

www.atmo-auvergnerhonealpes.fr

Sillon'air

Le Grand Annecy

Diffusion : septembre 2025

Siège social :
3 allée des Sorbiers 69500
BRON
Tel. 09 72 26 48 90
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’Ecologie, du Développement Durable et de l’Energie (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’Etat 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 le site 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 2025 – Sillon’air – Le Grand Annecy.

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 AtmoAuvergne-Rhône-Alpes

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

Financement et participation

Cette étude d'amélioration de connaissances a été rendue possible grâce à l'aide financière particulière du membre suivant :



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, et sans la mise à disposition de la flotte de véhicules d'Enedis.



Résumé

Contexte sanitaire et technologique

En France, la pollution de l'air est responsable de 48 000 décès par an. Pour mieux surveiller et sensibiliser à la qualité de l'air, les micro-capteurs de qualité de l'air connaissent un essor important : plus accessibles que les stations fixes traditionnelles, ils permettent aux collectivités et aux citoyens de mieux comprendre leur exposition quotidienne.

Une dynamique régionale d'innovation

Dans la région Auvergne-Rhône-Alpes, plusieurs projets innovants ont vu le jour, soutenus par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes pour garantir la cohérence des micro-capteurs avec la surveillance réglementaire. Sur le territoire du Grand Annecy, deux projets phares ont été menés :

- **Vizionnaire (2019)** : réseau de capteurs fixes.
- **Sillon'air Haute-Savoie**: mesures mobiles de qualité de l'air à partir de véhicules ENEDIS équipés de micro-capteurs.

Le projet Sillon'air sur le Grand Annecy

La présente étude approfondit l'intérêt et l'utilisation des données issues de véhicules en mobilité sur une agglomération de la taille du Grand Annecy. Objectif : enrichir la surveillance autour des axes routiers et garantir une information cohérente sur la qualité de l'air. Malgré un taux de fonctionnement satisfaisant (83 %) pour les microcapteurs fixes mesurant les PM_{2,5}, les microcapteurs mobiles installés sur une des flottes des véhicules ENEDIS ont souffert de nombreuses défaillances techniques, limitant la fiabilité de certaines données.

Apports concrets et pistes d'action

L'étude a permis d'identifier plusieurs leviers d'action basés sur les données PM_{2,5} :

- Cibler l'action Fonds Air Bois sur les quartiers sud résidentiels d'Annecy (en particulier sur le nord de l'ancienne commune de Seynod)
- Valoriser la bonne qualité de l'air sur les rives du lac et la préserver
- Poursuivre la surveillance au niveau du port
- Favoriser les outils de modélisation et des nouveaux capteurs plus fiables pour l'évaluation des plans d'action
- Restreindre l'utilisation de la flotte de véhicules pour les mesures en mobilité

Perspectives et enjeux

L'intégration des micro-capteurs dans des cartographies (PM_{2,5} et NO₂) à fine échelle est une avancée technique prometteuse, mais encore perfectible. L'enjeu principal reste de constituer un réseau fiable et bien intégré dans l'observatoire réglementaire actuel, avec un suivi rigoureux du matériel et des données. À terme, ces données pourraient enrichir des outils tels que la **Captothèque** (<https://app.captotheque.fr/carte>) ou l'application **AirToGo**, pour une meilleure visualisation et exploitation de la qualité de l'air à l'échelle locale.



Sommaire

1. Introduction – Contexte du projet	6
2. Avancée du projet	7
2.1. Chronologie et avancées du projet	7
2.2. Description des données et protocole	7
3. Fiabilité des données	11
3.1. Résultats de la 1ère intercomparaison d'installation	11
3.2. Résultats de la 2ème intercomparaison dite « de renouvellement »	12
3.3. Résultat de l'intercomparaison de sortie en fin de projet	13
3.4. Pannes et taux de fonctionnement	14
3.5. Protocole de correction des données par le fournisseur	15
3.6. Protocole de validation des données	16
3.7. Corrélation entre μ capteurs et stations de référence	17
3.8. Conclusion sur la fiabilité des données	19
4. Analyse et préconisation d'actions	21
4.1. Analyse des données de particules $PM_{2.5}$	21
4.2. Analyse des données d'ozone (O_3)	23
4.3. Analyse des données de dioxyde d'azote (NO_2)	25
4.4. Focus sur les mesures en mobilité : une information pour du temps réel	26
5. Intégration des données dans les cartographies fines échelles	29
5.1. Présentation	29
5.2. Intégration des micro-capteurs dans les cartographies $PM_{2.5}$	29
5.3. Intégration des micro-capteurs dans les cartographies NO_2	32
5.4. Intégration des micro-capteurs en mobilité dans les cartographies	33
6. Conclusion et perspectives	36

1. Introduction – Contexte du projet

En France, 48 000 décès par an sont liés à une exposition régulière aux particules fines, et les coûts liés sont évalués entre 68 et 97 milliards d'euros par an par le Sénat.

Depuis plusieurs années, les micro-capteurs se développent rapidement tant au niveau national qu'à l'échelle européenne ou internationale. Plus petits, moins coûteux et facilement transportables comparativement aux analyseurs homologués ces micro-capteurs intéressent différents acteurs. Les collectivités s'en emparent pour équiper certains bâtiments publics et les citoyens se servent de capteurs pour mieux appréhender leur exposition individuelle.

Dans ce contexte, des projets naissent sur le territoire régional pour mettre en place de nouveaux observatoires de qualité de l'air basés sur ces mesures indicatives innovantes. Atmo Auvergne-Rhône-Alpes accompagne ces nouveaux projets pour assurer une cohérence régionale, d'une part, entre ces nouvelles technologies entre elles, et, d'autre part, avec la surveillance réglementaire de la qualité de l'air.

De son côté, le Grand Annecy innove depuis plusieurs années sur son territoire en testant différentes solutions pour mesurer la qualité de l'air à l'aide de microcapteurs, et faire ainsi avancer la recherche sur le sujet :

- Le projet Vizionnair, projet expérimental de mesures de la qualité de l'air par des stations fixes réparties sur le territoire (35 au maximum du projet) - 2019
- Le projet Sillon'air Haute Savoie¹ mené par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes et ENEDIS de mesures mobiles de la qualité de l'air. Ce projet, tout d'abord construit à l'échelle de la Haute-Savoie et ensuite restreint au territoire du Grand Annecy, a permis de mesurer la qualité de l'air sur des axes routiers à partir de véhicules ENEDIS équipés de capteurs.

Cette nouvelle étude, qui fait l'objet de ce rapport, permet d'approfondir l'analyse de données sur le Grand Annecy, dans l'objectif de garantir une information cohérente et maîtrisée sur le territoire.

Le travail s'appuie sur la mise à disposition par ENEDIS d'une partie de sa flotte de véhicules professionnels sillonnant le territoire de Grand Annecy. Cette flotte est équipée de micro-capteurs et peut ainsi mesurer les concentrations en temps réel en différents points du territoire.

Ainsi, le travail concourt à l'amélioration de la surveillance en proximité des axes routiers tout en assurant une cohérence technique et garantir la qualité de l'information diffusée.

La production de ces données complémentaires et cohérentes au dispositif de surveillance d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, a pour objectif de créer à terme des services sur le territoire du Grand Annecy.

¹ [Sillon'air - Retour d'expérience de la 1ere phase de mesures par µcapteurs en mobilité sur le territoire de la Haute-Savoie](#)

2. Avancée du projet

2.1. Chronologie et avancées du projet

La durée contractuelle de l'opération est de 48 mois. L'opération a débuté à l'été 2021. Pour le suivi des engagements et la bonne réalisation du partenariat un comité de suivi (appelé également COPIL) organisé par le Grand Annecy s'est réuni 2 fois par an. Le Comité de suivi a pour objectif d'examiner toutes questions liées au partenariat, à la collecte, à l'exploitation des données et à la communication prévue dans le cadre du présent partenariat.

La recherche d'un consensus étant un objectif du partenariat, les décisions du comité de suivi sont validées à l'unanimité.

Les grandes étapes du projet sont précisées dans le schéma ci-dessous.

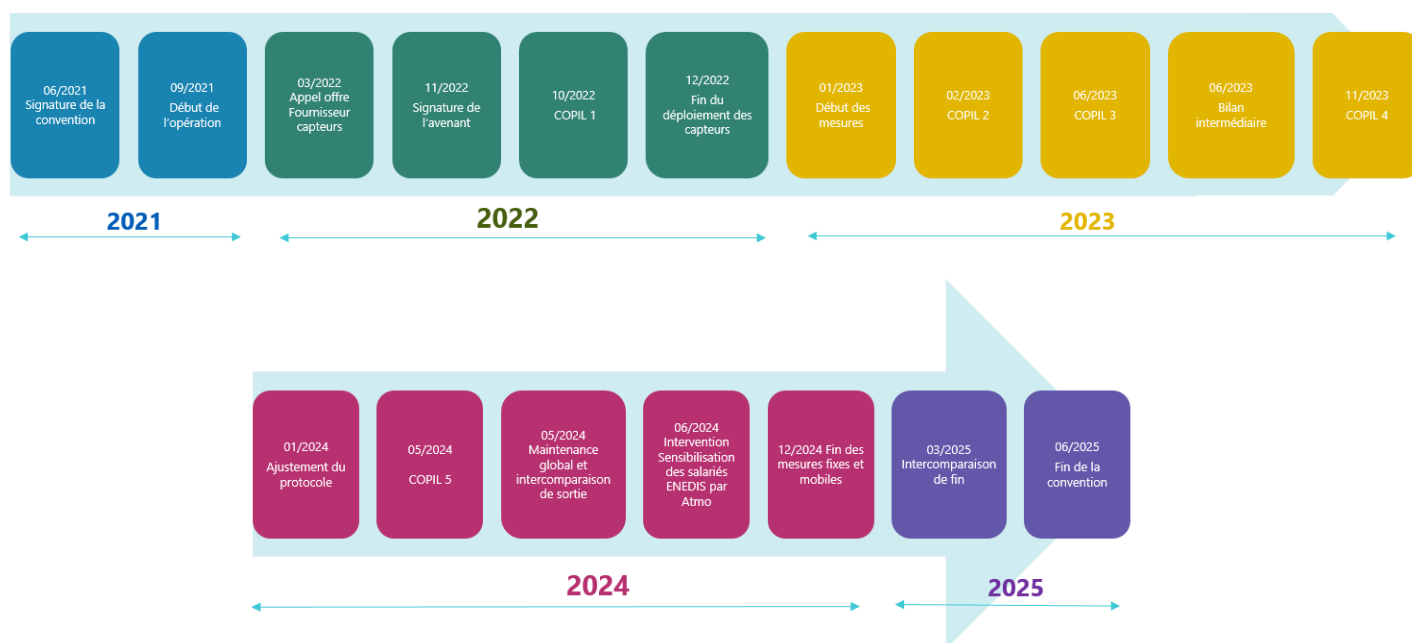


Figure 1 : Chronologie et grandes étapes du projet

2.2. Description des données et protocole

Solution AtmoTrack

En mars 2022, un appel d'offre a été élaboré par le Grand Annecy afin de choisir le meilleur fournisseur de micro-capteurs répondant au cahier des charges du projet.

Deux réponses à l'appel d'offres ont été réceptionnées et analysées.

Atmo Track a été sélectionné. Atmotrack (de 42 factory) est une start-up nantaise qui développe et fabrique des capteurs « labellisés et reconnus ». Ces capteurs sont notamment testés tous les ans dans le cadre du challenge de l'AIRLAB².



Figure 2 : Capteur AtmoTrack

Le capteur choisi mesure les particules (PM1, PM2.5 et PM10), il mesure le niveau sonore, les données météorologiques (température, humidité). Il est également possible d'ajouter l'un des capteurs supplémentaires de gaz suivants : ozone (O3), dioxyde d'azote (NO2), dioxyde de soufre (SO2), éthylène (C2H4) et sulfure d'hydrogène (H2S).

Dans le cadre de notre étude, et selon le cahier des charges établi par le Grand Annecy, les particules fines, le NO2 et l'O3 ont été investigués.

La fiche technique complète du capteur est disponible en ANNEXE 1.

Description du protocole choisi

Cinquante micro-capteurs ont été loués par le Grand Annecy pour une durée de 2 ans.

Le retour d'expérience du projet Sillon'air Haute Savoie ³précise que « Les micro-capteurs en mobilité présentent un avantage certain en termes de couverture géographique et d'accessibilité à des zones qui n'avaient jamais été sondées. Néanmoins, la mesure par micro-capteur en mobilité reste encore indicative, et encore moins fiable qu'une donnée micro-capteur fixe. Afin d'assurer une certaine cohérence et validité, il convient de préconiser l'installation de micro-capteurs fixes en certains sites préalablement choisis en parallèle du déploiement sur une flotte mobile. Cela permettra de qualifier la mesure en mobilité voire de la réajuster si besoin. »

Dans le cadre du présent projet, la moitié des capteurs sont installés en fixe, l'autre moitié ont permis d'équiper 25 véhicules de la flotte ENEDIS.

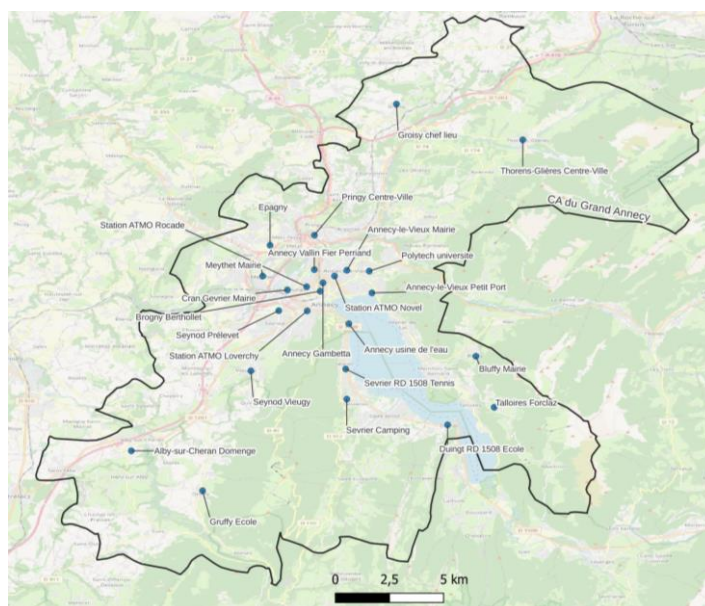
Les 25 sites d'implantation pour les capteurs fixes ont été sélectionnés selon plusieurs critères :

- Anciens points de mesures du précédent projet Vizionnair, déjà équipés d'électricité
- Couverture spatiale représentative
- Présence d'une station de référence d'ATMO Auvergne-Rhône-Alpes (3 capteurs)

Les 25 capteurs implantés sur les sites fixes mesurent les particules fines et un polluant gazeux (NO₂ ou O₃). 12 mesurent l'ozone. 13 mesurent le NO₂.

² L'AIRLAB, accélérateur de solutions pour la qualité de l'air, AIRPARIF et ses partenaires lancent tous les ans le Challenge Microcapteurs ayant pour but de tester les solutions disponibles sur le marché, pour les fabricants qui le souhaitent, et éclairer ainsi les utilisateurs en valorisant les solutions les plus performantes

³ https://www.atmo-auvergnerhonealpes.fr/sites/aura/files/content/migrated/atoms/files/20202401_rex_1erephasesillonair_diffusable.pdf



La répartition géographique des polluants NO₂ et O₃ a été faite suivant l'expertise d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes. Le NO₂ est un polluant lié au trafic routier, la proximité des axes en centre-ville a donc été privilégiée pour le choix de ces sites. A contrario, l'O₃ est un polluant secondaire qui se forme en périphérie des centres urbains, plutôt zone rurale. Les sites d'implantation pour les capteurs équipés de mesures d'ozone ont donc été choisis en milieu périurbain tout en s'assurant d'une représentativité spatiale globale cohérente.

25 capteurs ont été installés sur la flotte d'ENEDIS. Au vu du retour d'expérience du projet Sillon'air 74⁴, et de la littérature scientifique, ces micro-capteurs mesurent uniquement les particules fines. La fiabilité des capteurs pour la mesure du NO₂ est à ce jour trop variable pour que les capteurs soient utilisés en mobilité. L'installation des capteurs PM sur la flotte de véhicule ENEDIS a été effectuée en novembre 2022 par le fournisseur de capteurs AtmoTrack en concertation avec ENEDIS.

⁴ - Sillon'air - Retour d'expérience de la 1ere phase de mesures par microcapteurs en mobilité sur le territoire de la Haute-Savoie



Figure 5 : Capteur AtmoTrack positionné sur un véhicule ENEDIS

Les données ainsi collectées suivent le parcours suivant :

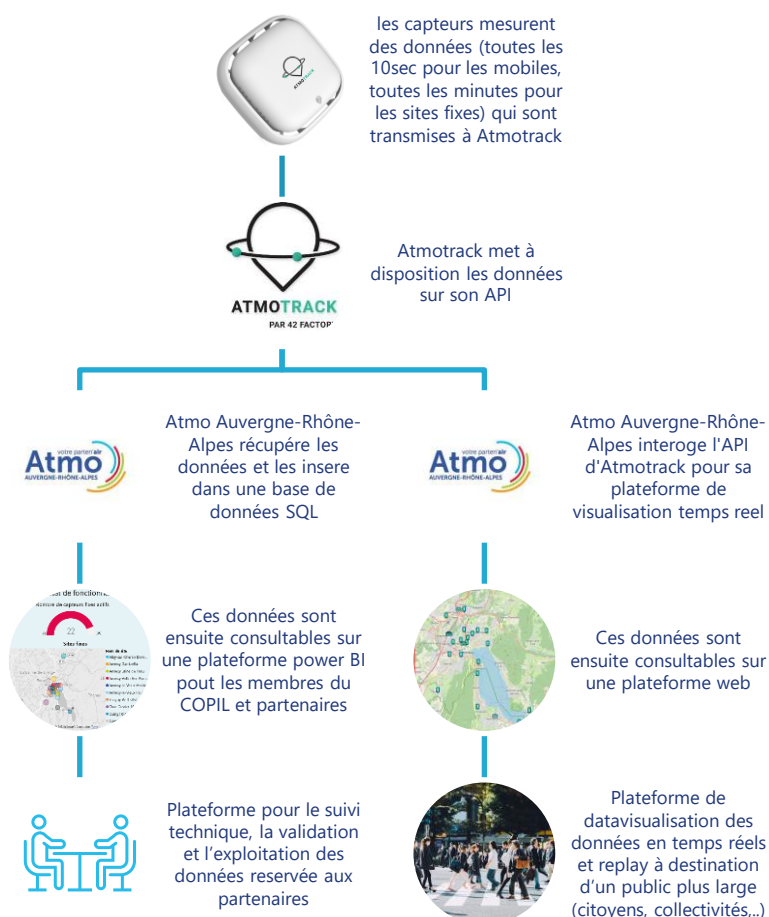


Figure 6 : Protocole de suivi de la donnée de la mesure jusqu'à l'utilisation

3. Fiabilité des données

3.1. Résultats de la 1ère intercomparaison d'installation

Avant d'installer les capteurs sur leur sites respectifs, une phase d'intercomparaison de l'ensemble des capteurs est indispensable. Cette phase d'intercomparaison suit un protocole défini ⁵par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes. Elle a deux fonctions principales :

- S'assurer de la cohérence des micro-capteurs entre eux : analyse de la répétabilité des capteurs
- S'assurer de la cohérence avec la station de référence d'Atmo : analyse de la corrélation

Dans le cadre de notre projet, la période d'intercomparaison a eu lieu :

- Du 28/09/2022 au 04/11/2022 pour les capteurs mobiles
- Du 17/10/2022 au 04/11/2022 pour les capteurs fixes



Figure 7 : Capteurs en intercomparaison sur le site de référence de Loverchy

A l'issue de cette période d'intercomparaison, les données des capteurs ont été analysées selon le protocole d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes. Deux capteurs ont été identifiés comme défectueux et retournés au fournisseur. Le tableau suivant résume les résultats pour les capteurs restants en fonction des polluants mesurés.

Polluants	Validation du protocole Atmo pour l'intercomparaison
PM ₁₀	Conforme
PM _{2,5}	Conforme
NO ₂ -mems	Non Conforme
NO ₂ -capsule chimique	Conforme
O ₃ – après « période de chauffe »	Conforme

Figure 8 : Résultats de la première intercomparaison

⁵ Rapport IMObs 2021 : Intégration des microcapteurs dans l'Observatoire – Atmo Auvergne-Rhône-Alpes

Une fois les capteurs installés, différentes pannes techniques sont intervenues sur les capteurs (absence de remontée de données, coupure électrique, etc.) lors des mois suivants. Les capteurs en panne ont dû être remplacés par de nouveaux capteurs qu'il a fallu à nouveau intercomparer. Deux autres périodes d'intercomparaison ont donc été programmées et mises en place.

- Intercomparaison du 17 au 25 janvier

Polluants	Validation du protocole Atmo
PM ₁₀	Conforme
PM _{2,5}	Conforme
NO ₂ -capsule chimique	Conforme

Figure 9 : Résultats de la deuxième intercomparaison

- Intercomparaison du 04 au 17 avril

Polluants	Validation du protocole Atmo pour l’intercomparaison
PM10	Conforme
PM2,5	Conforme
NO2-capsule chimique	Non conforme

Figure 10 : Résultats de la troisième intercomparaison

Lors de la dernière intercomparaison d’avril, les mesures de NO₂ par capsule chimique n’ont pas été conformes aux attentes, en effet le coefficient de détermination calculé entre les données du µcapteur et de la station de référence est inférieur à 0,2.

Les mesures ont été opérationnelles sur site à partir du 01/01/2023.

3.2. Résultats de la 2ème intercomparaison dite « de renouvellement »

Le constructeur affiche une durée de vie d’un an pour les cellules de mesures intégrées dans les microcapteurs et préconise donc de renouveler les cellules après un an de mesure.

En mai 2024, au bout d’1.5 an de mesures, un changement des 25 capteurs fixes a été planifié. En plus de l’intercomparaison des 25 capteurs entrants, une intercomparaison des 25 capteurs de sorties a été effectuée afin d’évaluer la fiabilité des capteurs après 1.5 ans de mesures.



Figure 11 : Etape et planning de l'intercomparaison de renouvellement

Polluants	Validation du protocole Atmo pour l'intercomparaison
PM ₁₀	Conforme
PM _{2,5}	Conforme
NO ₂ -capsule chimique	Conforme après correction
O ₃ – après « période de chauffe »	Conforme après correction

Figure 12 : Résultats de l'intercomparaison de renouvellement (nouveaux capteurs)

Polluants	Validation du protocole Atmo pour l'intercomparaison
PM ₁₀	Conforme
PM _{2,5}	Conforme
NO ₂ -capsule chimique	Non évaluable
O ₃ – après « période de chauffe »	Non évaluable

Figure 13 : Résultats de l'intercomparaison de sortie (anciens capteurs)

Lors de l'intercomparaison de sortie, avec les anciens capteurs, la conformité des données NO₂ et O₃ n'a pas pu être évaluée dans les mêmes conditions que les capteurs sur site car les corrections effectuées sur les µcapteurs sont remises à zéro lors du débranchement des appareils.

3.3. Résultat de l'intercomparaison de sortie en fin de projet

A la fin du projet une intercomparaison a été réalisée sur un échantillon restreint de capteurs : 3 capteurs mobiles ont été comparés à l'analyseur réglementaire et 3 capteurs fixes. Comme lors de la précédente intercomparaison la conformité des données NO₂ et O₃ n'a pas pu être évaluée. Les résultats sont conformes pour les particules en PM₁₀ et en PM_{2,5}.

Polluants	Validation du protocole Atmo pour l'intercomparaison
PM ₁₀	Conforme (3 capteurs évalués)
PM _{2,5}	Conforme (3 capteurs évalués)
NO ₂ -capsule chimique	Non évaluable
O ₃ – après « période de chauffe »	Non évaluable

Figure 14 : Résultats de l'intercomparaison de fin de projet - capteurs fixes

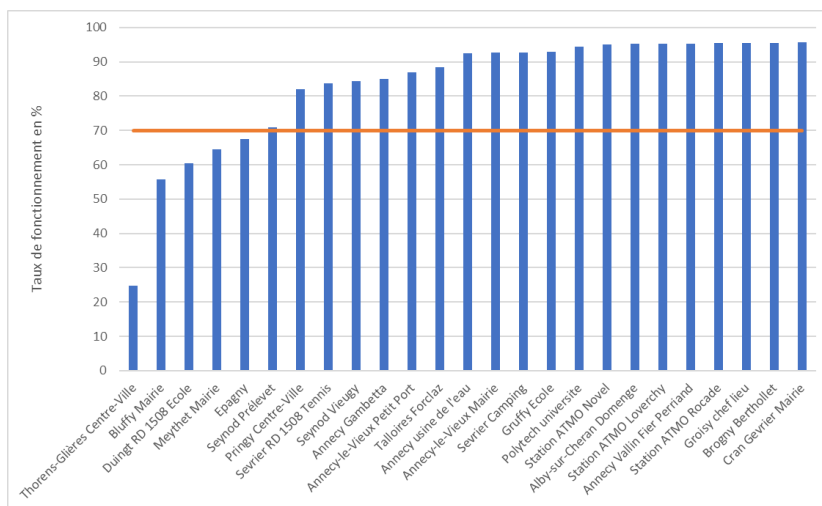
Polluants	Validation du protocole Atmo pour l'intercomparaison
PM ₁₀	Conforme (3 capteurs évalués)
PM _{2,5}	Conforme (3 capteurs évalués)

Figure 15 : Résultats de l'intercomparaison de fin de projet - capteurs mobiles

3.4. Pannes et taux de fonctionnement

Après installation sur sites (fixes ou véhicules ENEDIS), les capteurs ont été paramétrés pour une remontée des données en automatique. Une plateforme de suivi de la donnée a été mise à disposition du Grand Annecy pour suivre l'évolution des concentrations et le taux de fonctionnement des capteurs.

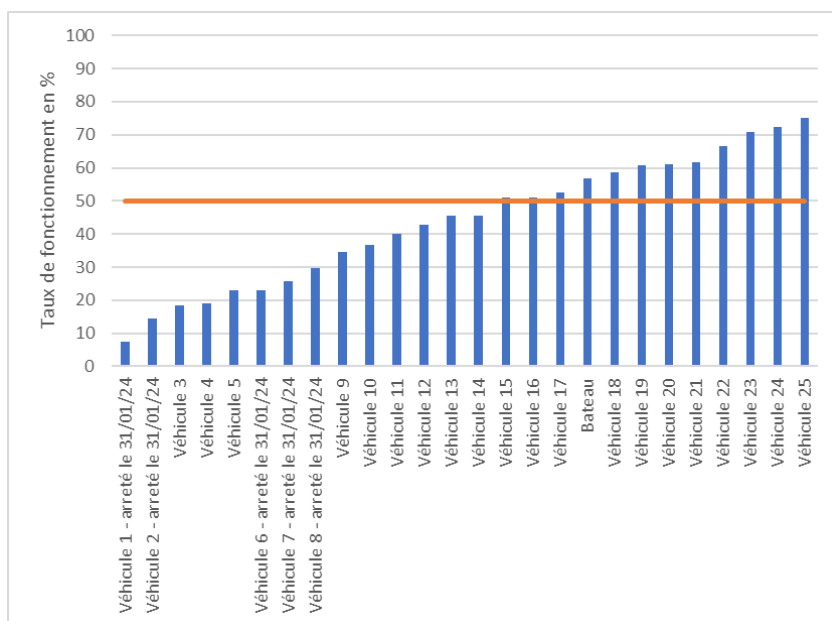
Le graphique suivant représente le taux de fonctionnement des capteurs fixes du 01/01/2023 au 31/08/2024.



Capteurs fixes
 **83%**

Figure 16 : Taux de fonctionnement des 25 capteurs fixes installés sur les communes du Grand Annecy pour la période du 01/01/2023 au 31/12/2024.

Pour les capteurs installés en fixe, le taux de fonctionnement est stable et atteint 83% sur 20 mois. En revanche, le taux de fonctionnement pour les capteurs dits « en mobilité » installés sur la flotte de véhicule ENEDIS est beaucoup moins bon. Il atteint 45% en moyenne. Ce taux de fonctionnement bas est dû à différentes pannes (capteurs débranchés, capteurs défectueux, etc.) et à des difficultés de remontées de données lorsque le véhicule est garé en sous-sol.



Capteurs en mobilité
 **45%**

Figure 17 : taux de fonctionnement des 25 capteurs mobiles installés sur la flotte de véhicules ENEDIS pour la période du 01/01/2023 au 31/12/2024.

Tout au long du projet 25 capteurs ont dû être remplacés, soit 50% du parc. Ces remplacements ont entraîné des coûts liés aux interventions, à la logistique et aux intercomparaisons nécessaires en amont de chaque

redéploiement de capteur. Ces pannes ont également entraîné une baisse significative des taux de fonctionnement car les dépannages ont mis un temps important à être réalisés.

3.5. Protocole de correction des données par le fournisseur

Afin d'avoir des mesures le plus juste possible deux types de correction sont apportées aux données par le fournisseur pour les polluants gazeux (aucune correction n'est effectuée sur les données des particules) :

Correction durant la période d'intercomparaison

Cette correction permet de calibrer les capteurs sur un site réglementaire Atmo Auvergne-Rhône-Alpes de référence situé dans la zone de l'étude. Les capteurs sont soumis à une période d'apprentissage, durant laquelle les données sont comparées avec les valeurs de l'analyseur de référence. A l'issue, un coefficient de correction est calculé et appliqué. Ensuite vient une période de tests où les capteurs sont toujours sur le site de référence et qui permet de valider le coefficient calculé précédemment. Après ces deux phases, les capteurs sont calibrés et peuvent être déployés sur leur site définitif.

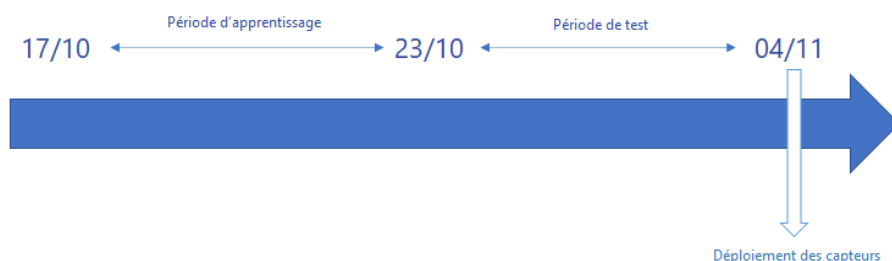


Figure 18 : Exemple de timing de la correction durant la période d'intercomparaison

Correction hebdomadaire

Lorsque le capteur est installé sur site en opérationnel, le fournisseur procède à un ajustement manuel des capteurs O₃ et NO₂ chaque semaine, le lundi matin. Comme pendant le 1^{er} calibrage durant la période d'intercomparaison, cet ajustement hebdomadaire est réalisé à partir des données de référence de la station Atmo Auvergne-Rhône-Alpes réglementaire. Ce calibrage permet de recaler les données en fonction de l'aérologie locale de la semaine passée.

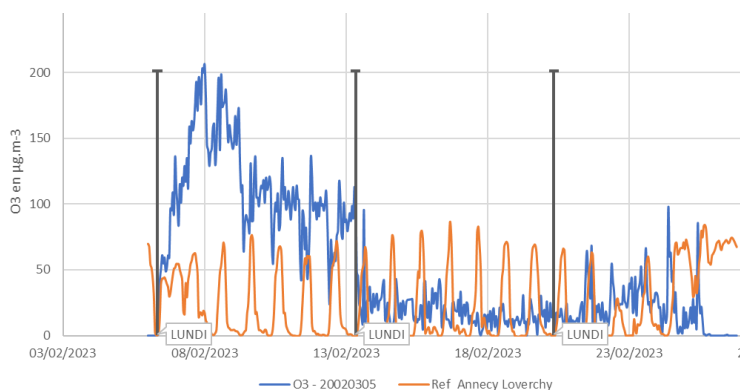


Figure 19 : Exemple de calibrage du fournisseur sur la période de mars 2023

Le graphique ci-contre illustre le décalage significatif qu'il peut exister entre une semaine et la suivante lié au recalage hebdomadaire effectué tous les lundis. Ce graphique illustre également la différence significative entre l'analyseur réglementaire de référence d'Annecy Loverchy et le microcapteur situé sur ce même site pour la mesure d'ozone

Même s'il apporte globalement une plus-value, le recalage ne permet pas systématiquement au micro-capteur de se rapprocher du signal de l'analyseur réglementaire.

3.6. Protocole de validation des données

Pour avoir une donnée la plus juste possible et le moins de perte de données possible un processus de validation des données a été mis en place par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes se décomposant en deux étapes:

- De façon hebdomadaire un suivi de l'état de fonctionnement des données via la plateforme power bi cette opération est appelée "validation technique". En cas d'absence de données prolongée ou d'anomalie sur les mesures d'un capteur, le fournisseur est tenu au courant par mail

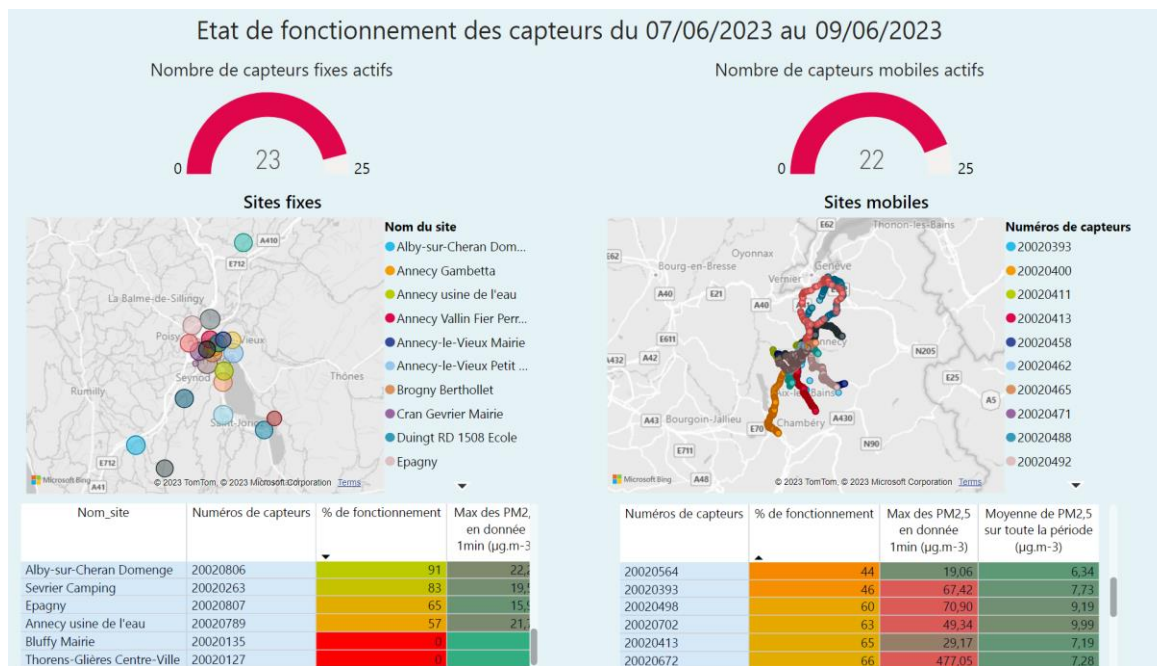


Figure 20 : visuel de la plateforme power BI mise à disposition par Atmo pour le suivi des microcapteurs fixes et mobiles

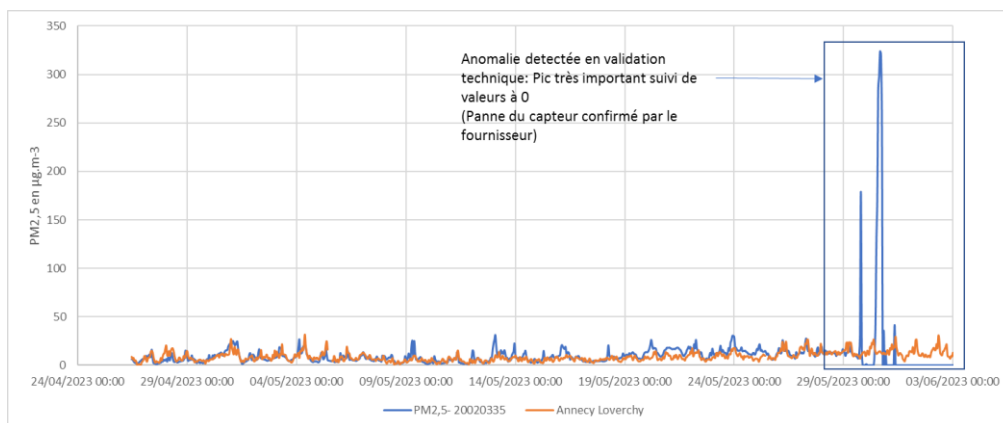


Figure 21 : Exemple d'anomalie détectée lors d'une validation technique

- Au début de chaque mois les données des capteurs fixes sont étudiées afin de détecter des anomalies (valeurs fortes, à zéro, incohérentes,). Cette inspection que l'on nomme "validation environnementale" permet d'invalidier les données en cas d'anomalie sur une longue période. Si les invalidations sont trop fréquentes ou montrent un dysfonctionnement significatif du capteur, le fournisseur est contacté pour programmer une intervention en vue d'une réparation ou d'un remplacement de capteur.

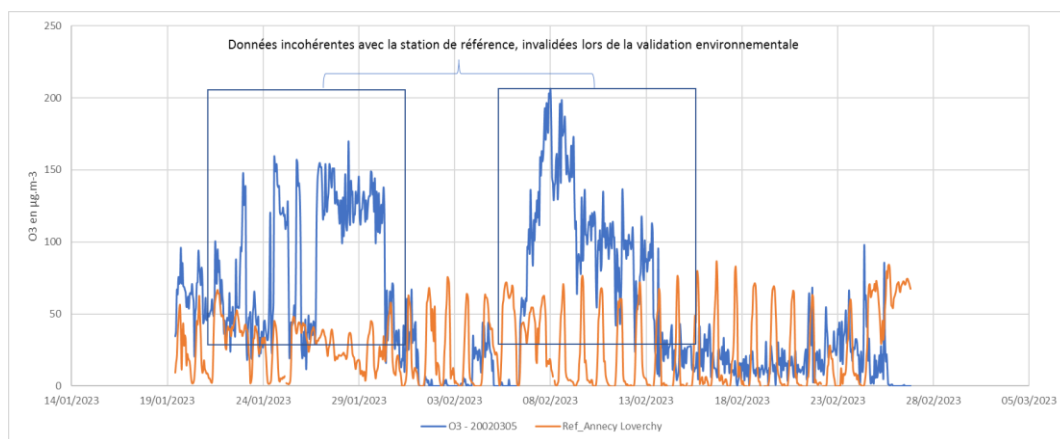


Figure 22 : Exemple de données invalidées lors de la validation environnementale

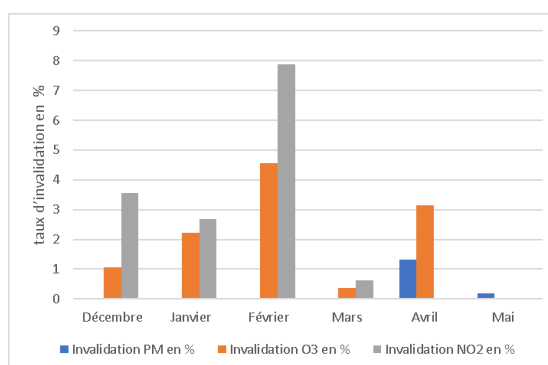


Figure 23 : Pourcentage d'invalidation par mois et par polluants

Décembre-Mai	
Invalidation PM en %	0
Invalidation O3 en %	2
Invalidation NO2 en %	3

Le taux d'invalidation le plus élevé est principalement sur les données NO₂ et O₃, jusqu'à 8% d'invalidation pour le mois le plus élevé.

3.7. Corrélation entre µcapteurs et stations de reference

La corrélation mensuelle entre les stations de référence et les micro-capteurs est étudiée afin d'avoir un indicateur de la fiabilité des capteurs dans le temps. Le graphique suivant présente l'évolution du coefficient de détermination (R^2). Il mesure l'adéquation linéaire entre le modèle et les données observée. Il varie entre 0 et 1, soit entre un pouvoir de prédiction faible (totalement aléatoire) et un pouvoir de prédiction fort (données identiques à un coefficient linéaire près).

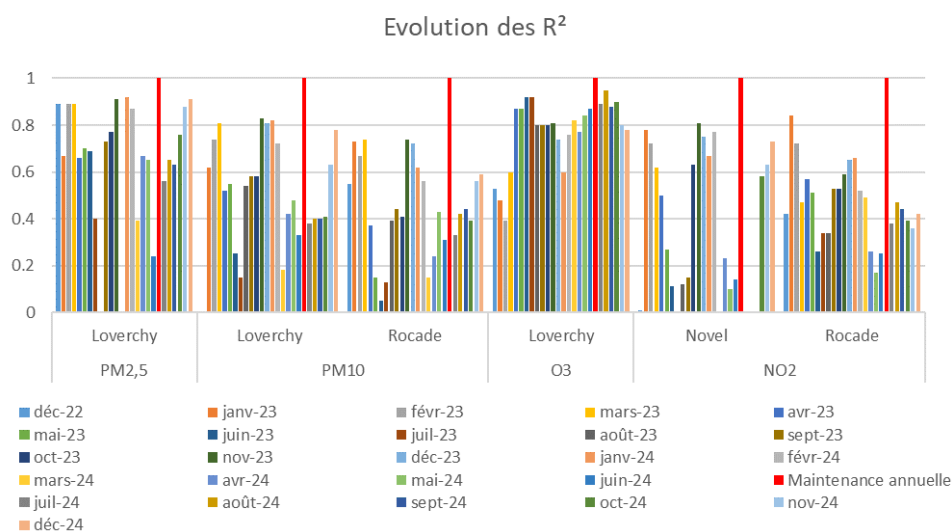


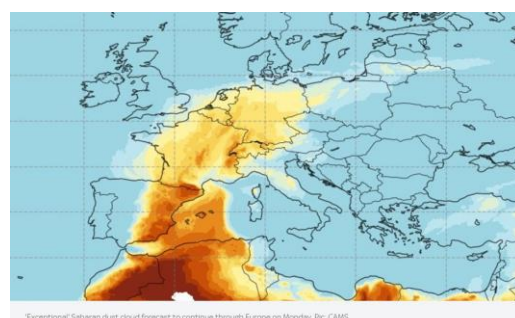
Figure 24 : évolution mensuelle du R^2 de décembre 2022 à décembre 2024

La fiabilité des capteurs est différente en fonction des polluants mesurés.

- ➔ Le coefficient R^2 est stable dans le temps pour les PM2.5 et pour l'ozone. Pour l'ozone, il est légèrement plus élevé en été. Pour les PM2.5 il est plus élevé en hiver.
- ➔ Pour les PM10, et en particulier pour le NO2 la fiabilité est très variable d'un mois à l'autre

Quelle fiabilité des micro-capteurs pour les épisodes de Dust ?

Les épisodes de Dust sont liés aux particules fines en provenance du Sahara, qui sous l'action des phénomènes météorologiques sont déplacées jusqu'en France. Ces particules désertiques sont des particules assez grossières, de quelques microns à une dizaine de microns de diamètre. Du fait de leur diamètre assez important, ces particules ont moins de facilité à pénétrer dans les organismes que les particules PM2.5, issues de phénomènes de combustion. D'autre part, leur composition chimique est très différente de celles émises par les combustions, qui sont des particules très complexes comprenant des éléments carbonés, organiques, mais aussi des traces de métaux.



Visualisation des particules Dust en provenance du Sahara. Source : CAMS

Le micro-capteur utilise une technique de mesure optique basée sur la méthode de comptage laser du nombre de particules. Le nombre de particules est déterminé selon les gammes de taille, qui est ensuite converti en concentration (masse par unité de volume estimée en $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$) à l'aide d'un algorithme de conversion nombre/masse. Suivant la composition chimique, certaines ont un poids plus léger que d'autres. L'algorithme de conversion, conçu par le constructeur, n'est pas spécifiquement adapté aux particules issues des épisodes désertiques. Il est donc normal d'avoir un écart entre les mesures issues d'un micro-capteur et celle issue d'un analyseur homologué.

Par exemple la station réglementaire de Loverchy augmente considérablement entre le 29 et 30 mars (plus de $80 \mu\text{g}.\text{m}^{-3}$), les micro-capteurs sur la même période ne dépassent pas les $15 \mu\text{g}.\text{m}^{-3}$.

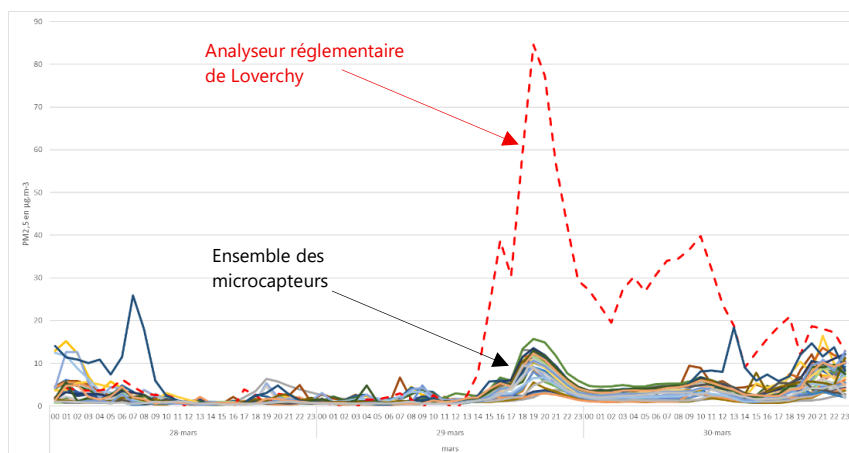


Figure 25 : Concentrations mesurées par les appareils de mesures lors de l'épisode de pollution au Dust du 28 au 30 mars 2024. En rouge en pointillé, l'analyseur réglementaire de Loverchy. En trait plein, les micro-capteurs.

Exemple de biais lié à la correction fournisseur sur les mesures d'ozone

La correction apportée par le fournisseur détaillé en 3.4 permet de corriger en moyenne la donnée mais peut localement engendrer des biais importants sur l'évaluation et la comparaison à certaines valeurs réglementaires. En particulier sur l'ozone, la valeur réglementaire se calcule par un nombre de dépassement ($120 \mu\text{g.m}^{-3}$) d'une moyenne glissante sur 8h.

Le recalage hebdomadaire peut engendrer des biais significatifs sur le calcul de cette statistique comme visible sur le graphe ci-dessous.

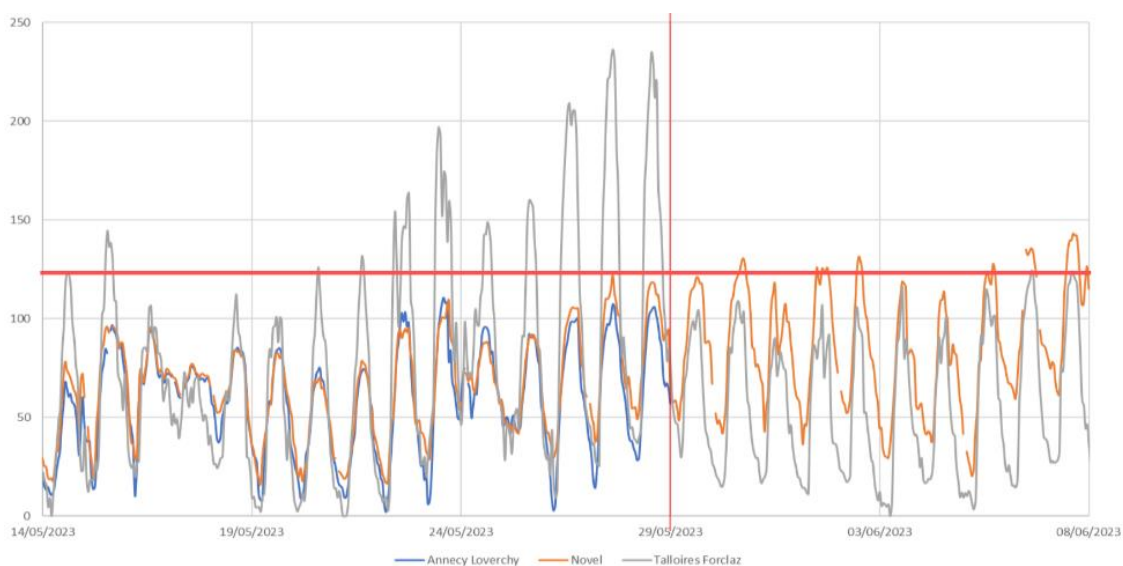


Figure 26 : Exemple de biais lié à la correction fournisseur sur les mesures d'ozone pour la période du 15 au 30 mai 2023

3.8. Conclusion sur la fiabilité des données

Plusieurs études au sein d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes ont démontré l'efficacité des micro-capteurs à mesurer les particules $\text{PM}_{2.5}$. Les mesures dans le cadre de ce projet confirment ce constat. Néanmoins, la fiabilité des capteurs AtmoTrack sur les autres polluants reste encore à améliorer. Les résultats montrent en effet une corrélation peu satisfaisante et pas suffisamment stable selon les périodes, malgré des ajustements hebdomadaires pour l' O_3 et le NO_2 .

Particules Fines $\text{PM}_{2.5}$: Les capteurs AtmoTrack affichent une fiabilité correcte pour les capteurs fixes, hormis pendant les épisodes de Dust.

Ozone O_3 : Les capteurs AtmoTrack donnent une bonne représentativité des niveaux moyens journaliers, et en particulier en été lorsque les concentrations sont plus élevées. Néanmoins les données ne sont pas suffisamment fiables à un pas de temps plus bas : horaires ou minutes. La comparaison aux valeurs réglementaires n'est donc pas possible étant donné que celle-ci se base sur une statistique horaire.

Dioxyde d'azote NO_2 : Le capteur présente encore trop d'incertitude pour être exploité de manière fiable.

4. Analyse et préconisation d'actions

4.1. Analyse des données de particules PM_{2.5}

Le graphique ci-dessous représente l'évolution temporelle des moyennes journalières en PM_{2.5} depuis le début des mesures à savoir du 1^{er} janvier 2023 au 31 décembre 2024. Ce graphique montre la bonne corrélation de tous les capteurs, les concentrations sont en moyenne plus élevées sur la période hivernale en lien avec le chauffage au bois (de janvier à mars).

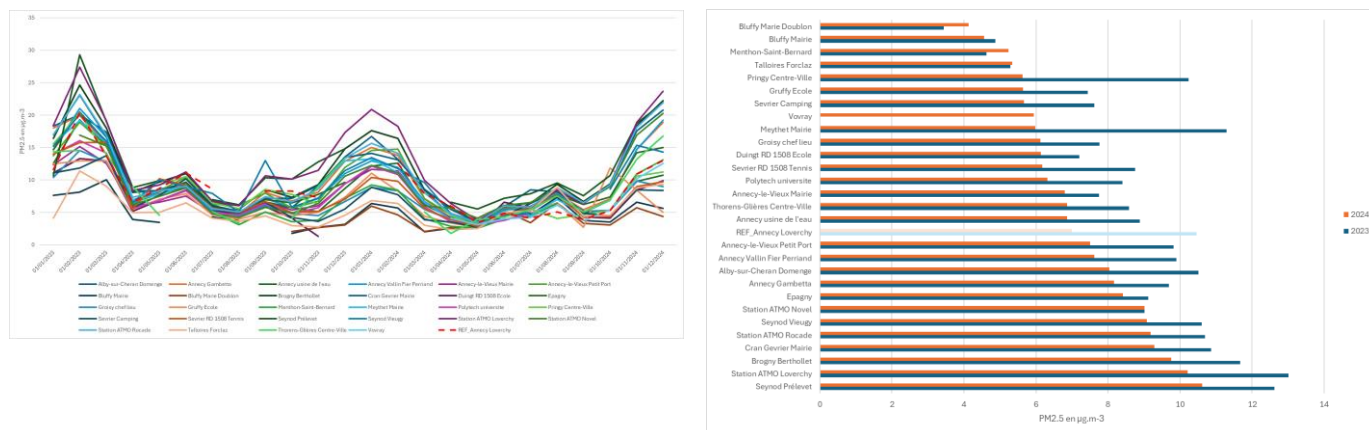


Figure 27 : Concentration des données PM_{2.5} du 01/01/2023 au 31/12/2024. Graphique de gauche : concentrations journalières du 01/01/2023 au 31/12/2024. Graphique de droite : Concentrations annuelles 2023 (en bleu) et 2024 (en orange).

En moyenne annuelle, les niveaux de pollution aux particules fines PM_{2.5} sont moins élevées en 2024 qu'en 2023 sur la plupart des sites de mesures (aussi bien sur les stations réglementaires de référence que sur les microcapteurs). La baisse moyenne d'environ 15% s'explique par des conditions météorologiques plus dispersives et la mise en place d'actions qui permettent de réduire les émissions de polluants.

Dans le cadre de notre étude Sillon'air, l'exploitation de données PM_{2.5} permettent de préconiser deux actions en lien avec ce polluant.

Préconisation 1 : Renforcer la communication du fonds Air Bois sur les secteurs sensibles identifiés

Les particules en suspension PM_{2.5} proviennent en majorité de la combustion à des fins énergétiques de différents matériaux (bois, charbon, pétrole), du transport routier et d'activités industrielles très diverses. Sur le Grand Annecy, la part du chauffage au bois non performant occupe une place prépondérante, à hauteur de 80% comme le montre la répartition des émissions par secteur d'activité du diagramme suivant.

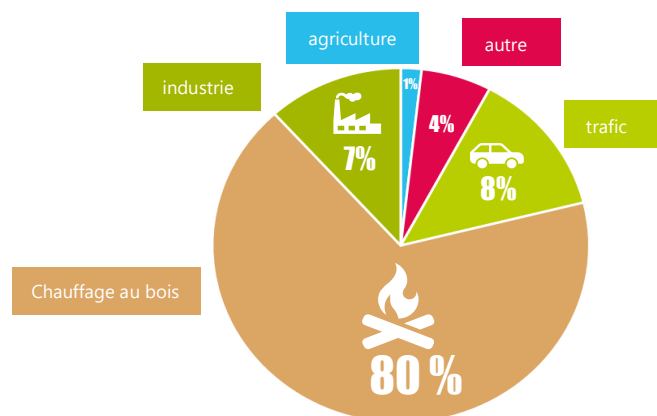


Figure 28 : Responsabilité des secteurs d'activité dans les émissions de $PM_{2.5}$ en 2023 sur le territoire du Grand Annecy

Afin de réduire les émissions, des actions sont mises en place par les collectivités et notamment par le Grand Annecy. Un fond Air Bois⁶ a ainsi été mis en place pour aider financièrement les grands anneciens à remplacer leurs anciennes installations de chauffage au bois (cheminée ou poêle) par un appareil récent, plus performant et moins polluant.

La répartition des capteurs sur le Grand Annecy permet d'identifier plusieurs zones, une zone plutôt préservée autour du Lac et une zone avec des valeurs plus fortes dans les quartiers sud résidentiels d'Annecy (en particulier sur le nord de l'ancienne commune de Seynod), qui au cours des hivers 2022 et 2023 ont été soumis à des concentrations en particules $PM_{2.5}$ plus élevées que sur le reste du territoire. Des actions de communications en lien avec le chauffage au bois peuvent être intensifiées spécifiquement sur cette zone pour optimiser l'impact du dispositif du fonds Air Bois.

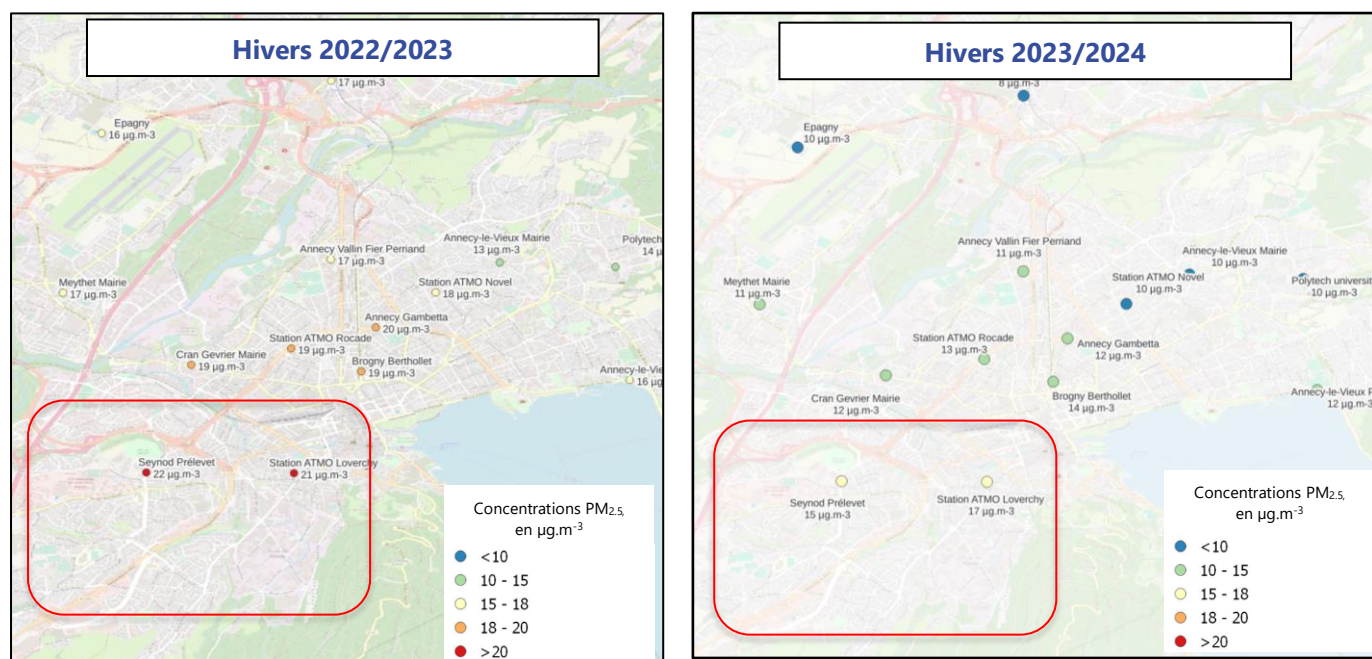


Figure 29 : Concentrations de particules $PM_{2.5}$ au cours de 2 hivers consécutifs (du 01/12 au 31/03)

Préconisation 2 : Valoriser la préservation des abords du lac

Durant les premiers mois de mesures et notamment lors de la période hivernale, plusieurs épisodes avec des concentrations de particules élevées ont été enregistrés. Lors de ces épisodes les concentrations mesurées aux abords du lac (capteurs de Sevrier, Talloire, Duingt, Bluffy) présentaient globalement des niveaux plus bas que sur le reste du territoire (Seynod, Loverchy, etc.)

⁶ Site internet : <https://www.grandannecy.fr/mon-quotidien/preserve-mon-environnement/lenvironnement/air/les-aides>

En particulier lors de l'épisode de pollution aux particules du 04 au 06 mars 2023 les concentrations sur le site de Bluffy ont été encore plus faibles que les autres sites.

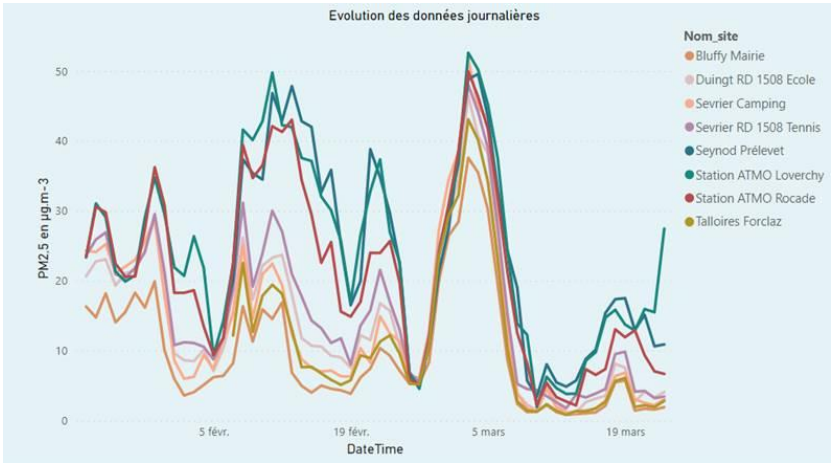
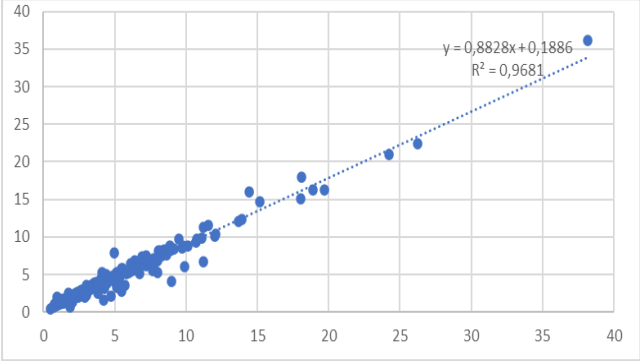
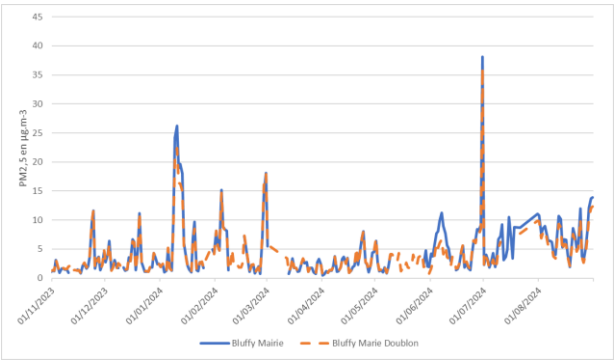


Figure 30 : focus sur l'épisode de pollution de mars 2023

Ces premiers résultats laissent penser que les zones autour du lac, et notamment la rive droite, sont préservées par la pollution aux particules. Afin de pousser ces investigations plus loin, il a été préconisé d'installer un capteur en doublon à Bluffy pour valider les données enregistrées lors des six premiers mois de mesure.

En complément, les membres du COPIL ont acté lors de la séance de juin 2023 de rajouter un capteur sur la commune de Menthon-Saint-Bernard qui a fait la demande de rejoindre les communes investiguées.

Le doublon installé à Bluffy confirme les concentrations mesurées par le premier microcapteur.



	Bluffy Mairie	Bluffy Marie Doublon
Moyenne	4,58	3,99
Maximum	38,14	36,20
Médiane	3,06	2,70

Figure 31 : Confirmation des données mesurées à Bluffy grâce au doublon, installé depuis le 26/10/2023

La zone autour du lac reste relativement préservée des particules fines par rapport au centre d'Annecy. Il convient de préserver cette zone.

4.2. Analyse des données d’ozone (O₃)

L'ozone (O_3) est un polluant secondaire ; il se forme lorsque les oxydes d'azote et les hydrocarbures réagissent sous l'influence des rayonnements ultra-violet du soleil. C'est donc un polluant plutôt présent durant la période estivale. Pour rappel, les mesures d'ozone par micro-capteurs présentent en moyenne des données correctes en moyenne annuelle ou journalière mais ne sont pas fiables à un pas de temps plus bas (en particulier à un pas de temps horaire).

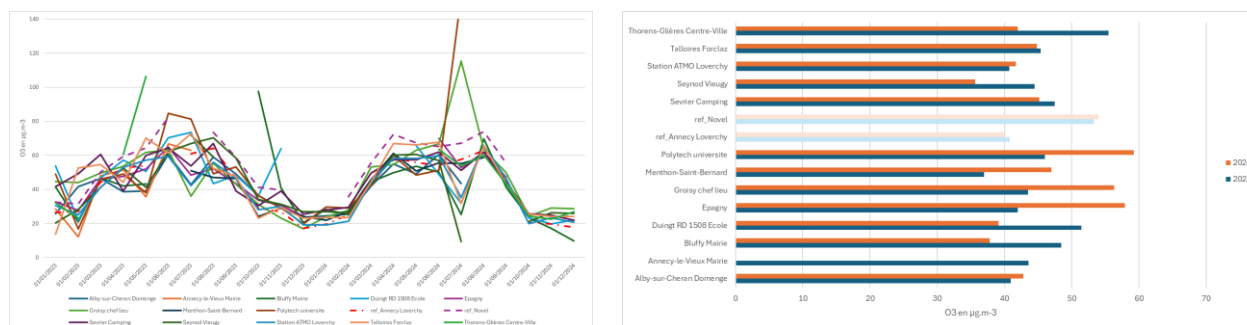


Figure 32 : Concentration d'ozone au cours de l'année 2023 et 2024

Aucune tendance significative ne se détache des capteurs entre l'année 2023 et 2024.

Préconisation 3 : Poursuivre la surveillance sur le lac et au niveau du port

Suite à des concentrations élevées d'ozone aux abords du lac lors du premier semestre 2023, le COPIL a décidé de se rapprocher de la Compagnie des Bateaux d'Annecy pour installer un micro-capteur sur un de leur bateau effectuant des traversés sur le lac de façon régulière. Cette mesure innovante, en mobilité sur le lac, a permis de visualiser et confirmer l'hypothèse d'un phénomène aérologique de formation d'ozone au-dessus du lac.

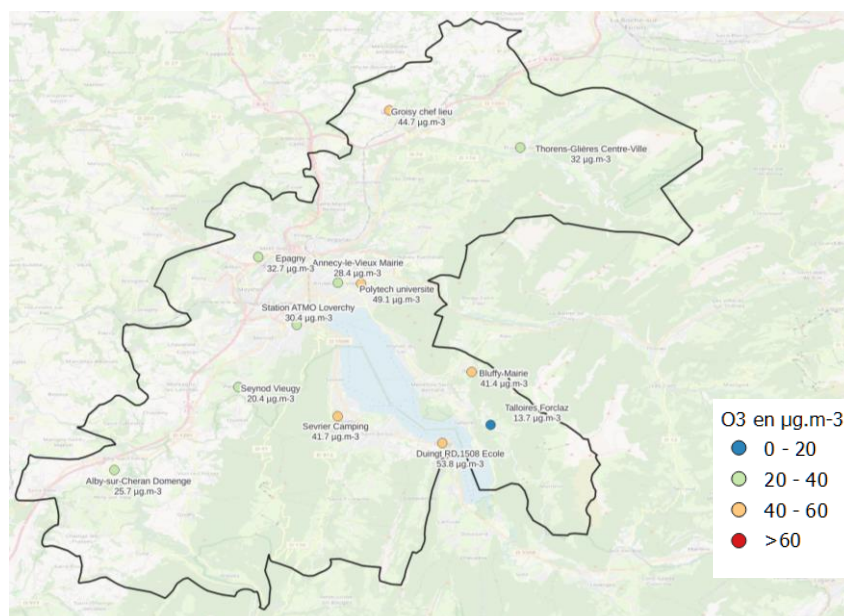


Figure 33 : Concentration d'Ozone en $\mu\text{g.m}^{-3}$, janvier 2023

Ce nouveau capteur installé en août 2023 a en outre permis de mettre en lumière des concentrations particulièrement élevées de particules à certains moments de la journée au niveau du port.

C'est par exemple le cas en septembre 2023 : toutes concentrations mesurées sur le lac varient entre 0 et 20 $\mu\text{g.m}^{-3}$, alors que les concentrations au niveau du port varient entre 20 et 45 $\mu\text{g.m}^{-3}$. Les pics s'observent particulièrement le matin en 7h et 10h lorsque le bateau est à quai.

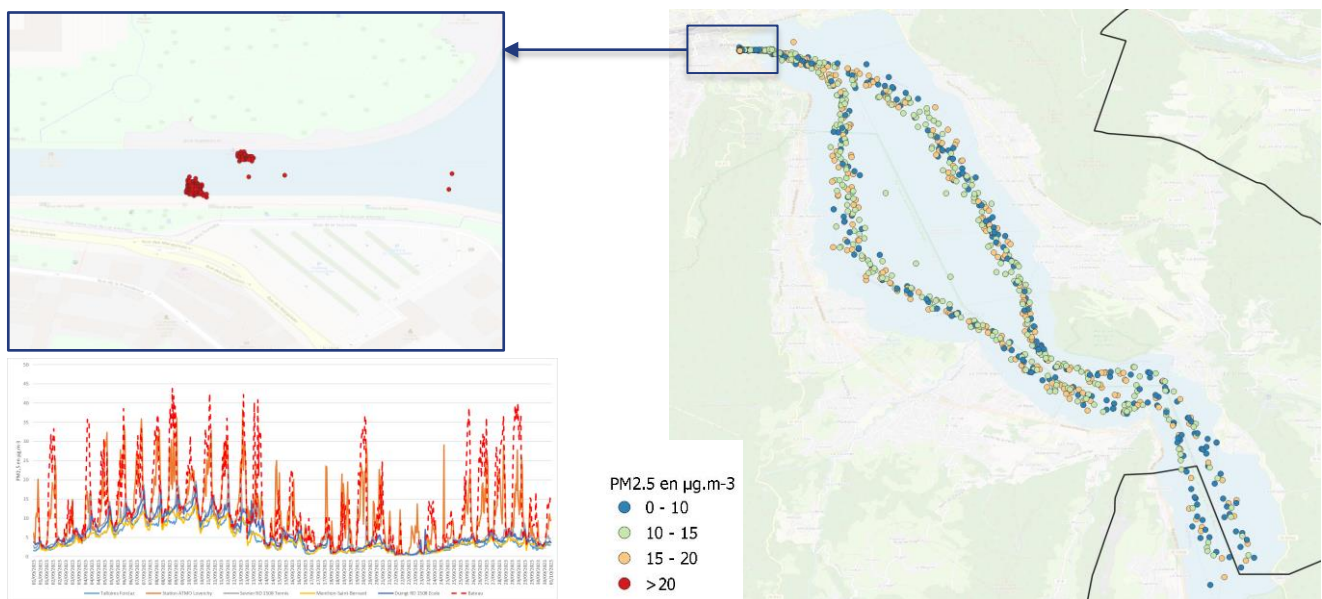


Figure 34 : Concentrations horaires d'ozone en septembre 2023, mesurées par le microcapteur installé sur le bateau

Ces pics sont également synchronisés, avec la station de référence de Loverchy située à proximité. Il conviendrait donc d'explorer plus finement cette zone afin d'avoir des profils journaliers plus complets et de comprendre l'origine de cette hausse locale des concentrations de particules.

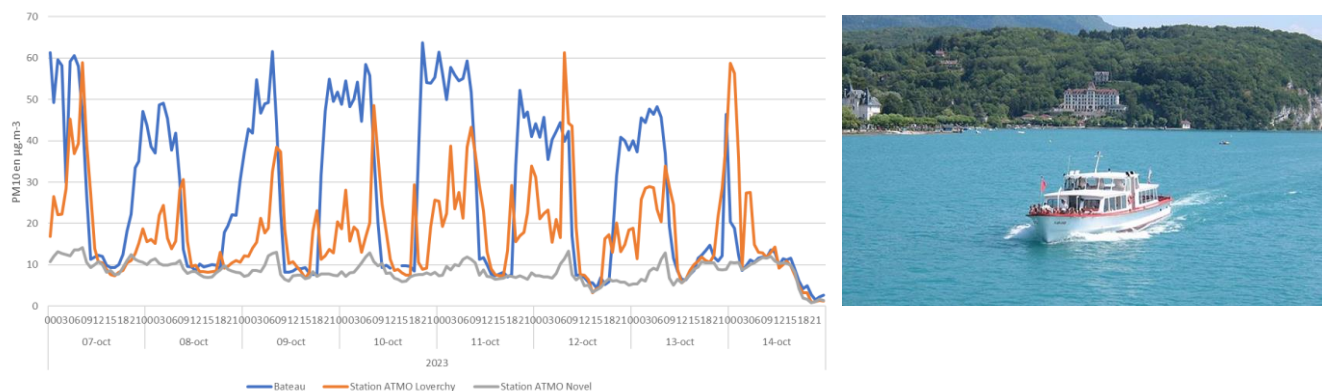
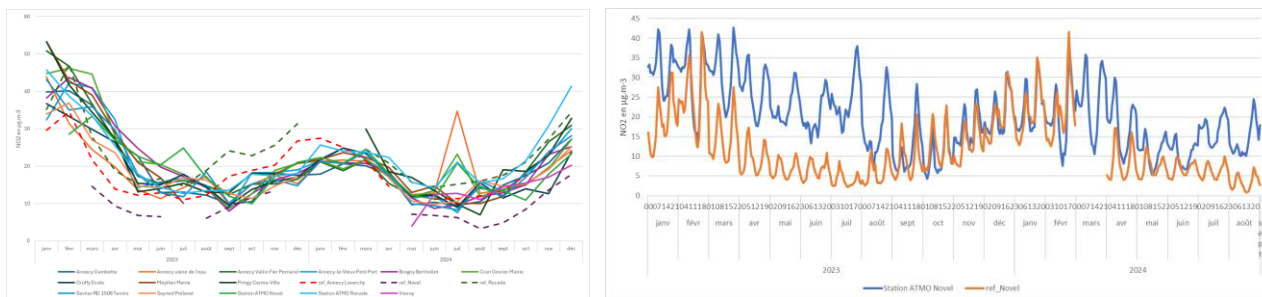


Figure 35 : Exemple de pics en particules fines PM10 sur le site du Bateau synchronisé avec le micro-capteur de la station réglementaire de Loverchy au cours de la 2eme semaine d'octobre 2023.

4.3. Analyse des données de dioxyde d'azote (NO₂)

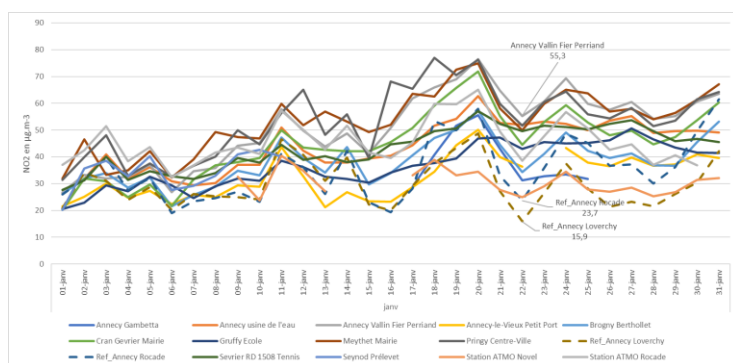
Le dioxyde d'azote (NO₂) est émis lors des phénomènes de combustion, principalement par combinaison de l'azote et de l'oxygène de l'air. Les sources principales sont les véhicules et les installations de combustion.

En moyenne mensuelle, les micro-capteurs permettent d'avoir, après invalidation environnementale, une idée indicative des niveaux de concentrations. Pour un pas de temps plus fin, comme spécifié dans le paragraphe précédent, la fiabilité du capteur pour ce polluant est incertaine. En effet, sur certaines périodes, le capteur, situé sur la station fixe de Novel, est bien corrélé en moyenne hebdomadaire à l'analyseur réglementaire européen (septembre 2023 à février 2024). A d'autres périodes, il est décorrélé ou présente un biais ou une dérive significative (janvier à juillet 2023 et juin à août 2024).



Préconisation 4 : Favoriser les outils de modélisation pour l'évaluation de la ZFE en NO₂

Une des utilisations envisagées par les micro-capteurs NO₂ était l'évaluation de la ZFE. Ce type d'évaluation nécessite d'avoir des mesures précises en tout point du territoire pour voir au mieux les gains induits par les actions mises en place. D'après les éléments précédents (corrélation faible entre le micro-capteur et l'analyseur réglementaire), et comme on peut le voir également sur la figure suivante les données des micro-capteurs peuvent être très disparates sur une journée. Cette absence de précisions ne permet pas d'évaluer des plans d'action qui impactent les concentrations. En moyenne, l'incertitude des micro-capteurs peut en effet être plus élevée que la baisse des concentrations engendrées par les plans. A cela, s'ajoutent les variabilités des autres facteurs (météorologiques, renouvellement classique du parc, autre actions mises en place) rendant ainsi impossible une évaluation fiable et chiffrée de l'impact d'une action ciblée. L'évaluation est beaucoup plus pertinente grâce à des outils de modélisation et d'estimation d'émissions. Grâce à ces outils, l'impact de la ZFE peut être estimé de manière plus précise avec tous les autres paramètres constants (météo, renouvellement du parc, etc.).



4.4. Focus sur les mesures en mobilité : une information pour du temps réel

Les données en mobilité en complément des données fixes ont été mises à disposition sur une plateforme en temps réel. Cette plateforme innovante permet une visualisation des données règlementaires de l'observatoire d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes et des données microcapteurs sur une même interface.

Elle a pour premier objectif d'afficher les concentrations mesurées en temps réel par les véhicules de la flotte d'ENEDIS comme le montre l'image ci-dessous.

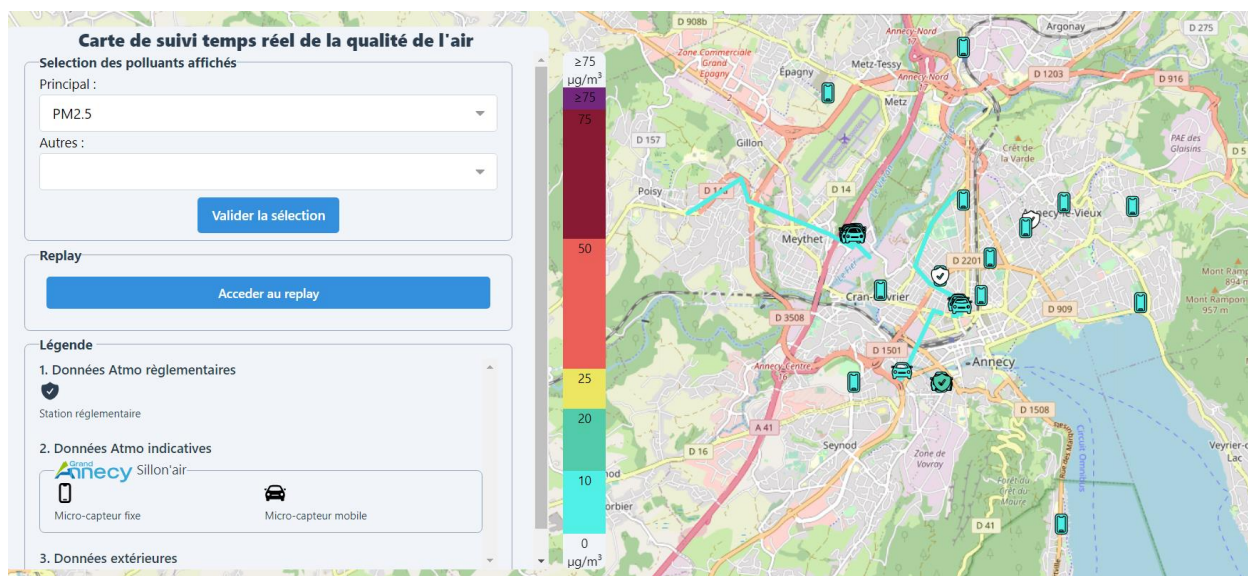


Figure 38 : plateforme de visualisation temps réel

Le second objectif de cette plateforme est de réaliser des replays afin d'observer des phénomènes sur une plus grande période. Les images ci-dessous représentent un exemple de replay réalisé lors de la fin d'un épisode de pollution, l'évolution dans le temps permet d'observer la dispersion des particules tout au long de la journée suite à un épisode pluvieux.

Cette option innovante de replay permet de mieux appréhender l'évolution temporelle de la qualité de l'air et de comprendre les facteurs locaux influant sur la pollution.

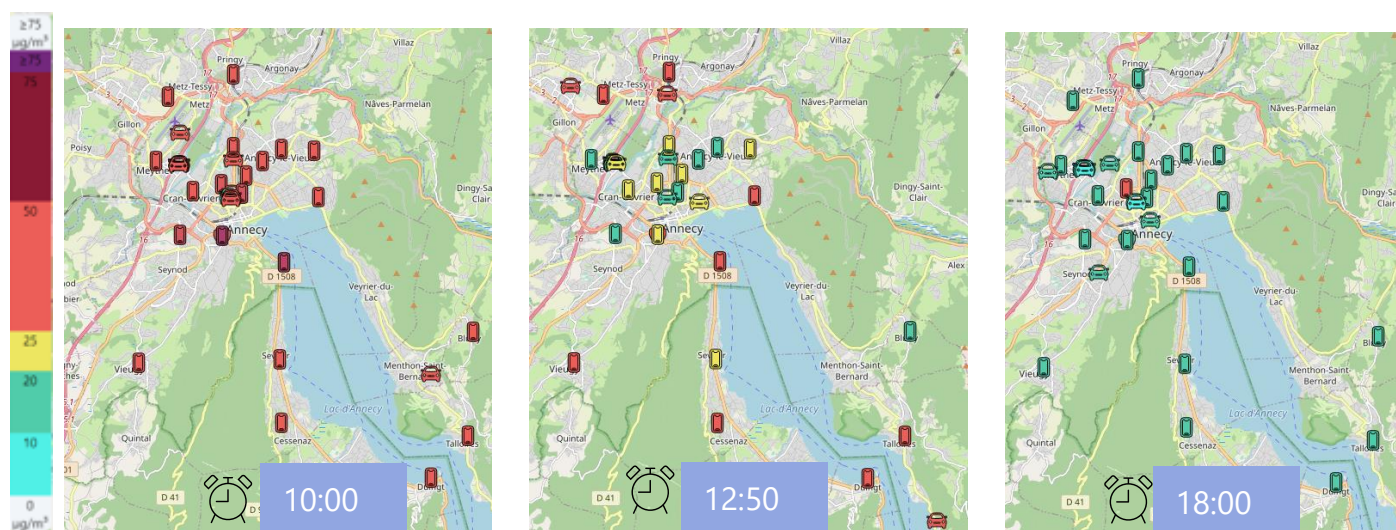


Figure 39 : Evolution temporelle des concentrations de $PM_{2.5}$ pour la journée du 6 mars (10h, 12h50 et 18h) à l'aide du replay de la plateforme de datavisualisation

A partir du mois d'octobre 2024, 3 bus de la flotte SIBRA ont été équipés d'un capteur. En moyenne horaire les données mesurées sur les bus se rapprochent des données observées sur les autres véhicules comme l'illustre la figure 38 (graphique à gauche) pour la journée du 12 novembre 2024. Sur les données agrégées à la minute on constate, sur les bus, mais aussi sur certains véhicules, des artefacts très fréquents avec des pics temporellement très élevés. Ils proviennent soit d'artefacts de mesures à cause du mouvement du capteur, soit de sources très ponctuelles (pot d'échappement direct, véhicules non performants, environnement très local,...). Ils représentent les niveaux de pollutions à une échelle ultra locale, non représentative des niveaux respirés par la population.

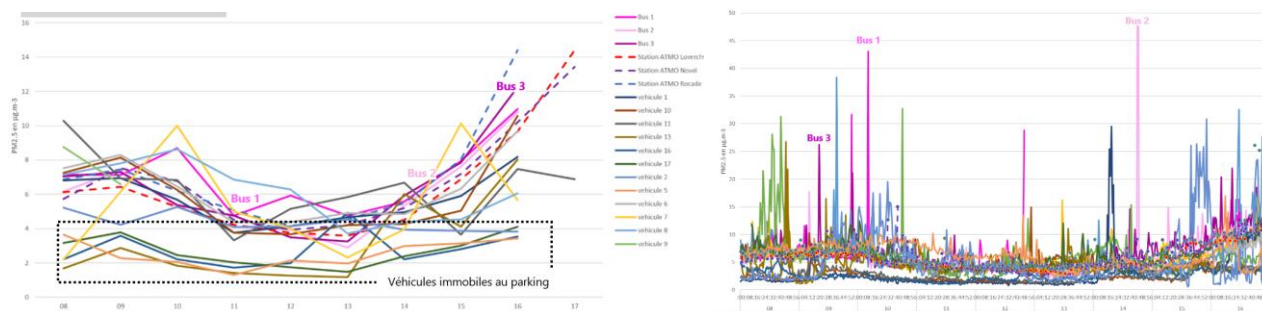


Figure 40 : Focus sur une journée (12 novembre 2024) pour les mesures des capteurs en mobilité installés sur les bus

Préconisation 5 : Optimiser l'utilisation des véhicules de la flotte

En l'état actuel, la mesure en mobilité associée à l'option de replay permet d'appréhender les phénomènes de moyenne à grande échelle. Néanmoins le maillage avec les véhicules en mobilité n'est pas suffisamment important pour avoir une vision exhaustive et efficace de l'ensemble du territoire à chaque moment de la journée. La qualité de l'information reste trop fortement dépendante du nombre de véhicules et de leur déplacement. Le déplacement des véhicules dépend des contraintes professionnelles (fréquence de déplacement plus élevée en matinée et fin d'après-midi) et n'est à fortiori pas optimisée pour sonder l'ensemble des périodes horaires de la journée, ni du territoire.

Une meilleure couverture spatiale et temporelle pourrait être mise en place en multipliant considérablement le nombre de capteurs, mais engendrerait un coût important. Une optimisation de l'utilisation de la flotte pourrait également être envisagée mais impliquerait une analyse approfondie des déplacements de la flotte d'ENEDIS. En moyenne un véhicule est, en effet, en déplacement 10h par mois.

5. Intégration des données dans les cartographies fines échelles

5.1. Présentation

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes a développé depuis 2022 une chaîne de modélisation fine échelle permettant d'intégrer des mesures de micro-capteurs dans les cartographies de particules fines $PM_{2.5}$. Testée et développée dans le cadre des travaux innovants de développement, la chaîne a été paramétrée pour intégrer des capteurs FIXI (sensor community) construits et validés par Atmo AURA. Dans le cadre du projet sillonn'air un travail important a été opéré pour que cette chaîne de modélisation intègre les capteurs AtmoTrack utilisés sur le Grand Annecy. La chaîne totale de modélisation est décrite en Annexe 2.

5.2. Intégration des micro-capteurs dans les cartographies $PM_{2.5}$

5.2.1 Moyennes mensuelles

Dans cette section, nous évaluons l'impact de l'intégration des mesures via micro-capteurs sur une cartographie au cours d'une longue période (au moins un mois). Pour ce faire, les résultats de ces cartographies (krigeage fine échelle) sont moyennés sur une période d'un mois et comparés aux résultats des cartographies issues de la méthode « Combine » qui pour le moment font office de référence à Atmo Auvergne-Rhône-Alpes pour les prévisions à fine échelle des agglomérations. Ces comparaisons permettent d'évaluer l'apport de l'intégration des mesures des micro-capteurs pour la cartographie.

Les cartographies (horaires) moyennées sur une période d'un mois, ainsi que la différence entre les deux méthodes, sont présentées ci-dessous (Figure 41 et Figure 42) pour les périodes de novembre et décembre 2023.

En moyenne mensuelle, les deux méthodes sont cohérentes dans le cœur de l'agglomération d'Annecy (moyenne mensuelle autour de 12 à 14 $\mu g.m^{-3}$ à cette période de l'année). En revanche, pour la zone située à l'est de l'agglomération d'Annecy (zone comprenant la partie sud du Lac, les Aravis, etc...), les niveaux de particules $PM_{2.5}$ sont en moyenne 3 à 4 $\mu g.m^{-3}$ plus faibles après intégration des données micro-capteurs. Cette différence atteint même 6 $\mu g.m^{-3}$ pour la moyenne mensuelle de décembre au niveau de la zone à proximité des micro-capteurs fixes proche de Bluffy. Ces conclusions s'observent aussi bien pour le mois de novembre 2023 que pour le mois de décembre 2023.

Ce même type de différence a déjà été mis en évidence dans des travaux précédents réalisés par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes au niveau de l'agglomération de Grenoble où la modélisation « classique » qui n'intègre que les mesures des stations réglementaires tend à « lisser » les contrastes des niveaux de particules fines entre les valeurs relevées en agglomération (plus instrumentées) et les zones rurales de montagnes avoisinantes, ce qui conduit probablement à une surévaluation des niveaux de particules $PM_{2.5}$ dans ces zones périphériques. Au niveau de l'agglomération de Grenoble, l'intégration des mesures d'un réseau de micro-capteurs a eu pour conséquence de faire baisser les niveaux de particules $PM_{2.5}$ modélisés sur le secteur de la Chartreuse (plus-value validée à l'aide de mesures indépendantes réalisées avec un analyseur sur remorque). Au niveau de l'agglomération du Grand Annecy, le même phénomène est sans doute ici aussi mis en évidence pour la zone correspondant à la partie sud du Lac et des Aravis.



Figure 41 : Cartographie (moyenne mensuelle) de la concentration en particules PM2.5 ($\mu\text{g.m}^{-3}$) avec la méthode Combine classique (gauche), la méthode Krigeage fine échelle intégrant les données de micro-capteurs fixes (droite) pour le mois de novembre 2023.



Figure 42 : Cartographie (moyenne mensuelle) de la concentration en particules PM2.5 ($\mu\text{g.m}^{-3}$) avec la méthode Combine classique (gauche), la méthode Krigeage fine échelle intégrant les données de micro-capteurs fixes (droite) pour le mois de décembre 2023.

5.2.2 Exemple d'une plus-value des micro-capteurs sur les cartographies horaires

Cette étude porte sur un événement survenu le 23 novembre 2023, entre 20h et 21h. Ce soir-là, une configuration particulière et assez inattendue des concentrations de particules fines (PM2.5) a été observée sur les cartes à fine échelle intégrant les données des micro-capteurs fixes.

Deux zones présentaient des niveaux élevés de pollution (entre 40 et 50 $\mu\text{g.m}^{-3}$) :

- À l'est du centre-ville, entre Vieugy et Seynod.
- Au nord-ouest, autour d'Annecy-le-Vieux.

En revanche, le centre-ville affichait des concentrations plus faibles (entre 20 et 30 $\mu\text{g.m}^{-3}$).

Il serait intéressant d'examiner les raisons de cette configuration. Cela pourrait s'expliquer, en partie, par des émissions locales plus importantes, notamment liées à l'usage du chauffage au bois dans certaines zones périurbaines. D'ailleurs, des niveaux de pollution hivernaux plus élevés ont déjà été relevés à Seynod et à la station Atmo d'Annecy Loverchy lors des hivers 2022-2023 et 2023-2024.

Cependant, ce phénomène n'a pas été observé à Annecy-le-Vieux, ce qui suggère que des conditions météorologiques particulières pourraient aussi jouer un rôle. Par exemple, par temps calme (peu ou pas de

vent), une brise descendante venant des montagnes autour du lac (vent catabatique) pourrait favoriser la dispersion des particules dans certaines zones (comme le centre-ville), tandis que d'autres zones à l'abri du vent (sous le vent des Bauges et des Aravis) pourraient connaître une accumulation de polluants à cause d'une ventilation plus faible.

Le soir du 23 novembre 2023, les conditions météo observées à la station de l'aérodrome d'Annecy (Meythet) confirment ce scénario : vent faible (< 10 km/h), température proche de 0°C et présence de brouillard.

Des analyses plus détaillées des conditions météo locales et des sources de pollution sont cependant nécessaires pour confirmer ces hypothèses. Dans ce cas, le réseau de micro-capteurs s'avère très utile, car il permet de détecter des phénomènes locaux que les modèles classiques ne peuvent pas toujours repérer.

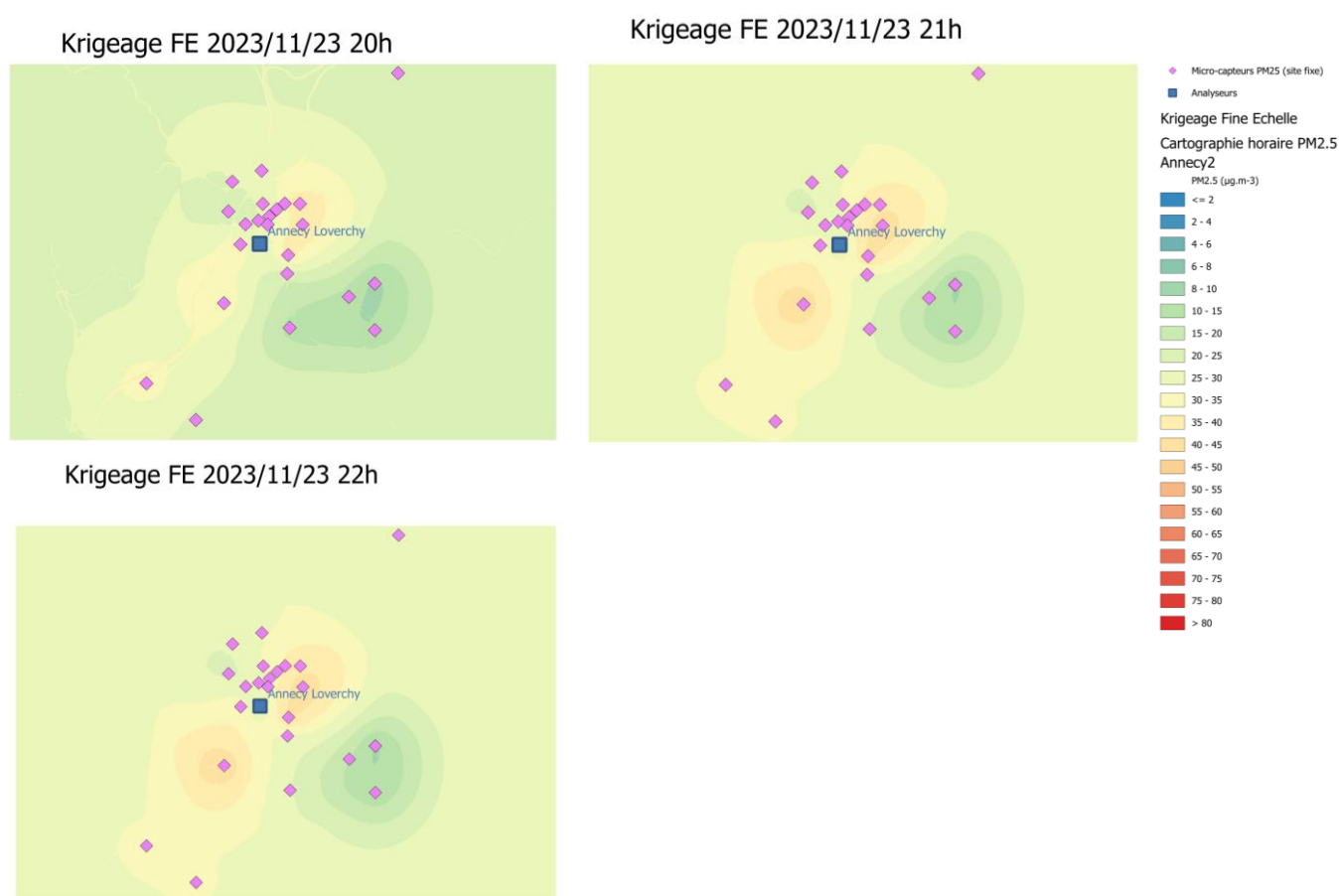


Figure 43 : Exemple de cartographie PM2.5 avec une plus-value potentielle des microcapteurs (illustration du phénomène de vent catabatique, dans la soirée du 23/11/2023)

5.2.3 Perspectives

Ce projet a permis de tester la chaîne de modélisation avec intégration de micro-capteurs sur un nouveau territoire avec des données provenant de micro-capteurs Atmotrack.

Comme vu précédemment, intégrer les données de ces micro-capteurs dans les cartographies peut permettre de rendre compte de certains phénomènes locaux et d'ajouter ainsi une précision dans les cartographies. Néanmoins la fiabilité des micro-capteurs utilisés dans le cadre de ce projet reste encore trop incertaine pour s'assurer d'une plus-value notable dans les cartographies actuelles.

L'objectif serait donc de mettre en place un réseau de micro-capteurs fiables et bien maîtrisés. Cela suppose un suivi rigoureux tout au long du processus : de l'installation, à la validation finale, en passant par des comparaisons avec les stations réglementaires.

A terme, ces nouvelles données maîtrisées mesurées sur le Grand Annecy pourraient être intégrées facilement dans les services développés par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes : comme la plateforme de visualisation et de comparaison des micro-capteurs FIXI sur le site Captothèque <https://app.captothèque.fr/carte> , et la cartographie fine échelle du territoire intégrant les microcapteurs dans l'application AirToGo.

5.3. Intégration des micro-capteurs dans les cartographies

NO₂

Dans ce projet, la chaîne de modélisation, initialement conçue pour traiter les données de particules fines (PM_{2.5}) issues des micro-capteurs, a été améliorée pour pouvoir également intégrer d'autres polluants, notamment le dioxyde d'azote (NO₂).

Une nouvelle version de la chaîne a donc été développée spécifiquement pour traiter les mesures de NO₂ fournies par les micro-capteurs, et elle a été testée avec les données d'Atmotrack.

Les tests ont porté sur le mois de novembre 2023. Ce mois a été choisi car la corrélation linéaire entre les deux micro-capteurs de NO₂ installés sur les stations réglementaires (Annecy Rocade et Novel) et les mesures des analyseurs de référence était plus élevée que les autres mois. En effet, pour novembre 2023 même si en absolue les données de micro-capteurs sont bien plus basses que celles mesurées par l'analyseur réglementaire, la corrélation linéaire entre les données du micro-capteur et de l'analyseur est de 80 % à Novel et de 60 % à Annecy Rocade.



Figure 44 : Test d'intégration des données de microcapteurs fixes NO₂ dans les cartographies du territoire – Novembre 2023

La carte obtenue reste globalement cohérente, avec des concentrations de NO₂ plus élevées le long des grands axes routiers. Cependant, l'intégration des données issues des micro-capteurs entraîne une baisse notable des niveaux de NO₂ sur l'ensemble du territoire par rapport aux cartes actuelles (voir Annexe 3).

Cela s'explique par des mesures de NO₂ relativement faibles enregistrées par les micro-capteurs durant le mois de novembre 2023, par rapport aux stations de référence surtout après le 15 novembre (cf. graphe ci-dessous)

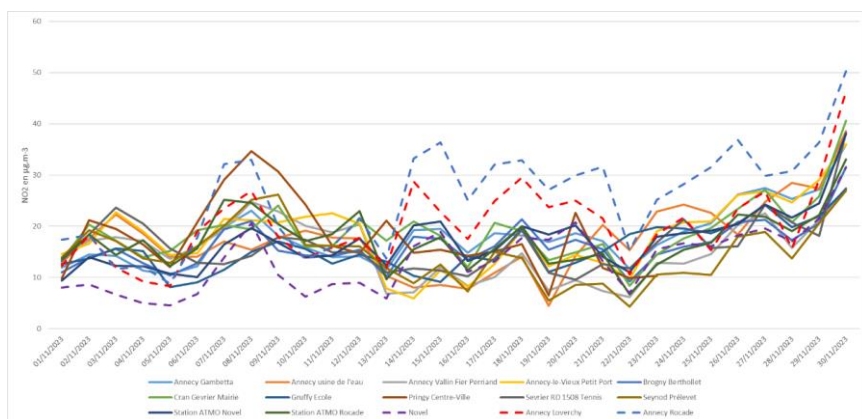


Figure 45 : Concentration mesurées par les microcapteurs de NO₂ sur le mois de novembre 2023

La fiabilité des capteurs est donc un élément clé pour garantir la représentativité des cartographies. Pour que les données issues des micro-capteurs soient cohérentes entre elles et compatibles avec les données réglementaires, elles doivent suivre un protocole rigoureux : installation encadrée, validation, recalage des mesures. Ce n'est qu'à ces conditions qu'elles pourront être intégrées aux cartographies régionales de manière fiable et homogène.

5.4. Intégration des micro-capteurs en mobilité dans les cartographies

Les données collectées par des micro-capteurs mobiles (installés sur des voitures ou des bateaux) ont été ajoutées aux cartes existantes, en complément des capteurs fixes et des analyseurs déjà utilisés. Pour pouvoir intégrer ces données mobiles dans les cartes horaires, un traitement spécifique est nécessaire : chaque mesure prise à la minute par un véhicule dans une maille du modèle de 20m x 20m est d'abord moyennée sur une heure avant d'être utilisée dans le calcul par krigeage.

Lorsque le véhicule équipé d'un micro-capteur est en mouvement, les turbulences liées à la vitesse engendrent un biais significatif sur la mesure du micro-capteur. Plus la vitesse est élevée, plus le biais est important. Par ailleurs, la distance parcourue par le véhicule entre chaque mesure en cas de vitesse élevée pose des problèmes de géolocalisation : la mesure de concentration n'est plus représentative d'un point fixe mais d'un tronçon, parcouru par le véhicule pendant la durée de la mesure. Ainsi un filtre a été testé en fonction de la vitesse pour fiabiliser la donnée.

Les premiers résultats ont permis de rapidement mettre en évidence de fortes déviations locales des niveaux de concentrations PM_{2.5} correspondants à des « amas » importants de mesures au niveau de localisation de stationnement fortement fréquentées par les véhicules comportant des capteurs (centre commercial Courier, locaux GRDF-Enedis à proximité de l'A41). La forte surreprésentation de ces mesures effectuées probablement de nuit et sur un parking (intérieur ou sous-terrain) engendre un biais important de représentativité (effectuées principalement la nuit, ces mesures ne sont pas représentatives d'une journée complète). La baisse des niveaux PM_{2.5} engendrées par la prise en compte des mesures de micro-capteurs mobiles sur ces secteurs est probablement une conséquence de ce biais. Afin de tenter de s'affranchir de ces effets, nous avons effectué différents tests (chacun pour la journée du 23 novembre 2023). Ces tests sont résumés dans le tableau ci-dessous :

- Variation des seuils de vitesse minimaux et maximaux des véhicules ayant effectué la mesure.
- Attribution d'une valeur d'incertitude double (60% au lieu de 30%) aux mesures effectuées par les micro-capteurs mobiles par rapport aux micro-capteurs fixes.
- Filtrage des mesures par corrélation avec le modèle actuel.

Le filtrage sur les vitesses a été implémenté dans le but de tenter d'éliminer et de diminuer le nombre (via le seuil sur les vitesses minimales) de mesures provenant des parkings. L'attribution d'une valeur d'incertitude

double (60% au lieu de 30%) aux micro-capteurs mobiles en comparaison aux micro-capteurs fixes se justifie par la baisse de la fiabilité des mesures des capteurs mobiles et de leur sur-représentation en nombre par rapport aux micro-capteurs fixes. Le filtrage par corrélation propose d'éliminer un nombre croissant de mesures, de façon itérative et aléatoire, dans le but d'obtenir une corrélation spatiale suffisante entre les mesures utilisées et les concentrations de polluants du modèle utilisées comme fond pour le krigeage.

	Vitesse min (km/h)	Vitesse max (km/h)	VME MC mobiles x2	Nbr min mesures par maille	Filtrage par corrélation
Test 1	0	6	Non	1	Non
Test 2	6	30	Non	1	Non
Test 3	6	30	Oui	1	Non
Test 4	6	30	Oui	1	Oui
Test 5	20	50	Oui	1	Oui

Figure 46 : Synthèse des différents filtres appliqués aux mesures effectuées en mobilité

Parmi les tests effectués sur les seuils de vitesse, aucun n'a pu permettre d'obtenir un tri satisfaisant des mesures effectuées sur les parkings qui restent sur-représentées. Cependant, en ne conservant que les données enregistrées à des vitesses comprises entre 6 et 30 km/h, la répartition spatiale des niveaux de PM2.5 obtenue s'est révélée plus cohérente avec celle des cartes produites à partir des capteurs fixes. Ce choix a donc été retenu.

Ajouter une incertitude plus élevée pour les mesures mobiles (le double de celles des capteurs fixes) a aussi légèrement amélioré la cohérence des cartes. Cette option a été jugée utile et conservée.

L'application d'un filtrage basé sur la corrélation a également donné de bons résultats : la distribution spatiale des PM2.5 s'est rapprochée du modèle de base intégrant les micro-capteurs, avec des niveaux plus faibles en périphérie et plus élevés dans le centre. Toutefois, ce filtre étant aléatoire, il est difficile à utiliser pour des comparaisons rigoureuses. C'est pourquoi les résultats du test 3 (sans ce filtre) sont présentés ci-dessous, afin de comparer précisément les données issues des deux types de capteurs. Malgré cela, dans un contexte opérationnel, le filtrage par corrélation est fortement recommandé pour traiter les données mobiles.

Pour la journée du 23 novembre, les mesures prises en compte pour le test d'intégration des micro-capteurs fixes et mobiles sont représentées ci-dessous :

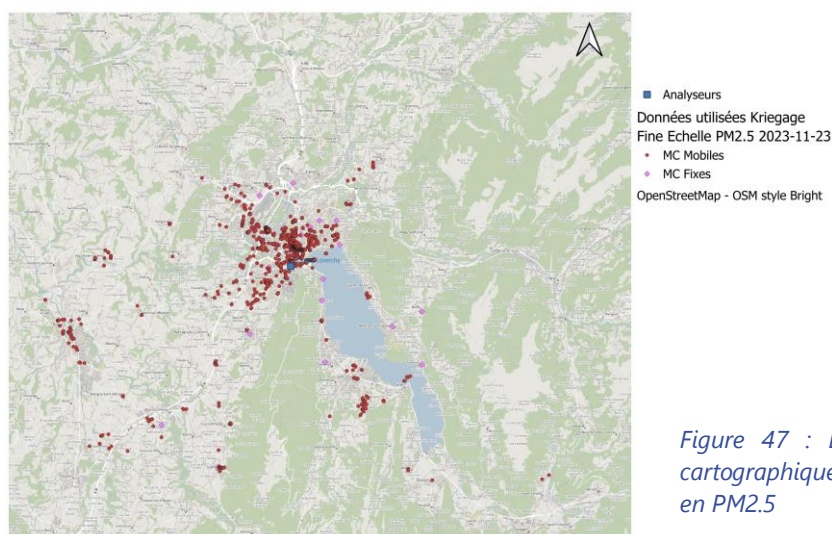


Figure 47 : Données prises en compte pour le test cartographique d'intégration des données fixes et mobiles en PM2.5

Les cartes du 23 novembre 2023 ci-dessous comparent les niveaux moyens de $PM_{2.5}$: l'une utilise uniquement les micro-capteurs fixes (en haut), l'autre combine les capteurs fixes et mobiles (en bas).

L'ajout des micro-capteurs mobiles réduit les niveaux le long des routes, mais les augmente à l'est de la ville, notamment près du Lac et dans le secteur des Aravis (Talloires, Bluffy, etc.). Cela engendre des minima locaux près des micro-capteurs fixes à l'est du Lac, et également dans les zones de parkings très fréquentées par les véhicules de la flotte. Ces résultats posent des questions sur la pertinence de l'intégration des mesures mobiles dans la cartographie.

Dans le cadre de ce projet, Atmo a fait des progrès importants en validant la faisabilité technique d'intégrer les mesures mobiles dans les cartographies. Toutefois, cela nécessite l'application de filtres importants pour corriger les mesures moins fiables et éviter leur sur-représentation, par exemple en excluant les zones de parkings souterrains ou intérieurs où les véhicules se rendent fréquemment. Malgré ces précautions, il est difficile de déterminer l'utilité de ces mesures pour un territoire aussi large que celui d'Annecy, en raison de leur fiabilité limitée et de l'échantillonnage irrégulier des trajets et de la nature aléatoire des lieux visités par les véhicules équipés de micro-capteurs.



Figure 48 : Test d'intégration des micro-capteurs en mobilité dans les cartographies du territoire - 23 novembre 2023. A gauche, cartographie intégrant uniquement les micro-capteurs fixes, à droite, cartographie intégrant les micro-capteurs fixes et mobiles.

6. Conclusion et perspectives

Le projet Sillon'air s'inscrit dans une démarche innovante de surveillance de la qualité de l'air à l'échelle du Grand Annecy. En mobilisant la flotte de véhicules professionnels d'ENEDIS, équipée de micro-capteurs, aux côtés d'un réseau de capteurs fixes, il a permis de collecter des données fines et localisées, notamment en proximité des axes routiers, dans l'objectif d'apporter une meilleure compréhension des dynamiques de pollution au sein du territoire.

Malgré un **taux de fonctionnement satisfaisant** pour les capteurs fixes (83 % sur 20 mois), les capteurs embarqués sur les véhicules ont présenté de nombreuses limites techniques, avec un taux moyen de fonctionnement de 45 %. Ces dysfonctionnements, liés notamment à des pannes matérielles, des capteurs déconnectés ou des difficultés de transmission en parking souterrain, ont engendré des pertes de données significatives et des coûts logistiques importants.

En termes de **représentativité**, la fiabilité des capteurs varie fortement selon les polluants mesurés : les données PM2.5 ont montré une représentativité correcte (hors épisodes de poussières désertiques), tandis que les mesures d'O3 n'étaient fiables que sur des moyennes journalières, et celles de NO2 restent trop incertaines pour permettre une exploitation rigoureuse.

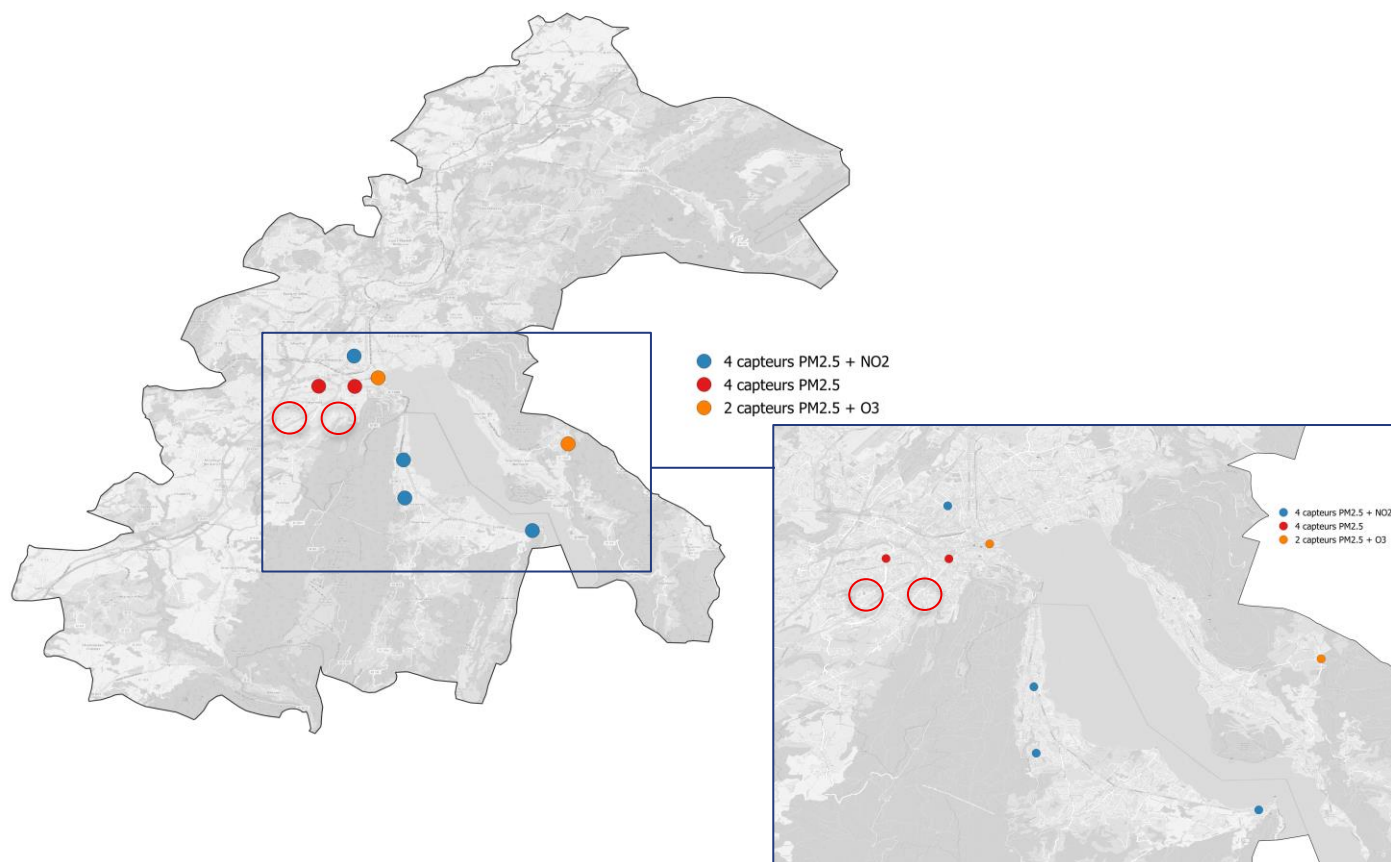
Pour autant, cette étude a permis de dégager plusieurs **leviers d'action concrets** à partir de l'exploitation des données PM2.5. Ainsi, des actions ciblées peuvent être envisagées :

- ➔ Cibler l'action Fonds Air Bois sur les quartiers sud résidentiels d'Annecy (en particulier sur le nord de l'ancienne commune de Seynod)
- ➔ Valoriser la bonne qualité de l'air sur les rives du lac et la préserver
- ➔ Poursuivre la surveillance au niveau du port
- ➔ Favoriser les outils de modélisation et des nouveaux capteurs plus fiables pour l'évaluation des plans d'action
- ➔ Restreindre l'utilisation de la flotte de véhicules pour les mesures en mobilité

En perspectives, bien que les données issues de la mobilité représentent une source d'information prometteuse, elles présentent aujourd'hui des limites importantes en termes de taux de fonctionnement, de fiabilité, et donc de rentabilité par rapport aux investissements nécessaires. Le traitement de ces données reste encore peu opérationnel, et l'optimisation des flottes reste complexe et sujette à de nombreuses contraintes. Toutefois, des réflexions sont en cours au niveau national pour répondre à ces enjeux. À terme, les travaux du LCSQA (Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air) devraient permettre de développer des méthodologies robustes, assurant une meilleure représentativité spatiale et temporelle des données de qualité de l'air mesurées par des capteurs embarqués.

L'étude actuelle menée dans le cadre du projet Sillon'air a permis d'identifier certaines zones à fort enjeu. Dans cette optique, l'objectif à court terme serait de privilégier un déploiement fixe et ciblé de capteurs, conçu pour compléter de manière pertinente les cartographies existantes. Ce déploiement devra s'appuyer sur les enseignements tirés de l'étude Sillon'air, tout en tenant compte des contraintes budgétaires. Il s'agit donc de concevoir un réseau optimisé, apportant une réelle valeur ajoutée aux dispositifs actuels, en capitalisant sur les avancées technologiques introduites depuis le lancement du projet. À ce titre, un benchmark des capteurs de NO₂ a été réalisé, révélant l'existence de dispositifs plus performants que ceux utilisés dans Sillon'air. Ces capteurs assemblés par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, et corrigés en temps réel par des algorithmes d'intelligence artificielle ouvrent des perspectives concrètes d'amélioration pour les futures campagnes de mesure.

Dans la continuité de ces résultats, et toujours dans un contexte budgétaire contraint, la mise en place d'un réseau optimisé d'une dizaine de points de mesure pour les particules fines (PM), dont 4 incluant également des capteurs NO₂ et 2 des capteurs O₃ peut être envisagée. Ce maillage ciblé, reposant sur une sélection stratégique des emplacements, permet de renforcer la représentativité des données tout en maintenant un équilibre entre expertise, couverture et maîtrise des coûts.

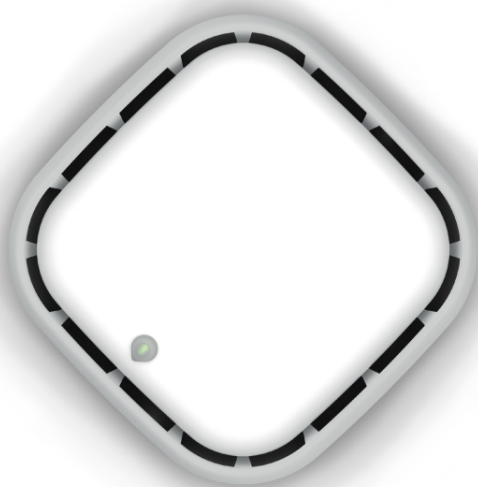


Dans cette dynamique, le territoire du Grand Annecy pourrait bénéficier de la plateforme collaborative de datavisualisation de la Captothèque : <https://app.captotheque.fr/carte> récemment mise en place. Financée par la Région, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes et son fonds de dotation Convergence, cette plateforme est accessible depuis mars 2025. Elle permettra la visualisation des microcapteurs déployés localement sur le Grand Annecy, au même titre que ceux installés sur la métropole de Grenoble (50 capteurs en 2025) et ceux prévus sur la métropole de Lyon (30 capteurs d'ici 2026).

En outre, les données issues de ce nouveau réseau permettront d'affiner les cartographies territoriales, en apportant une meilleure résolution sur les zones prioritaires identifiées dans le cadre du projet Sillon'air. À terme, ces cartes enrichies seront intégrées aux services numériques existants (AirToGo, Captothèque et site web) et rendues accessibles aux citoyens, renforçant ainsi la transparence et l'engagement du public dans les enjeux de qualité de l'air.

Annexe 1

Fiche technique du capteur Atmotrack



NE PAS DISTRIBUER - V2.3 - COPYRIGHT © - 2021 - 42 FACTORY

Fiche technique Atmo02

42 Factory est une société française qui conçoit et commercialise des solutions de surveillance de l'air principalement pour les entreprises, les collectivités locales et les organismes reconnus. La recherche, le développement et la production sont réalisés en France.

Nos capteurs sont déployés à la fois sur des emplacements fixes et des véhicules, ce qui nous permet de surveiller les sources et événements de pollution en temps réel et dans une zone déterminée. En fonction de vos besoins et exigences, nous proposons plusieurs options pour installer et alimenter nos appareils.

L'Atmo02 est la deuxième génération de produit d'AtmoTrack. En plus des particules (**PM1**, **PM2.5** et **PM10**), il mesure le **niveau sonore**, les données météorologiques (**température**, **humidité**), le **dioxyde d'azote** (NO2), le **monoxyde de carbone** (CO) et l'**ammoniac** (NH3). Il est également possible d'ajouter l'un des capteurs de gaz suivants: **ozone** (O3), **dioxyde d'azote** (NO), **dioxyde de soufre** (SO2), **éthylène** (C2H4) et **sulfure d'hydrogène** (H2S).



Paramètres techniques

PARAMÈTRES	INDEX	UNITÉS
Générale		
Plage de fonctionnement - Température	-10 à +60	Celsius (°C)
Plage de fonctionnement - Humidité	0 à 99	%RH
Tension d'alimentation	DC 9 à 24	Volts (V)
Consommation d'énergie	1.2 à 3	Watt (W)
Alimentation recommandée	DC 12V / 1A	Volts (V) / Ampères (A)
Températures de stockage	-10 à +60	Celsius (°C)
Dimensions externes	140 x 140 x 46,5	mm
Intervalle de mesure & envoi de données	paramétrable (10 par défaut)	secondes
Poids	261	g
Type de communication : GPS /GSM Transmission : GPRS (2G)	1900 hz, 1800hz, 900hz, 850hz	Hertz (Hz)
WIFI	802.11 b/g/n	
Particules Fines		
Plage de mesure	0.3 à 1.0; 1.0 à 2.5; 2.5 à 10	Micron (µm)
Efficacité du comptage des particules	50%@0.3µm, 98%@ 0.5µm	
Plage de mesure	0 à 1000	µg/m³
Résolution de la mesure	1	µg/m³
Limite de détection (plus basse concentration mesurable) LOD	1	µg/m³
Précision de la mesure	±10% @ 100-500µg/ m³ ±10µg @ 0- 100µg/ m³	
Dérive de l'étalonnage (en % par mois)	<1%	
Durée de vie du capteur	> 2ans (typ.)	
Temps de réponse	<1	secondes (s)
Temps de réponse T90	<10 s	secondes (s)

NE PAS DISTRIBUER- V2.3 - COPYRIGHT © - 2021 - 42 FACTORY

PARAMÈTRES	INDEX	UNITÉS
Humidité		
Plage de mesure	0 à 100	%RH
Précision	±3	%RH
Température		
Plage de mesure	-40 à 85	Celsius (°C)
Précision	±0.5 °C @ 25°C ±1 °C else	
NO₂ (Dioxyde d'azote)		
Plage de mesure	0 à 250 0 à 478	ppb µg/m³
Résolution	1 2	ppb µg/m³
Limite de détection	10 19	ppb µg/m³
Précision (écart max par rapport aux valeurs réelles)	10 19	ppb µg/m³
Temps de réponse	10	secondes (s)
R² (vs appareil de référence en chambre de mesures)	≥ 0.68	
NH₃ (Ammoniac)		
Plage de mesure	0 à 500 0 à 340	ppb µg/m³
Résolution	1 1	ppb µg/m³
Limite de détection	5 3	ppb µg/m³
Précision (écart max par rapport aux valeurs réelles)	5 3	ppb µg/m³
Temps de réponse	10	secondes (s)
CO (Monoxyde de carbone)		
Plage de mesure	0 à 500 0 à 581	ppb µg/m³
Résolution	1 1	ppb µg/m³
Limite de détection	5 6	ppb µg/m³
Précision (écart max par rapport aux valeurs réelles)	5 6	ppb µg/m³
Temps de réponse	10	secondes (s)
R² (vs appareil de référence en chambre de mesures)	≥ 0.7	

NE PAS DISTRIBUER- V2.3 - COPYRIGHT © - 2021 - 42 FACTORY

PARAMÈTRES	INDEX	UNITÉS
Gaz en option (Capsule électrochimique)		
Temps de réponse T90	<50	secondes (s)
O₃ (Ozone)		
Plage de mesure	0 à 10 000 0 à 20 000	ppb µg/m ³
Résolution	5 10	ppb µg/m ³
Précision (écart max par rapport aux valeurs réelles)	5 10	ppb µg/m ³
Limite de détection	10 20	ppb µg/m ³
Durée de vie	> 2 ans (typ.)	
Dérive de l'étalonnage (en % par mois)	< 2%	
Temps de réponse	10	secondes (s)
R ² (vs appareil de référence en chambre de mesures)	≥ 0.7	
NO₂ (Dioxyde d'azote)		
Plage de mesure	0 à 10 000 0 à 19 120	ppb µg/m ³
Résolution	5 10	ppb µg/m ³
Précision (écart max par rapport aux valeurs réelles)	5 10	ppb µg/m ³
Limite de détection	5 10	ppb µg/m ³
Durée de vie	> 2 ans (typ.)	
Dérive de l'étalonnage (en % par mois)	< 2%	
Temps de réponse	10	secondes (s)
R ² (vs appareil de référence en chambre de mesures)	≥ 0.75	

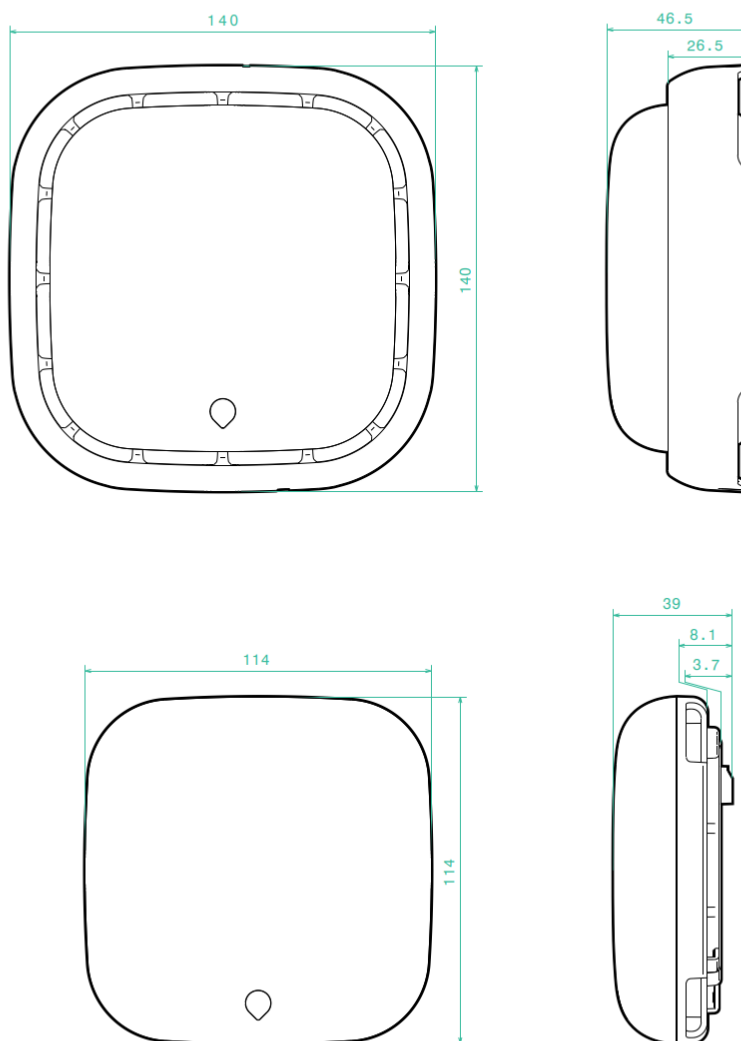
NE PAS DISTRIBUER- V2.3 - COPYRIGHT © - 2021 - 42 FACTORY

PARAMÈTRES	INDEX	UNITÉS
SO ₂ (Dioxyde de soufre)		
Plage de mesure	0 à 10 000 0 à 26 596	ppb µg/m ³
Résolution	5 13	ppb µg/m ³
Précision (écart max par rapport aux valeurs réelles)	5 13	ppb µg/m ³
Limite de détection	10 27	ppb µg/m ³
Durée de vie	> 2 ans (typ.)	
Dérive de l'étalonnage (en % par mois)	< 2%	
Temps de réponse	10	secondes (s)
R ² (vs appareil de référence en chambre de mesures)	≥ 0.8	
C ₂ H ₄ (Ethylène)		
Plage de mesure	0 à 100 0 à 87	ppm mg/m ³
Résolution	0.25 0.22	ppm mg/m ³
H ₂ S (Sulfure d'hydrogène)		
Plage de mesure	0 à 100 0 à 139	ppm mg/m ³
Résolution	0.02 0.03	ppm mg/m ³
CO (Monoxyde de carbone)		
Plage de mesure	0 à 200 0 à 233	ppm mg/m ³
Résolution	0.02 0.02	ppm mg/m ³
NH ₃ (Ammoniac)		
Plage de mesure	0 à 50 0 à 35	ppm mg/m ³
Résolution	0.03 0.02	ppm mg/m ³
Sonomètre		
Plage de mesure	30 à 90	dB
Résolution	≈ 0.1	dB

NE PAS DISTRIBUER- V2.3 - COPYRIGHT © - 2021 - 42 FACTORY

Dimensions globales

Toutes les mesures sont exprimées en millimètres.



NE PAS DISTRIBUER- V2.3 - COPYRIGHT © - 2021 - 42 FACTORY

ANNEXE 2

Description de la chaîne de modélisation fine échelle intégrant les micro-capteurs

Les premières étapes sont semblables aux étapes de la chaîne de modélisation traditionnellement opérée par Atmo AuRA pour la réalisation de cartographies et de prévisions à fine échelle. Pour ce faire, il est nécessaire de disposer de données de concentrations de fond, qui sont fournies d'abord par le modèle de chimie-transport CHIMERE qui résout le transport et la chimie des polluants émis par l'ensemble des secteurs et fournis des concentrations pour un grand nombre de polluants (dont $PM_{2.5}$, PM_{10} , O_3 , NO_2 ...) sur la région Auvergne-Rhône-Alpes à la résolution horizontale de 3km (domaine d'intégration AURA_3KM). Ensuite, le modèle SIRANE permet d'obtenir une estimation des concentrations, pour les polluants $PM_{2.5}$, PM_{10} et NO_2 , associées à un réseau linéaire représentant le trafic routier. Ces concentrations sont disponibles à une échelle horizontale de 10m sur l'ensemble de l'agglomération d'Annecy. Les valeurs de concentrations de fond ($PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_2) issues du modèle CHIMERE sur l'ensemble de la région Auvergne-Rhône-Alpes servent de fond à l'élaboration d'une première cartographie sur l'ensemble de la région, pour laquelle les valeurs mesurées aux stations et autres points de mesures d'Atmo AuRA sont extraites (à l'exclusion des mesures micro-capteurs et sites dits 'trafic' ou 'industrielle'). L'écart entre les valeurs mesurées et modélisées (par CHIMERE) permet ensuite d'obtenir une cartographie des concentrations de polluant sur l'ensemble de la région via une méthode de krigeage (dérivée externe). Les données de concentration issues de ce krigeage régional sont ensuite agrégées avec les sorties du modèle SIRANE pour prendre en compte les concentrations à la fois liées aux valeurs de fond ainsi que celles associées au trafic routier, dans une méthode développée par Atmo AURA appelée COMBINE afin d'obtenir une cartographie du polluant considéré sur la zone de l'agglomération d'Annecy (domaine Annecy2).

Les données cartographiques issues de la méthode «COMBINE» servent ensuite de données cartographiques «de fond» pour une nouvelle étape de krigeage «fine échelle» réalisée uniquement sur la zone de l'agglomération d'Annecy (domaine Annecy2). Pour cette étape de krigeage, les données de stations d'Atmo AuRA ainsi que celles du réseau de micro-capteurs «Atmotrack» sont extraites et agrégées dans un même tableau de données. Pour les tests et cartographies expliquant uniquement les données de micro-capteurs fixes, les données issues de micro-capteurs mobiles sont également exclues à ce stade de la méthode. Les données micro-capteurs 'Atmotrack' disponibles toutes les 5 minutes sont agrégées au pas de temps horaire. Après extraction et sélection des données de mesures que l'on souhaite utiliser pour le krigeage, les données de mesures sont comparées aux données modélisées (=celles issues de l'étape de modélisation «COMBINE») et la différence entre ces valeurs aux différents points de mesures est utilisée dans une nouvelle étape de krigeage (avec dérivées externes). Dans cette étape de krigeage «fine échelle», par rapport au krigeage effectué sur toute la région avec les données d'Atmo AURA, nous avons introduit un développement supplémentaire dans lequel nous introduisons une valeur d'incertitude associée à chaque mesure. Une valeur d'incertitude de 0 est associée aux mesures effectuées par les analyseurs sur les stations d'Atmo AURA, tandis qu'une incertitude de 0,3 est associée aux micro-capteurs (fixes et mobiles). Ces valeurs d'incertitudes sont introduites afin de tenir compte de la confiance plus élevée associée aux mesures par analyseurs et afin de permettre au résultat du krigeage de s'écarter plus rapidement des données micro-capteurs. Les données de sorties du krigeage fine échelle sur la zone du Grand Annecy sont disponibles à une résolution horizontale de 20 mètres.

Intégration des micro-capteurs fixes et cartographie

Le développement de cette chaîne de modélisation cartographique et surtout son application à la zone du Grand Annecy avec utilisation des données micro-capteurs Atmotrack a principalement nécessité le développement et l'application de la fonction de récupération données (fonction_recup_MCEXT) de micro-capteurs «Atmotrack» stockées dans une base de données locale à Atmo AURA et la concaténation de ces données avec celles issues de la base données API d'Atmo AURA. Cette fonction permet de récupérer pour une requête SQL les données micro-capteurs Atmotrack et ensuite de les agréger (agrégation au pas de temps

horaires, agrégation spatiale pour les données mobiles, ...) et les filtrer selon différents critères (prise en compte du code des validation, élimination de valeurs négatives ou aberrantes, filtres sur la vitesse du véhicule...). Pour le krigeage à fine échelle, les données de mesures de stations d'Atmo AURA sont agrégées à celles issues des micro-capteurs Atmotrack. Les données de stations d'Atmo AuRA correspondant aux stations de type 'trafic' ou 'industrielles' sont exclues, de même que celles situées en dehors du domaine d'intégration (Annecy2). La combinaison de ces critères amène donc à utiliser uniquement les données issues de la station Annecy Loverchy parmi les données d'Atmo AURA pour le polluant PM_{2.5} pour le krigeage sur la zone correspondant à l'agglomération du Grand Annecy. Pour les cartographies fine échelle pour le polluant NO₂, les données des stations Atmo AURA issues des stations Novel, Annecy Loverchy et Annecy Rocade sont utilisées. Les stations Atmo AURA (id et coordonnées) ainsi que les 24 points de mesures équipés de micro-capteurs fixes pour les cartographies PM_{2.5} et 13 points de mesures équipés de micro-capteurs fixes pour les cartographies NO₂ sont rassemblées dans les tableaux ci-dessous.

20010106_39	MC_Atmotrack_20010106	Microcapteur (site fixe)	942394.2	6539501.7
20020027_39	MC_Atmotrack_20020027	Microcapteur (site fixe)	939604.0	6539831.9
20020052_39	MC_Atmotrack_20020052	Microcapteur (site fixe)	940776.2	6538962.2
20020089_39	MC_Atmotrack_20020089	Microcapteur (site fixe)	949600.8	6531733.7
20020129_39	MC_Atmotrack_20020129	Microcapteur (site fixe)	949593.2	6534911.0
20020130_39	MC_Atmotrack_20020130	Microcapteur (site fixe)	947826.1	6534009.0
20020179_39	MC_Atmotrack_20020179	Microcapteur (site fixe)	949601.1	6534906.9
20020184_39	MC_Atmotrack_20020184	Microcapteur (site fixe)	941654.2	6539205.7
20020212_39	MC_Atmotrack_20020212	Microcapteur (site fixe)	941961.1	6540350.3
20020254_39	MC_Atmotrack_20020254	Microcapteur (site fixe)	937388.8	6525607.0
20020263_39	MC_Atmotrack_20020263	Microcapteur (site fixe)	943790.9	6531894.2
20020305_39	MC_Atmotrack_20020305	Microcapteur (site fixe)	944486.5	6540354.1
20020335_39	MC_Atmotrack_20020335	Microcapteur (site fixe)	940431.7	6537582.7
20020432_39	MC_Atmotrack_20020432	Microcapteur (site fixe)	951184.2	6549271.4
20020533_39	MC_Atmotrack_20020533	Microcapteur (site fixe)	943616.6	6535590.4
20020687_39	MC_Atmotrack_20020687	Microcapteur (site fixe)	943458.9	6540369.8
20020721_39	MC_Atmotrack_20020721	Microcapteur (site fixe)	942286.9	6538939.6
20020723_39	MC_Atmotrack_20020723	Microcapteur (site fixe)	941874.6	6542614.1
20020728_39	MC_Atmotrack_20020728	Microcapteur (site fixe)	939306.2	6533578.9
20020774_39	MC_Atmotrack_20020774	Microcapteur (site fixe)	942906.3	6539967.7
20020786_39	MC_Atmotrack_20020786	Microcapteur (site fixe)	944670.1	6538925.5
20020789_39	MC_Atmotrack_20020789	Microcapteur (site fixe)	943687.2	6536858.0
20020806_39	MC_Atmotrack_20020806	Microcapteur (site fixe)	934010.9	6528105.4
20020807_39	MC_Atmotrack_20020807	Microcapteur (site fixe)	939879.1	6541856.4
FR33201_39_11	Annecy Loverchy	Analyseur Air	941742.1	6537627.0

Tableau 1 : Sites de mesures utilisés pour les cartographies fine échelle sur la zone du Grand Annecy pour le polluant PM_{2.5}

id	si_isit	type_appareil	nom_polluant	sid_coordx	sid_coordy
20010106_03	MC_ext_20010106	Microcapteur (site fixe)	NO2	942394.2	6539501.7
20020027_03	MC_ext_20020027	Microcapteur (site fixe)	NO2	939604.0	6539831.9
20020052_03	MC_ext_20020052	Microcapteur (site fixe)	NO2	940776.2	6538962.2
20020184_03	MC_ext_20020184	Microcapteur (site fixe)	NO2	941654.2	6539205.7
20020212_03	MC_ext_20020212	Microcapteur (site fixe)	NO2	941961.1	6540350.3
20020254_03	MC_ext_20020254	Microcapteur (site fixe)	NO2	937388.8	6525607.0
20020335_03	MC_ext_20020335	Microcapteur (site fixe)	NO2	940431.7	6537582.7
20020533_03	MC_ext_20020533	Microcapteur (site fixe)	NO2	943616.6	6535590.4
20020721_03	MC_ext_20020721	Microcapteur (site fixe)	NO2	942286.9	6538939.6
20020723_03	MC_ext_20020723	Microcapteur (site fixe)	NO2	941874.6	6542614.1
20020774_03	MC_ext_20020774	Microcapteur (site fixe)	NO2	942906.3	6539967.7
20020786_03	MC_ext_20020786	Microcapteur (site fixe)	NO2	944670.1	6538925.5
20020789_03	MC_ext_20020789	Microcapteur (site fixe)	NO2	943687.2	6536858.0
FR33201_03_11	Annecy Loverchy	Analyseur Air	NO2	941742.1	6537627.0
FR33202_03_11	Novel	Analyseur Air	NO2	942978.7	6540090.0
FR33203_03_11	Annecy Rocade	Analyseur Air	NO2	941653.7	6539208.0

Tableau 2 : Sites des mesures utilisés pour les cartographies fine échelle sur la zone du Grand Annecy pour le polluant NO₂

ANNEXE 3 : cartographie du NO₂ avant/après intégration des microcapteurs pour le mois de nov. 2023

