Le calcul de ces composantes est opéré par une factorisation en matrices non négatives. On se donne une base d'apprentissage, par exemple toutes les sorties cartographiques du modèle d'intérêt sur un polluant sur une large période (par exemple un an), ou sur un sous-échantillonnage pertinent de cette période (sampling aléatoire, sampling selon les conditions météo pour avoir une distribution associée équilibrée). On fixe également un nombre de composantes à l'avance, que l'on ne prendra ni trop petit pour être capable de reconstruire correctement tous les motifs cartographiques rencontrés, ni trop grand pour assurer un aspect synthétique des composantes (i.e. « telle composante est représentative d'une situation de vent d'ouest avec un fort impact du trafic routier » pour schématiser). On se retrouve donc avec une matrice volumineuse, qui est la matrice à factoriser.



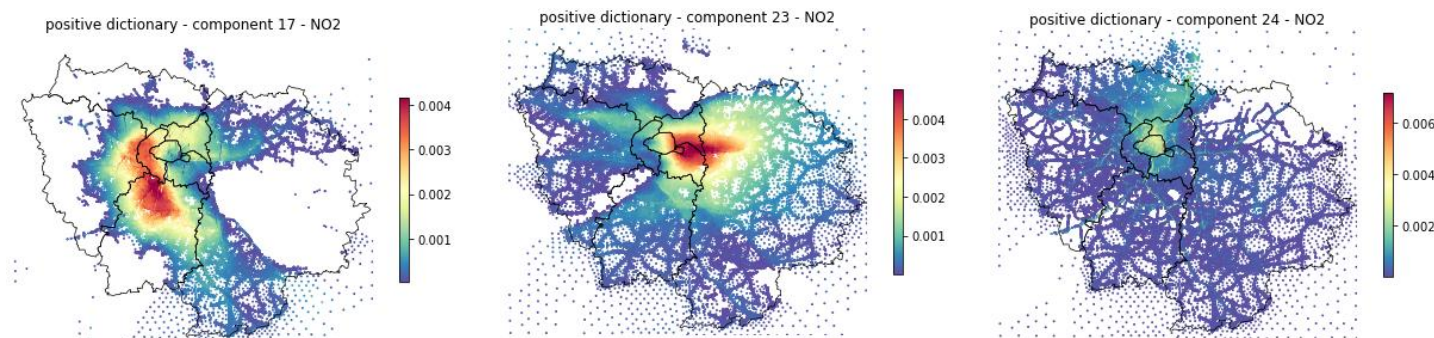
Le problème de factorisation illustré : N_t est la taille de la base d'apprentissage, n_{mesh} le nombre de mailles ou points récepteurs du modèle. Il s'agit de trouver les matrices positives de poids et de composantes optimales dont le produit approxime au mieux la matrice de départ.

Le choix d'un algorithme travaillant avec des nombres positifs ou nuls est bien entendu guidé par la nature physique des champs manipulés. Les poids et les composantes étant positives, on s'assure de la positivité des cartographies reconstruites, ainsi qu'un certain sens physique des composantes, au moins localement.

Puisque N_t est de l'ordre de plusieurs milliers, et que n_{mesh} est de l'ordre de plusieurs centaines de milliers, il n'est pas envisageable de traiter l'ensemble des données en une fois pour des raisons d'espace mémoire. Il faut recourir à des traitements par lots (https://en.wikipedia.org/wiki/External_memory_algorithm), qui permettent un chargement en

mémoire d'uniquement une fraction des données à la fois. Un tel algorithme est implémenté au sein du package python « scikit-learn », sous le nom « MiniBatchDictionaryLearning ».

Ces travaux se sont focalisés sur le NO₂ parce que polluant fortement impacté par le trafic routier et pour lequel l'assimilation de données menée en s'appuyant sur l'estimateur BLUE (Best Linear Unbiased Estimator) est parfaitement maîtrisée pour ces situations.



Trois exemples de composantes résultant d'une factorisation opérée sur un an consécutif de sorties fine-échelle NO₂

L'obtention de ces composantes est une étape qui peut être laborieuse, tant pour la gestion des lots de données que de la paramétrisation de la factorisation (combien de composantes ? faut-il rajouter une pénalisation ℓ_1 sur les poids pour obtenir une solution creuse ? faut-il repasser plusieurs fois sur les lots de la base d'apprentissage pour améliorer la factorisation ?). Une fois ces questions réglées, c'est cependant une étape à ne réaliser qu'une seule fois, sous réserve de sauvegarder les composantes une fois achevée.

Chaque composante prise séparément ne constitue pas une cartographie ayant du sens. Le but est en revanche que des combinaisons linéaires pertinentes le soient. Reconstituer une carte correspondant à un pas de temps, ou un ensemble de pas de temps, passe par :

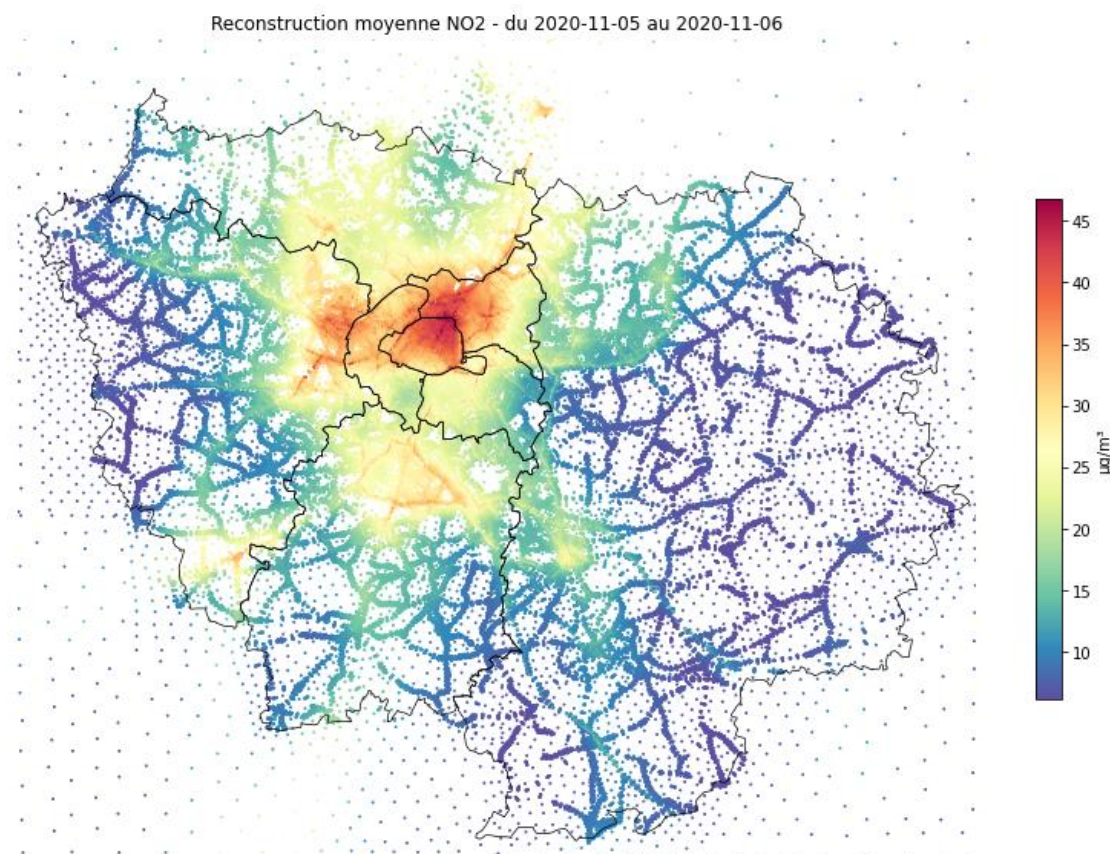
- le chargement des observations systèmes-capteurs (mobiles et fixes) sur ce ou ces pas de temps
- l'extraction des valeurs de chaque composante à tous les emplacements où il y a eu observation
- l'optimisation d'une régression linéaire sous contrainte de coefficients positifs entre les composantes extraites aux observations et les observations
- la combinaison linéaire des composantes selon les coefficients positifs calculés à l'étape précédente

Malgré le grand nombre possible d'observations à traiter, la complexité algorithmique reste mesurée. La régression linéaire est du type $X_c w + w_0 \approx y_0$, avec y_0 un vecteur de taille n_{obs} , X_c une matrice de taille $n_{obs} \times n_{composantes}$ et w le vecteur de poids positifs recherché de tailles $n_{composantes}$, et est très accessible pour les algorithmes de résolution associés.

L'objectif de ces travaux exploratoires étant d'évaluer la faisabilité de la méthodologie avec l'utilisation de nombreux capteurs, les résultats de NO₂ des systèmes-capteurs, bien que non valides comme décrit précédemment, ont été utilisés.

L'examen des composantes montrent que les motifs associés ne sont pas des motifs locaux (à l'échelle de la rue), mais s'étendent (sont non-nuls) plutôt sur une fraction du domaine. Par construction, les cartes produites par cette méthodologie ne peuvent pas refléter les variations les plus locales observées par les systèmes-capteurs, et c'est peut-être paradoxalement un des points forts. En effet, dans la mesure où il n'est pas possible de « faire confiance » aux observations prises individuellement, ce « moyennage » spatial à travers ce mélange de composantes s'avère prometteur.

La mise en œuvre de cette méthodologie avec les données du projet a donné naissance à des cartes reconstruites ayant physiquement du sens, que ce soit en NO₂ ou en PM₁₀, ce qui constitue un succès en soi.



Reconstruction par composantes positives utilisant les données des systèmes-capteurs (mobiles et fixes) de la campagne Mesures & Perceptions

Ces travaux exploratoires ont permis le développement de la méta-modélisation du modèle urbain fine-échelle d'Airparif Cartes temps réel et la reconstruction rapide de cartographies fine-échelle ayant un sens physique via les données des stations de référence ou encore des données de systèmes-capteurs (et ce malgré le grand volume de données intégrées). Moyennant une amélioration des performances de la factorisation produisant les composantes, ce qui demande un investissement important et un examen de la parcimonie (*sparseness*) des composantes, ces travaux pourraient être utilisés pour produire des cartographies plus rapidement et notamment pour faire de la prévision fine échelle horaire de la qualité de l'air.

Ils ont également montré la capacité de cette méthodologie à intégrer de nombreuses données de mesures, qui pourraient trouver une application pour l'amélioration des cartographies à fine échelle lorsque des systèmes-capteurs seront suffisamment justes.

Annexe 7.2 : Méthodologies d'assimilations de données utilisant l'estimateur BLUE

Différentes méthodologies d'assimilations des modélisations brutes avec des données de mesure ont été explorées, que ce soit le krigeage, la covariance empirique sur une période d'apprentissage ou la covariance géométrique. Elles s'appuient toutes sur l'estimateur BLUE (Best Linear Unbiased Estimator)

BLUE (Best Linear Unbiased Estimator)

L'estimateur BLUE est le cœur mathématique se cachant derrière la régression linéaire (cf. les équations normales où l'on peut identifier des matrices de covariance), les processus autorégressifs (résolution des équations de Yule-Walker), les processus gaussiens, le krigeage, etc.

BLUE s'intéresse aux vecteurs gaussiens, que l'on peut sans perte de généralités considérer comme centrés et définis par une matrice de covariance (de taille $n \times n$ pour un vecteur de taille n). Dans le cas où l'on a accès que partiellement à une réalisation de ce vecteur gaussien, i.e. que l'on a accès à m membres du vecteur sur les n , BLUE offre une estimation des $n - m$ autres membres inconnus, ainsi que les incertitudes associées. L'estimateur est également capable d'opérer lorsqu'il n'est pas possible d'accéder exactement à ces m valeurs mais plutôt à leurs valeurs bruitées (bruit gaussien).

En modélisant donc la sortie cartographique du modèle par un vecteur gaussien (un élément du vecteur = une maille), et sous réserve de respecter ces hypothèses de normalité, BLUE est donc un algorithme fort pratique pour la fusion d'informations modélisées et observées : l'estimateur permet alors d'estimer l'erreur commise par le modèle à chacune de ses n mailles et à un instant t en ayant accès à m erreurs ponctuellement constatées par m capteurs. L'erreur peut ensuite être retranchée au modèle brut.

La matrice de covariance joue un rôle central dans le calcul de l'estimation. La covariance entre deux membres du vecteur étudié est un réel, et exprime leur similarité statistique. Une colonne de cette matrice est donc la covariance entre une maille et toutes les autres, et peut être cartographiée. Une colonne est donc le motif de propagation du signal mesuré à cette maille vers toutes les autres mailles, la matrice est l'ensemble de ces motifs de propagation. En cas d'intégration de m observations, l'étape d'inversion de la matrice $m \times m$ est donc là pour assurer la modulation optimale des m motifs de propagation. L'erreur estimée découle donc directement de cette covariance, et l'on comprend bien l'importance de bien la modéliser.

Quelle formulation de la covariance d'erreur du modèle ?

La problématique élémentaire est donc l'estimation de l'erreur commise par le modèle, que celui-ci soit pris tel quel ou bien débiaisé au préalable (comme dans le cas du krigeage à dérive externe où le modèle passe par $x \mapsto ax + b$). Comme mentionné plus haut, la matrice de covariance de cette erreur à estimer est cruciale, et il existe diverses approches pour accéder à cet objet.

Krigeages

Pour générer cette matrice, appelée communément B dans la littérature, les techniques de krigeage font le choix de la calculer en fonction de la distance qui sépare deux mailles (ou deux points récepteurs). On calcule dans un premier temps D , la matrice $(d_{ij})_{ij}$, avec d_{ij} la distance euclidienne qui sépare maille i de la maille j . On applique ensuite une fonction k aux distances calculées, nous donnant $B = (k(d_{ij}))_{ij}$. Cette matrice devant posséder les caractéristiques d'une matrice de covariance (symétrique, semi-définie positive), k ne peut être choisie au hasard et doit appartenir à une certaine classe de fonctions. Les techniques de krigeage proposent un ensemble

de fonctions k respectant cette propriété, et en choisissent une via l'étude du semi-variogramme. Sans rentrer dans les détails, les techniques usuelles de krigeage ajoutent des contraintes sur les coefficients d'estimation (leur somme doit valoir 1) par rapport au BLUE plus général.

C'est une technique qui est très souple d'utilisation : générer B (ou une sous matrice de B) à la volée est rapide et ne requiert pas une utilisation mémoire très forte. Mais c'est également une technique qui par construction propage *radialement* les erreurs observées, ce qui peut interroger lorsque le modèle dont il faut estimer l'erreur est un modèle urbain fine-échelle. Les mailles ne sont pas différenciées selon leur caractère fond / influencé / trafic, et l'erreur estimée peut mener à des cartes assimilées manquant de sens physique.

Covariance empirique

Estimation sur une période d'apprentissage

Une possibilité pour accéder à un B réaliste physiquement est de modéliser la covariance de l'erreur du modèle en fonction de la covariance du modèle, et d'estimer cette covariance du modèle sur une période donnée, typiquement une année. L'estimation de cette covariance passe par des algorithmes de traitement des données par lots, pour des raisons de mémoire occupée. Les covariances empiriques sont ensuite localisées via un produit de Schür afin d'annuler les covariances longue-distance.

C'est la solution actuellement en opérationnel au sein d'Airparif (2022). Elle offre l'avantage de proposer un B physiquement réaliste, basé sur les données (*data-driven*), ce qui conduit à des cartes assimilées et des cartes d'incertitudes au sens physique élevé. Elle a cependant l'inconvénient de ne pouvoir s'appliquer qu'à des emplacements d'observations connues à l'avance. En effet, stocker et manipuler la matrice de covariance B dans son intégralité ($n \times n$) peut être laborieux, dans la mesure où n vaut souvent plus de 10^4 , voire 10^5 . On fixe en pratique avant l'apprentissage de la covariance et le parcours des données modélisées les m localisations du domaine qui seront susceptibles de porter une observation, et ce qui mène donc au calcul, stockage et manipulation d'une matrice $n \times m$.

Si cette approche a porté ses fruits dans le cas d'assimilation des données des stations de référence fixes, elle est plus difficile à mettre en œuvre dans le cas de μ -capteurs mobiles, où l'ensemble des positions occupées est beaucoup trop grand pour le pré-calcul de B exposé dans ce paragraphe.

Estimation par un ensemble

Il est également possible d'estimer empiriquement des covariances en croisant les données de plusieurs runs de modélisation qu'ils proviennent de différents modèles, ou qu'ils proviennent d'un même modèle où les données d'entrées ont été perturbées. Bien que l'on dispose de plusieurs modèles de fond, seul un modèle d'impact est disponible, ce qui a limité l'examen de cette approche.

Covariance générée géométriquement

Anne Tilloy, Vivien Mallet et leurs co-auteurs présentent dans « BLUE-based NO₂ data assimilation at urban scale » une formulation de la matrice de covariance d'erreur basée sur le parcours du réseau routier (Tilloy et al (2013)). Plus concrètement, en considérant le réseau routier émetteur du modèle urbain à assimiler, deux mailles / points récepteurs covariant largement si :

- le trajet entre les deux à travers le réseau est court, et inversement
- leurs distances orthogonales au réseau sont similaires, et inversement

La covariance générée est ainsi anisotrope et présente des avantages en termes de réalisme physique : une observation localisée au cœur du trafic n'influence pas de la même manière une maille qui se situerait 100m plus loin dans le trafic qu'une maille de fond située aussi à 100m. La covariance entre la maille i et la maille j est plus exactement définie par :

$$B_{ij} = v_c \exp\left(-\frac{d_{ij}}{L_d}\right) \exp\left(-\frac{|P_i - P_j|}{L_p + \alpha \min(P_i, P_j)}\right)$$

avec L_p , L_d , v_c et α des paramètres à fixer d'avance, P_i la distance orthogonale du point récepteur i au réseau (i.e. au brin le plus proche), et d_{ij} la distance à travers le réseau entre les projections sur le réseau des mailles i et j .

Si le calcul de P_i est peu coûteux algorithmiquement, la génération de la matrice $(d_{ij})_{ij}$ est plus consommatrice en ressources. Pour un modèle de n mailles, l'assimilation de m observations requiert donc le calcul de $n \times m$ plus courts chemins à travers le graphe associé au réseau, et donc $n \times m$ l'appel à l'algorithme de Dijkstra. Pour un ensemble d'observations dont les emplacements sont connus à l'avance, cette matrice peut être précalculée, et peut donc être chargée en temps constant. En revanche, pour un grand nombre de données mobiles, cette matrice doit être générée à chaque pas de temps, ce qui peut rapidement être irréalisable en un temps raisonnable (on rappelle que n est de l'ordre de plusieurs centaines de milliers, de même que m au plus fort de la campagne de mesures). Si des optimisations semblent réalisables (Sebastian Knopp (2006) peut offrir des pistes par exemple), l'application exacte de cette formulation est encore trop gourmande en ressources.

Cet article ouvre cependant la voie à d'autres formulations de la covariance, basées elles aussi sur des considérations géométriques liées au réseau. Il est par exemple possible de remplacer la distance à travers le réseau d_{ij} par une simple distance euclidienne (à vol d'oiseau) : le parcours de graphe n'est alors plus nécessaire et le calcul de B est alors très raisonnable. Il est également possible de mieux modéliser l'incertitude a priori du modèle, qui vaut v_c quelque soit la maille / point récepteur. v_c pourrait être remplacé par un terme qui soit fonction de P_i et P_j , et qui amènerait une variance pré-assimilation (a priori) plus grande proche des axes que loin des axes.

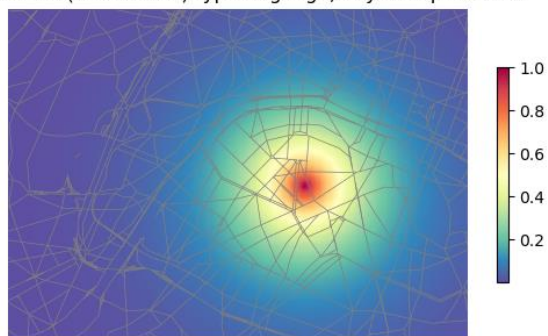
Les avantages et inconvénients de chacune des méthodes décrites ci-dessus sont résumées dans le tableau ci-dessous.

	Avantages	Inconvénients
Krigeage	Génération de la covariance d'erreur aisée (paramètres estimés par le semi-variogramme) Librairies de calcul disponibles en python et R	Possible manque de sens physique de la propagation des erreurs, et donc de la carte assimilée Incertitudes des mesures fixées par le semi-variogramme (effet pépité), et donc possiblement très différentes d'un pas de temps à un autre Difficile d'attribuer des incertitudes différentes entre le réseau de mesures de référence et les données μ -capteurs avec l'utilisation d'une librairie usuelle
Covariance empirique sur une période d'apprentissage	Sens physique élevé des cartes assimilées Calibration des incertitudes (modèles et observations) par validation croisée	Pas réalisable pour des emplacements de capteurs non-connus à l'avance
Covariance géométrique	Sens physique des cartes assimilées	Peut être coûteux algorithmiquement selon les formulations

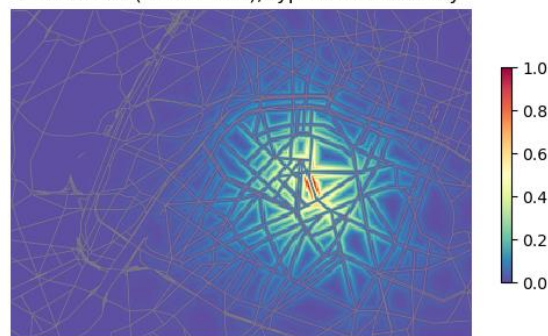
Avantages et inconvénients pour différentes formulations de la covariance d'erreur.

En résumé, BLUE avec une génération à la volée des matrices de covariance d'erreur semble être le meilleur compromis dans le cas de l'assimilation d'un modèle urbain avec des données observées dont l'emplacement ne peut être connu à l'avance (mesures en mobilité). Le krigeage et la covariance géométrique le permettent. Les travaux se sont poursuivis en ce sens avec deux méthodes de covariance géométriques : « type Mallet et Tilloy » et « type Mallet et Tilloy simplifiée ».

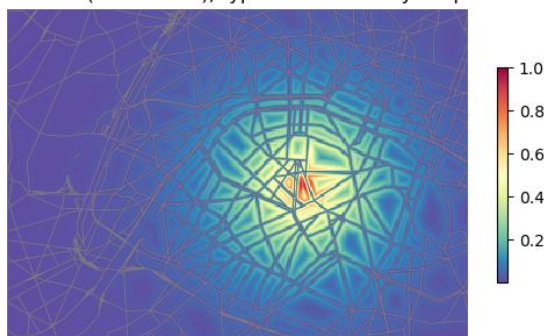
covariance (normalisée) type krigeage, noyau exponentiel



covariance (normalisée), type Mallet et Tilloy



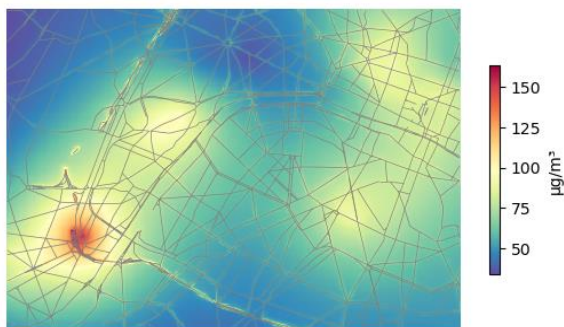
covariance (normalisée), type Mallet et Tilloy simplifié



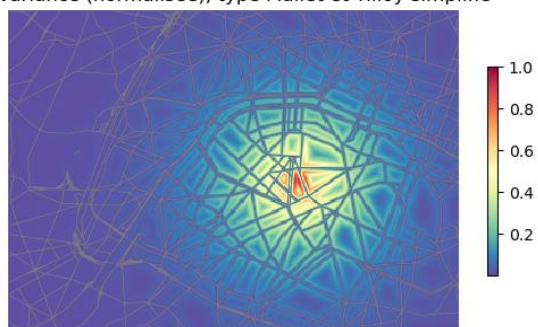
Comparaison de formulations de covariance d'erreur. Dans cette figure sont représentées les covariances d'erreur entre une maille en particulier et le reste des mailles du domaine

La figure suivante présente une comparaison des assimilations BLUE de données capteurs en utilisant diverses formulations de la covariance d'erreur. Les cartographies représentent la journée du 7 décembre 2020 à 10h pour les particules PM_{10} . Pour cette heure, environ 1500 données μ -capteurs ont été assimilées. Les temps de calcul associés à la génération des trois cartographies sont 2, 4 et 40 s pour les méthodologies de « krigeage », « Mallet et Tilloy simplifié » et « Mallet et Tilloy complet ».

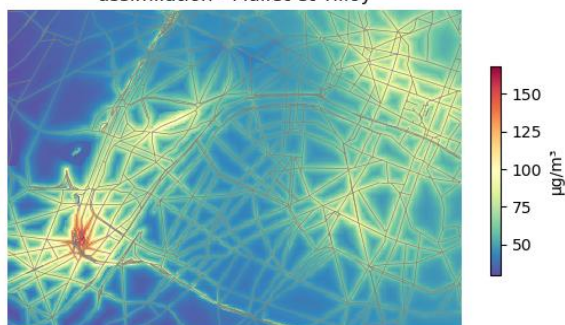
assimilation - krigeage, noyau exponentiel



covariance (normalisée), type Mallet et Tilloy simplifié

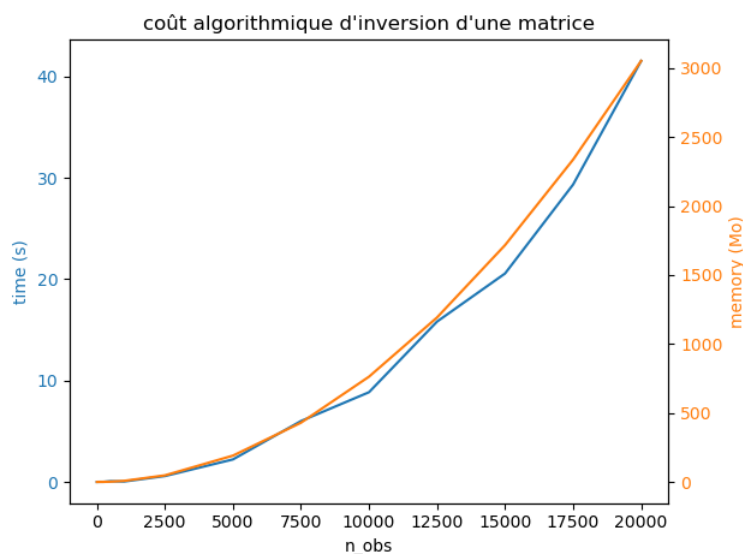


assimilation - Mallet et Tilloy



Comparaisons des assimilations BLUE de données capteurs brutes PM_{10} utilisant diverses formulations de la covariance d'erreur pour la journée du 7 décembre 2020 à 10h

Comme dit plus haut, la formulation de la covariance d'erreur a un impact crucial sur la cartographie analysée produite, au moins sur le plan du sens physique et du réalisme visuel. Cependant, les questions algorithmiques liées au grand nombre d'observations possibles disponibles doivent encore être discutées (l'inversion d'une matrice de taille $n_{obs} \times n_{obs}$ devient vite critique lorsque n_{obs} croît).



Mémoire occupée par une matrice de taille $n_{obs} \times n_{obs}$, et temps pour opérer son inversion (PC de bureau)

Les derniers développements du projet ont permis de produire une nouvelle formulation des covariances d'erreur qui sera intéressante à évaluer. Celle-ci s'appuie directement sur la sortie du modèle à assimiler pour générer les covariances dont BLUE a besoin pour spatialiser les erreurs du modèle :

$$B_{ij} = (\varphi_0 + x_i^b)(\varphi_0 + x_j^b)e^{-d_{ij}/d_0}$$

Avec x_b le vecteur de concentration modélisé brut, d_{ij} la distance euclidienne entre les mailles i et j , d_0 une distance typique de localisation des covariances, et φ_0 un paramètre représentant l'incertitude minimale du modèle.

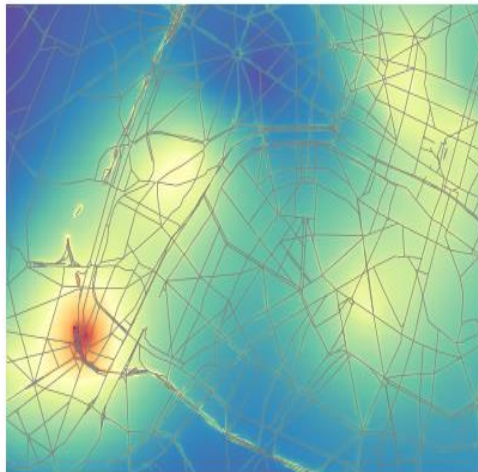
Cette modélisation de covariance a l'avantage :

- d'être simple à calculer (pas de parcours de graphe routier comme chez Tilloy et Mallet)
- ne nécessite pas d'apprentissage, et ouvre donc la voie à l'assimilation de données mobiles aux positions non-connues à l'avance
- d'être physiquement réaliste, la propagation des erreurs respecte la dispersion vue par le modèle brut à assimiler (alors que la formulation de Tilloy et Mallet considère tous les axes routiers de la même manière, ce qui amène en pratique à corriger de manière exagérée les petits axes).

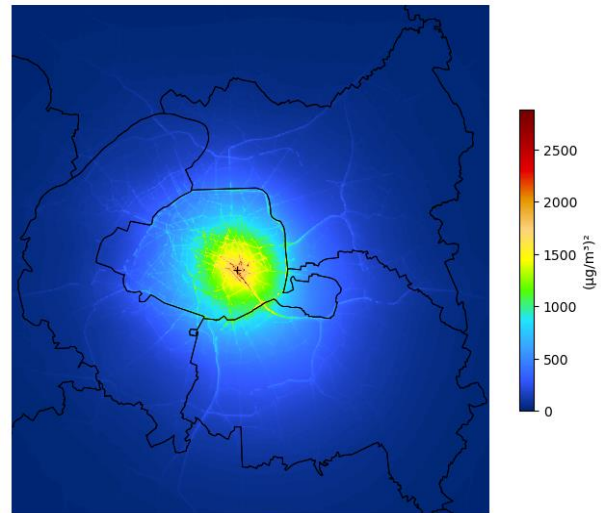
Cette formulation est la candidate principale pour une poursuite ultérieure des travaux. La contrainte du nombre de relevés systèmes-capteurs assimilables heure par heure subsiste, des approches pour contourner cette difficulté seront à développer. La modélisation des incertitudes des mesures avec la différenciation de l'amplitude des incertitudes des mesures du réseau automatique d'Airparif de celles des systèmes-capteurs est également à travailler.

Une illustration est présentée page suivante.

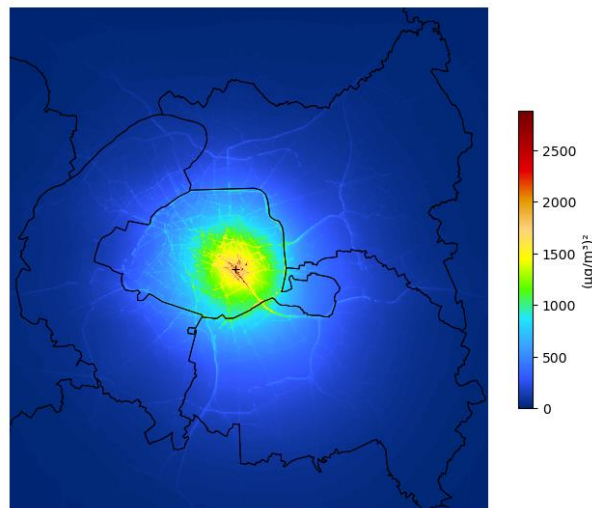
assimilation - krigeage, noyau exponentiel



Covariance modélisée entre la maille 7405293 et les autres



Covariance modélisée entre la maille 7405293 et les autres



Exemple de deux cartes de covariances générées à la volée à partir de la carte à assimiler

Ces travaux d'assimilation ont permis d'appliquer tel quel, sans séparation de domaines l'estimateur BLUE à un nombre d'observations raisonnable (plusieurs dizaines de milliers, mais inférieur à une centaine de milliers) avec une nouvelle méthode de génération de covariances d'erreur à la volée selon la géométrie du réseau routier sous-jacent.

Les perspectives pour une mise en œuvre opérationnelle d'une telle méthode sont une optimisation des paramètres géométriques, une optimisation des paramètres d'incertitudes, que ce soit l'incertitude modèle a priori (pré-assimilation) ou l'incertitude des observations (quelle amplitude d'incertitude pour les données systèmes-capteurs par rapport aux stations de référence) et d'identifier les solutions algorithmiques pour prendre en compte jusqu'à 150 000 données systèmes-capteurs présentes dans le domaine pour une heure donnée).

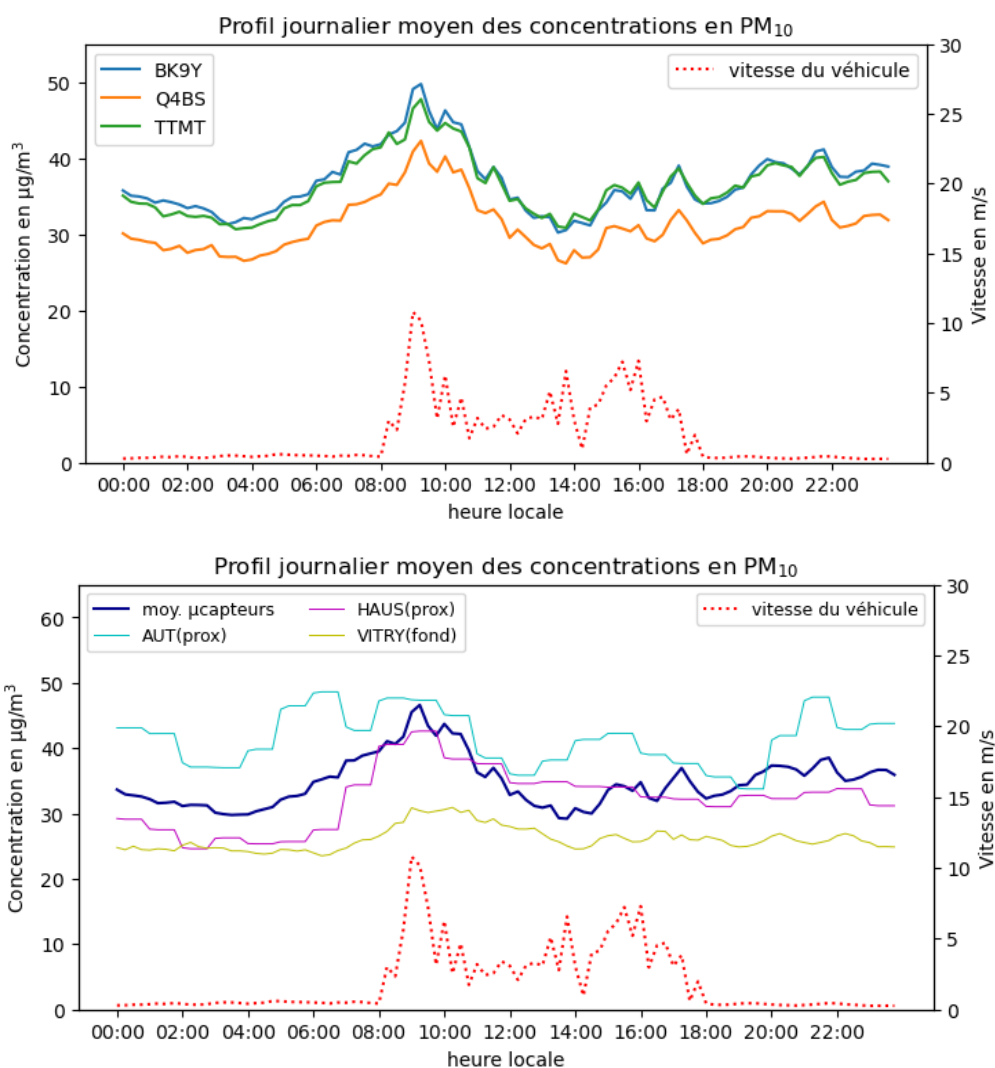
Références :

- Blond (2002), Blond, *Assimilation de données photochimiques et prévision de la pollution troposphérique*, Thèse de doctorat de l'école Polytechnique, 2002.
- Mairal et al, Mairal J., Bach F., Ponce J., Sapiro G., *Online Dictionary Learning for Sparse Coding*
- Nguyen (2017), *Assimilation de données et couplage d'échelles pour la simulation de la dispersion atmosphérique en milieu urbain*, Thèse de doctorat de l'Université de Lyon, Mai 2017

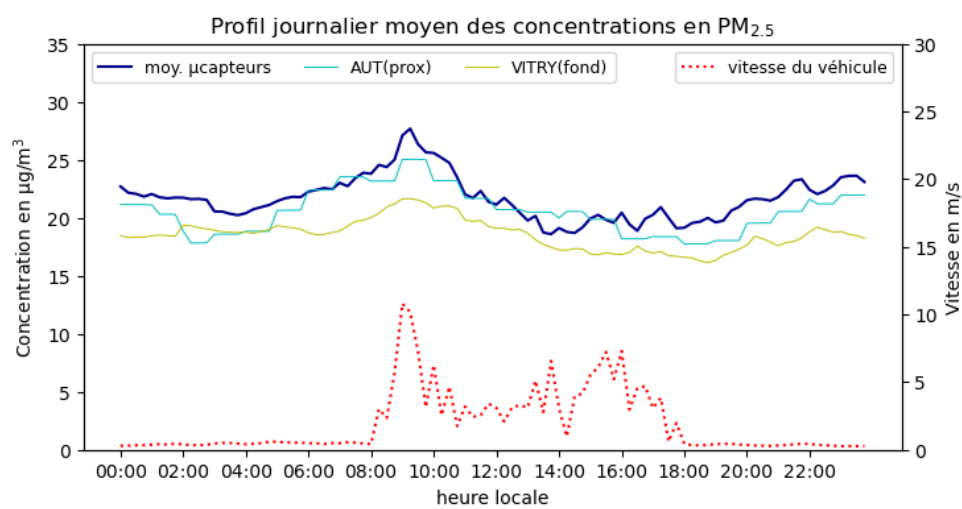
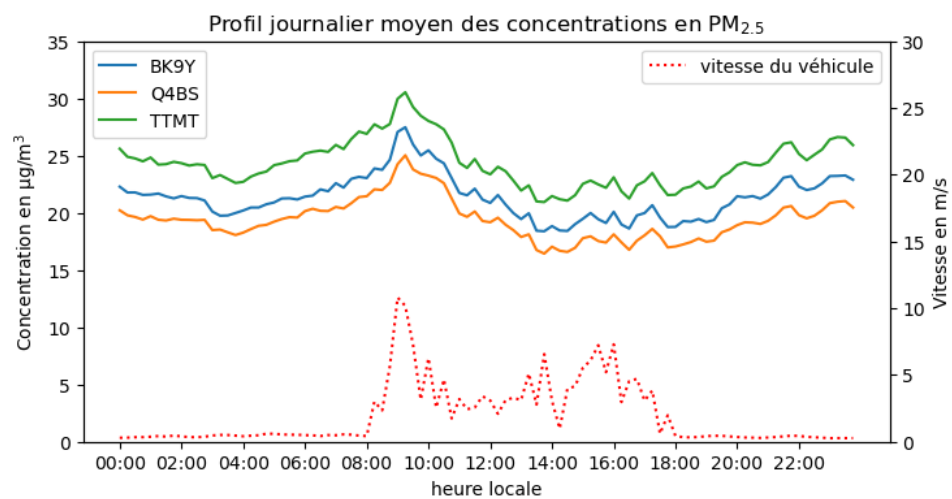
Annexe 8 : Résultats complémentaires sur le croisement de mesure en mobilité et de données de caméras embarquées

A. Analyse des mesures de QA

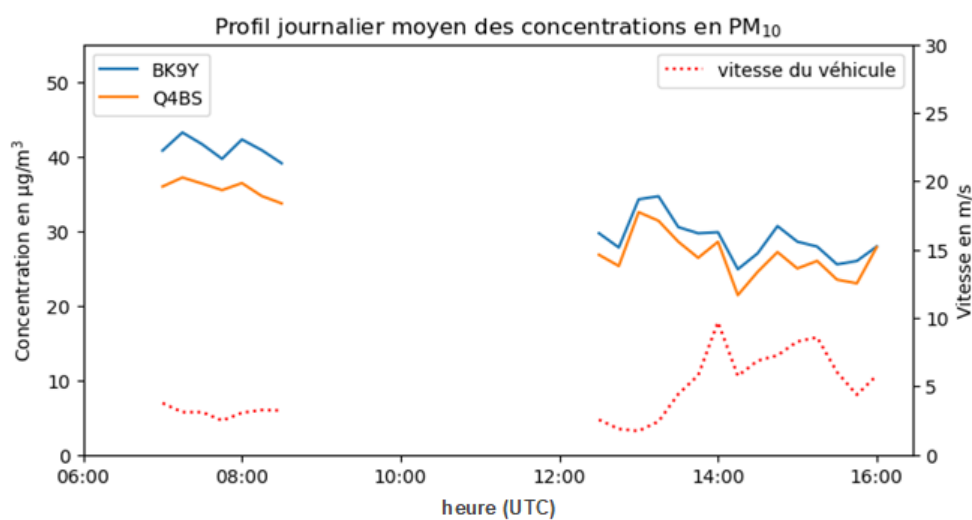
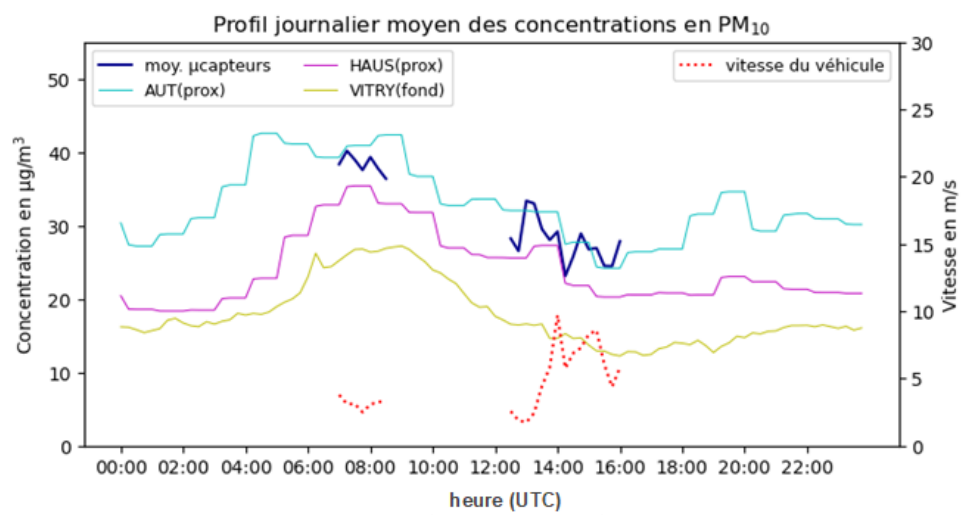
Profils journaliers moyens en PM₁₀ et PM_{2.5} sur la tournée des Ulis



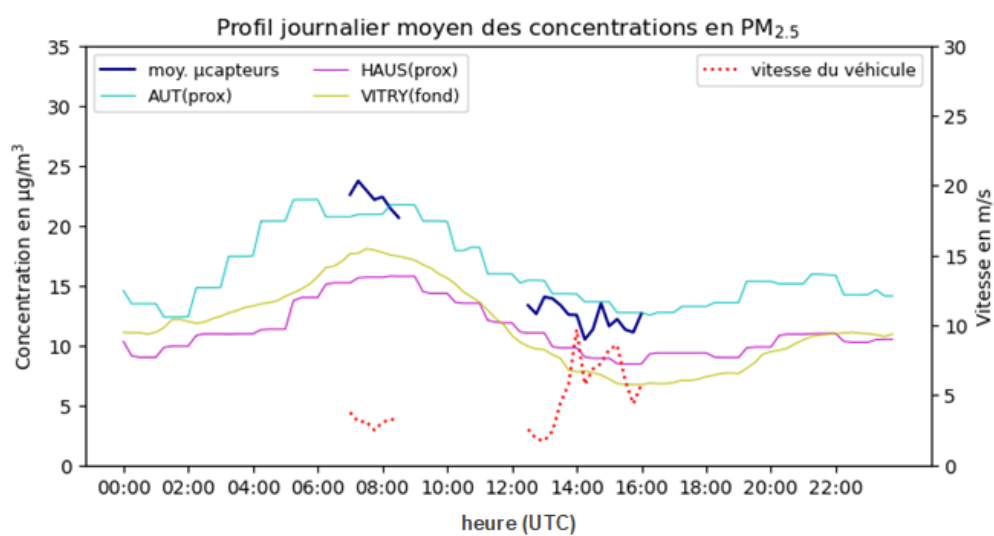
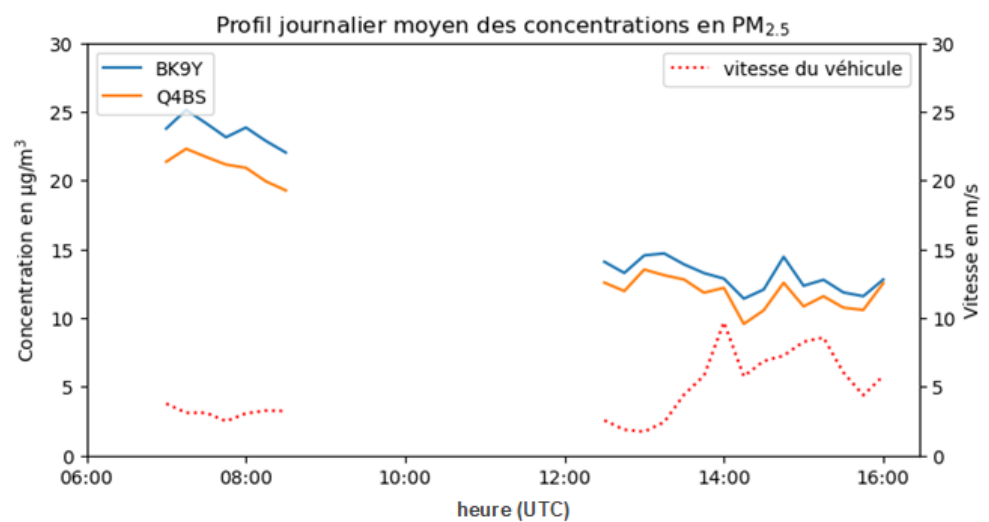
PM ₁₀	Profil journalier		En tournée (8h-18h exclus)		Hors tournée	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
Moy. Syst. capteurs	34.8	3.8	35.8	4.9	34.2	2.8
BP Auteuil (trafic)	41.5	4.2	41.1	3.9	41.7	4.4
Bd Haussmann (trafic)	32.3	4.6	36.0	3.3	29.8	3.6
Vitry-sur-Seine (fond)	26.1	1.8	27.6	1.9	25.1	0.9



PM _{2.5}	Profil journalier		En tournée (8h-18h exclus)		Hors tournée	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
Moy. µcapteurs	21.7	1.9	21.6	2.7	21.8	1.2
Auteuil (prox)	20.6	1.9	21.1	2.1	20.3	1.8
Vitry-sur-Seine (fond)	18.6	1.3	18.8	1.8	18.4	0.9



En tournée (7h00-8h30 puis 12h30-16h00)	PM ₁₀	
	Moyenne	Ecart-type
Moy. μ capteurs	31	5.6
Auteuil (prox)	33	6.5
Haussman (prox)	27	5.7
Vitry-sur-Seine (fond)	18	5.7



En tournée (7h00-8h30 puis 12h30-16h00)

PM_{2.5}

Moy. µcapteurs

Moyenne Ecart-type

Auteuil (prox)

16.2

3.5

Haussman (prox)

11.4

3.0

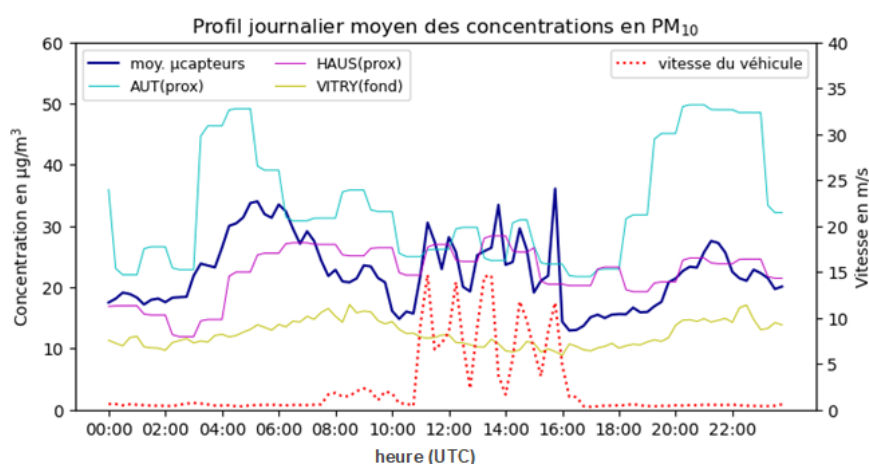
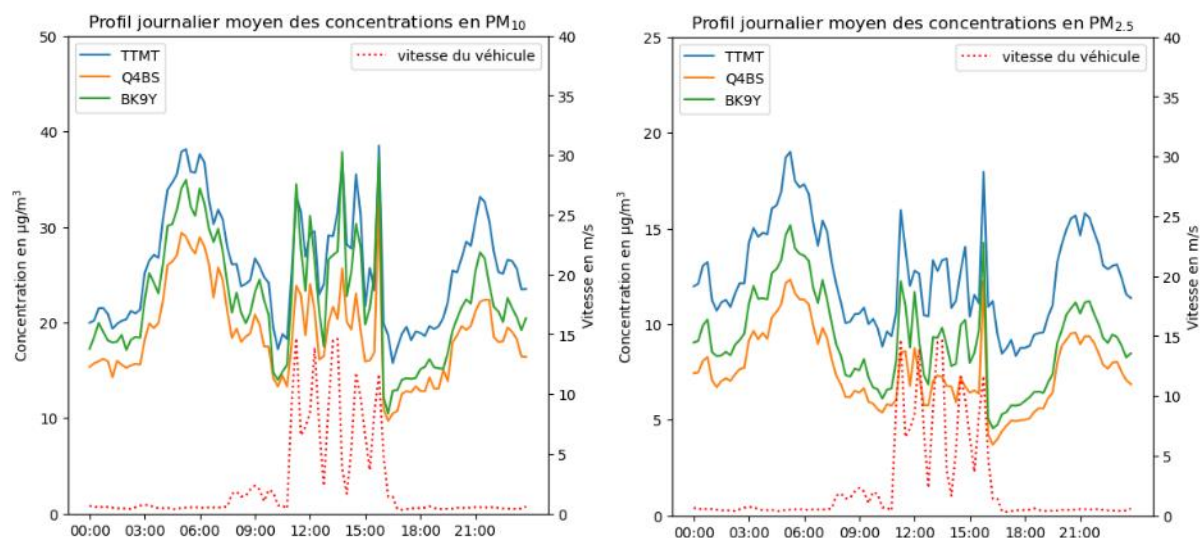
Vitry-sur-Seine (fond)

11.1

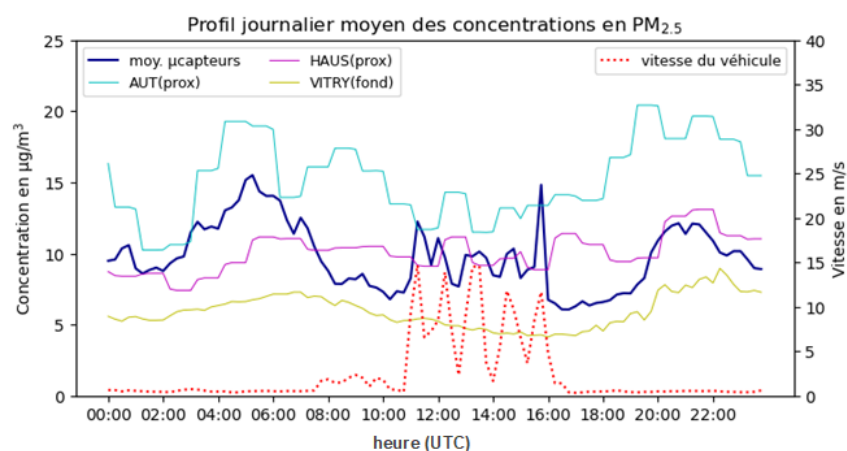
4.7

Profils journaliers moyens en PM₁₀ et PM_{2.5} sur la tournée de la Créteil

1^{ère} période (11 au 18 mai)

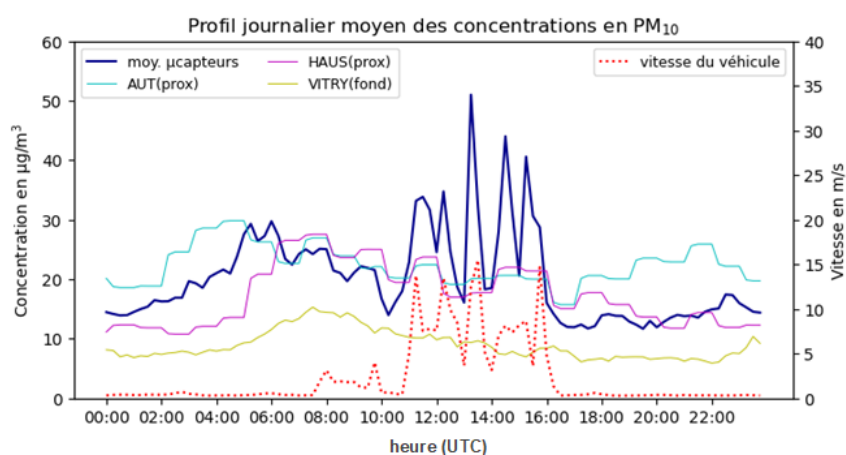
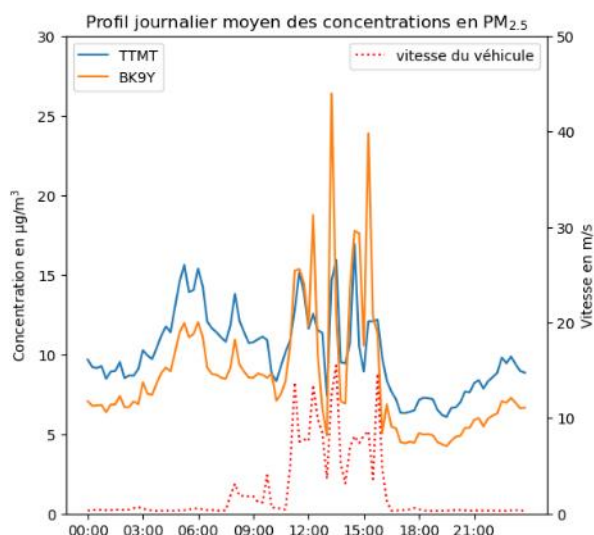
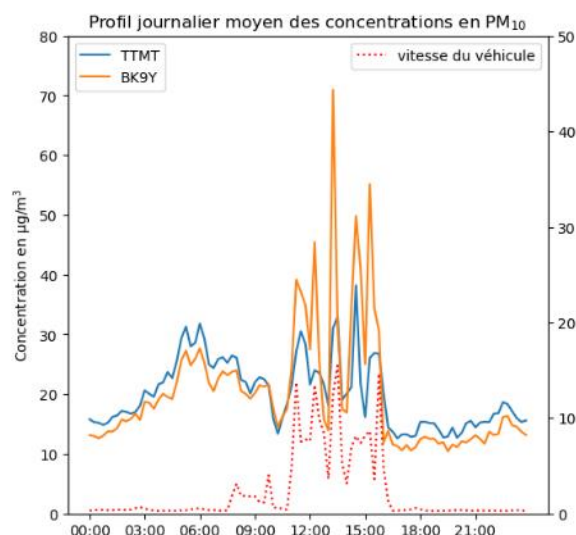


PM ₁₀	Profil journalier		En tournée		Hors tournée	
	Moy.	Ecart-type	Moy.	Ecart-type	Moy.	Ecart-type
Moy. µcapteurs	22.4	5.5	23.1	5.2	22.0	5.7
Auteuil (prox)	33.2	9.6	28.5	4.3	35.7	10.6
Hausmann (prox)	22.4	4.3	25.1	2.6	21.0	4.4
Vitry-sur-Seine (fond)	12.4	2.1	12.1	2.4	12.5	1.9

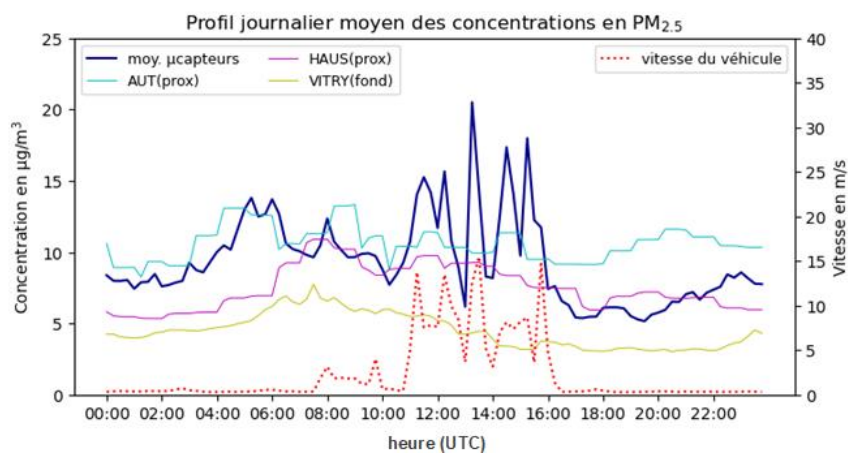


PM _{2.5}	Profil journalier		En tournée		Hors tournée	
	Moy.	Ecart-type	Moy.	Ecart-type	Moy.	Ecart-type
Moy. µcapteurs	9.8	2.3	9.0	1.7	10.2	2.4
Auteuil (prox)	15.2	2.9	14.0	1.9	15.9	3.1
Hausmann (prox)	10.1	1.3	10.0	0.8	10.1	1.6
Vitry-sur-Seine (fond)	5.9	1.2	5.2	0.9	6.3	1.1

1^{ère} période (23 au 31 mai)



PM ₁₀	Profil journalier		En tournée		Hors tournée	
	Moy.	Ecart-type	Moy.	Ecart-type	Moy.	Ecart-type
Moy. µcapteurs	20.1	7.6	26.2	8.6	17.1	4.9
Auteuil (prox)	22.3	3.3	21.3	2.3	22.8	3.6
Haussmann (prox)	17.4	5.2	21.5	3.3	15.4	4.8
Vitry-sur-Seine (fond)	9.0	2.4	10.3	2.4	8.4	2.2

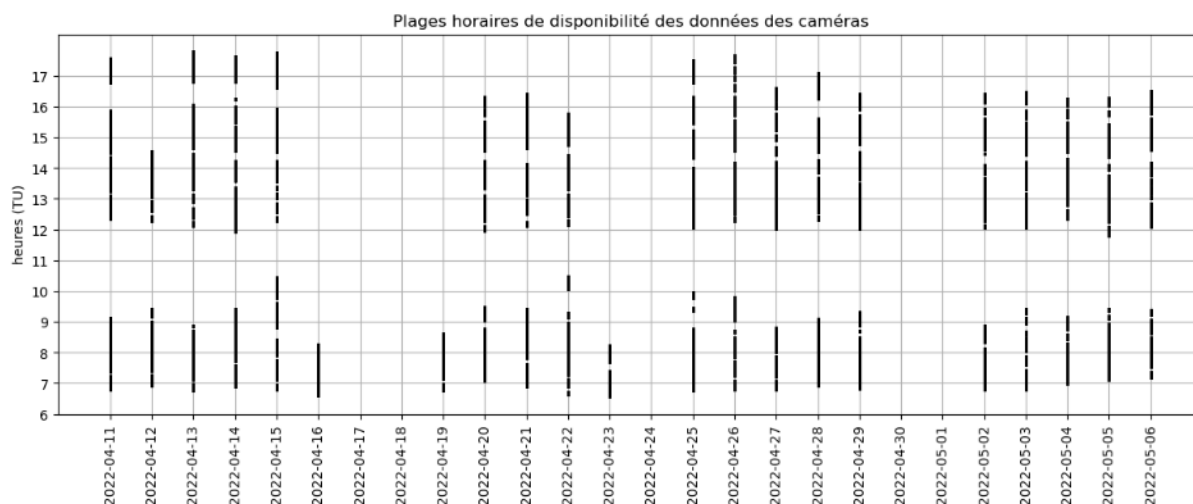


PM _{2.5}	Profil journalier		En tournée		Hors tournée	
	Moy.	Ecart-type	Moy.	Ecart-type	Moy.	Ecart-type
Moy. µcapteurs	9.3	3.0	11.7	3.3	8.2	2.2
Auteuil (prox)	10.6	1.2	10.9	1.2	10.5	1.2
Haussmann (prox)	7.5	1.6	9.1	1.0	6.8	1.3
Vitry-sur-Seine (fond)	4.5	1.2	4.8	1.2	4.3	1.2

B. Analyse des données de trafic issues des caméras embarquées

La Chapelle

Comme dans la tournée des Ulis (présentée en partie 2.2.5.2), les données issues des caméras ne sont disponibles que pendant les phases de déplacement du véhicule.

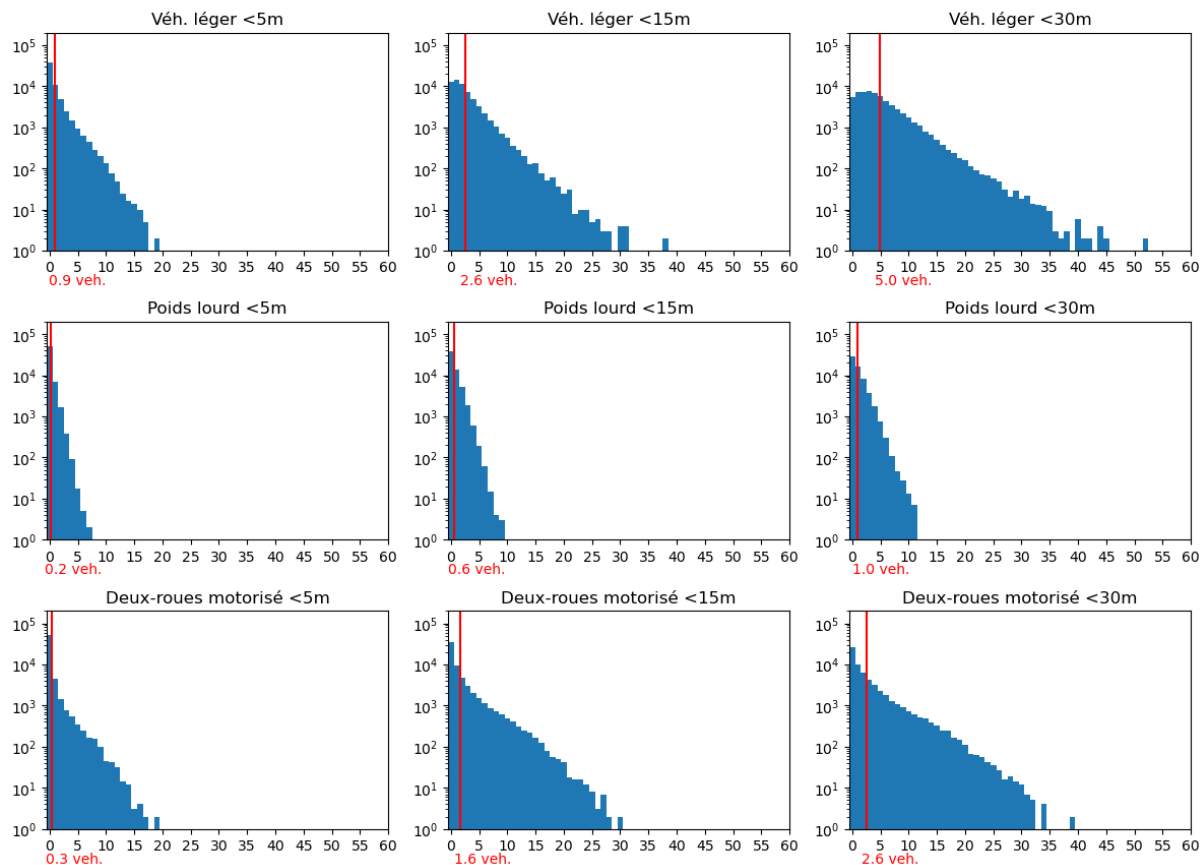


Les données des caméras, agrégées à une fréquence de 5s, représentent 6.1e4 lignes soit 85 heures. Sur les 4 semaines de tournées, le matin du lundi au samedi de 6h45 à 9h30 (TU) et l'après-midi du lundi au vendredi de 12h à 17h30 (TU), la disponibilité des données des caméras est bonne – étant donné l'absence de données lorsque le véhicule est à l'arrêt : 48% des plages de tournées sont couvertes.

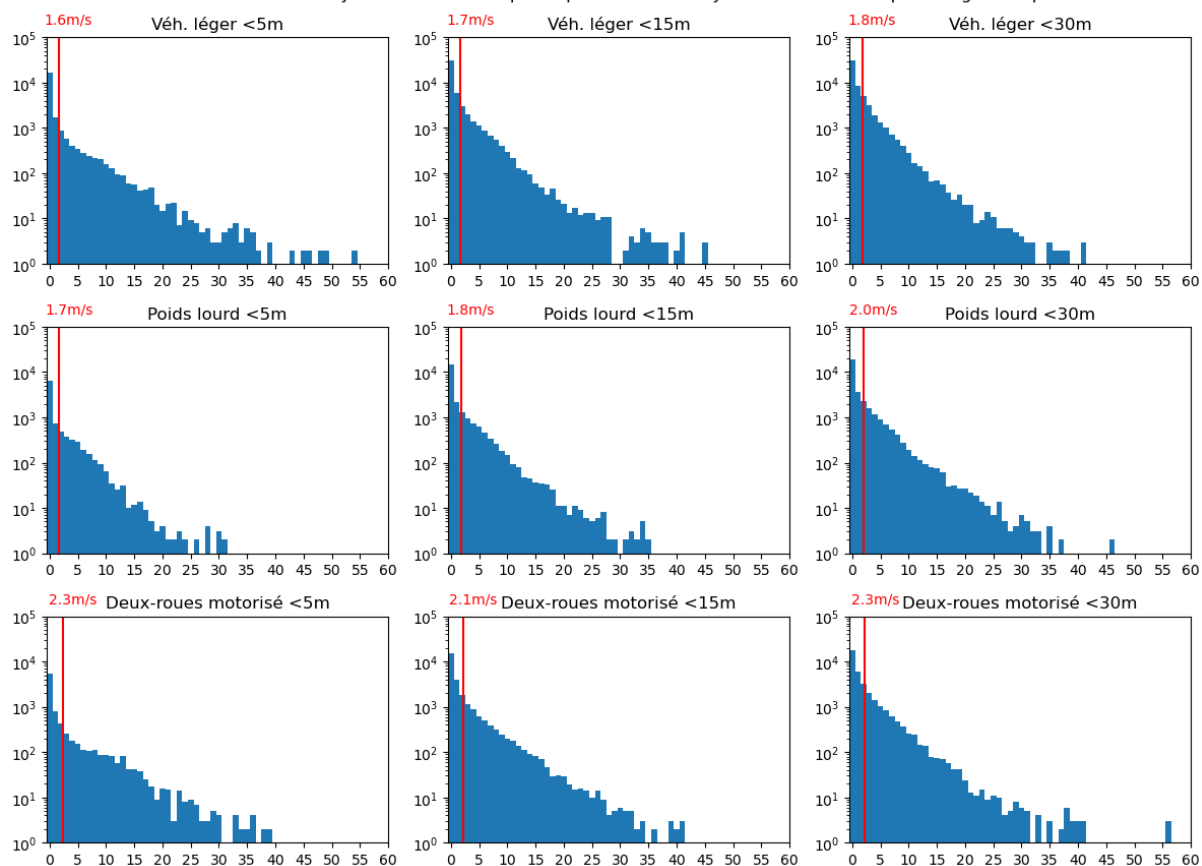
D'après les histogrammes, la situation la plus fréquente est l'absence de deux-roues motorisé et de poids-lourd autour du véhicule de tournée. En revanche, il y a le plus souvent 3 voitures dans le périmètre de 30m, 1 voiture dans le périmètre de 15 m et aucune voiture dans les 5m.

Les véhicules les plus représentés sont les véhicules légers : il y a en moyenne 5 véhicules légers dans un périmètre de 30m, 2.6 véhicules légers dans un périmètre de 15m et 0.9 véhicules légers à moins de 5m. Les véhicules de l'environnement ont en moyenne des vitesses moyennes relativement faibles : 1.6 à 2.3 m/s.

Nombre d'occurrences et moyenne des valeurs prises par le nombre de véhicules par catégorie et périmètre

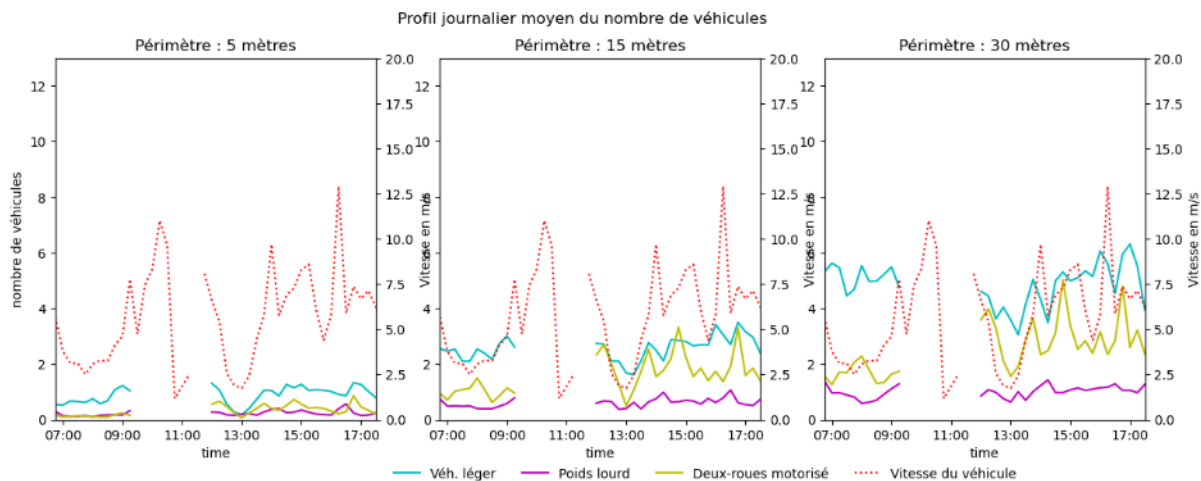


Nombre d'occurrences et moyennes des valeurs prises par la vitesse moyenne des véhicules par catégorie et périmètre

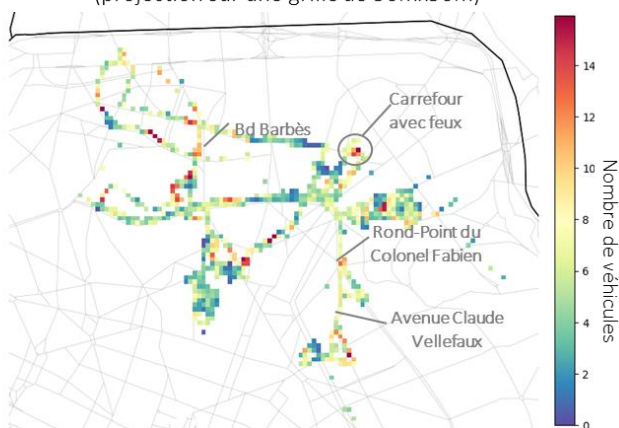


D'après les profils moyens journaliers :

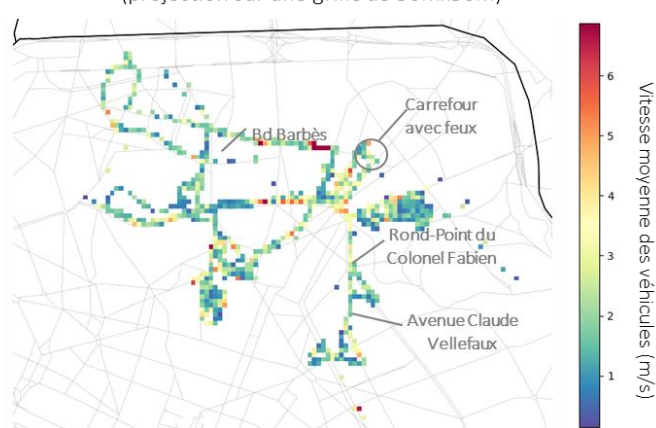
- le matin, le véhicule en tournée est surtout entouré de véhicules légers
- l'après-midi, le véhicule en tournée croise des véhicules légers et des deux-roues motorisés



Nombre de véhicules légers dans un périmètre de 30m
(projection sur une grille de 50mx50m)

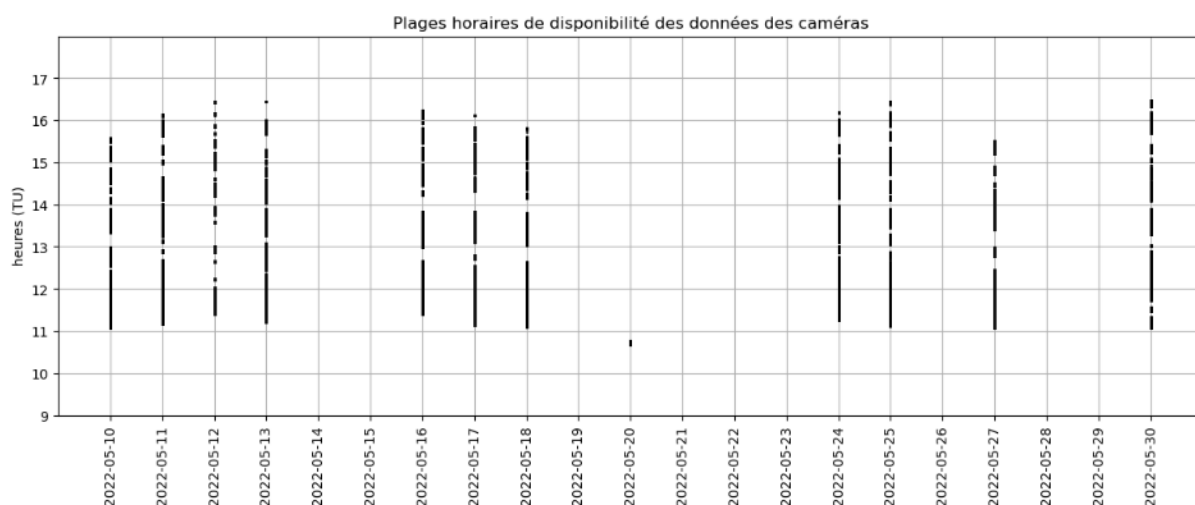


Vitesse moyenne des véhicules légers dans un périmètre de 30m
(projection sur une grille de 50mx50m)



Créteil

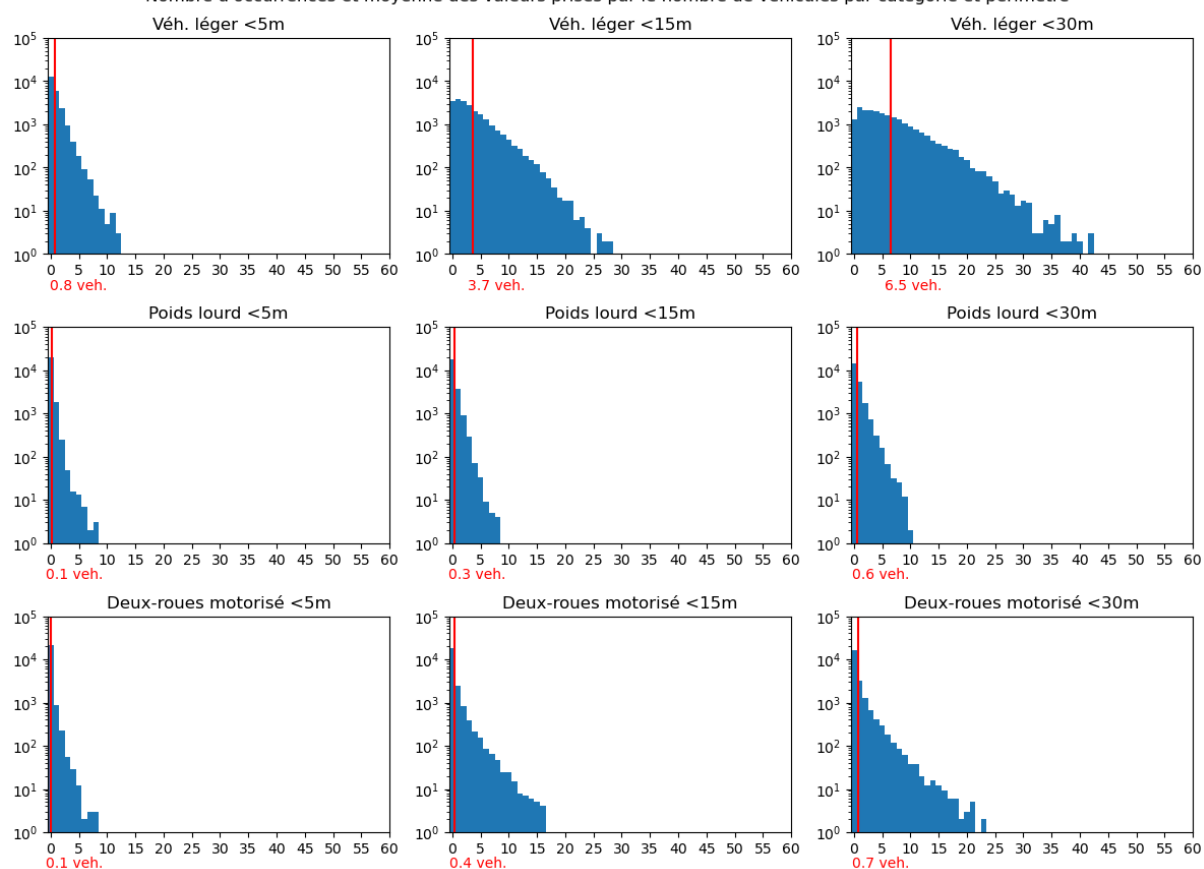
Comme pour les 2 précédentes tournées, les données issues des caméras ne sont disponibles que pendant les phases de déplacement du véhicule.



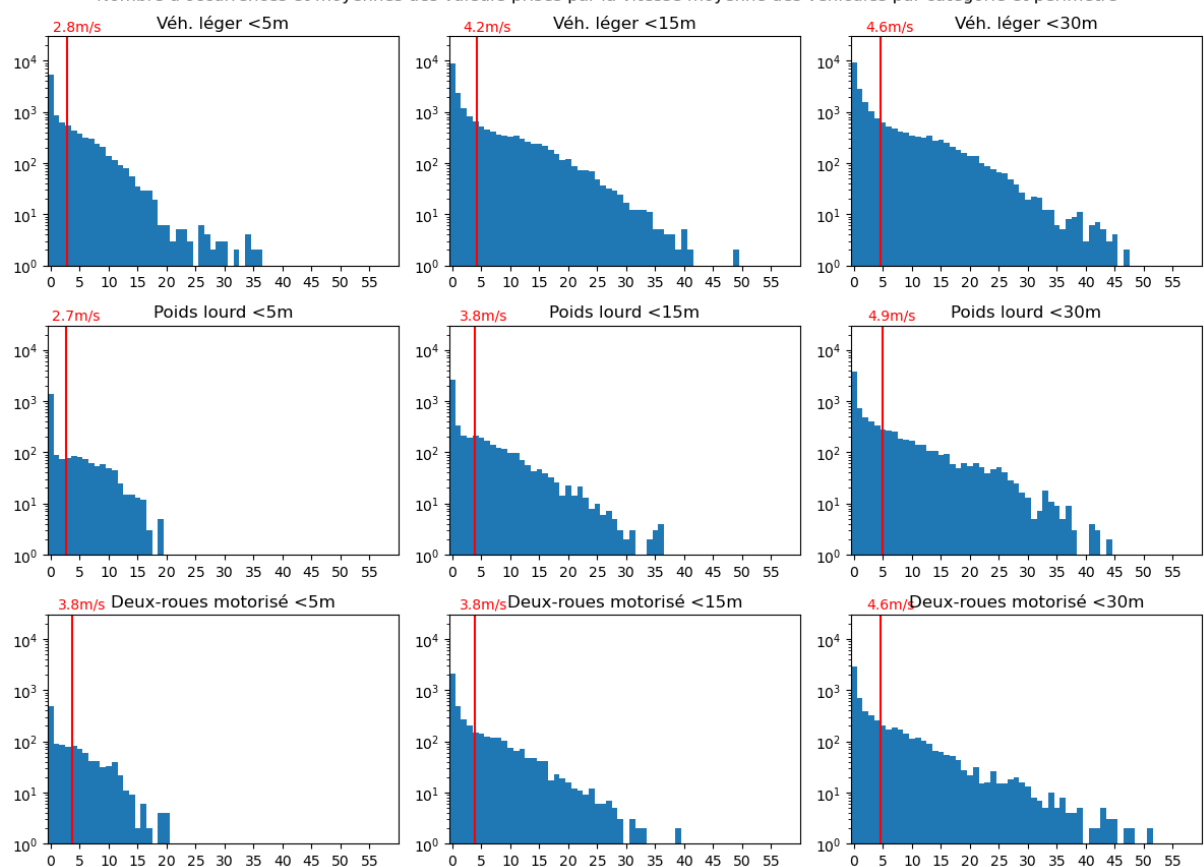
Les données des caméras, agrégées à une fréquence de 5s, représentent 2.3×10^4 lignes soit 32 heures. Sur les 11 journées de tournées (de 11h à 16h15 TU), la disponibilité des données des caméras est bonne – étant donné l'absence de données lorsque le véhicule est à l'arrêt : 50% des plages de tournées sont couvertes.

Au vu histogrammes, la situation la plus fréquente est la présence d'aucun ou d'un véhicule autour du véhicule de tournée. Les véhicules les plus représentés sont les véhicules légers : il y a en moyenne 6.5 véhicules légers dans un périmètre de 30m, 3.7 véhicules légers dans un périmètre de 15m et 0.8 véhicules légers à moins de 5m. Les véhicules de l'environnement ont en moyenne des vitesses moyennes relativement faibles : 2.7 à 4.9 m/s.

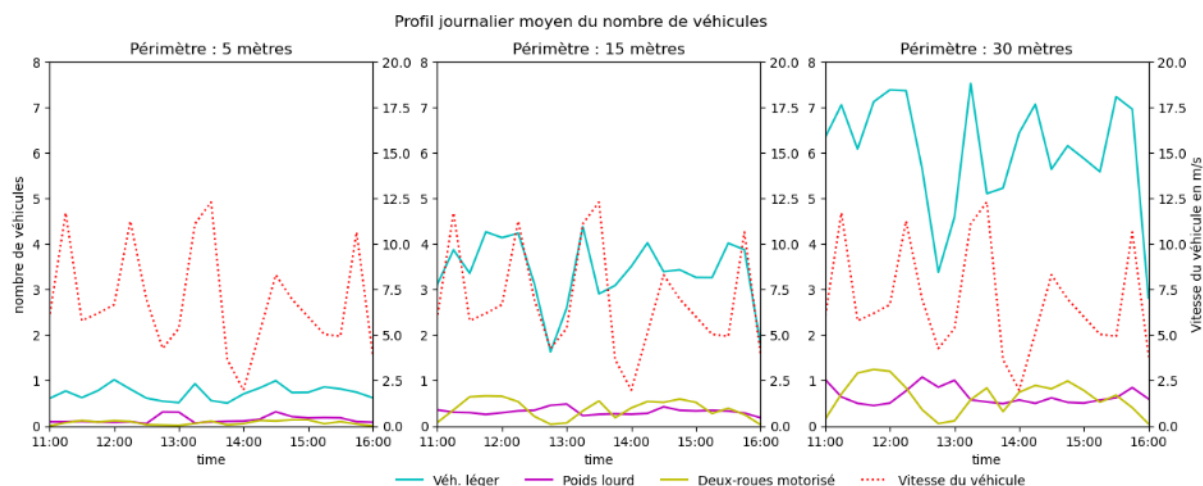
Nombre d'occurrences et moyenne des valeurs prises par le nombre de véhicules par catégorie et périmètre



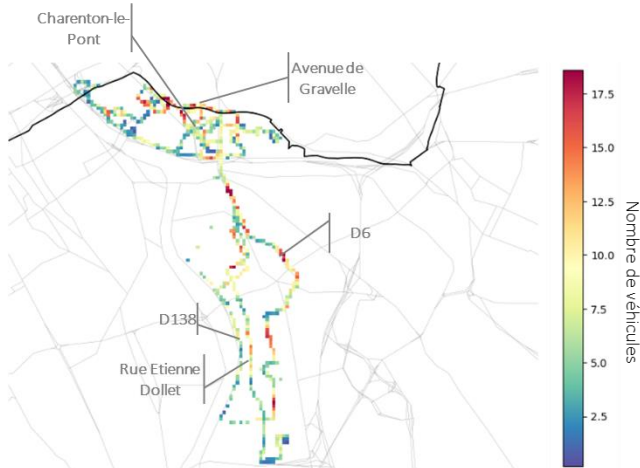
Nombre d'occurrences et moyennes des valeurs prises par la vitesse moyenne des véhicules par catégorie et périmètre



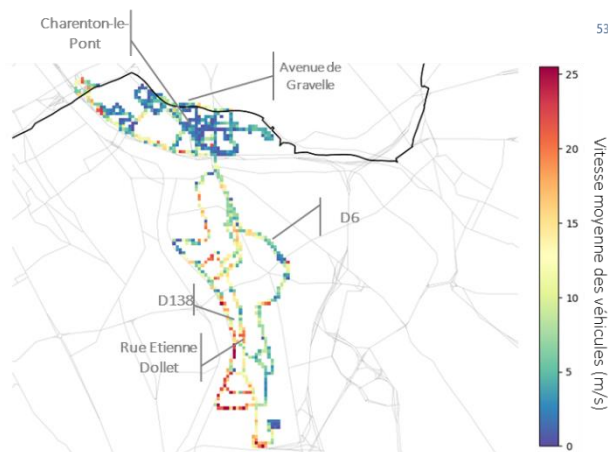
D'après les profils moyens journaliers, les véhicules légers sont en moyenne plus fréquents dans l'environnement du véhicule que les poids-lourds et les deux-roues motorisés. Les pointes de vitesses du véhicule de tournée correspondent aux moments où il y a le plus de véhicules légers dans le périmètre de 30m.



Nombre de véhicules légers dans un périmètre de 30m
(projection sur une grille de 50mx50m)

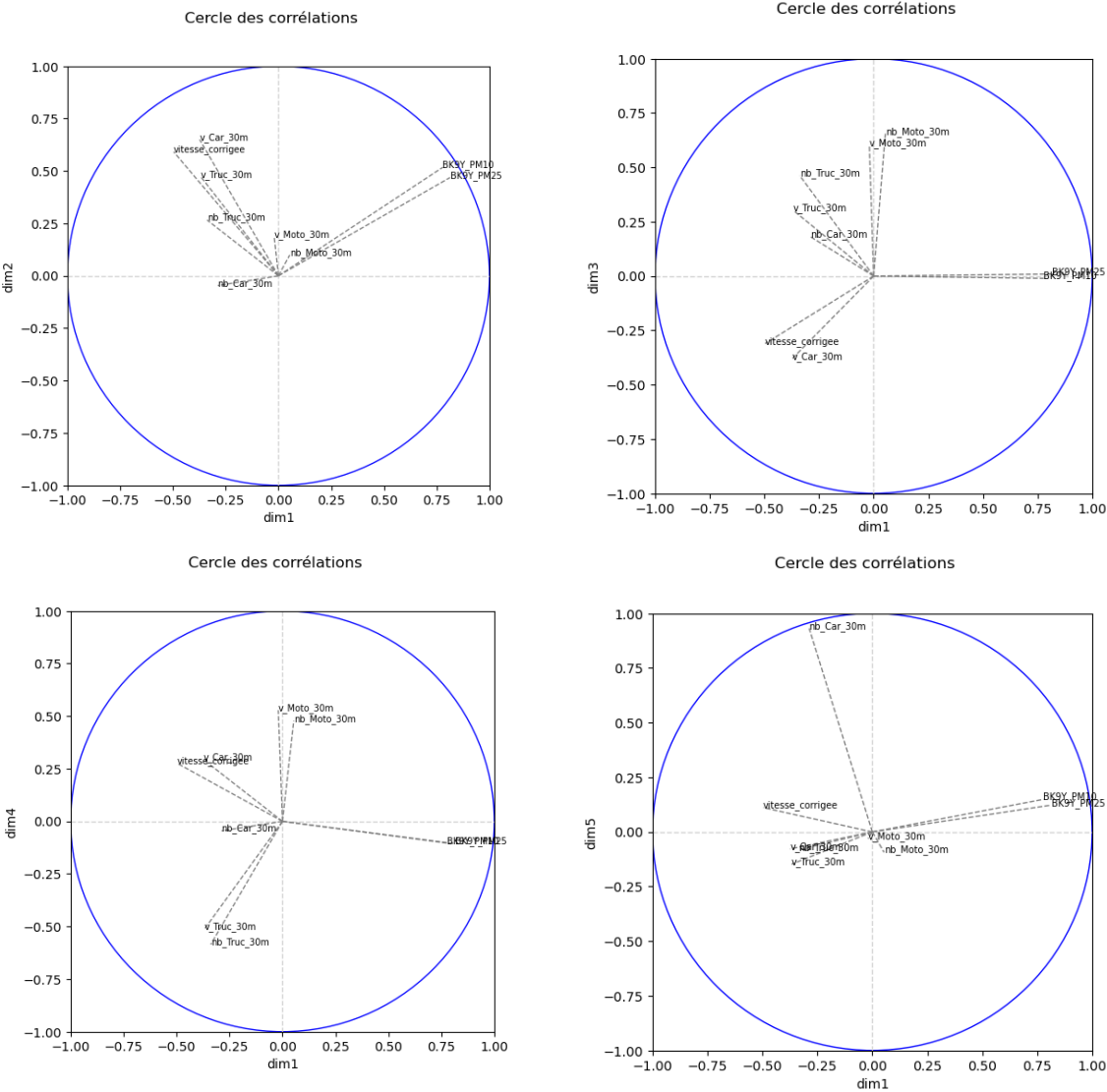


Vitesse moyenne des véhicules légers dans un périmètre de 30m
(projection sur une grille de 50mx50m)



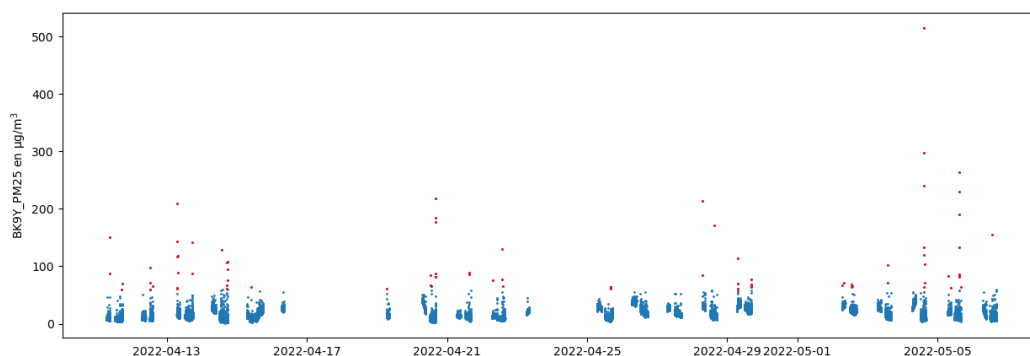
C. Croisement des mesures de qualité de l'air et des données de trafic

Analyse en Composantes Principales – Cercles des corrélation

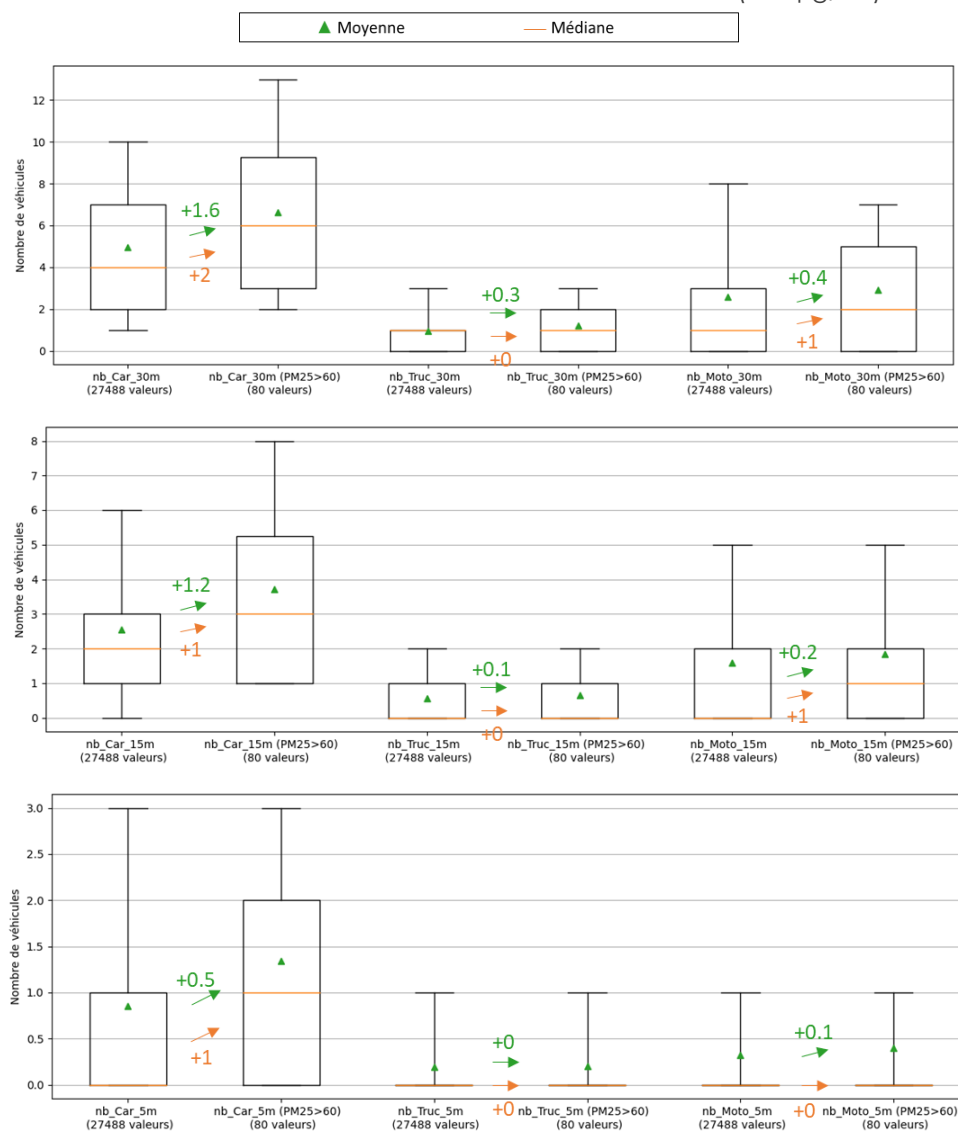


Les Ulis

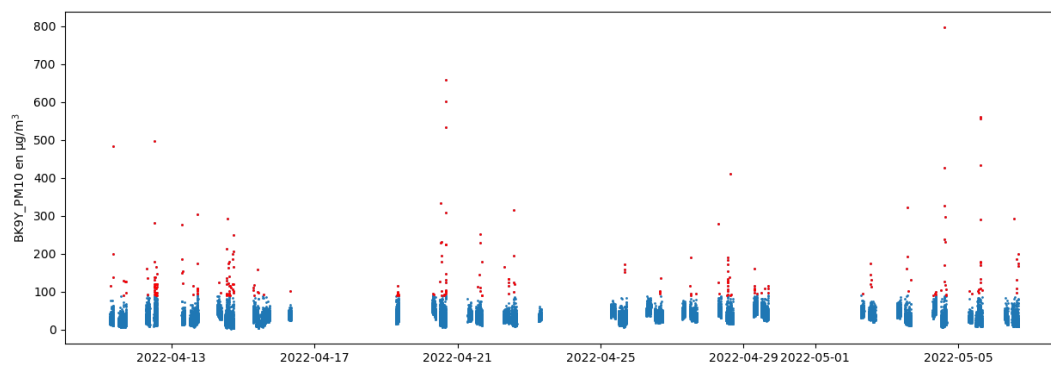
Série temporelle en PM_{2.5} (capteur BK9Y) : en rouge les concentrations > 60 µg/m³



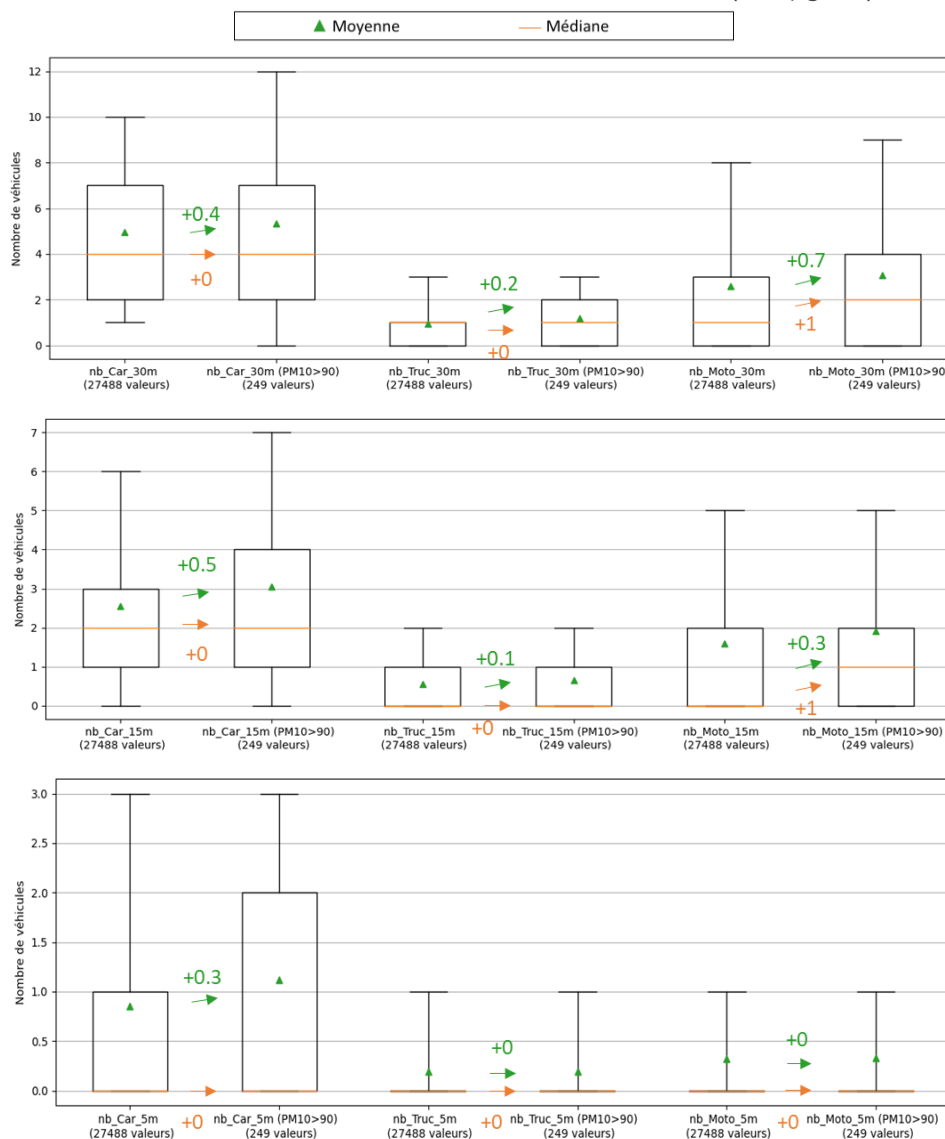
Boxplot des variables de trafic (nombre de véhicules par type) correspondant à l'ensemble des concentrations PM_{2.5} et aux concentrations élevées (>60 µg/m³)



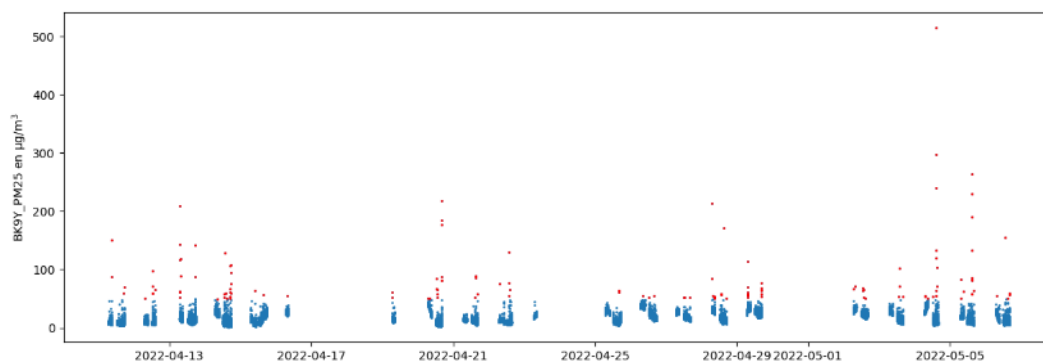
Série temporelle en PM₁₀ (capteur BK9Y) : en rouge les concentrations > 90 µg/m³



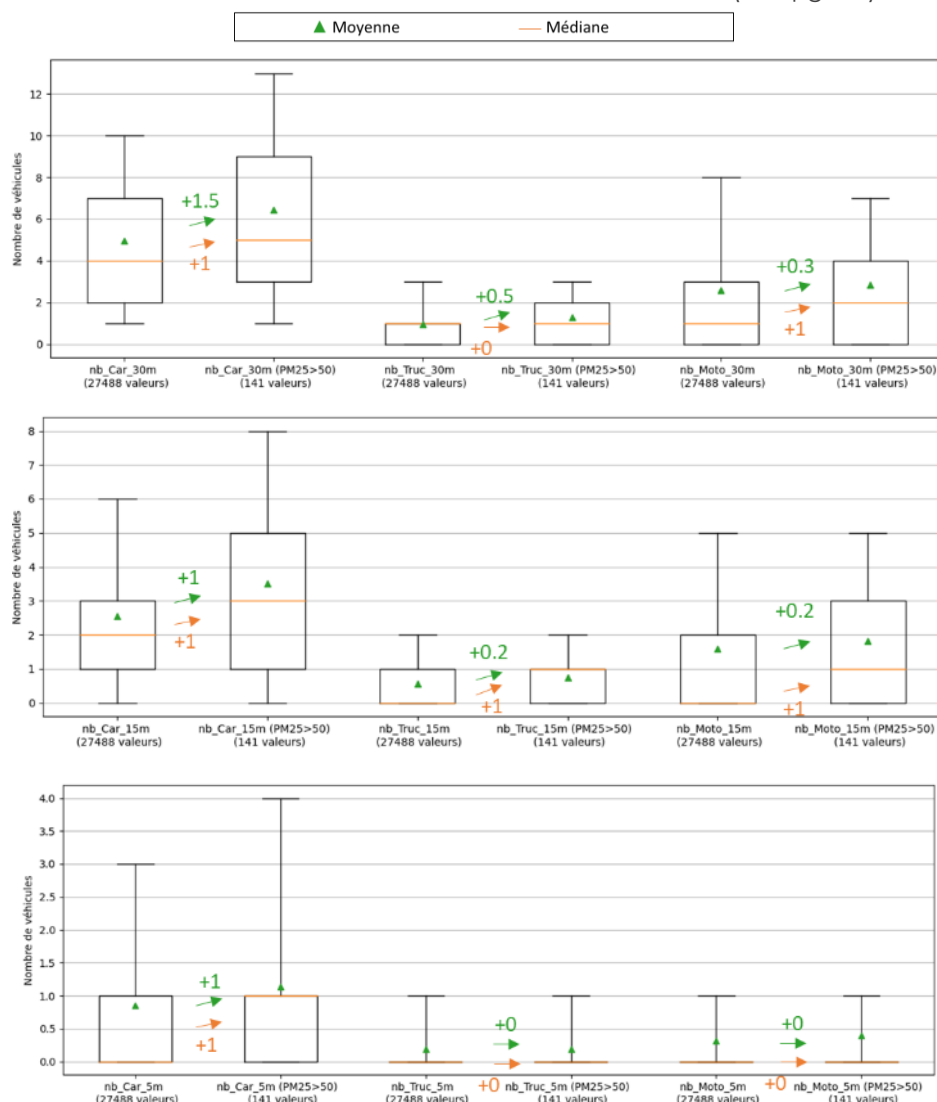
Boxplot des variables de trafic (nombre de véhicules par type) correspondant à l'ensemble des concentrations PM₁₀ et aux concentrations élevées (>90 µg/m³)



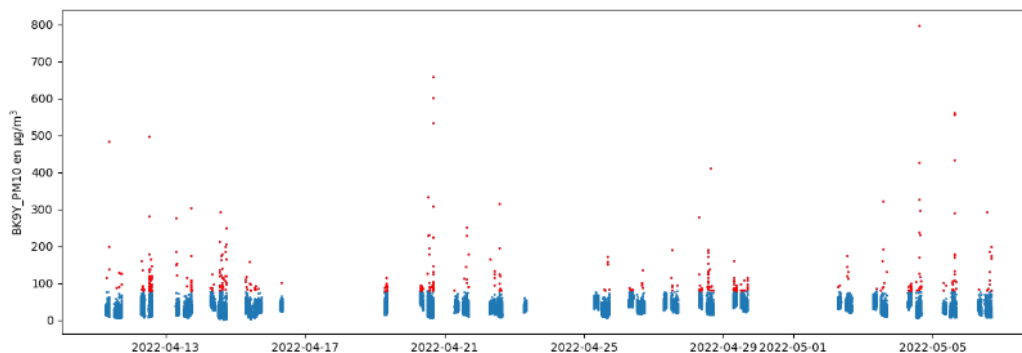
Série temporelle en PM_{2.5} (capteur BK9Y) : en rouge les concentrations > 50 µg/m³



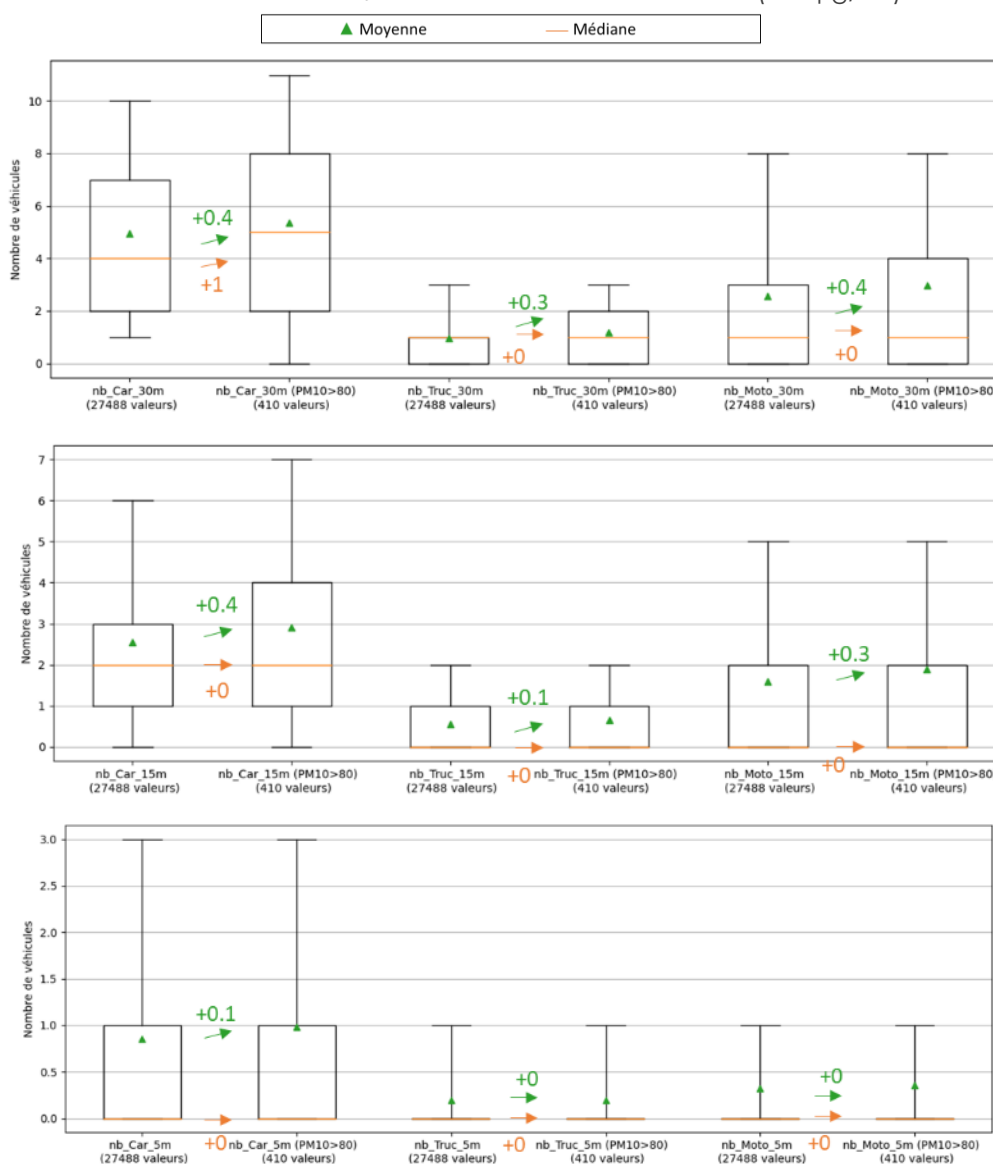
Boxplot des variables de trafic (nombre de véhicules par type) correspondant à l'ensemble des concentrations PM_{2.5} et aux concentrations élevées (>50 µg/m³)



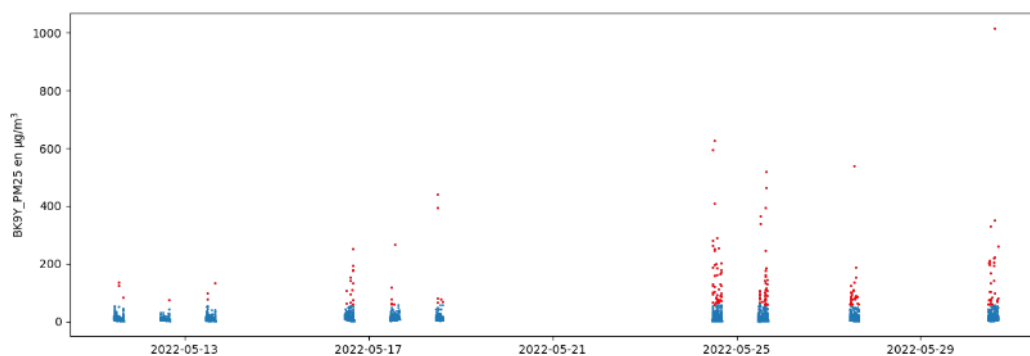
Série temporelle en PM₁₀ (capteur BK9Y) : en rouge les concentrations > 80 µg/m³



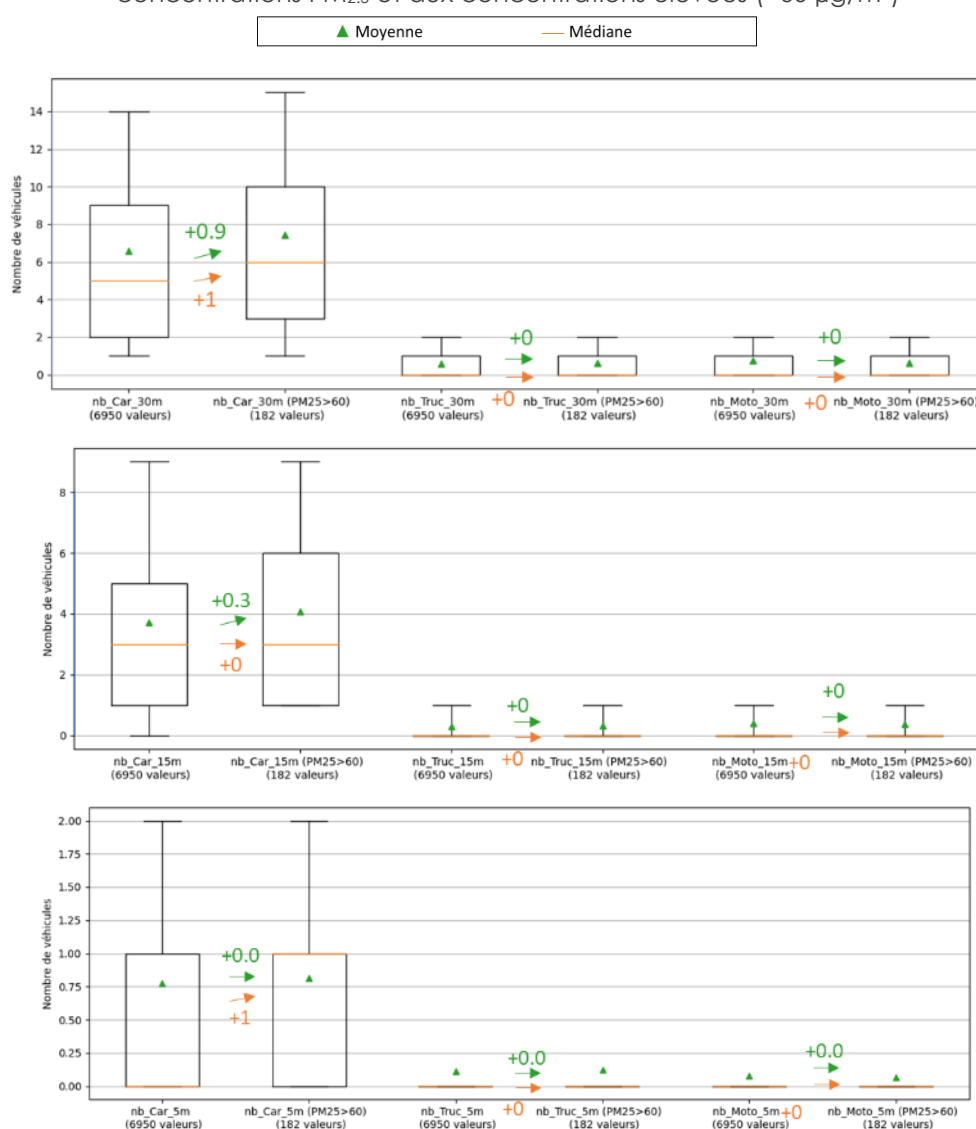
Boxplot des variables de trafic (nombre de véhicules par type) correspondant à l'ensemble des concentrations PM₁₀ et aux concentrations élevées (>80 µg/m³)



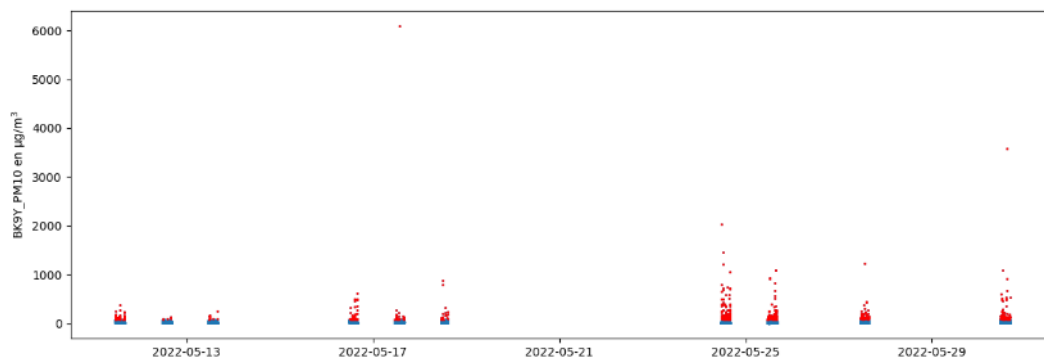
Série temporelle en PM_{2.5} (capteur BK9Y) : en rouge les concentrations > 60 µg/m³



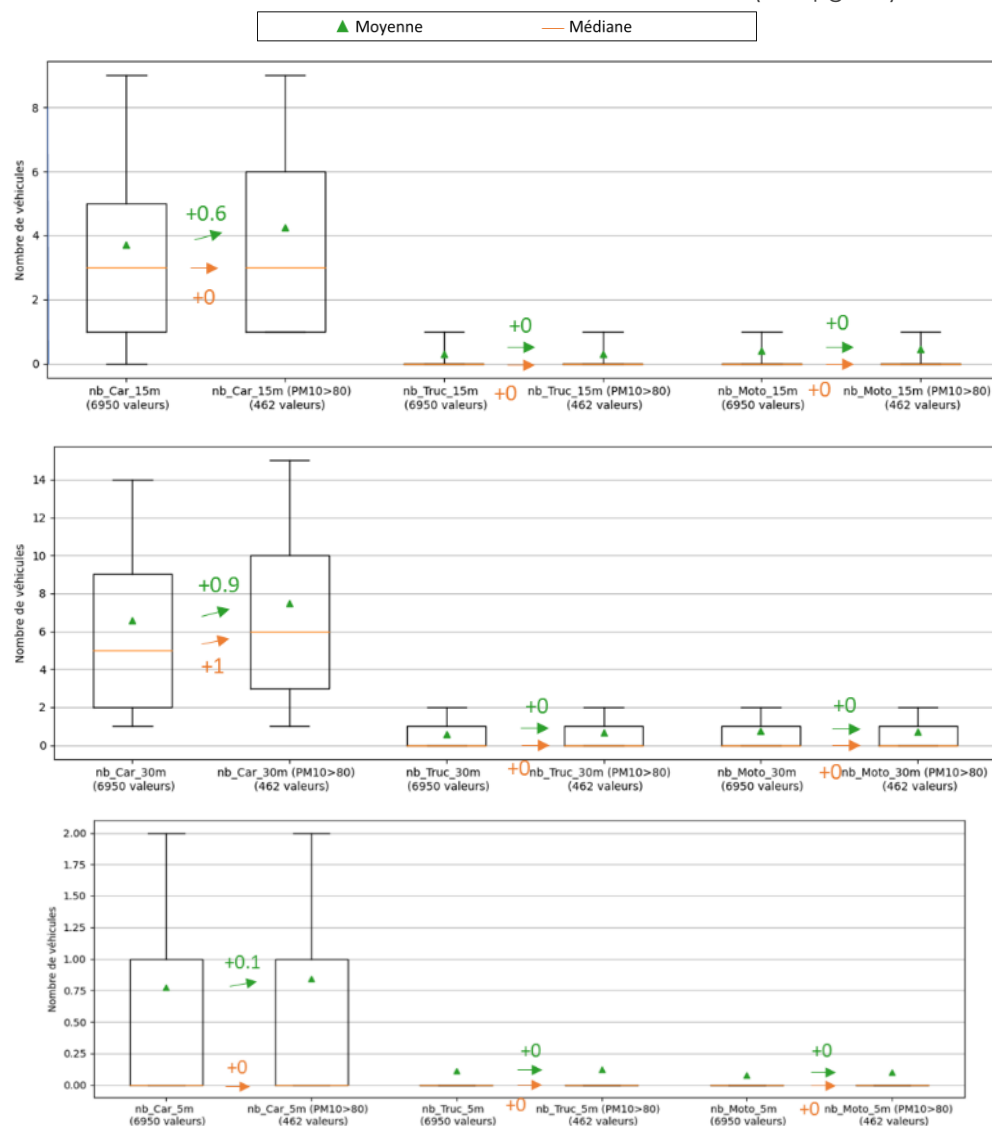
Boxplot des variables de trafic (nombre de véhicules par type) correspondant à l'ensemble des concentrations PM_{2.5} et aux concentrations élevées (>60 µg/m³)



Série temporelle en PM₁₀ (capteur BK9Y) : en rouge les concentrations > 80 µg/m³



Boxplot des variables de trafic (nombre de véhicules par type) correspondant à l'ensemble des concentrations PM₁₀ et aux concentrations élevées (>80 µg/m³)



Annexe 9 : Comportement à long terme des capteurs

Un capteur déployé sur de longues périodes peut être affecté par divers types de dégradation des performances. Si la dégradation est rapide ou brutale, on parle généralement de défauts ou de défaillances des capteurs (par exemple : dus à des dysfonctionnements dans le contrôle du débit d'air, de l'alimentation, l'épuisement des filtres ou l'encrassement), tandis que si la perte de performance est progressive (par exemple : perte de sensibilité, variation de la ligne de base, perte de corrélation), nous utilisons généralement le terme de dérive du capteur. Pour étudier ces phénomènes pour les capteurs utilisés dans ce projet, nous avons utilisé les métriques suivantes :

- **Erreur relative** – représente le rapport entre l'erreur de mesure absolue et la valeur de référence. Plus précisément, dans notre cas nous avons utilisé la définition suivante de l'erreur relative en pourcentage avec signe :

$$erreur_{relative} = \frac{valeur_{mesurée} - valeur_{référence}}{valeur_{référence}} \times 100 \%$$

- **Rapport des écarts interquartiles** – une mesure relative de la sensibilité du capteur à la grandeur ciblée, elle est définie comme suit :

$$rapport_{écarts\ interquartiles} = \frac{écart\ interquartile_{mesures\ capteur}}{écart\ interquartile_{mesures\ référence}}$$

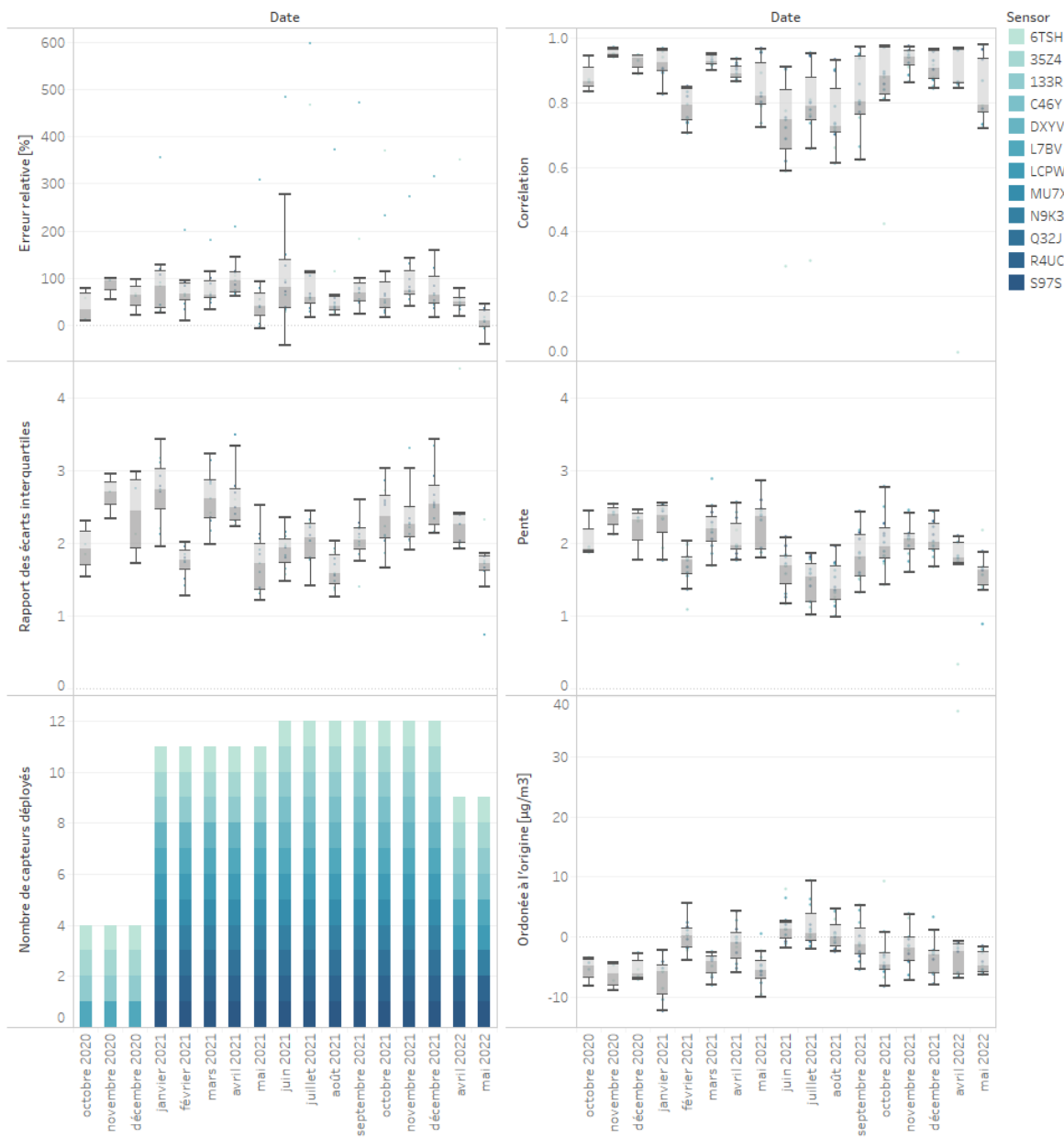
- **Corrélation Pearson** - coefficient qui résume la liaison linéaire qui existe entre deux variables :

$$corrélation_{pearson} = \frac{covariance(mesures_{capteur}, mesures_{référence})}{écart\ type_{capteur} \cdot écart\ type_{référence}}$$

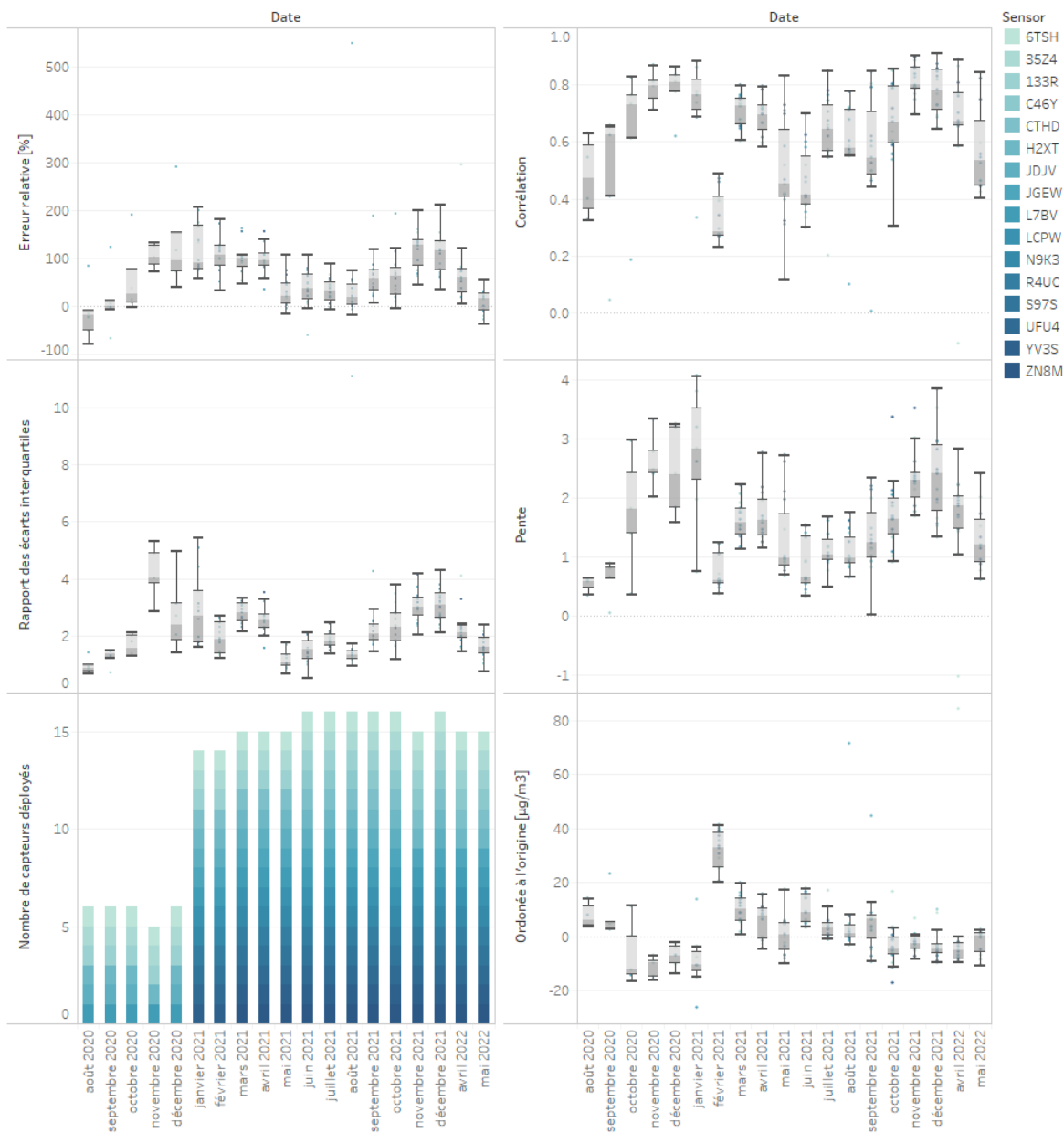
- **Pente (b) et ordonnée à l'origine (a)** de la régression linéaire entre les mesures du capteur et les mesures de la référence, en considérant le modèle suivant :

$$mesure_{capteur} = a + b \cdot mesure_{référence}$$

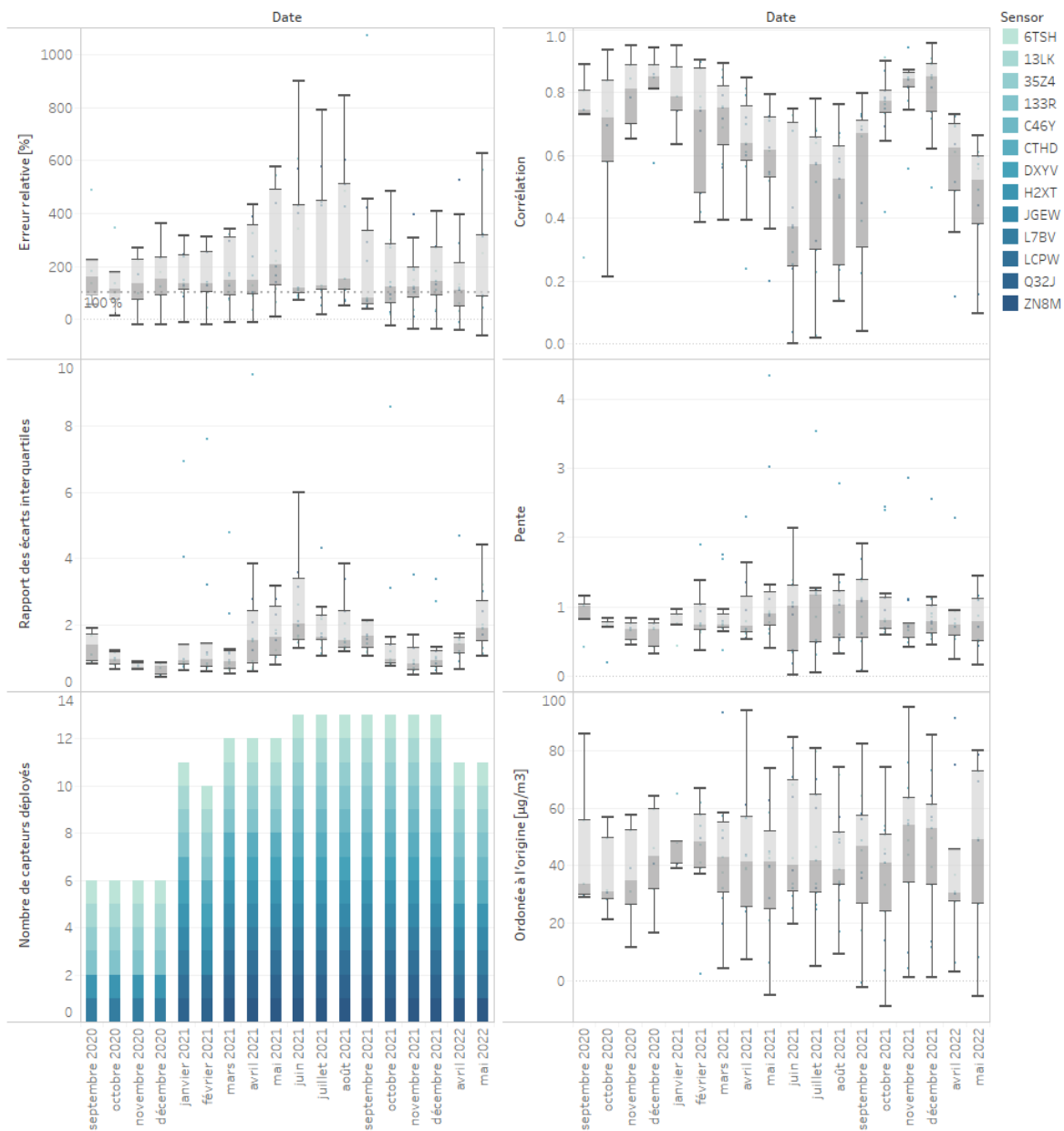
Dans ce qui suit, nous présentons les résultats statistiques de l'analyse de ces métriques, pour les mesures PM_{2.5}, PM₁₀ et les deux technologies NO₂, par rapport aux mesures de la station de référence et au système cartes temps réel à travers des représentations mensuelles en boîte à moustaches.



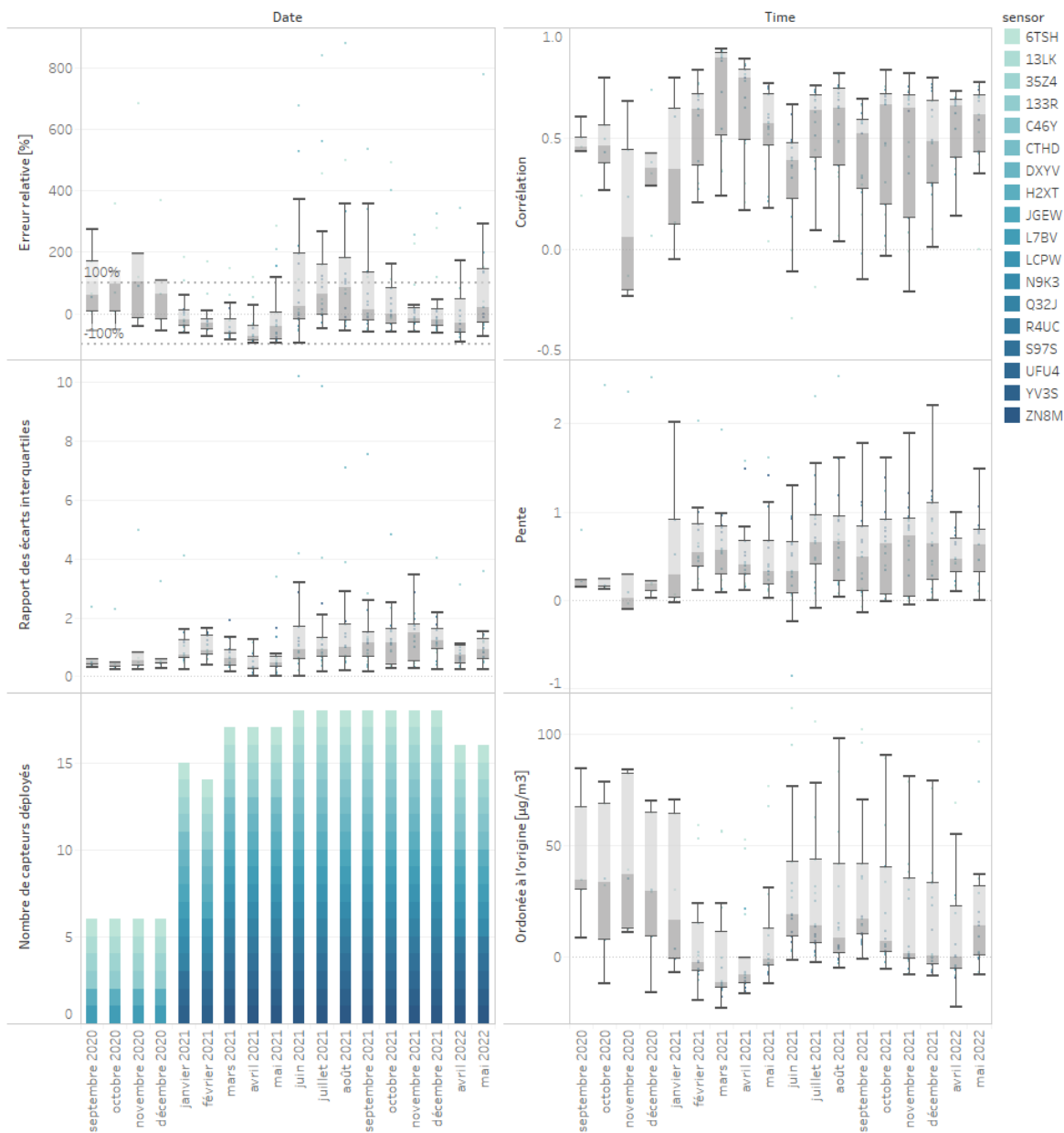
Résultats statistiques des métriques considérées pour les capteurs PM2.5 déployés sur les stations de référence par rapport aux mesures de référence.



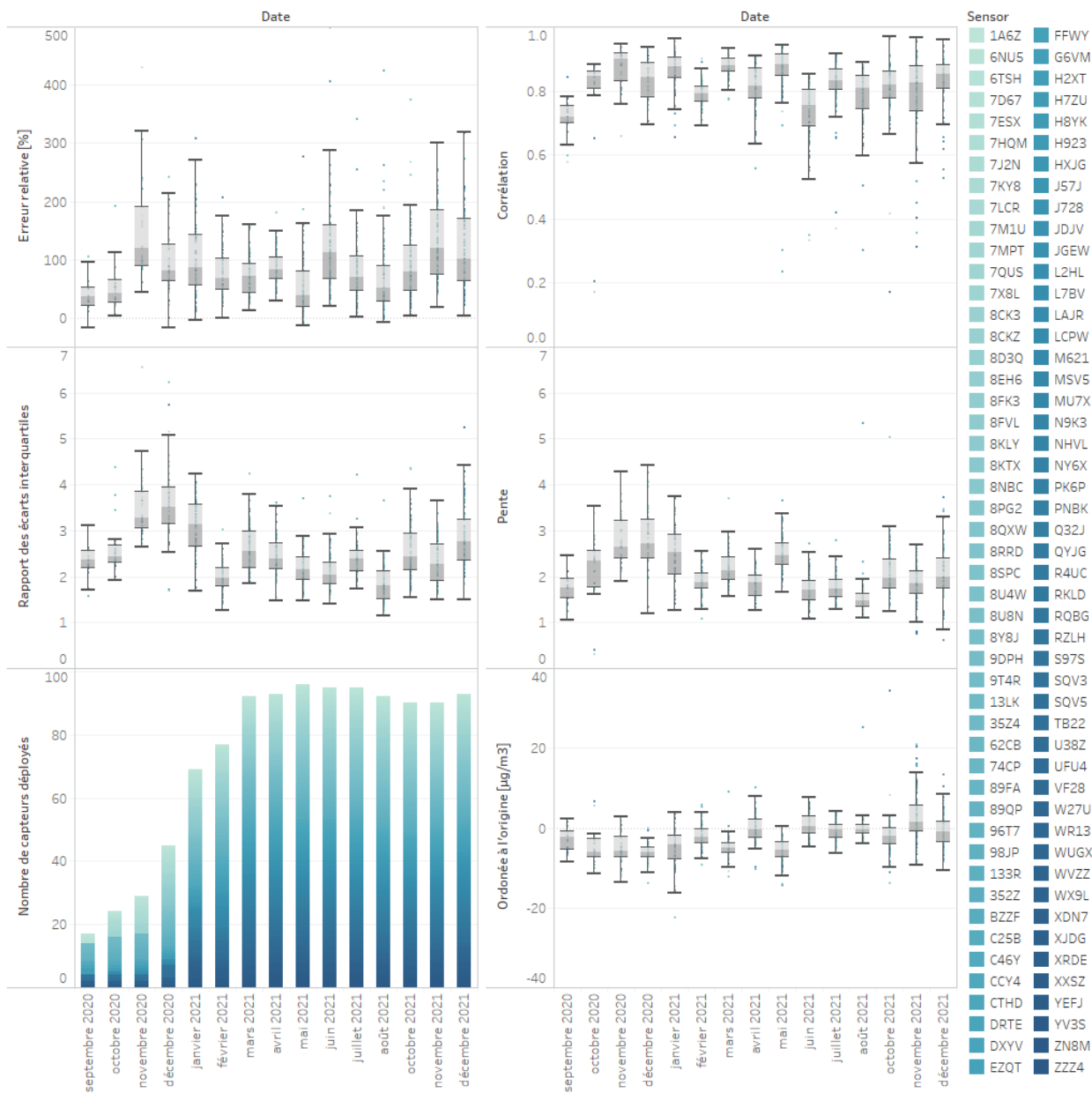
Résultats statistiques des métriques considérées pour les capteurs PM10 déployés sur les stations de référence par rapport aux mesures de référence.



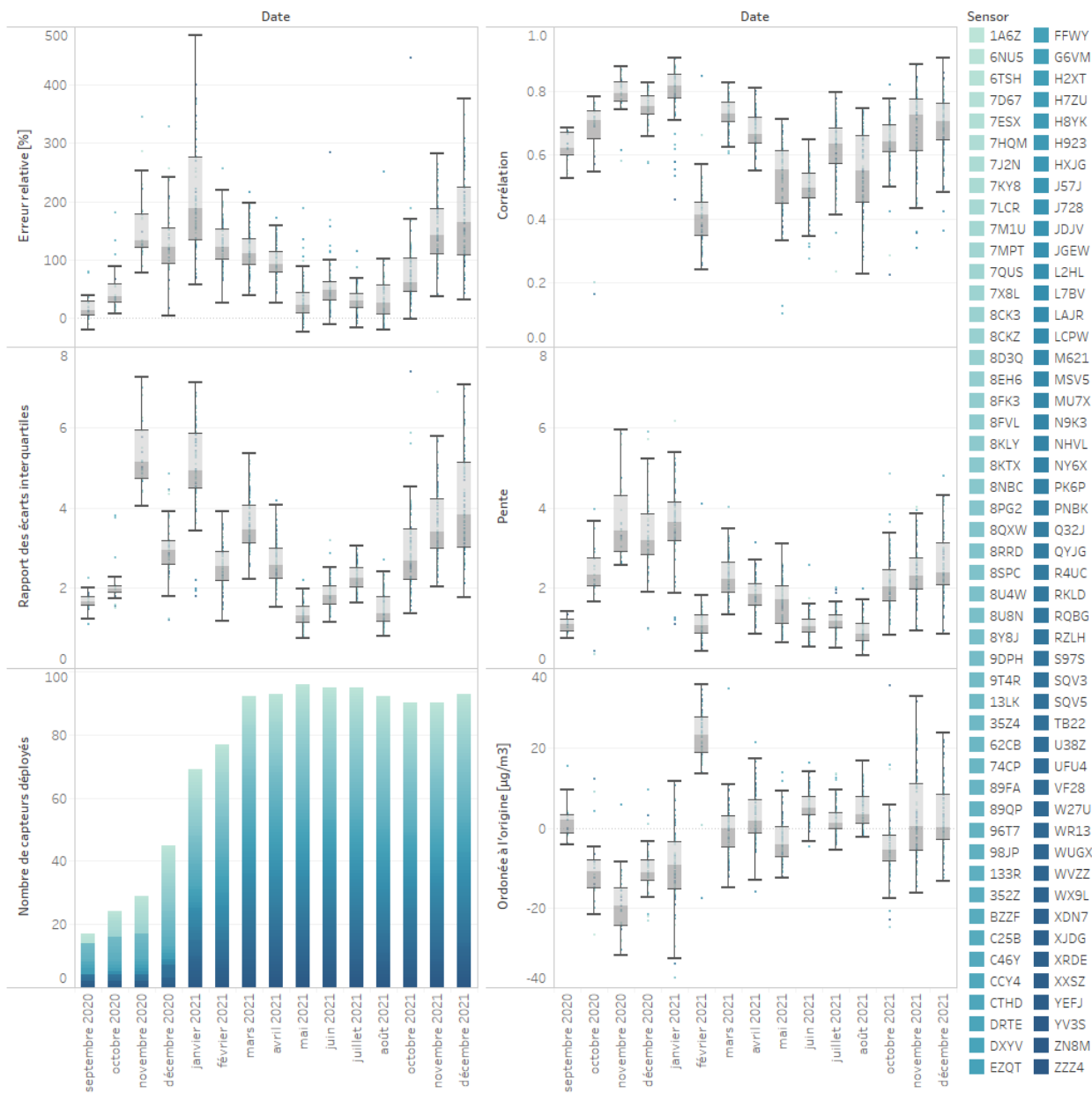
Résultats statistiques des métriques considérées pour les capteurs NO₂ électrochimiques déployés sur les stations de référence par rapport aux mesures de référence.



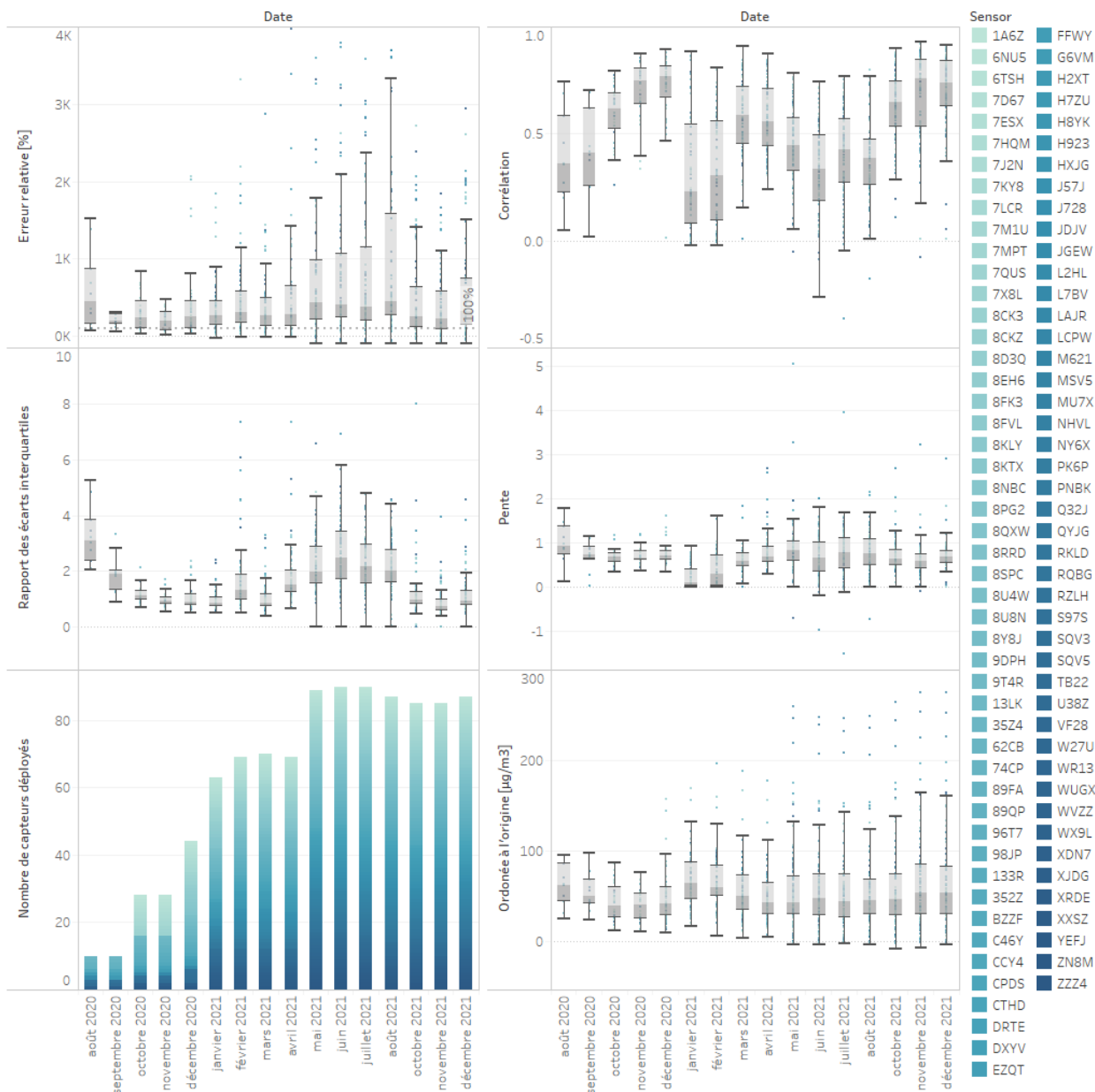
Résultats statistiques des métriques considérées pour les capteurs NO₂ semiconducteurs déployés sur les stations de référence par rapport aux mesures de référence.



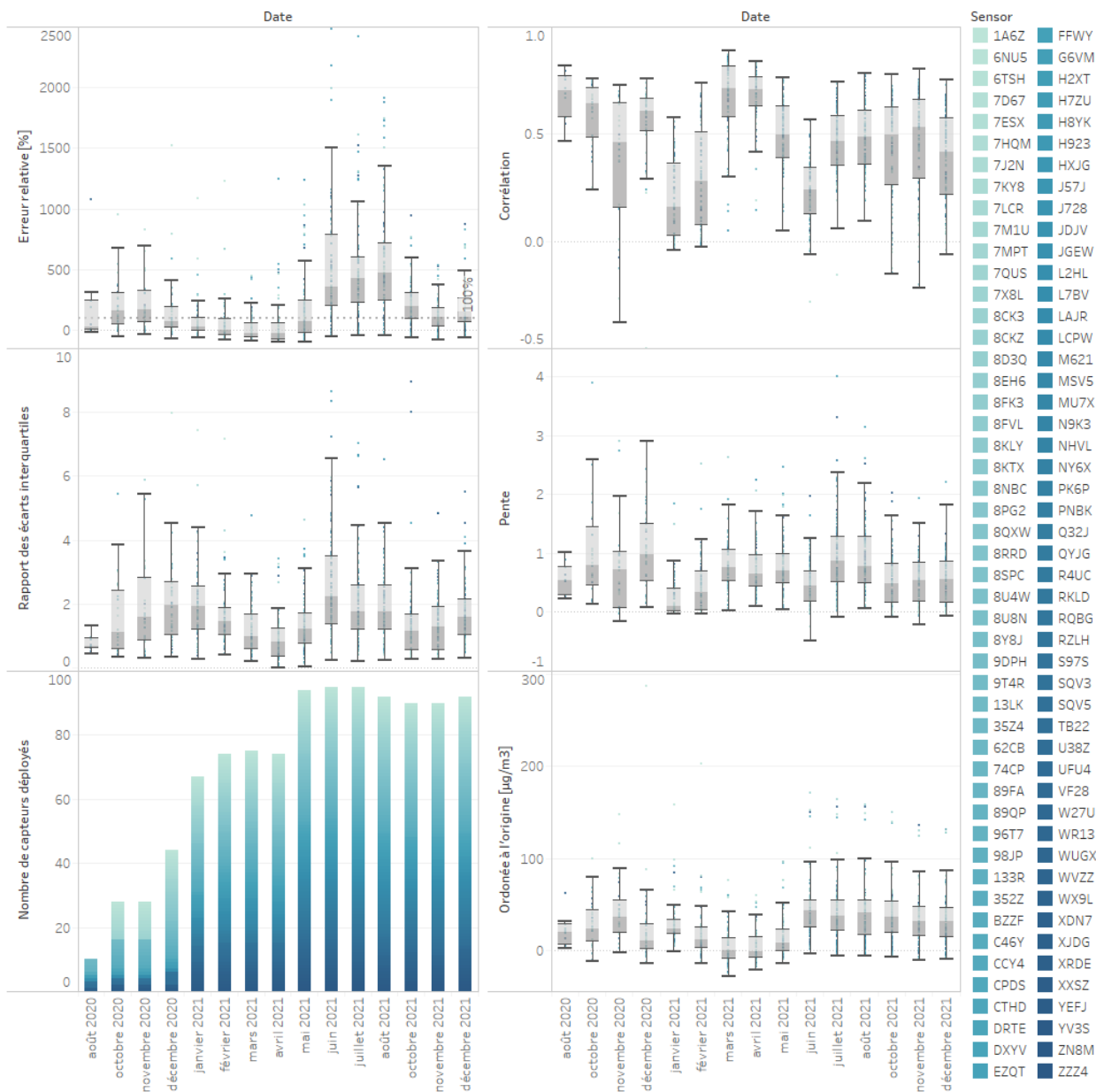
Résultats statistiques des métriques considérées pour les capteurs PM2.5 déployés sur des sites fixes par rapport aux sorties du système carte temps réel aux mêmes positions.



Résultats statistiques des métriques considérées pour les capteurs PM10 déployés sur des sites fixes par rapport aux sorties du système cartes temps réel aux mêmes positions.



Résultats statistiques des métriques considérées pour les capteurs NO₂ électrochimiques déployés sur des sites fixes par rapport aux sorties du système cartes temps réel aux mêmes positions.



Résultats statistiques des métriques considérées pour les capteurs NO2 semiconducteurs déployés sur des sites fixes par rapport aux sorties du système cartes temps réel aux mêmes positions.

Annexe 10 : Préoccupation des franciliens à la qualité de l'air

Questionnaire utilisé pour l'enquête

Bonjour, la Région Île-de-France et Airparif (l'agence de la qualité de l'air) souhaitent connaître votre perception de la qualité de l'air et vos habitudes de déplacements. Le questionnaire durera moins de 10 minutes. Votre nom n'apparaîtra pas dans les résultats de cette enquête. Etes-vous d'accord ?

- 1. A quelle fréquence vous déplacez-vous en voiture ou en deux-roues motorisé en tant que conducteur ou passager ? 1 réponse possible**

Aide contextuelle : oui y compris taxi, VTC

- Au moins une 1 fois par jour
- Au moins 1 fois par semaine
- Au moins 1 fois par mois
- Presque jamais

A. Questions pour le Profilage

- 1. Quel est votre âge ?**

(Entrée manuelle ou menu déroulant)

- 2. Quelle est votre catégorie socio-professionnelle ?**

1 réponse possible

- agriculteur exploitant,
- artisan, commerçant, chef d'entreprise,
- cadre et professions intellectuelles supérieures,
- professions intermédiaires,
- employé,
- ouvrier,
- retraité,
- sans activité professionnelle.

- 3. Quel est le code postal de votre résidence principale ?**

(Entrée manuelle)

1 réponse possible

(2 versions du questionnaire selon le lieu : uniquement pour le bureau de Poste)

- 4. Pour quels types de trajets utilisez-vous régulièrement un véhicule motorisé (voiture, moto, scooter) ?**

Aide contextuelle : oui conducteur ou passager

Plusieurs réponses possibles

- Domicile-travail
- Déplacements professionnels
- Courses
- Loisirs
- Déplacements pour les enfants
- Autres

- 5. Quel(s) moyen(s) de déplacement utilisez-vous le plus régulièrement ?**

Plusieurs réponses possibles

- Véhicule (voiture, moto ou scooter) thermique
- Véhicule (voiture, moto ou scooter) électrique ou hybride
- Vélo ou trottinette (y compris électrique)

- Marche
- Métro, bus, RER, train

B. Questions perceptions QA

1. La pollution de l'air est un sujet qui vous préoccupe ?

1 réponse possible

- Non
- Un peu
- Oui, j'y suis attaché
 - Oui, depuis longtemps
 - Oui, surtout depuis la crise sanitaire

2. Pour améliorer la qualité de l'air, êtes-vous prêt à modifier votre mode de déplacement principal ou changer votre véhicule ?

Aide contextuelle : par exemple prendre les transports en communs, choisir le vélo, la marche, acheter une voiture électrique ou un vélo électrique,

1 réponse possible

- Non
- Pourquoi pas, j'y songe
- Oui, je suis prêt à faire le pas
- Je l'ai déjà fait

3. Quels autres modes de déplacement pourriez-vous envisager pour réaliser les trajets que vous faites habituellement en véhicules motorisé ?

Aide contextuelle : Si la personne n'utilise pas de véhicule motorisé – non concerné

Plusieurs réponses possibles

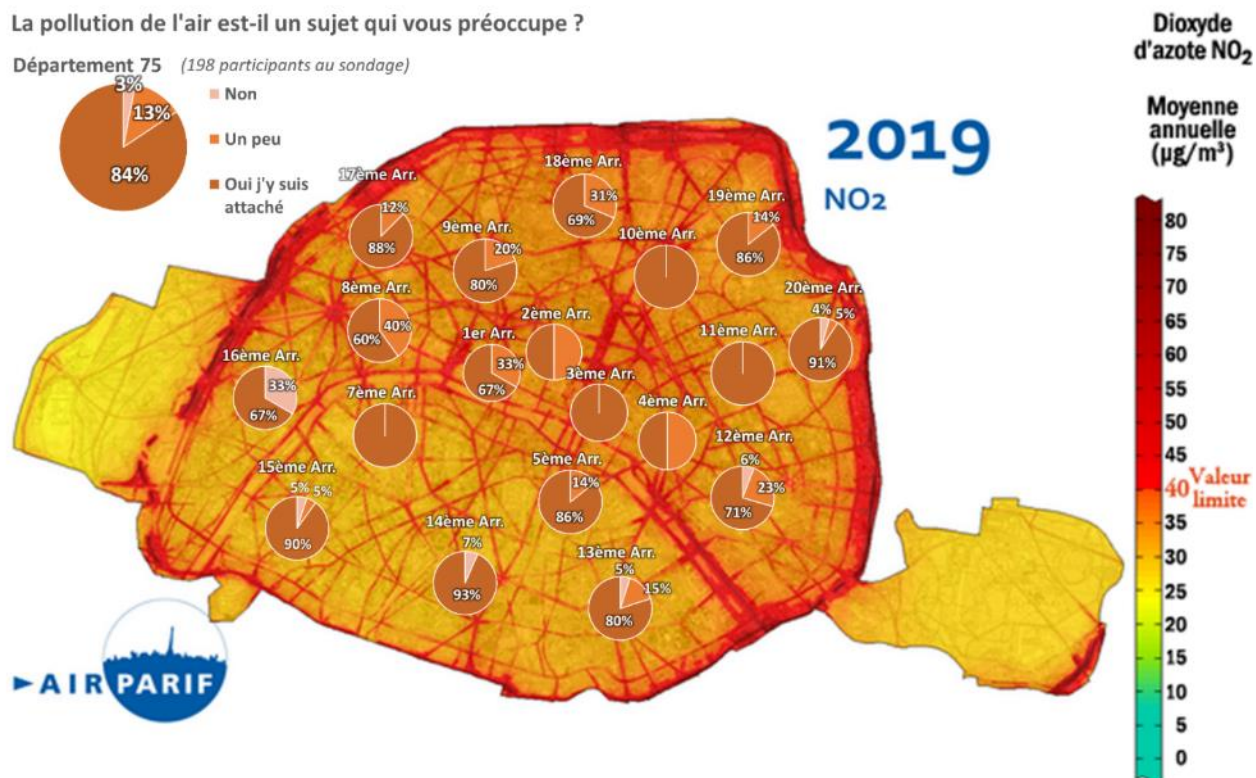
- Marche
- Vélo ou trottinette (personnel ou en libre-service, y compris électrique)
- Transport en commun
- Covoiturage
- Voitures/ scooters en libre-service
- Non concerné

4. Qu'est-ce qui vous inciterait à changer votre mode de transport pour réduire la pollution de l'air ?

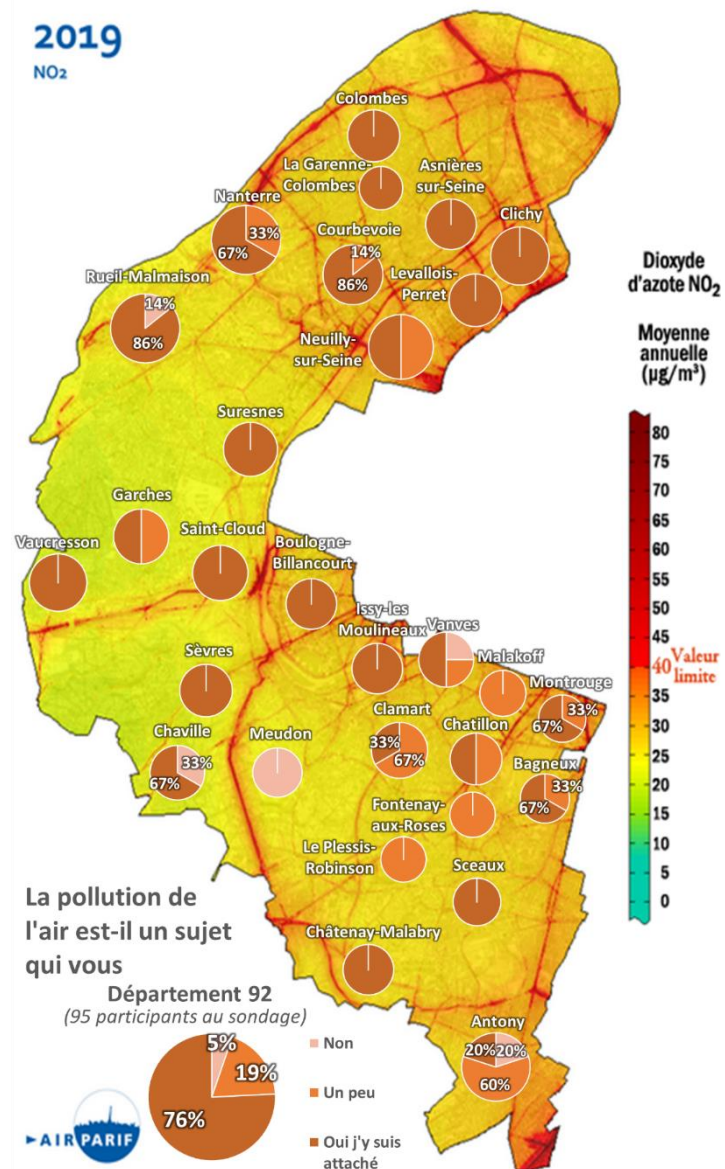
Plusieurs réponses possibles

- Une meilleure information de l'impact de vos activités sur la pollution de l'air et ses conséquences sur la santé
- Une aide financière à l'achat d'un véhicule électrique (voiture, vélo, scooter, trottinette, ...)
- La réalisation de pistes cyclables et de stationnements vélos sécurisés
- Un développement des transports en commun
- Une contrainte ou une obligation réglementaire limitant l'usage de la voiture (exemple Crit'air)
- Des voies réservées au covoiturage
- Autres

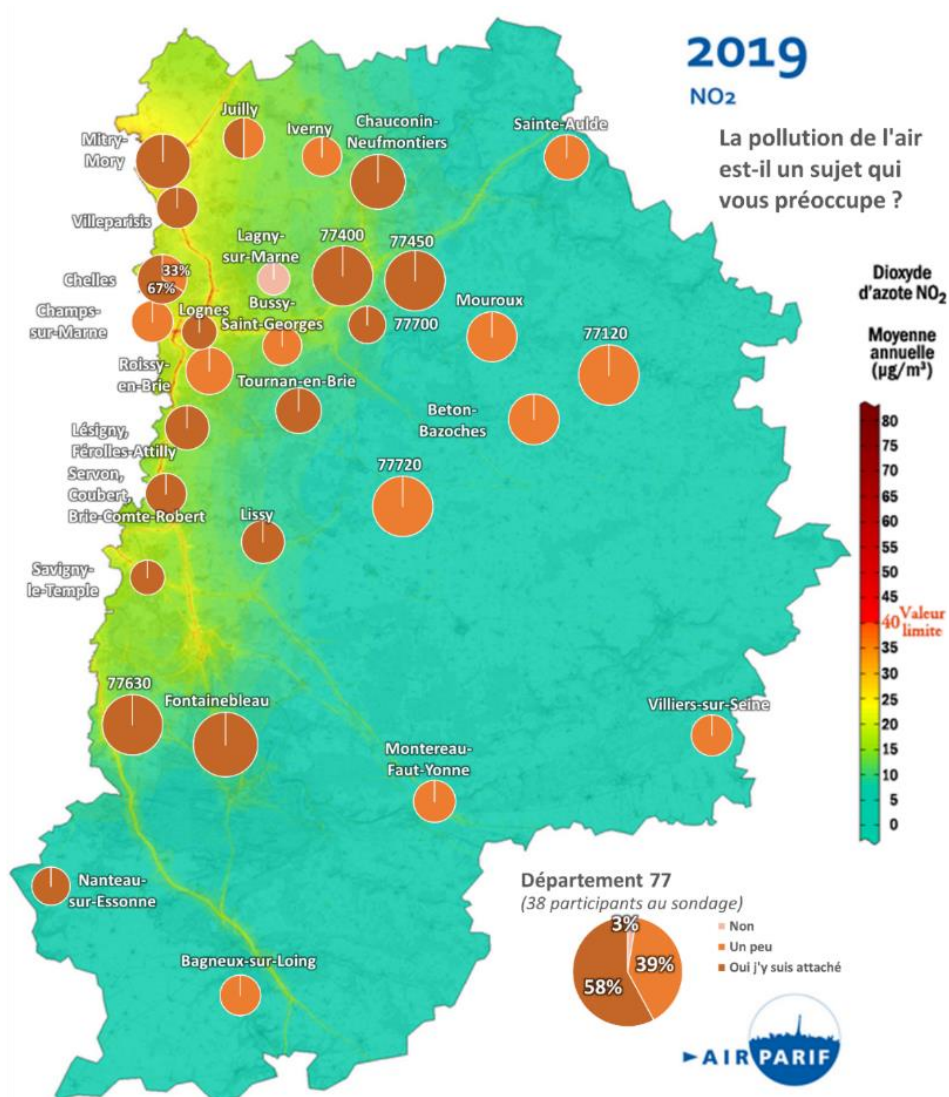
Spatialisation de la réponse à la question « la qualité de l'air est-il un sujet qui vous préoccupe » au regard des cartes de pollution au dioxyde d'azote à l'échelle départementale



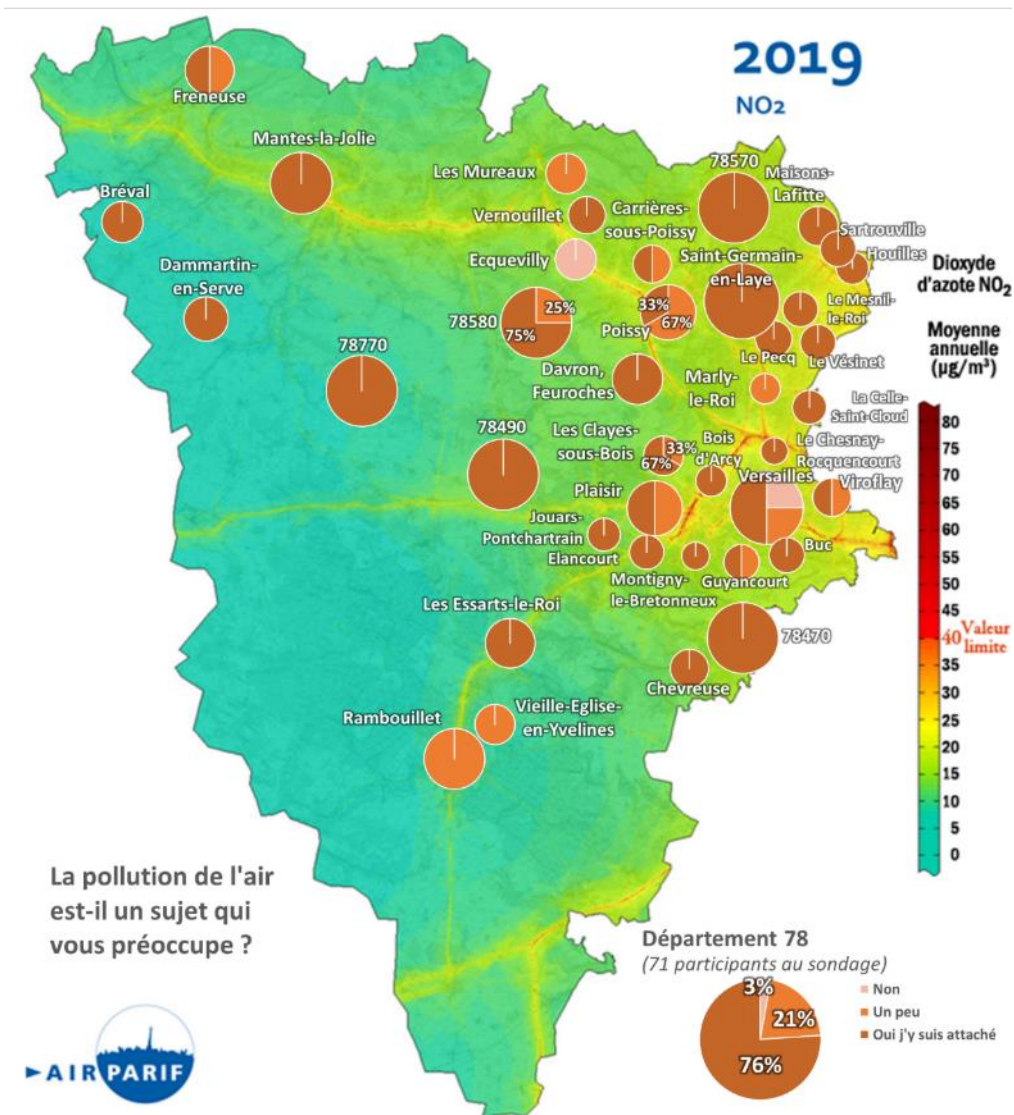
Préoccupation des franciliens à la Qualité de l'Air dans le département de Paris (75) et cartographies des niveaux de dioxyde d'azote (NO₂) en moyenne annuelle



Préoccupation des franciliens à la Qualité de l'Air dans le département des Hauts-de-Seine (92) et cartographies des niveaux de dioxyde d'azote (NO₂) en moyenne annuelle



Préoccupation des franciliens à la Qualité de l'Air dans le département de Seine-et-Marne (77) et cartographies des niveaux de dioxyde d'azote (NO₂) en moyenne annuelle



Préoccupation des franciliens à la Qualité de l'Air à dans le département des Yvelines (78) et cartographies des niveaux de dioxyde d'azote (NO₂) en moyenne annuelle

REFERENCES

Airparif (2009), Exposition des automobilistes franciliens à la pollution atmosphérique liée au trafic routier, Rapport d'étude, Octobre 2009

Baillargeon (2005), Le krigeage : revue de la théorie et application spatiale de données de précipitations, *Mémoire Faculté des études supérieures de l'Université Laval*, Avril 2005

Blond (2002), Blond, *Assimilation de données photochimiques et prévision de la pollution troposphérique*, Thèse de doctorat de l'école Polytechnique, 2002.

Chen et al. (2016), Chen T., Guestrin C., XGBoost : A Scalable Tree Boosting System, In Proceedings of the 22nd ACM Sigkdd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, San Francisco, CA, USA, 13–17 August 2016

Knopp (2006), Sebastian Knopp, *Efficient Computation of Many-to-Many Shortest Paths*, Thèse de l'Institut d'informatique théorique Algorithmique I, 2006

LCSQA (2019), Gressent A., Malherbe L., Utilisation des données de micro-capteurs pour la modélisation et la cartographie de la qualité de l'air, Novembre 2019.

J.KK. Hammond et al (2020), Meta-modeling of a simulation chain for urban air quality, *Advanced modelling and Simulation in Engineering Sciences* <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02429687/document>

Mairal et al, Mairal J., Bach F., Ponce J., Sapiro G., Online Dictionary Learning for Sparse Coding

Nguyen (2017), Assimilation de données et couplage d'échelles pour la simulation de la dispersion atmosphérique en milieu urbain, Thèse de doctorat de l'Université de Lyon, Mai 2017

Schneider et al. (2017), P., Castell N., Vogt M., Dauge F. R., Lahoz W.A. Bartonova A., Mapping urban air quality in near real-time using observations from low-cost sensors and model information, *Environment International*, Vol 106, September 2017, Pages 234-247

Tilloy et al (2013), Tilloy A., Mallet V., Poulet D., Pesin C., Brocheton F., *BLUE-based NO₂ data assimilation at urban scale*, *Jornal of Geophysical Research*, 2013



SOLUTIONS
POUR
NOTRE
AIR