

Evaluation des micro-capteurs e-PM

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes & EcologicSense



Diffusion : Février 2017

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





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.air-rhonealpes.fr et www.atmoauvergne.asso.fr/

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

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 & EcologicSense (2016) Evaluation des micro-capteurs e-PM d'EcologicSense** ».

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

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

- Grenoble-Alpes Métropole
- Région Auvergne-Rhône-Alpes

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

Version éditée le 20 février 2017

Sommaire



1. Introduction.....	4
1.1. Contexte	4
1.2. Objectifs.....	4
1.3. Rappels sur la réglementation.....	5
2. Matériel et méthode	7
2.1. Instrumentation	7
2.1.1. Les micro-capteurs : e-PM AQ SENSE et AQ FEEL	7
2.1.2. Les analyseurs : TEOM.....	8
2.2. Méthodologie sur l'évaluation des micro-capteurs	10
2.2.1. Sites de mesures.....	10
2.2.2. Echantillonnage temporel	11
3. Résultats	12
3.1. Echantillonnage temporel	12
3.1.1. Répartition annuelle des données	12
3.1.2. Taux de fonctionnement et mesures dans la gamme d'utilisation	12
3.1.3. Optimisation des mesures des capteurs	13
3.2. Reproductibilité des mesures des capteurs e-PM.....	14
3.2.1. Données journalières.....	14
3.2.2. Données horaires	14
3.2.3. Données fines	15
3.3. Comparaison avec un analyseur de référence TEOM et ajustement des mesures des micro-capteurs.....	15
3.3.1. Site de type trafic	15
3.3.2. Site de fond urbain	19
3.4. Ajustement des micro-capteurs par rapport au TEOM	23
3.4.1. Facteur correctif	23
3.4.2. Z-score (utilisé par AirPACA).....	23
4. Conclusions.....	24
5. Perspectives de recherche	25

1. Introduction

1.1. Contexte

Dans le domaine de la qualité de l'air, les particules fines constituent aujourd'hui un véritable enjeu sanitaire, environnemental et financier.

En France, les particules inférieures à 10 microns et 2.5 microns de diamètre aérodynamique sont réglementées en air ambiant. A ce titre, elles font partie des composés mesurés par les associations agréées de surveillance de la qualité de l'air depuis de nombreuses années. La technique de mesure des particules s'est au cours du temps améliorée, automatisée, permettant actuellement le suivi en continu.

Le domaine de la surveillance de la qualité de l'air connaît actuellement de nombreuses innovations technologiques avec l'apparition d'une nouvelle gamme de capteurs (micro-capteurs) offrant de nouvelles perspectives dans le domaine de la mesure jusqu'à présent centrée sur les mesures homologuées (analyseurs fixes).

Ces micro-capteurs, bien moins coûteux que les analyseurs de référence, offrent la possibilité d'être déployés sur de nombreux sites. Lorsqu'ils sont autonomes en énergie et peu encombrants, ils peuvent également être « mobiles » car portés par des citoyens souhaitant connaître leur exposition personnelle. Couplés aux nouvelles technologies numériques, ces micro-capteurs ouvrent de nouvelles possibilités en matière d'information et de surveillance.

Dans le cadre du projet Mobicit'Air, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes a engagé une étude visant à évaluer la qualité métrologique des micro-capteurs (solutions fixes et mobiles) sur la base d'intercomparaisons avec les stations de référence du réseau de surveillance de la qualité de l'air. Dans le cadre de cette étude, un partenariat a été mis en place avec le groupe TERA (NEC-K, TERA Environnement, EcoLogicSense, Human Up) pour évaluer les micro-capteurs e-PM d'EcoLogicSense pour la mesure des particules en suspension (PM10 et PM2,5). Cette évaluation permet d'apprécier le fonctionnement de ces appareils et d'identifier les conditions d'utilisation au sein d'une Association Agréée de Surveillance de la Qualité de l'Air en complément de la mesure de référence.

1.2. Objectifs

Trois axes d'études sont ciblés dans le cadre de cette évaluation technique :

- L'évaluation de la fiabilité des e-PM ;
 - Gamme de mesure : Au minimum 95% des données devront être comprises dans la gamme de mesure.
 - Dérive : Valider les périodicités de maintenance en fonction des typologies de site
 - Reproductibilité entre micro-capteurs : elle devra être <20% pour les PM10 et <30% pour les PM2,5 afin de garantir la pertinence des informations remontées par des capteurs déployés sur un vaste territoire.
 - Robustesse : Vérifier la pérennité du déploiement d'une telle solution sur un vaste territoire en garantissant un taux de fonctionnement > 80%
- La comparaison des mesures des micro-capteurs à celles d'un analyseur de référence ;
 - Définir la pertinence et les limitations du système de mesure low-cost e-PM.
- L'identification des conditions d'utilisation au sein d'une AASQA en complément de la mesure de référence.
 - Donner les postulats d'intégration des données des capteurs e-PM dans les modélisations des AASQA.

1.3. Rappels sur la réglementation

La [directive 2008/50/CE](#) du Parlement Européen et du Conseil du 21 mai 2008, concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe, regroupe 4 directives européennes : La [directive cadre 96/62/CE](#) ainsi que les directives filles [2002/3/CE](#), [2000/69/CE](#) et [1999/30/CE](#).

Cette même directive détermine les critères d'acceptabilité vis-à-vis de la méthode utilisée. Le tableau ci-dessous définit les incertitudes tolérées (à un degré de fiabilité de 95%). Le pourcentage donné, est applicable pour la valeur limite ciblée.

Tableau 1 : Incertitudes tolérées pour les instruments de mesures

Instruments	Mesures fixes dites de « référence »	Mesures indicatives de type capteur	Modélisation	Estimation objective
Incertitude	25 %	50 %	50%	100%
A utiliser quand les concentrations en polluant sont :				
	>SES	$SEI \leq [] \leq SES$	<SEI	<SEI

SES : Seuil d'Evaluation Supérieur

SEI : Seuil d'évaluation Inférieur

- **Mesures indicatives** : mesures qui respectent des OQD (objectifs de qualité de la donnée) moins strictes que ceux qui sont requis pour les mesures fixes.
- **Estimation objective** : toute méthode formalisée permettant d'obtenir l'ordre de grandeur en polluant en un point donné ou sur une aire géographique sans nécessairement recourir à des outils mathématiques complexes ou aux équations de la physique.

La [directive 2015/1480](#) de la Commission du 28 août 2015, modifiant plusieurs annexes des directives du Parlement Européen et du Conseil [2004/107/CE](#) et [2008/50/CE](#), établit les règles concernant les méthodes de référence, la validation des données et l'emplacement des points de prélèvement pour l'évaluation de la qualité de l'air ambiant.

Les tableaux suivants récapitulent l'ensemble des valeurs réglementaires concernant les particules (PM_{2,5} et PM₁₀) dans l'air ambiant.

Tableau 2 : Objectifs qualité pour les PM₁₀ et les PM_{2,5}

Polluants	Valeurs limites	Seuil d'information	Seuil d'alerte (Niv1)
Particules fines de diamètre inférieur ou égal à 10 micromètres (PM ₁₀)	En moyenne annuelle : 40 µg/m³. En moyenne journalière 50 µg/m³ à ne pas dépasser plus de 35 jours par an.	50 µg/m ³ sur 1 jour (sur constat ou prévision)	80 µg/m³ sur 1j (sur constat ou prévision) Ou 50 µg/m³ sur 4j (constat j-1+ constat j-2+ prévi. j + prévi. j+1)

Polluant	Valeurs limites	Valeurs cibles	Objectif de réduction de l'exposition par rapport à l'IEM** de 2010, qui devrait être atteint en 2020		Obligation en matière de concentration relative à l'exposition qui doit être respectée en 2015
Particules fines de diamètre inférieur ou égal à 2,5 micromètres (PM2,5)	Pour la protection de la santé :	Pour la protection de la santé :	Concentration initiale :	Objectif de réduction	20 µg/m³ pour l'IEM**.
	En moyenne annuelle :	En moyenne annuelle	<= à 8,5 µg/m³	0%	
	<u>Phase 1</u> :	(A)	>=8,5 et <13 µg/m³	10%	
	25 µg/m³ depuis 01/01/15.	respecter à partir du 1er janvier 2010) :	>=13 et <18 µg/m³	15%	
	<u>Phase 2</u> :	25 µg/m³.	>=18 et <22 µg/m³	20%	
	20 µg/m³ en 2020*.		>= à 22 µg/m³	Toute mesure appropriée pour atteindre 18 µg/m³	
* Il s'agit d'une <u>valeur limite</u> indicative que la commission européenne prévoyait de réviser en 2013 à la lumière des informations complémentaires sur l'impact sanitaire et environnemental, la faisabilité technique et l'expérience acquise en matière de <u>valeur cible</u> dans les États membres. ** IEM : Indicateur d'exposition moyenne, calculé par chaque pays en considérant un ensemble de stations représentatives de la pollution urbaine de fond dans les agglomérations et les zones urbaines.					

2. Matériel et méthode

2.1. Instrumentation

2.1.1. Les micro-capteurs : e-PM AQ SENSE et AQ FEEL

- Principe de mesure :

Les particules présentes dans l'air sont aspirées à travers le capteur par un flux forcé. Ces particules passent devant un laser, généré par une LED infrarouge, et dévient les photons sur une lentille qui les focalise sur une photodiode. Le signal de sortie est retranscrit sous forme de pourcentage de temps d'occupation des particules dans le capteur.

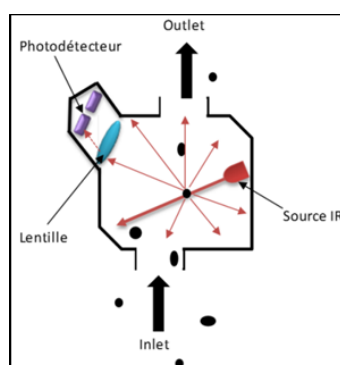


Figure 1 : Technologie du capteur e-PM

A noter que le capteur ne peut pas détecter les particules avec un diamètre aérodynamique inférieur à 1 μm . Le capteur détecte donc les particules comprises entre 1 et 10 μm .

Le Tableau 3 définit les caractéristiques des deux types de capteurs :

Tableau 3 : Spécificités des capteurs de particules

Spécificités	AQ-Sense	AQ-FEEL
Mode de communication	Radiofréquence	GSM
Alimentation	Secteur ou batterie (autonomie de 10 jours)	Secteur ou batterie (recharge par panneau solaire)
Périodicité de mesure standard	Sur secteur : 5 min Sur batterie : 30 min	Sur secteur : 7 min Sur batterie : 10 / 15 min en fonction de la période de transmission des données
Echantillonnage horaire maximal	80%	57%
Transmission des données	Réseau local	Réseau distant
Besoins spécifiques	Ordinateur + collecteur de données radiofréquence à une portée suffisante	Réseau GSM pour que les capteurs communiquent
Etudes visées	Atmo – AuRA	Air PACA

Plus le rapport temps de mesure sur périodicité de mesure (nommé ci-après temps d'échantillonnage en %) sera proche de 100%, plus le capteur pourra intégrer les nombreuses variations de

concentrations en particules dans ses mesures. La réponse sera ainsi moins bruitée mais le système sera plus énergivore.

Tableau 4 : Caractéristiques générale des e-PM

Paramètre	PM2,5	PM10
Gamme de mesure quantitative ¹	0 – 100 µg/m ³	0 – 200 µg/m ³
Limite de détection (taille)	1 µm	
Limite de détection (concentration)	2 µg/m ³	
Précision	25%	15%
Température d'utilisation	-5°C à 50°C	
Hygrométrie d'utilisation	0 – 95 % pour T > 0°C et 0 – 70 % pour T < 0°C	
Aérosol de calibration	Sable d'Arizona A1	

¹ Qualitatif au-delà de la gamme

2.1.2. Les analyseurs : TEOM

Les particules en suspension présentes dans l'atmosphère peuvent être étudiées par la mesure de leur masse, de leur nombre ou encore de leur composition chimique.

La Directive Européenne stipule que :

La méthode de référence utilisée pour l'échantillonnage et la mesure des PM10 en masse est celle décrite dans la norme EN 12341 (1999) : « Qualité de l'air — détermination de la fraction PM10 de matière particulaire en suspension - méthode de référence et procédure d'essai in situ pour démontrer l'équivalence à la référence de méthodes de mesurage ».

La méthode de référence utilisée pour l'échantillonnage et la mesure des PM2,5 en masse est celle décrite dans la norme EN 14907 (2005) : « Méthode de mesurage gravimétrique de référence pour la détermination de la fraction massique PM2,5 de matière particulaire en suspension ».

Les États membres peuvent utiliser toute autre méthode dont ils peuvent prouver qu'elle donne des résultats équivalents à ceux des méthodes visées à la section A ou, dans le cas des particules, toute autre méthode dont L'État membre concerné peut prouver qu'elle présente un rapport constant avec la méthode de référence. Dans ce cas, les résultats obtenus par la méthode doivent être corrigés pour produire des résultats équivalents à ceux qui auraient été obtenus en utilisant la méthode de référence.

La méthode de référence de mesure par gravimétrie consiste en un prélèvement journalier sans contrôle de température puis une pesée au laboratoire après collecte et conditionnement des échantillons. Les résultats moyens journaliers sont disponibles avec un différé supérieur à la semaine.

Avec cette méthode, il est impossible de disposer d'une information en temps réel sur la concentration en particules dans l'air. De ce fait, l'utilisation quotidienne de la méthode manuelle de référence de mesure des PM10 au sein d'un réseau de surveillance de la qualité de l'air ne répond donc pas totalement aux exigences de la directive européenne, qui fait de l'information du public un objectif important avec une mise à jour obligatoire des données au moins quotidiennement.

En France, la technique la plus utilisée actuellement est la mesure par microbalance. De nombreuses associations de surveillance de la qualité de l'air utilisent notamment des analyseurs **TEOM FDMS**, dont l'équivalence avec la méthode de référence a été démontrée.

Le principe de fonctionnement du TEOM FDMS repose sur l'utilisation d'une microbalance. Les particules sont collectées sur un filtre placé sur un système oscillant. La collecte de ces particules va produire une décroissance naturelle de la fréquence d'oscillation du système ; cette décroissance est ensuite convertie en masse.

Le FDMS est un dispositif permettant de mesurer en continu la perte de masse en cours d'échantillonnage du filtre de collection TEOM due à la volatilisation de poussières instables (et notamment du nitrate d'ammonium). Le fonctionnement met en jeu plusieurs étapes :

- Séchage des poussières en amont de la microbalance afin d'éliminer l'eau liée aux particules avant qu'elles ne soient piégées sur le filtre. Ce séchage est effectué au moyen d'une membrane déshydratante type Nafion.
- Mesure de la perte de masse due à la volatilisation de poussières instables : pour effectuer la mesure de perte de masse, l'analyseur arrête cycliquement de collecter les particules. Pendant cet arrêt, la variation de masse du filtre représente la volatilisation des poussières volatiles et semi volatiles présentes sur le filtre TEOM.



Tête de prélèvement



Microbalance

Figure 2 : TEOM avec une tête de prélèvement

Tableau 5 : Caractéristiques techniques du TEOM

Paramètres	TEOM – FDMS
Paramètres mesurés	PM10 PM2,5 (en fonction de la tête de prélèvement)
Gamme d'utilisation	T° de l'air aspiré : -40°C à 60°C T° de l'abri : 8 à 25°C
Gamme de mesure	PM10 ou PM2,5 : 0 à 5000000 µg/m ³
Limite de quantification	PM 2.5 : 5 µg/m ³ PM 10 : 5 µg/m ³
Incertitude (constructeur)	+/- 2 µg/m ³
Résolution	0.1 µg/m ³
Technologie	Gravimétrie (Microbalance)
Energie / Autonomie	Sur secteur uniquement (pas de batterie)
Fréquence échantillonnage	1/4h (Moy. glissante sur 1h de mesure en temps réel)
Stockage des données	Station d'acquisition
Communication	Envoi des données par GSM dans la BDD d'Atmo AuRA
Messages d'alertes sur seuil	OUI
Etalonnage	Tous les 6 mois
Dimensions / Poids	127 x 43,2 x 48,3 (cm) / 34 kilos

2.2. Méthodologie sur l'évaluation des micro-capteurs

L'objectif de cette étude était d'évaluer sur site, le fonctionnement des micro-capteurs e-PM en réalisant des mesures en parallèle entre plusieurs e-PM et des TEOM FDMS sur des stations de typologie différente et pour différentes saisons. Les paramètres étudiés ont été décrits dans le chapitre 1.1.

2.2.1. Sites de mesures

Les sites d'évaluation correspondent à des stations de typologies différentes afin d'évaluer les réponses dans des environnements présentant des gammes de particules variées. De plus pour étudier les réponses au cours de différentes saisons, les micro-capteurs ont été installés en été et en hiver sur des sites de fond urbain. Les micro-capteurs ont été placés en situation terrain sur les terrasses des stations de référence durant les tests et au plus près des têtes de prélèvements des sites fixes.

Fond urbain – Grenoble les Frênes

La station fixe de « Grenoble les Frênes » est située en zone de fond urbain dans un parc au Sud de l'agglomération Grenobloise. Cette station est équipée d'appareils de mesures d'oxydes d'azote (NOx), d'ozone (O₃), de particules en suspension (PM₁₀ et PM_{2,5}), de black carbone (BC), de métaux... Elle caractérise la qualité de l'air en site urbain de fond et les niveaux mesurés sur cette station sont très proches de ceux relevés sur d'autres sites de même typologie dans l'agglomération grenobloise.



Figure 3: Site fixe les Frênes – Fond urbain

Proximité trafic – Rondeau

Le site du Rondeau est en proximité trafic sur l'échangeur du Rondeau au Sud de l'agglomération Grenobloise sur la commune d'Echirolles. Cette station caractérise les niveaux mesurés en proximité de deux axes automobiles importants (A480 et Rocade Sud). Cette station est équipée d'appareil de mesures des NOx et des PM₁₀ & 2.5.



Figure 4: Site fixe Le Rondeau – Proximité trafic

Fond urbain – Lyon centre

La station fixe de « Lyon centre » est située en zone de fond urbain sur le toit d'un immeuble en plein centre de l'agglomération Lyonnaise. Cette station est équipée d'appareil de mesures d'oxydes d'azote (NOx), d'ozone (O₃), de particules en suspension (PM10 et PM2,5), de black carbone (BC), de métaux... Elle caractérise la qualité de l'air en site urbain de fond et les niveaux mesurés sur cette station sont très proches de ceux relevés sur d'autres sites de même typologie dans l'agglomération lyonnaise.

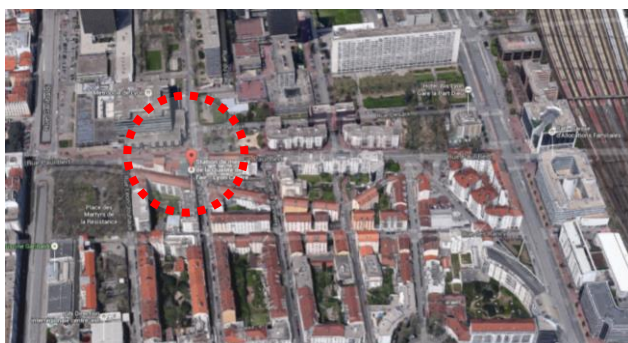


Figure 5: Site fixe Lyon centre – Fond urbain

2.2.2. Echantillonnage temporel

Cette étude visait à évaluer les capteurs au cours d'une année, sur différents sites et durant plusieurs saisons. L'expérimentation s'est découpée en 3 phases

- La première phase concernait la comparaison sur un site urbain de fond (Grenoble - Les Frênes) à l'aide de 3 micro-capteurs e-PM AQ Sense v2.1 : phase préalable
- La deuxième phase concernait un site de proximité automobile (Grenoble - Le Rondeau). Lors de cette phase, 5 micro-capteurs AQ Sense v2.1 ont été déployés ; ces micro-capteurs étaient divisés en deux lots aux configurations différentes (durée et fréquence de mesures) : phase d'évaluation
- La troisième phase concernait la comparaison sur un site urbain de fond (Lyon Centre) à l'aide de 3 micro-capteurs e-PM AQ Sense v2.2 suivant les résultats des précédents tests : phase d'application

Station	Date de début	Date de fin	N° e-PM (temps d'échantillonnage %)
Grenoble les Frênes (urbain de fond)	20/05/2015	30/06/2015	35 (33%), 36 (33%), 38 (33%)
Le Rondeau (proximité trafic)	01/07/2015	07/09/2015	18 (80%), 27 (80%) 35 (33%), 36 (33%), 38 (33%)
Lyon centre (fond urbain)	17/02/2016	20/05/2016	01 (80%), 65 (80%), 81 (80%)

Tableau 6 Calendrier des mesures et micro-capteurs mis en œuvre

3. Résultats

3.1. Echantillonnage temporel

3.1.1. Répartition annuelle des données

La Figure 6 représente les périodes d'installation des capteurs sur plusieurs stations du réseau de surveillance de la qualité de l'air d'Atmo Auvergne – Rhône-Alpes. A noter que pour le site de Lyon Centre, les données ne seront traitées que jusqu'au 20/05/16.

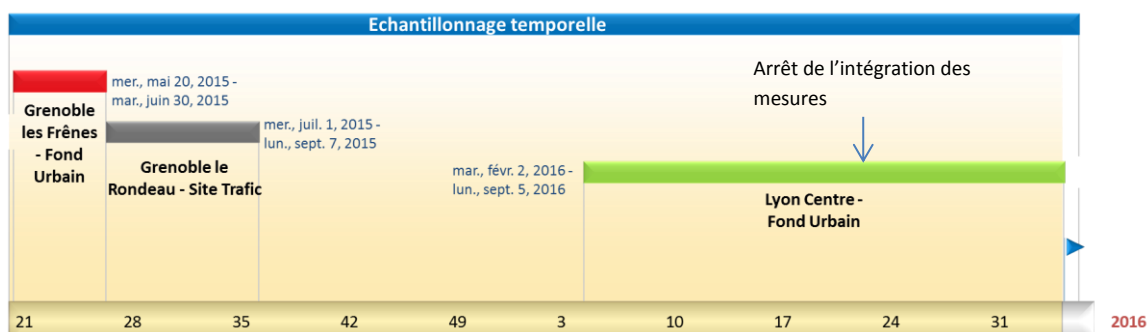


Figure 6 : Echantillonnage temporel

Lieu	Date d'installation	Durée (jours)	Taux de mesures sur l'année (%)
Grenoble les Frênes	Du 20/05/15 au 30/06/15	41	11%
Grenoble le Rondeau	Du 01/07/15 au 07/09/15	68	19%
Lyon Centre	Du 02/02/16 au 20/05/16	93	25%

Cet échantillonnage avait pour but de suivre l'évolution des concentrations en particules au cours des différentes saisons, pour définir les meilleurs cas d'usage et les limites des capteurs.

Il en ressort, que suite aux retours des deux premières phases, des développements ont été lancés pour optimiser les capteurs e-PM, en particulier sur l'aspect aéraulique. De ce fait, la période hivernale a été tronquée pour pouvoir tester directement la version 2.2 des capteurs sur le site de Lyon. Cependant, les conditions climatiques de l'hiver 2015-2016 ont été particulièrement douces. Peu de dépassements ont été enregistrés, durant l'installation des micro-capteurs.

Cet échantillonnage a permis d'utiliser les micro-capteurs sur deux sites de typologie différente, cependant les niveaux de concentrations observées ont été relativement faibles ne permettant pas d'évaluer l'efficacité des capteurs à des niveaux de concentrations élevés.

3.1.2. Taux de fonctionnement et mesures dans la gamme d'utilisation

Le tableau suivant résume le taux de fonctionnement des capteurs pour les trois études :

Lieu	Date d'installation	Taux de fonctionnement (%)
Grenoble les Frênes	Du 20/05/15 au 30/06/15	100 %
Grenoble le Rondeau	Du 01/07/15 au 07/09/15	100 %
Lyon Centre	Du 02/02/16 au 20/05/16	82 %

Le taux de fonctionnement plus faible sur le site de Lyon est induit par des coupures de courant sur la station, qui ont nécessité l'intervention d'une personne d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes pour relancer

le système. Suite à la seconde intervention, aucun autre arrêt n'a été enregistré. Malgré tout, les taux de fonctionnement sont supérieurs à 80%, montrant la robustesse du système.

De la même manière, le tableau ci-dessous donne le pourcentage de dépassement sur les données fines de la gamme de mesures pour les trois sites :

Tableau 7 : Taux de dépassement de la gamme de mesure des capteurs e-PM

Lieu	Date d'installation	Pourcentage de dépassement	
		PM2,5	PM10
Grenoble les Frênes	Du 20/05/15 au 30/06/15	0.03%	0.05%
Grenoble le Rondeau	Du 01/07/15 au 07/09/15	0.15%	0.14%
Lyon Centre	Du 02/02/16 au 20/05/16	0.36%	0.10%

Les mesures des capteurs ont été à plus de 98 % dans leur gamme, aussi bien pour les PM10 que pour les PM2,5

3.1.3. Optimisation des mesures des capteurs

Les essais menés sur le site de Grenoble Les Frênes ont mis en évidence un défaut de reproductibilité des capteurs e-PM. Après diagnostic, Groupe TERA a défini trois axes de travail pour améliorer ce défaut :

- *Point 1 : amélioration du ratio temps de mesure sur périodicité.* Il a été augmenté de 33% à 80%. Une nette diminution du bruit de fond de la mesure des e-PM est observée, permettant de travailler sur l'optimisation du système d'étalonnage. La figure suivante compare les mesures des capteurs à celles du TEOM pour les deux configurations sur une période où les variations sont faibles.

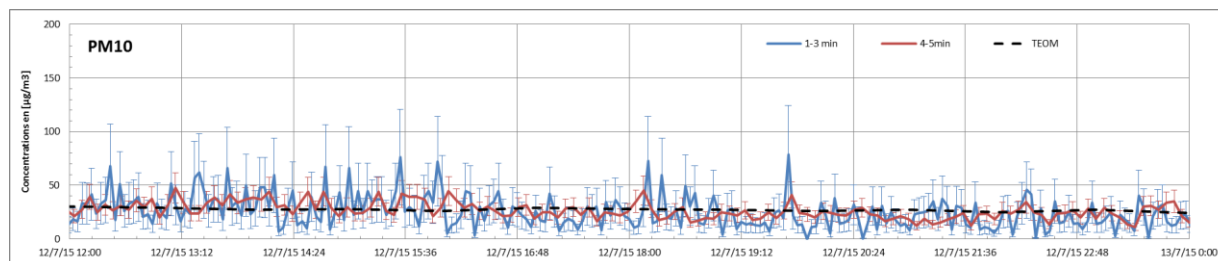


Figure 7 : Comparaison des mesures de capteurs e-PM selon la configuration

Une plus grande variabilité est observable pour la configuration à **33% (1-3 min)** du temps (écart relatif de 58%), par rapport à la configuration à **80% (4-5 min)** du temps (écart relatif de 30%). Pour les PM2,5, les écarts relatifs sont respectivement de 78 % contre 39 %.

Dans la suite du rapport, seuls les résultats de la configuration optimisée (échantillonnage de 80% du temps) seront présentés.

- *Point 2 : Optimisation du système aéraulique du capteur e-PM.*
- *Point 3 : Optimisation du système d'étalonnage*

3.2. Reproductibilité des mesures des capteurs e-PM

3.2.1. Données journalières

Suite à l'optimisation des capteurs, voici les meilleures corrélations obtenues pour les capteurs e-PM installés sur le site de Lyon Centre.

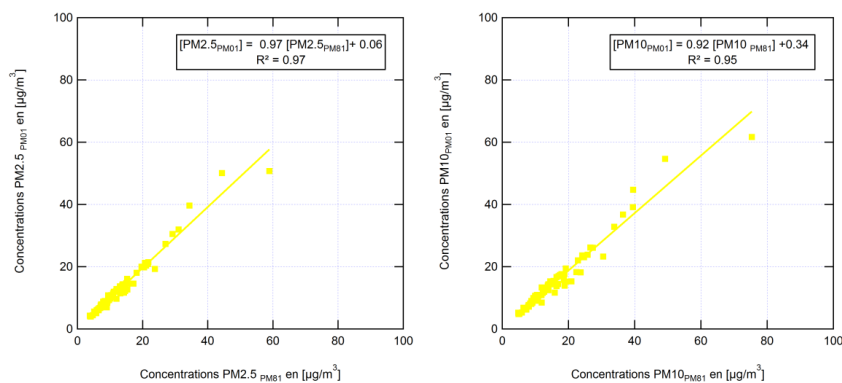


Figure 8 : corrélation des moyennes journalières des capteurs sur le site de Lyon Centre – PM2,5 et PM10

Le Tableau 8 résume les coordonnées des droites de corrélation entre e-PM pour les différentes études :

Tableau 8 : Corrélation sur les données journalières entre les capteurs e-PM

Paramètres mesurés	Paramètres de corrélation	Site Lyon Centre Tps de mesure 80%
PM2,5	Pente	0.96
	Ordonnée à l'origine	0.61
	R²	0.92
PM10	Pente	0.97
	Ordonnée à l'origine	-0.72
	R²	0.93

L'amélioration fluïdique, réalisée pour les essais sur le site de Lyon centre, favorise une meilleure reproductibilité des mesures pour les PM2,5 et pour les PM10 ($R^2 > 0.9$).

3.2.2. Données horaires

La comparaison des mesures des capteurs, sur les moyennes horaires, sont données sur la Figure 9 :

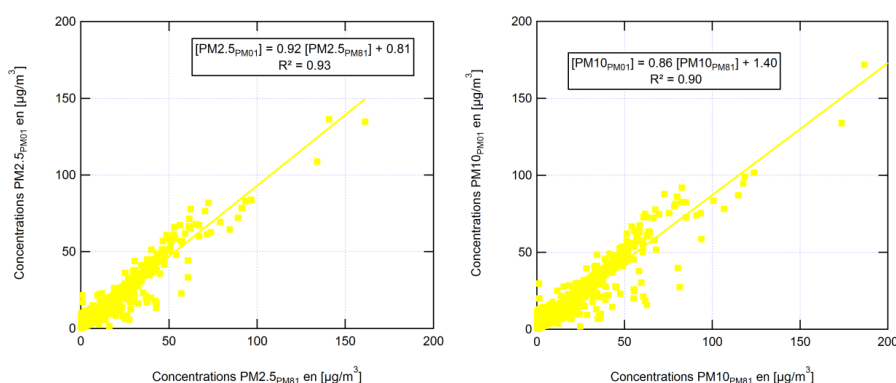


Figure 9 : corrélation des moyennes horaires des capteurs sur le site de Lyon Centre – PM2,5 et PM10

Le tableau suivant synthétise les coefficients de corrélation des capteurs après l'amélioration fluidique :

Tableau 9 : Corrélation sur les données horaires entre les capteurs e-PM

Paramètres mesurés	Paramètres de corrélation	Site Lyon Centre Tps de mesure 80%
PM2,5	Pente	0.91
	Ordonnée à l'origine	0.47
	R²	0.90
PM10	Pente	0.91
	Ordonnée à l'origine	0.84
	R²	0.90

L'étude des corrélations entre les e-PM pour les PM10 et PM2,5 permet de mettre en évidence des réponses reproductibles. Les optimisations apportées aux capteurs ont permis d'améliorer plusieurs aspects de la réponse des capteurs vis-à-vis de :

- *La dispersion des réponses* : des coefficients de corrélation proche de 1 sur la dernière campagne, montrent une bonne corrélation des capteurs ;
- *La reproductibilité des capteurs* : les pentes proches de 1 et les ordonnées à l'origine proches de 0 montrent que les données remontées par les capteurs ont des valeurs similaires sur la gamme étudiée.

Les capteurs montrent une erreur de reproductibilité <20% pour les PM10 et <30% pour les PM2,5 sur la dernière campagne réalisée à Lyon comme spécifié dans les objectifs de l'étude.

3.2.3. Données fines

Aucun parallèle n'est possible sur les données fines car la synchronisation de l'horodatage des capteurs n'est pas réalisable.

3.3. Comparaison avec un analyseur de référence TEOM et ajustement des mesures des micro-capteurs

3.3.1. Site de type trafic

3.3.1.1. Données journalières

La figure suivante présente les corrélations entre les mesures journalières des e-PM avec celles des TEOM pour les PM10 et PM2,5. On peut observer une meilleure reproductibilité de la mesure en PM10 par rapport à celle des PM2,5.

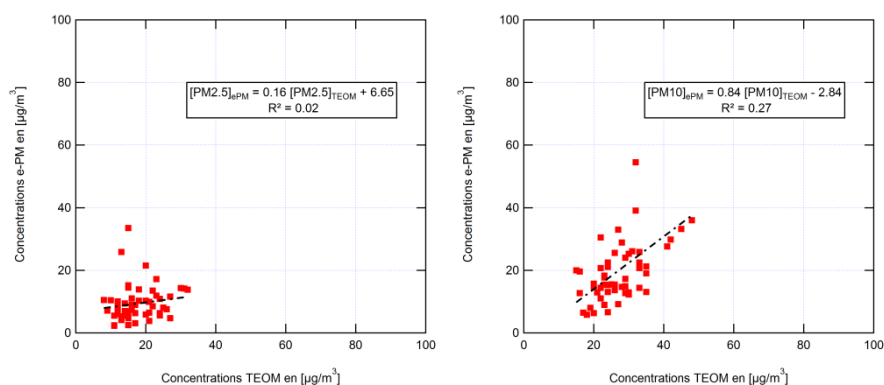


Figure 10 Corrélation des moyennes journalières des capteurs vis-à-vis de celles du TEOM.

Le tableau suivant résume les équations des droites de corrélation en fonction du pas de temps de mesures :

Tableau 10 : corrélation sur les données journalières entre le TEOM et les capteurs e-PM – Zone de proximité trafic

Droite de corrélation	PM2,5	PM10
Pente	0.16	0.84
Ordonnée à l'origine	6.65	-2.84
R²	0.02	0.27

La figure suivante présente les évolutions journalières des mesures des capteurs pour les PM2,5 et les PM10.

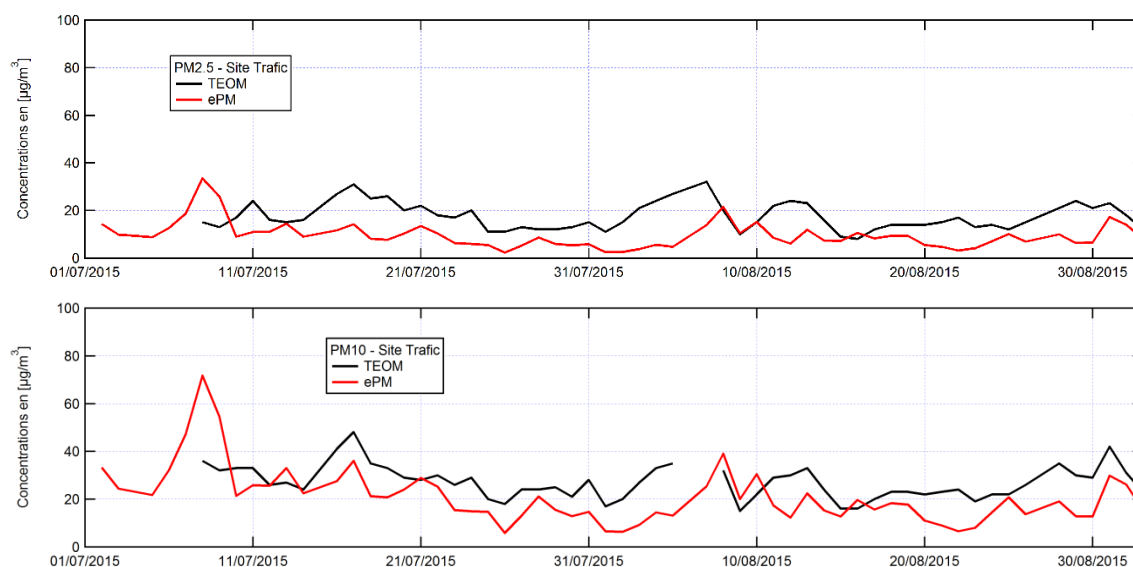


Figure 11 : Evolution journalières des mesures en particules sur le site de Grenoble – Le Rondeau

Comme le montrait les équations des droites de corrélation, les différences sont plus marquées sur les mesures des PM2,5, dû au fait que les capteurs e-PM ne mesurent pas les particules d'un diamètre inférieur à 1 micron. Pour les PM10, cette différence est moins marquée.

3.3.1.2. Données horaires

Les figures suivantes donnent les corrélations des mesures des capteurs vis-à-vis de celles des TEOM.

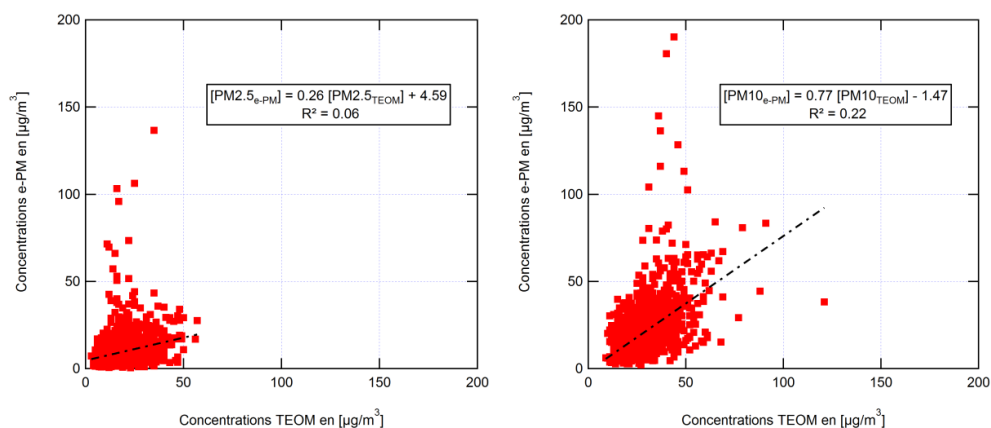


Figure 12 Corrélation des moyennes horaires des capteurs vis-à-vis de celles du TEOM – site trafic.

Le tableau suivant résume les coordonnées des pentes en fonction du pas de temps de mesures :

Tableau 11 : Corrélation sur les données horaires entre le TEOM et les capteurs e-PM – Zone de proximité trafic

Droite de corrélation	PM2,5	PM10
Pente	0.26	0.77
Ordonnée à l'origine	4.59	-1.47
R²	0.06	0.22

La figure suivante donne les variations horaires des concentrations en particules mesurées par les capteurs et le TEOM.

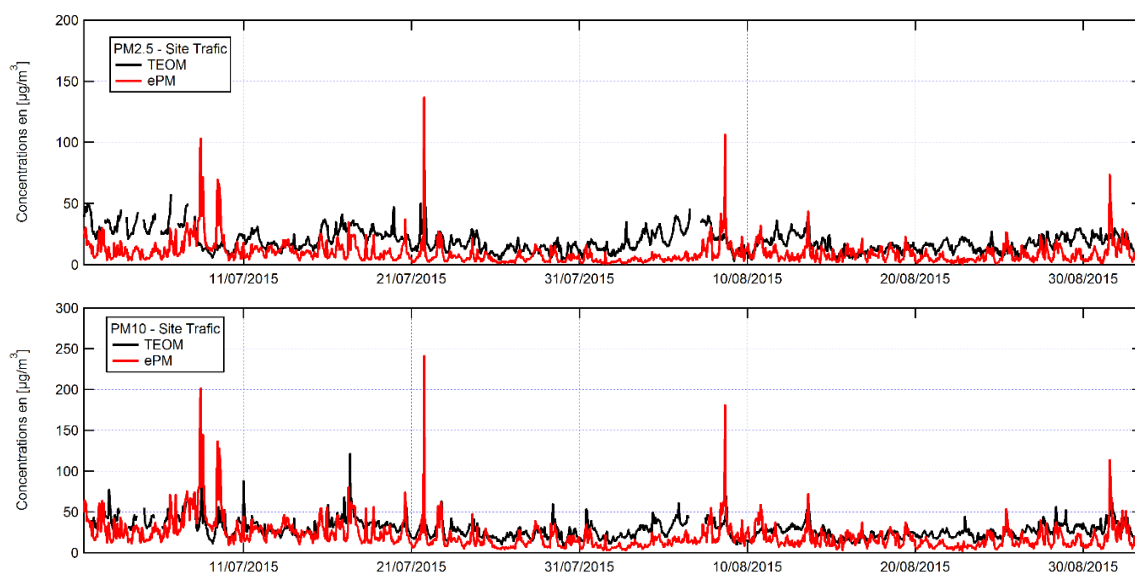


Figure 13 : Evolution horaire des concentrations moyennes en particules pour les capteurs et le TEOM

3.3.1.3. Données fines

Des inter-comparaisons entre les données fines des capteurs e-PM et les mesures du TEOM ne sont pas réalisables car les pas de temps ne correspondent pas.

La figure suivante montre l'évolution des concentrations des capteurs vis-à-vis du TEOM.

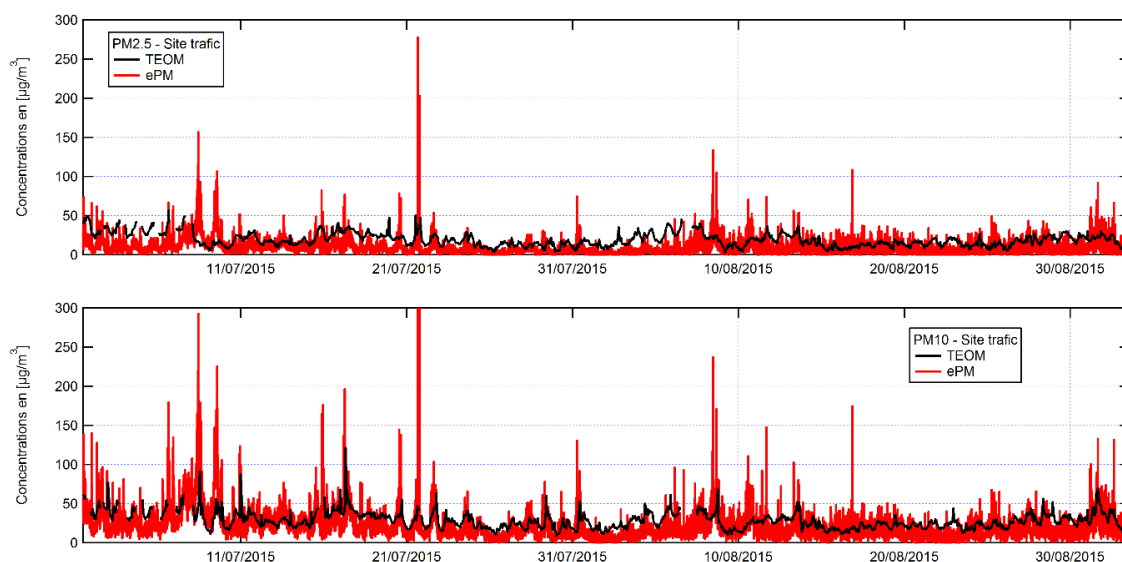


Figure 14 : Evolution fine des concentrations moyennes en particules mesurées par les capteurs versus les données du TEOM

Les données fines des capteurs permettent d'apporter des informations sur un pas de temps inférieur au quart horaire (pas de temps des analyseurs TEOM).

3.3.1.4. Conclusions

Les corrélations horaires et journalières entre le TEOM et les capteurs montrent des résultats similaires. Cependant, ces corrélations montrent que les capteurs e-PM ont une incertitude de mesure plus élevée que les analyseurs TEOM, les coefficients de régression des droites de corrélation sont faibles pour les PM_{2,5} (<0,05) mais acceptable pour les PM₁₀ (~0,3).

Ces différences sont liées aux principes de mesures des appareils comparés. D'un côté, le TEOM est une mesure massique avec une séparation par impaction et de l'autre côté une mesure optique avec ses limitations. Ces essais mettent en avant :

- Que les capteurs e-PM ne **mesurent** que les particules ayant un **diamètre aérodynamique > 1 µm**. Or, une **fraction importante** des particules présentes sur un **site de proximité trafic** est composée de suies. Ces particules ont la particularité d'être très fines et donc difficilement détectées par les capteurs e-PM.
- **L'impact de la chimie des aérosols sur la mesure des capteurs e-PM**. La réponse des capteurs e-PM va varier selon la composition des aérosols présents sur site. Ceci s'explique par le fait que la partie sensible des capteurs n'est pas suffisamment performante pour distinguer la chimie des particules qui passent devant le faisceau. Il n'est pas possible au capteur d'adapter son étalonnage en conséquence. Cette limitation est due au coût de l'instrument qui se veut « lowcost » pour être déployé en nombre et remonter des données en temps réel sous forme de réseau dense.

Un biais est observable entre les mesures des capteurs et celles du TEOM. La figure suivante donne les moyennes de moyennes sur la semaine avec et sans correction pour les PM_{2,5} et les PM₁₀.

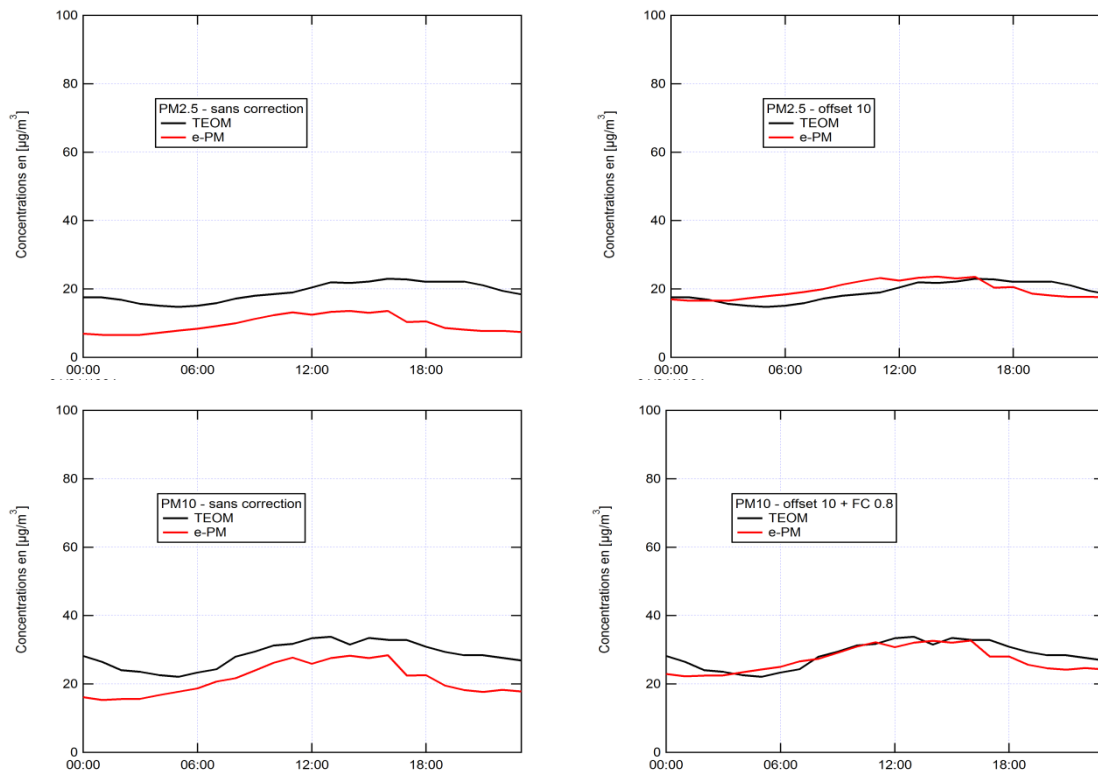


Figure 15 : Moyennes de moyenne avec et sans correction en rouge sur la semaine

Ces graphiques montrent qu'il est nécessaire :

- Pour les **PM2,5**, d'appliquer un **offset de 10 µg/m³**. Ce décalage est dû à la non-détection des particules inférieures à 1µm.
- Pour les **PM10**, d'appliquer un **offset de 10 µg/m³** et un **facteur correctif de 0.8**. Ce facteur est induit par la nature des particules présentant des propriétés optiques différentes par rapport au sable utilisé pour calibrer les capteurs.

Les **profils moyens horaires - journaliers** sont très **concordants** entre **e-PM** et **TEOM**.

3.3.2. Site de fond urbain

3.3.2.1. Données journalières

La figure suivante présente les corrélations entre les mesures journalières des e-PM avec celles des TEOM pour les PM10 et PM2,5.

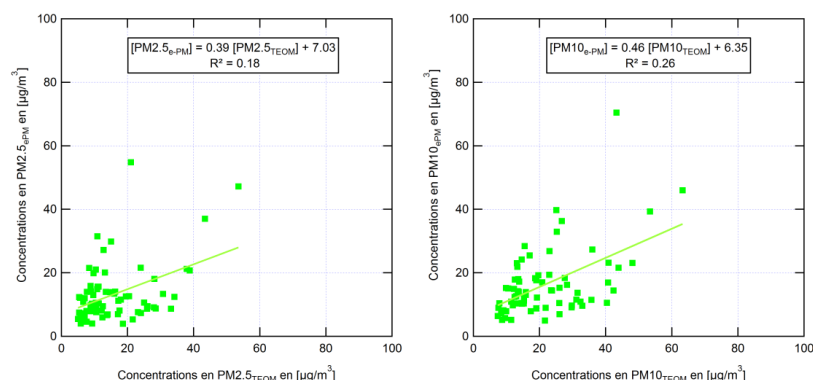


Figure 16 : Corrélation des moyennes horaires des capteurs vis-à-vis de celles du TEOM – site de fond urbain.

Le tableau suivant résume les coordonnées des droites de corrélations obtenues pour le site de fond urbain.

Tableau 12 : Corrélation sur les données horaires entre le TEOM et les capteurs – Zone de fond urbain

Droite de corrélation	PM2,5	PM10
Pente	0.39	0.46
Ordonnée à l'origine	7.03	6.35
R²	0.18	0.26

La variabilité des données des capteurs e-PM par rapport à celles du TEOM est liée à l'influence de la chimie des aérosols sur la réponse des capteurs. La figure suivante montre les évolutions journalières des capteurs et du TEOM.

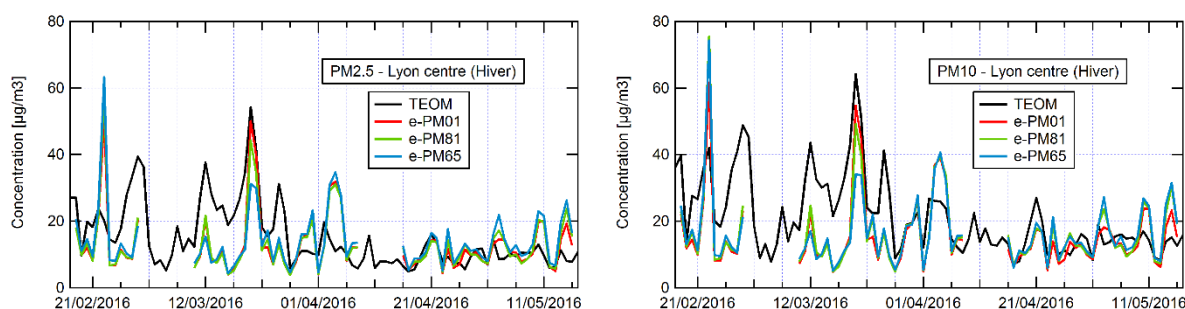


Figure 17 : Variation journalières des concentrations en PM des capteurs et du TEOM

A noter, le pic du 21/02/2016 a également été observé en région PACA.

Un ACMS présent sur le site permettra d'étudier plus précisément ce phénomène, vis-à-vis de la composition chimique de l'aérosol (voir 3.3.2.4).

3.3.2.2. Données horaires

Les graphiques suivants présentent la corrélation des mesures des capteurs à celles des TEOM.

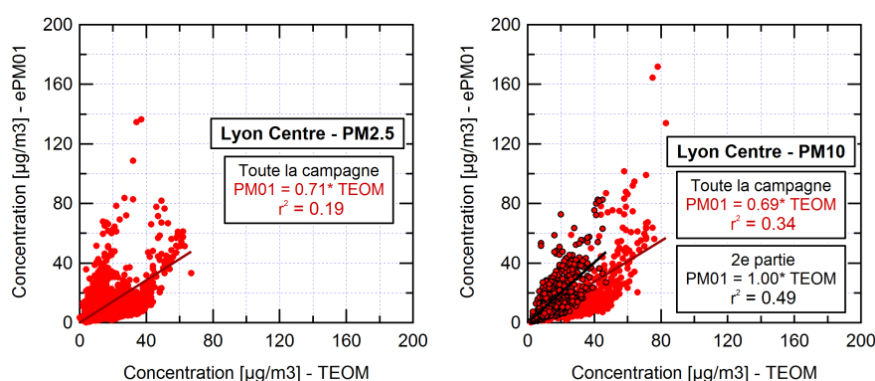


Figure 18 Corrélations horaires entre des e-PM avec les TEOM pour les PM10 et PM2,5 sur le site de Lyon centre

La deuxième partie correspond aux données les plus concordantes entre les micro-capteurs et le TEOM.

L'étude des corrélations entre les e-PM et le TEOM montre clairement les périodes distinctes de décalage et de bonne corrélation qui peuvent être associées aux variations de la composition chimique des aérosols fournissant des réponses optiques plus ou moins influencées. Le tableau suivant résume les coordonnées des droites obtenues sur le site de fond urbain.

Tableau 13 : Corrélation sur les données horaires entre le TEOM et les capteurs – Site de fond urbain

Droite de corrélation	PM2,5	PM10	
		Toute la campagne	2 ^e partie
Pente	0.71	0.69	1.0
R ²	0.19	0.34	0.49

Les graphiques suivants illustrent les variations des concentrations horaires de PM10 et de PM2,5 (Figure 19) sur le site de Lyon Centre

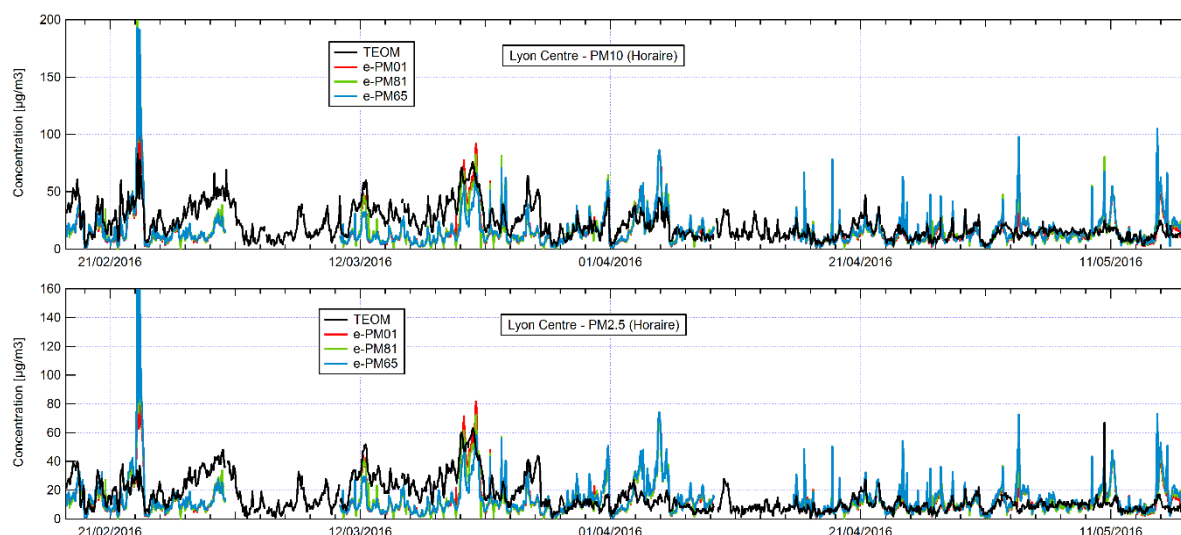


Figure 19 Variation des concentrations horaires de PM10 et PM2,5 sur le site de Lyon centre

L'étude des évolutions des concentrations horaires des PM10 et PM2,5 pour les e-PM et TEOM-FDMS montre comme pour les évolutions journalières des périodes de fort décalage et d'autres de bonne co-évolution.

3.3.2.3. Données fines

Les micro-capteurs ont échantillonné suivant la configuration définie lors des précédentes études. Cette configuration permet d'avoir un suivi des concentrations sur des pas de temps fin (5min).

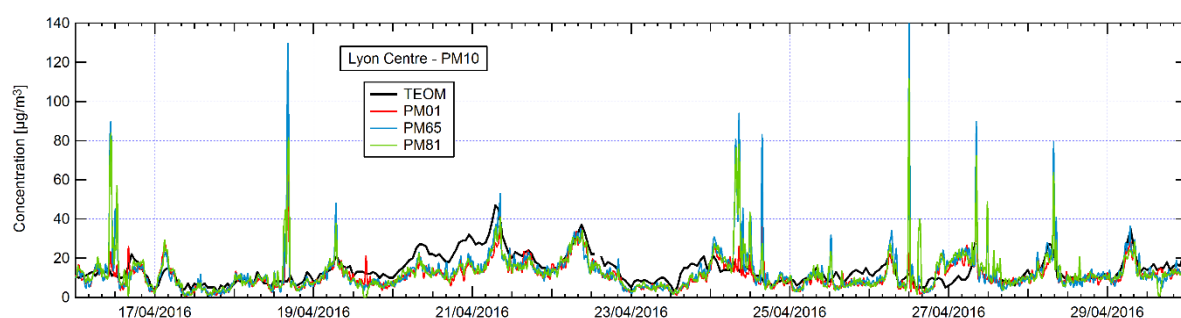


Figure 20 Evolution des concentrations en PM10 et PM2,5 sur le site de Lyon centre pour des pas de temps fins et du TEOM en moyenne horaire.

La Figure 20 montre, sur un zoom d'une période de la campagne, que des évolutions fines des e-PM permettent d'étudier avec plus de précision des sites avec des variations de concentrations rapide.

Des pics importants non détectés par les TEOM pourraient être liés à la mesure d'aérosols aux propriétés optiques très spécifiques.

3.3.2.4. Etude de la composition des aérosols

Afin d'essayer de mieux comprendre ces différences, les e-PM avaient été placés sur le site de Lyon centre pour comparer les mesures des capteurs à un analyseur temps réel de chimie de particules pour les PM1 grâce à un ACMS. Bien que les e-PM ne mesurent pas les particules de taille inférieure à 1µm, cette pré-étude permet de donner quelques tendances.

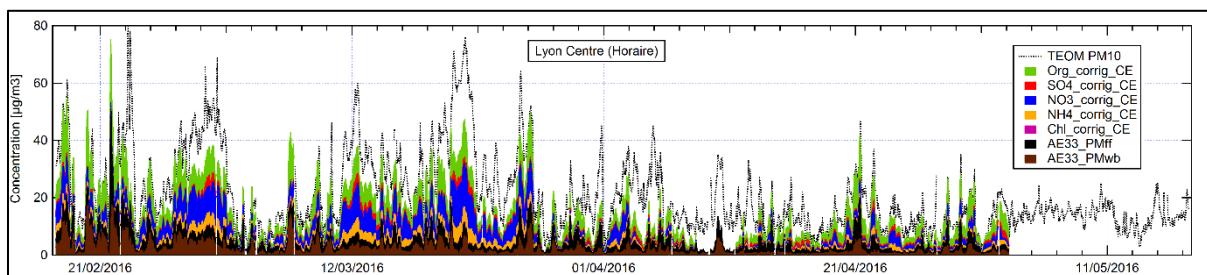


Figure 21 Variation des concentrations horaires de PM10 et de la chimie des particules (PM1) sur le site de Lyon centre

La Figure 21 montre l'évolution des fractions de chacun des composés chimiques. Ces données permettent d'identifier les écarts de mesure entre TEOM et e-PM, en fonction de la nature des particules. Cependant, il n'est pas possible de tirer des conclusions sur l'influence d'un aérosol en particulier.

3.3.2.5. Conclusions

Les corrélations horaires et journalières entre le TEOM et les capteurs montrent que les capteurs e-PM ont une incertitude de mesure plus élevée que les analyseurs TEOM. Cependant la variabilité des capteurs est moins importante que sur le site de proximité trafic ($R^2 < 0.1$ sur site trafic contre 0.2 sur site fond urbain pour PM2,5 et $R^2 < 0.3$ sur site trafic contre > 0.3 sur site fond urbain pour les PM10). Ces améliorations sont dues à l'optimisation fluidique des capteurs et à la typologie du site, où les variations sont plus faibles.

Ces essais mettent encore en avant certaines limitations des micro-capteurs e-PM :

- Les capteurs e-PM ne **mesurent** que les particules ayant un **diamètre aérodynamique > 1 µm**. Lors des essais, la réponse des capteurs e-PM chute lorsque la fraction en PM1 augmente, alors que la mesure du TEOM reste stable, comme pour la période du 12/03 au 20/03 pour laquelle on distingue, grâce à l'ACMS, une augmentation de la proportion de PM1.
- L'impact de la chimie des aérosols sur la mesure des capteurs e-PM. La réponse des capteurs e-PM va varier selon la composition des aérosols présents sur site. Ceci s'explique par le fait que la partie sensible des capteurs n'est pas suffisamment performante pour distinguer la chimie des particules qui passent devant le faisceau et adapter son étalonnage en conséquence. Cette limitation est due au coût de l'instrument qui se veut « lowcost » pour être déployé en nombre et remonter des données en temps réel sous forme de réseau dense.

Pour garder les atouts de la technologie e-PM tout en diminuant les limitations, des traitements de données supplémentaires peuvent être apportés et sont présentées dans le chapitre 3.4.

3.4. Ajustement des micro-capteurs par rapport au TEOM

La réponse des e-PM est influencée par des aérosols chimiquement variables et un offset est visible lorsque la fraction PM1 est importante. Pour pouvoir utiliser au mieux les avantages de ces µcapteurs, plusieurs solutions peuvent être envisagées pour diminuer l'influence de ces paramètres.

3.4.1. Facteur correctif

Afin de faire correspondre au mieux les données des capteurs aux mesures des TEOM, il a été possible de déterminer des facteurs correctifs à appliquer sur les mesures des capteurs e-PM.

Pour le site de trafic, la Figure 15 présente les valeurs corrigées pour les PM2,5 et les PM10. Il est nécessaire pour les PM2,5 d'appliquer un offset de 10 µg/m³ et pour les PM10, un facteur correctif de 0.8 et un offset de 10 µg/m³.

Ces correctifs sont nécessaires compte tenu de la taille des particules (présence importante de particules de moins de 1 micron) et de la nature chimique des particules de suies.

Pour le site de fond urbain, les corrections sont plus difficiles à appliquer du fait de sources variées. Il sera nécessaire de continuer les études sur d'autres sites pour appliquer les correctifs les plus adaptés.

3.4.2. Z-score (utilisé par AirPACA)

Le Z-score est une fonction permettant d'écarter les couples de données e-PM/TEOM non satisfaisant.

La formule est la suivante : $Z_{score} = \frac{\text{Valeur ePM} - \text{Valeur réf}}{U \text{ réf}}$

où Valeur e-PM : concentration mesurée par le capteur ; Valeur Réf : concentration mesurée par le TEOM le plus proche situé sur un site comparable et U Réf : incertitude liée à la mesure de référence, soit 25% pour le TEOM.

Les valeurs ayant un Z_{score} supérieur à 3 sont écartées et les autres sont utilisées pour l'exploitation.

Pour le site de fond urbain de Lyon Centre, pour les moyennes journalières, l'ensemble des Z_{score} est inférieur à 2, l'ensemble des valeurs est utilisable.

Pour les données horaires, le tableau suivant résume les Z_{score} obtenus.

Tableau 14 : fraction de Z_{score} dans la catégorie définie

	PM2,5	PM10
Z _{score} < 2	73 %	72 %
2 < Z _{score} < 3	19 %	20 %
3 < Z _{score}	8 %	7 %

Cette étude des Z_{score} montre que plus de 70% des valeurs des e-PM sont utilisables sans traitement supplémentaire, que 20% sont exploitables sous conditions et que seulement moins de 10% sont inutilisables sans correctif.

4. Conclusions

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes et le Groupe TERA ont réalisé des mesures en parallèle entre des micro-capteurs e-PM d'EcoLogicsense et les TEOM-FDMS du réseau de surveillance afin d'évaluer leur fonctionnement. Pendant plusieurs semaines, ces parallèles ont été réalisés successivement en été sur les sites de Grenoble les Frênes (urbain de fond) et du Rondeau (Proximité trafic) et en hiver sur le site de Lyon centre (urbain de fond). Le but était de déterminer les conditions d'utilisation et de déploiement de ces micro-capteurs pour potentiellement compléter le réseau de mesure réglementaire des réseaux de surveillance de la qualité de l'air.

Suite aux essais réalisés sur les différentes typologies de site, plusieurs limitations ont été observées sur la mesure des capteurs.

- **Influence des aérosols sur la mesure des capteurs** : ce point est prioritaire et est la source de la majorité de l'incertitude de mesure des capteurs. Une pré-étude a été mise en place sur le site de Lyon à l'aide d'un ACMS, néanmoins les conclusions sont limitées du fait que les mesures de cet instrument concernent uniquement la fraction PM1 non détectable par les e-PM. Des études plus poussées avec des analyseurs de black carbon ou d'autres instruments seraient pertinentes pour affiner la méthode de calcul des PM intégrée dans les capteurs e-PM.
- **Offset de la mesure des micro-capteurs pour les sites ayant des fractions en PM1 importantes**
Cet offset a notamment été remarqué sur le site de proximité automobile.

Cette étude a permis de mettre en évidence les points forts des capteurs e-PM pour atteindre les objectifs :

- **Les capteurs e-PM ont une gamme de mesure adaptée au cas d'usage**, aucune donnée horaire n'a dépassé les 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pendant la période de mesure. Il faudra néanmoins faire des essais complémentaires dans des périodes moins clémentes d'un point de vue de la pollution atmosphérique pour étudier plus précisément le haut de la gamme de mesure des capteurs.
- **L'erreur de reproductibilité des capteurs e-PM de la version 2.2 est inférieure à l'objectif de 20% pour les PM10 et 30% pour les PM2,5**. Cela permet une interprétation plus simple des données quand les capteurs sont déployés sur de vastes réseaux.
- **Les micro-capteurs e-PM ont été robustes** et n'ont pas montré de panne sur le terrain durant la période de l'étude.
- **L'étude des Z_{score} sur le site de Lyon Centre** montre que **moins de 10% des données** sont inexploitable (suivant ce critère statistique) sans traitement supplémentaire.
- Les mesures des capteurs sont influencées par la nature et la taille des aérosols. **Un traitement de données par rapport à un instrument de référence est nécessaire pour exploiter au mieux les données des capteurs e-PM pour la surveillance de l'air ambiant.** Dans d'autres cas d'usages, comme la surveillance de la qualité de l'air intérieur ou la surveillance de sites avec un aérosol dominant, l'impact est plus faible (un facteur de réponse correspondant à l'aérosol majoritaire peut être déterminé).

L'accès aux données via le Cloud TERA permet de disposer des données simplement et facilement. Pour rendre l'interface plus adaptée aux traitements des données par les AASQA, il serait nécessaire :

- De spécifier le format de l'heure exportée ;
- De disposer d'un système de récupération automatique des données.

Pour le groupe TERA, la réalisation de ce genre de campagne d'intercomparaison participe au processus d'évaluation en conditions réelles de ses micro-capteurs et à l'optimisation des configurations des micro-capteurs.

Cette intercomparaison a permis à Atmo Auvergne-Rhône-Alpes de définir certaines modalités d'usage au sein d'une AASQA. Il a notamment été mis en évidence que l'utilisation des micro-capteurs pour densifier les réseaux de mesures doit toujours être réalisée avec le maintien systématique d'un ou plusieurs parallèles entre micro-capteurs et appareils de référence.

5. Perspectives de recherche

A l'issue de cette étape d'évaluation des capteurs e-PM, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes va déployer une vingtaine de capteurs e-PM afin de **densifier le réseau de mesures des particules** dans l'agglomération lyonnaise. Conformément aux conclusions de l'évaluation, ce déploiement devra respecter plusieurs phases :

- **Avant la campagne (1 semaine)** : Réalisation d'une intercomparaison de tous les e-PM sur une période minimale d'une semaine sur un site équipé d'un analyseur de référence (TEOM FDMS). Cette étape vise à valider la reproductibilité initiale du lot de micro-capteurs.
- **Pendant la campagne (1 an)** : Déploiement d'une vingtaine d'e-PM avec le maintien d'une intercomparaison entre e-PM et TEOM sur deux sites de typologies différentes et équipés de TEOM.
- **Au bout de 6 mois et après la campagne (1 semaine)** : Réalisation d'une intercomparaison de tous les e-PM sur une période minimale d'une semaine sur un site équipé d'un analyseur de référence (TEOM FDMS). Cette étape vise à vérifier la reproductibilité des e-PM et d'évaluer l'impact de l'encrassement de micro-capteurs (notamment ceux utilisés en proximité automobile).

Afin de s'affranchir de la limite de détection (1 micron) qui induit une sous-estimation en proximité automobile, les sites choisis dans le cadre de ce déploiement à Lyon concernent essentiellement des **sites urbains de fond**.

L'objectif final de ce déploiement est d'intégrer les données des micro-capteurs **dans la chaîne de modélisation mise en œuvre sur l'agglomération lyonnaise**.

La figure suivante illustre le plan d'échantillonnage de ce déploiement dans l'agglomération lyonnaise. Les micro-capteurs seront déployés dans chaque maille (points bleus).



Figure 22 : Quadrillage de l'agglomération lyonnaise pour le déploiement des micro-capteurs

Pour réaliser les corrections des capteurs e-PM, il est nécessaire de déployer des capteurs sur des stations de référence. Cela permettra de corréler les données des micro-capteurs à celles des TEOM, pour établir le facteur correctif à appliquer.

Ces facteurs seront ensuite appliqués en temps réel à l'aide d'une application, ou toutes les 24 heures pour corriger les données des capteurs présents dans le périmètre d'études.

Un projet devra être lancé pour vérifier la faisabilité et la pertinence de ce type de correction à plus grande échelle. Néanmoins, ce traitement est limité à des sites où les évolutions de la chimie des particules et des concentrations sont lentes (supérieures ou égales à une heure) et homogène sur des territoires étendus. De ce fait, cet applicatif ne sera pas utilisable sur des stations de proximité trafic.

Pour les sites de proximité trafic, l'influence des particules inférieures à 1 micron doit être prise en compte. Une étude plus longue sur cette typologie de station comprenant la période hivernale permettrait d'affiner le facteur correctif global à appliquer aux capteurs e-PM afin de se rapprocher au plus des données des TEOM.