

# Rendre cohérentes les mesures innovantes par micro-capteurs avec l'observatoire régionale de la qualité de l'air

---

## Projet IMObs : Intégration des données Micro-capteurs dans l'OBServatoire

**Auteur : Steve Micallef**

Diffusion : Décembre 2021

---

Siège social :  
3 allée des Sorbiers 69500 BRON  
Tel. 09 72 26 48 90  
[contact@atmo-aura.fr](mailto:contact@atmo-aura.fr)



# Conditions de diffusion

Dans le cadre de la réforme des régions introduite par la Nouvelle Organisation Territoriale de la République (loi NOTRe du 16 juillet 2015), les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air de l'Auvergne (ATMO Auvergne) et de Rhône-Alpes (Air Rhône-Alpes) ont fusionné le 1er juillet 2016 pour former Atmo Auvergne-Rhône-Alpes.

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes est une association de type « loi 1901 » agréée par le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (décret 98-361 du 6 mai 1998) au même titre que l'ensemble des structures chargées de la surveillance de la qualité de l'air, formant le réseau national ATMO.

Ses missions s'exercent dans le cadre de la loi sur l'air du 30 décembre 1996. La structure agit dans l'esprit de la charte de l'environnement de 2004 adossée à la constitution de l'État français et de l'article L.220-1 du Code de l'environnement. Elle gère un observatoire environnemental relatif à l'air et à la pollution atmosphérique au sens de l'article L.220-2 du Code de l'Environnement.

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes communique publiquement sur les informations issues de ses différents travaux et garantit la transparence de l'information sur le résultat de ses travaux.

A ce titre, les rapports d'études sont librement disponibles sur les sites [www.atmo-auvergnerhonealpes.fr](http://www.atmo-auvergnerhonealpes.fr)

Les données contenues dans ce document restent la propriété intellectuelle d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes.

Toute utilisation partielle ou totale de ce document (extrait de texte, graphiques, tableaux, ...) doit faire référence à l'observatoire dans les termes suivants : © Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, IMObs - Intégration des données Micro-capteurs dans l'OBServatoire

Les données ne sont pas rediffusées en cas de modification ultérieure.

Par ailleurs, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes n'est en aucune façon responsable des interprétations et travaux intellectuels, publications diverses résultant de ses travaux et pour lesquels aucun accord préalable n'aurait été donné.

En cas de remarques sur les informations ou leurs conditions d'utilisation, prenez contact avec Atmo Auvergne-Rhône-Alpes

- depuis le [formulaire de contact](#)
- par mail : [contact@atmo-aura.fr](mailto:contact@atmo-aura.fr)
- par téléphone : 09 72 26 48 90

# Financement

Cette étude d'amélioration de connaissances a été rendue possible grâce à l'aide financière particulière des membres suivants :

La Région Auvergne-Rhône-Alpes  
Grenoble-Alpes-Métropole  
Le Grand-Lyon  
L'Agglomération du Grand Anancy



Toutefois, elle n'aurait pas pu être exploitée sans les données générales de l'observatoire, financé par l'ensemble des membres d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes

# Résumé

L'observation environnementale de la qualité de l'air connaît aujourd'hui une période d'innovation inédite grâce à l'arrivée des objets connectés, et en particulier à des micro-stations de mesures de polluants.

Les acteurs publics et privés du territoire, et les citoyens, se mobilisent pour innover, améliorer et préserver la qualité de l'air de la région grâce à ces micro-capteurs permettant une mesure indicative des niveaux de pollution atmosphérique. Plusieurs projets naissent sur le territoire régional pour mettre en place de nouveaux observatoires de qualité de l'air basés sur ces mesures innovantes.

Un véritable enjeu est d'accompagner ces nouveaux projets innovants pour assurer une cohérence régionale, d'une part, entre ces nouvelles technologies entre elles, et, d'autre part, avec la surveillance réglementaire et qualitative de la qualité de l'air. La diffusion d'une information cohérente et expertisée est en effet indispensable pour instaurer la confiance des citoyens et les inciter à un changement de comportement bénéfique pour le bien commun.

Elaborer un protocole simple et homogène pour le traitement des mesures par micro-capteurs des différents projets du territoire est la condition indispensable pour assurer une cohérence entre le déploiement de ces nouvelles technologies et la surveillance réglementaire et qualitative de la qualité de l'air.

Ainsi, dans le cadre de cette étude, des données de micro-capteurs de particules fines basées sur le système open-source du projet [Sensor.Community](#), adapté avec une cellule de détection Plantower PMS7003, ont été utilisées pour **élaborer un protocole en 4 étapes**, en l'état actuel des connaissances, **permettant de rendre homogènes et exploitables les mesures par micro-capteurs de particules sur le territoire régional**. Certaines étapes sont également adaptées pour d'autres types de polluants (étapes 1 et 2). Les étapes du protocole s'articulent autour de 4 thématiques :

- Etape 1 - La **vérification des micro-capteurs avant utilisation** et déploiement sur site : ce protocole détaille les préconisations de la période indispensable d'intercomparaison en amont d'un déploiement. Cette phase consiste à comparer l'ensemble des micro-capteurs sur une station fixe afin d'identifier les micro-capteurs présentant un problème métrologique.
- Etape 2 - L'**installation des micro-capteurs** : ce protocole liste les préconisations d'installation sur site (par exemple le choix du site ou la hauteur optimale d'installation).
- Etape 3 - La **validation environnementale des mesures** effectuées par micro-capteur : comme pour les données issues d'analyseurs fixes réglementaires, la validation est un point central et complexe de l'utilisation des mesures effectuées par micro-capteurs. L'invalidation proposée dans cette étude, pour les particules fines, dépend très fortement du taux d'humidité. Une invalidation automatique par réseau de neurones a été testée sur le territoire de Grenoble, avec des résultats encourageants.
- Etape 4 - L'**ajustement des mesures** micro-capteur de particules fines, pour qu'elles soient comparables aux stations de référence : plusieurs facteurs explicatifs pouvant jouer sur la composition chimique des particules ont été étudiés (température, bassin d'air, saisonnalité, typologie) pour pouvoir ajuster au mieux les micro-capteurs au regard des analyseurs des stations de référence. Deux méthodes ont en particulier été testées pour prendre en compte la saisonnalité :

- Un ajustement bi-saisonnier : 2 paramétrisations différentes appliquées en fonction de la saison : une paramétrisation en été, une autre paramétrisation en hiver. Facile à mettre en place, les résultats améliorent les données brutes.
- Un ajustement glissant : la paramétrisation se réajuste en temps réel sur l'historique des 30 derniers jours. Plus complexe à appréhender, il permet néanmoins des résultats plus performants que l'ajustement bi-saisonnier.

Ces protocoles ont pu être testés de manière concrète dans le cadre d'un déploiement de 30 micro-capteurs de particules fines (utilisant des Plantower PMS 7003) sur les communes de la Métropole de Grenoble. Les sites ont été choisis avec l'aide des équipes municipales des communes volontaires pour leur représentativité du fond urbain au niveau des communes, en respectant le protocole d'installation. Le protocole de validation permet d'identifier 38% de données invalides sur la période considérée (de mi-octobre à fin novembre 2021). Le protocole d'ajustement, testé sur la même période, permet de réduire le biais des micro-capteurs en particulier pour les concentrations supérieures à  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Un premier test de cartographie sur le territoire grenoblois intégrant ces données validées et corrigées a également pu être élaboré, ouvrant différentes perspectives encourageantes :

- Etude sur l'apport potentiel des micro-capteurs dans les cartographies : l'objectif serait d'établir des premiers éléments méthodologiques pour quantifier concrètement l'apport des micro-capteurs dans les cartographies fines échelles d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes.
- Confrontation des résultats des protocoles de validation, et d'ajustement au code national SESAM, développé en 2021 par l'INERIS et confirmation de la pertinence de son application sur notre territoire régional.



# Sommaire

<b>1. Introduction et contexte</b> .....	<b>7</b>
1.1. Mesurer de manière innovante .....	7
1.2. S'adapter au contexte économique et sociétal .....	7
1.3. Garantir la rigueur scientifique et technique : le rôle d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes...	8
<b>2. Méthodologie</b> .....	<b>9</b>
2.1. La technologie micro-capteur .....	Erreur ! Signet non défini.
La mesure des particules fines .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
2.2. Quel micro-capteur pour quel usage ? .....	9
2.3. Nécessité d'élaborer des protocoles adaptés .....	10
2.4. Données utilisées .....	11
<b>3. Axe de recherche et principaux résultats</b> .....	<b>14</b>
3.1. Protocoles d'étude pour l'intercomparaison et l'installation des micro-capteurs (Processus de déploiement) .....	14
3.2. Elaboration d'un protocole pour la validation des données micro-capteurs .....	19
3.2.1 Invalidation manuelle .....	20
3.2.2 Invalidation en fonction de taux d'humidité .....	20
3.2.3 Invalidation automatique basée sur un réseau de neurone .....	21
3.3. Elaboration d'un protocole pour l'ajustement des données micro-capteurs .....	23
3.4. Première réflexion d'intégration des données micro-capteurs dans les cartographies locales de particules .....	27
<b>4. Application sur un jeu de données grenoblois</b> .....	<b>31</b>
4.1. Contexte et objectif de l'observatoire citoyen sur Grenoble .....	31
4.2. Protocole d'intercomparaison appliqué aux micro-capteurs de l'observatoire grenoblois .....	31
4.3. Protocole d'installation appliqué aux micro-capteurs de l'observatoire grenoblois .....	33
4.4. validation automatique et manuelles .....	34
4.5. Taux de fonctionnement des microcapteurs et critère sur l'humidité relative .....	35
4.6. Application du protocole : Validation et Ajustement par coefficient de correction simple .....	39
4.7. Premier test de correction géo-statistiques de la modélisation à partir des mesures .....	42
<b>5. Conclusions et perspectives</b> .....	<b>47</b>

# 1. Introduction et contexte

## 1.1. Mesurer de manière innovante

L'observation environnementale de la qualité de l'air connaît aujourd'hui une période d'innovation inédite grâce à l'arrivée des objets connectés, et en particulier à des micro-stations de mesures de polluants.

Ces micro-stations de mesure, communément appelées micro-capteurs, sont moins coûteuses et moins encombrantes que les stations fixes traditionnelles. Elles permettent ainsi d'envisager le déploiement dense de points de mesures distribués sur nos territoires, et d'imaginer de nouveaux usages de la mesure. L'intégration de réseaux de micro-capteurs dans l'observatoire constituerait ainsi une piste d'évolution à moyen terme permettant, si la donnée est qualifiée, d'en augmenter la résolution spatiale et temporelle, ainsi que la capacité à prendre en compte des événements localisés ou atypiques.

La multiplication de ces mesures permettrait ainsi de renforcer l'observatoire actuel, mais également de communiquer plus localement. Un capteur fiable et testé par l'observatoire, connecté à une plateforme web, permettrait en effet aux utilisateurs de mesurer, de visualiser en temps réel les données, d'être acteurs de la surveillance, et d'auto-évaluer leur exposition individuelle à la pollution.

## 1.2. S'adapter au contexte économique et sociétal

Les acteurs publics et privés du territoire se mobilisent pour innover, améliorer et préserver la qualité de l'air de la région grâce à ces micro-capteurs permettant une mesure indicative des niveaux de pollution atmosphérique. Plusieurs projets naissent sur le territoire régional pour mettre en place de nouveaux observatoires de qualité de l'air basés sur ces mesures innovantes, notamment :

- Le projet partenarial (ENEDIS, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, PlanetWatch) intitulé Sillon'air 74 (2018-2020) a expérimenté la mesure géolocalisée en temps réel en mobilité de particules fines. 70 véhicules d'ENEDIS équipés d'un micro-capteur laser développé par la start-up Pollutrack ont sillonné la Haute-Savoie et ont pu récolter 4,5 millions de données de mesure en mobilité.
- Le projet partenarial GEOPTIS : La filiale de La Poste GEOPTIS propose une solution de mesure de la qualité de l'air en mobilité avec son partenaire Atmotrack (fournisseur de micro-capteurs). Après des premiers travaux encourageant sur des mesures réalisées sur une flotte de 20 véhicules à Villeurbanne en partenariat avec Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, le dispositif a été étendu à trois communes de la métropole de Lyon en 2020 : 50 véhicules et une dizaine de bâtiments La Poste sont aujourd'hui équipés de capteurs mesurant les particules fines et également la mesure du dioxyde d'azote (pour 40 capteurs).
- L'Observatoire lycéen en vallée de l'Arve : Depuis novembre 2019, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes collabore avec les lycées de Passy et de Cluses pour construire un observatoire citoyen de la qualité de l'air. Depuis le premier trimestre 2021, ce réseau de mesure innovant compte 45 micro-capteurs de particules fines répartis sur l'ensemble de la vallée de l'Arve, installés chez les lycéens eux-mêmes, chez des particuliers volontaires ou encore sur des lieux phares du territoire. Les données de ces micro-capteurs sont accessibles à tous et visualisables en direct sur la plateforme Captothèque.fr. Elles alimentent également des temps d'échange réguliers et enrichissants entre Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, les lycéens et les citoyens participants. Au-delà de l'aspect pédagogique certain de ce projet, la création et le développement de cet

observatoire innovant a permis d'expérimenter le déploiement « massif » de micro-capteurs avec l'implication et la participation des jeunes et des citoyens.

- La Captothèque : Financée avec un soutien important de la région, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes développe une Captothèque régionale afin de permettre à tous les citoyens de la Région de réaliser une auto-évaluation de leur exposition personnelle à la pollution de l'air et de participer à une mesure collaborative. Ainsi, un service de prêt de micro-capteurs mobiles de particules fines (type bibliothèque de capteurs) a été lancé en septembre 2020 sur 3 métropoles de la Région (Grenoble, Lyon et Clermont Ferrand) et s'est étendu en Janvier 2022 sur le Pays voironnais et dans la vallée de l'Arve. La volonté est d'étendre progressivement ce service à d'autres territoires de la Région. Ce dispositif permet également, le déploiement d'observatoires citoyens et la réalisation d'études spécifiques autour de la mesure et des problématiques de qualité de l'air.
- En partenariat avec Grenoble-Alpes-Métropole, un réseau de 30 micro-capteurs fixes été déployés au cours de l'été 2021 sur les communes du territoire métropolitain. À la suite d'un appel à candidature lancé par Grenoble-Alpes Métropole et Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, 30 communes se sont portées volontaires pour installer un micro-capteur de mesure de particules fines sur leur territoire pendant un an. Les équipes communales ont été directement impliquées dans le choix des sites et dans l'installation des capteurs sur des lieux emblématiques de leurs communes : mairies, écoles, parcs ou autres infrastructures communales.

Un véritable enjeu est d'accompagner ces nouveaux observatoires expérimentaux et ces projets innovants pour assurer une cohérence régionale, d'une part, entre ces nouvelles technologies entre elles, et, d'autre part, avec la surveillance réglementaire et qualitative de la qualité de l'air. La diffusion d'une information cohérente et expertisée est en effet indispensable pour instaurer la confiance des citoyens et les inciter à un changement de comportement bénéfique pour le bien commun.

### **1.3. Garantir la rigueur scientifique et technique : le rôle d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes**

L'intégration de réseaux de micro-capteurs mobiles à l'observatoire, implique en amont une normalisation et une validation des mesures avant de pouvoir être partagées et comparées.

La cohérence de l'information délivrée est un enjeu majeur du changement de comportement des citoyens pour améliorer la qualité de l'air.

Elaborer un protocole simple et homogène pour le traitement des mesures par micro-capteurs des différents projets du territoire est la condition indispensable pour assurer une cohérence entre le déploiement de ces nouvelles technologies et la surveillance réglementaire et qualitative de la qualité de l'air.

En l'état actuel des connaissances, l'objectif de ce rapport vise à :

- Définir des protocoles de validation et d'ajustement des données de micro-capteurs issues de différentes campagnes de mesures réalisées sur plusieurs territoires de la Région afin que ces données viennent enrichir de manière cohérente l'observatoire d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes.
- Développer des nouvelles méthodes d'intégration de ces données dans les cartographies locales ou régionales de qualité de l'air.
- Rédiger des fiches méthodologiques synthétiques permettant d'accompagner les territoires sur l'utilisation des micro-capteurs.
- Tester les protocoles sur un jeu de données test disponible sur le territoire de Grenoble-Alpes-Métropole

## 2. Méthodologie

### 2.1. Quel micro-capteur pour quel usage ?

Il existe sur le marché plusieurs type de micro-capteurs de différentes marques, mais tous les micro-capteurs ne se valent pas. Le choix du micro-capteur est un enjeu primordial lors du montage d'une étude et, en l'état des connaissances actuelles, il doit être discuté en amont avec l'ensemble des partenaires du projet.

A cet effet, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes explore depuis 2015 le potentiel de ces nouvelles technologies de micro-capteur : différents fournisseurs de capteur et différents polluants ont été évalués en complément du challenge Airlab d'Airparif. Les premières analyses sur les appareils mesurant les gaz et le NO<sub>2</sub> montrent des résultats très, voire trop, variables et instables en fonction du capteur. Les tests réalisés sur des micro-capteurs de particules fines sont eux plus prometteurs même s'il reste du travail de validation et de recalage à étudier. Le travail décrit dans ce rapport c'est ainsi appuyé sur l'analyse des données de micro-capteurs de particules fines et présente des protocoles liés à ce polluant. Cependant, un certain nombre d'étape de ce protocole reste applicable pour différents polluants, notamment concernant les intercomparaisons et l'installation.

En parallèle du travail effectué dans le cadre de ce rapport, une démarche plus générale au sein du Groupe d'un travail interne à Atmo Auvergne-Rhône-Alpes est actuellement en cours pour alimenter, organiser et cadrer les réflexions et avancées sur le choix du microcapteur en fonction des usages.

#### **Focus sur la mesure des particules fines**

Les méthodes de mesure des particules en suspension sont multiples et variées en raison de leur nature extrêmement complexe et diversifiée. Ainsi la mesure des particules fines dans le cadre de la mission de surveillance de la qualité de l'air est principalement basée sur 3 approches complémentaires qui permettent la description la plus complète de la pollution particulaire :

- La détermination de la concentration massique (homologuée au niveau de la législation européenne),
- La détermination du nombre de particules, éventuellement par classe de taille (permettant la quantification de particules très fines n'ayant pas un poids important mais ayant un impact sanitaire majeur),
- L'analyse de leur composition chimique (qui permet d'affiner l'évaluation de leur impact sur la santé).

L'analyseur homologué utilisé historiquement pour la surveillance réglementaire correspond à une mesure massique automatisée : la méthode par microbalance à oscillation. Les particules fines se déposent sur un support qui oscille en continu, faisant ainsi varier la fréquence d'oscillation. Ces variations de fréquences sont ensuite converties en variations de masse de poussière déposée puis en concentration (µg/m<sup>3</sup>) grâce à une mesure parallèle du débit volumique.

Les micro-capteurs actuels de mesure des particules fines, utilisent, eux, une technique de mesure optique basée sur la méthode de comptage du nombre de particules. Un ventilateur permet de faire entrer l'air extérieur et de l'entraîner à travers une chambre de détection. Cet air, contenant des particules fines, passe devant le faisceau d'un laser qui va être intercepté et dévié par les particules. Un photodétecteur (diode) mesure la différence entre la lumière envoyée et la lumière dispersée par les particules (baisse de l'intensité lumineuse). Le signal électrique de la photodiode est alors transmis à un microcontrôleur qui traite la donnée en temps réel : connaissant le débit du ventilateur

et le diamètre de la section, on peut déterminer un nombre de particules selon les gammes de taille, qui pourra ensuite être converti en masse par unité de volume ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (ou concentration) à l'aide d'un algorithme de conversion nombre/masse. La variabilité de composition chimique des particules induit une dispersion de la lumière dépendantes des propriétés optiques des différentes particules et ainsi une variabilité du facteur de correction du nombre à la masse du micro-capteur. C'est cette variabilité qui génère une incertitude de mesure sur la concentration en masse résultante et qu'il est important d'étudier pour améliorer les algorithmes de conversion.

### Exemple de la mesure par participation citoyenne

Avec la prise de conscience croissante par les citoyens des problématiques environnementales et la montée de la défiance à l'égard des représentants dits « institutionnels », certains citoyens cherchent à devenir acteur de la surveillance de la qualité de l'air. Les ASQAA sont donc amenées à évoluer pour intégrer cette nouvelle approche ainsi que pour favoriser le dialogue et la participation citoyenne. Depuis plusieurs années, différents projets ont été réalisés par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes et ont contribué à cette évolution, notamment les projets Mobicit'Air (projet "ville respirable en 5 ans", 2016), BB-Clean (projet européen Interreg Alpine Spacen, 2018-2021), Checkbox (projet ADEME Primequal, 2019-2021).

Ceux-ci ont permis de tester différentes approches et méthodologies sociotechniques :

- L'étude de différents cas d'usages de l'utilisation de micro-capteurs de qualité de l'air par les citoyens
- L'expérimentation de différentes méthodes d'accompagnement des citoyens à la mesure de la qualité de l'air
- L'évaluation sociologique de l'impact des mesures sur leurs perceptions, leurs représentations et les changements de pratiques

Si l'ensemble de ces projets confirme la pertinence de l'utilisation de micro-capteurs pour la sensibilisation des citoyens à la qualité de l'air, les bénéfices de l'usage de micro-capteurs citoyens pour la surveillance de la qualité de l'air restent encore mitigés et sujets à de nombreuses contraintes. Une meilleure caractérisation de la réponse métrologique de ces nouveaux appareils ainsi que le développement de nouvelles méthodes de validation et d'ajustement de leurs données semblent en effet des éléments nécessaires pour pouvoir étudier réellement leur intégration aux outils de surveillance.

## 2.2. Nécessité d'élaborer des protocoles adaptés

Par leur technique de mesure et leur fonctionnement, les micro-capteurs ne produisent pas la même qualité d'information et ne sont pas aussi fiables et précis que les analyseurs réglementaires homologués. Ainsi, des différences parfois significatives existent lorsque ces deux types d'appareils sont mis en comparaison.

Afin que toutes les mesures par micro-capteurs soient comparables entre elles, différents verrous scientifiques doivent être levés.

Une cartographie de ces principaux verrous techniques a été élaborée, afin d'identifier les axes de travail nécessaire pour rendre homogènes et exploitables les mesures par micro-capteurs sur le territoire régional.

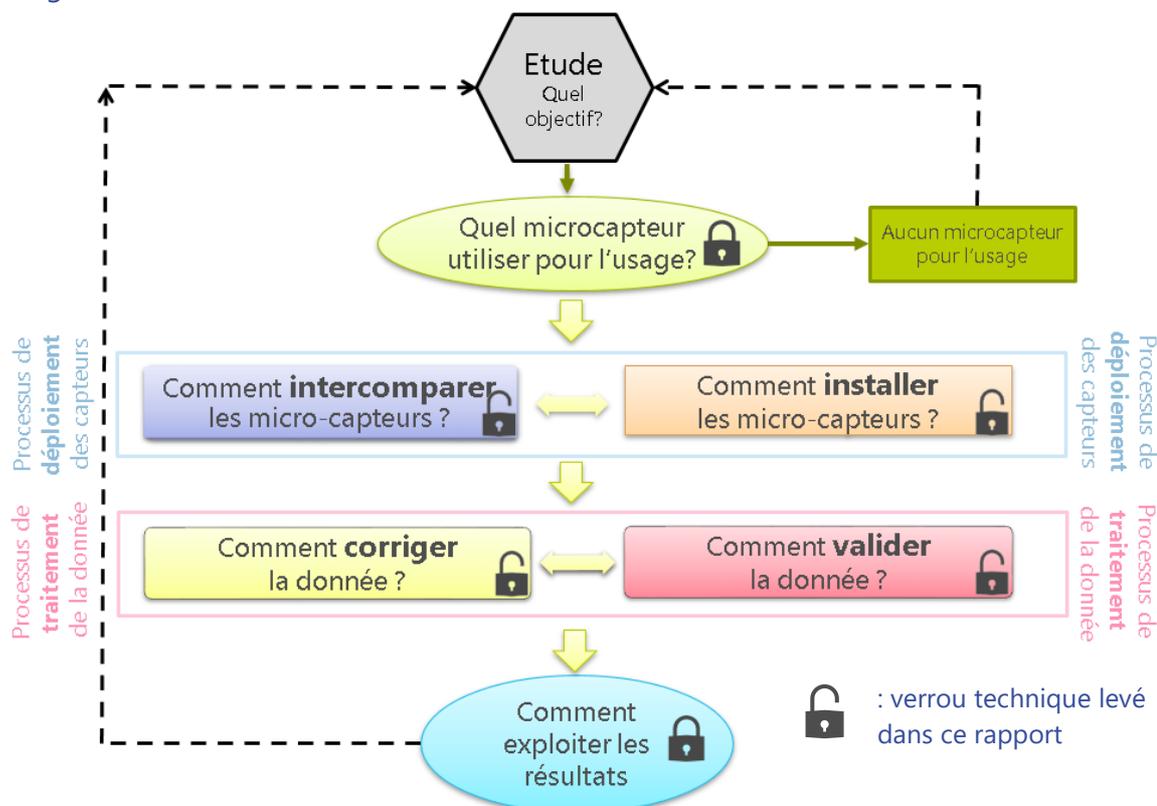


Figure 1 : Cartographie des protocoles et des verrous scientifiques à lever pour optimiser l'utilisation des micro-capteurs de qualité de l'air

Ainsi, il est nécessaire d'établir des protocoles pour homogénéiser les traitements et lever ces verrous scientifiques. Cela concerne en particulier :

- La vérification des micro-capteurs avant utilisation et déploiement sur site
- L'installation des micro-capteurs
- La validation des mesures effectuées par micro-capteurs
- L'ajustement des mesures micro-capteur pour qu'ils soient comparables aux stations de référence

Il ressort également la nécessité de développer de nouvelles méthodes d'utilisation et d'intégration de ces données dans les cartographies locales ou régionales de qualité de l'air.

## 2.3. Données utilisées

### A l'échelle régionale

Depuis plus de 5 ans, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes utilise des micro-capteurs dans le cadre de mesures indicatives facilement déployables. Plus de 160 micro-capteurs de différentes marques ont été déployés dans différents contextes et environnements. Ils permettent d'avoir un premier retour d'expérience sur leur utilisation.

En parallèle, une dizaine de stations fixes d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes ont été équipées de micro-capteurs pendant 1 an au cours de l'année 2020. Ces données présentent l'avantage d'être effectuées conjointement avec des appareils de référence, et d'être représentatives de l'ensemble du territoire

régional. Il est important en effet de disposer d'un panel représentatif de différents bassins d'air<sup>1</sup> de la région, et non d'une zone restreinte. Différentes typologies sont également représentées.

Les micro-capteurs étudiés dans ce cadre sont principalement des FIXIS équipés du sensor Plantower PMS7003. Ces micro-capteurs mesurant les particules présentent l'avantage d'être construits facilement en interne, à un coût raisonnable. Les premiers retours d'expérience montrent des résultats satisfaisants concernant leur reproductibilité et leur stabilité.

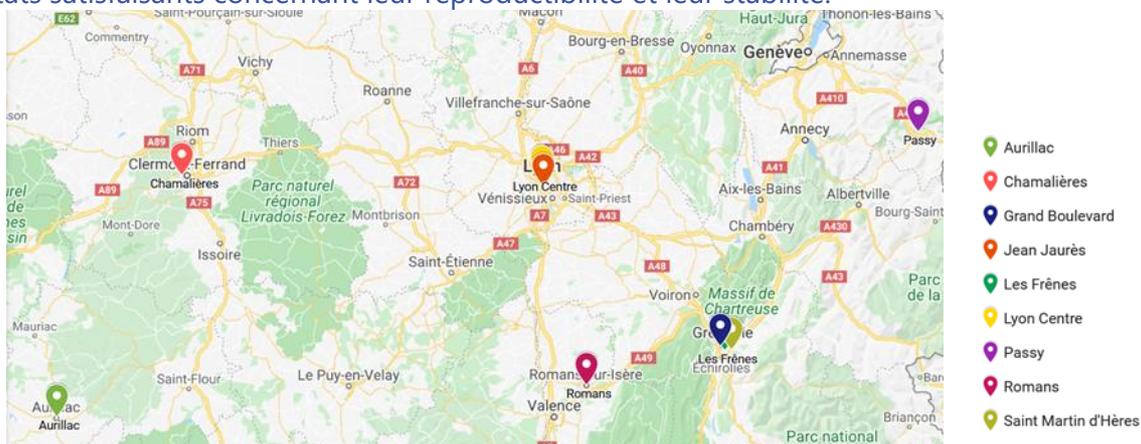


Figure 2 : Stations de référence équipées de micro-capteur en 2020

Nom du site	Bassin d'air	Typologie	Code postal	Nombre de FIXI
Aurillac	Auvergnat	Site urbain	15014	1
Chamalières	Auvergnat	Site trafic	63075	1
Grand Boulevard	Grenoblois	Site trafic	38000	3
Jean Jaurès	Lyonnais	Site trafic	69000	3
Les Frênes	Grenoblois	Site urbain	38165	3
Lyon Centre	Lyonnais	Site urbain	69123	3
Passy	Haute-Savoie	Site périurbain	74208	3
Romans	Drôme	Site urbain	26281	1
Saint Martin d'Hères	Grenoblois	Site urbain	38421	1

Figure 3 : Caractéristiques des stations réglementaires d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes équipées de micro-capteurs au cours de l'année 2020

### Sur le quartier de Part Dieu à Lyon

Dans le cadre du projet GEOPTIS, 50 véhicules de la flotte de La Poste sont équipés de micro-capteurs AtmoTrack. Pour compléter cet observatoire mobile innovant, une dizaine de micro-capteur de type FIXI (équipé du sensor Plantower PMS7003) ont été déployés chez des citoyens du quartier de la Part

<sup>1</sup> Bassin d'air : Zone atmosphérique, d'origine naturelle ou administrative, surplombant un territoire géographique donné. La notion de bassin d'air est introduit dans l'arrêté cadre régional d'épisode de pollution d'atmosphérique.

Dieu grâce à un appel à volontaire en partenariat avec le TUBA<sup>2</sup>. Ces micro-capteurs ont été installés chez les citoyens volontaires d'avril 2021 à novembre 2021. Ces données serviront en particulier dans le cadre des premières réflexions concernant l'intégration des micro-capteurs dans une cartographie fine échelle à l'échelle d'un quartier.

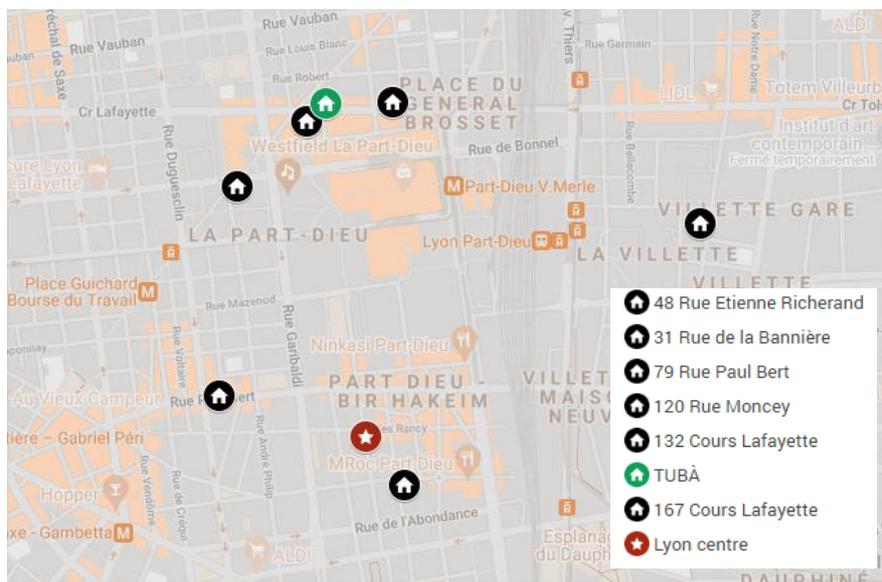


Figure 4 : Cartographie des sites « participation citoyenne » équipés de micro-capteurs FIXI sur le quartier de la Part-Dieu au cours de l'année 2021

<sup>2</sup> TUBA : tube à expérimentation urbaine. [tuba-lyon.com](http://tuba-lyon.com)

# 3. Axe de recherche et principaux résultats

## 3.1. Sélectionner le bon micro-capteur en fonction de l'usage

L'utilisation ou non de micro-capteurs comme moyen métrologique d'une étude est une réflexion primordiale à mener au moment de l'élaboration et du montage de projet en fonction de l'objectif à atteindre

Si il est jugé que cette métrologie peut répondre à la problématique, la sélection du type et de la marque du micro-capteur peut se faire en s'appuyant sur les résultats du challenge Airlab d'Airparif. En complément des résultats de ce challenge, il est important de prendre en compte les spécificités territoriales, tests locaux et connaissances régionales car dans le cadre du challenge Airlab les micro-capteurs ont été évalués dans un contexte de fond urbain parisien et avec des niveaux de concentrations relativement élevées. Ainsi pour une sélection adaptée de micro-capteurs permettant de répondre aux objectifs fixés, il est important d'échanger avec un référent d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes en charge de la veille et de l'évaluation des micro-capteurs ou du correspondant territorial dans un premier temps.

Une réflexion plus poussée dans le cadre du Groupe de Travail Interne d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes sur les microcapteurs est actuellement en cours pour définir plus précisément le type de micro-capteur à utiliser pour chaque usage

## 3.2. Protocoles d'étude pour l'intercomparaison et l'installation des micro-capteurs (Processus de déploiement)

Du fait de sa métrologie, et son système de fonctionnement, le micro-capteur est particulièrement sensible à son environnement.

Tous les micro-capteurs doivent être testés et vérifiés en amont de leur utilisation sur site, durant une période appelée intercomparaison. Durant cette intercomparaison, les micro-capteurs sont comparés avec un analyseur de référence homologué du réseau réglementaire. Cette période d'intercomparaison est mise en place pour une durée de 7 à 20 jours.

Pour les particules fines en particulier, la réponse des appareils de mesure est très dépendante de leur composition chimique et donc de la source de pollution et de l'environnement étudié. L'intercomparaison doit donc avoir lieu dans la même aire géographique (ou bassin d'air) que celle où seront déployés les micro-capteurs et dans la mesure du possible avec la même typologie.

Si les tests ne sont pas possibles sur l'ensemble des micro-capteurs en parallèle, il conviendra de faire un sondage aléatoire par lot, et de tester une sélection des micro-capteurs au sein de chaque lot.

Parmi l'ensemble des micro-capteurs déployés dans le cadre d'un projet d'une campagne de mesure, il est également recommandé de maintenir un ou plusieurs échantillons du lot total, appelé

« échantillon de référence », sur le ou les site(s) de référence et de même(s) typologie(s) que les micro-capteurs déployés. La comparaison des micro-capteurs échantillon, avec la mesure de référence tout au long des mesures permet :

- D'une part, d'avoir une référence sur laquelle se baser pour la validation et les recalages
- D'autre part, d'identifier une potentielle dérive des mesures (particulièrement pour les cellules électro-chimiques sujettes à une dérive temporelle ou un encrassement des cellules optiques)
- Enfin, de pouvoir identifier des différences de réponses métrologiques entre la mesure de référence et les micro-capteurs lors de phénomènes particuliers (ex : les micro-capteurs de particules fines n'ont pas la même réponse que l'analyseur de référence FIDAS lors des épisodes sahariens)

La taille de l'échantillon de référence est fixée à 3 appareils afin d'assurer une bonne représentativité de l'échantillon total.

Les conclusions et protocoles décrits dans cette partie (*comment intercomparer les micro-capteurs ?* et *Comment installer les micro-capteurs ?*) sont basés sur le retour d'expérience et l'exploitation de 160 micro-capteurs installés sur la région Auvergne-Rhône-Alpes de différentes marques : Agriscope, Atmotrack, Ethera, Fixi. Ces parties peuvent donc être applicables à différentes marques et différents polluants.

En ce qui concerne les protocoles sur l'analyse de données (*Comment valider la donnée micro-capteurs ?* et *Comment corriger la donnée micro-capteur ?*), le protocole proposé a été établi à partir des mesures de micro-capteurs FIXI de particules fines. Une démarche similaire peut être envisagée pour d'autres micro-capteurs optiques de mesure de particules fines, mais ne sera pas applicable en l'état pour d'autres polluants ou d'autres technologie.

### **Evaluation des micro-capteurs lors de l'intercomparaison : comment vérifier les micro-capteurs ?**

Cette phase consiste à identifier **les micro-capteurs** qui présentent une anomalie de mesure (mauvaise paramétrisation, problème constructeur) avant leur déploiement sur site.

Pour cela, deux paramètres sont testés :

- La répétabilité des micro-capteurs entre eux
- La comparaison à une mesure réglementaire effectuée avec un appareil de référence homologué sur une station fixe du réseau d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes.

La **répétabilité des micro-capteurs entre eux** est testée grâce à un test de GRUBBS. Ce test statistique permet de vérifier la variabilité de l'ensemble des micro-capteurs en identifiant l'existence d'un appareil aberrant ou significativement différent du reste du groupe. Ce test est appliqué sur les facteurs suivants PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, température, et humidité relative mesurés par les micro-capteurs.

Sur notre ensemble de 160 micro-capteurs, ce test a identifié environ 1% <sup>3</sup> des micro-capteurs comme significativement différents.

La statistique du Test de GRUBBS est la suivante :

---

<sup>3</sup> Ce chiffre est donné à titre indicatif sur les données actuelles, il pourrait évoluer avec l'ancienneté du matériel lors de futures intercomparaisons.

$$G = \frac{\max_{i=1, \dots, N} |Y_i - \bar{Y}|}{s}$$

avec  $\bar{Y}$  et  $s$  désignant respectivement la moyenne de l'échantillon des micro-capteurs et l'écart-type. La statistique du test de Grubbs est le plus grand écart absolu par rapport à la moyenne de l'échantillon divisé par l'écart type de l'échantillon.

La **comparaison à l'analyseur de référence réglementaire** s'effectue à l'aide du coefficient de détermination linéaire de Pearson,  $R^2$  pour les concentrations de particules  $PM_{10}$  et  $PM_{2.5}$ . Cet indicateur mesure de la qualité de la prédiction par régression linéaire des concentrations de l'analyseur de référence à l'aide du micro-capteur.  $R^2$  est le rapport entre la variation expliquée par régression linéaire et la variation totale.

Un seuil (0.4) sur le  $R^2$  a été déterminé en dessous duquel les mesures de concentrations de  $PM_{10}$  et  $PM_{2.5}$  sont considérées trop significativement éloignées de la station de référence pour être ajustées et exploitées. L'ajustement des micro-capteurs (cf. chapitre 3.3. *Elaboration d'un protocole pour l'ajustement des données micro-capteurs*) étant linéaire, il est apparu pertinent de se baser sur un indicateur de validité linéaire.

A la fin de la période d'intercomparaison, ces 2 statistiques valident le déploiement et la mise en place sur site des micro-capteurs.



Figure 5 : Photo d'installation d'une intercomparaison de micro-capteurs sur une station fixe réglementaire du réseau d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes

### Préconisations préalables sur l'installation des micro-capteurs

Le projet Sillonair partenarial (Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, ENEDIS, Pollutrack) de février 2020 a permis d'identifier certaines préconisations de déploiement qu'il convient de rappeler ici.

Afin d'éviter toute perte de représentativité, il est nécessaire de travailler avec les données brutes et de n'agréger les données que de manière cohérente et pertinente avec l'échelle des phénomènes.

Afin d'assurer une certaine cohérence et validité, il convient de préconiser l'installation de 3 micro-capteurs sur une station fixe équipée d'analyseur réglementaire situé dans la zone d'étude. A défaut, il est nécessaire d'équiper un site fixe réglementaire situé dans le même bassin d'air et, dans la mesure du possible, de même typologie.

La fiabilité du micro-capteur dépend du polluant mesuré. Ainsi les mesures particulières ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_1$ ) sont plus fiables que les mesures de concentrations de gaz ( $NO_2$ ,  $O_3$ ). Il apparaît également que les concentrations mesurées sont bien plus fiables en  $PM_{2.5}$  qu'en  $PM_{10}$ . Il est donc préférable de mesurer les particules  $PM_{2.5}$  ou  $PM_1$  (qui présente une fiabilité plus forte et une corrélation avec les analyseurs de référence bien plus élevée) plutôt que les autres polluants ( $PM_{10}$ ,  $NO_2$ ,  $O_3$ ).

Dans le cas de déploiement de micro-capteurs installés sur une flotte mobile, il convient d'en installer environ 30% sur des sites fixes. Des points de rendez-vous pourront ainsi servir de point de validation de la mesure mobile qui est sujette à plus de variabilité.

## Protocole d'installation des micro-capteurs

Du fait de sa métrologie et de son système de fonctionnement, le micro-capteur est particulièrement sensible à l'influence de certains paramètres environnementaux, tels que l'ensoleillement, la hauteur par rapport au sol, l'encaissement et la ventilation au niveau du point d'accroche... Ces différents paramètres peuvent en effet impacter de manière significative les concentrations relevées par le micro-capteur et doivent ainsi être considérés lors de l'installation de l'appareil.

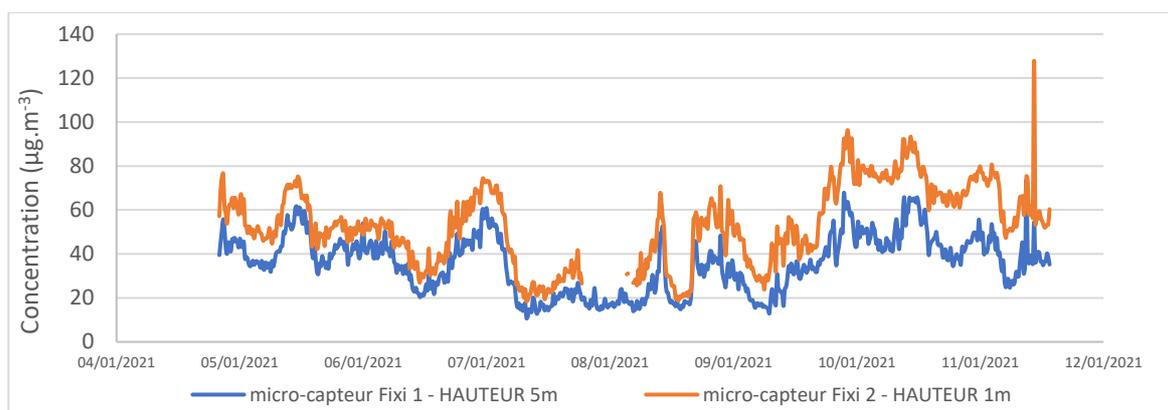


Figure 6 : Concentration en  $PM_{10}$  de 2 micro-capteurs FIXIS situés sur un même site à des hauteurs différentes

A l'instar des appareils de mesures réglementaires, une bonne connaissance de l'environnement de mesure d'un micro-capteur permettra de mieux comprendre certains événements particuliers, de les traiter et les analyser de manière adéquate ou de les enlever du jeu de données analysé si nécessaire, selon l'objectif et la finalité de l'étude.

Ainsi, il est premièrement recommandé d'intégrer une mesure d'humidité relative et de température en complément des mesures de polluants. Ces 2 paramètres permettront d'ajuster les micro-capteurs (cf. chapitre protocole d'ajustement).

Aussi, l'application d'un protocole d'installation à l'ensemble des micro-capteurs faisant partie d'un réseau de mesure permet d'assurer une bonne représentativité de chaque appareil vis-à-vis de l'objectif final de la campagne de mesures, ainsi qu'une bonne comparabilité entre les différents appareils.

Il est ainsi recommandé de :

- **Choisir correctement son site de mesure**

Afin d'assurer une bonne représentativité des mesures selon l'objectif de l'étude (caractérisation de la pollution de fond ou d'une source en particulier, suivi de chantier ou d'un industriel, etc...), le site d'implantation du micro-capteur doit être choisi avec stratégie. Par exemple, dans le cas d'un micro-capteur de particules fines visant à caractériser le fond urbain au niveau d'une commune, il faut s'assurer de l'absence de zones fumeuses ou de zones de chantier à proximité, qui pourraient, du fait de la forte sensibilité de l'appareil et de la fréquence de mesure élevée, affecter considérablement les mesures.

- **S'assurer de la remontée des données**

Selon le micro-capteur utilisé et ses caractéristiques techniques (mode d'alimentation électrique, mode de transmission de la donnée, fréquence de mesure...), il convient de vérifier en amont de l'installation définitive de l'appareil que celui-ci pourra fonctionner correctement tout au long de la période de mesure : pas de coupure d'électricité ou de réseau internet par exemple. Les différents critères techniques doivent ainsi être validés en amont auprès de la personne responsable sur place ou tester à travers une visite préalable à l'installation.

Dans le cas de micro-capteurs FIXIs, nécessitant une alimentation électrique et une connexion à un réseau wifi en continu, une installation sur des bâtiments publics peut s'avérer très fastidieuse, du fait des paramètres de sécurité informatique déployés sur ce type d'établissements, souvent inadaptés à la connexion d'appareils tels que les micro-capteurs. Des échanges poussés avec les équipes techniques présentes sur place sont alors nécessaires pour permettre l'installation du micro-capteur. Ces échanges peuvent s'avérer très lents et complexes, du fait du nombre important d'interlocuteurs impliqués et de leurs disponibilités. Si la connexion du capteur sur le wifi du bâtiment s'avère définitivement impossible, l'utilisation d'un routeur 4G/wifi équipé d'un abonnement GSM adapté peut être envisagé, en considérant bien le surcoût associé. Lorsque cela est possible, le lancement d'un appel à volontaires auprès de citoyens volontaires pouvant héberger un micro-capteur chez eux, est donc à privilégier, le wifi des particuliers étant généralement compatible avec la connexion de ces petits appareils.

Lorsque l'appel à volontaire auprès de citoyens n'est pas possible (par exemple dans le cadre d'observation spécifique, de surveillance industrielle ou autre), l'installation sur l'espace public ou bâtiment public est à privilégier avec une autorisation de la mairie. Dans ce cas, il est préconisé d'utiliser des appareils autonomes en termes d'alimentation électrique et de transmission des données. Dans le cas de capteur fonctionnant avec d'autres types de communication (LoRA, 3/4G, sigfox...), il faudra alors toujours s'assurer de la disponibilité des réseaux utilisés dans la zone définie et de leur pérennité.

- **Considérer la hauteur du capteur par rapport au sol**

Les données des micro-capteurs doivent être comparables à celles mesurées par les appareils de référence. En se basant sur les directives du LCSQA relatives à l'installation des têtes de prélèvements, **le micro-capteur doit être positionné entre 1,5 m et 4m par rapport au sol**. Une hauteur plus élevée peut être étudiée si les circonstances techniques d'accroche ou de sécurité ne permettent pas de faire autrement.

- **Éviter un ensoleillement direct**

Les micro-capteurs n'étant généralement pas équipés de système de régulation thermique ou hygrométrique, une forte chaleur et des rayonnements solaires importants peuvent entraîner une surchauffe à l'intérieur du boîtier et ainsi endommager les composants électroniques et/ou biaiser la mesure (ex dans le cas de la mesure des particules fines, cela peut en effet affecter le ratio gaz/particules). Il convient ainsi d'éviter l'installation sur une façade orientée plein sud ou de choisir un emplacement abrité.

- **Éviter l'encaissement de l'appareil et favoriser un emplacement ventilé**

Afin que l'air ne soit pas amené à stagner au niveau du capteur, il faut favoriser des emplacements avec une bonne aérologie. Aucun obstacle ne doit se trouver dans un périmètre de 1m autour du micro-capteur. Dans le cas spécifique de certains micro-capteurs non autonomes (FIXIs par exemple), la nécessité d'avoir accès à une alimentation électrique contraint souvent à installer

l'appareil sur la façade d'un bâtiment. Il faut alors favoriser au mieux un emplacement bien ventilé malgré la présence d'un mur d'accroche.

- **Favoriser un branchement électrique plutôt que les batteries solaires**

Le retour d'expérience actuel sur l'utilisation de micro-capteurs montre que la puissance des batteries solaires actuellement disponibles sur le marché à des coûts permettant des déploiements massifs, n'est pas toujours adaptée à une utilisation en continu du micro-capteur, avec notamment des problèmes d'alimentation et des coupures qui peuvent être fréquentes en fonction des saisons et de l'implantation (en particulier en saison hivernale ou en zone de montagne). L'évolution des coûts et des technologies devraient permettre d'envisager ultérieurement l'autonomie énergétique des micro-capteurs.

- **S'assurer de l'accessibilité du micro-capteur**

Les micro-capteurs pouvant être sujets à des coupures fréquentes ou à d'autres dysfonctionnements techniques, une intervention par du personnel habilité doit être possible et facilitée afin d'assurer un fonctionnement optimal de l'appareil.

Le déploiement des micro-capteurs chez des particuliers présente là encore certains avantages. Il permet, d'une part, de simplifier les échanges et les interventions techniques avec un interlocuteur unique et, d'autres part, de faire réaliser à distance aux citoyens les premières interventions simples de maintenance. En revanche, si une intervention d'Atmo s'avère nécessaire, celle-ci devra être réalisée sur des horaires convenables pour les citoyens, qui sont plutôt disponibles en dehors des heures travaillées.

Ces recommandations ont été définies à partir de notre expérience du déploiement de plusieurs réseaux de mesures s'appuyant sur le système FIXI, le micro-capteur de particules fines de la Captothèque. Ce micro-capteur est alimenté sur prise électrique, communique en Wifi et utilise un sensor PMS7003. Ces réseaux de mesures peuvent être déployés sur des périodes allant de quelques mois à plusieurs années. La méthode décrite ici peut s'appliquer au déploiement de réseaux construits avec d'autres micro-capteurs que les FIXI mais doit être adaptée selon l'objectif des mesures (sensibilisation citoyenne, caractérisation des niveaux de fond, suivi de chantier, étude de zone...) et le polluant considéré.

### 3.3. Elaboration d'un protocole pour la validation des données micro-capteurs

Tout comme pour les données issues d'analyseurs fixes réglementaires, la validation est un point central de l'utilisation, de l'exploitation et de l'interprétation des mesures effectuées par micro-capteurs.

En effet, le 1<sup>er</sup> retour d'expérience des différentes études montre une variabilité temporelle et géographique très forte du taux d'invalidation en fonction de différents paramètres : variation de la température et de l'humidité, influence de l'environnement, métrologie non adaptée, dérive, mauvaise paramétrisation. Certaines justifications de valeurs invalides ne sont pas encore identifiées.

L'objectif de cette partie est de mettre au point une première méthodologie d'invalidation environnementale (basée sur l'expertise d'un opérateur) et automatique (machine Learning) basée sur un ensemble d'apprentissage.

### 3.2.1 Invalidation manuelle

Lors de l'acquisition des données, une première routine de vérification a pour but d'invalider des données dont l'exploitation n'est pas possible. Cela concerne par exemple des données partielles (données issues d'un capteur en mobilité qui ne disposeraient pas de coordonnées GPS ou de données de pollution) ou des données aberrantes (valeurs supérieures à un seuil défini en amont).

Cette vérification permet également de s'affranchir de la survenue de bug due à des valeurs non stockables résultant d'une erreur de transmission.

Les données sont ensuite contrôlées de façon hebdomadaire via un outil de visualisation « dashboard », et peuvent être invalidées manuellement par un opérateur. Cette validation, appelée validation environnementale, suit les mêmes protocoles établis pour les stations fixes dans le cadre de la surveillance réglementaire d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes.

### 3.2.2 Invalidation en fonction de taux d'humidité

Cette partie est applicable seulement pour les mesures de particules fines. Pour les autres polluants, une étude de sensibilité serait nécessaire.

Les analyseurs de particules homologués au niveau européens chauffent l'air au niveau de la canne de prélèvement pour éviter toute influence de l'humidité. Ce n'est pas le cas des micro-capteurs. Une forte humidité relative peut donc influencer sur la mesure des concentrations. En effet, il semblerait que les micro-capteurs comptent certaines gouttes d'eau comme des particules fines.

Sur notre jeu de données, cette dépendance est notable. Les concentrations sont anormalement élevées lorsque l'humidité relative augmente.

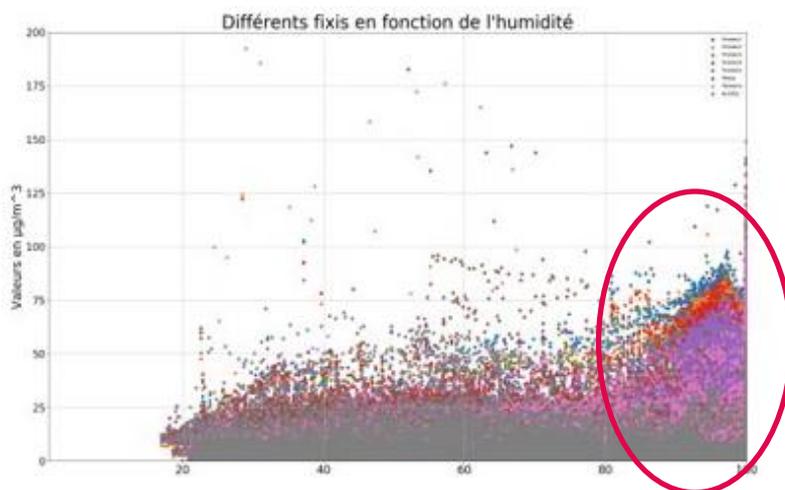


Figure 7 : Dépendance des concentrations des micro-capteurs type FIXI PMS7003 en fonction de l'humidité

Même si la relation entre humidité et concentration mesurée est notable, la relation est particulièrement délicate à déterminer (test de dépendance linéaire, exponentielle, polynomiale). Dans un premier temps, il est apparu plus pertinent d'invalider les données lorsque l'humidité dépasse un certain seuil. La fiabilité pour les données de concentrations supérieures à un certain seuil d'humidité est en effet trop variable pour être prise en compte dans une exploitation.

De plus, le seuil doit être étudié et déterminé pour chaque étude. En effet, le seuil optimal (déterminant le meilleur compromis entre la suppression minimale de données valides et la suppression maximale de données invalides) n'est pas homogène en fonction de la saison, de la typologie et de la météorologie locale.

Dans le cadre des données mises à disposition pour ce rapport, un compromis a été étudié afin de supprimer les concentrations impactées par l'humidité tout en gardant un taux acceptable de

données valides. Le tableau ci-dessous illustre pour différents sites le taux de données supérieurs à un certain seuil d'humidité relative (60%, 70%, 80%, 85%, 90%, 95%, 98% et 99.8%.)

	60%	70%	80%	90%	95%	98%	99,8%
Passy	28,7%	26,2%	22,1%	21,4%	19,9%	19,0%	18,1%
Romans	60,1%	55,8%	51,1%	47%	44%	42,5%	41%
Chamalières	53,3%	46,4%	40,1%	34%	28,4%	25,1%	21,3%
Frênes	36,4-51%	29,2-45%	23,2-39%	18-34,5%	13,5-30,5%	10,4-29,1%	8,03-28,1%
Aurillac	55%	50%	45%	39,9%	35,9%	34,5%	33%

Figure 8 : Proportion du pourcentage de données au-dessus des différents seuils d'humidité relative pour différents sites équipés de micro-capteurs de type FIXI en 2020

Pour le cas d'Aurillac par exemple, la suppression de données permet d'améliorer la fiabilité des données, et de réduire l'écart moyen entre le micro-capteur et l'analyseur de référence.

Seuil d'humidité relative	60 %	70%	80%	90%	95%	98%	99,8%
Indicateur de variation de l'écart entre les valeurs de référence et du FIXI	-84%	-79%	-75%	-72%	-68%	-66%	-29%

Figure 9 : Indicateur de variation de l'écart entre valeurs de référence et micro-capteur en fonction de l'humidité relative pour un micro-capteur de type FIXI (PMS7003) installé sur la station réglementaire d'Aurillac en 2020

Dans cet exemple précis, le seuil de 95% d'humidité a été déterminé au vu des différents résultats. A noter que pour un autre type de sensor (par ex SDS), le seuil peut être différent.

### 3.2.3 Invalidation automatique basée sur un réseau de neurone

#### Hypothèse préalable basée sur l'observation de la variabilité du FIDAS

Les micro-capteurs présentent une métrologie par comptage laser. Le FIDAS, appareil de mesure équivalent du point de vue de la réglementation européenne aux analyseurs de référence est un appareil basé sur la même métrologie. Dans le cadre d'une première approche de validation, une comparaison entre les micro-capteurs et l'analyseur FIDAS semble donc pertinente.

La station réglementaire des Frênes situé en zone urbaine à Grenoble est équipée :

- D'un analyseur réglementaire, depuis 2001
- D'un appareil FIDAS depuis août 2020
- D'une série de 3 micro-capteurs de type FIXI depuis mars 2020

Une analyse exploratoire de ces données sur le mois de novembre 2020 montre en particulier que l'ensemble des données du FIDAS varient dans l'intervalle suivant basé sur l'analyseur réglementaire

$$\text{intervalle}_{ref}(t) = \text{mean}_{ref}(t) \pm 3 * \text{STD}_{ref}(t)$$

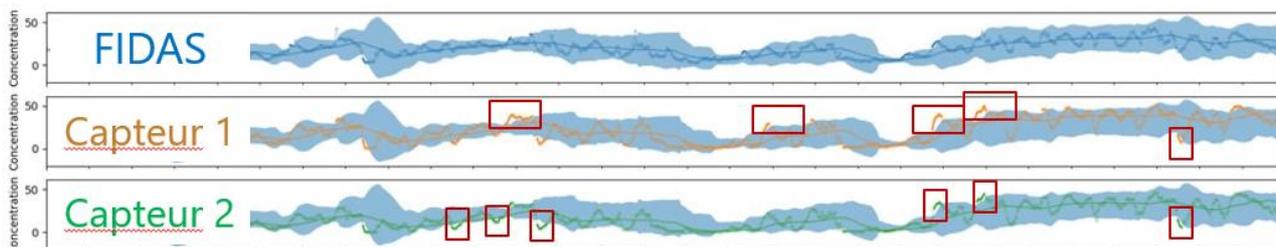


Figure 10 : Analyse exploratoire de novembre 2020 pour les micro-capteurs de type FIXI installés sur la station réglementaire des Frênes, comparaison à l'analyse réglementaire de type FIDAS pour identifier les données invalides

Cette observation est particulièrement intéressante pour notre étude car, par extension, cet intervalle de variabilité constitue une première base de validation automatique des micro-capteurs. Les données micro-capteur incluses dans cet intervalle de variabilité peuvent être considérées comme valide, étant donné que les mesures du FIDAS (équivalent à la mesure réglementaire) restent dans cet intervalle. A contrario, les données micro-capteurs sortant de cet intervalle de variabilité peuvent être considérés comme invalides.

L'intervalle de variabilité s'appuie sur l'analyseur d'une station fixe (ici les Frênes). Afin de pouvoir extrapoler cette méthodologie de validation aux autres micro-capteurs (implanté hors d'une station fixe), un réseau de neurones récurrent a été implémenté.

### Pourquoi un réseau de neurones récurrent ?

Le réseau de neurone récurrent (RNN) est une méthode de Machine Learning, permettant de traiter des données temporelles en conservant en mémoire les données déjà vues. Les RNN sont construits de façon à garder en mémoire les modifications effectuées sur les données au fur et à mesure de l'entraînement.

Le réseau de neurones est particulièrement adapté à notre problématique. D'une part, les données à traiter correspondent à des séries temporelles avec un historique conséquent, et en constante évolution. D'autre part, un travail préparatoire mené par des étudiants de l'INSA dans le cadre d'un projet de fin d'étude, a montré que les réseaux de neurones récurrents apportaient des résultats plus encourageant que d'autres méthodes testées (ARMA, classification SVM, classification One-Class SVM, prophet).

### Résultats : Performance du Réseau de Neurones sur l'ensemble de test

Dans le cadre de notre étude, nous avons pu tester les réseaux de neurones récurrents pour valider les données micro-capteurs des Frênes. Les données de micro-capteurs ont été divisés en 2 échantillons : un ensemble d'apprentissage (pour paramétrer le réseau de neurones) et un ensemble de test (pour s'affranchir du biais de sur-paramétrisation).

L'objectif du réseau de neurones est ici d'identifier les valeurs invalides, c'est-à-dire les données qui sortent de l'intervalle de variabilité (défini plus en haut en 3.2.1) ou les données avec une humidité relative > à 95%.

La paramétrisation retenue qui donne les meilleurs résultats en termes de fiabilité et de rapidité

d'entraînement est le modèle Long Short Term Memory<sup>4</sup> (LSTM) avec 2 couches de 50 cellules.

Sur l'ensemble de test, la performance des résultats peut être synthétisée dans la matrice « de confusion » ci-dessous.

	Données validées par l'expert	Données invalidées par l'expert
Données validées par le réseau	<b>55%</b> soit 3 681 données	<b>8%</b> soit 562 données
Données invalidées par le réseau	<b>7%</b> soit 474 données	<b>30%</b> soit 2 064 données

*Figure 11 : Matrice de confusion pour la classification par réseau de neurones LSTM paramétré et testé sur le site fixe des Frênes. Les performances de ce modèle seront dégradées lorsqu'il sera appliqué sur des micro-capteurs implantés sur d'autres sites.*

Ainsi, dans 85% des cas, la prévision de validation par le réseau de neurone est correcte.

En particulier, 55% des données valides sont identifiées comme valide par le réseau de neurone et 30% des données invalides sont identifiées comme invalides par le réseau de neurone. Inversement, la prévision par le réseau de neurone a 15% de chance d'être erronée. Dans 8% des cas, le réseau considère comme valide des données qui sont invalides. Et dans 7% des cas, le réseau invalide à tort des données valides.

Le modèle ainsi paramétré valide 63% des données (à raison ou à tort). Néanmoins, ces données validées par le modèle peuvent présenter une différence avec l'analyseur réglementaire. Une étape d'ajustement est nécessaire pour permettre de rendre les données validées les plus représentatives possibles.

### 3.4. Elaboration d'un protocole pour l'ajustement des données micro-capteurs.

Cette partie traite uniquement d'un protocole élaboré pour les mesures de particules.

Du fait de la métrologie par comptage laser du micro-capteur de particules, il semble envisageable de corriger sa mesure afin qu'elle soit cohérente avec celle des stations fixes. En effet, les micro-capteurs de particules fines sont paramétrés en fonction d'une certaine spécificité de particules. La qualité de mesure du micro-capteur dépend donc de sa fonction de paramétrage et de transposition de nombre en concentrations. Cette fonction de transferts est paramétrée pour être optimum sur une certaine catégorie de particules. Si le capteur est utilisé pour mesurer des particules chimiquement mais surtout ayant des propriétés optiques différentes, un ajustement sur la concentration peut être envisagé pour augmenter la fiabilité du capteur.

Plusieurs facteurs explicatifs pouvant jouer sur la composition chimique des particules ont été étudiés pour pouvoir ajuster au mieux les micro-capteurs au regard des analyseurs des stations fixes :

- **La saisonnalité** : la nature chimique des particules diffèrent en fonction de la source de pollution et donc de la saison. Ainsi les particules liées au chauffage au bois sont particulièrement présentes en hiver. A contrario, au printemps, les particules sont plus liées

<sup>4</sup> Cellule à mémoire interne

au secteur agricole. Les particules liées au trafic sont présentes toute l'année.

- **Le bassin d'air** : Le bassin d'air fait référence à une zone géographique qui se différencie des autres par la composition chimique de son atmosphère. Au même instant, la composition chimique à Lyon peut être par exemple différente de la composition chimique à Grenoble.
- **La typologie** : par exemple, les particules en proximité routière sont très liées au secteur trafic. A contrario, en milieu rurale ou périurbain, la composition chimique des particules sera plutôt liée au chauffage.

Par ailleurs, des paramètres externes comme l'humidité ou la température peuvent directement influencer sur le système de mesure du micro-capteur et peuvent être des facteurs explicatifs de la différence entre micro-capteur et analyseur réglementaire.

Une première étude exploratoire a permis de tester la significativité de ces différents facteurs pour les données.

### 3.3.1 La saisonnalité joue un rôle prépondérant dans la méthode d'ajustement des micro-capteurs

Une première étude exploratoire sur les données d'intercomparaison régionale a permis d'étudier la saisonnalité dans la fiabilité du micro-capteur.

2 méthodes ont été testés :

- La première se base sur l'étude au cours du temps de la différence entre micro-capteur et analyseurs de référence.
- La 2<sup>ème</sup> se base sur l'évolution mensuelle des coefficients de régression linéaire au cours du temps.

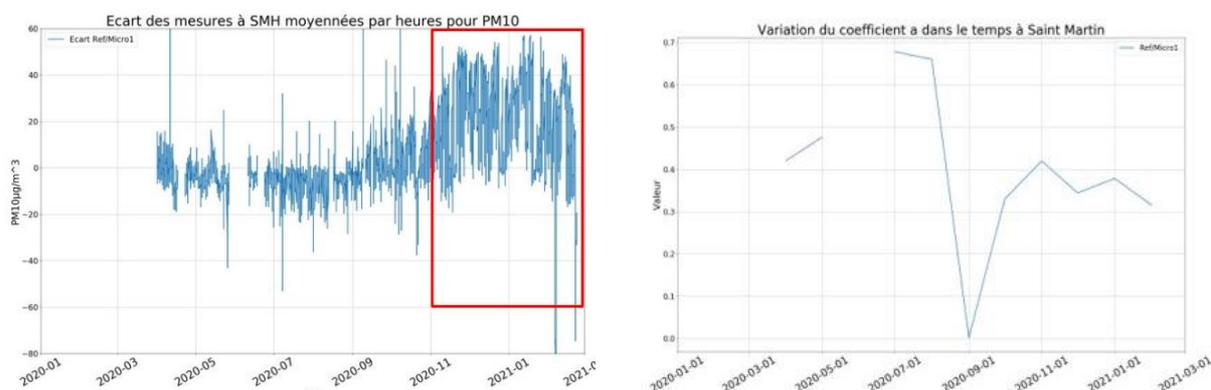


Figure 12 : Analyse exploratoire des données d'intercomparaison régionale pour identifier une saisonnalité. En exemple ici, graphique de Saint Martin d'Hères.

Figure 12 à gauche : évolution des écarts entre micro-capteur et analyseur réglementaire. La différence n'est pas stable au cours du temps. La variabilité augmente fortement d'octobre à mars (cadre rouge).

Figure 12 à droite : évolution du coefficient de régression  $(y_{pred} = a x_{fixe} + b)$  au cours du temps. On observe une stabilité du coefficient d'octobre à mars.

Les 2 méthodes confortent l'idée de 2 saisons : été (avril à septembre) hiver (octobre à mars).

Cette étude exploratoire a été poussée sur l'ensemble des données d'intercomparaison régionale. Les résultats sont synthétisés dans le tableau ci-dessous :

Site	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Frênes	Hiver	Hiver	Période d'incertitude	Période d'incertitude	Été	Été	Été	Été	Période d'incertitude	Période d'incertitude	Hiver	Hiver
SMH	Hiver	Hiver	Été	Été	Été	Été	Été	Été	Été	Période d'incertitude	Hiver	Hiver
Passy	Hiver	Hiver	Été	Été	Été	Été	Été	Été	Été	Période d'incertitude	Période d'incertitude	Hiver
Aurillac	Indéfini	Indéfini	Indéfini	Indéfini	Indéfini	Indéfini	Indéfini	Indéfini	Indéfini	Indéfini	Indéfini	Indéfini
Romans	Indéfini	Indéfini	Indéfini	Indéfini	Indéfini	Indéfini	Indéfini	Indéfini	Indéfini	Indéfini	Indéfini	Indéfini
Chamalières	Hiver	Hiver	Hiver	Période d'incertitude	Été	Été	Été	Été	Été	Été	Été	Hiver

Figure 13 : Synthèse des résultats de l'étude de la saisonnalité

Il est donc indispensable de tenir compte de la saisonnalité dans l'ajustement envisagé pour corriger les micro-capteurs. Soit en prenant en compte les 2 saisons hiver/été telle que définie ici, soit en paramétrant un ajustement « glissant » qui se réadapte en temps réel au fur et à mesure du temps.

### 3.3.2 L'ajustement est également dépendant du bassin d'air

Dans le cadre d'application d'une correction basée sur l'analyseur réglementaire, il a été testé que l'ajustement était bien applicable à tous les micro-capteurs du bassin d'air. Pour cela, un ajustement a été paramétré à Saint-Martin-d'Hères. Il a ensuite été appliqué à un micro-capteur des Frênes. Une comparaison a ensuite été effectuée entre l'analyseur réglementaire et le micro-capteur des Frênes ajusté. Il en ressort que l'ajustement paramétré sur la station de Saint-Martin-d'Hères est bien transposable à la station des Frênes, dans le même bassin d'air.

Le même ajustement a ensuite été testé sur un bassin d'air différent (station fixe de Lyon Centre). Les résultats dégradés montrent que l'ajustement n'est pas exportable au bassin d'air Lyonnais.

### 3.3.3 Ajustement par régression linéaire : choix de la meilleure méthode d'ajustement du micro-capteur de type FIXI

Afin de prendre en compte les différents facteurs de manière simple et accessible, et de proposer un protocole opérationnel, un ajustement par régression multilinéaire prenant en compte le maximum de facteurs a été testé. L'ajustement étant dépendant des bassins d'air, une régression multilinéaire doit être paramétrée sur chacun de ces derniers. La température et l'humidité relative sont intégrées comme facteur auxiliaire explicatif de la régression.

Pour prendre en compte la saisonnalité, deux méthodes ont été évaluées :

- Un ajustement bi-saisonnier : 2 paramétrisations différentes de la régression sont appliquées en fonction de la saison : une paramétrisation en été, une autre paramétrisation en hiver.
- Un ajustement glissant : la paramétrisation se réajuste en temps réel sur l'historique des 30 derniers jours.

Dans le cadre de l'ajustement bi-saisonnier, il est nécessaire de disposer d'un historique d'un an d'un micro-capteur installé en parallèle d'une station fixe réglementaire de même typologie et dans le même bassin d'air pour paramétrer les équations de recalage (ou d'utiliser celles préalablement définies dans le cadre de cette étude).

La deuxième méthode est plus complexe à implémenter d'un point de vue opérationnel étant donné que la paramétrisation de l'ajustement doit avoir lieu tous les jours. Elle nécessite de disposer d'un micro-capteur sur une station fixe pendant toute la période de mesure. Facile à tester sur un

ensemble de données de test, mais complexe à mettre en œuvre en opérationnelle en temps réel. Elle est résumée dans le schéma suivant :

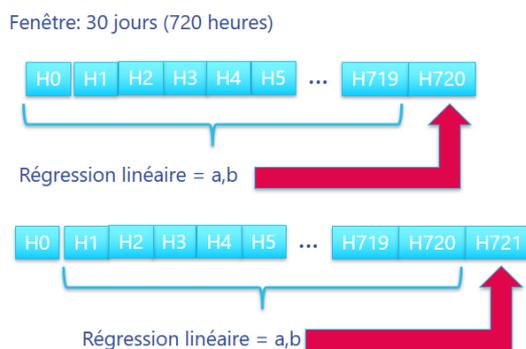


Figure 14 : Synthèse méthodologique de l'ajustement par régression multilinéaire glissante sur 30 jours

Les deux méthodes (ajustement bi-saisonnier, et ajustement glissant) sont évaluées par validation croisée<sup>5</sup> à l'aide d'un indicateur. Plus la valeur de cet indicateur est faible, plus l'écart entre les valeurs de référence et les valeurs du micro-capteur diminue, et donc plus la méthode d'ajustement est efficace. Avec un indicateur à 0.25 par exemple, la méthode a permis de diminuer de 50% les écarts en moyenne.

Pour effectuer ces premiers tests et évaluer les différentes méthodes, les données de micro-capteurs sur l'ensemble du territoire régional ont été utilisées (cf. 2.4 Données utilisées à l'échelle régionale) Ainsi, les tests ont été effectués sur l'ensemble des stations présentant suffisamment de données pour être représentative d'une année complète, tout en présentant une diversité territoriale. Les tests ont ainsi portés sur les stations fixes d'Aurillac, des Frênes (équipés de 4 micro-capteurs), de Passy et de Romans.

PM2.5	Régression linéaire sans paramètres explicatifs	Régression multilinéaire avec			
		Température		Température + Humidité relative	
	Ajustement bi-saisonnier	Ajustement bi-saisonnier	Paramétrisation glissante	Ajustement bi-saisonnier	Paramétrisation glissante
Aurillac	-24%	-39%	-58%	-36%	-58%
Frênes 1	-37%	-78%	-82%	-74%	-84%
Frênes 2	-28%	-75%	-78%	-68%	-78%
Frênes 3	-29%	-74%	-76%	-65%	-76%
Frênes 4	-30%	-76%	-76%	-69%	-79%
Passy	-4%	-6%	-16%	-9%	-16%
Romans	-16%	-62%	-49%	-61%	-49%
Moyenne	-24%	-58%	-62%	-35%	-63%

<sup>5</sup> La validation croisée permet de diviser automatiquement l'échantillon en un échantillon d'apprentissage et de test. Cette action est répétée en permutant l'échantillon de test un certain nombre de fois. L'estimation de l'erreur est au final moyennée sur tous les ajustements effectués. Cette méthode évite le phénomène de surajustement.

*Figure 15 : Evaluation et comparaison des différentes méthodes d'ajustement multilinéaire des concentrations PM<sub>2.5</sub> des micro-capteurs FIXI sur les différents sites. Plus la valeur de cet indicateur est faible, plus la méthode d'ajustement est efficace.*

Quel que soit la méthode, l'ajustement sur les PM<sub>2.5</sub> permet d'apporter une plus-value par rapport à la mesure non ajustée. Les paramètres explicatifs tels que la température et l'humidité relative permettent également de réduire les écarts avec les concentrations mesurées par la station de référence.

Enfin l'ajustement glissant sur les 30 derniers jours permet également de grandement améliorer l'ajustement. Les résultats et conclusions sont comparables pour les PM<sub>10</sub>.

L'équation optimale d'ajustement pour les micro-capteurs type FIXI mesurant les particules fines est donc du type :

$$y_{pred} = a x_{fixi} + b x_{température} + c x_{humidité} + d, \quad \text{Équation 1}$$

$y_{pred}$  correspond à la valeur ajustée,

$x_{fixi}$  sont les valeurs relevées par le FIXI,

$x_{température}$  sont les valeurs de température,

$x_{humidité}$  sont les valeurs d'humidité

$a, b, c,$  et  $d$  sont les coefficients déterminés par la régression multilinéaire de ces 3 paramètres par rapport à la valeur de référence. Ils sont spécifiques pour chaque bassin d'air. Dans le cadre de l'ajustement glissant, ils sont estimés tous les jours (à l'aide des données des 30 jours précédents). Dans le cas d'estimations par saison, ils sont déterminés à l'avance pour les 2 saisons hiver et été.

Il existe cependant un cas particulier pour les sites ayant une influence particulière, comme par exemple les sites à influence trafic. Ils présentent des caractéristiques propres liés à leur source exclusivement trafic avec moins de variabilité liée à la chimie des particules. Les premières conclusions d'une analyse exploratoire préliminaire laisse envisager que tous les sites trafic de la région pourrait être regroupés et corrigés selon 2 catégories : site trafic en milieu urbain ou site trafic routier (bordure d'autoroute par exemple). Cependant une étude plus approfondie devrait être menée pour savoir si l'ajustement peut être régional pour tous les sites trafic et si l'ajustement par saison est pertinent également pour cette typologie.

### **3.5. Première réflexion d'intégration des données micro-capteurs dans les cartographies locales de particules**

La prise en compte des mesures des stations réglementaires dans les cartographies de qualité de l'air se fait historiquement à l'aide du krigeage, technique d'interpolation géostatistique. L'objectif est d'estimer, à partir des stations fixes réglementaires, et d'une variable auxiliaire (les sorties de modélisation numérique) la valeur des concentrations en tous les points du territoire.

Intégrer les données micro-capteurs dans ces cartographies, en prenant en compte leur incertitude et leur variabilité, est un véritable enjeu de recherche<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> Une thèse sur ce sujet est actuellement en cours au LCSQA, Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air, support scientifique et technique des AASQA

Dans le cadre de notre étude, les réflexions ont porté sur une première approche d'intégration des données de micro-capteurs dans les cartographies d'Auvergne-Rhône-Alpes. Un jeu de données de mesure des particules sur le quartier lyonnais de la Part Dieu (Cf. 2.4 Données utilisées) a été utilisé pour ce premier test (données fixes et mobiles de micro-capteurs FIXI et Atmotrack). Différents types de krigeage prenant en variable auxiliaire la cartographie issue du modèle numérique ont été implémentés, et comparés :

- **Krigeage des Innovations** : réalise un krigeage de la différence entre mesure et modèle (aux points de mesures), ensuite ajouté à la carte modélisée
- **Krigeage des Innovations v2** : on réalise le krigeage du rapport entre mesure et modèle, multiplié ensuite par le modèle
- **Krigeage des Résidus** : similaire au Krigeage des innovations, mais ici une régression linéaire entre mesure et modèle permet de calculer les « résidus », qui sont krigés puis ajoutés au modèle :

$$Z(x) = a * M(x) + b + R(x)$$

où Z : concentration krigée, M : concentration modélisée, R : résidus krigés  
a et b : coefficients de régression entre mesure et modèle

- **Krigeage à Dérive Externe** : similaire au krigeage des résidus, mais la régression linéaire est faite en validation croisée (exclut le point de mesure avant de réaliser la régression)

Le krigeage à dérive externe est recommandé par le LCSQA, et est mis en place dans un projet visant justement à exploiter la donnée de micro-capteurs<sup>7</sup>.

Afin d'optimiser ces différents krigeages, un filtre basé sur la corrélation entre le modèle et les mesures a été testé et mis en place. Le principe de ce filtre repose sur une élimination aléatoire d'un pourcentage des observations. Pour chaque élimination, un calcul de la corrélation entre le modèle et la mesure du nouveau jeu de données est réalisé. Après plusieurs tentatives convergentes vers une amélioration significative de la corrélation modèle mesure, le jeu de données donnant la corrélation maximale est conservé (1000 tentatives sont réalisées par jeu de données horaires et par pourcentage d'élimination fixé). Plusieurs pourcentages d'élimination de données sont testés (0 à 50% par pas de 10%). Un jeu de données final est élaboré à partir de critère sur la corrélation modèle/mesure horaire  $\geq$  à 0.5 et pour un nombre de données maximum. Si quelques soit le filtrage du nombre de données, il n'est pas possible d'obtenir une corrélation supérieure ou égale à 0.5 alors le jeu de données permettant d'obtenir la corrélation maximale est choisi quel que soit le pourcentage d'élimination des données

Deux approches ont été évaluées pour obtenir une cartographie sur la période étudiée :

- 1- Moyenner les données d'entrée horaires et effectuer un unique krigeage sur l'ensemble de la période
- 2- Effectuer un krigeage pour chaque pas de temps horaire, puis moyenner tous les krigeages calculés pour obtenir une cartographie sur l'ensemble de la période

Ces deux approches peuvent être résumées par la Figure suivante :

---

<sup>7</sup> « Cartographie de la qualité de l'air à l'échelle urbaine à partir des données de micro-capteurs », Alicia Gressent, disponible sur : [https://www.lcsqa.org/system/files/media/documents/LCSQA2020\\_guide\\_cartographie\\_capteurs.pdf](https://www.lcsqa.org/system/files/media/documents/LCSQA2020_guide_cartographie_capteurs.pdf)

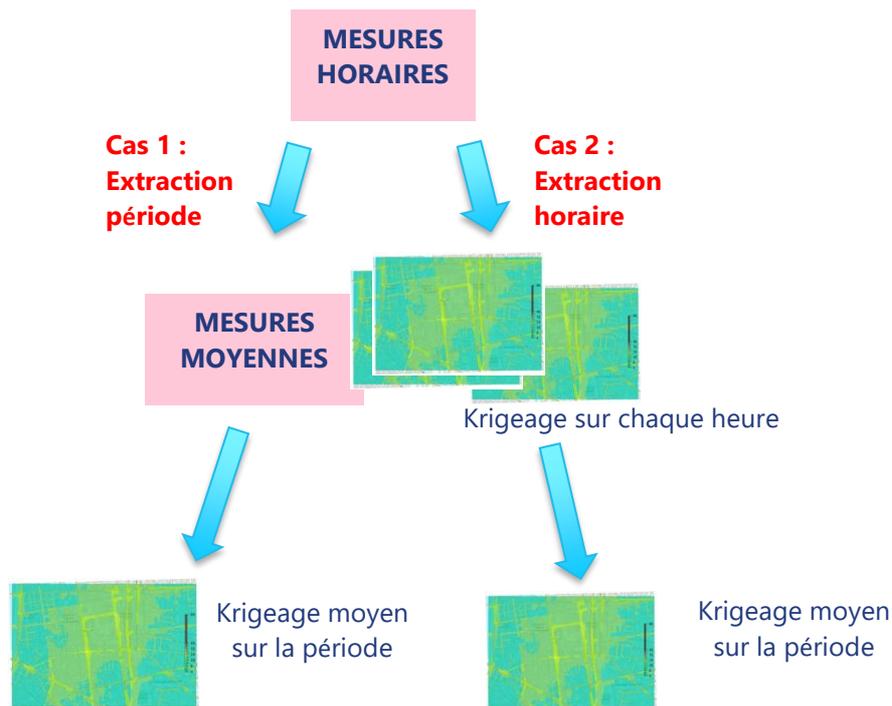


Figure 16 : Schéma synthétisant les 2 approches de modélisation testées pour intégrer les micro-capteurs FIXI dans les cartographies

Des indices de performances, ont été calculés, afin de quantifier l'amélioration (ou la dégradation) apportée par les différents krigage.

Une validation croisée est effectuée afin d'estimer la concentration à chaque point de mesure des capteurs fixes (station de référence et FIXI). Bien que les FIXI soient des micro-capteurs, avec une incertitude de mesure élevée, ils ont été considérés avec le même poids que les stations de référence pour la validation croisée. Ne considérer que la station de référence aurait posé un problème, n'ayant qu'un seul point de mesure à comparer à chaque krigage. Enfin, les mesures mobiles, qui apportent pourtant une information supplémentaire durant le krigage, sont exclues de la validation croisée. L'approche de comparaison des différentes méthodes est donc perfectible, et doit être considérée comme telle lors de l'interprétation. Une autre approche avec plusieurs stations de référence dans la même zone, en validation croisée, pourrait permettre de tirer davantage de conclusions.

Cette première approche permet néanmoins de calculer de premiers indicateurs de performance des différentes méthodes (biais relatif, biais absolu, RMSE, pour chaque krigage). Ils permettent de comparer les différents krigeages entre eux, que ce soient les types de krigage (Innovation, Résidu, Dérive Externe) ou l'approche (sur les mesures moyennées ou par krigage horaire).

La Figure ci-dessous montre les performances atteintes :

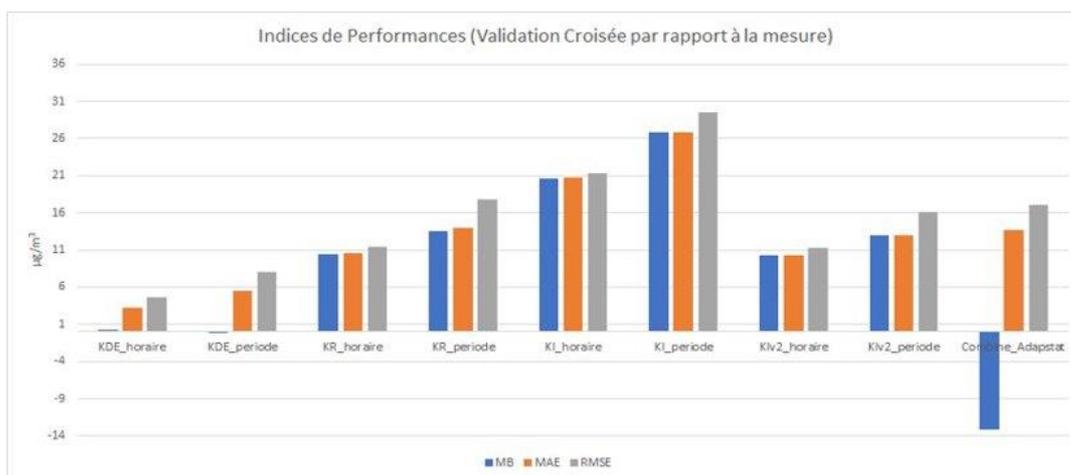


Figure 17 : Evaluation et performance de l'intégration des micro-capteurs de type FIXI dans les différents krigeages testés

Pour chaque type de krigeage, l'approche horaire donne de meilleurs résultats que le krigeage de la moyenne des mesures. Un krigeage sur la période va considérer de manière égale toutes les mesures (les mesures d'une station fixe avec beaucoup d'échéances horaires vont avoir « le même poids » qu'un unique passage d'un micro-capteur mobile à une échéance horaire). Le krigeage horaire, lui, va effectuer autant de cartographies que d'heures auxquelles une mesure est disponible. Ainsi les stations fixes desquelles remontent beaucoup de mesures vont davantage impacter la carte finale. C'est donc l'approche à privilégier pour intégrer les micro-capteurs dans les cartographies actuelles d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes.

Une nette amélioration par rapport au modèle numérique est visible pour une partie des krigeages, c'est-à-dire que la cartographie des concentrations s'est « rapprochée » des mesures fixes. En particulier, le krigeage à dérive externe semble se démarquer des autres krigeages : il présente en effet des biais moyens moins importants que les autres krigeages. A noter tout de même que dans certains cas, le krigeage dégrade la cartographie de base du modèle : le biais moyen après krigeage est parfois plus important que le biais de base du modèle (c'est par exemple le cas pour le krigeage des innovations dans le graphe ci-dessus).

# 4. Application sur un jeu de données grenoblois

## 4.1. Contexte et objectif de l'observatoire citoyen sur Grenoble

Dans la poursuite d'une démarche débutée il y a plusieurs années, Grenoble-Alpes-Métropole et Atmo Auvergne-Rhône-Alpes poursuivent leur collaboration pour améliorer l'observation de la qualité de l'air grâce à la donnée participative. C'est un axe de développement suivi depuis plusieurs années par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes et ses partenaires comme Grenoble-Alpes-Métropole, pionnier en la matière, avec notamment sa participation au déploiement du dispositif Captothèque au travers de différentes actions comme un service de prêt gratuit au citoyen ou le déploiement de 30 micro-capteurs de particules fines sur les communes de la Métropole (utilisés dans le cadre de cette étude)

Les micro-capteurs ainsi déployés permettent de mesurer les particules en temps réel. Construits par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, ils sont basés sur le système open-source du projet Sensor.Community et adapté avec une sensor PMS7003. L'installation a débuté à partir de l'été 2021 sur des sites choisis avec l'aide des équipes municipales des communes volontaires pour leur représentativité du fond urbain au niveau des communes. Ils permettent de récolter des données de particules fines pendant toute une année et servent de base à la construction de l'observatoire participatif de la qualité de l'air sur le territoire de Grenoble-Alpes-Métropole qui sera enrichi dans les prochaines années, notamment avec la participation des citoyens métropolitains. Comme pour l'ensemble des projets participatifs, les données de mesures sont consultables par tous. Les citoyens sont ainsi invités à consulter, comparer ces mesures locales et à participer aux échanges directement sur la plateforme en ligne [captotheque.fr](https://captotheque.fr)

Les données récoltées dans le cadre de cet observatoire participatif sont également analysées par les équipes d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes et sont ainsi utilisées comme jeu de données test pour les protocoles de validation, de recalage et d'intégration au modèle décrit précédemment dans ce rapport. A terme, l'objectif est d'étudier le potentiel d'intégration des mesures participatives récoltées par les collectivités, les entreprises ou les citoyens, à la surveillance de la qualité de l'air.

## 4.2. Protocole d'intercomparaison appliqué aux micro-capteurs de l'observatoire grenoblois

Pour avoir un réseau de micro-capteur dense permettant d'appliquer l'ensemble des points décrits précédemment, 30 micro-capteurs FIXI ont été utilisés. Ces micro-capteurs mesurent les particules fines de tailles inférieures à 10, 2.5 et 1µm. La température et l'humidité relative sont également mesurées. Les mesures sont effectuées toutes les 150 secondes.

Comme détaillé dans la partie 3.1 *Elaboration d'un protocole d'étude pour l'installation et la mise en fonctionnement des microcapteurs*, les micro-capteurs ont été intercomparés sur une station

règlementaire du réseau d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes située dans le même bassin d'air que les futurs sites, soit la station de Saint Martin d'Hères.

Après une quinzaine de jours de mesure les données ont été récoltées par le laboratoire de métrologie pour être analysées et comparées à l'analyseur de référence selon le processus de déploiement des micro-capteurs détaillé plus haut (voir 3.1 *Elaboration d'un protocole d'étude pour l'installation et la mise en fonctionnement des microcapteurs*).

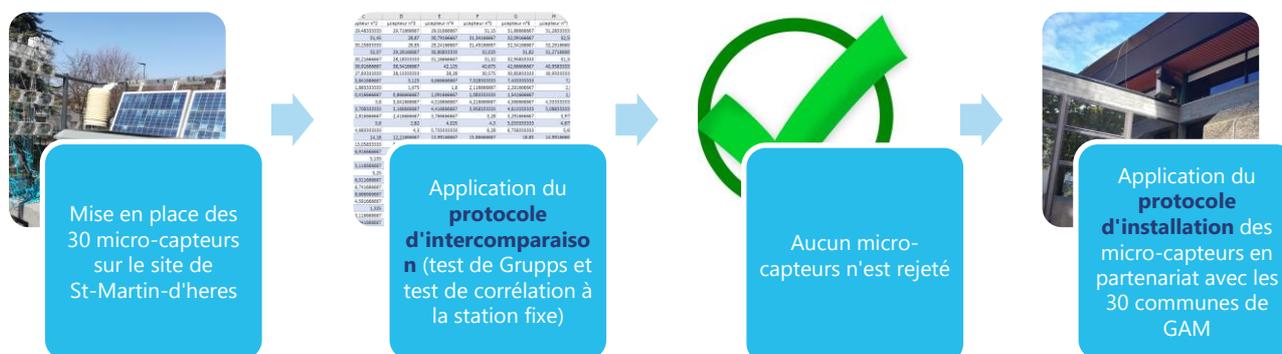


Figure 18 : Application du processus de déploiement des micro-capteurs (protocole d'intercomparaison et protocole d'installation) à l'étude de Grenoble-Alpes-Métropole.

Les résultats découlant de cette intercomparaison ont été concluants, et aucun capteur n'a été écarté.

### Application du test de la répétabilité des capteurs aux micro-capteurs de l'observatoire grenoblois :

Ci-dessous une extraction des 10 premiers capteurs testés (statistique du test de GRUBBS : 2.709)

Numéro du $\mu$ capteur	n°1	n°2	n°3	n°4	n°5	n°6	n°7	n°8	n°9	n°10
Moyenne en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	7,72	8,73	8,16	7,62	8,68	7,07	7,48	8,55	8,43	8,79
Test de Grubbs	1,096	0,391	0,456	1,252	0,320	2,059	1,448	0,123	0,056	0,475
Validité du $\mu$ capteur	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tableau 1 : Résultats du test de répétabilité (test de GRUBBS) sur les  $\text{PM}_{10}$  pour la période d'intercomparaison concernant 10 micro-capteurs dans le cadre de l'observatoire participatif grenoblois

Numéro du $\mu$ capteur	n°1	n°2	n°3	n°4	n°5	n°6	n°7	n°8	n°9	n°10
Moyenne en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	6,973	7,787	8,426	7,777	7,352	7,715	8,852	8,660	8,621	8,887
Test de Grubbs	1,169	0,113	1,117	0,097	0,572	0,000	1,788	1,485	1,424	1,843
Validité du $\mu$ capteur	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tableau 2 : Résultats du test de répétabilité (test de GRUBBS) sur les  $\text{PM}_{2,5}$  pour la période d'intercomparaison concernant 10 micro-capteurs dans le cadre de l'observatoire participatif grenoblois

## Application du test de corrélation avec la station fixe dans le cadre de l'observatoire grenoblois :

Extraction des résultats du test de corrélation des 10 premiers capteurs testés

Numéro du $\mu$ capteur	n°1	n°2	n°3	n°4	n°5	n°6	n°7	n°8	n°9	n°10
R <sup>2</sup>	0,58	0,57	0,55	0,57	0,56	0,57	0,53	0,58	0,57	0,56
Validité de la corrélation	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tableau 3 : Résultats du test de corrélation des PM<sub>2,5</sub>

Numéro du $\mu$ capteur	n°1	n°2	n°3	n°4	n°5	n°6	n°7	n°8	n°9	n°10
R <sup>2</sup>	0,23	0,21	0,19	0,22	0,20	0,20	0,16	0,22	0,20	0,18

Tableau 4 : Résultats du test de corrélation des PM<sub>10</sub>

Le test de corrélation montre des résultats corrects pour les PM<sub>2,5</sub>. Concernant les PM<sub>10</sub> les résultats sont bien moins bons car certains micro-capteurs montrent une corrélation avec la station de référence inférieure à 0.4. Pour la suite de l'étude, il a donc été choisi d'écarter l'analyse des PM<sub>10</sub> et de se concentrer sur l'étude des PM<sub>2,5</sub>.

### 4.3. Protocole d'installation appliqué aux micro-capteurs de l'observatoire grenoblois.

Les 30 micro-capteurs ont été répartis sur l'ensemble du territoire de la métropole grenobloise.

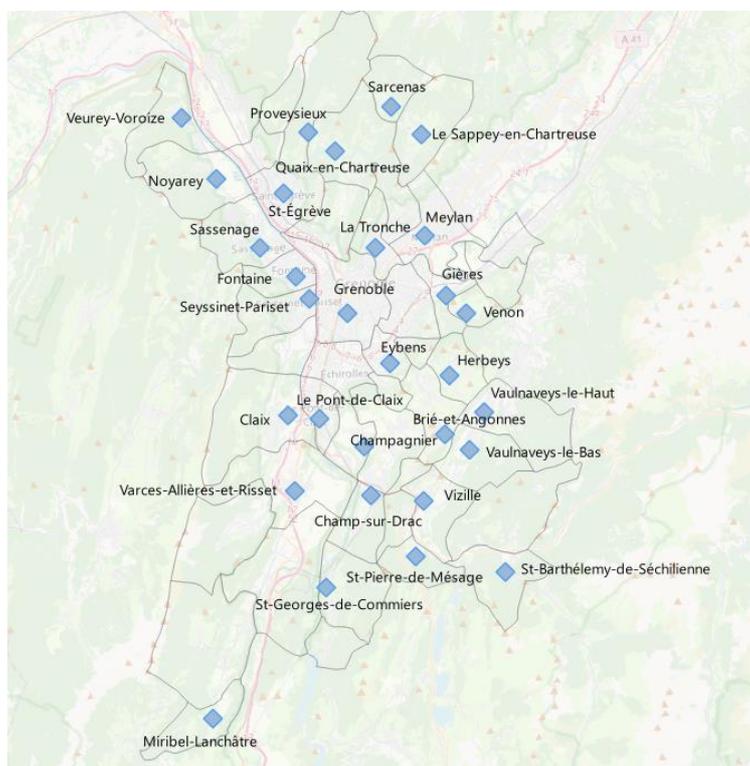


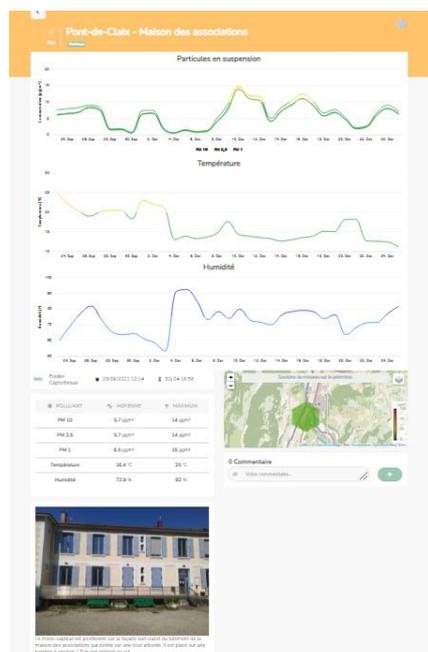
Figure 19 : Répartition des sites de mesure dans le cadre de l'observatoire participatif sur le territoire de Grenoble-Alpes-Métropole

Les sites de mesures, choisis avec l'aide des équipes municipales, ont été sélectionnés pour leur représentativité du niveau d'exposition moyen de la population, appelé fond urbain. Une attention particulière a été portée sur l'absence de sources majeures de particules fines à proximité directe (pas de cheminée, pas de grille d'évacuation d'air vicié, pas d'influence direct de trafic routier, etc), sur la hauteur du point de mesure par rapport au sol, son orientation, son exposition au soleil ainsi que sa position générale par rapport aux infrastructures et aux aménagements urbains (afin d'éviter tout encaissement et de favoriser la circulation de l'air). Les endroits trop excentrés de zones urbanisées ou inversement trop proches d'infrastructures routières ou industrielles majeures ont été exclus.

Les données issues de ces micro-capteurs ont deux principales fonctions :

- Elles sont intégrées sur le site Captothèque pour une visualisation directe et dans un but d'implication et de sensibilisation des citoyens
- Elles sont intégrées dans une base interne pour pouvoir les manipuler (validation, ajustement), les données sont visualisées en interne sur l'outil Grafana

L'ensemble des données ainsi mesurées représentent plus de 86 000 données par jour de mesure.



30 micro-capteurs  
installés dans 30  
communes



Mesurant les particules  
PM1, PM2.5, PM10  
la température et l'humidité



Toute les 150 sec



24h/24

Soit plus de 86 000 données par jours

Figure 20 : Descriptif des données de l'observatoire participatif grenoblois. A gauche : Visualisation des données sur le site captothèque.fr (exemple du site situé à Pont-de-Clair). A droite : Infographie sur l'ensemble des données

## 4.4. validation automatique et manuelles

Chaque jour une première validation automatique est réalisée, permettant de supprimer les valeurs négatives ou extrêmement élevées. Ensuite, toutes les semaines un opérateur visualise les données, et peut, manuellement, supprimer des données aberrantes, selon la même expertise que pour les stations fixes du réseau réglementaire.



Saint-Georges-de-Commiers	77%	77%	77%
Saint-Barthélemy-de-Séchilienne	69%	69%	69%
Le Sappey-en-Chartreuse	66%	66%	66%
Noyarey	59%	59%	59%
Proveysieux	50%	50%	50%
Champagnier	48%	48%	48%
Seyssinet-Pariset	41%	41%	41%
La Tronche	34%	34%	34%

Tableau 5 : Taux de fonctionnement des micro-capteurs pour les particules PM<sub>2,5</sub>, les PM<sub>1</sub>, la température et l'humidité

Les moyennes des différentes mesures réalisées par les micro-capteurs (PM<sub>2,5</sub>, température et humidité relative) ont été calculées sur la période du 1<sup>er</sup> octobre au 17 novembre pour l'ensemble des données (Annexe 1). Pour les PM<sub>2,5</sub>, pour l'ensemble des données, la concentration moyenne la plus élevée a été mesurée pour la commune de Vizille avec une moyenne d'environ 21 µg/m<sup>3</sup> et la plus faible pour la commune de Sarceñas avec une moyenne d'environ 7 µg/m<sup>3</sup> (**Erreur ! Source du r envoi introuvable.**).

Communes	Moyennes pour l'ensemble des données	Moyennes pour les données avec HR <99,9%
	PM <sub>2,5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>2,5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )
Vizille	21	8
Saint-Georges-de-Commiers	19	17
Noyarey	18	18
La Tronche	19	14
Vaulnaveys-le-Haut	17	17
Eybens	17	17
Grenoble	17	15
Brié-et-Angonnes	16	6
Champs-sur-Drac	16	15
Fontaine	15	7
Saint-Pierre-de-Mésage	14	7
Meylan	15	15
Claix	15	15
Varcès-Allières-et-Risset	15	10
Vaulnaveys-le-Bas	15	15
Sassenage	15	15
Gières	14	14
Saint Egrève	13	9

Herbeys	13	-
Miribel-Lanchâtre	12	10
Venon	13	13
Veurey-Voroize	12	8
Le Pont-de-Claix	11	11
Le Sappey-en-Chartreuse	10	10
Champagnier	10	10
Quaix-en-Chartreuse	9	10
Saint-Barthélemy-de-Séchilienne	9	7
Seyssinet-Pariset	9	9
Proveysieux	8	8
Sarcenas	7	7

Figure 21 : Moyennes des concentrations de PM<sub>2,5</sub> mesurées par les micro-capteurs pour l'ensemble des données et pour les données avec une humidité relative inférieure à 99,9% (qui représentent 64% des données totales).

Dans la partie 3.3, il est montré que pour une humidité relative élevée, les concentrations mesurées par les micro-capteurs montrent une variabilité dans leur fiabilité. Un compromis a été étudié et choisi afin de ne pas prendre en compte les concentrations de particules mesurées lorsque l'humidité est supérieure à 95%, ce qui représentait 30% du jeu de données. Dans le cadre de l'observatoire grenoblois, le seuil d'invalidation fixé préalablement à 95% est trop contraignant : il exclue trop de données valides et implique sur l'ensemble des sites une invalidation de 51% des données.

Le Tableau 6 montre la répartition des mesures de l'humidité relative selon 4 gammes (<95%, ≥95% et <97%, ≥97% et <99,9% et 99,9%). Pour la commune d'Herbeys, aucune données d'humidité ne sont remontées pendant cette période à la suite d'un problème sur le micro-capteur. Du fait de ce manque de données, il n'a pas été possible de calculer une moyenne pour les PM<sub>2,5</sub> en sélectionnant les données inférieures à 99,9%.

Communes	Taux de fonctionnement global	Pourcentage des mesures de l'HR pour 4 gammes de données			
		<95%	≥95% et <97%	≥97% et <99,9%	99,9%
Meylan	99,9%	100%	0%	0%	0%
Quaix-en-Chartreuse	99,6%	100%	0%	0%	0%
Sassenage	96%	100%	0%	0%	0%
Vaulnaveys-le-Haut	99,7%	100%	0%	0%	0%
Proveysieux	50%	100%	0%	0%	0%
Sarcenas	97%	100%	0%	0%	0%
Venon	99%	100%	0%	0%	0%
Gières	99,6%	99,9%	0,1%	0%	0%
Noyarey	59%	96%	4%	0%	0%
Vaulnaveys-le-Bas	79%	93%	4%	3%	0%
Champagnier	48%	93%	7%	0%	0%

Le Sappey-en-Chartreuse	66%	92%	2%	4%	2%
Claix	98%	80%	13%	7%	0%
Eybens	98%	75%	18%	7%	0%
Le Pont-de-Claix	90%	71%	8%	19%	2%
Champs-sur-Drac	98,7%	66%	6%	16%	12%
Saint-Georges-de-Commiers	77%	66%	7%	16%	12%
Miribel-Lanchâtre	96%	58%	4%	13%	25%
Seyssinet-Pariset	41%	44%	7%	18%	31%
Grenoble	98%	43%	7%	14%	36%
Varces-Allières-et-Risset	99,9%	38%	3%	13%	46%
La Tronche	34%	36%	3%	10%	51%
Saint-Barthélemy-de-Séchilienne	69%	27%	4%	13%	56%
Saint Egrève	100%	26%	2%	7%	65%
Saint-Pierre-de-Mésage	100%	22%	3%	8%	67%
Veurey-Voroize	97,6%	20%	1%	5%	74%
Vizille	91%	17%	2%	6%	75%
Brié-et-Angonnes	92%	17%	3%	5%	75%
Fontaine	92%	14%	2%	5%	79%
Herbeys	-	-	-	-	-

*Tableau 6: Répartition des mesures de l'humidité relative des micro-capteurs pour les différentes communes selon 4 gammes*

Cette analyse a également permis de faire le zoom sur des périodes où les concentrations des micro-capteurs de l'observatoire grenoblois ont significativement augmenté, dépassant pour certains les  $50 \mu\text{g.m}^{-3}$ . Deux périodes sont visualisables dans les figures ci-dessous : la première le 7 novembre entre midi et 23h (Figure 24), et la seconde le 11 novembre entre 11h et 20h (Figure 25). Le pourcentage de données valides en lien avec le taux d'humidité (diagramme en bâton en gris sur les graphiques ci-dessous) diminue lorsque les concentrations augmentent, en lien avec une saturation du capteur d'humidité.

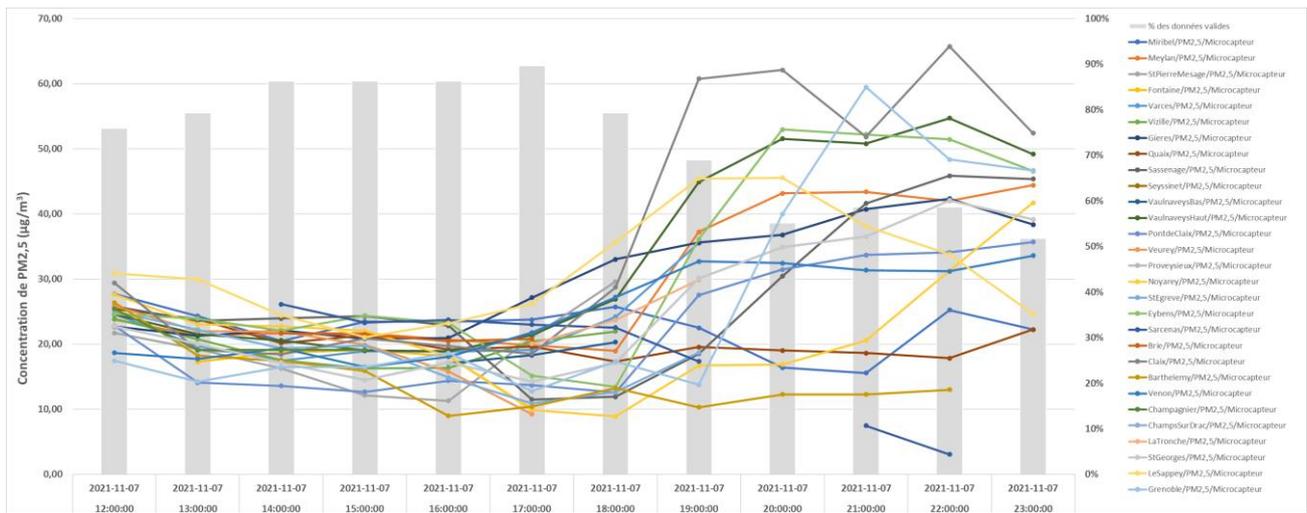


Figure 22 : Concentrations de PM<sub>2,5</sub> et pourcentages de données valides horaires pour les différents micro-capteurs pour le 7 novembre entre 12h et 23h

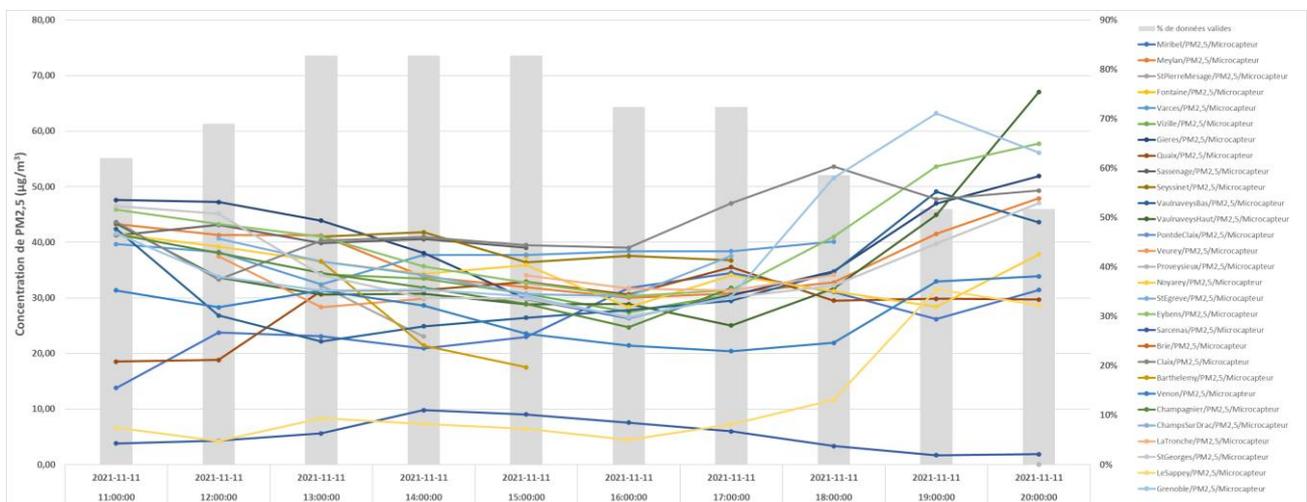


Figure 23 : Concentrations de PM<sub>2,5</sub> et pourcentages de données valides horaires pour les différents micro-capteurs pour le 11 novembre entre 11h et 20h

## 4.6. Application du protocole : Validation et Ajustement par coefficient de correction simple

L'étude de détermination du seuil optimal d'invalidation dans le cadre de l'étude grenobloise a mis en évidence un phénomène de saturation de l'humidité sur les capteurs. Ainsi en comparant, la répartition de l'humidité relative de la station fixe avec celle du micro-capteur, il apparait que la justesse du capteur d'humidité pour des valeurs hautes est faible sur certains sites. Sur le site fixe de Grenoble les Frênes par exemple, le capteur d'humidité du micro-capteur est effet saturé contrairement à la mesure réglementaire de la station fixe de référence :

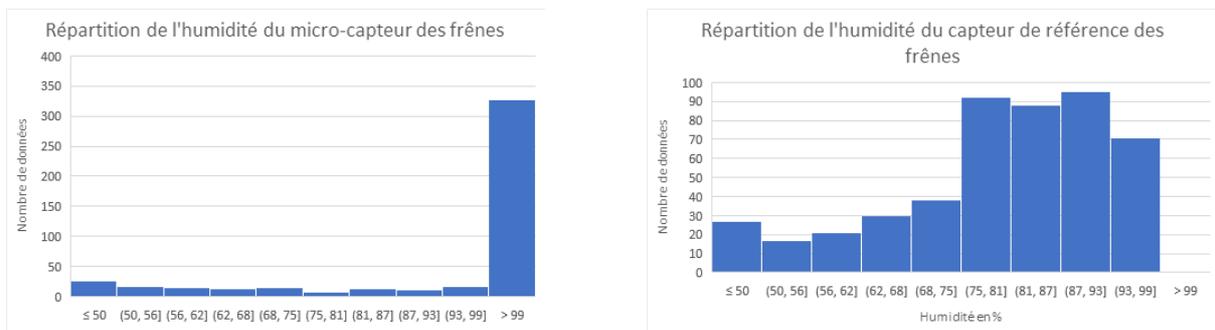


Figure 24 : Différence de répartition des taux d'humidité entre un micro-capteur et un analyseur réglementaire de référence sur la station des Frênes.

De cette observation découle une différence très faible entre les invalidations liées aux différents taux d'humidité préalablement choisis. Afin de conserver un nombre significatif de données en invalidant les données liées à une humidité à 100%, source d'une surestimation certaine des concentrations, le seuil d'invalidation a été fixé dans ce cas précis à  $\geq 99.9$ . En choisissant ce seuil, sur l'ensemble des capteurs 8210 données sont conservées sur 12076 données au total.

Nombre de valeurs (humidité)	
total	12076
$\leq 99,9\%$	8210
$< 99\%$	7862
$< 95\%$	6976

Figure 25 : Nombre de données conservés en fonction de l'humidité choisie, dans le cadre de l'observatoire participatif grenoblois

Le nombre de données invalidées est stable dans le temps, et n'implique pas une invalidation prolongée sur toute une période. Le 30 octobre aucune valeur n'est invalidée, ce qui s'explique par une température plus élevée ce jour, et donc une humidité relative plus faible inférieure toujours inférieure à 99,9%.

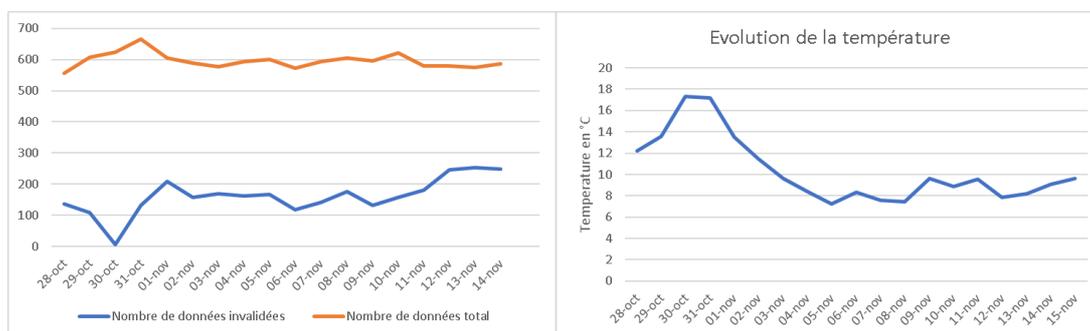


Figure 26: Evolution temporelle du nombre de données invalidées au regard de l'évolution temporelle de la température

Le protocole d'ajustement bi-saisonnier (cf. 3.3. *Elaboration d'un protocole pour l'ajustement des données micro-capteurs*) a été appliqué sur l'ensemble des micro-capteurs. Ainsi les 30 micro-capteurs ont été corrigés en prenant en compte la saison (hivernale), la typologie (fond urbain), et le bassin d'air (Grenoblois).

Afin d'évaluer l'impact de l'ajustement sur un cas opérationnel, une comparaison entre la station fixe réglementaire des Frênes et le micro-capteur ajusté situé à proximité a été menée entre le 29 octobre 2021 et le 15 novembre 2021 (Figure 29).

La comparaison graphique ci-dessous montre que :

- Pour les concentrations supérieures à  $10 \mu\text{g.m}^{-3}$ , l'ajustement (courbe grise sur le graphique) permet, de se rapprocher des mesures de la station fixe réglementaire. En particulier, la donnée brute du micro-capteur tend à largement surestimer la concentration mesurée par l'analyseur réglementaire. L'ajustement permet de corriger cette surestimation
- Pour les concentrations inférieures à  $10 \mu\text{g.m}^{-3}$ , l'ajustement engendre une surestimation d'environ  $5 \mu\text{g.m}^{-3}$ . Cette surestimation provient de la méthodologie par régression linéaire (ordonnée à l'origine). Ce constat constitue une piste intéressante de perspective pour améliorer l'ajustement, même s'il ne s'agit pas d'un enjeu primordial étant donné que le problème est notable uniquement sur les concentrations faibles.
- L'invalidation avec le seuil à 99,9% (courbe rouge sur le graphique) supprime des données dont les valeurs sont incohérentes avec l'analyseur de référence
- L'invalidation avec le seuil à 99,9% (courbe rouge sur le graphique) tend à supprimer trop de données qui semblent être valides. Ce constat confirme le problème de précision du capteur concernant la mesure d'humidité relative.

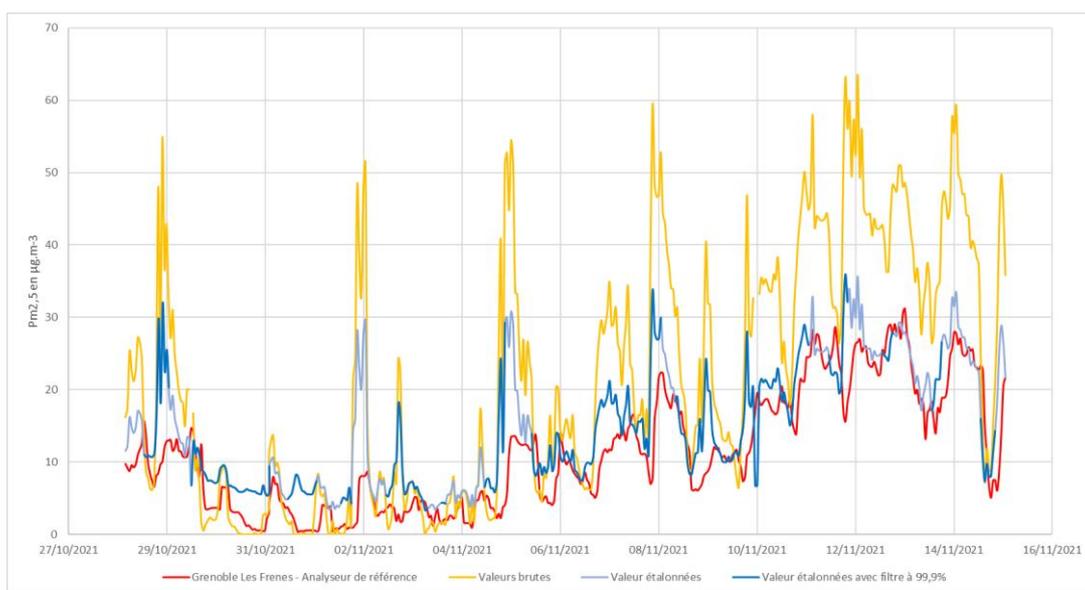


Figure 27 : Evolution temporelle des données du micro-capteur de Grenoble avant (en jaune) et après (en bleu) étalonnage et filtrage. La station fixe de référence de Grenoble est en rouge.

Afin d'approfondir plus finement l'apport de l'ajustement, une étude des écarts entre la station fixe et le micro-capteur corrigé de Grenoble a été réalisée.

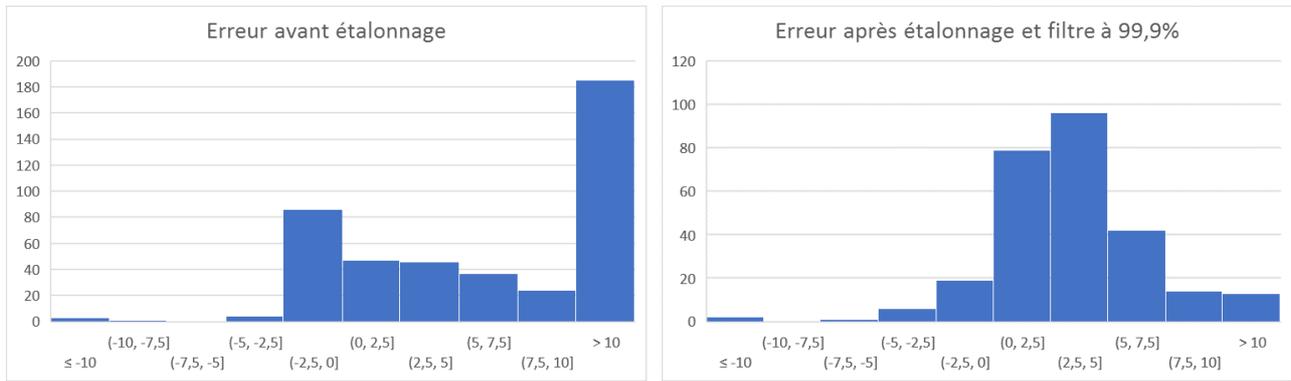


Figure 28 : Histogrammes des erreurs entre la station fixe des Frênes et le micro-capteur de Grenoble. A gauche, histogramme avant application du protocole d'ajustement. A droite histogramme après application du protocole d'ajustement.

Après ajustement, la fréquence les erreurs supérieures à  $10 \mu\text{g.m}^{-3}$  est très largement diminuée (200 observations supérieures à  $10 \mu\text{g.m}^{-3}$  avant correction, contre une dizaine après correction). Les histogrammes montrent en effet que la correction permet de retrouver une distribution des erreurs centrée autour de zéro. La plupart des erreurs sont comprises entre  $-5 \mu\text{g.m}^{-3}$  et  $5 \mu\text{g.m}^{-3}$ .

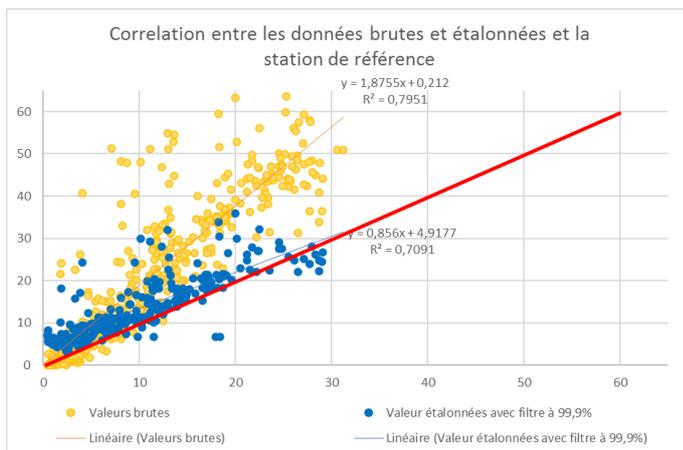


Figure 29 : Corrélation entres les données brutes et étalonnées et la station de référence

Cet ajustement est appliqué sur l'ensemble des 30 micro-capteurs du réseau grenoblois (cf. Annexe 2 : Résultats d'application du protocole d'ajustement sur les 30 micro-capteurs de l'observatoire participatif grenoblois).

## 4.7. Premier test de correction géo-statistiques de la modélisation à partir des mesures

### Maximiser la corrélation entre le modèle et la mesure

Les données issues des micro-capteurs de l'observatoire participatif grenoblois préalablement filtrées et ajustées ont ainsi pu être intégrées lors d'un premier test dans une cartographie

grenobloise, en s'appuyant sur les conclusions décrites dans la partie 3.4 *Première réflexion d'intégration des données micro-capteurs dans les cartographies locales de particules*. Le description complète d'application des protocoles est décrit dans l'Annexe 3 : *Description des étapes d'extraction des données mesurées, modélisées suivant les différents protocoles*.

Lorsque toutes les étapes : validation, étalonnage et filtrage des mesures par critère de corrélation sont mis en œuvre, le nombre d'observation est diminué de -38%. Afin d'intégrer de manière optimale les données issues de micro-capteurs dans la cartographie, et d'obtenir des cartes les plus réalistes possible, la corrélation entre le modèle et les mesures doit être positive et relativement élevée. Les données sont donc filtrées sur un critère de corrélation entre le modèle et la mesure appelé « filtre cartographique » (voir partie 3.4 *Première réflexion d'intégration des données micro-capteurs dans les cartographies locales de particules*). Ce filtre supprime, dans le cas concret d'application à la métropole grenobloise 13% des données. Il permet d'augmenter significativement la moyenne des corrélations modèle mesure horaire sur l'ensemble de la période. En effet, la moyenne des corrélations est initialement de 0.28. Le filtre sur l'humidité relative permet d'augmenter la corrélation entre le modèle et la mesure à 0.31 sur la moyenne des corrélations horaires. Le filtre cartographique permet de passer à une corrélation entre le modèle et la mesure à 0.81.

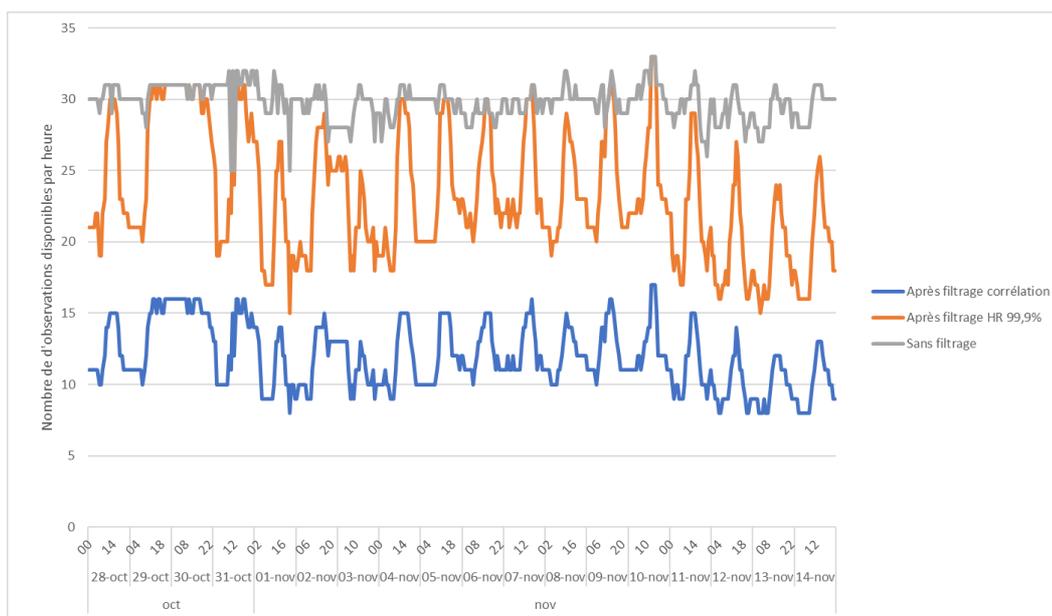


Figure 30 - Nombre d'observations disponibles par heure en fonction des différents filtres appliqués sur l'ensemble des capteurs de l'observatoire grenoblois

Plus en détails, (voir Figure 3031), le nombre de mesures disponibles par heure sans aucun traitement (courbe en gris ci-dessous) est relativement haut (entre 25 et 33 mesures disponibles sur 33 capteurs). Ce nombre est en revanche diminué lorsque le critère de validation par l'humidité relative des micro-capteurs est appliqué (courbe orange). La diminution du nombre d'observation disponible est plus importante pendant les périodes nocturnes de mesures. Le filtre cartographique par critère de corrélation modèle mesure (en bleu) est encore plus sélectif puisque le nombre de mesures disponible par heure varie entre 8 à 17 mesures par heure. Il n'y a pas de période spécifique observable pour les données filtrées par ce dernier.

## Intégration dans les cartographies par le Krigeage

Comme décrit dans la partie 3.4 *Première réflexion d'intégration des données micro-capteurs dans les cartographies locales de particules*, la dernière étape d'intégration des mesures de l'observatoire participatif grenoblois dans la cartographie consiste à réaliser un Krigeage des données issues des micro-capteurs en utilisant les prévisions de concentrations du modèle pour chaque heure de la période étudiée. La figure suivante permet d'observer l'impact des différentes étapes du protocole sur les données utilisées dans la correction géostatistique des cartes modélisées.

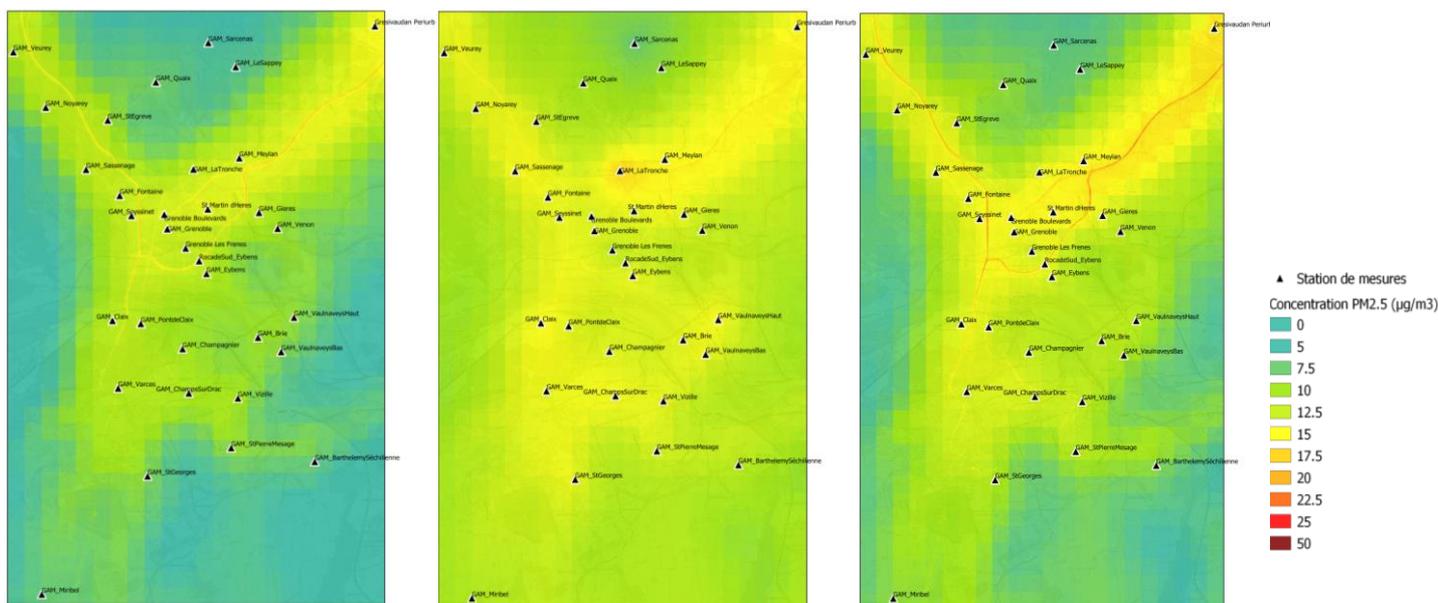


Figure 31 – A gauche : moyenne du modèle actuellement utilisé Combine Adapstat / Au milieu : moyenne du modèle Combine Adapstat avec Krigeage des observations (Stations Références et Micro-capteurs FIXIs (filtre de validation des humidités relatives à 99,9% et étalonné par la méthode des coefficients fixes sur Grenoble les Frênes) / A droite : moyenne du modèle Combine Adapstat avec Krigeage des observations (Stations Références et Micro-capteurs FIXIs (filtre de validation des humidités relatives à 99,9% et étalonné par la méthode des coefficients fixes sur Grenoble les Frênes) et filtrage des mesures par critères de corrélation sur la période du 28 octobre au 15 novembre 2021

La première cartographie (à gauche) illustre le modèle de référence actuel (combine Adaptstat) utilisé sur la région Auvergne-Rhône-Alpes.

La cartographie du milieu intègre les données issues du filtre sur le seuil d'humidité relative mais sans le filtre cartographique (filtre de corrélation modèle mesures). Sur cette carte, les concentrations de fond sont plus élevées et certaines mesures ont une influence particulièrement significative comme celle du capteur de La Tronche par exemple. Les concentrations autour de ce point sont en effet supérieures à  $20\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  sur plusieurs kilomètres et ont une influence sphérique notable, alors que le modèle Combine Adapstat (carte de gauche) présente des influences liées à la configuration routière (en lien avec le modèle SIRANE prenant en compte les émissions trafic et la physique lié à la dispersion atmosphérique dans les rues).

La cartographie de droite intègre les données issues du filtre par le seuil d'humidité et du filtre cartographique. Cette carte géo-corrigée permet ainsi de limiter les zones d'influences sphériques

tout en conservant une interpolation sans biais et en gardant une certaine cohérence avec le modèle Combine Adapstat. Les concentrations en milieu trafic sont plus élevées que le modèle de référence. Les concentrations sont également plus élevées en moyenne vallée avec des niveaux globalement plus élevés à des altitudes plus hautes que sur la cartographie de référence.

### Une première approche d'évaluation de la performance du krigeage

Pour évaluer la performance du krigeage par rapport au modèle, la validation croisée a été utilisée. Cette méthodologie permet d'estimer « le poids » de chaque mesure dans le jeu de données et d'estimer en première approche la performance de la correction au niveau des points de mesures. Chaque station de mesure a une importance spatiale différente dans la correction géostatistique. Pour évaluer l'importance des stations de manière isolée dans le krigeage et également la performance du krigeage, la différence des biais absolus est calculée pour chaque station de la manière suivante :

$$DIFF_{MGE} = \overline{MGE^{XVALID}} - \overline{MGE^{MOD}} = \frac{\sum_{t=1}^{t=NT} |C_t^{XVALID} - C_t^{MES}|}{NT} - \frac{\sum_{t=1}^{t=NT} |C_t^{MOD} - C_t^{MES}|}{NT}$$

**Avec :**

$DIFF_{MGE}$  : Différence des biais absolus Validation croisée et Modèle Combine Adapstat de la station

$\overline{MGE^{XVALID}}$  : Biais absolu moyen de la validation croisée de la station

$\overline{MGE^{MOD}}$  : Biais absolu moyen du modèle Combine Adapstat de la station

NT : nombre d'observations sur la période de la station

$C_t^{XVALID}$  : Concentration pour l'échéance t issue de la validation croisée au niveau de la station

$C_t^{MOD}$  : Concentration pour l'échéance t issue de la validation croisée au niveau de la station

$C_t^{MES}$  : Concentration pour l'échéance t issue du modèle Combine Adapstat au niveau de la station de mesures

Cette différence permet d'identifier pour chaque station si le krigeage sans cette station est plus performant que le modèle Combine Adapstat et inversement.

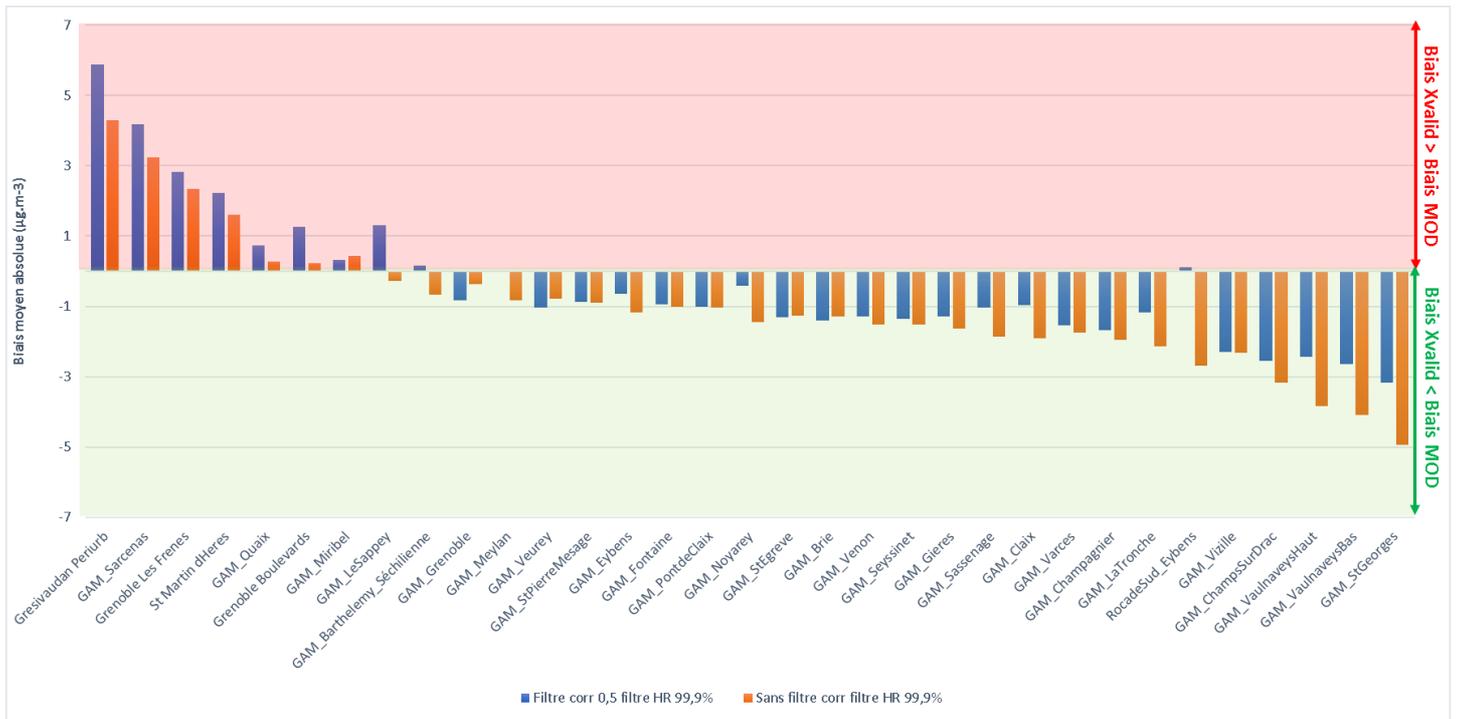


Figure 32 - Ecart entre les biais absolus de la validation croisée et modèle Combine Adapstat par station de mesures. Partie rouge, les valeurs sont positives, le biais de la validation croisée > Biais du modèle. Partie verte : les biais de la validation croisée sont inférieurs au biais du modèle.

Globalement la différence des biais est comprise entre -5 et 5 µg.m<sup>-3</sup>. Ainsi, l'impact maximal du retrait d'une des stations de mesures serait de cet ordre de grandeur sur la cartographie.

La différence des biais est positive pour les stations comme Grenoble Periurbaine, Grenoble les Frènes, Sarcenas. Ainsi, si on enlève indépendamment une de ces stations du krigeage, ce dernier sera moins performant en termes de biais que le modèle de référence. Ces stations ont donc un poids potentiellement important dans la correction. Pour les autres stations où le biais du modèle est plus important que la validation croisée, le fait d'enlever une de ces stations du krigeage n'aurait pas de poids dans la correction.

Cette méthode n'est néanmoins pas complète pour espérer optimiser le réseau de mesure car elle ne permet de mesurer le retrait que d'une seule station. Pour aller plus loin, il serait nécessaire de réaliser des validations croisées en enlevant des combinaisons de ces stations ce qui a encore aujourd'hui un coût de calcul très important.

# 5. Conclusions et perspectives

Le travail mené dans le cadre de ce projet a permis d'appréhender une nouvelle façon d'approcher l'exploitation des données mesurées par micro-capteurs.

Dans le cadre de cette étude, le processus de déploiement (protocoles d'installation et d'intercomparaison) et le processus de traitement de la données (protocoles de validation et d'ajustement) ont été formalisés et décrits dans des fiches méthodologiques (Annexe 4 ) permettant d'accompagner au mieux les collectivités qui seraient démarchées par des entreprises privées et intéressées par la mise en place de mesures par micro-capteurs sur leur territoire.

Ces différents protocoles présentent les niveaux de connaissances actuels chez Atmo Auvergne-Rhône-Alpes et nécessitent d'être régulièrement mis à jour. La première application de ces protocoles sur des données concrètes et opérationnelles a été testée dans le cadre de l'observatoire participatif grenoblois déployés à l'automne 2021. Ce premier test a montré des résultats encourageants qu'il conviendrait de poursuivre, en particulier sur différents points techniques décrit ci-après :

- **Extrapolation temporelle du protocole d'ajustement des micro-capteurs** : l'objectif serait ici de tester de manière opérationnelle le protocole d'ajustement des micro-capteurs sur une année complète avec changement de saison (ajustement de type glissant ou bi-annuel). Le test actuel sur le territoire grenoblois a été effectué uniquement sur la saison hivernale. Il conviendrait de généraliser l'application du protocole à une année entière. Dans ce contexte, il conviendrait également de tester et de mettre en place d'un point de vue opérationnel l'ajustement glissant tel que décrit dans le paragraphe 3.2 *Elaboration d'un protocole pour la validation de données micro-capteurs* afin de perfectionner la méthodologie.
- **Extrapolation géographique du protocole de validation des micro-capteurs** : l'objectif est ici d'exporter le protocole de validation par réseau de neurones à de nouveaux territoires (autre que le territoire grenoblois) et d'évaluer la robustesse de la méthodologie. Il s'agit également de poursuivre l'étude sur la fiabilité et la précision des capteurs d'humidité.
- **Etude sur l'apport potentiel des micro-capteurs dans les cartographies** : l'objectif est d'établir des premiers éléments méthodologiques pour quantifier l'apport des micro-capteurs dans les cartographies fines échelles. Il convient dans ce cadre d'effectuer un premier test cartographique des concentrations sur plusieurs mois avec changement de saison en fusionnant les nouvelles observations par micro-capteurs avec celles issues des modèles physico-chimiques d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes. Une réflexion devra être menée sur une approche permettant de quantifier l'apport de l'utilisation des micro-capteurs dans les cartographies fine échelle régionales
- **Confrontation des résultats des protocoles de validation, et d'ajustement au code national SESAM, développé en 2021 par l'INERIS et confirmer la pertinence de son application sur notre territoire régional.** Il s'agirait d'installer, et de prendre en main l'outil SESAM, et d'effectuer un premier test pour évaluer la pertinence d'utilisation de cet outil sur notre territoire régional, et si possible confronter la méthodologie établie en interne à la méthodologie nationale.

# Annexes

## Annexe 1. Tableau des moyennes mesurées par les 30 micro-capteurs sur GAM du 1<sup>er</sup> Octobre au 17 Novembre 2021

Moyennes des mesures des micro-capteurs pour l'ensemble des données pour les PM<sub>10</sub>, les PM<sub>2,5</sub>, les PM<sub>1</sub>, la température et l'humidité.

Communes	Moyennes				
	PM10 (µg/m <sup>3</sup> )	PM2,5 (µg/m <sup>3</sup> )	PM1 (µg/m <sup>3</sup> )	Température (°C)	Humidité relative (%)
Vizille	25	21	14	12	96
Saint-Georges-de-Commiers	22	19	13	14	75
Noyarey	21	18	13	11	82
La Tronche	20	19	13	11	91
Vaulnaveys-le-Haut	20	17	12	11	75
Eybens	20	17	12	11	83
Grenoble	19	17	12	15	85
Brié-et-Angonnes	19	16	11	11	96
Champs-sur-Drac	19	16	11	15	75
Fontaine	18	15	11	12	97
Saint-Pierre-de-Mésage	18	14	10	11	95
Meylan	18	15	10	12	77
Claix	17	15	10	12	82
Varces-Allières-et-Risset	17	15	11	13	89
Vaulnaveys-le-Bas	17	15	11	14	73
Sassenage	17	15	11	13	68
Gières	17	14	10	12	81
Saint Egrève	15	13	10	13	92
Herbeys	15	13	9	-	-
Miribel-Lanchâtre	15	12	9	11	82
Venon	14	13	9	13	69
Veurey-Voroize	14	12	9	12	93
Le Pont-de-Claix	13	11	8	14	76
Le Sappey-en-Chartreuse	12	10	7	8	80
Champagnier	11	10	8	16	64
Quaix-en-Chartreuse	11	9	7	11	77
Saint-Barthélemy-de-Séchilienne	10	9	7	10	93

Seyssinet-Pariset	10	9	7	14	92
Proveysieux	9	8	6	13	72
Sarcenas	8	7	4	8	77

## Annexe 2 : Résultats d'application du protocole d'ajustement sur les 30 micro-capteurs de l'observatoire participatif grenoblois

Le tableau ci-dessous détaille, pour chaque micro-capteur, la valeur de la moyenne avant et après application du protocole d'ajustement.

	Barthelemy chilienne	Brie	Champagnier	Champs sur Drac	Claix	Eybens	Fontaine	Gieres	Grenoble	LaTronche	LeSappey	Meylan	Miribel	Noyarey	PontdeClaix
Moyenne brute	11	20	13	22	22	22	20	20	21	28	11	21	15	21	13
Moyenne ajustée	9	14	11	16	15	15	14	14	15	28	9	15	11	15	11

	Quaix	Sarcenas	Sassenage	Seyssinet	StEgreve	StGeorges	StPierreMesage	Varces	VaulnaveysBas	VaulnaveysHaut	Venon	Veurey	Vizille	St Martin d' Heres(réf)	Grenoble les Frênes
Moyenne brute	11	5	20	11	18	22	18	21	18	22	16	16	27	13	11
Moyenne ajustée	10	6	15	10	13	16	13	15	14	16	13	12	17	13	11

Tableau 7 : Moyenne des micro-capteurs de l'étude avant et après application du protocole d'ajustement

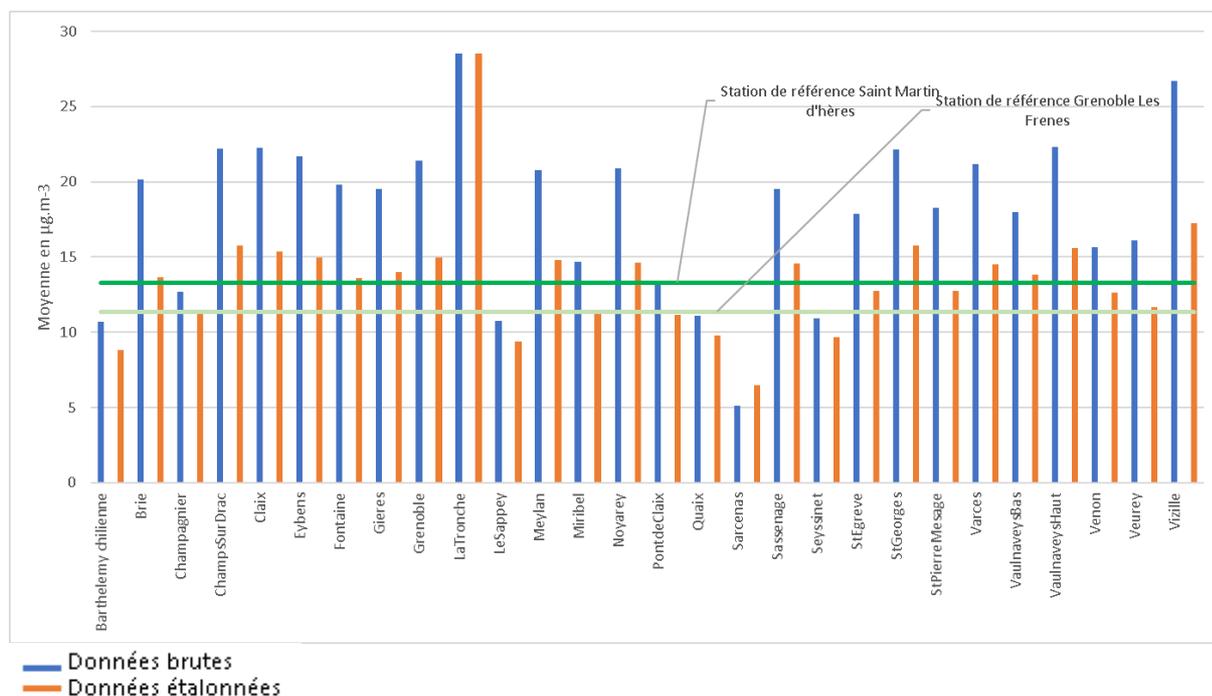
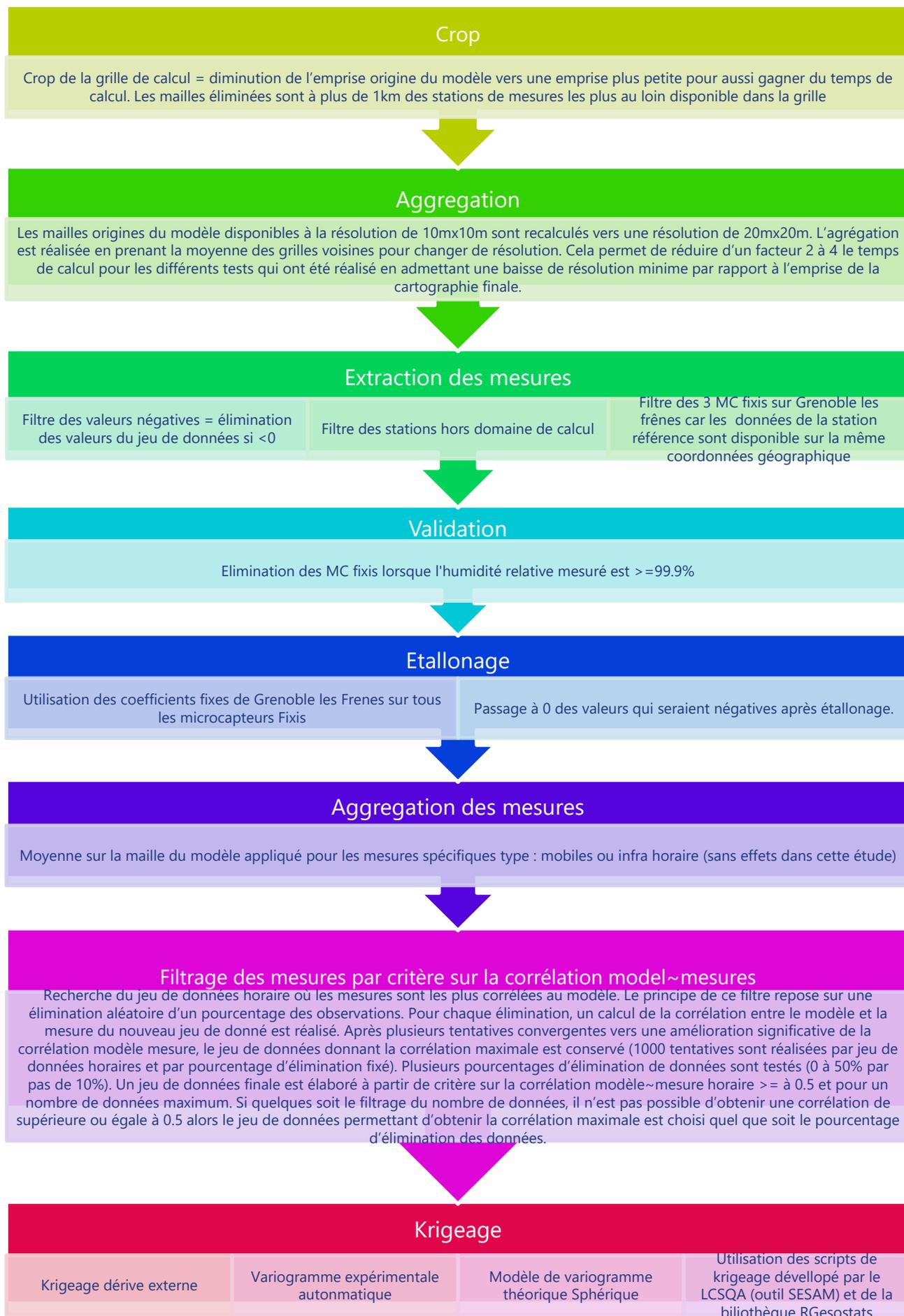


Figure 33 : Valeurs avant et après étalonnage comparées aux stations de référence proches

## Annexe 3 : Description des étapes d'extraction des données mesurées, modélisées suivant les différents protocoles



## Annexe 4 : Fiches méthodologiques des 4 protocoles d'utilisation des micro-capteurs

Cette annexe contient les 4 fiches méthodologiques détachables de 4 pages chacune permettant l'utilisation des micro-capteurs :

- Protocole d'intercomparaison ou Comment intercomparer les micro-capteurs ?
- Protocole d'installation ou Comment installer les micro-capteurs ?
- Protocole d'ajustement ou Comment corriger la donnée ?
- Protocole de validation ou Comment valider la donnée ?

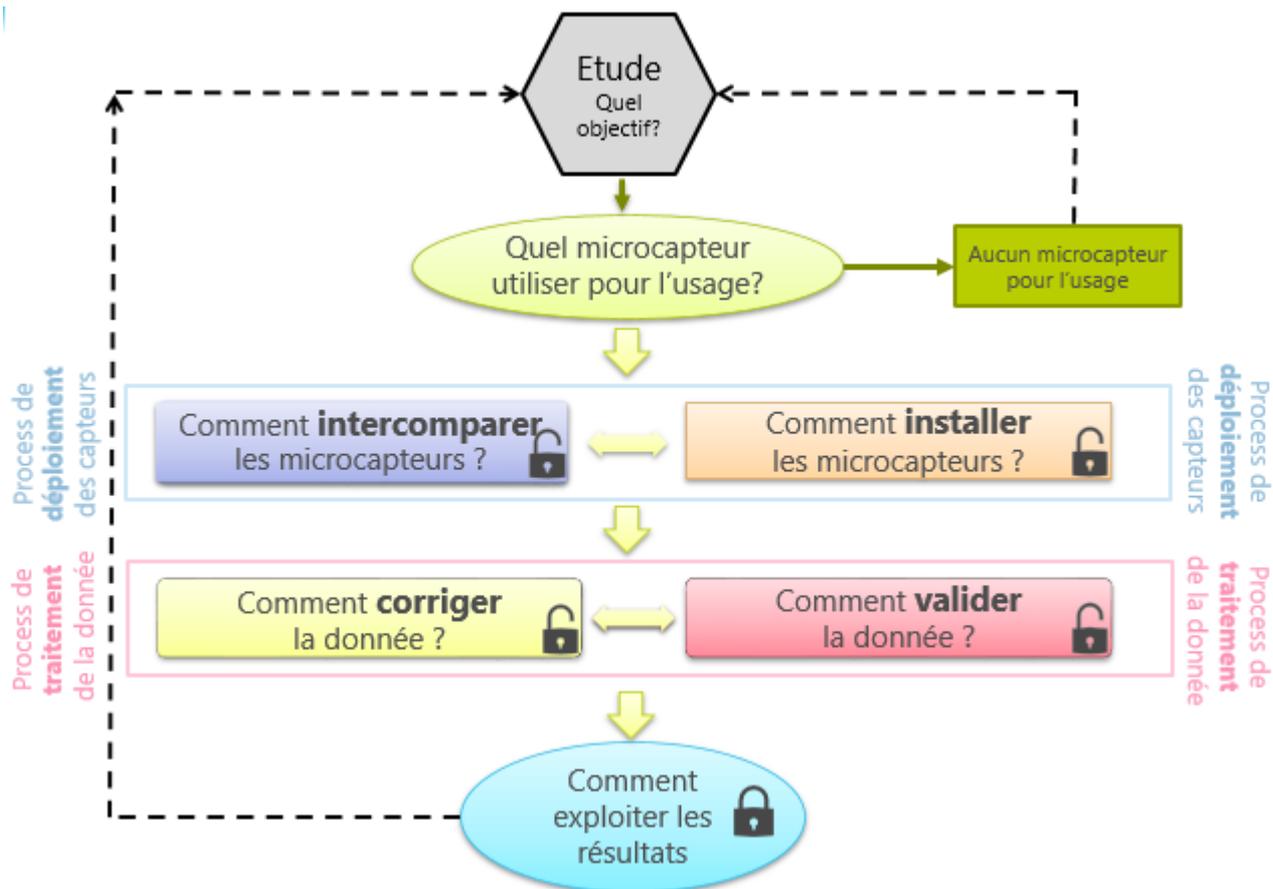


Figure 34 : Cartographie des protocoles et des verrous scientifiques à lever pour optimiser l'utilisation des micro-capteurs de qualité de l'air

# PROTOCOLE D'INTERCOMPARAISON

## PROCESSUS DE DEPLOIEMENT DES MICRO-CAPTEURS

Cette fiche s'applique à



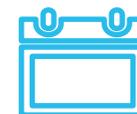
toute marque de  
microcapteurs



PM<sub>2.5</sub> PM<sub>10</sub>,  
humidité,  
température



en fixe ou mobile

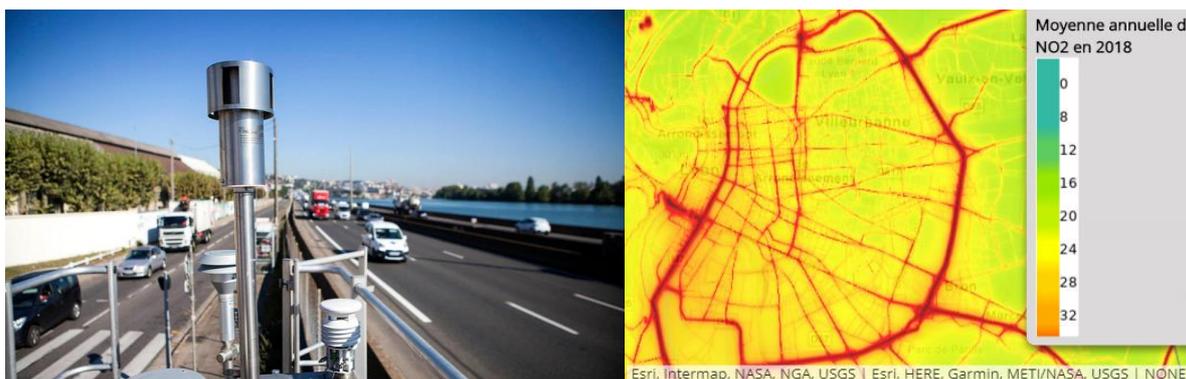


1 fois par an



### 1. Contexte : l'expertise d'Atmo au profit des micro-capteurs

Depuis près de 40 ans, les équipes de l'observatoire Atmo Auvergne-Rhône-Alpes mesurent, et analysent la qualité de l'air respirée sur l'ensemble du territoire régional. Les mesures des 90 stations de surveillance (plus de 600 mesures par jour) alimentent les outils statistiques et de modélisation permettant de produire des cartes de pollution et de prévision de grande précision.

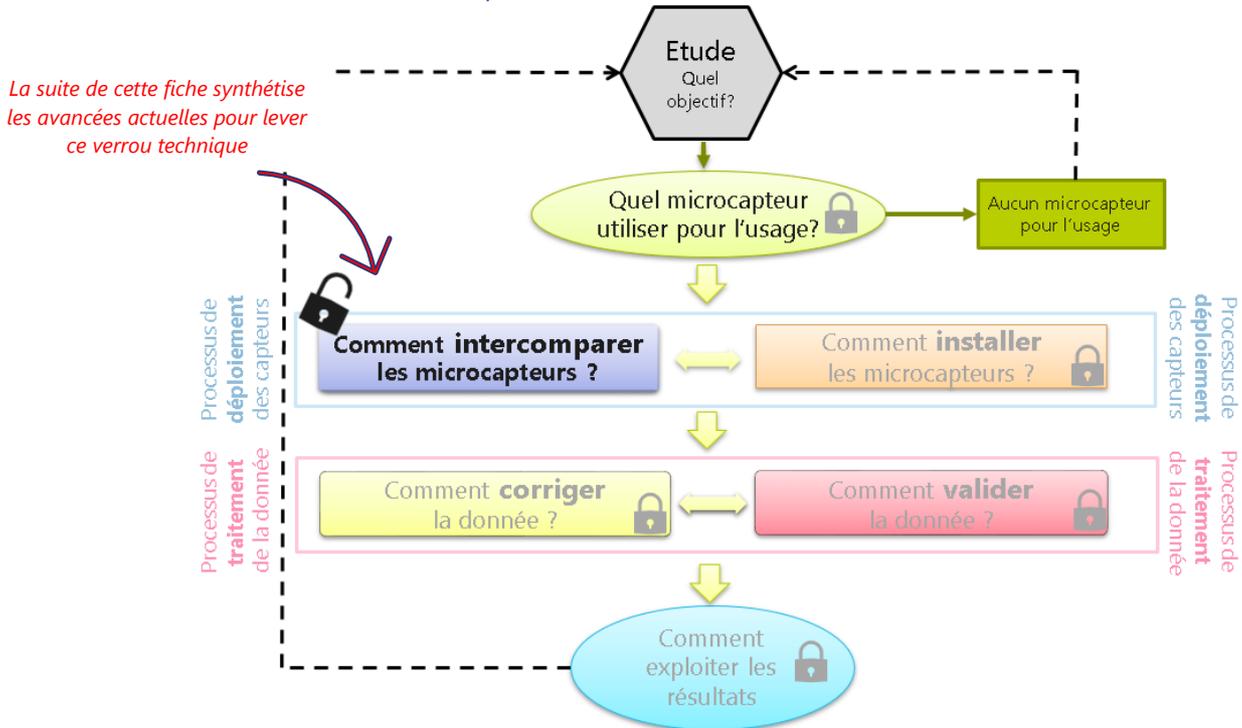


Station fixe réglementaire d'Atmo AuRA (à gauche) et cartographie réglementaire du polluant NO<sub>2</sub> pour l'année 2018 sur Lyon (à droite)

L'émergence de micro-capteurs de qualité de l'air, moins précis que les stations traditionnelles mais à un coût beaucoup plus raisonnable, pourrait permettre à terme une complémentarité des connaissances de la pollution grâce à un suivi en temps réel avec une granularité spatiale très fine. Néanmoins, l'utilisation de ces réseaux de micro-capteurs à bas coût pose différents verrous scientifiques et technologiques loin d'être maîtrisés (validation, positionnement optimal des capteurs, métrologie et réétalonnage des capteurs, analyse des masses de données remontées pour une caractérisation fine de la pollution, temps de maintenance, etc.). Ces problématiques sont d'autant plus complexes dans le cas des réseaux hétérogènes (capteurs avec des résolutions et des précisions différentes, capteurs mobiles et fixes, etc.)

## 2. Identification des différents verrous scientifiques à lever

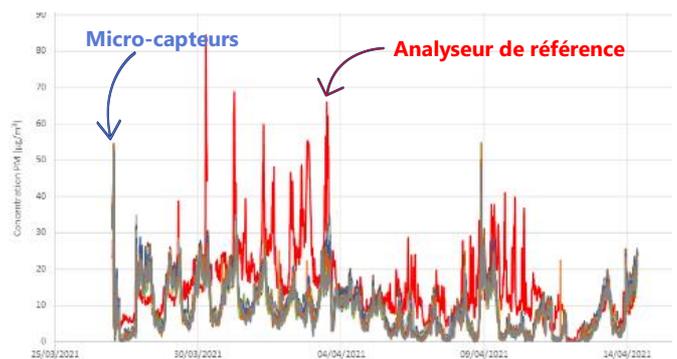
Une cartographie des principaux verrous techniques à lever a été élaborée, basée sur la définition d'objectif d'utilisation souhaitée du micro-capteur.



La présente fiche traite des connaissances actuelles sur le verrou technique « Comment intercomparer les microcapteurs ? ». Trois autres fiches également disponibles décrivent les avancées actuelles sur les différents verrous identifiés : Comment installer les microcapteurs ? Comment corriger la donnée ? Comment valider la donnée ?

## 3. L'œil d'Atmo : pourquoi une vérification métrologique ?

Les premières études et exploitations montrent que les micro-capteurs présentent une fiabilité bien moindre que les 90 stations de mesures réglementaires. En effet, la variabilité intrinsèque de ces micro-capteurs, la difficulté de calibration, et la diversité des conditions d'acquisition (typologie, exposition, conditions météorologiques, vitesse) rendent la mesure non exploitable en l'état et nécessite un important travail de validation de la donnée.



*Ecarts entre les données de la station de référence et les données micro-capteurs*

Cette validation métrologique en amont du déploiement des micro-capteurs sur site est indispensable :

- 1- pour s'assurer de la reproductibilité des mesures des micro-capteurs entre eux
- 2- pour s'assurer de leur cohérence avec la station de référence dans un environnement connu.

## 4. Protocole d'intercomparaison : comment intercomparer les micro-capteurs ?

### Préconisation 1 : Mettre en place une période d'intercomparaison

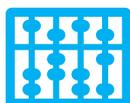
Une période d'intercomparaison, préalable au déploiement sur site, est indispensable pour vérifier que les micro-capteurs fonctionnent correctement, et restent cohérent avec une mesure réglementaire.

Durant cette intercomparaison, tous les micro-capteurs sont comparés avec un analyseur de référence homologué sur une [station fixe Atmo réglementaire](#). La typologie de la station de référence doit être identique à celle des sites des micro-capteurs. L'intercomparaison est mise en place pour une durée de 7 à 20 jours pendant une saison représentative à celle des mesures par micro-capteurs. Si la période de mesures est prévue sur plusieurs saisons, l'intercomparaison doit avoir lieu durant une période où les concentrations vont varier dans une gamme la plus large possible (souvent l'hiver).

A noter que dans la perspective d'un recalage des données (voir Fiche Comment corriger la donnée ?), il est également nécessaire qu'il y ait sur la station de référence choisie un micro-capteur du même type qui tourne en continu en référence.

Si le nombre de micro-capteurs à déployer dépasse 100, plusieurs problèmes techniques peuvent survenir lors de l'intercomparaison (pas suffisamment de place disponible sur la station fixe, problème de surcharge électrique, etc). Dans ce cas, il est préconisé d'anticiper le temps nécessaire pour enchaîner plusieurs intercomparaisons à la suite. A défaut, un sondage aléatoire par lot peut être mis en place pour sélectionner les micro-capteurs qui participeront à l'intercomparaison.

Au moment de l'installation, il convient de s'assurer du bon démarrage des capteurs. Pendant l'intercomparaison, la remontée des données doit être vérifiée tous les 3 jours.



**Totalité des micro-capteurs si possible. Sinon sondage aléatoire par lot**



**Sur la station Atmo de référence de la zone d'étude**



**Durée totale 7 à 20 jours**



**Tous les 3 jours, s'assurer de la remontée des données**

### Préconisation 2 : S'assurer de la cohérence des micro-capteurs entre eux pendant l'intercomparaison

La répétabilité des micro-capteurs est testée grâce à un test de GRUBBS. Ce test est appliqué à la fin de la période d'intercomparaison sur les facteurs suivants : PM10, PM2.5, et si possible, température et humidité relative mesurées par les micro-capteurs.

Ce test statistique permet de vérifier la variabilité de l'ensemble des micro-capteurs en identifiant l'existence d'un appareil aberrant ou significativement différents du reste du groupe. Il permet d'isoler les micro-capteurs différents de l'ensemble du groupe.

#### Test de GRUBBS

En supposant que les données sont approximées par une loi normale, la statistique de test est la suivante :

$$G = \frac{\max_{i=1, \dots, N} |Y_i - \bar{Y}|}{s}$$

avec  $\bar{Y}$  et  $s$  désignant respectivement la moyenne de l'échantillon des micro-capteurs et l'écart type. La statistique du test de Grubbs est le plus grand écart absolu par rapport à la moyenne de l'échantillon divisé par l'écart type de l'échantillon.

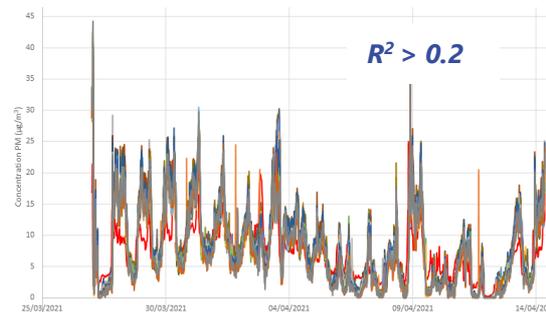
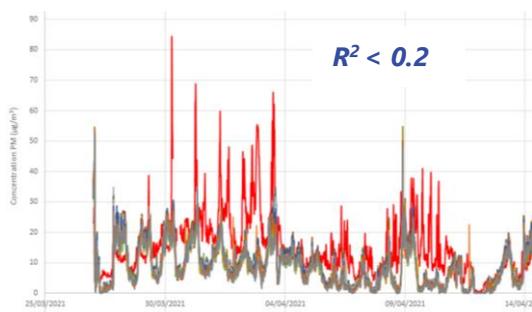
Les capteurs qui sont rejetés par ce test ne peuvent pas, en l'état, être déployés sur site. Il convient de procéder à une maintenance, de recommencer l'intercomparaison (période de « chauffe » du micro-capteur) et de contacter le fournisseur si le problème persiste.

### Préconisation 3 : S'assurer de la cohérence avec la station de référence d'Atmo pendant la période d'intercomparaison

La comparaison avec l'analyseur de référence réglementaire s'effectue à l'aide du coefficient de détermination linéaire de Pearson,  $R^2$  pour les concentrations de particules  $PM_{10}$  et  $PM_{2.5}$ .

A la fin de la période d'intercomparaison, pour chaque micro-capteur, le coefficient  $R^2$  est calculé entre les données  $PM_{10}$  (et  $PM_{2.5}$ ) mesurées par le micro-capteur et la station fixe.

- Si  $R^2 < 0.2$  pour les  $PM_{2.5}$  ou les  $PM_{10}$ , le micro-capteur est considéré comme non fonctionnel pour cette mesure sur la période. Si la mesure en question est indispensable pour l'étude, le micro-capteur doit être retourné au fournisseur ou réparé en interne.
- Si  $R^2 > 0.2$  pour les  $PM_{2.5}$  et les  $PM_{10}$ , le micro-capteur est considéré comme fonctionnel et peut être déployé sur site.



Période d'intercomparaison de micro-capteurs en comparaison d'un analyseur fixe réglementaire (en rouge).  
A gauche  $R^2 < 0.2$ , à droite  $R^2 > 0.2$ .

## 5. Pour aller plus loin

**Rapport complet Atmo Aura :** « Intégration des données micro-capteurs dans l'observatoire, 2021 ».  
**Note de cadrage du LSCQA pour l'utilisation des capteurs :** « Synthèse des travaux 2017-2020 issus du Groupe de Travail (GT) « Micro-Capteurs pour l'évaluation de la qualité de l'air »

### Contact

Steve MICALLEF, Unité Innovation  
smicallef@atmo-aura.fr  
Standard : 09 72 26 48 90



- Fiche Méthodologique IMOBS V1 Mai 2022-  
- Public interne et partenaires -

# PROTOCOLE D'INSTALLATION

## PROCESSUS DE DEPLOIEMENT DES MICRO-CAPTEURS

Cette fiche s'applique à



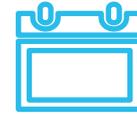
Toute marque de  
micro-capteur



PM<sub>2,5</sub> PM<sub>10</sub>,  
NO<sub>2</sub>, tout autres  
polluants



En fixe



A la mise en place



### 1. Contexte : l'expertise d'Atmo au profit des micro-capteurs

Depuis près de 40 ans, les équipes de l'observatoire Atmo Auvergne-Rhône-Alpes mesurent, et analysent la qualité de l'air respirée sur l'ensemble du territoire régional. Les mesures des 90 stations de surveillance (plus de 600 mesures par jour) alimentent les outils statistiques et de modélisation permettant de produire des cartes de pollution et de prévision de grande précision.

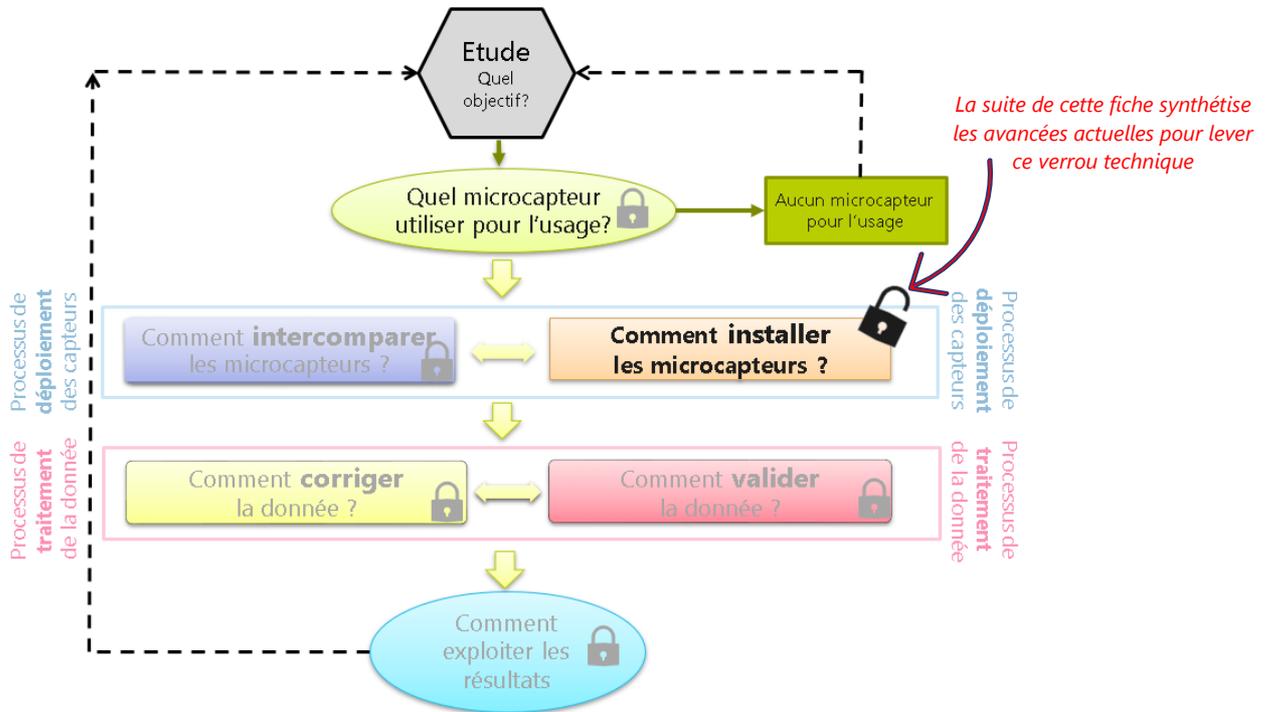


Station fixe réglementaire d'Atmo AuRA (à gauche) et cartographie réglementaire du polluant NO<sub>2</sub> pour l'année 2018 sur Lyon (à droite)

L'émergence de micro-capteurs de qualité de l'air, moins précis que les stations traditionnelles mais à un coût beaucoup plus raisonnable, pourrait permettre à terme une complémentarité des connaissances de la pollution grâce à un suivi en temps réel avec une granularité spatiale très fine. Néanmoins, l'utilisation de ces réseaux de micro-capteurs à bas coût pose différents verrous scientifiques et technologiques loin d'être maîtrisés (validation, positionnement optimal des capteurs, métrologie et réétalonnage des capteurs, analyse des masses de données remontées pour une caractérisation fine de la pollution, temps de maintenance, etc.). Ces problématiques sont d'autant plus complexes dans le cas des réseaux hétérogènes (capteurs avec des résolutions et des précisions différentes, capteurs mobiles et fixes, etc.)

## 2. Identification des différents verrous scientifiques à lever

Une cartographie des principaux verrous techniques à lever a été élaborée, basée sur la définition d'objectif d'utilisation souhaitée du micro-capteur.



La présente fiche traite des connaissances actuelles sur le verrou technique « Comment installer les microcapteurs ? ». Trois autres fiches également disponibles décrivent les avancées actuelles sur les différents verrous identifiés : Comment intercomparer les microcapteurs ? Comment corriger la donnée ? Comment valider la donnée ?

## 3. L'œil d'Atmo : pourquoi un protocole d'installation ?

Du fait de sa métrologie et de son système de fonctionnement, le micro-capteur est particulièrement sensible à l'influence de certains paramètres environnementaux, tels que l'ensoleillement, la hauteur par rapport au sol, l'encaissement et la ventilation au niveau du point d'accroche... Ces différents paramètres peuvent en effet impacter de manière significative les concentrations relevées par le micro-capteur et doivent ainsi être considérés lors de l'installation de l'appareil.

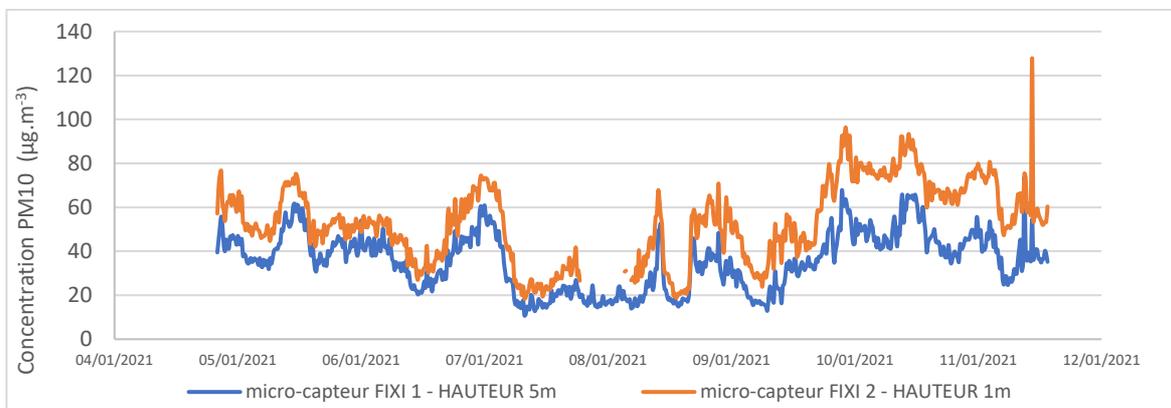


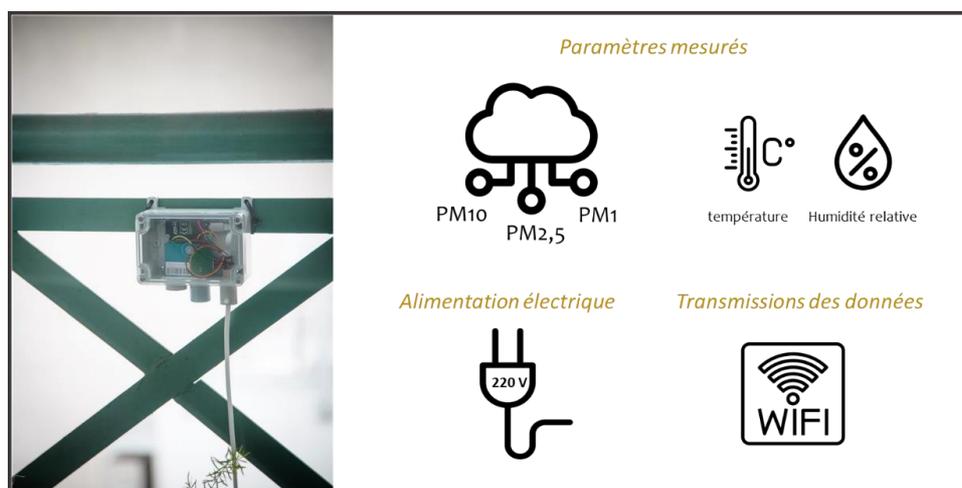
Figure 35: Concentrations en PM<sub>10</sub> de 2 micro-capteurs FIXIs situés sur un même site à des hauteurs différentes

A l'instar des appareils de mesures réglementaires, une bonne connaissance de l'environnement de mesure d'un micro-capteur permettra de mieux comprendre certains événements particuliers, de les traiter et les analyser de manière adéquate ou de les enlever du jeu de données analysées si nécessaire, selon l'objectif et la finalité de l'étude.

Aussi, l'application du protocole d'installation à l'ensemble des micro-capteurs faisant partie d'un réseau de mesure permet d'assurer une bonne représentativité de chaque appareil vis-à-vis de l'objectif final de la campagne de mesures, ainsi qu'une bonne comparabilité entre les différents appareils.

Cette fiche méthodologique a été construite à partir de notre expérience du déploiement de plusieurs réseaux de mesures s'appuyant sur le système FIXI, le micro-capteur de particules fines de la Captothèque. Ce micro-capteur est alimenté sur prise électrique, communique en Wifi et utilise un sensor PMS7003.

Ces réseaux de mesures peuvent être déployés sur des périodes allant de quelques mois à plusieurs années.



La méthode décrite ici peut s'appliquer au déploiement de réseaux construits avec d'autres micro-capteurs que les FIXI mais doit être adaptée selon l'objectif des mesures (sensibilisation citoyenne, caractérisation des niveaux de fond, suivi de chantier, étude de zone...) et le polluant considéré.

## 4. Protocole d'installation de micro-capteurs

### Préconisation 0 : Respecter, dans la mesure du possible, les recommandations du LCSQA

Le LCSQA (Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air) fournit des préconisations en termes de choix de site de mesure et d'installation des appareils de mesures de qualité de l'air. Celles-ci permettent d'assurer que les données seront de bonne qualité et non pas altérées par quelque perturbation environnementale, en particulier pour des mesures réglementaires de référence. Pour l'installation des micro-capteurs, qui restent des mesures indicatives et non réglementaires, il est ainsi recommandé de suivre, dans la mesure du possible, ces recommandations : en particulier celles relatives à la hauteur de l'appareil par rapport au sol, l'aérodynamie au niveau du site ou encore l'ensoleillement. Si les critères les plus importants, au regard de l'installation de micro-capteurs fixes de particules fines sont repris et détaillés plus bas, l'ensemble des recommandations du LCSQA sont présentées dans le guide « [Conception, implantation et suivi des stations françaises de surveillance de la qualité de l'air](#) ».

## Préconisation 1 : S'assurer de la bonne représentativité du site

Afin d'assurer une bonne représentativité des mesures selon l'objectif de l'étude (caractérisation de la pollution de fond ou d'une source en particulier, suivi de chantier ou d'un industriel, etc...), le site d'implantation du micro-capteur doit être choisi avec stratégie. Par exemple, dans le cas d'un micro-capteur de particules fines visant à caractériser le fond urbain au niveau d'une commune, il faut s'assurer de l'absence de zones fumeurs ou de zones de chantier à proximité, qui pourraient, du fait de la forte sensibilité de l'appareil et de la fréquence de mesure souvent très élevée des micro-capteurs, affecter considérablement les mesures.

## Préconisation 2 : S'assurer de la remontée des données

Selon le micro-capteur utilisé et ses caractéristiques techniques (mode d'alimentation électrique, mode de transmission de la donnée, fréquence de mesure...), il convient de vérifier en amont de l'installation définitive de l'appareil que celui-ci pourra fonctionner correctement tout au long de la période de mesure : pas de coupure d'électricité ou de réseau internet par exemple. Les différents critères techniques doivent ainsi être validés en amont auprès de la personne responsable sur place ou tester à travers une visite préalable à l'installation.

Dans le cas de micro-capteurs FIXIs, nécessitant une alimentation électrique et une connexion à un réseau wifi en continu, une installation sur des bâtiments publics peut s'avérer très fastidieuse, du fait des paramètres de sécurité informatique déployés sur ce type d'établissements, souvent inadaptés à la connexion d'appareils tels que les micro-capteurs. Des échanges poussés avec les équipes techniques présentes sur place sont alors nécessaires pour permettre l'installation du micro-capteur. Ces échanges peuvent s'avérer très lents et complexes, du fait du nombre important d'interlocuteurs impliqués et de leurs disponibilités. Si la connexion du capteur sur le wifi du bâtiment s'avère définitivement impossible, l'utilisation d'un routeur 4G/wifi équipé d'un abonnement GSM adapté peut être envisagé, en considérant bien le surcoût associé. Lorsque cela est possible, le lancement d'un appel à volontaires auprès de citoyens volontaires pouvant héberger un micro-capteur chez eux, est donc à privilégier, le wifi des particuliers étant généralement compatible avec la connexion de ces petits appareils.

Lorsque l'appel à volontaire auprès de citoyens n'est pas possible (par exemple dans le cadre d'observation spécifique, de surveillance industrielle ou autre), l'installation sur l'espace public ou bâtiment public est à privilégier avec une autorisation de la mairie. Dans ce cas, il est préconisé d'utiliser des appareils autonomes en termes d'alimentation électrique et de transmission des données. Dans le cas de capteur fonctionnant avec d'autres types de communication (LoRA, 3/4G, sigfox...), il faudra alors toujours s'assurer de la disponibilité des réseaux utilisés dans la zone définie et de leur pérennité.

## Préconisation 3 : Choisir la hauteur du capteur par rapport au sol

Les données des micro-capteurs doivent être comparables à celles mesurées par les appareils de référence. En se basant sur les directives du LCSQA relatives à l'installation des têtes de prélèvements, **le micro-capteur doit être positionné entre 1,5 m et 4m par rapport au sol**. Une hauteur plus élevée peut être étudiée si les circonstances techniques d'accroche ou de sécurité ne permettent pas de faire autrement.

## Préconisation 4 : Eviter un ensoleillement direct

Les micro-capteurs n'étant généralement pas équipés de système de régulation thermique ou hygrométrique, une forte chaleur et des rayonnements solaires importants peuvent entraîner une surchauffe à l'intérieur du boîtier et ainsi endommager les composants électroniques et/ou biaiser la mesure (ex dans le cas de la mesure des particules fines, cela peut en effet affecter le ratio gaz/particules).

Il convient ainsi d'éviter l'installation sur une façade orientée plein sud ou de choisir un emplacement abrité.

## **Préconisation 5 : Eviter l'encaissement de l'appareil et favoriser un emplacement ventilé**

Afin que l'air ne soit pas amené à stagner au niveau du capteur, il faut favoriser des emplacements avec une bonne aérologie. Aucun obstacle ne doit se trouver dans un périmètre de 1m autour du micro-capteur. Dans le cas spécifique de certains micro-capteurs non autonomes (FIXIs par exemple), la nécessité d'avoir accès à une alimentation électrique contraint souvent à installer l'appareil sur la façade d'un bâtiment. Il faut alors favoriser au mieux un emplacement bien ventilé malgré la présence d'un mur d'accroche.

## **Préconisation 6 : Favoriser dans la mesure possible un branchement électrique plutôt que les batteries solaires**

Le retour d'expérience actuel sur l'utilisation de micro-capteurs montre que la puissance des batteries solaires actuellement disponibles sur le marché à des coûts permettant des déploiements massifs, n'est pas toujours adaptée à une utilisation en continu du micro-capteur, avec notamment des problèmes d'alimentation et des coupures qui peuvent être fréquentes en fonction des saisons et de l'implantation (en particulier en saison hivernale ou en zone de montagne). L'évolution des coûts et des technologies devraient permettre d'envisager ultérieurement l'autonomie énergétique des micro-capteurs.

## **Préconisation 7 : S'assurer de l'accessibilité du micro-capteur**

Les micro-capteurs pouvant être sujets à des coupures fréquentes ou à d'autres dysfonctionnements techniques, une intervention par du personnel habilité doit être possible et facilitée afin d'assurer un fonctionnement optimal de l'appareil.

Le déploiement des micro-capteurs chez des particuliers présente là encore certains avantages. Il permet, d'une part, de simplifier les échanges et les interventions techniques avec un interlocuteur unique et, d'autres part, de faire réaliser à distance aux citoyens les premières interventions simples de maintenance. En revanche, si une intervention d'Atmo s'avère nécessaire, celle-ci devra être réalisée sur des horaires convenables pour les citoyens, qui sont plutôt disponibles en dehors des heures travaillées.

## **5. Exemple en situation réelle**

Dans le cas de la mise en place d'un observatoire citoyen sur le territoire de Grenoble-Alpes-Métropole, 30 micro-capteurs FIXIs ont été déployés sur les communes de l'agglomération entre l'été 2021 et l'été 2022. En lien avec les équipes municipales sur place, les 30 micro-capteurs ont été installés sur des bâtiments publics (mairies, écoles, services techniques...) respectant les critères d'implantation cités ci-dessus et assurant une représentativité du fond urbain au niveau des communes.



Le micro-captur FIXI déployé sur la commune d'Eybens est situé sur la façade ouest du bâtiment de la mairie. Il est positionné à environ 4m au-dessus du sol et ne reçoit que peu de rayonnement solaire. L'absence de sources majeures de particules fines à proximité assure sa représentativité de la pollution particulaire de fond au niveau de la commune.

## 6. Pour aller plus loin

**Rapport complet Atmo Aura** : « *Intégration des données micro-capturs dans l'observatoire, 2021* ».

**Note de cadrage du LCSQA pour l'utilisation des capturs** : « *Synthèse des travaux 2017-2020 issus du Groupe de Travail (GT) « Micro-Capturs pour l'évaluation de la qualité de l'air* »

**Critère d'implantation du LCSQA** : [https://www.lcsqa.org/system/files/media/documents/lcsqa2016-guide\\_stations\\_surveillance\\_qa.pdf](https://www.lcsqa.org/system/files/media/documents/lcsqa2016-guide_stations_surveillance_qa.pdf)

## Contact

Prisca RAY, Unité Innovation  
pray@atmo-aura.fr  
Standard : 09 72 26 48 90



# PROTOCOLE DE VALIDATION

## PROCESSUS DE TRAITEMENT DE LA DONNEE MICRO-CAPTEUR

Cette fiche s'applique à



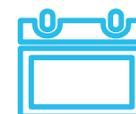
FIXI uniquement



PM<sub>2,5</sub> PM<sub>10</sub>,



En fixe

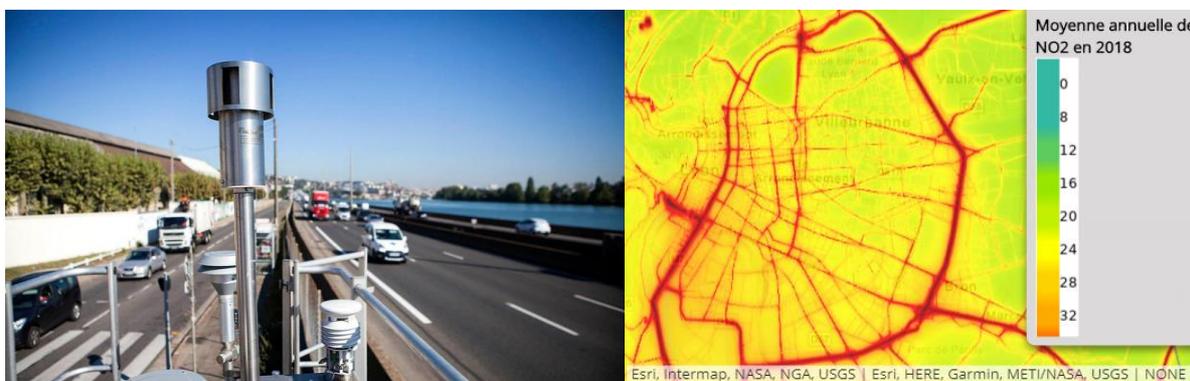


En routine



### 1. Contexte : l'expertise d'Atmo au profit des micro-capteurs

Depuis près de 40 ans, les équipes de l'observatoire Atmo Auvergne-Rhône-Alpes mesurent, et analysent la qualité de l'air respirée sur l'ensemble du territoire régional. Les mesures des 90 stations de surveillance (plus de 600 mesures par jour) alimentent les outils statistiques et de modélisation permettant de produire des cartes de pollution et de prévision de grande précision.

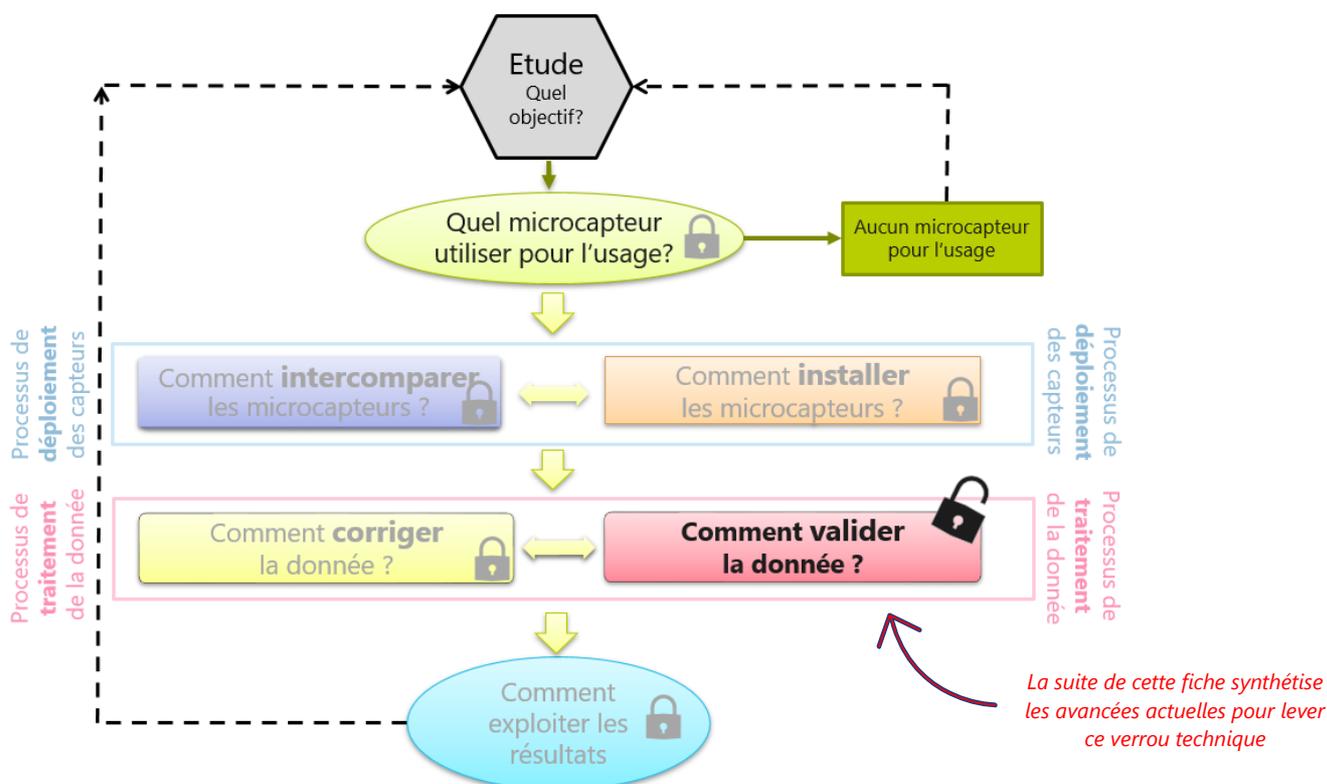


Station fixe réglementaire d'Atmo AuRA (à gauche) et cartographie réglementaire du polluant NO<sub>2</sub> pour l'année 2018 sur Lyon (à droite)

L'émergence de micro-capteurs de qualité de l'air, moins précis que les stations traditionnelles mais à un coût beaucoup plus raisonnable, pourrait permettre à terme une complémentarité des connaissances de la pollution grâce à un suivi en temps réel avec une granularité spatiale très fine. Néanmoins, l'utilisation de ces réseaux de micro-capteurs à bas coût pose différents verrous scientifiques et technologiques loin d'être maîtrisés (validation, positionnement optimal des capteurs, métrologie et réétalonnage des capteurs, analyse des masses de données remontées pour une caractérisation fine de la pollution, temps de maintenance, etc.). Ces problématiques sont d'autant plus complexes dans le cas des réseaux hétérogènes (capteurs avec des résolutions et des précisions différentes, capteurs mobiles et fixes, etc.)

## 2. Identification des différents verrous scientifiques à lever

Une cartographie des principaux verrous techniques à lever a été élaborée, basée sur la définition d'objectif d'utilisation souhaitée du micro-capteur.



La présente fiche traite des connaissances actuelles sur le verrou technique « Comment corriger la donnée ? ». Trois autres fiches également disponibles décrivent les avancées actuelles sur les différents verrous identifiés : Comment intercomparer les micro-capteurs ? Comment installer les micro-capteurs ? Comment corriger la donnée ?

## 3. L'œil d'Atmo : pourquoi valider la donnée microcapteurs ?

Tout comme pour les données issues d'analyseurs fixes réglementaires, la validation est un point central de l'utilisation, de l'exploitation et de l'interprétation des mesures effectuées par micro-capteurs. En effet, le 1<sup>er</sup> retour d'expérience des différentes études montre une variabilité temporelle et géographique très forte du taux d'invalidation en fonction de différents paramètres : variation de la température, de l'humidité, influence de l'environnement, de la métrologie non adaptée, de la dérive, d'une mauvaise paramétrisation. Certaines justifications de valeurs invalides ne sont pas encore identifiées.

Plusieurs facteurs explicatifs jouent sur la composition chimique des particules :

- **La saisonnalité** : la nature chimique des particules diffère en fonction de la source de pollution et donc de la saison.
- **Le bassin d'air** : par exemple, au même instant, la composition chimique sur Lyon peut être différente de la composition chimique sur Grenoble.
- **La typologie** : par exemple, les particules en proximité routière sont très liées au secteur trafic. A contrario, en milieu rural ou périurbain, la composition chimique des particules sera liée au chauffage.

Par ailleurs, des paramètres externes comme l'humidité ou la température peuvent directement influencer sur le système de mesure du micro-capteur et peuvent être des facteurs explicatifs de la différence entre micro-capteur et analyseur réglementaire.



## 4. Protocole de validation des mesures de micro-capteur pour les FIXI mesurant les particules fines

Le protocole présenté a été établi à partir des travaux menés pour un réseau de FIXI utilisant des sensors PMS7003.

### Préconisation 1 : Maintenir un échantillon des micro-capteurs sur un/des site(s) de référence

Parmi l'ensemble des micro-capteurs déployés dans le cadre d'un projet d'une campagne de mesure, il est recommandé de maintenir un échantillon du lot total, appelé « échantillon de référence », sur le ou les site(s) réglementaire(s) de référence de l'étude et de même(s) typologie(s) que les micro-capteur déployés.

La comparaison de ces micro-capteurs échantillons avec la mesure de référence tout au long des mesures permet :

- D'une part, d'avoir une référence sur laquelle se baser pour la validation et les recalages
- D'autre part, d'identifier une potentielle dérive des mesures
- Enfin, de pouvoir identifier des différences de réponses métrologiques entre la mesure de référence et les micro-capteurs lors de phénomènes particuliers (ex : les micro-capteurs de particules fines n'ont pas la même réponse que l'analyseur de référence FIDAS lors des épisodes sahariens)

Dans la mesure du possible et en cas de déploiement conséquent, la taille de l'échantillon de référence est fixée à 3 appareils afin d'assurer une bonne représentativité de l'échantillon total. Dans le cas où le nombre de capteurs est limité, un seul micro-capteur de référence peut être envisagé.

### Préconisation 2 : Valider manuellement l'acquisition des données

Lors de l'acquisition des données, une première routine de vérification a pour but d'invalider des données dont l'exploitation n'est pas possible. Cela concerne par exemple des données partielles (données issues d'un capteur en mobilité qui ne disposerait pas de coordonnées GPS ou de données de pollution) ou des données aberrantes (valeurs supérieures à un seuil défini en amont).

Cette vérification permet également de s'affranchir de la survenue de bug due à des valeurs non stockables résultant d'une erreur de transmission.

Dans le cadre du suivi de l'étude, les mesures par micro-capteur sont ensuite contrôlées de façon hebdomadaire via un Dashboard et peuvent être invalidées manuellement par un opérateur. Cette validation, appelée validation environnementale, suit les mêmes protocoles établis pour les stations fixes dans le cadre de la surveillance réglementaire d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes. Cela concerne en particulier les données aberrantes ou les données négatives qu'il convient d'invalider. Cette invalidation manuelle environnementale est laissée au libre arbitre de la personne responsable des données.

### Préconisation 3 : Déterminer un seuil d'humidité relative au delà duquel les données de particules fines sont invalides

Les analyseurs de particules homologués chauffent l'air au niveau de la canne de prélèvement pour éviter toute influence de l'humidité. Ce n'est pas le cas des micro-capteurs. Une forte humidité relative peut donc influencer sur la mesure des concentrations. En effet, les micro-capteurs comptent certaines gouttes d'eau comme des particules fines.

Même si la relation entre humidité et concentration mesurée est notable, la relation est particulièrement délicate à déterminer (test de dépendance linéaire, exponentielle, polynomiale). Pour les données supérieures

à un certain seuil d'humidité, la fiabilité des concentrations mesurées est trop variable pour une exploitation. Par conséquent, il apparaît dans un premier temps plus pertinent d'invalider les données lorsque l'humidité dépasse ce seuil. Un test de sensibilité sur le jeu de données test a donc été mené pour déterminer le meilleur compromis entre fiabilité des données et taux d'invalidation.

*Si  $HR(t) > \text{seuil}$ , alors  $C(t)$  est invalide*

avec

*$HR(t)$  : humidité relative mesurée par le micro-capteur de type FIXI à l'instant  $t$*

*$C(t)$  : concentration mesurée par le micro-capteur de type FIXI à l'instant  $t$*

*Seuil : une valeur d'humidité relative préalablement fixé*

Sur les données de tests (« Intercomparaison Techniques » menée sur 5 sites fixes de la région au cours de l'année 2020), il apparaît que le meilleur compromis pour le seuil se situe à 95%. Ainsi, l'invalidation est préconisée pour les données de concentrations correspondantes à des mesures d'humidité supérieures ou égales à 95%. Cela implique un taux d'invalidation très variable entre 13% et 44% sur les sites testés (à savoir Aurillac, Les Frênes, Passy, Romans, Chamalières au cours de l'année 2020). Lorsque l'humidité dépasse le seuil de 90%, il est conseillé de garder un œil critique sur la donnée.

### Le seuil peut être adapté en fonction de l'étude

Même si la fiabilité des données est très dépendante de l'humidité relative, le seuil (fixé à 95% dans le cadre du jeu de test) peut être adapté en fonction des mesures de l'étude.

En fonction de la météorologie et de la période, un seuil fixé à 95% pourrait en effet entraîner un trop grand nombre d'invalidations. Dans ce cas, le seuil concernant l'humidité relative pourrait être fixé à 98% ou 99%.

## Préconisation 4 : Mettre en place une validation automatique par réseau de neurones

Plusieurs méthodologies de machine learning ont été envisagées pour valider les mesures effectuées par micro-capteur. Un travail préparatoire mené par des étudiants de l'INSA dans le cadre d'un projet de fin d'étude a montré que les réseaux de neurones récurrent (RNN) apportaient des résultats plus encourageants que d'autres méthodes testées de Machine Learning (ARMA, classification SVM, classification One-Class SVM, prophet). En particulier, les réseaux de neurone récurrent permettent de traiter des données temporelles en conservant en mémoire les données déjà vues.

La méthodologie mise au point se base sur l'observation suivante observée sur le site de Grenoble les Frênes. L'ensemble des données du FIDAS varient dans l'intervalle de variabilité basé sur l'analyse réglementaire :

$$\text{intervalle}_{ref}(t) = \text{mean}_{ref}(t) \pm 3 * \text{STD}_{ref}(t)$$

Cet intervalle de variabilité est représenté en bleu sur le graphique ci-dessous :

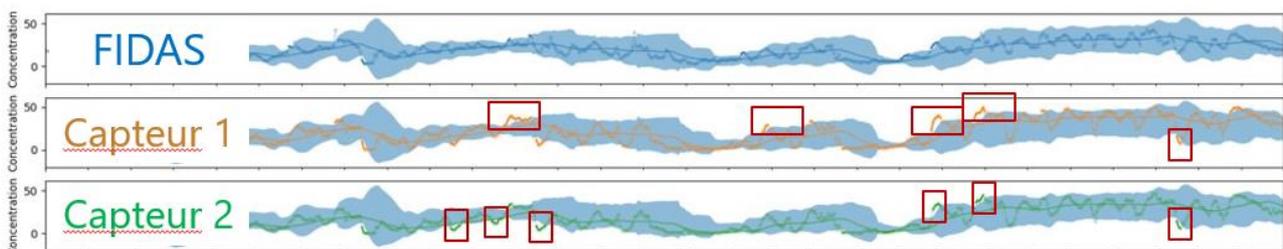


Figure 36 : Analyse exploratoire de novembre 2020 pour les micro-capteurs de type FIXI installés sur la station réglementaire des Frênes, comparaison à l'analyse réglementaire de type FIDAS pour identifier les données invalides

Cette observation est particulièrement intéressante car cet intervalle de variabilité constitue une première base de validation automatique des micro-capteurs. Les données micro-capteur incluses dans cet intervalle de variabilité peuvent être considérées comme valide, étant donné que les mesures du FIDAS (équivalent à la mesure réglementaire) restent dans cet intervalle. A contrario, les données micro-capteurs sortant de cet intervalle de variabilité peuvent être considérés comme invalides. Le réseau de neurone doit être paramétré pour identifier les valeurs de micro-capteurs sortant de cet intervalle de fiabilité.

La paramétrisation retenue qui donne les meilleurs résultats en termes de fiabilité et de rapidité d'entraînement est le modèle Long Short Term Memory<sup>8</sup> (LSTM) avec 2 couches de 50 cellules.

Actuellement, le réseau a été paramétré uniquement sur la station fixe de Grenoble les Frênes, et donne de résultats encourageants (dans 85% des cas, la prévision de validation par le réseau de neurone est correcte). Il peut être utilisé sur le bassin grenoblois. Il peut également être extrapolé à d'autres bassins d'air mais les résultats seront dégradés. Il conviendrait à terme de paramétrer un réseau pour chaque bassin d'air, voire par typologie.

A noter qu'à l'heure actuelle, la mise en opérationnel de cette méthodologie de validation par réseau de neurone est en cours de développement.

## 5. Pour aller plus loin

**Rapport complet Atmo AuRA** : « *Intégration des données micro-capteurs dans l'observatoire, 2021* ».

**Note de cadrage du LSCQA pour l'utilisation des capteurs** : « *Synthèse des travaux 2017-2020 issus du Groupe de Travail (GT) « Micro-capteurs pour l'évaluation de la qualité de l'air* »

### Contact

Steve MICALLEF, Unité Innovation  
smicallef@atmo-aura.fr  
Standard : 09 72 26 48 90



---

<sup>8</sup> Cellule à mémoire interne

- Fiche Méthodologique IMOBS V1 Mai 2022 -  
- Public interne et partenaires -

# PROTOCOLE D'AJUSTEMENT

## PROCESSUS DE TRAITEMENT DE LA DONNEE MICRO-CAPTEUR

Cette fiche s'applique à



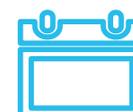
FIXI uniquement



PM<sub>2,5</sub> PM<sub>10</sub>,



En fixe

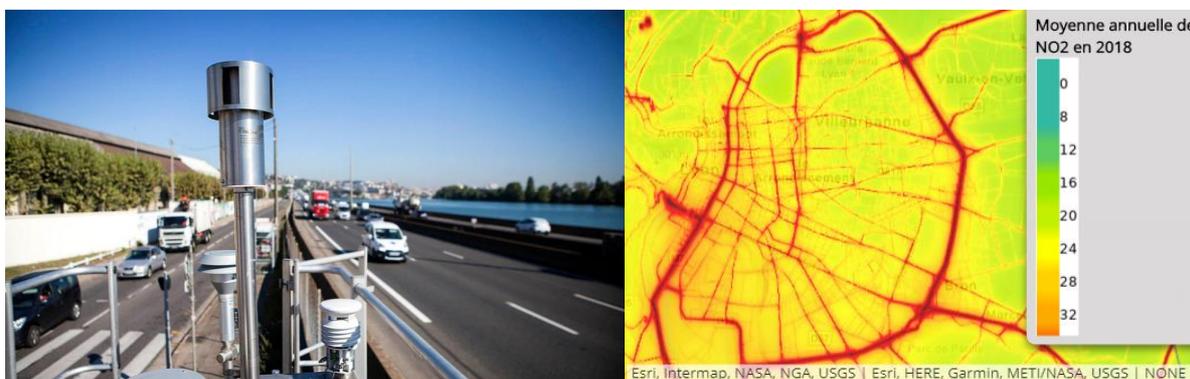


En routine



### 1- Contexte : l'expertise d'Atmo au profit des micro-capteurs

Depuis près de 40 ans, les équipes de l'observatoire Atmo Auvergne-Rhône-Alpes mesurent, et analysent la qualité de l'air respirée sur l'ensemble du territoire régional. Les mesures des 90 stations de surveillance (plus de 600 mesures par jour) alimentent les outils statistiques et de modélisation permettant de produire des cartes de pollution et de prévision de grande précision.



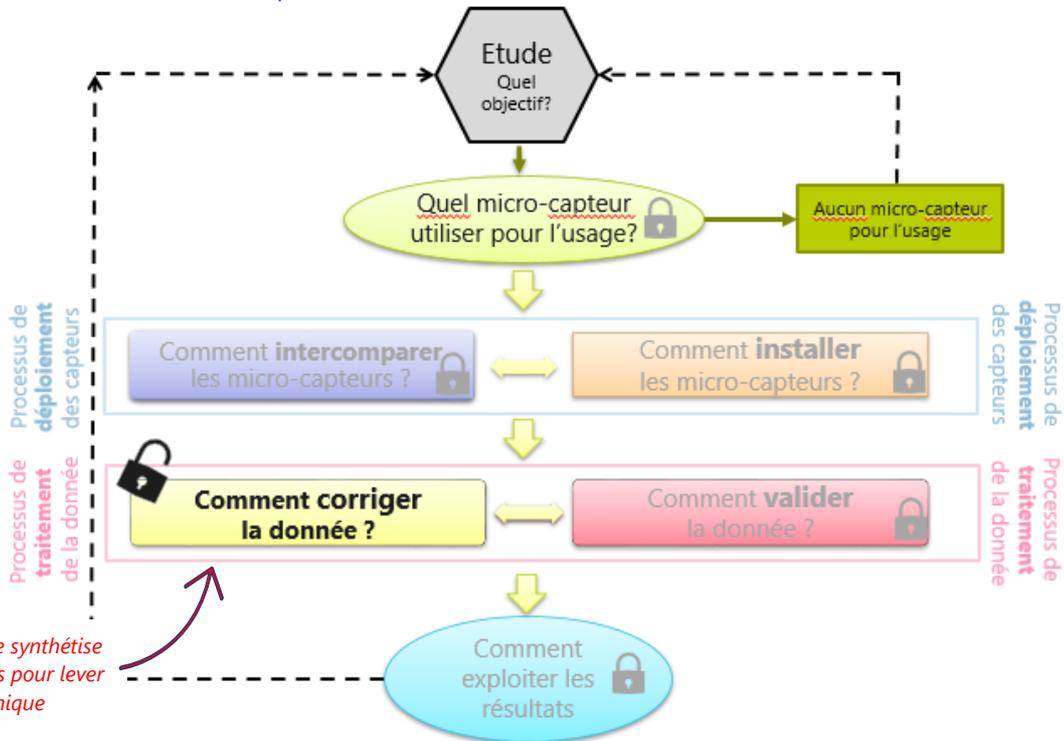
Station fixe réglementaire d'Atmo AuRA (à gauche) et cartographie réglementaire du polluant NO<sub>2</sub> pour l'année 2018 sur Lyon (à droite)

L'émergence de micro-capteurs de qualité de l'air, moins précis que les stations traditionnelles mais à un coût beaucoup plus raisonnable, pourrait permettre une complémentarité des connaissances de la pollution grâce à un suivi en temps réel avec une granularité spatiale très fine. Néanmoins, l'utilisation de ces réseaux de micro-capteurs à bas coût pose différents verrous scientifiques et technologiques loin d'être maîtrisés (validation, positionnement optimal des capteurs, métrologie et réétalonnage des capteurs, analyse des masses de données remontées pour une caractérisation fine de la pollution, temps de maintenance, etc.). Ces problématiques sont d'autant plus complexes dans le cas des réseaux hétérogènes (capteurs avec des résolutions et des précisions différentes, capteurs mobiles et fixes, etc.)



## 2- Identification des différents verrous scientifiques à lever

Une cartographie des principaux verrous techniques à lever a été élaborée, basée sur la définition d'objectif d'utilisation souhaitée du micro-capteur.

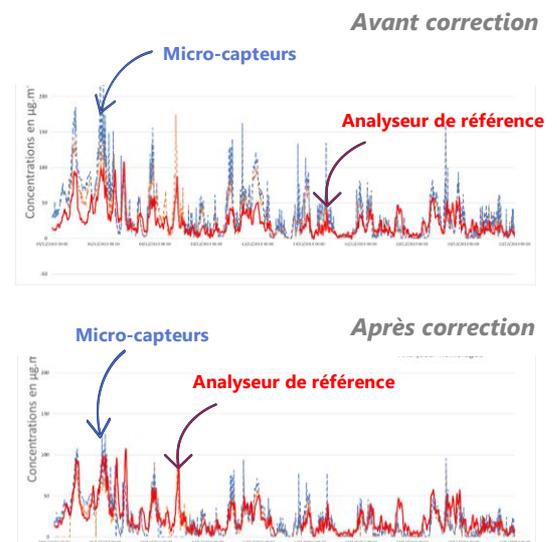


La présente fiche traite des connaissances actuelles sur le verrou technique « Comment corriger la donnée ? ». Trois autres fiches également disponibles décrivent les avancées actuelles sur les différents verrous identifiés : Comment intercomparer les micro-capteurs ? Comment installer les micro-capteurs ? Comment valider la donnée ?



## 3- L'œil d'Atmo : pourquoi corriger la donnée microcapteurs ?

Les premières études et exploitations montrent que les micro-capteurs présentent une fiabilité bien moindre que les 90 stations de mesures réglementaires. En effet, les micro-capteurs, de par leur métrologie (comptage laser), sont paramétrés en fonction d'une certaine spécificité de particules. La qualité de mesure du micro-capteur dépend de sa fonction de paramétrage et de transposition de comptage en concentrations. Cette fonction de transfert est paramétrée pour être optimum sur une certaine catégorie de particules. Si le capteur est utilisé pour mesurer des particules chimiquement différentes, un ajustement sur la concentration peut être envisagé pour augmenter la fiabilité du capteur. Une première analyse de ce type de correction a été menée dans le cadre de l'observatoire Lycéen de l'Arve.



Exemple de correction (basée sur la station fixe en rouge) des FIXI mesurant les PM10 (courbes bleue et orange) dans le cadre de l'observatoire lycéen de l'Arve.

Plusieurs facteurs explicatifs jouent sur la composition chimique des particules :

- 1- **La saisonnalité** : la nature chimique des particules diffère en fonction de la source de pollution et donc de la saison.
- 2- **Le bassin d'air** : par exemple, au même instant, la composition chimique sur Lyon peut être différente de la composition chimique sur Grenoble.
- 3- **La typologie** : par exemple, les particules en proximité routière sont très liées au secteur trafic. A contrario, en milieu rurale ou périurbain, la composition chimique des particules sera liée au chauffage.

Par ailleurs, des paramètres externes comme l'humidité ou la température peuvent directement influencer sur le système de mesure du micro-capteur et peuvent être des facteurs explicatifs de la différence entre micro-capteur et analyseur réglementaire.



## 4- Protocole de correction de micro-capteur de mesure les particules fines (de type FIXI)

Le protocole présenté a été établi à partir des travaux menés pour un réseau de FIXI utilisant des sensors PMS7003.

Afin de prendre en compte les différents facteurs de manière simple et accessible, et de proposer un protocole opérationnel, un ajustement par régression multilinéaire prenant en compte le maximum de facteurs a été testé, et mis en place.

Pour prendre en compte la saisonnalité, deux méthodes ont été envisagées en utilisant les techniques de régression linéaire :

- 1- Un ajustement bi-saisonnier : 2 paramétrisations différentes de la régression sont appliquées en fonction de la saison : une paramétrisation en été, une autre paramétrisation en hiver.
- 2- Un ajustement glissant : la paramétrisation se réajuste en temps réel sur l'historique des 30 derniers jours.

A l'heure actuelle, seule la première méthode (ajustement bi-saisonnier) a été implémentée en opérationnelle et est décrite dans cette fiche.

### Préconisation 1 : Maintenir un échantillon des micro-capteurs sur un/des site(s) de référence

Parmi l'ensemble des micro-capteurs déployés dans le cadre d'un projet d'une campagne de mesure, il est recommandé, comme dans la fiche « comment installer les micro-capteurs ? », de maintenir un échantillon du lot total, appelé « échantillon de référence », sur le ou les site(s) réglementaire(s) de référence de l'étude et de même(s) typologie(s) que les micro-capteur déployés. Si plusieurs typologies de sites sont suivies pendant l'étude, il est alors préconisé dans la mesure du possible de maintenir un micro-capteur échantillon sur chaque station fixe de typologies différentes.

La comparaison de ces micro-capteurs échantillons avec la mesure de référence tout au long des mesures permet :

- D'une part, d'avoir une référence sur laquelle se baser pour la validation et la correction des données
- D'autre part, d'identifier une potentielle dérive des mesures
- Enfin, de pouvoir identifier des différences de réponses métrologiques entre la mesure de référence et les micro-capteurs lors de phénomènes particuliers (ex : les micro-capteurs de particules fines n'ont pas la même réponse que l'analyseur de référence FIDAS lors des épisodes sahariens)

Idéalement, la taille de l'échantillon de référence est fixée à 3 appareils afin d'assurer une bonne représentativité de l'échantillon total. Dans le cas où le nombre de capteurs est très limité, un seul micro-capteur de référence peut être envisagé.

## Préconisation 2 : Identifier la saisonnalité (Eté/Hiver) en fonction du bassin d'air

La saisonnalité est variable en fonction du bassin d'air (du moins pour les sites de typologies urbain, périurbain, et rural). Cette saisonnalité est synthétisée dans le tableau suivant pour des sites fixes du réseau d'Atmo. Certains bassins d'air n'ont pas encore pu être caractérisés. Dans ce cas, il convient de prendre par défaut la saisonnalité suivante :

- 3- Eté : Mars (inclus) à Septembre (inclus)
- 4- Hivers : Octobre (inclus) à février (inclus)

Site	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Frênes	Été	Hiver	Hiver	Hiver								
SMH	Été	Hiver	Hiver	Hiver								
Passy	Été	Hiver	Hiver	Hiver								
Aurillac	Indéfini											
Romans	Indéfini											
Chamalières	Été											

	Eté
	Hiver
	Période d'incertitude
	Indéfini

## Préconisation 3 : Appliquer l'ajustement en fonction du bassin d'air et de la saison (hors site trafic)

Que ce soit pour les PM<sub>10</sub> ou pour les PM<sub>2,5</sub>, à chaque instant t, la mesure par microcapteur doit être corrigée à l'aide d'une équation de régression prenant en compte les paramètres de température et d'humidité relative du FIXI.

L'ajustement ne doit pas intervenir sur les données brutes de la base de données qui doivent rester accessibles, et consultables.

L'ajustement correspond à une équation de régression de la forme :

$$y_{pred}(t) = a_{saison,bassin} * x_{fixi}(t) + b_{saison,bassin} * x_{température}(t) + c_{saison,bassin} * x_{humidité}(t) + d_{saison,bassin}$$

Équation (1)

avec :

$y_{pred}$  : valeurs ajustées du micro-capteur de type FIXI,

$x_{fixi}$  : mesures brutes relevées par le FIXI,

$x_{température}$  : mesures de température relevées par le FIXI,

$x_{humidité}$  : mesures d'humidité relevées par le FIXI

$a_{saison,bassin}$ ,  $b_{saison,bassin}$ ,  $c_{saison,bassin}$ , et  $d_{saison,bassin}$  : coefficients estimés par la régression multilinéaire de ces 3 paramètres par rapport à la valeur de référence.

Les coefficients a, b, c, d sont spécifiques pour chaque saison et chaque bassin d'air. Ils ont été préalablement estimés sur une période d'un an pour tous les bassins d'air et pour les 2 saisons hiver et été (telles que définies dans [ce fichier](#)).

Note : Cette méthodologie a été élaborée de manière théorique et a été testée en opérationnel sur le bassin grenoblois. La méthodologie de correction par régression linéaire peut vite montrer certaines limites : en particulier l'apparition de données négatives, une variabilité trop importante ou l'apparition d'un offset trop élevé. Il convient dans ce cas de réestimer les coefficients de régression a,b,c,d pour le bassin d'air en question sur un jeu de données plus représentatif, et de mettre à jour le tableau des coefficients.

## Préconisation 4 : Prendre conscience du cas des sites en proximité trafic et d'observation spécifique

### Site de proximité trafic

Les sites de typologie trafic présentent des caractéristiques propres liés à leur source exclusivement trafic. Les sites de la région présentent moins de variabilité liée à la chimie des particules.

Actuellement, l'ajustement pour les sites trafic dépend également du bassin d'air et de la saison. La méthodologie d'ajustement est donc identique aux autres sites selon l'équation (1) mais avec des coefficients de régression propres aux sites trafic.

Note : une étude plus approfondie devrait être menée pour savoir si l'ajustement peut être régional pour tous les sites trafic et si l'ajustement par saison est pertinent également pour cette typologie. Les premières conclusions d'une analyse exploratoire préliminaire laisse envisager que tous les sites trafic de la région pourraient être regroupés et corrigés selon 2 catégories : site trafic en milieu urbain (type Jean Jaurès) ou site trafic routier (A7 sud Lyonnais).

### Site d'observation spécifique

Les sites d'observation spécifique (surveillance industrielle ou de chantiers) présentent des caractéristiques propres en termes de taille d'aérosols et de chimie. En fonction de l'étude, l'équation (1), paramétrée pour des mesures de fond, peut être également appliquée sur des sites d'observations spécifiques. Néanmoins, les mesures ainsi corrigées ne sauraient être suffisamment précises pour une exploitation en termes de concentration, elles apportent une information relative et indicative sur le nombre de pics.

## 5- Pour aller plus loin

**Rapport complet Atmo Aura** : « *Intégration des données micro-capteurs dans l'observatoire, 2021* ».

**Note de cadrage du LSCQA pour l'utilisation des capteurs** : « *Synthèse des travaux 2017-2020 issus du Groupe de Travail (GT) « Micro-Capteurs pour l'évaluation de la qualité de l'air* »

### Contact

Steve MICALLEF, Unité Innovation  
smicallef@atmo-aura.fr  
Standard : 09 72 26 48 90

