

Utilisation de micro-capteurs pour cartographier la pollution aux particules fines

Sommaire

Contexte	3
Objectifs	4
Réalisations et résultats du projet	5
Phase préalable : Validation métrologique des micro-capteurs	6
Phase d'observation : application à une zone d'intérêt de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur.....	7
Phase de cartographie	9
Conclusion : Des micro-capteurs pour une meilleure cartographie des particules.....	13

Contexte

AtmoSud est l'association agréée par le ministère en charge de l'environnement pour la surveillance de la qualité de l'air (AASQA) dans la région Provence-Alpes-Côte d'Azur.

A ce titre, AtmoSud dispose de moyens de mesure et de modélisation des différents polluants réglementés : dioxyde de soufre SO₂, dioxyde d'azote NO₂, monoxyde de carbone CO, ozone O₃, benzène-toluène-xylène BTX, hydrocarbures aromatiques polycycliques HAP, métaux lourds et particules en suspension (PM).

Pour les particules en suspension, AtmoSud mène des actions et met en œuvre des moyens spécifiques dans le but d'améliorer la connaissance de ce polluant concernant :

- les niveaux de concentrations¹,
- la composition chimique²,
- la granulométrie³,
- ***la répartition spatiale pour mieux appréhender l'exposition des populations***⁴.

Ces actions permettent de mieux apprécier l'impact de la pollution particulaire atmosphérique sur l'environnement : santé des populations, écosystème et patrimoine bâti.

Pour évaluer les populations exposées à la pollution particulaire (PM), notamment à des niveaux de concentrations supérieurs aux seuils réglementaires, deux types de données sont nécessaires :

- ✓ les données de population, notamment la densité et la répartition géographique,
- ✓ ***les concentrations des PM dans l'air ambiant.***

AtmoSud dispose, grâce à ses plateformes de modélisation, d'outils opérationnels pour ***cartographier les concentrations des PM***.

Ces cartographies doivent être ajustées par des données de mesures. Leurs précisions et leurs cohérences spatiales dépendent fortement du nombre et de l'incertitude des mesures disponibles pour réaliser cet ajustement.

Des investigations sont menées, en laboratoire et sur le terrain, pour évaluer la faisabilité et la valeur ajoutée de l'utilisation de micro-capteurs dans le processus de cartographie des concentrations particulières dans l'air ambiant. C'est l'objet de ce projet.

La facilité d'implantation et le coût des micro-capteurs communicants et autonomes sont les atouts pour envisager la multiplication du nombre de points de mesure, si importante pour l'ajustement des modélisations. Il reste à démontrer leur précision et leur mise en œuvre opérationnelle pour la surveillance de l'air ambiant.

¹ SCENARII, Air PACA 2011- 2013

² SPECIATION PM, Air PACA 2012 - 2014

³ SIGNATURE PM, Air PACA 2013 - 2014

⁴ EXPOP, Air PACA 2014

Objectifs

Objectifs stratégique

Le projet a été labélisé par le PRSE, comme répondant à l'objectif stratégique :

- ***Améliorer les connaissances sur l'exposition aux particules en vue de cibler les actions à mener en intégrant les diversités des territoires : réduire et contrôler les expositions nocives à la pollution atmosphérique ayant un impact sur la santé.***



Objectifs opérationnels

Le but du projet est d'investiguer les possibilités qu'offre :

- ***L'utilisation des micro-capteurs communicants et autonomes dans la réalisation des cartographies d'exposition des populations aux particules en suspension.***

Cinq objectifs opérationnels représentent le challenge du projet :

Phase préalable : Validation métrologique des micro-capteurs

- Le test et la validation métrologique des micro-capteurs,
- La définition du protocole d'utilisation des micro-capteurs.

La phase d'observation : Application à une zone d'intérêt dans la région Provence-Alpes-Côte d'Azur

- Conception de la stratégie d'échantillonnage
- Campagne de mesures : déploiement des micro-capteurs
- Modélisation de la dispersion des particules en suspension

La phase de cartographie d'exposition

- Intégration des mesures des micro-capteurs et cartographie des concentrations de PM
- Cartes d'exposition des populations à la pollution PM

Collaboration

Le projet a été mené avec ECOLOGICSENSE qui développe les micro-capteurs e-PM.



Il a bénéficié de la collaboration et du support de la Métropole Nice Côte d'Azur (NCA).



Réalisations et résultats du projet

Comme énoncé dans le paragraphe précédent, les micro-capteurs utilisés dans le cadre de cette étude sont les e-PM du groupe TERA dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau suivant :



Spécifications techniques		e-PM AQ Feel
Gamme d'utilisation (T°C, HR)	-5°C... + 50°C - 0...95% (T>0°C) - 0-70% (T<0°C)	
Précision (T°C, HR)	± 0.5°C (de 5 à 40°C) ± 3% (de 20 à 80% HR)	
Gamme de mesure	PM 2.5 (0 – 100 µg/m³) - PM 10 (0 – 200 µg/m³); Qualitatif au-delà	
Technologie	Détection par diffraction de lumière	
Communication	GSM	
Mémoire interne	3 mois de mesure pour une périodicité de 10 min	
Energie QAE	Secteur – Batterie + Panneau solaire	
QAI	Secteur	
Mise en marche	A distance via le logiciel Soft'Air	
Forfait M2M	10 Mo/mois en moyenne	
Autonomie QAE	Autonome ou 10 jours sans soleil (périodicité de 10 min)	
Calibration	Annuelle – Sable d'Arizona	
Dimensions boîtier - Poids	Boîtier couleur beige : 16 x 16 x 6 (cm) – 0,4 kg Homesense + batterie : 31*23*18 (cm) – 4,2 kg Panneau Solaire + support : 55*32*41 (cm) – 3,0 kg	

Tableau 1 : Caractéristiques techniques des micro-capteurs e-PM AQ Feel

Phase préalable : Validation métrologique des micro-capteurs

La validation métrologique des micro-capteurs a fait l'objet d'un premier rapport disponible sur le site internet d'AtmoSud : <http://www.atmosud.org/publications/utilisation-de-micro-capteurs-pour-cartographier-la-pollution-aux-particules-fines>

Les tests d'équivalence ont montré que les moyennes horaires et journalières en PM10, recueillies à partir des données des micro-capteurs, suivent, de façon acceptable, les niveaux observés par les méthodes de référence. Toutefois, des décrochages ponctuels dus, en partie, aux conditions météorologiques (vent, humidité, etc...) et à la nature chimique des particules ont été relevés.

Bien que les micro-capteurs puissent donner une tendance et/ou une valeur indicative intéressante, il n'est pas possible actuellement de leur accorder le même degré de confiance que les méthodes de référence.

Afin d'identifier les écarts significatifs entre les valeurs de référence et les valeurs expérimentales (valeurs des micro-capteurs), un premier traitement statistique sur les données est réalisé via le calcul de l'estimateur statistique Z-Score. Ce dernier apparaît pertinent et permet de récupérer un jeu de données relativement cohérent, dépourvu de valeurs jugées mathématiquement aberrantes.

Les biais moyens, en valeur absolue, sont compris entre 30 % et 50 % pour les PM10, selon les micro-capteurs et les périodes de mesure par rapport aux méthodes de référence. Les biais pour les PM2,5 apparaissent plus importants en raison de la gamme de concentration sur laquelle sont mesurées ces particules.

Les tests de reproductibilité ont montré des résultats prometteurs. En effet, les coefficients de détermination, calculés entre les micro-capteurs, sont relativement élevés.

Pour l'utilisation future des micro-capteurs, il faut donc envisager :

- Une première validation des données, par l'intermédiaire du calcul du Z-Score,
- Un ajustement des données, dans un second temps, afin d'être plus en accord avec les données de référence.

Les jeux de données obtenus après une année complète de mesure avec la station de référence et le micro-capteur placé en parallèle permettent d'obtenir, à l'aide d'une régression linéaire, une équation pertinente pour l'ajustement des données de l'ensemble des micro-capteurs déployés sur la zone d'étude.

Phase d'observation : application à une zone d'intérêt de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur

1. Déploiement

Suite à cette phase de validation des micro-capteurs, AtmoSud les a déployés sur une zone d'intérêt : la Plaine du Var, à Nice. En effet, la Métropole Nice Côte d'Azur établit un éco-quartier sur cette zone sur laquelle de nombreuses expérimentations innovantes sont en cours dont un projet de Monitoring Urbain Environnemental.

Les huit micro-capteurs, utilisés pour les tests de reproductibilité et distingués chacun par un numéro d'identifiant à 4 chiffres, ont été déployés sur cet éco-quartier au cours du mois d'octobre 2016. Les mesures liées à cette phase d'observation ont été réalisées jusqu'à la fin de l'année 2017.

La Métropole Nice Côte d'Azur dispose d'un moyen mobile sur la zone (point rouge n°6118 sur la carte ci-dessous) équipé d'un analyseur automatique de particules, utilisé comme référence pour cette campagne.

Le capteur n°6115 a, initialement, été déployé près du complexe sportif Charles Ehrmann, au sud de la Plaine du Var. Toutefois, un important chantier a démarré à proximité, peu après l'installation du capteur, et a fortement perturbé les mesures en provoquant une saturation du capteur. Ainsi, il a été déplacé sur un site de mesure permanent d'AtmoSud, en situation trafic sur la Promenade des Anglais, à l'est de la Plaine du Var.



Carte 1 : Stratégie d'échantillonnage des micro-capteurs sur la Plaine du Var à Nice

Les capteurs sont déployés à une hauteur de 3 mètres du sol. Dans l'hypothèse où les résultats de cette campagne sont satisfaisants, il est prévu une assimilation des données de ces micro-capteurs dans les outils de modélisation d'AtmoSud. La réalisation d'une cartographie annuelle des concentrations en particules fines, s'appuyant sur les données de référence et des micro-capteurs, reste l'objectif final.

2. Traitements des données

Les micro-capteurs ont été opérationnels sur l'ensemble de l'année 2017 sur la Plaine du Var de Nice.

Le couple 'micro-capteur n°6118 – analyseur de référence' en situation urbaine est utilisé pour établir la validation des micro-capteurs sur la zone par l'intermédiaire du calcul du Z-Score décrit ci-dessous :

Estimateur	Z-score
Formule	$\frac{ \text{Valeur } \mu_{\text{capteur}} - \text{Valeur Réf} }{ U \text{ Réf} }$
Critère	0 à 2 : Satisfaisant 2 à 3 : Discutable >3 : Non satisfaisant

Tableau 2 : Descriptif du paramètre statistique « Z-Score »

Avec :

- Valeur μ_{capteur} : donnée mesurée par le micro-capteur
- Valeur Réf : donnée mesurée par l'analyseur de référence
- U Réf : incertitude type liée à la mesure de référence

Les tests réalisés avant le déploiement ont montré que les micro-capteurs sont reproductibles entre eux. De ce fait, les conclusions tirées par le calcul du Z-Score, effectué sur le couple « micro-capteur – référence », peuvent s'appliquer sur l'ensemble des micro-capteurs de la zone.

Le tableau ci-dessous indique les résultats du calcul du Z-Score sur les données horaires du couple « micro-capteur – référence » en 2017 :

Critère	Résultat (micro-capteur 6118 / référence)
Z-Score ≤ 2	68 %
2 < Z-Score ≤ 3	11 %
Z-Score > 3	15 %

Tableau 3 : Résultat du calcul du Z-Score sur les données horaires pour le couple « micro-capteur – référence » en 2017

Au final, 18 % des données horaires, soit 740 valeurs sur un total de 4390, ont été invalidées à la suite de ce calcul.

La corrélation, entre les données de l'analyseur de référence et celles des micro-capteurs, validées par le calcul du Z-Score, présente des résultats satisfaisants. En effet, le coefficient de détermination R^2 issu de la régression linéaire est relativement élevé (≈ 0.7). Ainsi, l'équation de cette régression, appliquée aux données des micro-capteurs, peut servir de correction complémentaire au calcul du Z-Score.

La régression linéaire des données horaires validées du micro-capteur et de la référence associée est présentée dans le graphe ci-dessous :

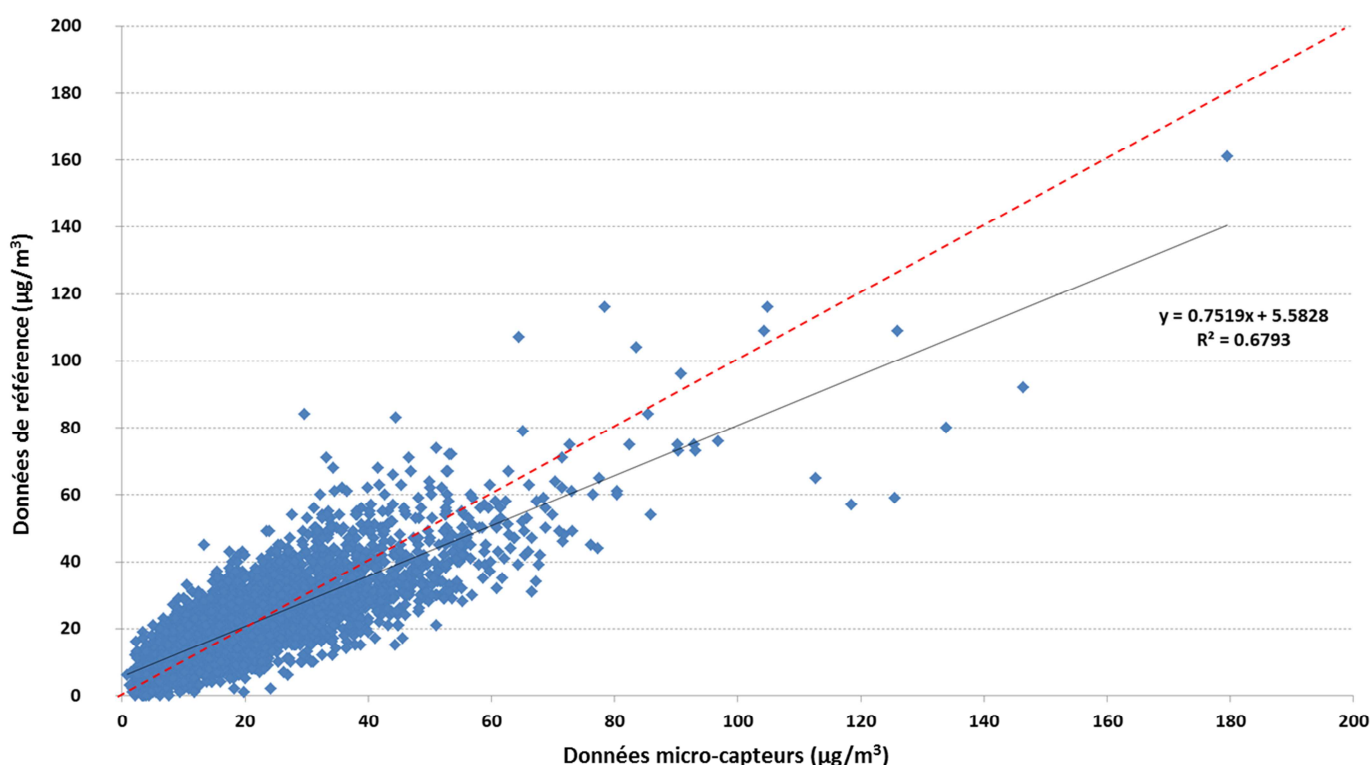


Figure 1 : Régression linéaire des données horaires après validation

L'utilisation de l'équation de cette régression linéaire apparaît pertinente pour ajuster les données après validation par calcul de Z-Score.

Phase de cartographie

1. Principe

La cartographie, dernière étape de ce projet, consistera à réaliser une carte d'exposition annuelle des populations, centrée sur la Plaine du Var, tenant compte des mesures réalisées par les micro-capteurs. Ces dernières compléteront les mesures des stations de référence et seront intégrées dans les outils de modélisation. Le croisement des mesures de particules fines avec les données de densité de

population au sein des bâtiments permettra ensuite d'estimer l'exposition des populations sur ce secteur.

Actuellement, les stations de mesure des Alpes-Maritimes sont intégrées dans les cartographies de pollution de l'air. Sur la Plaine du Var, la station de mesure de l'Aéroport Nice Côte d'Azur est la référence pour la modélisation sur cette zone. C'est la station la plus proche disposant d'un historique de données suffisant.

L'utilisation des micro-capteurs permettrait d'apporter des informations complémentaires sur les spécificités locales de la zone.

2. Réalisation

Tout d'abord, il s'agit d'appliquer l'équation issue de la régression linéaire des données horaires sur toutes les données horaires des micro-capteurs :

$$y = 0.7519 * x + 5.5828$$

Où x représente les données micro-capteurs non corrigées et y les données corrigées résultantes.

En effet, la phase de validation réalisée en amont du déploiement sur la Plaine du Var a montré que les micro-capteurs utilisés étaient reproductibles entre eux. Ainsi, la validation ainsi que l'équation d'ajustement, calculées à partir du couple « micro-capteur – analyseur de référence », peuvent être appliquées à l'ensemble des micro-capteurs de la zone.

De plus, une inter-comparaison des micro-capteurs a été réalisée à la fin de la campagne sur la Plaine du Var afin d'identifier les dérives potentielles des appareils.

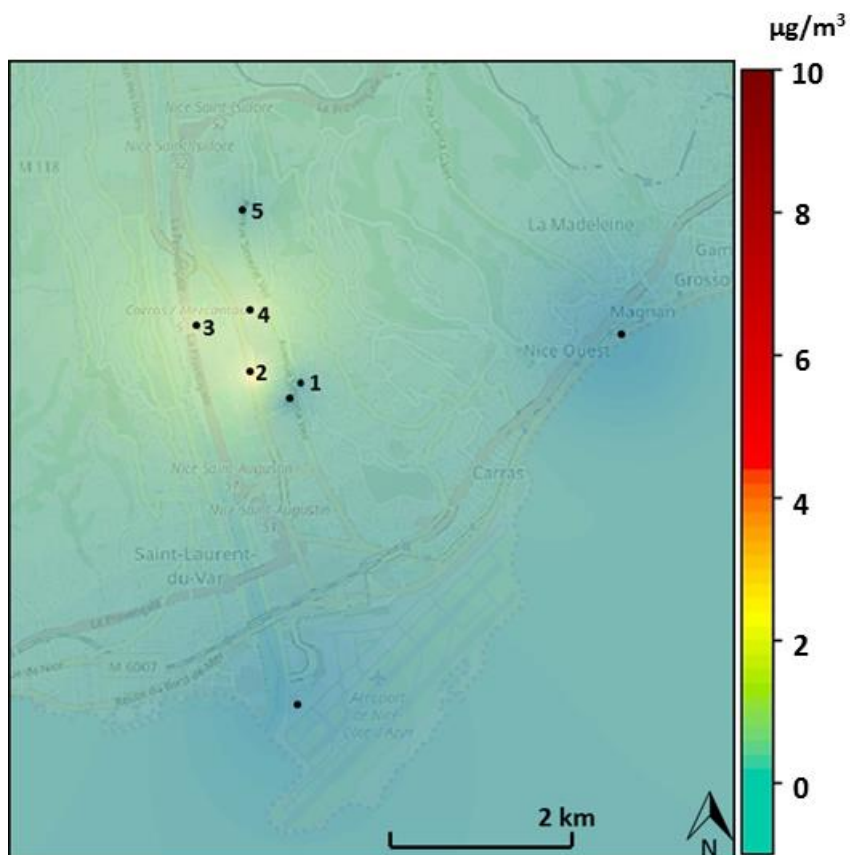
Un des micro-capteurs utilisés (n°6117 : installé au jardin botanique) a présenté une dérive relativement conséquente, très probablement due à l'encrassement de l'appareil. Les données de ce micro-capteur n'ont donc pas été prises en compte dans la cartographie.

Les données validées par calcul du Z-Score puis ajustées à l'aide de l'équation sont utilisées pour calculer le percentile 90.4 des concentrations annuelles en PM10 (35^{ème} valeur journalière la plus élevée sur une année) sur les différents sites de mesure de la Plaine du Var.

Id	Site	Typologie	Mesure	Estimation	Ecart
1	234 Av. Sainte Marguerite	Fond urbain	35	35	0
2	Bd. du Mercantour	Trafic	44	39	5
3	Aire d'accueil - Nice	Périurbain	35	32	3
4	Espace Vert - NCA	Périurbain	37	33	4
5	Av. Simone Veil	Trafic	31	30	1

Tableau 4 : Synthèse des différences entre les valeurs du percentile 90.4 des concentrations annuelles mesurées par les micro-capteurs et estimées par modélisation sur les différents sites échantillonnés

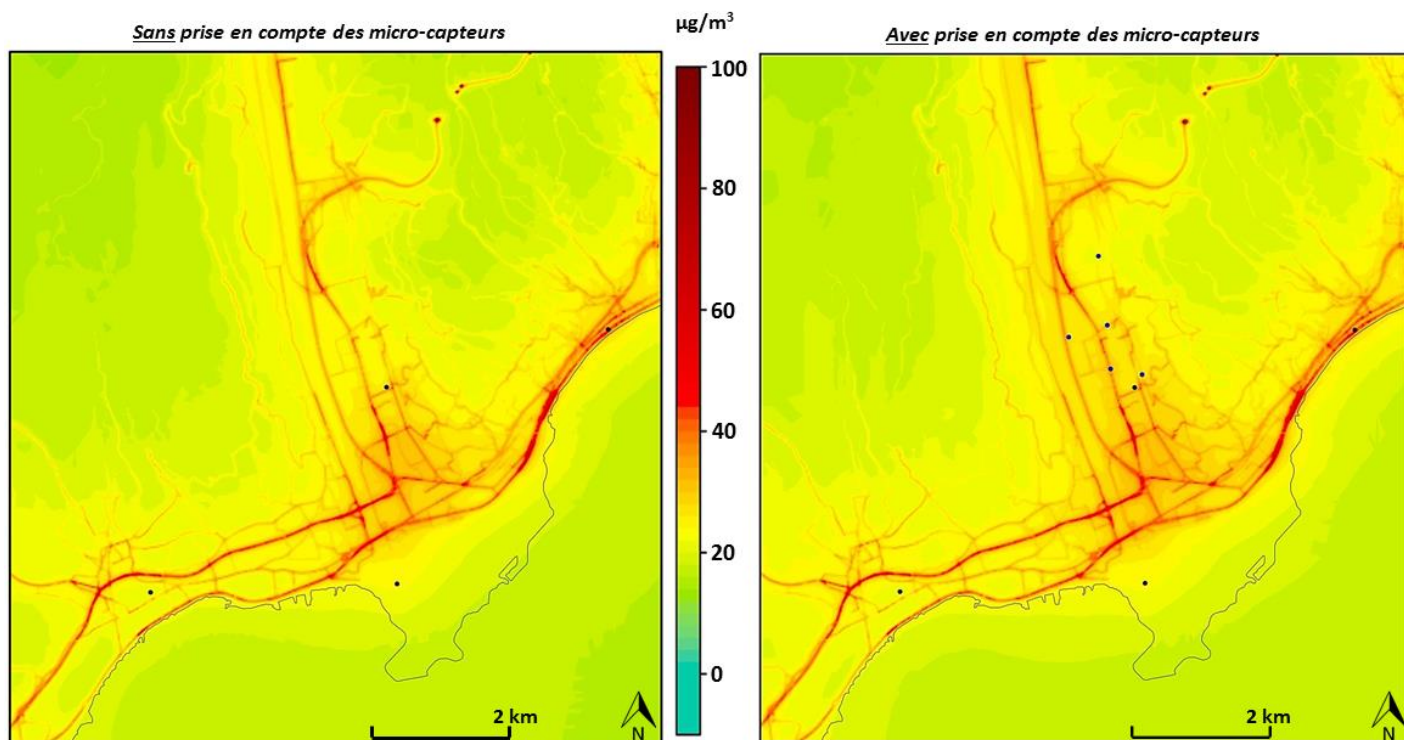
La carte ci-dessous illustre les résultats du tableau 3 et permet de visualiser spatialement les écarts entre les mesures du percentile 90.4 des concentrations annuelles en PM10 par des micro-capteurs par rapport aux estimations du modèle.



Carte 2 : Cartographie des écarts mesure/modèle sur la Plaine du Var

Les écarts entre les percentiles 90.4 des concentrations annuelles en PM10 mesurés et modélisés sont assez faibles, de l'ordre de quelques $\mu\text{g}/\text{m}^3$, et sont observés à proximité des principaux axes routiers de la zone.

Enfin, le modèle ADMS est corrigé par interpolation avec les données de mesure PM10 des micro-capteurs pour réaliser la carte du percentile 90.4 des concentrations annuelles sur la zone de la Plaine du Var.



Carte 3 : Cartographies annuelles du percentile 90.4 des concentrations journalières en PM10 sans prise en compte des données micro-capteurs (à gauche) et avec prise en compte des données micro-capteurs (à droite)

La cartographie prenant en compte les données micro-capteurs montre une augmentation du percentile 90.4, en moyenne annuelle sur la zone de la Plaine du Var, d'environ $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ par rapport à la cartographie ne prenant pas en compte les données micro-capteurs.

Cette zone est relativement bien renseignée pour la modélisation des concentrations en particules fines.

L'hypothèse est la suivante : les micro-capteurs déployés sur une zone peu renseignée en termes de mesure de qualité de l'air apportent une amélioration significative de la cartographie.

Conclusion : Des micro-capteurs pour une meilleure cartographie des particules

L'objectif du projet est l'utilisation des micro-capteurs communicants et autonomes pour la réalisation des cartographies d'exposition des populations aux particules en suspension.

Le projet comporte trois phases :

- une phase de validation métrologique, avec des investigations sur la justesse et la reproductibilité des micro-capteurs,
- une phase de mise en œuvre, avec un déploiement des micro-capteurs dans l'éco-quartier de la plaine du Var.
- une phase d'intégration des mesures des micro-capteurs dans le processus de cartographie des concentrations en particules fines.

Le projet a permis :

- d'évaluer les capacités métrologiques des micro-capteurs PM : justesse, reproductibilité, biais.
- de proposer des préconisations pour l'utilisation de ce type d'équipements innovants.
- de proposer une méthode de validation et de post-traitement des données des micro-capteurs qui garantit un niveau de confiance satisfaisant dans leur utilisation.

Le projet va permettre :

- d'améliorer les cartographies de qualité de l'air en intégrant les données des micro-capteurs.

Le déploiement des micro-capteurs dans la plaine du Var permet d'évaluer la valeur ajoutée que peut apporter un réseau de ce type d'équipements pour le calage des cartographies de pollution aux particules fines.

Utilisation de micro-capteurs pour cartographier la pollution aux particules fines

AtmoSud mène plusieurs actions pour améliorer la précision et la représentativité de ses cartographies, s'agissant de niveaux de pollution ou de l'exposition des populations.

Ce projet « Micro-capteurs PM », labélisé par le Plan Régional Santé Environnement, consiste à mener des investigations, en laboratoire et sur le terrain, pour évaluer la faisabilité et la valeur ajoutée de l'utilisation de ce type d'équipements innovants dans le processus de cartographie des concentrations particulières dans l'air ambiant.

Après avoir réalisé des tests d'équivalence et de reproductibilité sur les micro-capteurs PM du groupe TERA, les appareils ont été déployés durant l'année 2017 sur la Plaine du Var de Nice.

Les travaux ont permis d'établir des préconisations d'utilisation pour ces micro-capteurs ainsi qu'une méthode de validation et de post-traitement des données.

Enfin, les données traitées, tenant compte des spécificités locales, ont pour vocation d'améliorer les cartographies de concentration en particules fines sur la zone.

Responsable de publication : Thomas ALEIXO

Date : janvier 2019

Photos : Archives AtmoSud

