LCSQA

Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air

Note technique

ELABORATION D'UNE METHODOLOGIE NATIONALE DE CARTOGRAPHIE A PARTIR DE DONNEES DE CAPTEURS

Avancement de l'outil SESAM et contribution à l'exercice d'inter-comparaison des méthodes de calibration et de cartographie dans le cadre de Fairmode

Alicia Gressent (Ineris)

Vérifié par Augustin Colette, le 10 juin 2022

Approuvé par Anne Morin, le 26 septembre 2022

SEPTEMBRE 2022

"L'expertise au service de la qualité de l'air"

SYNTHESE

L'essor des capteurs de la qualité de l'air à bas coût offre de nouvelles possibilités pour la cartographie des concentrations de polluants. L'outil SESAM est développé par l'Ineris dans le cadre des travaux du LCSQA afin d'exploiter les données de capteurs et tirer avantage de la couverture spatio-temporelle des observations associées pour la cartographie de la qualité de l'air à l'échelle urbaine. SESAM repose sur une méthode géostatistique (krigeage en dérive externe ; Gressent et al., 2020) permettant de fusionner les données de capteurs fixes et mobiles et les estimations issues de la modélisation. L'outil est disponible en « open source » accompagné d'un guide d'utilisation du LCSQA (Gressent et al., 2021). Le développement de SESAM se poursuit pour mieux représenter l'incertitude de mesures inhérente aux capteurs dans la procédure d'interpolation spatiale et pour étendre l'utilisation de l'outil à d'autres polluants et d'autres domaines d'étude. Par ailleurs, les étapes de traitement et de correction des données de capteurs en amont de leur utilisation pour la fusion de données sont cruciales. Dans le cadre des travaux du groupe CT6 (en anglais *Cross-cutting task 6 on Low-Cost sensors*, groupe de travail transversal sur les capteurs à bas coût) de Fairmode, le LCSQA participe à une étude d'inter-comparaison des méthodes de traitement/calibration des données de capteurs en réseau et de fusion de données à l'échelle nationale. L'objectif étant d'établir des recommandations pour l'utilisation de ces nouvelles données d'observation de la qualité de l'air.

ABSTRACT

The undeniable rise of low-cost air quality sensors offers new possibilities for pollutant concentration mapping. The SESAM tool is developed within the framework of the LCSQA to exploit sensor data and take advantage of their unique spatial and temporal observation coverage for air quality mapping at the urban scale. SESAM is based on a geostatistical method (external drift kriging; Gressent et al., 2020) that merges fixed and mobile sensor data with estimates from urban scale modeling. The tool is available as open source with a LCSQA user guide (Gressent et al., 2021). Further developments are planned to better represent the measurement uncertainty inherent to the sensors in the spatial interpolation procedure and to extend the use of the tool to other pollutants and other study areas. Furthermore, the processing and correction steps of sensor data prior to their use in data fusion are crucial. As part of the work of the CT6 (Cross-cutting Task 6 on Low-Cost sensors) group of Fairmode, the LCSQA is participating in an inter-comparison study of sensor data processing/calibration and data fusion methods on a national scale. The objective is to establish recommendations for the use of these new air quality observation data.

1. CONTEXTE

L'impact de la pollution de l'air ambient sur la santé humaine est désormais reconnu. L'organisation mondiale de la santé montre que 7 millions de décès anticipés dans le monde sont causés par la mauvaise qualité de l'air (World Health Organization, 2018). En Europe et en France, la surveillance des principaux polluants (NO_2, SO_2, O_3, PM_{10}, $PM_{2.5}$, benzène, HAPs et les métaux lourds) est assurée par un réseau de stations de mesures de référence qui permet un suivi continu de leurs concentrations dans l'air ambient. Toutefois, le nombre de ces stations est limité du fait du coût élevé de leur installation et de leur maintenance.

Ces dix dernières années, les progrès technologiques offrent de nouvelles possibilités pour pallier ces contraintes, en particulier par la conception d'instruments miniaturisés et à bas coût (capteurs) pour mesurer les concentrations de polluants atmosphériques (Kumar et al., 2015). En France et en Europe, de nombreux projets de recherche ont été consacrés au déploiement de capteurs à faible coût via le crowdsourcing et la science citoyenne (DIAMS, https://www.airdiams.eu/a-propos ;

BREATHE, https://breathe.hypotheses.org/presentation-projet ;

AirCitizen, https://aircitizen.org/). En outre, des plateformes open source centralisent certaines données de capteurs (principalement des capteurs de $PM_{2,5}$) à l'échelle mondiale et offrent une visualisation intelligente et un accès aux données en temps réel (Sensor.Community, https://sensor.community/fr/ ; Purple Air, https://www2.purpleair.com/ ; AirCasting, https://www.habitatmap.org/aircasting). Ces divers déploiements de capteurs sont réalisés afin de rendre compte du potentiel de ces instruments en installant des capteurs fixes (sur du mobilier urbain, sur des bâtiments, au niveau des stations de référence) ou mobiles (sur le toit de véhicules, sur des vélos ou portés par des piétons) offrant une couverture spatiale et temporelle d'observation plus importante que celle des stations de référence. L'abondance des informations ainsi collectées offre de nouvelles opportunités de développements en modélisation et cartographie de la qualité de l'air.

2. INTRODUCTION

Dans ce contexte, le LCSQA s'est positionné en tant que précurseur dans le développement d'une méthodologie de cartographie de la qualité de l'air à partir des observations de capteurs. Cette activité s'inscrit dans les objectifs de la feuille de route du groupe de travail capteurs et de la commission de suivi modélisation (CS EMTD) et est réalisée en étroite collaboration avec des AASQA, des laboratoires de recherche et des startups. Les travaux LCSQA sur cette thématique visent à faire le lien entre les nouvelles données issues des mesures de capteurs et les approches plus classiques de modélisation de la qualité de l'air. L'objectif final est de tirer le meilleur de ces capteurs, malgré leurs incertitudes, pour contribuer à la surveillance de la qualité de l'air et à l'information du public, à l'évaluation de l'exposition individuelle ou encore à l'amélioration même de la modélisation et des inventaires d'émissions.

Parmi les travaux du LCSQA sur cette thématique, une analyse bibliographique portant sur l'utilisation des données de capteurs a été publiée en septembre 2018 (Gressent et al., 2018). L'élaboration d'une méthodologie de cartographie à partir des données de capteurs à l'échelle urbaine a fait l'objet d'un rapport LCSQA (Gressent et al., 2019). Ce rapport décrit l'approche utilisée et les résultats intermédiaires pour une application à partir des observations de PM_{10} de capteurs fixes et mobiles de la société AtmoTrack à Nantes. Ce travail a également été publié dans la revue scientifique Environment International (Gressent et al., 2020). Les codes de calcul qui constituent l'outil SESAM (data fusion with SEnSor for Air quality Mapping) et qui sont à l'origine des résultats présentés dans ces deux derniers documents ainsi que les conseils d'exécution associés sont détaillés dans une note technique LCSQA publiée en 2021 (Gressent et al., 2021). Le code lui-même est diffusé en open-source (https://github.com/AliciaGressent/SESAM). L'avancement concernant la dissémination et la poursuite du développement de l'outil est présenté ci-après.

En outre, une contribution du LCSQA est apportée au groupe de travail CT6 « Low Cost sensors benchmarking » de Fairmode depuis le début de l'année 2021 pour réaliser une étude d'inter-comparaison des méthodes de traitement/calibration et de fusion de données capteurs. Ce travail vient compléter les développements récents de l'outil SESAM et est décrit dans la présente note.

3. METHODOLOGIE DE CARTOGRAPHIE A L'ECHELLE URBAINE A PARTIR DES OBSERVATIONS DE CAPTEURS : SESAM

3.1 Présentation de SESAM

SESAM permet de réaliser des cartographies de la qualité de l'air à l'échelle urbaine par la fusion de données de capteurs fixes et mobiles et des estimations issues de la modélisation (Gressent et al., 2020). L'outil a été développé à partir des données de capteurs de la société AtmoTrack et des sorties du modèle de dispersion atmosphérique ADMS-Urban (Carruthers, et al., 1997) fournies par Air Pays de La Loire sur l'agglomération de Nantes (Gressent et al., 2020). SESAM repose sur une méthode géostatistique de krigeage en dérive externe permettant de combiner les différentes sources d'informations. L'incertitude de mesure des capteurs est considérée dans la procédure de krigeage en définissant la variance d'erreur de mesure (VME) permettant de pondérer l'importance des observations capteurs dans l'interpolation spatiale. La figure 1 présente l'outil SESAM avec une application sur la ville de Nantes le 29 novembre 2018 à 9h. Dans cet exemple, la moyenne annuelle 2016 des concentrations de PM_{10} calculée par ADMS-Urban est combinée aux observations de PM_{10} de capteurs fixes et mobiles à la résolution horaire.

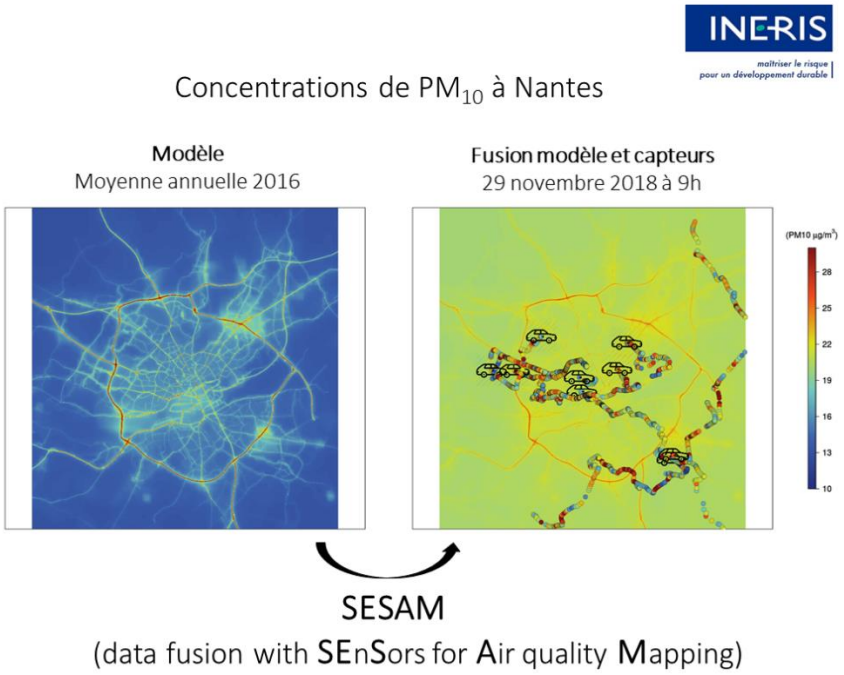

Figure 1: Présentation de l'outil SESAM (data fusion with SEnSor for Air quality Mapping) permettant la fusion de l'estimation issue de la modélisation (figure de gauche, moyenne annuelle 2016 des concentrations de PM_{10} estimée par ADMS-Urban) avec les observations de PM_{10} des capteurs (figure de droite, observations capteurs fixes et mobiles des PM_{10} par AtmoTrack et carte fusionnée en fond). Application à Nantes le 29 novembre 2018 à 9h.

3.2 Avancement

L'outil SESAM est diffusé en accès libre sous License GNU GPL (https://github.com/AliciaGressent/SESAM) depuis juin 2021 et est accompagné d'un guide d'utilisation LCSQA (Gressent et al., 2021). L'outil a été présenté auprès des AASQA lors de la CS EMTD de juin 2021. En outre, une assistance à l'utilisation de l'outil a été réalisée à la demande de certaines AASQA, en particulier Air Pays de la Loire et Atmo Auvergne-Rhône-Alpes au cours de cette même année. Le retour d'expérience des AASQA est attendu afin de faire évoluer l'outil.

En plus, des ajustements de SESAM sont envisagés, telles que la généralisation à d'autres polluants (NO_2 et O_3), l'application pour des domaines d'études variés et une meilleure prise en compte de l'incertitude inhérente aux données de capteurs fixes et mobiles. Des actions prévues dans le programme de travail 2022 du LCSQA permettront de mieux caractériser cette incertitude (en particulier s'agissant de l'évaluation de l'impact de la mobilité sur la mesure capteur) et ainsi de mieux la définir dans SESAM pour réaliser des cartographies de la qualité de l'air plus précises à l'échelle urbaine.

4. Participation au groupe CT6 de Fairmode : Inter-comparaison des methodes de traitement / calibration de reseau de capteurs et fusion de donnees

Le LCSQA participe au groupe CT6 de Fairmode (the Forum for Air quality Modeling, https://fairmode.jrc.ec.europa.eu/) intitulé « Low-Cost sensors benchmarking ». Ce groupe vise à réaliser une inter-comparaison des méthodes de traitement/calibration des données de capteurs en réseau et des méthodes de fusion de données à l'échelle nationale.

4.1 Données d'observation et domaine d'étude

Depuis janvier 2021, les données de particules fines ($PM_{2.5}$) de capteurs fixes et de stations de référence répartis aux Pays-Bas sont mises à disposition chaque heure et en temps réel. Les données de capteurs sont majoritairement issues du plus grand réseau citoyen de capteurs de $PM_{2.5}$, Sensor.Community (https://sensor.community/fr/), et des capteurs de projets professionnels disponibles aux Pays-Bas (https://sensors.rivm.nl/benchmark/). En outre, les estimations des concentrations de $PM_{2.5}$ issues du modèle RIO (Janssen et al., 2008) sont fournies pour ces mêmes échéances horaires. Tous les participants au groupe de travail utilisent ces données (comme illustré par la figure 2) dans le but de tester leurs approches de calibration de réseau de capteurs et de fusion de données. Pour cet exercice, le LCSQA propose d'élaborer une méthode de détection de valeurs aberrantes, d'appliquer et ajuster l'approche de correction des données de capteurs en réseau du RIVM, et d'utiliser l'outil SESAM pour la cartographie horaire des concentrations des $PM_{2.5}$ à l'échelle des Pays-Bas.

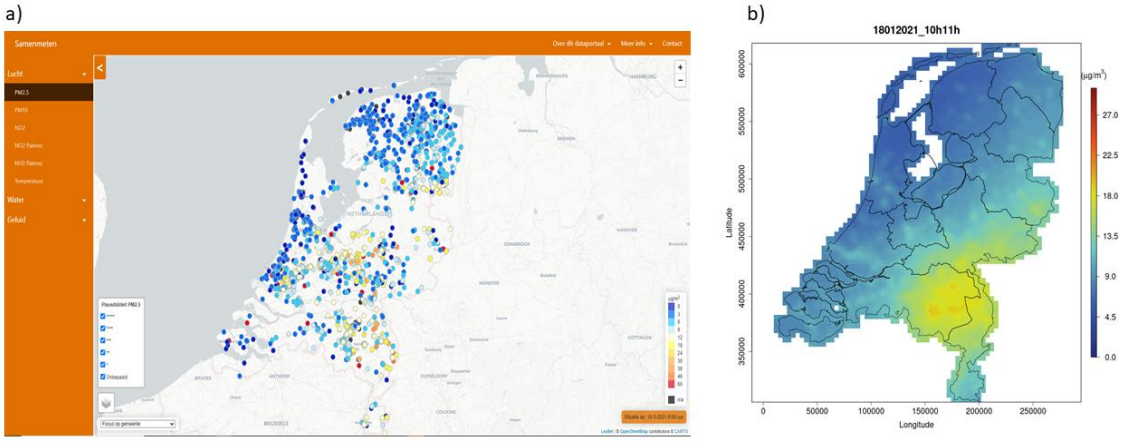

Figure 2: Exemple des données mises à disposition dans le cadre du travail d'inter-comparaison du groupe CT6 de Fairmode : données de capteurs fixes de $PM_{2.5}$ au Pays-Bas (a) et estimation des concentrations de $PM_{2.5}$ issues du modèle RIO (b) pour le 18/01/2021 à 11h.

4.2 Méthode de détection de valeurs aberrantes et correction du réseau de capteurs

Nous proposons une méthode pour identifier et éliminer les valeurs aberrantes présentes dans le jeu de données de capteurs fixes avant d'opérer une étape de calibration du réseau de capteurs et d'utiliser ces données pour la cartographie. La première étape de cette méthode consiste à nettoyer le jeu de données. En particulier, sont éliminées les valeurs négatives et les données qui sont identifiées comme : (i) appartenant à une série de données « gelées » (au moins trois échéances horaires qui se succèdent pour lesquelles la valeur capteur est constante), (ii) comprenant un biais positif constant, (iii) représentant des pics de concentrations très élevés (> 2 fois la valeur maximum des concentrations mesurées aux stations de référence sur le domaine d'étude).

Ensuite, une classification des données de capteurs est réalisée. Tout d'abord, à chaque capteur est attribué une classe de type qui rend compte du « type de pollution » influençant la mesure des capteurs : fond urbain, fond régional, trafic, ou environnement industriel. Cette classification est réalisée sur la base des informations de l'occupation des sols, de la densité de population, du réseau routier et de la typologie des stations de référence situées à proximité des capteurs. A cela s'ajoute une classification basée sur la distance d'éloignement des capteurs les uns par rapport aux autres. Ainsi, des groupes de capteurs sont formés (méthode de clustering) rassemblant les plus proches avec une distance maximum d'éloignement fixée à 10km. Le nombre de groupes de capteurs obtenus à l'issue de cette classification est de l'ordre de : *nombre de classes_type * nombre de classes_distance * nombre de saisons*, tel qu'illustré par la figure 3.

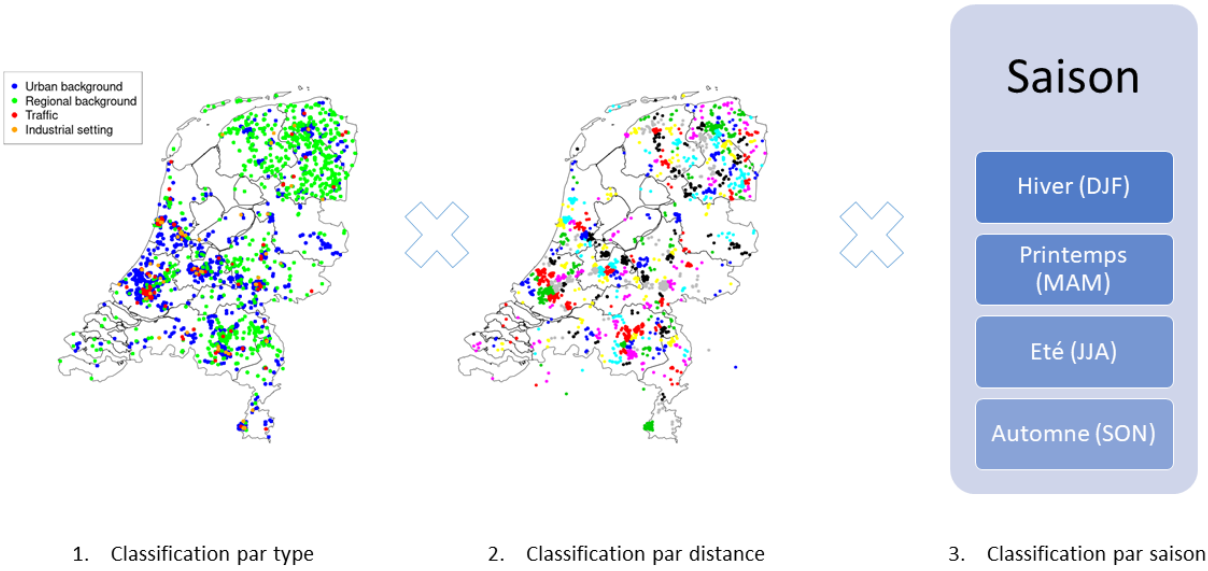

Figure 3: Création des groupes de données de capteurs en utilisant une classification par type (1), par la distance qui les sépare (2) et par saison (3).

La détection des valeurs aberrantes est inspirée des travaux de van Zoest et al., 2018. Cette dernière consiste à considérer chaque groupe de capteurs individuellement et de déterminer un intervalle de confiance dans lequel les valeurs de capteurs doivent se situer pour ne pas être éliminées. Cet intervalle est défini comme décrit par l'équation 1.

$$\mu \pm z \times \sigma$$

Equation 1

Où µ est la moyenne des concentrations de $PM_{2.5}$ en µg/m^3, σ est l'écart-type et z l'indicateur de la taille de l'intervalle de confiance. Dans l'hypothèse d'une indépendance et de la normalité des données, la valeur de z est fixée à 2,97 pour un intervalle de 99,7%, ce qui est alors arrondi à 3. Pour chaque groupe de capteurs, une transformation logarithmique est appliquée sur les données. Une distribution normale tronquée à 1 µg/m^3 est obtenue dont la moyenne et l'écart-type sont connus. Puis un estimateur de maximum de vraisemblance est utilisé pour obtenir les valeurs de la moyenne et de l'écart type de la distribution normale sous-jacente. L'intervalle est ensuite défini sur la base de cette estimation de la moyenne et de l'écart-type. Les valeurs de capteurs en dehors de cet intervalle sont identifiées comme valeurs aberrantes. La figure 4 présente un exemple d'application de la méthode de détection de valeurs aberrantes pour un groupe de capteurs (en noir sur la figure 4a). Les valeurs représentées en rouge sur la figure 4c sont identifiées comme valeurs aberrantes par l'algorithme.

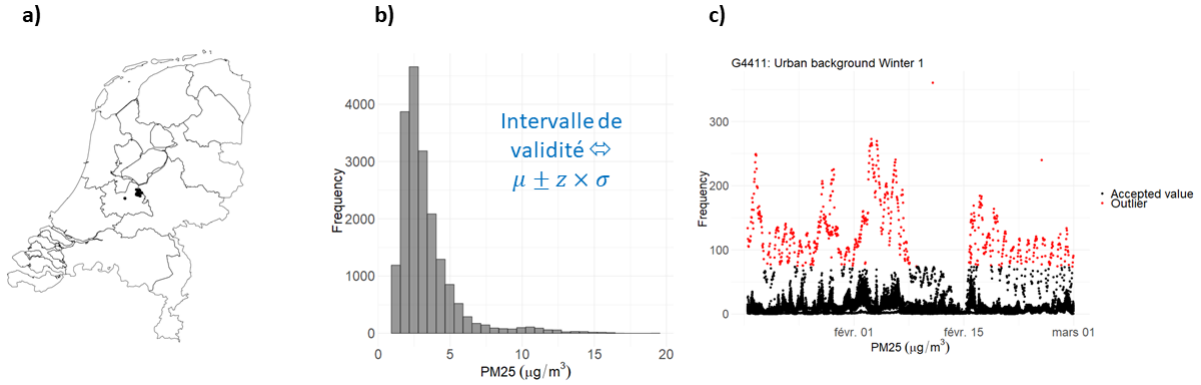

Figure 4 : Exemple de l'application de la méthode de détection de données aberrantes pour un groupe de capteurs type fond urbain, hiver.

Une fois les données de capteurs nettoyées et les valeurs aberrantes identifiées, une correction du réseau de capteurs peut être réalisée. Pour cela, la méthode développée par le RIVM est ajustée et appliquée : à chaque station de référence, les capteurs qui se situent à proximité de la station (distance d'éloignement maximum définie par la représentativité maximum de le station) sont sélectionnés. Puis un facteur de correction est estimé tel que pour chaque échéance horaire t :

$$F_{S,t} = \frac{C_{S,t}^{ref}}{\sum_1^n C_{S,t}^{capteur}}$$

Equation 2

Avec $F_{S,t}$, le facteur de correction calculé à la station de référence S à l'échéance horaire t, $C_{S,t}^{ref}$, la concentration mesurée à la station S à l'échéance horaire t, et $\sum_1^n C_{S,t}^{capteur}$, la concentration moyenne mesurée par les n capteurs situés à proximité de la station S à l'échéance horaire t.

Une interpolation spatiale des facteurs de correction est réalisée par méthode IDW (inverse distance weighting) sur le domaine d'étude. La figure 5 présente les facteurs de correction calculés aux stations (a) et la correction en concentration (µg/m^3) apportées aux observations de capteurs sur la base de ces facteurs le 18/01/2021 à 11h.

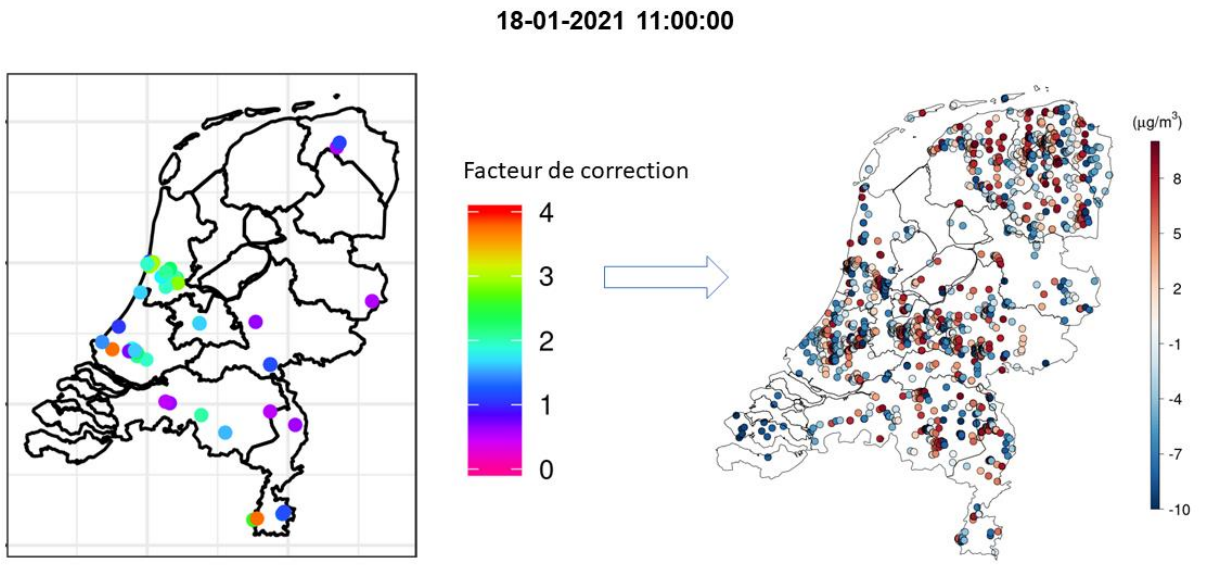

Figure 5: Facteurs de correction calculés aux stations de référence (à gauche) et correction qui résulte de l'application des facteurs sur les données de capteurs (à droite) le 18/01/2021 à 11h.

4.3 Application de SESAM

Les données de capteurs corrigées sont utilisées pour réaliser une cartographie des concentrations de $PM_{2.5}$ aux Pays-Bas. Dans cet objectif, l'outil SESAM communément utilisé pour la cartographie de la qualité de l'air à l'échelle urbaine avec des données de capteurs fixes et mobiles est appliqué pour la première fois à une échelle nationale. Cette adaptation de l'outil à une plus grande échelle ouvre des perspectives nouvelles d'applications en particulier pour le calcul d'exposition à l'échelle d'un territoire et l'évaluation de l'impact sur la santé.

La figure 6 présente la fusion de l'estimation horaire des concentrations de $PM_{2.5}$ du modèle RIO (modèle d'interpolation basé sur une méthode géostatistique, notamment un krigeage ordinaire avec une correction de tendance par l'ajout d'un biais) et des observations de capteurs corrigées de $PM_{2.5}$. La variance d'erreur de mesure (VME) est estimée à partir de ces observations. La VME est la combinaison de la variabilité des observations au point de mesures (ou autrement dit la dispersion des concentrations mesurées en chaque point) et de l'incertitude de mesure inhérente aux capteurs, définie à 50% pour les capteurs fixes et 75% pour les capteurs mobiles (Gressent et al., 2020). La fusion de données montre une augmentation des concentrations de $PM_{2.5}$ (> 16 µg/m^3) en comparaison à l'estimation du modèle seul, en particulier au Nord Est du pays. Les capteurs apportent de l'information supplémentaire là où il n'y a pas de stations de référence tout en étant pondérées par la variance d'erreur de mesure

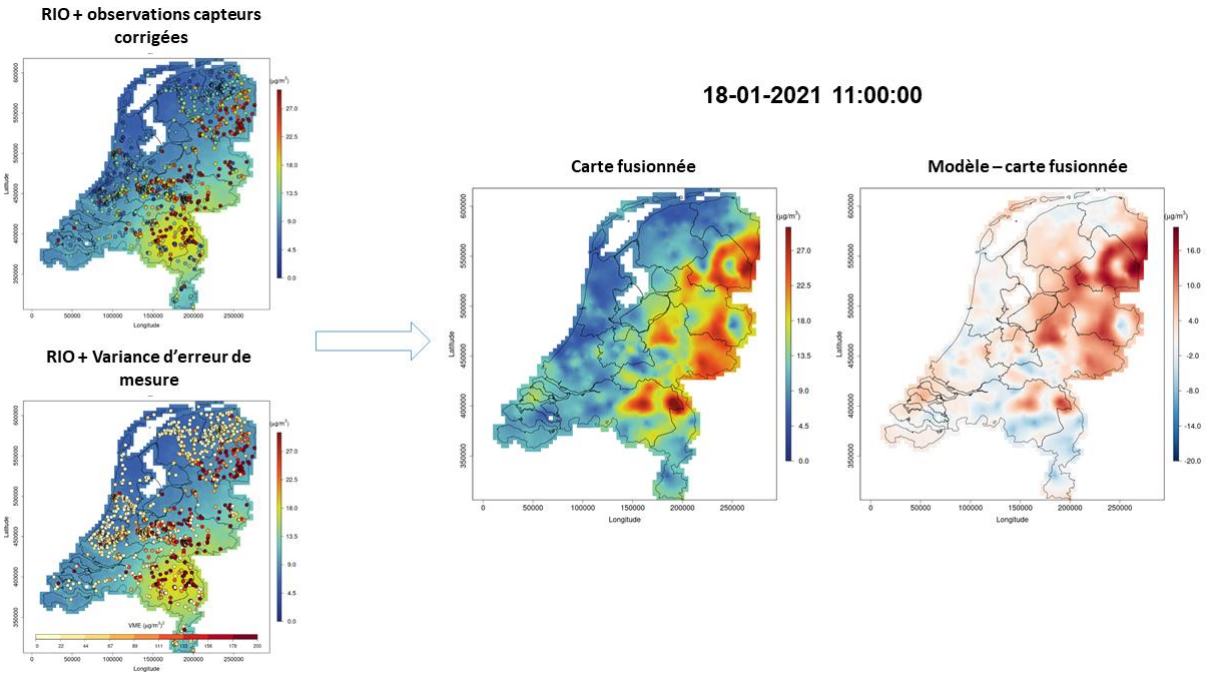

Figure 6: Fusion de données réalisée avec l'outil SESAM pour le 18/01/2021 à 11h aux Pays Bas à partir des données de capteurs fixes corrigées et de l'estimation horaire des concentrations de $PM_{2.5}$ par le modèle RIO.

4.4 Données synthétiques

Les travaux du groupe CT6 de Fairmode portent sur les méthodes permettant de calibrer et traiter les données brutes des capteurs de manière à obtenir les meilleures estimations des concentrations réelles de polluant. En général, les concentrations réelles ne sont pas connues, et nous ne pouvons donc pas tester la qualité des différents algorithmes d'une manière simple, en comparant le résultat du traitement au point de départ. Connaître les concentrations "réelles" permet de :

- Comparer les résultats de différentes méthodes de calibration ;
- Tester objectivement les effets des variations des stratégies de calibration.

Des données synthétiques pour tester différents algorithmes ont donc été générées par le RIVM à partir d'une méthodologie élaborée conjointement avec les participants du groupe CT6. La difficulté principale réside dans le fait qu'il est essentiel que le jeu de données synthétiques prenne en compte tous les aspects erratiques des données de capteurs même si les distributions analytiques ne décriront probablement pas entièrement le comportement de ces derniers. Ces aspects regroupent en particulier :

- Les écarts systématiques dus à l'humidité relative ou à d'autres facteurs environnementaux, c'est-à-dire les corrélations locales entre les écarts systématiques ;
- Les distributions très atypiques des déviations horaires que présentent les capteurs ;
- Les dysfonctionnements des capteurs individuels : parfois, les capteurs fonctionnent bien pendant un certain temps, parfois non.

L'idée de base pour créer des données de capteur synthétiques réalistes est d'utiliser le comportement réel du capteur comme base pour le comportement synthétique. Un avantage significatif de cette méthode est qu'elle utilise le comportement du capteur dans la même heure/période que celle pour laquelle les données synthétiques sont créées.

La création du jeu de données synthétiques est réalisée de la façon suivante à chaque échéance horaire :

- Une concentration réelle synthétique est définie ($C_{syntReal,k}$) comme étant la concentration qui devrait être mesurée si une station de mesure de référence était installée à chaque position où se situe un capteur. Cette concentration réelle synthétique est calculée à partir de l'écart entre la valeur à la station de référence et l'estimation du modèle RIO pour un nombre prédéfini de stations les plus proches des positions où les données synthétiques sont créées. Ces écarts définissent une plage de différences entre RIO et les stations de référence, [d0, d1]. Deux différences sont sélectionnées (D0, D1) dans l'ensemble et un nombre aléatoire r est tiré entre 0 et 1 pour définir la nouvelle concentration synthétique "réelle" tel que décrit dans l'équation 3.

$$C_{syntReal,k} = C_{RIO}(x,y) + (D0 + r \times (D1 - D0)$$

Equation 3

La valeur synthétique est limitée à des valeurs supérieures à 0,5 µg/m^3.

- Pour tous les capteurs, le rapport entre la valeur du capteur et la concentration estimée par le modèle RIO est calculé (équation 4).

$$\gamma_k = {C_{value,k}}/{C_{RIO,k}}$$

Equation 4

- Une valeur synthétique de capteur est ensuite estimée (équation 5).

$$C_k = \gamma_k \, C_{syntReal,k}$$

Equation 5

- Dans le but de créer des corrélations temporelles dans les valeurs synthétiques des capteurs, chaque capteur est relié à un capteur proche (éloignement maximum de 2 km). Les liens entre les capteurs sont rassemblés dans un tableau et sont utilisés à chaque échéance horaire pour créer les données synthétiques. Autrement dit, un capteur est lié au même autre capteur tant que cet autre capteur est disponible dans les ensembles de données horaires. Dans l'hypothèse où le capteurs k est liée au capteur j, la valeur synthétique du capteur k est estimée telle que proposée dans l'équation 6.

$$C_{synt,k} = \gamma_j \, C_{syntReal,k}$$

Equation 6

Pour exemple, les données de capteurs synthétiques obtenues pour 11/01/2022 et le 08/02/2022 sont présentées dans la figure 7 en comparaison aux données réelles des capteurs.

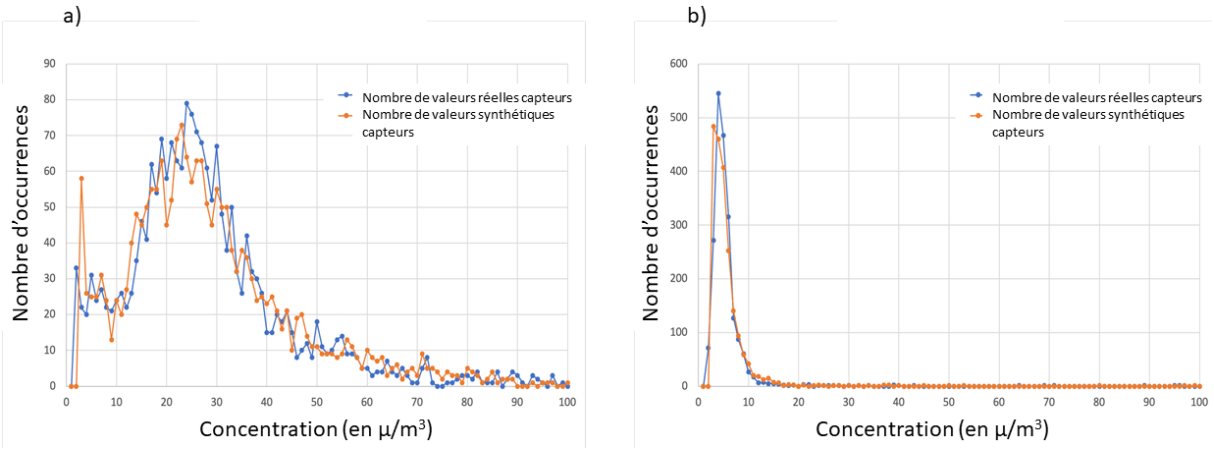

Figure 7 : Distribution des concentrations des capteurs réels (en bleu) et des données synthétiques (en orange), (a) le 11/01/2022 à 6h et (b) le 08/02/2022 à 20h.

Ces données synthétiques seront utilisées pour appliquer les méthodes de détection de valeurs aberrantes et de correction du réseau de capteurs telles que présentées dans la section 4.2. La performance des algorithmes mis en place par les participants au groupe de travail pourrait être évaluée en utilisant des métriques comme le « target diagram » (Janssen et al., 2020).

5. Conclusions

L'outil SESAM a été développé par l'Ineris dans le cadre des travaux du LCSQA afin d'exploiter les données d'observation des capteurs à bas coûts pour la cartographie de la qualité de l'air. Cet outil est désormais en accès libre et peut être utilisé pour la fusion de données des concentrations de polluant issues de la mesure de capteurs fixes et mobiles et des estimations par la modélisation. Des ajustements sont envisagés afin d'améliorer la prise en compte de l'incertitude de mesure des capteurs et en particulier pour tenir compte de l'impact de la mobilité sur la mesure. D'autre part, SESAM devrait évoluer pour servir à la cartographie d'autres polluants et pour d'autres situations ou domaines d'étude. En outre, le LCSQA participe aux travaux d'inter-comparaison des méthodes de calibration et de correction de réseau de capteurs et de fusion de données à l'échelle nationale du groupe CT6 de Fairmode. Pour cet exercice, une méthode de détection de valeurs aberrantes des données de capteurs est élaborée par le LCSQA. Cette approche consiste à définir un intervalle de confiance en considérant des groupes de capteurs déterminés par une classification reposant sur le type, la distance entre capteurs et les saisons. Ensuite, la méthode de calibration du RIVM est ajustée et appliquée. Pour cela, des facteurs de correction sont calculés aux stations de référence et interpolés sur le domaine d'estimation puis appliqués aux données de capteurs. Enfin, SESAM est utilisé pour réaliser la fusion de données à partir des données de capteurs corrigées et des estimations du modèle RIO. Un jeu de données synthétiques est créé afin de comparer les résultats des différents algorithmes et tester objectivement les effets des variations des stratégies de calibration. Des recommandations seront établies sur le traitement des données de capteurs en réseau en s'appuyant sur cet exercice.

6. REFERENCES

[1]. Carruthers, D. J., Edmunds, H. A., McHugh, C. A., Riches, P. J., and Singles, R. J., (1997). ADMS Urban – an integrated air quality modelling system for local government, Transactions on Ecology and the Environment, vol. 15, ISSN 1743-3541.

[2]. Gressent, A., Malherbe, L., Bessagnet, B., 2018. Note technique proposant une analyse bibliographique sur l'utilisation des données de micro-capteurs pour la modélisation et la cartographie de la qualité de l'air à l'échelle urbaine. Note technique LCSQA.

[3]. Gressent, A., Malherbe, L., 2019. Rapport sur l'utilisation des données de micro-capteurs pour la modélisation et la cartographie de la qualité de l'air. Rapport LCSQA.

[4]. Gressent, A., Malherbe, L., Colette, A., Rollin, H., Scimia, R., 2020. Data fusion for air quality mapping using low-cost sensor observations: feasibility and added-value, Environ. Int. 143, https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105965.

[5]. Gressent, A., 2021. Note technique, Guide d'utilisation du modèle de géostatistique SESAM pour la cartographie de la qualité de l'air à l'échelle urbaine à partir des données de micro-capteurs. Note technique LCSQA.

[6]. Janssen, S., Fierens, F., Dumont, G., and Mensink, C., RIO: a novel approach for air pollution mapping, 2008.

[7]. Janssen, S., Thunis, P., FAIRMODE Guidance Document on Modelling Quality Objectives and Benchmarking, version 3.2, EUR 30264 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-19745-4, doi:10.2760/30226, JRC120649.s

[8]. Kumar, P., Morawska, L., Martani, C., Biskos, G., Neophytou, M., et al., The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities, Environment International, Volume 75, 2015, Pages 199-205, ISSN 0160-4120, https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.019.

[9]. van Zoest, V.M., Stein, A. & Hoek, G. Outlier Detection in Urban Air Quality Sensor Networks. Water Air Soil Pollut 229, 111 (2018). https://doi.org/10.1007/s11270-018-3756-7.