

Intégration des mesures par micro-capteurs dans l'observatoire régional de la qualité de l'air

Diffusion : Janvier 2024

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'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

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
- 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 :



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

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.

L'action multi partenariale IMOBS (Intégration des données micro-capteurs à l'OBServatoire régional) débutée en 2021 a permis de confronter différentes données régionales et d'établir, en l'état actuel des connaissances, des premiers protocoles théoriques de déploiement, de validation, d'ajustement et d'exploitation cartographique des données de micro-capteurs de particules fines. Plus généralement, le travail mené en 2021 sur les différents protocoles d'intégration des données de micro-capteurs a ouvert différentes perspectives en termes de traitement et d'analyse de ces mesures innovantes.

Au cours de l'année 2022, les différents protocoles mis en place en 2021 ont pu être testés de manière opérationnelle sur le territoire grenoblois équipé d'un réseau de 30 micro-capteurs répartis sur l'ensemble de la Métropole. Pour pouvoir intégrer ces données à la chaîne de surveillance de l'observatoire agréé, 4 axes de travail ont été poursuivis en 2022 :

- **La validation des micro-capteurs** : en 2021, une méthode de validation par « réseau de neurones » a été testée sur le territoire grenoblois. En 2022, la méthodologie a été optimisée et les performances de validation ont été améliorées et étendues à l'ensemble de la région. Le réseau optimisé présente des performances acceptables. 87% de mesures valides de micro-capteurs sont bien classées « valides » par le réseau, et le réseau identifie automatiquement 43% des mesures « invalides » effectivement invalides.
- **L'ajustement des micro-capteurs** : Le rapport précédent ouvrait une perspective intéressante sur l'ajustement dit « glissant » qui permet un ajustement automatique glissant toutes les heures sur les 7 jours précédents. Le développement opérationnel de cet ajustement glissant a pu être mis en place dans le cadre de cette nouvelle étude. La méthode a ainsi pu être testée sur les 30 micro-capteurs du jeu de données grenoblois avec des résultats très encourageants.
- **L'intégration des micro-capteurs dans les cartographies** : En se basant sur les données du réseau de micro-capteurs grenoblois, un travail méthodologique a été lancé en 2022 pour développer une approche permettant de quantifier l'apport des micro-capteurs dans l'élaboration des cartographies régionales fines échelles. Les travaux de recherche seront poursuivis en 2023 dans le cadre d'un travail de Post-Doc réalisé en partenariat avec l'INSA.
- **Le développement d'une chaîne opérationnelle de traitement des données** : La mise en opérationnelle d'une chaîne de traitement permettant d'intégrer les données de micro-capteurs à la chaîne de surveillance de l'observatoire agréé a été poursuivie en 2022. Elle

intègre l'ajustement glissant et l'intégration des données de micro-capteurs dans les cartographies horaires. Un travail complémentaire sur l'architecture informatique des bases de données est cependant nécessaire pour que la chaîne de traitement devienne complètement opérationnelle.

Ces avancées techniques, testées en 2022 sur le territoire grenoblois, permettent d'envisager différentes perspectives pour l'Observatoire :

- **Valider l'apport des micro-capteurs dans les cartographies fines échelles en réalisant des comparaisons modèle/mesure en différents points du territoire pilote grenoblois à l'aide de remorques laboratoires équipées d'analyseurs réglementaires.** Les cartographies intégrant les données de micro-capteurs présentent une avancée significative d'un point de vue technique. La validation de ces cartes doit cependant se poursuivre : la confrontation des concentrations mesurées par des analyseurs réglementaires permettra de quantifier au mieux la pertinence de ces nouvelles cartographies.
- Poursuivre les travaux de recherche sur les différentes méthodes d'intégration des données dans les cartographies fine échelles et proposer des plans de déploiement optimisés.
- Maintenir un lien étroit avec les acteurs publics nationaux et européens en charge de la surveillance de la qualité de l'air. Au niveau national, le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA) coordonne un groupe de travail national visant à définir de manière concertée un cadre d'utilisation des « micro-capteurs » pour la surveillance de la qualité de l'air dans sa globalité (mesure indicative, estimation objective, support pour la modélisation, support pour la cartographie, outil de sensibilisation, etc.) Atmo Auvergne-Rhône-Alpes participe à ce groupe de travail national, avec d'autres observatoires régionaux et laboratoires de recherche.
- Concernant les cartographies, l'état actuel des connaissances au niveau national ne permet pas encore une méthodologie stable, nationale et opérationnelle avec une évaluation précise de l'apport des micro-capteurs. Néanmoins les recherches menées par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes sont très encourageantes, en particulier ceux sur l'ajustement glissant des données de micro-capteurs. Les travaux seront poursuivis en 2023 sur cette thématique, en étroite relation avec les partenaires de recherche régionaux et nationaux de l'observatoire.



Sommaire

1. Introduction et contexte	7
2. Le réseau grenoblois	8
2.1 Un contexte territorial favorable à l'innovation.....	8
2.2 Installation et maintien technique du réseau.....	8
2.3 Retour d'expérience : Analyse chiffrée du coût de l'observatoire de 30 micro-capteurs FIXIs.....	12
3. Perfectionnement des protocoles de traitement des micro-capteurs	14
3.1 Perfectionnement du processus de validation des données : application sur les 30 micro-capteurs de GAM.....	15
3.2 Perfectionnement du processus d'ajustement des données : application sur les 30 micro-capteurs de GAM.....	18
3.3 Confrontation aux codes SESAM de l'inertis.....	20
3.4 Evaluation de l'apport des micro-capteurs dans les cartographies.....	25
4. Conclusion	31

1. Introduction et contexte

Les acteurs publics et privés du territoire, accompagnés d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, se mobilisent pour innover, améliorer et préserver la qualité de l'air de la région grâce à l'apparition de 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.

L'action multi partenariale IMOBS (Intégration des données de micro-capteurs à l'OBServatoire régional) débutée en 2021 a permis de confronter différentes données régionales et d'établir, en l'état actuel des connaissances, des premiers protocoles théoriques de déploiement, de validation, d'ajustement et d'exploitation cartographique des données de certaines marques de micro-capteurs. L'objectif final est de rendre les mesures micro-capteurs les plus cohérentes possibles à l'observatoire régional de la qualité de l'air.

En parallèle, en partenariat avec Grenoble-Alpes-Métropole, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes a déployé un réseau de 30 micro-capteurs fixes en octobre 2021 situé sur 30 communes du territoire métropolitain grenoblois dans l'objectif d'améliorer l'observation participative de la qualité de l'air.

Ainsi en 2021, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes a pu établir des premiers tests très encourageants d'intégration des micro-capteurs dans les cartographies sur le territoire grenoblois sur une période très courte de 2 semaines en novembre 2021¹. Plus généralement, le travail mené en 2021 sur les différents protocoles d'intégration des données de micro-capteurs a ouvert différentes perspectives en termes de validation, d'ajustement, de cartographie et d'analyse de ces mesures innovantes.

Au niveau national, l'outil SESAM (data fusion with SEnSors for Air quality Mapping) a été développé par l'INERIS dans le cadre de ses travaux pour le Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air (LCSQA), pour cartographier des concentrations de polluants à l'échelle urbaine, en fusionnant les nouvelles observations de micro-capteurs avec celles issues de méthodes plus conventionnelles et les calculs d'un modèle de qualité de l'air.

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes continue ses avancées innovantes sur le sujet, et poursuit son accompagnement des nouveaux observatoires expérimentaux régionaux et ces projets innovants de son expertise pour assurer une cohérence scientifique régionale de l'utilisation des micro-capteurs. La diffusion d'une information cohérente et expertisée reste en effet indispensable pour inciter le changement de comportement des citoyens, les entraîner dans les différents plans d'actions, et améliorer durablement la qualité de l'air au niveau régional.

L'objectif pour 2022 est de tester de manière plus opérationnelle les différents outils théoriques élaborés en 2021 en les validant durant une longue période de plusieurs mois avec changement de saison sur le territoire grenoblois.

Ainsi au cours de l'année 2022, un premier test de capitalisation de ces outils a été effectué sur l'observatoire participatif grenoblois avec son réseau de 30 micro-capteurs. L'objectif à terme est de développer une méthodologie permettant de quantifier l'apport ou la dégradation de l'utilisation des micro-capteurs dans les cartographies régionale fine échelle. En l'état actuel des connaissances, des premières réflexions sur ce sujet ont été menées dans le cadre de ce rapport.

¹ Rapport Imobs, 2021

2. Le réseau grenoblois

2.1 Un contexte territorial favorable à l'innovation

Dans la continuité 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 dans ce cadre que 30 micro-capteurs de particules fines ont été déployés sur les communes de la Métropole au cours de l'été 2021.

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. Comme expliqué dans le rapport de synthèse des travaux² de 2021, 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 micro-capteurs déployés dans le cadre de cet observatoire participatif permettent de mesurer les particules fines en temps réel (PM₁₀, PM_{2,5} et PM₁). Construits par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, ils sont basés sur le système open-source du projet [Sensor.Community](#). L'observatoire participatif de mesure de la qualité de l'air sur le territoire de Grenoble-Alpes-Métropole vise à être enrichi dans les prochaines années, notamment avec la participation des citoyens métropolitains.

Les données récoltées par ces micro-capteurs sont analysées par les équipes d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes et utilisées comme jeu de données test pour les protocoles de validation, de recalage et d'intégration de ces nouvelles données à l'observatoire. 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.

Par ailleurs, ce déploiement constitue également un outil de sensibilisation du grand public et des acteurs du territoire. En effet, l'installation des capteurs directement sur des lieux emblématiques des communes, au plus proche des habitants, apporte de la visibilité au sujet de la qualité de l'air au niveau local et suscite l'intérêt des citoyens pour la mesure. Comme pour l'ensemble des projets participatifs, les données de mesures sont consultables en accès libre et en direct sur le site [Captothèque.fr](#), la plateforme web d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes dédiée aux données citoyennes et participatives. Les citoyens et les élus sont ainsi invités à consulter, comparer ces mesures locales et à participer aux échanges directement sur la plateforme en ligne.

2.2 Installation et maintien technique du réseau

La mise en place de ce réseau s'est déroulée entre le mois de février 2021 et l'automne de la même année et a fait appel à différentes étapes, depuis l'intercomparaison des capteurs jusqu'à leur déploiement sur le territoire. Une fois le réseau de mesure déployé, un protocole assurant sa maintenance technique a été mis en place afin de permettre le bon fonctionnement des appareils

² Rapport IMObs 2021

et la remontée des données en continu tout au long de l'année.

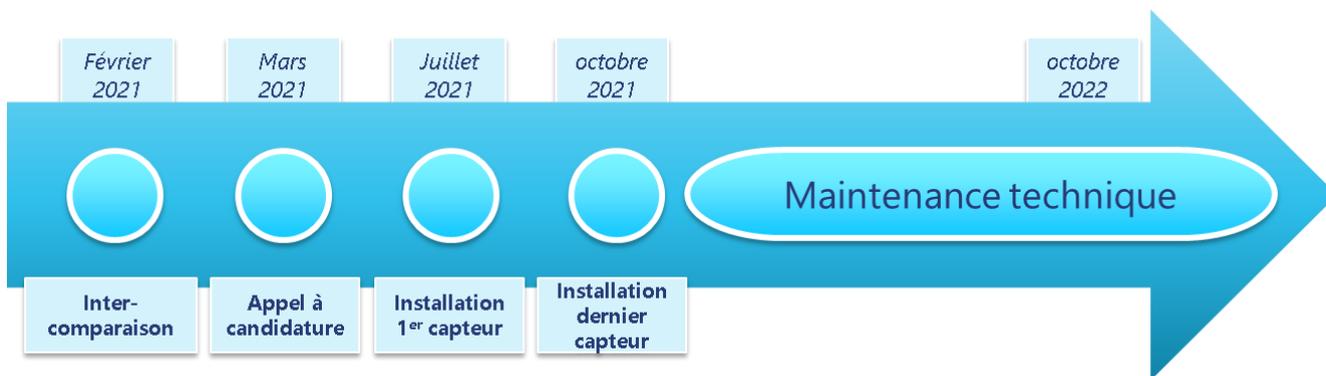


Figure 1: chronologie des étapes de mise en place et de maintien du réseau de mesure

L'intercomparaison des 30 micro-capteurs de ce réseau de mesure a eu lieu en février 2021 au niveau de la station de mesure de Grenoble les Frênes, représentative du bassin d'air de l'agglomération grenobloise. Cette intercomparaison a permis de valider l'ensemble des appareils et de s'assurer de leur bonne répétabilité.

En parallèle de cette intercomparaison, un appel à candidature auprès des communes de Grenoble-Alpes-Métropole a été lancée. Parmi les 49 communes de la métropole, 30 communes ont répondu favorablement en se portant volontaires pour héberger un micro-capteur de particules fines sur leur territoire pendant 1 an ou plus. Ces 30 communes sont réparties sur l'ensemble de l'agglomération grenobloise, des villes et villages chartroussins jusqu'aux communes du sud grenoblois en passant par le cœur de l'agglomération. Avec l'aide des équipes municipales et leur connaissance du terrain, les sites de mesure ont ensuite été choisis sur chaque commune afin de représenter la pollution particulaire de fond tout en respectant le protocole d'installation défini dans le cadre des travaux d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes de 2021.

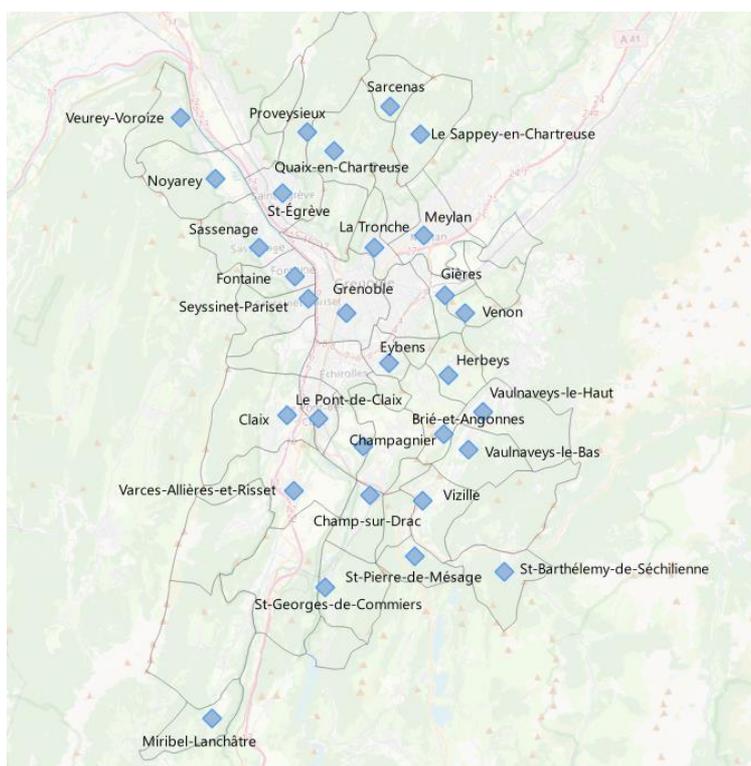


Figure 2: Représentation cartographique des 30 FIXIs répartis sur l'ensemble de l'agglomération grenobloise

Pour tous les sites, une alimentation électrique et un réseau Wifi ouvert doivent nécessairement être accessibles sur place. Si l'implication des équipes municipales a permis la bonne installation des appareils sur les sites de mesures choisis, cela a nécessité plus de temps et de ressources qu'il n'avait été initialement envisagé. Presque tous les micro-capteurs ont pu être installés sur des bâtiments publics (mairies, écoles, bâtiments des services techniques, maisons des habitants ou des associations) permettant à la fois de rendre la démarche visible auprès des habitants tout en respectant les critères d'implantation des micro-capteurs définis dans le protocole. Seuls 2 FIXIs ont dû être installés chez des particuliers, les critères techniques d'installation n'étant pas disponibles sur les bâtiments municipaux.

Le taux de fonctionnement de l'ensemble du réseau est tout à fait correct étant donné que $\frac{3}{4}$ des sites présentent un taux de fonctionnement supérieur à 75%. Seul le site situé à Claix a posé dès le début des mesures un problème de connectivité.

Nom de la station	Pourcentage de fonctionnement
Brié et Angonnes	100
Gières	100
Quaix-en-Chartreuse	99
Vaulnaveys le Haut	99
Meylan	98
Varces-Allières-et-Risset	97
Veurey-Voroize	97
St-Pierre-de-Mésage	96

St Georges	95
St-Barthelemy-de-Sechilienne	94
Champs-Sur-Drac	93
Venon	89
Herbeys	86
Fontaine	85
Proveysieux	85
St Egreve	84
Vizille	84
Sarcenas	83
Sassenage	81
Seyssinet-Pariset	79
Grenoble	77
La Tronche	76
Eybens	69
Le Sappey en chartreuse	68
Le Pont de Claix	67
Miribel-Lanchâtre	67
Noyarey	65
Champagnier	64
Vaulnaveys-le-Bas	61
Claix	1

Figure 3 : Taux de fonctionnement en 1/4h des 30 micro-capteurs de l'observatoire participatif grenoblois pour l'année 2022

Comme pour tous réseaux de mesures, un suivi régulier des données ainsi qu'une maintenance des équipements est nécessaire pour assurer le bon fonctionnement des micro-capteurs et la remontée des données en continu tout au long de la période de mesure. Concernant cet observatoire participatif, le suivi des données s'effectue chaque semaine. Si un micro-capteur ne renvoie pas de donnée depuis plus de deux jours, le responsable du site en question (personnel de mairie, élu, technicien) est contacté pour tenter de remettre le micro-capteur en fonctionnement à distance. Dans le cas des micro-capteurs FIXI, la maintenance consiste en effet, dans la grande majorité des cas, à réaliser des opérations simples de remise en fonctionnement pouvant être réalisées facilement par les personnes présentes sur place. Si aucune intervention du personnel de mairie n'est possible ou si leur intervention n'aboutit pas à une remise en fonctionnement du micro-capteur, un technicien d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes est dépêché sur place pour diagnostiquer le problème de façon plus approfondi et pour le solutionner.

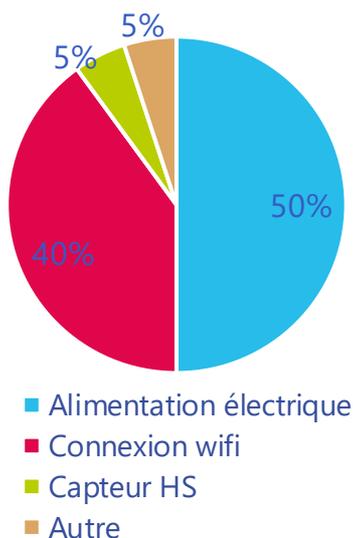


Figure 4 : Origine des pannes sur les 30 micro-capteurs de l'observatoire participatif grenoblois

Dans 90% des cas, le micro-capteur a été débranché par inadvertance ou bien la connexion Wifi a été interrompue. La remise en fonctionnement du capteur est alors facilement réalisée par le technicien. Dans quelques situations, c'est le micro-capteur lui-même qui est hors-service et doit être remplacé par un autre appareil.

En moyenne sur une année, la maintenance du réseau de mesure a nécessité 2 interventions des équipes d'Atmo sur place par mois. Certains sites, dits plus « fragiles », concentrent la majorité des interventions (5 interventions pour le FIXI le plus fragile) alors que d'autres n'en ont nécessité aucune.

D'autres polluants à mesurer à part les Particules Fines ?

A l'heure actuelle les FIXIs sont uniquement équipés de cellules mesurant les particules fines. Des études en interne sont en cours pour intégrer d'autres polluants (O₃, NO₂...). Ces solutions doivent dans un premier temps être testées dans différentes conditions, puis les FIXIs doivent être mis à niveau du côté logiciel et matériel. Pour le déploiement sur le terrain, l'augmentation du nombre de polluants mesurés ne devrait pas augmenter les besoins d'interventions car celles-ci sont majoritairement dues à des problèmes de communication qui concerne l'ensemble du FIXI et pas spécifiquement les cellules de mesures elles-mêmes.

2.3 Retour d'expérience : Analyse chiffrée du coût de l'observatoire de 30 micro-capteurs FIXIs

Trois postes principaux de dépenses ont été identifiés lors de l'analyse des coûts concernant le déploiement et le maintien du réseau participatifs grenoblois de 30 micro-capteurs :

- ➔ La fabrication du matériel,
- ➔ La mise en place du réseau,
- ➔ Le suivi de données et la maintenance du réseau.

Les tableaux suivants détaillent pour chacun des postes identifiés la durée totale des tâches, le coût d'achats éventuels, ainsi que les temps associés.

Pour plus de lisibilité, la fabrication (2 mois) et la mise en place du réseau (4 mois) se chiffrent en un forfait global. A contrario, le coût de la maintenance est analysé sur une année complète, à partir duquel un coût estimatif mensuel peut être déduit.

2.3.1 Cout de fabrication des 30 FIXIs : achat + construction

	Durée	Coût du matériel à assembler	Assemblage du matériel
Réseau de 30 micro-capteurs type FIXI (sans routeur)	2 mois	3 750 euros	8 jours

La durée totale d'achat et de fabrication est estimée à 2 mois. Cela prend en compte l'élaboration de la commande, les délais de livraison, la disponibilité technique pour la création du matériel. L'estimation du coût de 3750 euros ne prend pas en compte le coût supplémentaire d'un routeur : une connexion Wifi est donc indispensable sur la totalité des sites sélectionnés. Le temps d'assemblage et de coordination est estimé à 8 jours au vu du retour d'expérience sur l'année 2021.

2.3.2 Cout installation du réseau (30 micro-capteurs)

Cette estimation inclue le temps de coordination (repérage des sites, prise de contact, échanges avec les techniciens des collectivités), et l'installation sur site par un technicien d'Atmo AuRA.

	Durée	Temps coordination	Temps TEC installation	Temps total (forfait pour 30 capteurs)
Réseau 30 micro-capteurs	4 mois : Juillet à octobre 2021	6 jours	14 jours	20 jours

Le retour d'expérience montre qu'il faut prévoir un délai de 4 mois pour l'installation d'un réseau de 30 micro-capteurs. 20 jours effectifs sont indispensables pour l'installation d'un tel réseau.

2.3.3 Cout du maintien du réseau (suivi et maintenance)

	Durée	Temps suivi de la données	Temps de coordination pour une intervention	Temps d'intervention Atmo sur site	Temps moyen par mois
Réseau de 30 micro-capteurs	1 an : oct 2021 à oct 2022	0.6j/mois	1.4j/mois	0.7j/mois	2.7j/mois

D'après le retour d'expérience sur 2021, le maintien d'un réseau de 30 micro-capteurs type FIXIs implique un investissement mensuel de 2.7 jours par mois. Cela comprend le temps de vérification et de suivi de la remontée des données, le temps de coordination pour une intervention de la collectivité ou d'Atmo AuRA en cas de panne, et le temps de déplacement et d'intervention. Il est à noter que cette estimation se base sur le retour d'expérience d'une première année d'expérimentation. On peut vraisemblablement espérer une optimisation de la coordination pour les années à venir, ce qui diminuerait à terme le temps total à investir pour la surveillance d'un réseau de même taille.

Au cours de l'année 2022, les différents protocoles mis en place en 2021 ont pu être testés de manière opérationnelle sur les données de l'observatoire grenoblois. Des perfectionnements et améliorations de ces protocoles ont également été étudiés afin d'améliorer la fiabilité des données de micro-capteurs.

3.1 Perfectionnement du processus de validation des données : application sur les 30 micro-capteurs de Grenoble Alpes Métropole

La validation de la donnée consiste à identifier et supprimer toutes ou une partie des valeurs aberrantes issues des micro-capteurs. Cette étape a été abordée dans le rapport IMObs 2021 précédent sur le bassin d'air grenoblois et a fait l'objet d'une fiche méthodologique dédiée, présentant des perspectives intéressantes. Des réflexions complémentaires ont donc été traitées en 2022 dans le cadre de cette étude en particulier :

- Évaluer les performances de la validation des données micro-capteurs via un réseau de neurones ;
- Comparer les performances d'un apprentissage par bassin d'air avec un apprentissage régional ;
- Intégrer une validation des données fonctionnelle dans la chaîne de production.

3.1.1 Evaluer les performances du réseau du neurones pour la validation des données micro-capteurs

La station réglementaire de référence « Les Frênes », est équipée d'un analyseur réglementaire de particules fines $PM_{2,5}$. Dans le cadre de notre étude, elle a, par ailleurs, été équipée d'un triplet de micro-capteurs afin de pouvoir évaluer la fiabilité de ces derniers. Grâce à ces différents équipements, il est possible de comparer les micro-capteurs à une mesure réglementaire, et d'optimiser ainsi la paramétrisation du réseau de neurones. Afin de voir jusqu'à quel point les performances pouvaient être améliorées, des tests de sensibilité sur certains paramètres du réseau de neurones ont été réalisés. Les paramètres optimaux sont obtenus pour une taille de séquence de prédiction de 24 à 96 heures et un nombre de neurones de 25 à 75.

Dans la suite de ce rapport, les performances de validation sont évaluées grâce à la matrice de confusion qui permet de calculer le taux de données « bien classées » et de « mal classées » (données invalides validées par le réseau, et données valides invalidées par le réseau).

Afin d'éviter un phénomène de surapprentissage dans l'évaluation des performances sur le site des Frênes, le réseau (paramétré sur la station réglementaire Les Frênes) est ensuite testé et évalué sur la station réglementaire de Saint Martin d'Hères.

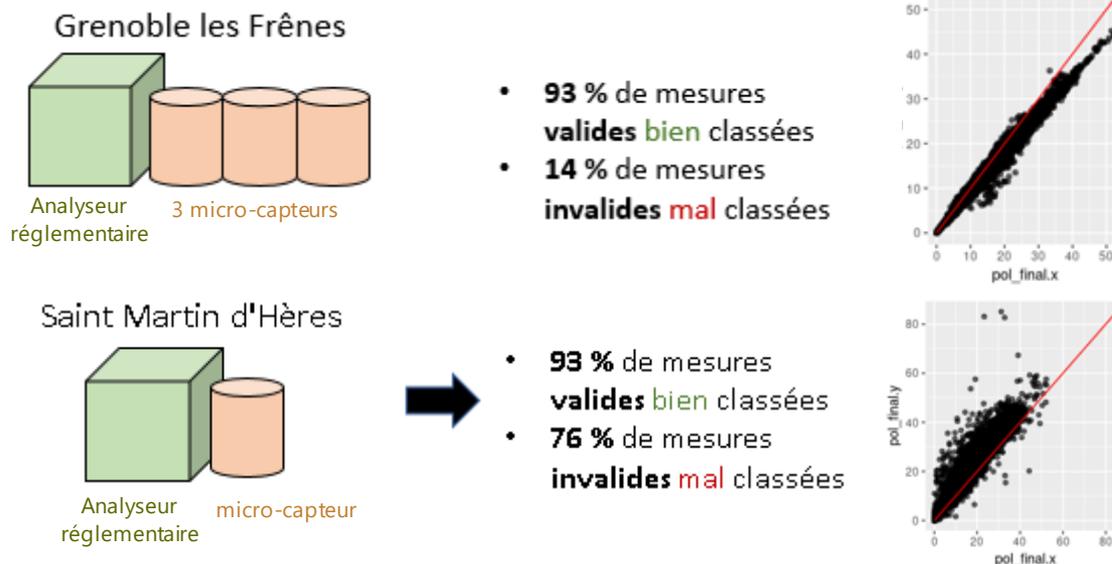


Figure 6 : Performances du réseau de neurones paramétré sur la station réglementaire des Frênes, et testé sur les stations des Frênes (en haut) et de Saint Martin d'Hères (en bas).

La figure 6 illustre un phénomène marqué de surapprentissage du réseau sur la station de Grenoble Les Frênes. Le réseau n'est pas suffisamment performant quand les données de test (Saint Martin d'Hères) changent par rapport aux données d'apprentissage (Les Frênes). Le taux de données invalides mal classées grimpe de 14% (Les Frênes) à 76% (Saint Martin d'Hères). Afin de limiter ce phénomène, différentes solutions (ou combinaisons de solutions) ont été testées et retenues :

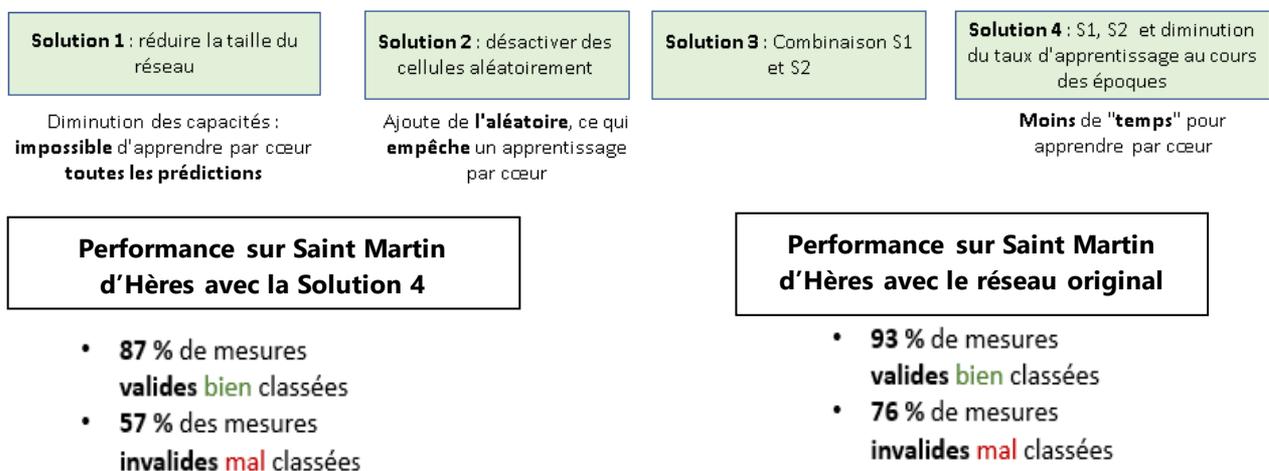


Figure 7 : Différentes solutions pour tester réduire le surapprentissage dans le réseau de neurones permettant de valider les micro-captors, et performances de la solution retenue.

Grace à la solution 4 qui englobe à la fois la réduction du réseau, la désactivation aléatoire de certaines cellules et la diminution du taux d'apprentissage, les résultats du réseau sont plus performants. Elle permet de réduire le taux d'invalides mal classés sur le site test de Saint Martin d'Hères de 76% à 57%.

Au final, le réseau optimisé présente des performances acceptables : 87% de mesures valides sont bien classées valides par le réseau, et le réseau identifie automatiquement 43% des mesures invalides effectivement invalides. Ces performances sont exportables sur le territoire grenoblois.

3.1.2 Comparer les performances d'un apprentissage par bassin d'air avec un apprentissage régional

Les tests et résultats précédents concernent le territoire grenoblois. Dans l'idée d'extrapoler ces résultats à l'ensemble de la région Auvergne-Rhône-Alpes, le réseau de neurone peut être déployé sur l'ensemble du territoire régional. Les spécificités locales et les différences d'aérogologie entre les différents bassins d'air de la région nous ont amené à tester et comparer 2 approches.

Approche 1 : Une paramétrisation du réseau de neurones par bassin d'air

Chaque bassin d'air de la région dispose dans ce cas d'une paramétrisation du réseau de neurone qui lui est propre. Cela permet de s'affranchir de la dépendance des bassins d'air dans la paramétrisation de la validation.

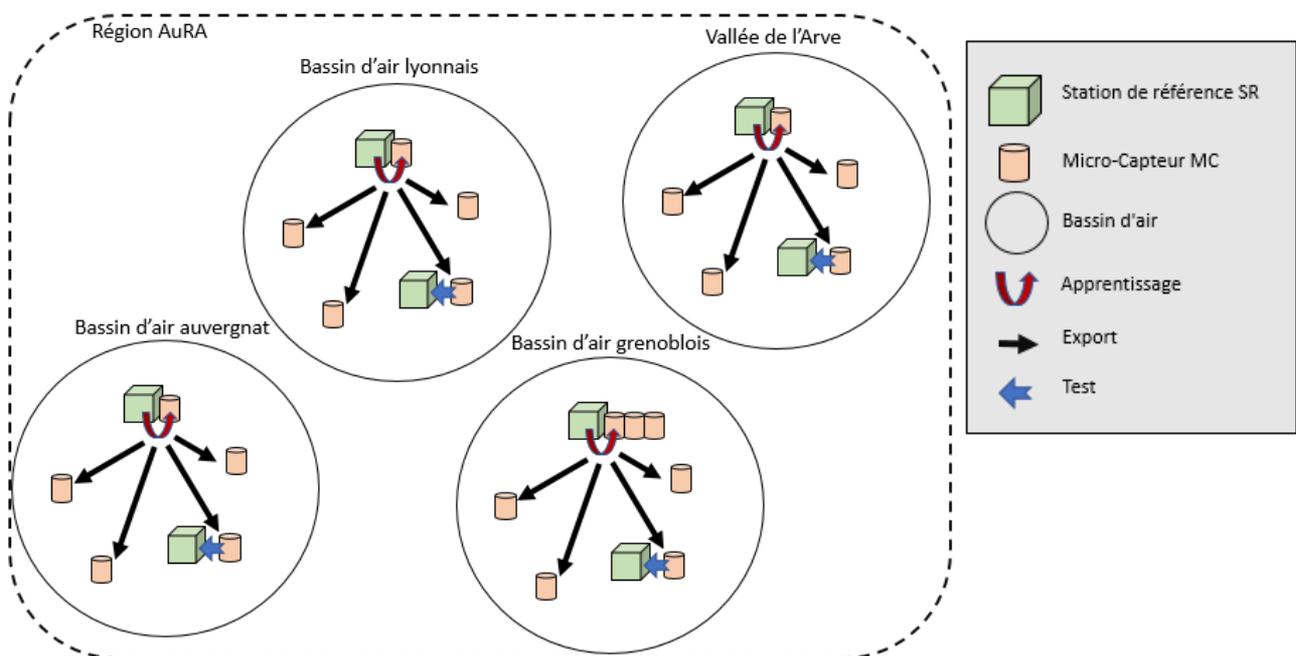


Figure 8 : Schéma d'extrapolation régionale du réseau de neurones de validation selon l'approche 1, à savoir avec une paramétrisation propre pour chaque bassin d'air.

Cette approche permet de prendre en compte chaque spécificité des bassins d'air, en particulier, l'aérogologie locale et le type de particules qui sont souvent propres à un contexte territorial.

Approche 2 : Une paramétrisation régionale du réseau de neurones

L'apprentissage est groupé à plusieurs bassins d'air. Les données de plusieurs bassins d'air servent ainsi à paramétrer le réseau de neurones afin d'avoir une diversité régionale dans les données d'apprentissage.

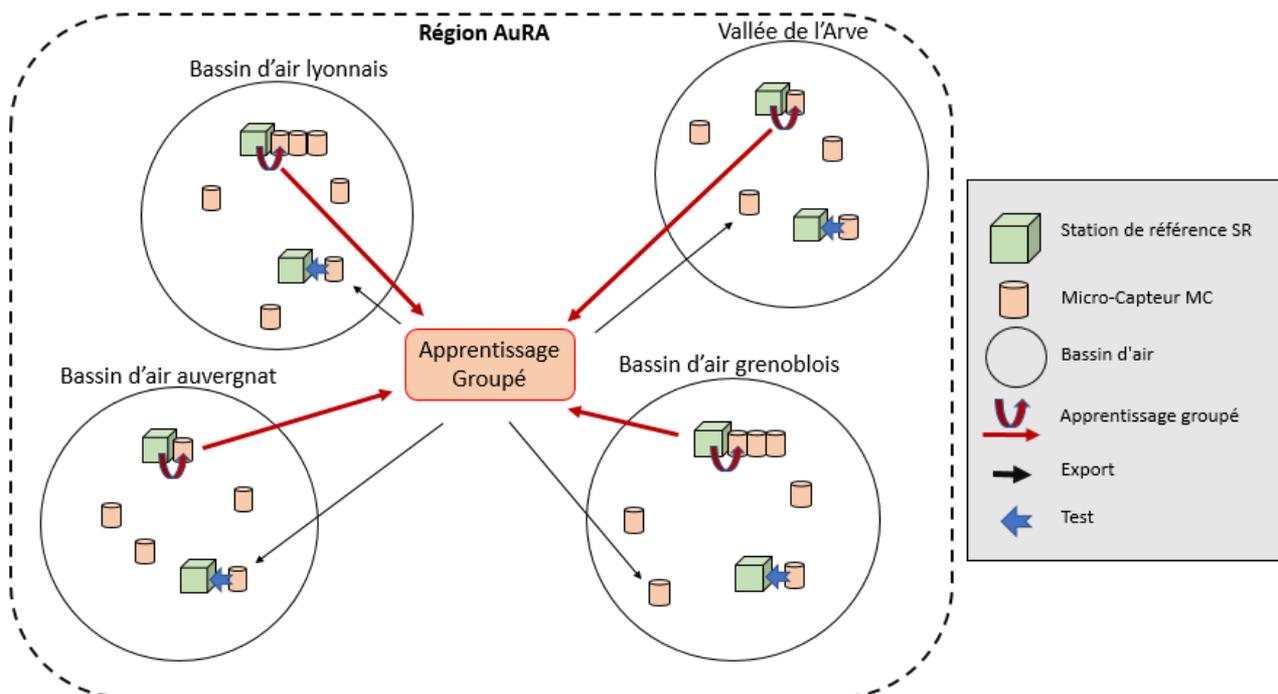


Figure 9 : Schéma d'extrapolation régionale du réseau de neurones de validation selon l'approche 2, à savoir avec une paramétrisation identique pour l'ensemble de la région.

Cette approche permet de diversifier les données d'apprentissages et d'éviter ainsi tout phénomène de surapprentissage qui pourrait biaiser les performances du réseau de neurones.

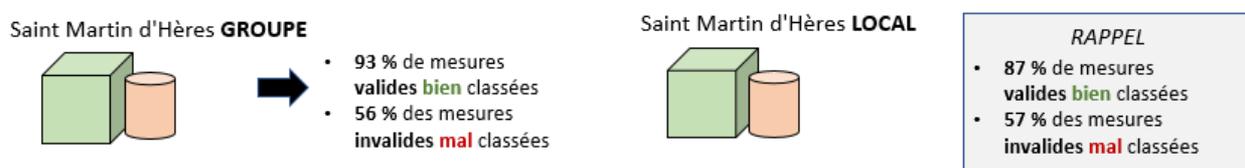


Figure 10 : Performance du réseau régional groupé (approche 2) comparé à la paramétrisation locale sur Saint Martin d'Hères (approche 1)

Les performances de la paramétrisation régionale présentent de meilleurs résultats que l'approche par bassin d'air pour notre site test de Saint Martin d'Hères. Le taux d'invalides mal classés évolue peu (les performances sont meilleures de 1%), mais le taux de données valides bien classées passe de 87% à 93% avec la paramétrisation groupée.

Par ailleurs, d'un point de vue opérationnel, la paramétrisation régionale est plus rapide à mettre en place et plus facile à mettre à jour si nécessaire : elle reste globalement plus stable et nécessite une seule paramétrisation du réseau de neurones grâce aux données disponibles dans les différents bassins d'air.

3.2 Perfectionnement du processus d'ajustement des données : application sur les 30 micro-captteurs de GAM

L'ajustement des données micro-captteurs consiste à corriger les données selon une méthodologie prédéfinie afin de les rendre comparables aux données réglementaires. De par leur métrologie, les micro-captteurs sont paramétrés en fonction d'une certaine spécificité 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, et le rendre plus cohérent avec les mesures réglementaires.

Le rapport précédent s'appuyait sur un ajustement par régression multilinéaire et identifiait différents facteurs à prendre en compte pour optimiser l'ajustement (saison, température, humidité, bassin d'air). L'ajustement s'appuyait sur une paramétrisation prédéfinie sur un jeu de données de l'année 2019. Le rapport précédent ouvrait une perspective intéressante sur l'ajustement dit « glissant ». Dans ce cas, la paramétrisation se réajuste en temps réel sur l'historique des 7 derniers jours, permettant ainsi de s'affranchir de la variable « saison » dans la régression multilinéaire.

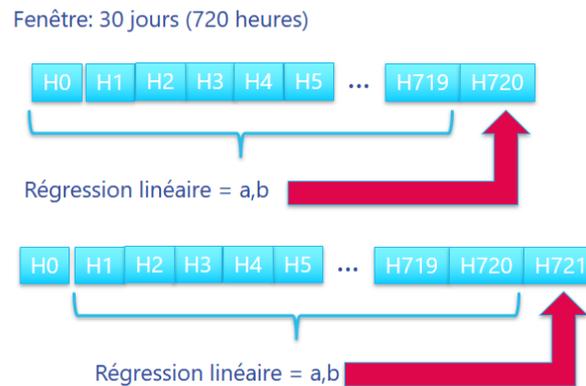


Figure 11 : Synthèse méthodologique de l'ajustement par régression multilinéaire glissante sur 30 jours

En 2021, cet ajustement avait été testé uniquement d'un point de vue théorique. Les résultats étaient encourageants, mais n'avaient pu être mise en place d'un point de vue opérationnelle faute de temps et de financement.

En 2022, le développement opérationnel a pu être mis en place dans le cadre de cette nouvelle étude. La méthode a ainsi pu être testée sur les 30 micro-capteurs du jeu de donnée grenoblois.

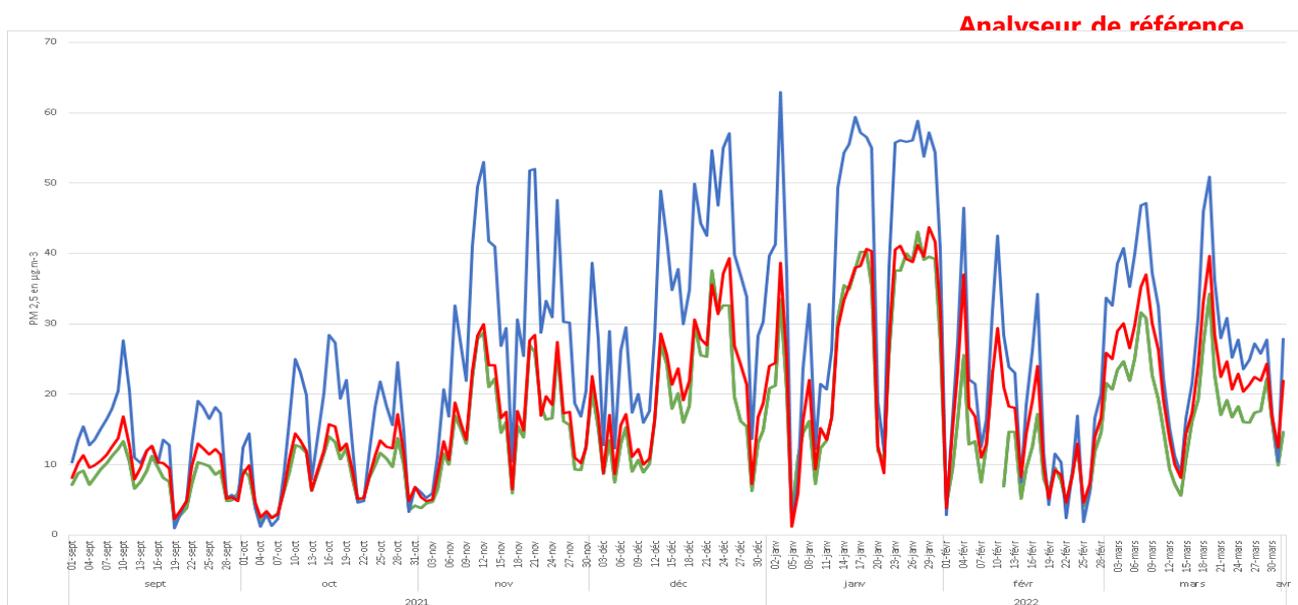


Figure 12 : Concentration en PM_{2.5} sur station de Saint Martin d'Hères avec ajustement glissant du bassin grenoblois (paramétré sur Les Frênes) de septembre 2021 à mars 2022

Le graphique ci-dessus illustre l'ajustement glissant pour les PM_{2.5} sur la station réglementaire de Saint Martin d'Hères. L'ajustement est paramétré sur le site des Frênes pour éviter le phénomène de surapprentissage. Il est ensuite appliqué sur le site de Saint Martin d'Hères pour test, puis comparé à l'analyseur réglementaire afin d'évaluer l'ajustement sur la période de septembre 2021 à mars 2022.

Cet ajustement par bassin d'air est maintenant opérationnel, et présente des résultats bien plus performants que les différentes méthodes qui avaient été préalablement testées.

3.3 Confrontation au code SESAM de l'inervis

3.3.1 Comparaison des pré-traitements

En parallèle des réflexions et développements menés sur le territoire régional, le laboratoire central de la surveillance de qualité de l'air (LCSQA) a développé et mis à disposition au niveau national le code SESAM (data fusion with SEnSors for Air quality Mapping). Ce code permet de traiter les données micro-capteurs dans l'idée de cartographier les concentrations de polluants à l'échelle urbaine, en fusionnant les nouvelles observations de micro-capteurs avec celles issues de méthodes plus conventionnelles.

La chaîne de modélisation développée en interne (U2MOD : Utilisation des Microcapteurs dans la MODélisation) intègre les étapes de validation et d'ajustement décrit dans les paragraphes précédents. Son approche diffère de la chaîne SESAM sur le traitement préalable des données mais partage les mêmes objectifs. Les deux chaînes suivent, en effet, les mêmes principes et les mêmes étapes : préparation, pré-traitement, cartographie. La chaîne SESAM propose en plus une étape finale de post traitement.

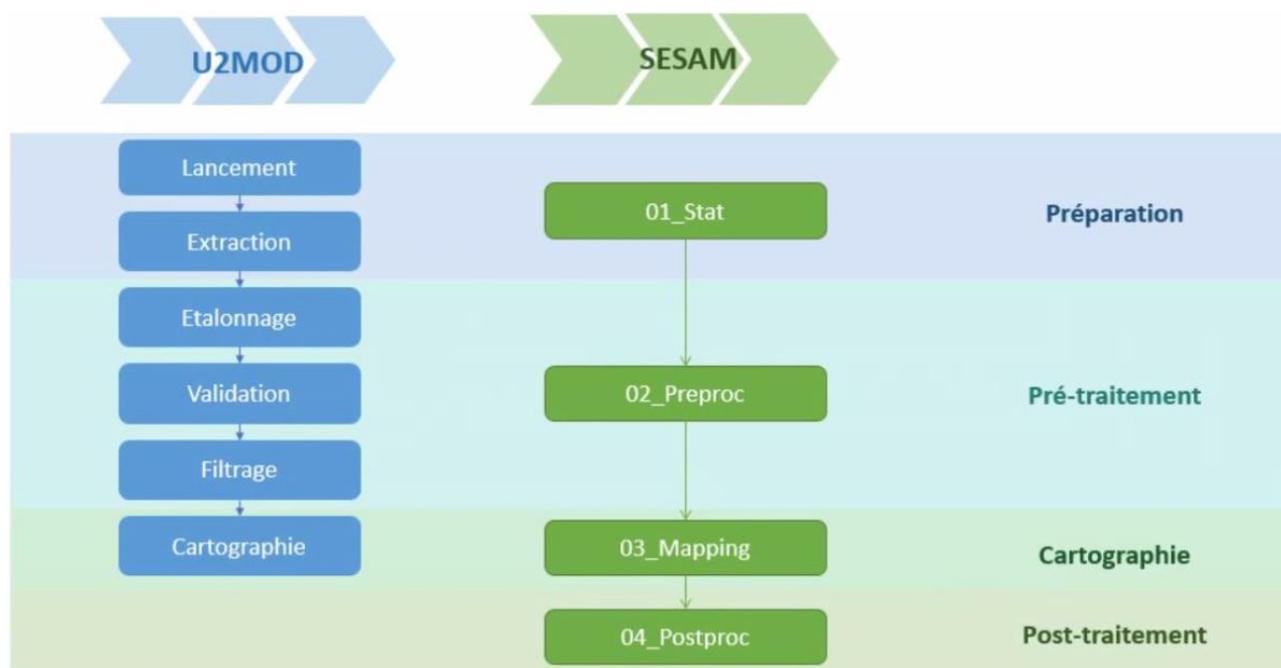


Figure 13 : Différentes étapes de traitement pour la méthode interne régionale U2MOD, et le code national SESAM développé par le LCSQA

En ce qui concerne l'étape de cartographie, la chaîne U2MOD s'appuie sur le travail mené par le LCSQA, cette étape est donc comparable aux 2 chaînes de modélisation. L'étape de pré-traitement

présente des différences plus marquées. Dans le cadre de la chaîne U2MOD, le travail de prétraitement repose sur les conclusions du projet IMObs 2021 et sur les perfectionnements de 2022 préalablement décrit dans le cadre de ce rapport.

Pour rendre les deux chaînes comparables, un script de lancement a été créé afin d'être complètement homogène et pouvoir lancer tous les scripts dans la chaîne automatiquement. Par ailleurs, un autre script d'environnement a été créé servant à stocker les paramètres communs et les répertoires de travail, d'entrées et de sorties.

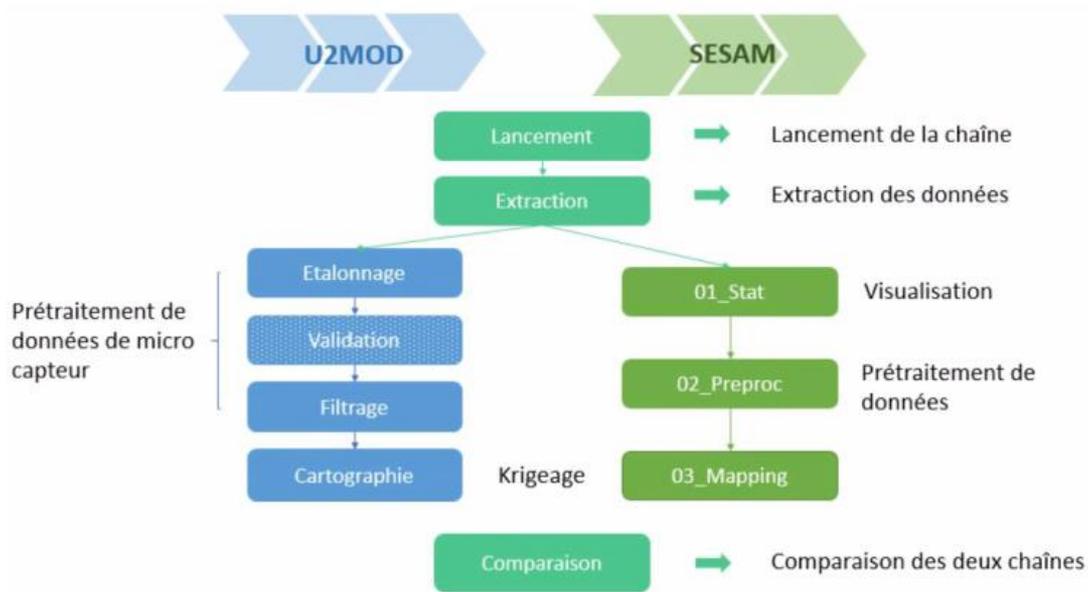


Figure 14 : Schéma synthétisant les différents scripts dans l'étude de comparaison des 2 chaînes (U2MOD et SESAM)

Les 2 chaînes ont été testées sur les données des 30 micro-capteurs de Grenoble-Alpes-Métropole (Cf. Chapitre 2. Le réseau grenoblois) pour la période 01/09/2021-01/04/2022. Les chaînes sont en particulier évaluées sur les stations réglementaires du réseau d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes afin de disposer de données réglementaires de référence et de données micro-capteurs :

- Grenoble les Frênes : 1 station de référence + 3 micro-capteurs
- Saint Martin d'Hères : 1 station de référence + 1 micro-capteur.

Afin de comparer les résultats des 2 chaînes de modélisation, 3 critères ont été utilisés pour évaluer les performances des prétraitements et confronter leurs cartes corrigées. Les résultats des comparaisons entre les deux chaînes de modélisation sont décrits selon les 3 critères ci-dessous.

1- Densité de répartition des données corrigées

Elle représente la distribution des valeurs du jeu de données, et permet de voir si globalement l'ensemble des données corrigées est plus proche du jeu de données de référence (station fixe) que les données brutes sans correction.

Les données brutes (en vert sur le graphique ci-dessous) sont éloignées des données de référence (représentées en rouge). La fréquence des données brutes comprises entre 0 et 20 gm^{-3} est moins élevée que les données réglementaires. Par ailleurs, les micro-capteurs sans correction ont tendance à surestimer les valeurs élevées. Les 2 méthodes de pré-traitement permettent une correction efficace de la donnée avec des courbes de densité qui se rapprochent de la densité des données de référence. L'étalonnage U2MOD (en rose) semble légèrement meilleur que l'étalonnage SESAM (en bleu) en particulier pour les données comprises entre 5 et 15 gm^{-3} .

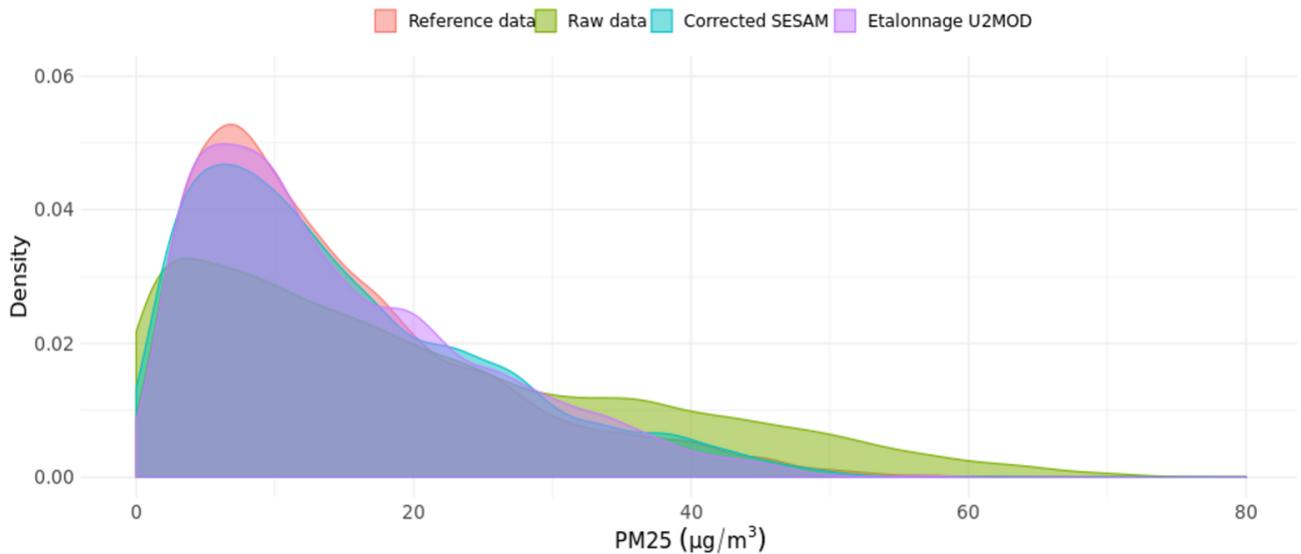


Figure 15 : Comparaison des densités de répartition des données des analyseurs et des micro-capteurs brutes et corrigées

2- Corrélation (R)

Ce critère évalue si deux variables ont une relation linéaire. La valeur absolue du coefficient R, toujours comprise entre 0 et 1, ne mesure pas l'«intensité» de la liaison mais bien la prépondérance de la relation affine sur les variations internes des variables.

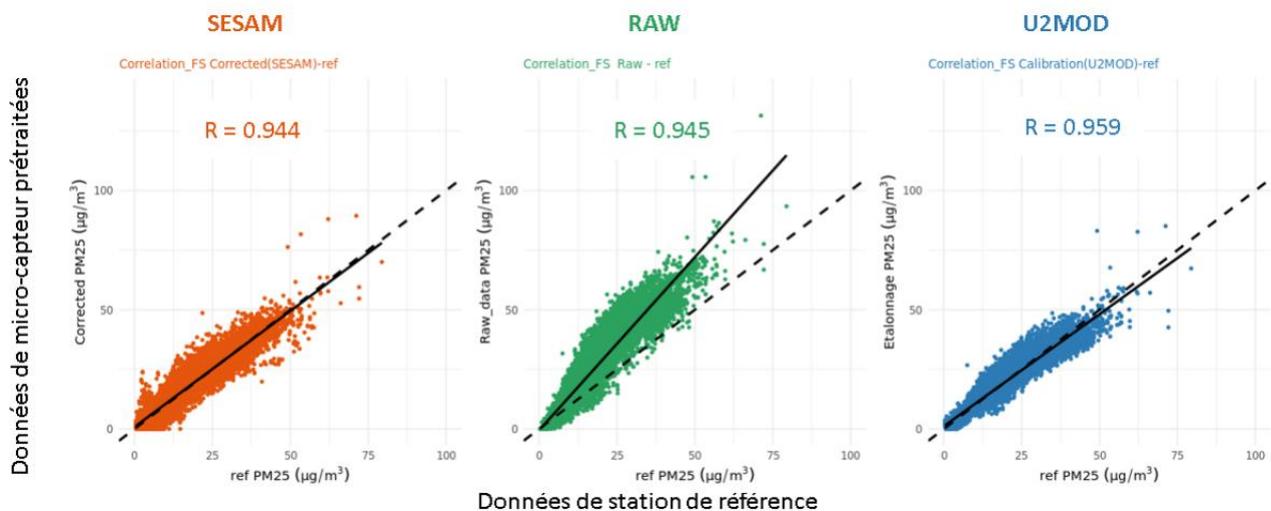


Figure 16 : Comparaison des mesures réglementaires par analyseurs aux données micro-capteurs brutes (en vert), corrigées par SESAM (en orange) et corrigées par la chaine U2 MOD (en bleu)

Les données brutes sans correction sont représentées en vert et présentent un biais notable qui augmente avec les concentrations. Les 2 corrections (SESAM en orange) et U2MOD (en bleu) permettent de corriger efficacement ce biais. Le coefficient de corrélation linéaire reste élevé et varie peu entre les différentes corrections.

3- L'étude d'erreurs qui se déclinent selon 3 indicateurs décrits dans le tableau ci-dessous

MAE Erreur absolue moyenne	MAPE Erreur moyenne absolue en pourcentage	RMSE Racine de l'erreur quadratique moyenne
$MAE = \frac{\sum_{i=0}^n y_i - x_i }{n}$	$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=0}^n \left \frac{x_i - y_i}{x_i} \right $	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (y_i - x_i)^2}{n}}$
Il s'agit d'une mesure globale de l'erreur. Plus la valeur est élevée, plus l'erreur est importante	Cet indicateur relatif permet de quantifier le biais par rapport aux valeurs. Il est intéressant pour relativiser certains écarts.	La RMSE est la racine carrée de la moyenne des erreurs quadratiques. L'effet de chacune des erreurs sur la RMSE est proportionnel à la taille de l'erreur quadratique. Les erreurs plus importantes ont donc un plus grand effet sur la valeur de la RMSE. Par conséquent, la RMSE est sensible aux valeurs extrêmes, aberrantes ou anomalies.

Ces indicateurs sont des mesures d'erreur donc plus leur valeur est faible, meilleures sont les performances du traitement des données.

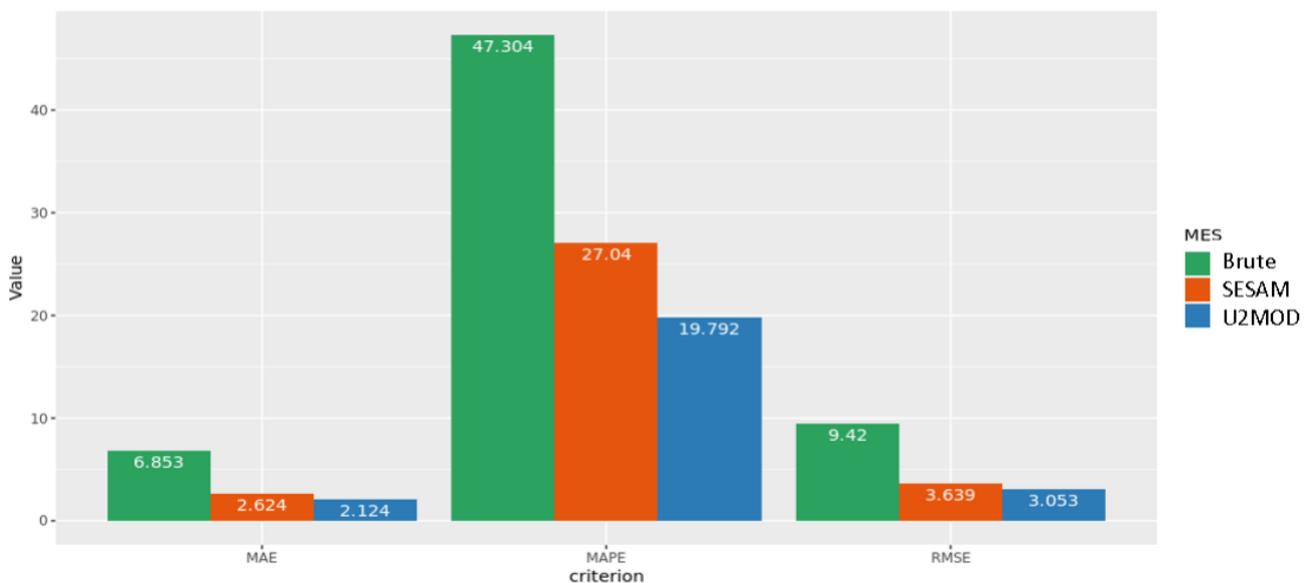


Figure 17 : Comparaison des données micro-capteurs brutes et corrigées (SESAM et U2MOD) selon les 3 critères d'erreurs

Les 3 indicateurs montrent que les différents traitements (U2MOD et code SESAM) permettent d'améliorer la fiabilité des données. En effet, les 3 indicateurs d'erreurs sont largement plus faibles avec les données corrigées (orange et bleues) qu'avec les données brutes (vertes). Le traitement effectué dans le cadre de U2MOD semble légèrement plus efficace que celui de SESAM. La MAPE en particulier passe de 27% à 20% avec le traitement de U2MOD.

Pour rappel, les indicateurs sont évalués sur les stations fixes réglementaires du réseau (les Frênes et Saint Martin d'Hères) et ne sont donc pas forcément représentatifs de l'ensemble du territoire.

3.3.2 Impact des pré-traitements sur les cartographies intégrant les micro-capteurs

L'étape de cartographie de la chaîne U2MOD s'inspire complètement de celle de la chaîne SESAM. Les 2 méthodologies sont identiques mais SESAM propose des options complémentaires, comme la prise en compte de la VME (Variance of Measurement Errors) par exemple.

Même si les options cartographiques sont identiques, les prétraitements différents entre SESAM et U2MOD peuvent impacter de manière significative les cartes des concentrations sur certaines heures. C'est par exemple le cas pour le 1^{er} janvier 2022 à 00h.

Le prétraitement de U2MOD ajoute beaucoup de contraste en termes de concentrations. Globalement le prétraitement de SESAM tend à homogénéiser les mesures de micro-capteurs et donc pour certaines échéances à diminuer la variabilité géographique des concentrations.

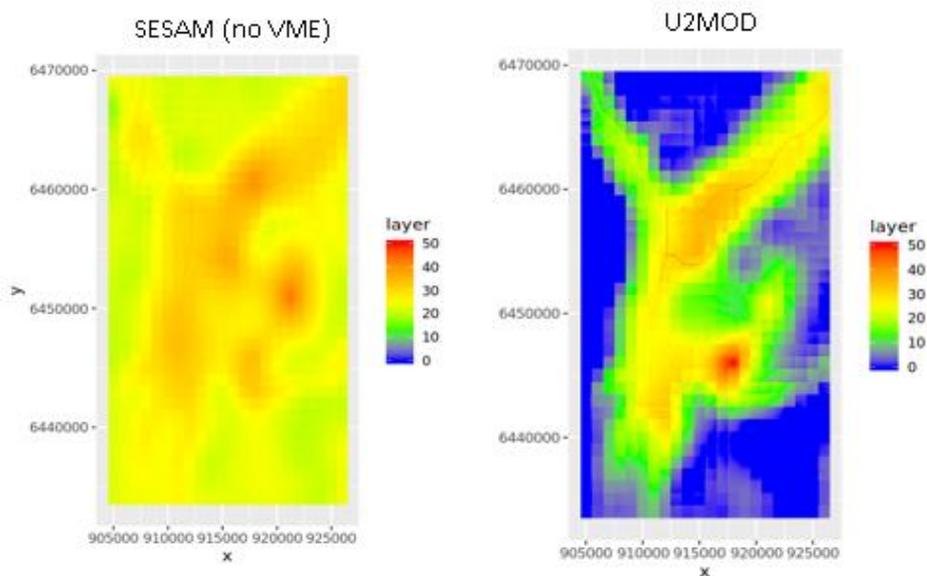


Figure 18 : Cartographie sur Grenoble du 1er janvier à 00h avec le pré-traitement SESAM (à gauche) et le pré-traitement U2MOD (à droite)

Etant donné que les stations de référence rentrent en compte dans l'élaboration de ces cartographies (méthodologie de krigeage), il n'est pas possible d'évaluer les performances de ces cartographies en comparant à une station de référence. Dans l'état actuel du travail qui a été mené, il n'est donc pas possible de savoir laquelle de ces cartes se rapprochent le plus de la réalité pour l'échéance du 1^{er} janvier 2022 à 00h. Le travail mené dans le chapitre suivant « Evaluation de l'apport des micro-capteurs dans les cartographies » apporte des éléments de réflexion à cette problématique.

3.3.3 Prise en compte de la « Variance of Measurement Errors » (VME) dans le cadre de la chaîne SESAM

La prise en compte de la VME est développée uniquement dans le cadre de la chaîne SESAM. La VME permet de tenir compte de la fiabilité des observations dans l'estimation dans le krigeage.

La VME est estimée ainsi :

$$VME_i = \left[\left(\frac{\sigma}{\sqrt{N}} \right)^2 + \frac{v_r^2}{N} \sum_{j=2}^N (C_j) \right]^2_i$$

Avec σ l'écart-type des observations du polluant à la position i ,
 N le nombre d'observations à la position i ,

v_r l'incertitude type relative (qui dépend du type de capteur)

C_j la $j^{\text{ème}}$ concentration de polluant à la position i .

La VME est la combinaison de :

- La variance qui correspond à la dispersion des concentrations de polluants à chaque position de mesure sur la période d'estimation par rapport au nombre d'observations
- L'incertitude de mesure propre aux micro-capteurs (on fixe par exemple une fiabilité de 50% pour les mesures effectuées à l'aide d'un micro-capteur fixe)

La VME permet ainsi de pondérer la prise en compte de chaque mesure dans l'élaboration de la cartographie en fonction de sa fiabilité. Ainsi une mesure effectuée à l'aide d'un analyseur réglementaire aura plus de poids dans le krigeage qu'une mesure effectuée à l'aide d'une mesure indicative telle que les micro-capteurs.

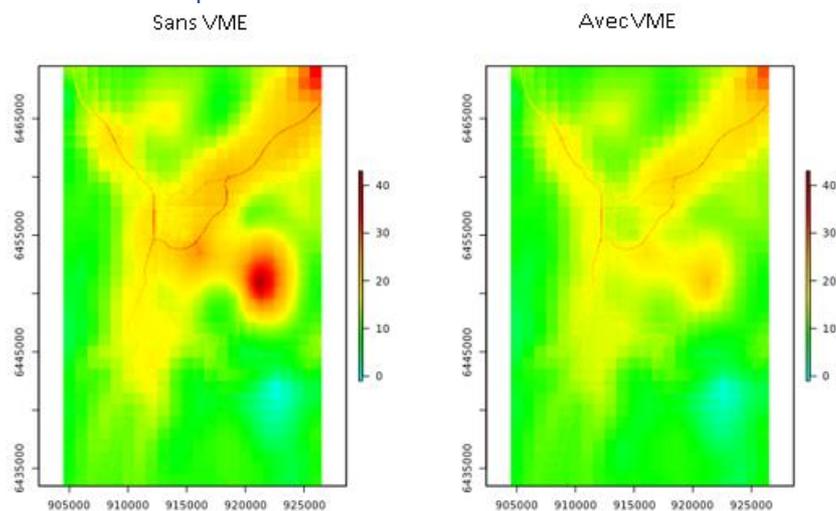


Figure 19 : Cartographie sur Grenoble sans (à gauche) et avec (à droite) prise en compte de la VME (Variance de l'erreur de mesures)

Dans cet exemple, l'erreur de mesure du micro-capteur situé à Vaulvaney engendre des concentrations élevées sur une large zone autour du capteur. La prise en compte de la VME permet d'éviter une surestimation sur la zone des contreforts de Belledone liée à une mesure indicative par micro-capteur trop élevée et non préalablement invalidée, qui n'est pas représentative de la zone.

Cette option de prise en compte de la VME demande un développement spécifique pour qu'elle soit intégrée dans la chaîne opérationnelle U2MOD. **Cette approche est une perspective très intéressante à approfondir.**

3.4 Evaluation de l'apport des micro-capteurs dans les cartographies.

En état actuel des connaissances, l'intégration des micro-capteurs dans les cartographies a été réalisée d'un point de vue technique, et différentes méthodes de traitement et d'intégration ont pu être testées. Néanmoins, au regard du coût de déploiement et de maintien d'un tel réseau, le bénéfice des micro-capteurs dans les modèles de dispersion physique reste à quantifier. En effet, la fiabilité des micro-capteurs peut être discutable, et il convient de vérifier :

- D'une part que les données mesurées par micro-capteurs améliorent la cartographie, c'est-à-dire que les concentrations après intégration des micro-capteurs dans les modèles de dispersions sont plus proches de la réalité que les cartographie sans micro-capteurs

- D'évaluer quel est le rapport bénéfices/coût.

Afin de quantifier au mieux l'apport des micro-capteurs dans les cartographies de la chaîne U2MOD, différents tests de sensibilité ont été mis en place. Au total, 12 configurations de cartographies ont été testées en faisant varier différents paramètres :

- Le modèle de dispersion : en prenant soit le modèle actuel utilisé par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes pour élaborer ses cartographies réglementaires (avec prise en compte des stations fixes réglementaires) soit le modèle brut (sans prise en compte des stations fixes réglementaires) ;
- Le type de validation/évaluation : en comparant les résultats de la modélisation aux stations fixes, ou en utilisant la méthode de validation croisée ;
- Le filtrage des données : en activant ou non le paramètre de corrélation entre les micro-capteurs et le modèle ;
- Le nombre de micro-capteurs : en utilisant ou non l'ensemble des données par micro-capteurs.

Au final, la configuration retenue consiste à utiliser le modèle actuel utilisé par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes en intégrant les mesures des stations fixes, et des micro-capteurs avec recalage et filtrage des données.

3.4.1 Evaluation moyenne sur la période d'étude du 01/11/21 au 31/12/21

Les différentes étapes de la chaîne cartographique U2MOD sont illustrées sur les cartographies suivantes.

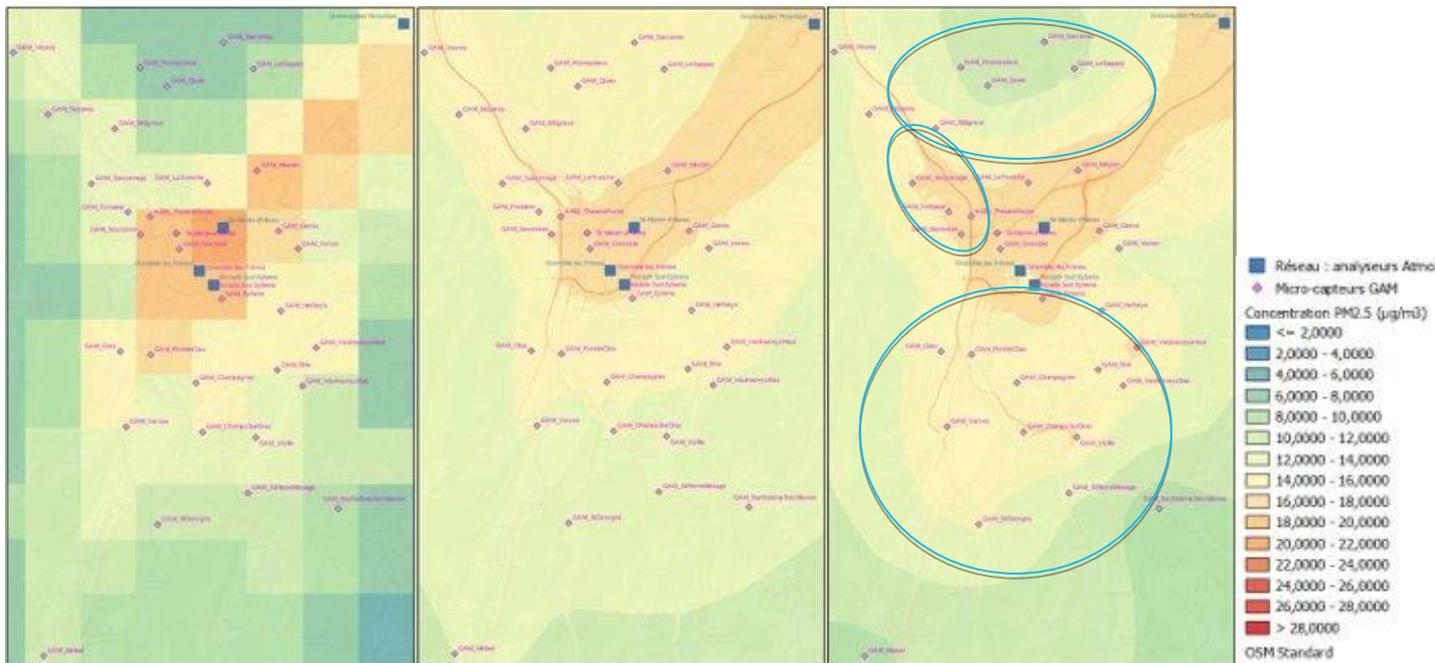


Figure 20 : Différentes étapes cartographiques de la chaîne de modélisation retenue avec intégration des micro-capteurs pour la période du 01/11/21 au 31/12/21. A gauche : Modélisation CHIMERE brute. Au milieu : Modélisation Combine actuellement utilisé chez Atmo. A droite : Modélisation Combine avec intégration des micro-capteurs corrigés et filtrés. Les zones entourées correspondent aux territoires impactés par l'intégration des micro-capteurs dans la cartographie.

Globalement la différence entre le modèle de base et la nouvelle version peut engendrer une différence de +/-4 $\mu\text{g.m}^{-3}$ en moyenne sur l'ensemble de la période (voir cartographie ci-contre). Les différences ne sont pas homogènes sur les territoires.

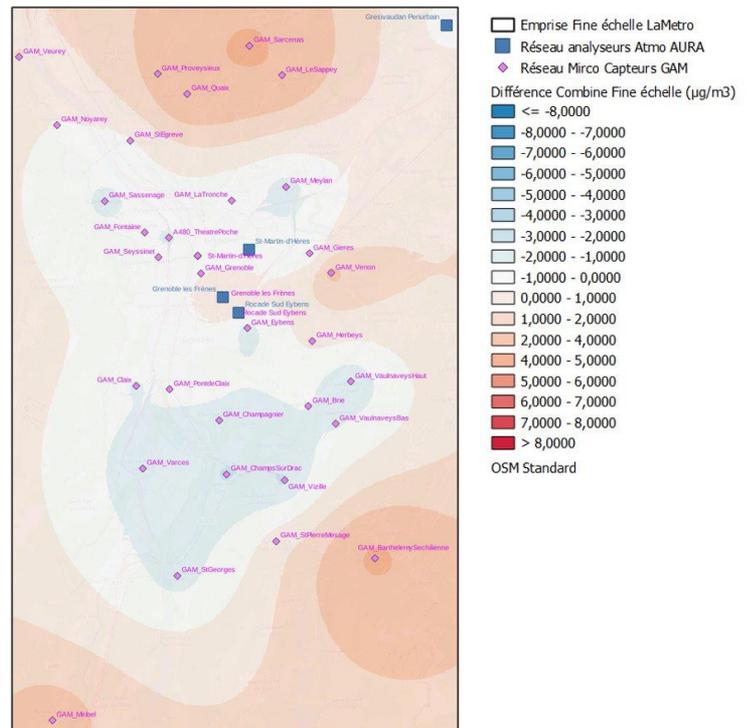


Figure 21 : Différences entre la modélisation actuelle et la nouvelle modélisation intégrant les micro-capteurs sur la période de test du 01/11/2021 au 12/31/2021.

Ainsi, en intégrant les micro-capteurs dans la chaîne de modélisation, les concentrations sont plus élevées de quelques microgrammes sur le sud grenoblois, ainsi que sur la vallée de l'Isère en direction de la cluse de Voreppe (Saint Egrève, Sassenage, Noyarey, etc.). A contrario, les concentrations sont plus faibles sur la zone Sud du massif de la Chartreuse.

Le graphique suivant permet de visualiser sous forme d'histogramme les valeurs mesurées et les valeurs prédites par le modèle Combine (sans Krigeage fine échelle avec la chaîne U2MOD). Si l'on considère les valeurs aux micro-capteurs comme une référence de mesure alors le modèle Combine présente des écarts moyens de l'ordre de 4 $\mu\text{g.m}^{-3}$ sur l'ensemble des capteurs disponibles. En faisant l'hypothèse d'une incertitude arbitraire de l'ordre de 30% (double de l'incertitude des stations fixe de référence) sur les mesures des micro-capteurs (barre d'erreur), le constat devient plus nuancé car seul quelques points modélisés par le modèle Combine présentent des écarts significatifs. Il s'agit des stations de Barthélémy, Le Sappey, Quaix, Sarcenas, Vizille et Rocade Sud Eybens. L'apport des micro-capteurs est donc à relativiser par rapport aux mesures en fonction de leur incertitude. Malgré cela, il apparaît que certains sites restent à l'écart et qu'initialement l'erreur de Combine sur ces sites est sans doute supérieure à l'erreur de la mesure.

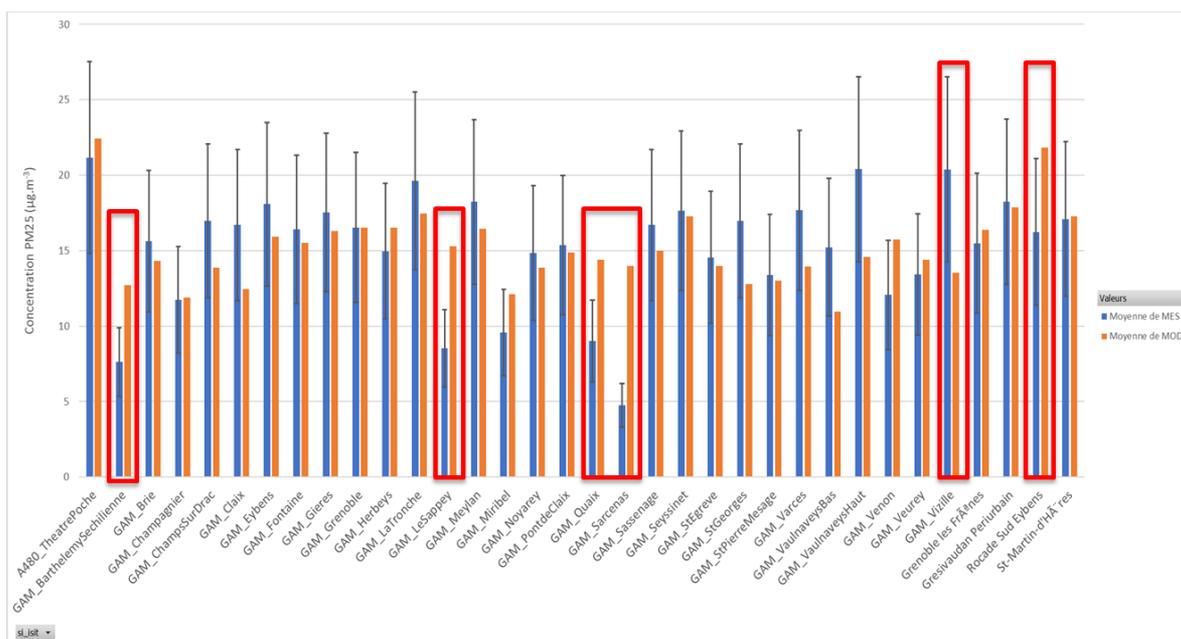


Figure 21 – Valeurs observés (en bleu) et valeurs modélisés par Combine.

Sur le graphique suivant, l'histogramme illustre pour chaque site, la mesure micro-capteur, la concentration modélisée avec le modèle actuel sans prise en compte des micro-capteurs (Combine), et la concentration modélisée avec intégration des micro-capteurs (par validation croisée pour éviter tout biais de validation). Les courbes (resp. verte et rouge) illustrent l'erreur absolue (resp. avec et sans micro-capteurs) pour chaque point de mesure.

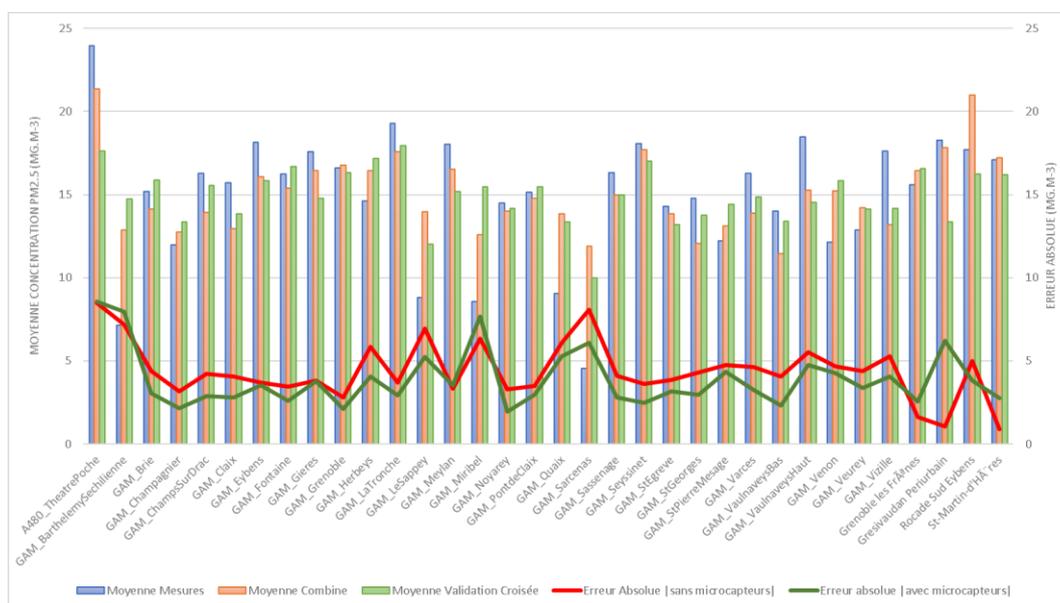


Figure 22 : Evaluation de l'apport des micro-capteurs dans les cartographies. Courbes : Estimation de l'erreur absolue sur les sites de mesures avec (en vert) et sans (en rouge) micro-capteurs⁵. Les histogrammes représentent les concentrations PM_{2,5} sur les différents sites pour les mesures, la modélisation « classique » et la modélisation U2MOD intégrant les micro-capteurs.

⁵ Pour éviter tout biais de surestimation, l'erreur au point de mesures est estimée grâce à la validation croisée. Ainsi pour chaque estimation d'erreur au point de mesure, la mesure micro-capteurs en question n'est pas prise en compte dans la chaîne de modélisation.

Pour la plupart des sites étudiés, l'erreur absolue avec intégration des micro-capteurs est plus faible de quelques microgrammes qu'avec la modélisation sans les micro-capteurs. Comme il s'agit d'une validation croisée, cela veut dire que les performances du krigeage fine échelle dans U2MOD avec les micro-capteurs sont meilleurs que sans. Pour la majeure partie des sites de mesure, **prendre en compte les micro-capteurs permet de réduire l'erreur absolue de la cartographie.** Dans quelques cas précis (Barthelemy Séchilienne, Miribel, Grésivaudan) la prise en compte des micro-capteurs augmente l'erreur absolue entre la mesure et la modélisation. Cela veut dire d'une part que l'intégration des autres micro-capteurs dans le krigeage fine échelle impact les performances du krigeage sur ces points de manière négative mais aussi que leur poids individuel est important.

3.4.2 Evaluation sur un pas de temps horaire

Intégrer les micro-capteurs dans les cartographies fait évoluer de quelques microgrammes les cartographies moyennes, mais peut avoir un impact beaucoup plus significatif sur les cartographies au pas de temps horaire. Ainsi, des différences notables peuvent apparaître sur les cartographies pendant une journée ou une heure en particulier.

Durant notre période de test, les concentrations en particules fines ont augmenté de manière significative le 24/12/21 entre 18h et 23h. Les cartographies ci-dessous illustrent les changements qu'engendrent les micro-capteurs au pas de temps horaire dans la chaîne de modélisation. La première ligne représente les cartographies avec intégration des micro-capteurs, et sur la seconde les cartographies actuelles. Même si les cartes sont visuellement très différentes, il est important de préciser que dans les 2 séries de cartes, les concentrations modélisées localement aux niveaux des stations fixes sont exactement égales aux mesures des analyseurs.

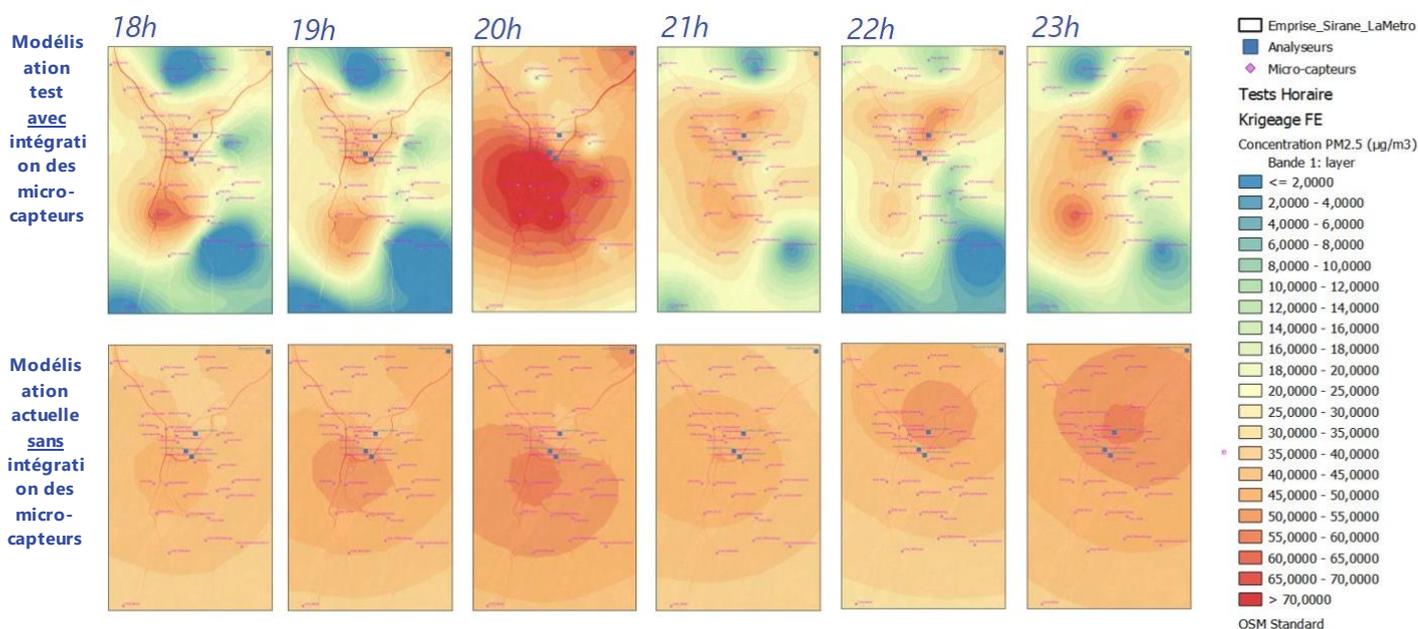


Figure 23 : Cartographies horaires avec (ligne du haut) et sans (ligne du bas) intégration des micro-capteurs pour le 24/12/2021 entre 18h et 23h.

Globalement, les cartes intégrant les micro-capteurs sont plus contrastées que les cartes actuelles sans micro-capteurs. Les territoires touchés par l'épisode de pollution sont moins étendus, et plus ciblés. Les micro-capteurs engendrent sur les cartographies une variabilité géographique de concentrations plus marquées avec probablement une meilleure prise en compte du relief et des spécificités locales. En particulier, les massifs (Chartreuse, Belledonne) et la vallée de la Romanche

sont moins exposés en intégrant les micro-capteurs. A contrario, ponctuellement certains territoires sont plus exposés tel que le sud grenoblois ou le début de la vallée du Grésivaudan. Dans notre exemple, l'étude temporelle montre une hausse générale des concentrations qui est notable sur le sud Grenoblois à 20h, en lien avec une hausse significative des concentrations mesurées par 6 micro-capteurs.

Afin de valider pleinement l'intérêt et la pertinence de ce genre d'informations dans la prévision quotidienne de la qualité de l'air sur Grenoble, il convient de mettre en place une phase de test pour évaluer l'intérêt opérationnel de cette chaîne de modélisation U2MOD par les prévisionnistes d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes.

4. Conclusion

Le travail mené dans le cadre de cette étude a permis d'appréhender et d'approfondir les réflexions et l'utilisation des mesures effectuées par micro-capteurs pour surveiller la qualité de l'air.

Les différents processus de validation, de correction et d'intégration des données par micro-capteurs ont pu ainsi être testés sur le réseau participatif grenoblois.

L'action a en particulier permis :

- **De maintenir le réseau participatif grenoblois** constitué de 30 micro-capteurs jusqu'à décembre 2022. Sur la période, le taux de fonctionnement de l'ensemble du réseau est très satisfaisant étant donné que $\frac{3}{4}$ des sites présentent un taux de fonctionnement supérieur à 75%. Le retour d'expérience montre que trois postes principaux de dépenses ont été identifiés lors de l'analyse des coûts concernant le déploiement et le maintien du réseau participatif. Ils concernent :
 - la fabrication du matériel pour 30 capteurs (3 800€ + 8jours)
 - la mise en place du réseau (20jours)
 - le suivi de données et la maintenance du réseau (2.7jours/mois)

- **De tester en opérationnel un ajustement en temps réel des micro-capteurs** : la paramétrisation se réajuste en temps réel sur l'historique des 7 derniers jours d'un micro-capteurs installé en parallèle d'un analyseur réglementaire. Le développement opérationnel a pu être mis en place dans le cadre de cette nouvelle étude et présente des résultats bien plus performants que les différentes méthodes qui avaient été préalablement testées.

- **De développer une chaîne de traitement opérationnelle U2MOD** : La mise en opérationnelle d'une chaîne de traitement U2 MOD est en cours. Elle intègre l'ajustement glissant et l'intégration dans les cartographies. Un travail sur la base de données de référence est nécessaire pour que cette chaîne soit complètement opérationnelle et transférable. Le travail sur la validation par réseau de neurones nécessite également quelques jours de travail pour être opérationnel.

- **De prendre en main et tester l'outil national SESAM développé par le LCSQA**

Le travail mené est encourageant, et ouvre sur différentes perspectives :

- **Intégrer le script opérationnel de validation par réseau de neurones dans la chaîne U2MOD.**

Lors des tests opérationnels d'utilisation des scripts de validation par réseau de neurones, il est apparu que la paramétrisation invalide la totalité des mesures de notre jeu de données grenoblois. Un temps de débogage est donc nécessaire pour profiter au mieux de la validation automatique.

- **Tester l'intégration opérationnelle en "temps réel" des micro-capteurs**

La chaîne U2 MOD pourrait être testée en opérationnelle et en temps réel pour intégrer les microcapteurs dans les cartographies du territoire (par exemple, dans le cadre des cartes journalières de prévisions). Cela permettrait en particulier de rendre compte dans les cartographies des événements ponctuels qui ne peuvent actuellement pas être intégrés dans les émissions. Une

importante étape de test est indispensable pour valider pleinement l'ensemble de la chaîne en temps réel.

→ Maintenir un lien étroit avec les partenaires régionaux et nationaux un niveau d'implication fort dans les avancées des partenaires

Les perspectives de l'INERIS sur l'utilisation des micro-capteurs sont axées sur la sensibilisation citoyenne et la cartographie. 2 axes qui sont travaillés en interne chez Atmo Auvergne-Rhône-Alpes. Concernant les cartographies, l'état actuel des connaissances au niveau national ne permet pas encore une méthodologie stable, nationale et opérationnelle avec une évaluation précise de l'apport des microcapteurs. Néanmoins les recherches menées par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes sont très encourageantes et en particulier sur l'ajustement glissant des microcapteurs. Il convient de poursuivre les efforts sur cette thématique et de maintenir un niveau d'implication fort sur les avancées des partenaires sur ce sujet

→ Poursuivre la validation des cartographies en les confrontant aux analyseurs réglementaires des remorques laboratoire.

Les cartographies intégrant les micro-capteurs présentent une avancée significative d'un point de vue technique. La validation de ces cartes doit se poursuivre : la confrontation des concentrations mesurées par des analyseurs réglementaires spécialement déployés sur les territoires impactés par l'intégration des micro-capteurs permettra de quantifier au mieux la pertinence de ces nouvelles cartographies.