

Qualité de l'air

PROVENCE - ALPES - CÔTE D'AZUR

## Exposition des populations à la pollution particulaire

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

*Phase de validation*

[www.airpaca.org](http://www.airpaca.org)

**AirPACA**  
QUALITÉ DE L'AIR

## Sommaire

Contexte .....	3
Objectifs .....	3
Collaboration .....	4
Réalisations et résultats du projet .....	5
<i>Equivalence des micro-capteurs</i> .....	5
1. Description des essais .....	5
2. PM10 : Traitement des données et principaux résultats.....	9
3. PM2,5 : Traitement des données et principaux résultats.....	20
<i>Reproductibilité des micro-capteurs</i> .....	30
1. Description des essais .....	30
2. Traitement des données.....	30
Conclusion .....	36
Perspectives : Suite du projet .....	37
Annexe 1 .....	38
Annexe 2 .....	40
Liste des illustrations .....	42
Glossaire.....	45

## Contexte

Air PACA 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 (PACA).

A ce titre, Air PACA dispose de moyens de mesure et de modélisation des différents polluants réglementés : SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>, BTX, HAP, métaux lourds et particules en suspension (PM).

Pour les particules en suspension, Air PACA mène des actions et met en œuvre des moyens spécifiques dans le but d'améliorer la connaissance de ce polluant pour ce qui est :

- Des niveaux de concentrations<sup>1</sup>,
- De la composition chimique<sup>2</sup>,
- De la granulométrie<sup>3</sup>,
- **De la répartition spatiale pour mieux appréhender l'exposition des populations<sup>4</sup>.**

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 supérieures 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,**

Pour ce qui est des concentrations des PM, Air PACA dispose, grâce à ses plateformes de modélisation, des outils opérationnels pour : **Cartographier les concentrations des PM.**

Ces cartographies, produites par la modélisation, doivent être ajustées par des données de mesures. Leur précision et leur cohérence spatiale dépendent fortement du nombre et de l'incertitude des mesures disponibles pour réaliser cet ajustement.

Le projet propose de mener des investigations, 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 particulaires dans l'air ambiant.

La facilité d'implantation et le coût des micro-capteurs communicants et autonomes sont les atouts mis en avant 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.

## 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**



<sup>1</sup> SCENARII, Air PACA 2011- 2013

<sup>2</sup> SPECIATION PM, Air PACA 2012 - 2014

<sup>3</sup> SIGNATURE PM, Air PACA 2013 - 2014

<sup>4</sup> EXPOP, Air PACA 2014

## 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.***

Pour cela, trois 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 PACA

- 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 PM.



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



## Réalisations et résultats du projet

### Phase préalable : Validation métrologique des micro-capteurs

La validation métrologique des micro-capteurs est réalisée par comparaison à la méthode de référence : **la gravimétrie**. Il s'agit d'une méthode normalisée décrite dans la norme européenne NF EN 12341<sup>5</sup> en vigueur.

Le traitement de données de comparaison est réalisé avec l'outil proposé par le RIVM et recommandé par la Commission européenne<sup>6</sup>.

Les étapes de traitement et les critères d'acceptation sont documentés dans la norme CEN/TS 16450 de juillet 2013<sup>7</sup>.

Les essais métrologiques réalisés au cours de cette phase :

- sont menés durant une période significative afin de prendre en compte les différentes saisonnalités,
- sont réalisés dans les conditions d'utilisation : à proximité immédiate d'une station de mesure Air PACA,
- permettent d'évaluer :
  - L'équivalence : justesse des micro-capteurs par rapport à la méthode de référence et incertitude
  - La reproductibilité : dispersion entre différents prototypes du même micro-capteur.

### Equivalence des Micro-capteurs

Il s'agit de comparer les mesures obtenues à l'aide des micro-capteurs par rapport à celles de référence, c'est-à-dire réalisées par **la gravimétrie**.

#### 1. Description des essais

Les tests d'équivalence se sont déroulés en deux phases : une phase estivale, du 28 août au 14 octobre 2015 et une phase hivernale, du 10 février au 15 mars 2016.

Durant chaque phase, trois micro-capteurs PM ont été positionnés sur la station de mesure d'Aix en Provence – Ecole d'Art.

---

<sup>5</sup> NF EN 12341 Juin 2014 : Air ambiant - Méthode normalisée de mesurage gravimétrique pour la détermination de la concentration massique MP10 ou MP2,5 de matière particulaire en suspension

<sup>6</sup> Disponibles sur le site: <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/legislation/assessment.htm>

<sup>7</sup> XP CEN/TS 16450 : 3 Juillet 2013. Indice de classement : X 43-021

Air ambiant — Systèmes automatisés de mesurage de la concentration de matière particulaire (PM10, PM2,5)



Photo 1 : Micro-capteur, fixé à l'intérieur du boîtier blanc (homesense), équipé de son panneau solaire

En parallèle, des prélèvements sur filtres, destinés à être peser au laboratoire de gravimétrie ont été réalisées sur ces mêmes périodes à l'aide du préleveur séquentiel LECKEL.



Photo 2 : Préleveur Leckel 47/50-CD

Une fois les prélèvements réalisés, les filtres sont envoyés au laboratoire de gravimétrie d'Air PACA.



Photo 3 : Vue d'ensemble du laboratoire de gravimétrie d'Air PACA

Le laboratoire de gravimétrie, établi sur le site d'Air PACA de Martigues, respecte les spécifications de la norme EN 12341.

Le laboratoire de gravimétrie est équipé d'une armoire climatique spécifique permettant de maîtriser les conditions ambiantes et le flux d'air.

Les conditions obtenues sont :

- Une hygrométrie comprise entre 45 % HR et 50 % HR,
- Une température comprise entre 20 °C et 21 °C.

Ces paramètres sont mesurés et enregistrés en continu à deux endroits critiques du laboratoire :

- Une sonde de mesure est installée au niveau de la table de pesée,
- Une autre est installée à proximité de la zone d'exposition des filtres avant leurs pesées.

Ces deux sondes sont reliées à un indicateur équipé d'un avertisseur sonore et visuel qui se déclenche en cas de non-respect des critères normatifs fixés sur les conditions ambiantes.

Le suivi des conditions du laboratoire est par ailleurs assuré par la pesée régulière de « filtres témoins » exposés en permanence dans le laboratoire. Une variation de leur masse non conforme aux critères normatifs interrompt la réalisation des pesées.

La norme Européenne EN 12341 impose une résolution de la balance inférieure ou égale à 10 µg. La balance utilisée par le laboratoire de gravimétrie d'Air PACA garantit une résolution d'1 µg.



Photo 4 : Balances de précision utilisées dans le laboratoire de gravimétrie

La balance est équipée d'un kit de pesée spécifique. Il permet l'utilisation des filtres de diamètre compris entre 30 à 70 mm.

La méthode de référence impose 4 pesées du filtre pour déterminer la masse prélevée sur ce dernier :

- Pesées du filtre avant prélèvement :  
Après un conditionnement dans le laboratoire de gravimétrie d'au moins 48 h, deux pesées séparées d'au moins 12 h sont réalisées. La masse du filtre ne doit pas varier de plus de 40  $\mu\text{g}$  entre les deux pesées pour pouvoir être validée. Ces pesées permettent de déterminer la masse du filtre vierge.
- Pesées du filtre après prélèvement :  
Après un conditionnement dans le laboratoire de gravimétrie d'au moins 48 h, deux pesées séparées d'au moins 24 h sont réalisées. La masse du filtre ne doit pas varier de plus de 60  $\mu\text{g}$  entre les deux pesées pour pouvoir être validée. Ces pesées permettent de déterminer la masse du filtre prélevé.

La quantité de matière prélevée est obtenue par différence entre la masse du filtre prélevé et la masse du filtre vierge.

Les micro-capteurs, quant à eux, sont équipés d'une carte SIM et remontent des données en temps réel vers un serveur FTP.

Deux méthodes d'échantillonnage ont été testées au cours de ces tests de validation :

- Durant la phase estivale, le temps de mesure des micro-capteurs était d'une minute toutes les dix minutes.
- Durant la phase hivernale, le temps de mesure des micro-capteurs était de quatre minutes toutes les 10 minutes.

Enfin, l'analyseur automatique de particules qui équipe la station d'Aix en Provence – Ecole d'Art constitue l'élément de référence pour les comparaisons en PM<sub>2,5</sub> ainsi que pour les comparaisons horaires. La gravimétrie ne donnant qu'une valeur journalière en PM<sub>10</sub>.

Pour plus de lisibilité et de clarté, le choix a été de séparer les graphes pour chaque phase (estivale et hivernale), pour chaque polluant (PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub>) ainsi qu'en fonction du pas de temps considéré (journalier ou horaire).

## 2. PM<sub>10</sub> : Traitement des données et principaux résultats

Un premier regard sur les séries des données brutes dans le temps (séries chronologiques) nous permet d'identifier quelques « décrochages » des mesures des micro-capteurs par rapport à celles de la référence.

A noter : Chaque micro-capteur dispose d'un numéro d'identifiant, permettant de les différencier.

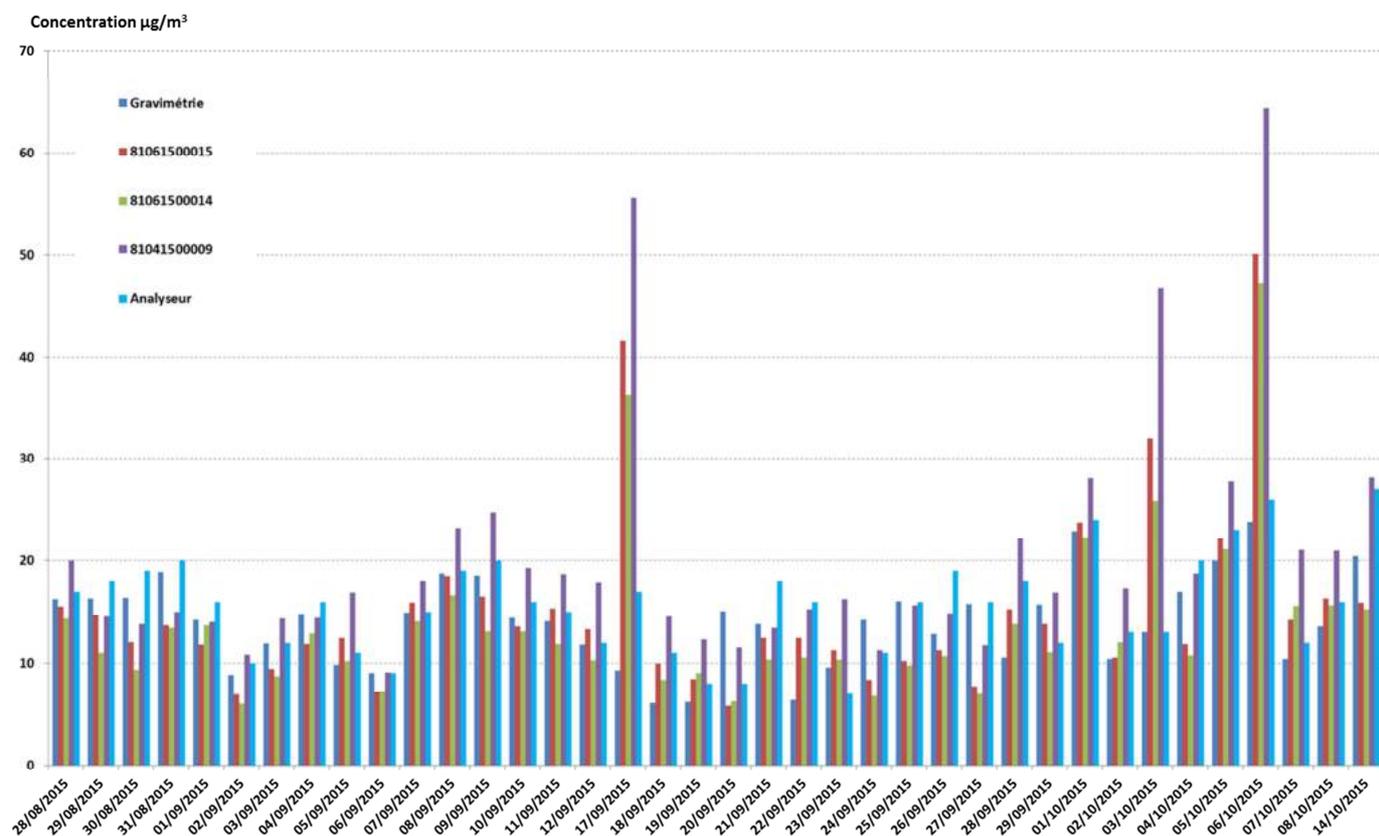


Figure 1 : Série chronologique brute des concentrations journalières en PM<sub>10</sub> - période estivale

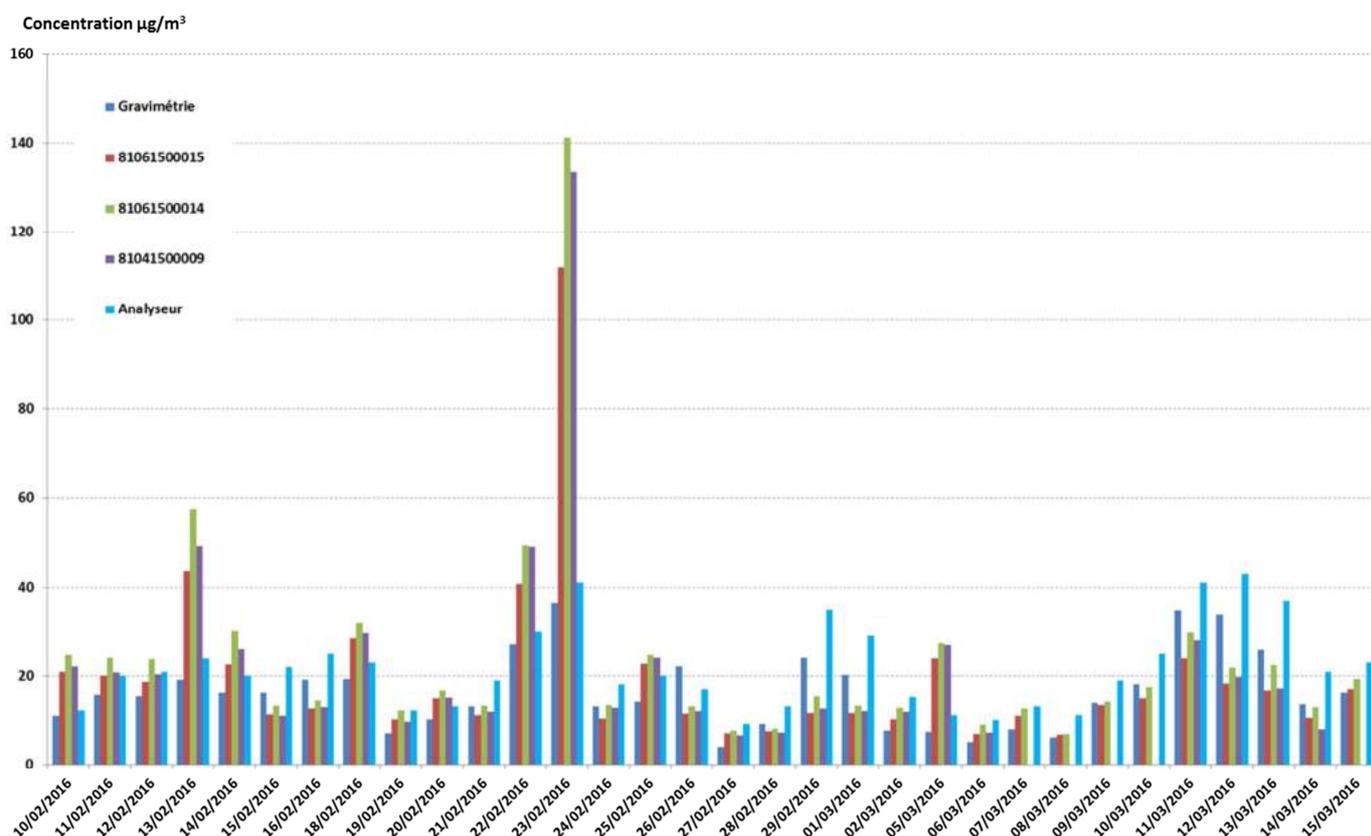


Figure 2 : Série chronologique brute des concentrations journalières en PM10 – période hivernale

Dans l'ensemble, on observe que les concentrations journalières en PM10 relevées par l'intermédiaire des micro-capteurs suivent relativement bien les niveaux obtenus par gravimétrie. Ponctuellement, en hiver comme en été, on observe un « décrochage » des mesures des micro-capteurs par rapport à celles de la référence. Les raisons de ces décrochages ne sont pas encore clairement identifiées.

Cependant, nous savons que la présence de sel marin couplée à une forte humidité peut-être la cause d'une surestimation des niveaux des micro-capteurs par rapport à la référence. Lorsque l'on observe une sous-estimation des micro-capteurs, on suppose fortement que c'est la nature chimique de la particule qui en est responsable.

Ces constats sont classiquement observés lorsqu'on utilise une technique optique pour la mesure de PM ; ce qui est le cas des micro-capteurs.

Il faut savoir également que le micro-capteur « 081041500009 » surévaluait les niveaux mesurés durant la période estivale. Ce défaut du micro-capteur a été corrigé par EcologicSense avant le début de la phase hivernale.

Nous avons alors utilisé un paramètre statistique, le Z-Score<sup>8</sup>, afin d'identifier, de manière mathématique, les écarts significatifs des données des micro-capteurs par rapport à la référence.

<sup>8</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Standard\\_score](https://en.wikipedia.org/wiki/Standard_score)

Cet estimateur se présente comme suit :

Estimateur	Z-score
<b>Formule</b>	$\frac{\text{Valeur } \mu_{\text{capteur}} - \text{Valeur Réf}}{U \text{ Réf}}$
<b>Critère</b>	<p>0 à 2 : Satisfaisant            2 à 3 : Discutable            &gt;3 : Non satisfaisant</p>

Tableau 1 : Description du paramètre statistique (Z-Score)

- Valeur  $\mu_{\text{capteur}}$  : La concentration mesurée par le micro-capteur,
- Valeur Réf : La concentration mesurée par la méthode de référence,
- U Réf : L'incertitude type liée à la mesure de référence (15 % pour la gravimétrie, 25 % pour l'analyseur automatique)

Les résultats du calcul du Z-Score sur les données journalières en PM10 sont les suivants :

	081061500015	081061500014	081041500009
<b><u>Zscore</u> ≤ 2</b>	<b>74 %</b>	<b>74 %</b>	<b>66 %</b>
<b>2 &lt; <u>Zscore</u> ≤ 3</b>	<b>13 %</b>	<b>10 %</b>	<b>18 %</b>
<b><u>Zscore</u> &gt; 3</b>	<b>13 %</b>	<b>16 %</b>	<b>15 %</b>

Tableau 2 : Résultats (en pourcentage) de l'application du Z-Score sur les données journalières PM10 des micro-capteurs – Période d'équivalence

A noter : ≈ 70 données journalières ont été prises en compte pour les calculs du Z-Score

Au regard des résultats, on constate que près de 75 % de notre jeu de données (horaire et journalier) est accepté par le Z-Score (Z-score ≤ 2).

La surestimation des niveaux mesurés par le micro-capteur « 081041500009 » induit des résultats du Z-Score en-deçà de ce qui est observé pour les autres capteurs.

Nous avons choisi d'avoir un critère d'acceptation moins contraignant sur les écarts « Micro-capteurs – Référence » lorsque ceux-ci étaient observés pour de faibles concentrations. C'est ici le cas de plus de 90 % des couples induisant un Z-score compris entre 2 et 3.

Voici donc les séries de concentrations journalières en PM10 pour lesquelles les couples jugés discordants par le calcul du Z-Score ont été écartés.

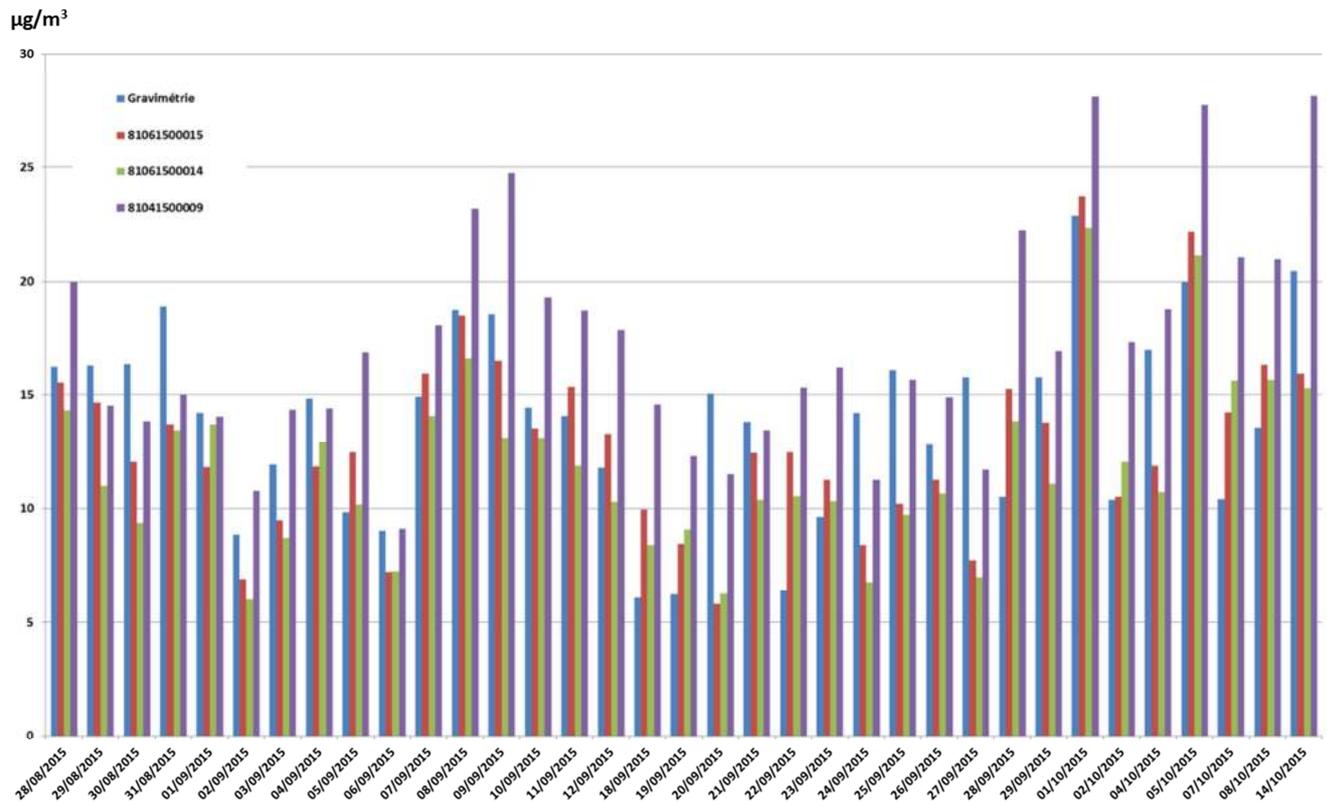


Figure 3 : Série chronologique des concentrations journalières en PM10, sans couples discordants – période estivale

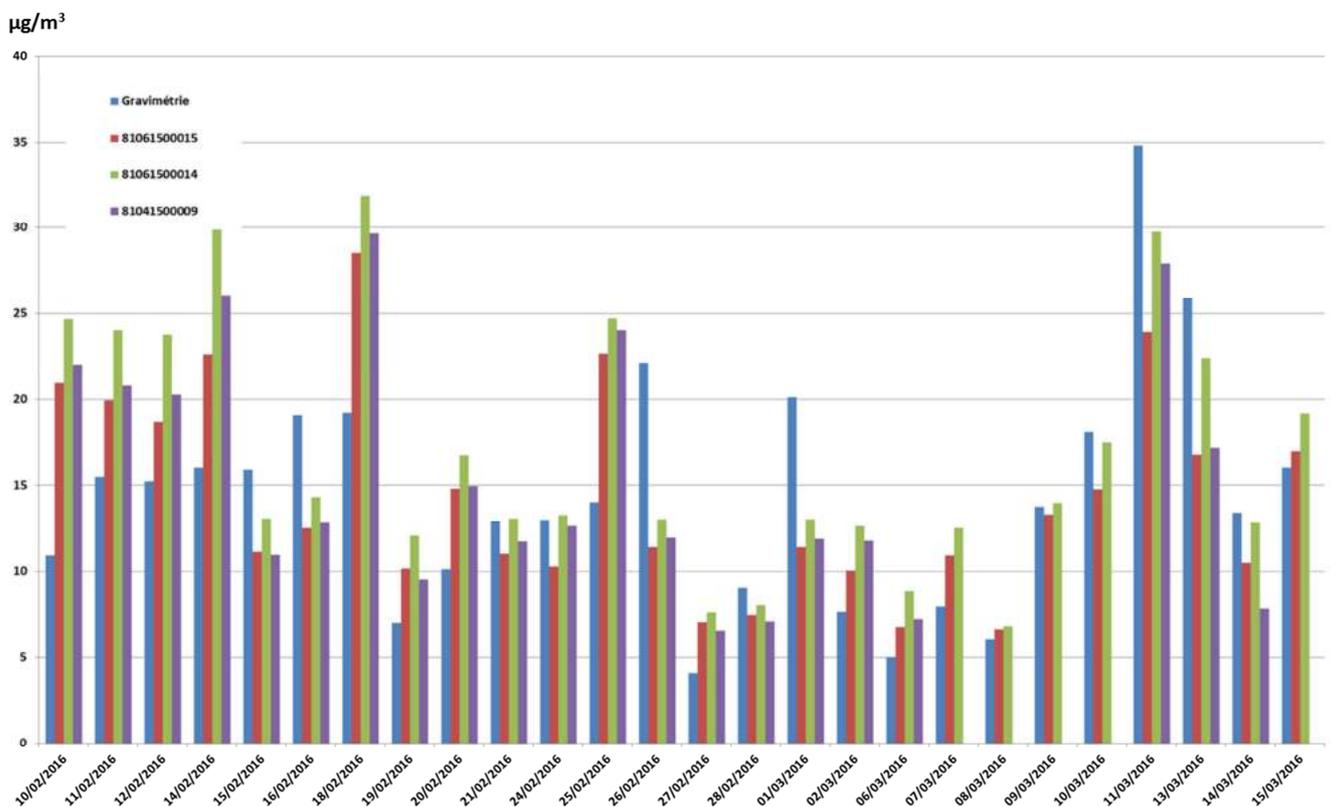


Figure 4 : Série chronologique des concentrations journalières en PM10, sans couples discordants – période hivernale

Le jeu de données alors accepté par le Z-Score est utilisé pour réaliser le graphe suivant, qui met en évidence le biais des valeurs journalières de chaque micro-capteur, ainsi que celui de l'analyseur automatique, par rapport à la gravimétrie.

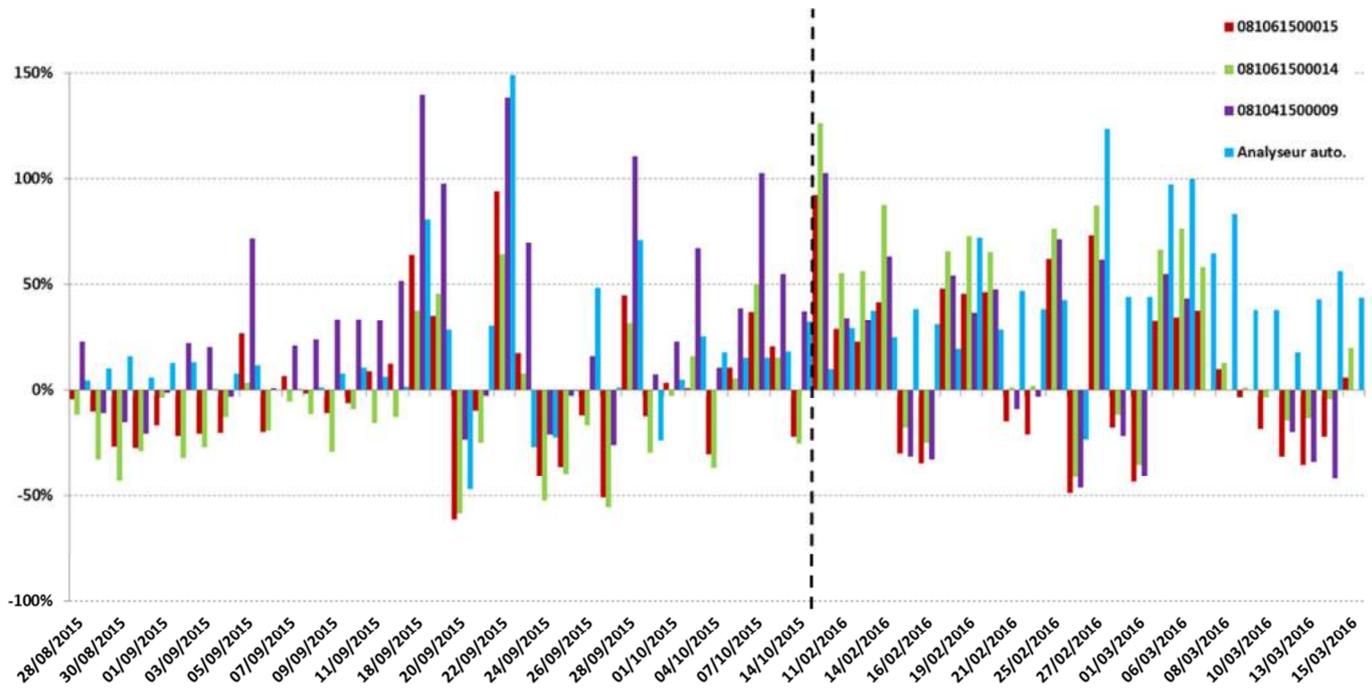


Figure 5 : Biais des valeurs journalières en PM10 des différents micro-capteurs et de l'analyseur automatique par rapport à la gravimétrie – Période d'équivalence

Les biais journaliers que peuvent avoir les micro-capteurs (par rapport à la gravimétrie) n'apparaissent pas « aberrants » en comparaison aux biais que peut afficher l'analyseur automatique par rapport à cette même référence.

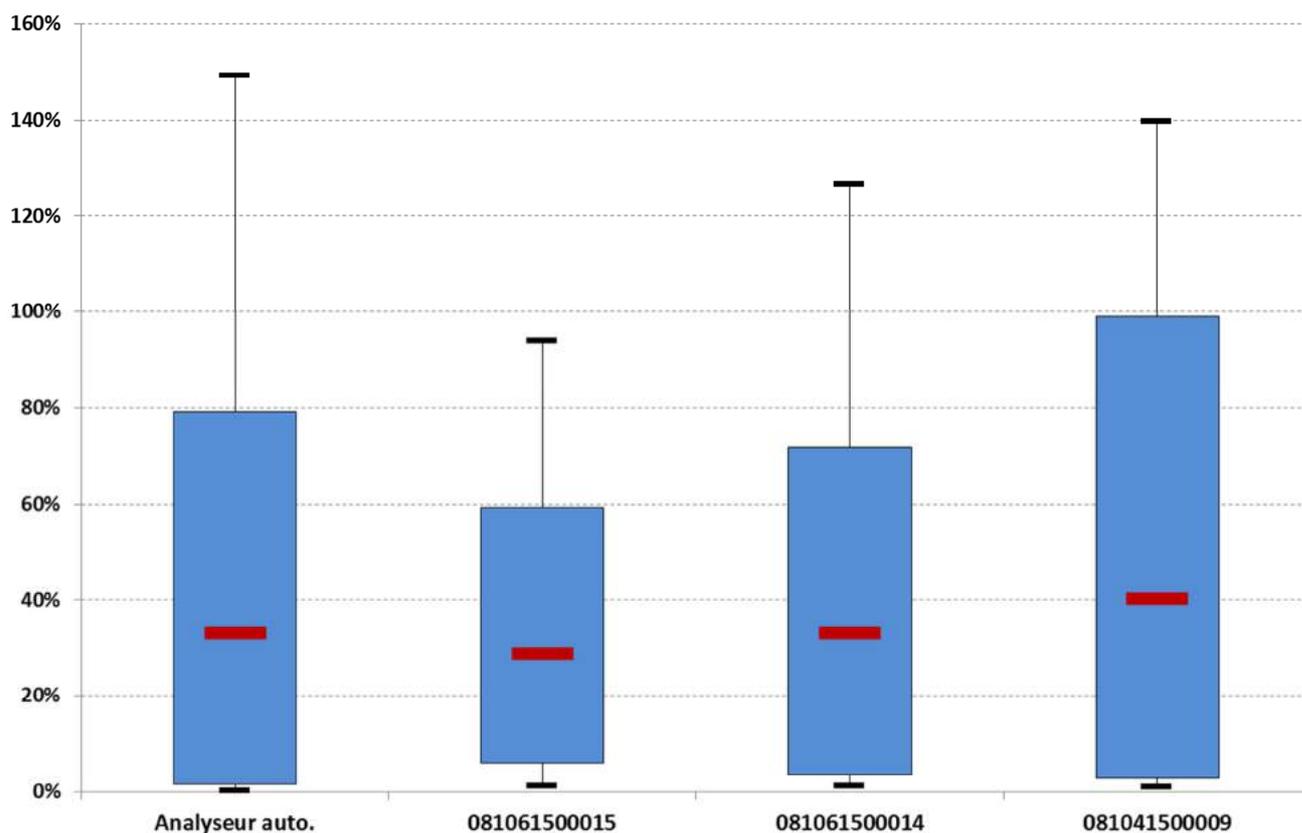


Figure 6 : Diagramme Box-Plot présentant la dispersion du biais moyen journalier en PM10, en valeur absolue, pour chaque micro-capteur ainsi que pour l'analyseur automatique, par rapport à la gravimétrie – Période d'équivalence

Indications : La barrette rouge indique le biais moyen, la zone bleue regroupe 80 % des données et enfin, les barrettes noires indiquent les valeurs min et max.

	<b>Analyseur Auto.</b>	<b>081061500015</b>	<b>081061500014</b>	<b>081041500009</b>
<i>Biais moyen journalier</i>	<b>33 %</b>	<b>29 %</b>	<b>33 %</b>	<b>40 %</b>

Tableau 3 : Biais moyen PM10 journalier, en valeur absolue, de chaque micro-capteur et de l'analyseur automatique – Période d'équivalence

Sur l'ensemble de nos périodes de mesure, le biais moyen journalier des micro-capteurs en PM10 n'excède pas celui de l'analyseur automatique. Seul le micro-capteur « 081041500009 » affiche un biais plus important en raison du problème de surestimation des valeurs en période estivale.

Les corrélations ci-dessous entre les micro-capteurs et la gravimétrie mettent en évidence le coefficient de détermination  $R^2$ , nettement moins bon pour les micro-capteurs que pour l'analyseur automatique.

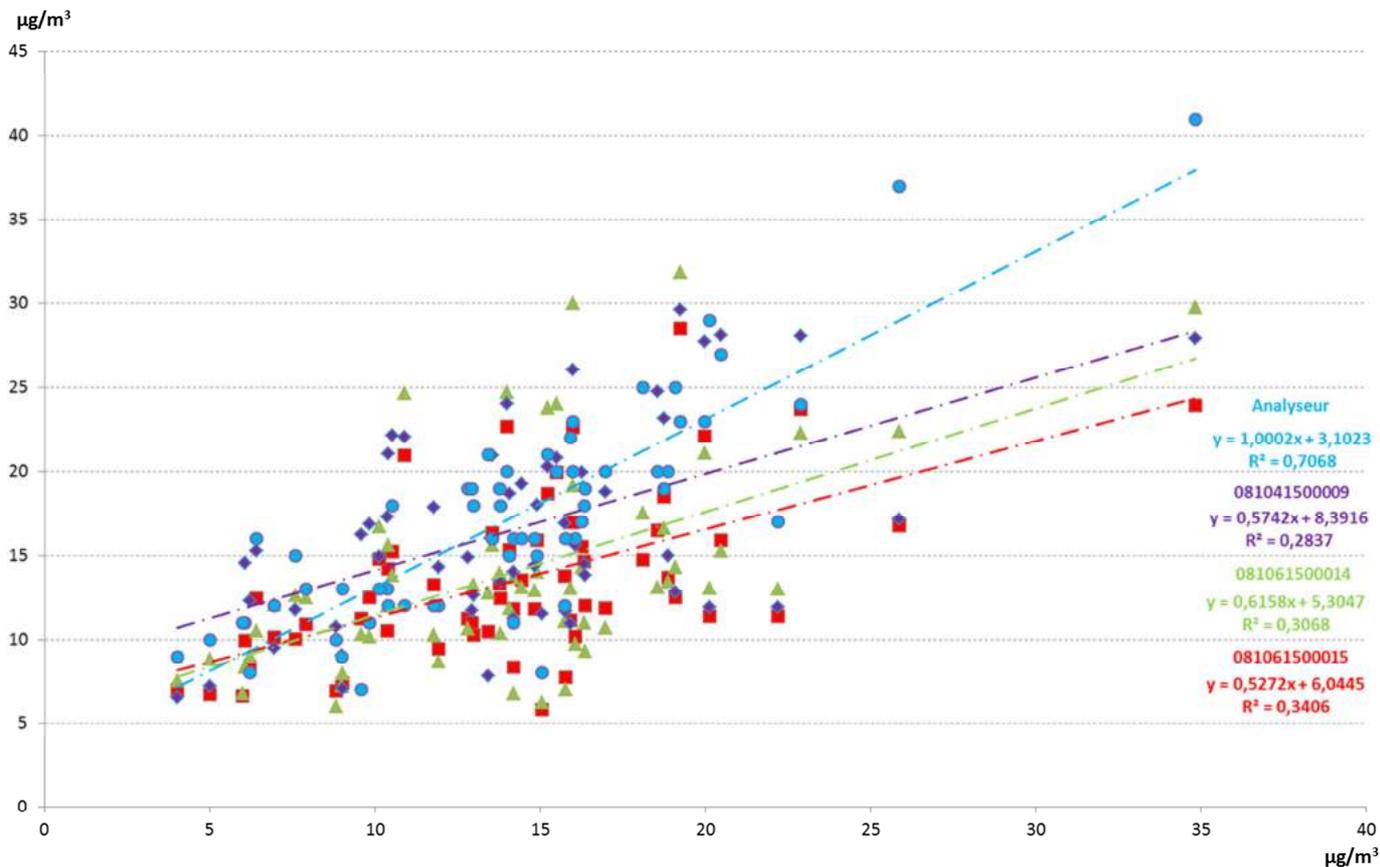


Figure 7 : Corrélations des valeurs PM10 journalières des micro-capteurs et de l'analyseur par rapport à la gravimétrie – Période d'équivalence

Ces graphes viennent donc appuyer le fait que les micro-capteurs proposent des valeurs journalières acceptables et exploitables pour une mesure indicative mais ne peuvent remplacer les appareils de mesures réglementaires en l'état actuel.

Toujours avec le jeu de données journalières accepté par le Z-Score, on souhaite maintenant calculer une équation de calibration qui, appliquée à chaque donnée journalière, permettra de se rapprocher au mieux de la référence.

Toutefois, l'ensemble du jeu de données contient des valeurs comprises dans une tranche de concentration peu étendue et relativement faible (5 – 30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Nous n'avons alors aucun point proche de la valeur limite journalière en PM10 (50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), voire au-delà. De ce fait, le nuage de point est trop concentré et ne permet pas d'établir une équation de calibration fiable.

Les résultats de ces calculs d'équation de calibration sont disponibles en Annexe 1.

L'incertitude relative avant et après calibration présente un écart qui n'est pas significatif, voire dégradant pour le système dans certains cas.

- **Traitements horaires**

Les résultats du calcul du Z-Score sur les données horaires sont les suivants :

	081061500015	081061500014	081041500009
<b>Zscore ≤ 2</b>	<b>71 %</b>	<b>73 %</b>	<b>68 %</b>
<b>2 &lt; Zscore ≤ 3</b>	<b>13 %</b>	<b>11 %</b>	<b>12 %</b>
<b>Zscore &gt; 3</b>	<b>16 %</b>	<b>16 %</b>	<b>20 %</b>

Tableau 4 : Résultats (en pourcentage) de l'application du Z-Score sur les données horaires PM10 des micro-capteurs – Période d'équivalence

A noter : ≈ 2080 données horaires ont été prises en compte pour les calculs du Z-Score

Les micro-capteurs que nous testons (GSM AQ Feel) sont destinés, dans notre cas, à une utilisation avec panneaux solaires.

Ce mode de fonctionnement à l'avantage de nous permettre une plus grande liberté dans les choix de positionnement des capteurs lors du déploiement (absence de contrainte de branchement électrique notamment).

L'inconvénient étant, bien entendu, la préservation de la batterie et donc de l'autonomie du capteur. Il n'est donc absolument pas judicieux de faire fonctionner le capteur de la même façon selon s'il est branché sur secteur ou s'il est utilisé avec panneau solaire.

Nous avons alors testé une méthode d'échantillonnage différente pour chacune des deux périodes :

- Durant la période estivale, les micro-capteurs effectuaient 1 minute de mesure par tranche de 10 minutes.
- Durant la période hivernale, les micro-capteurs effectuaient 4 minutes de mesure par tranche de 10 minutes.

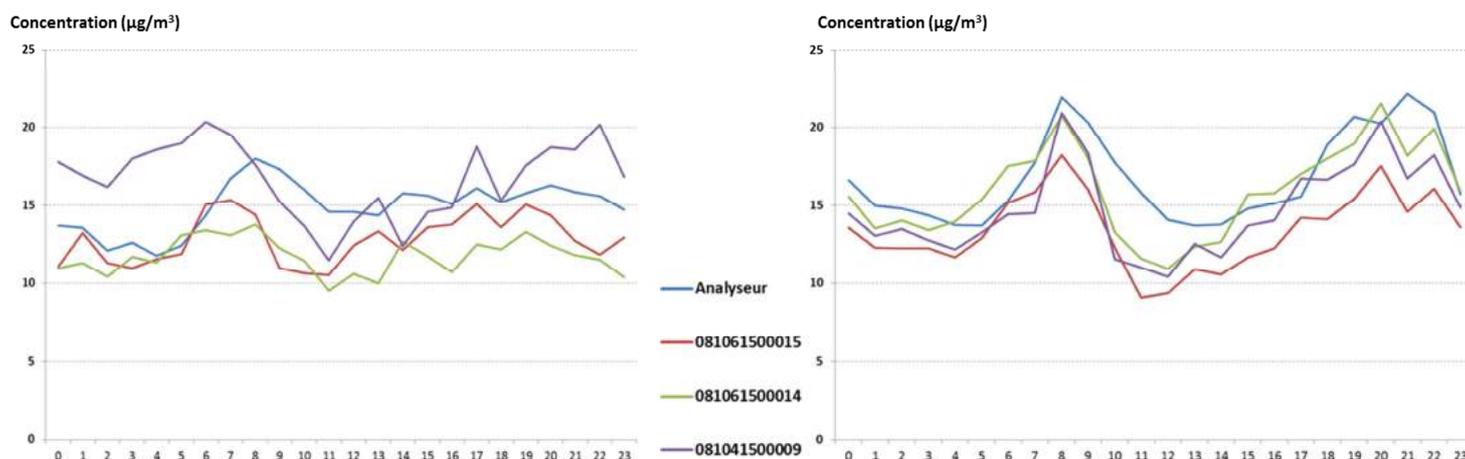


Figure 8 : Profil horaire moyen des données PM10 des trois micro-capteurs et de l'analyseur automatique en période estivale (à gauche) et en période hivernale (à droite)

Les profils horaires moyens ci-dessus sont calculés à partir des données horaires acceptées par le Z-Score.

La méthode d'échantillonnage testée en période estivale permet de conserver une très bonne autonomie mais ne présente pas un suivi pertinent.

La méthode d'échantillonnage testée en période hivernale présente de bons résultats par rapport à l'analyseur tout en conservant une autonomie acceptable. C'est la méthode d'échantillonnage la plus optimale pour un fonctionnement avec panneaux solaires. Cette méthode sera celle utilisée par défaut sur les capteurs lors de leur déploiement.

S'agissant des données horaires, les micro-capteurs présentent un coefficient de détermination  $R^2$  assez faible par rapport à l'analyseur automatique.

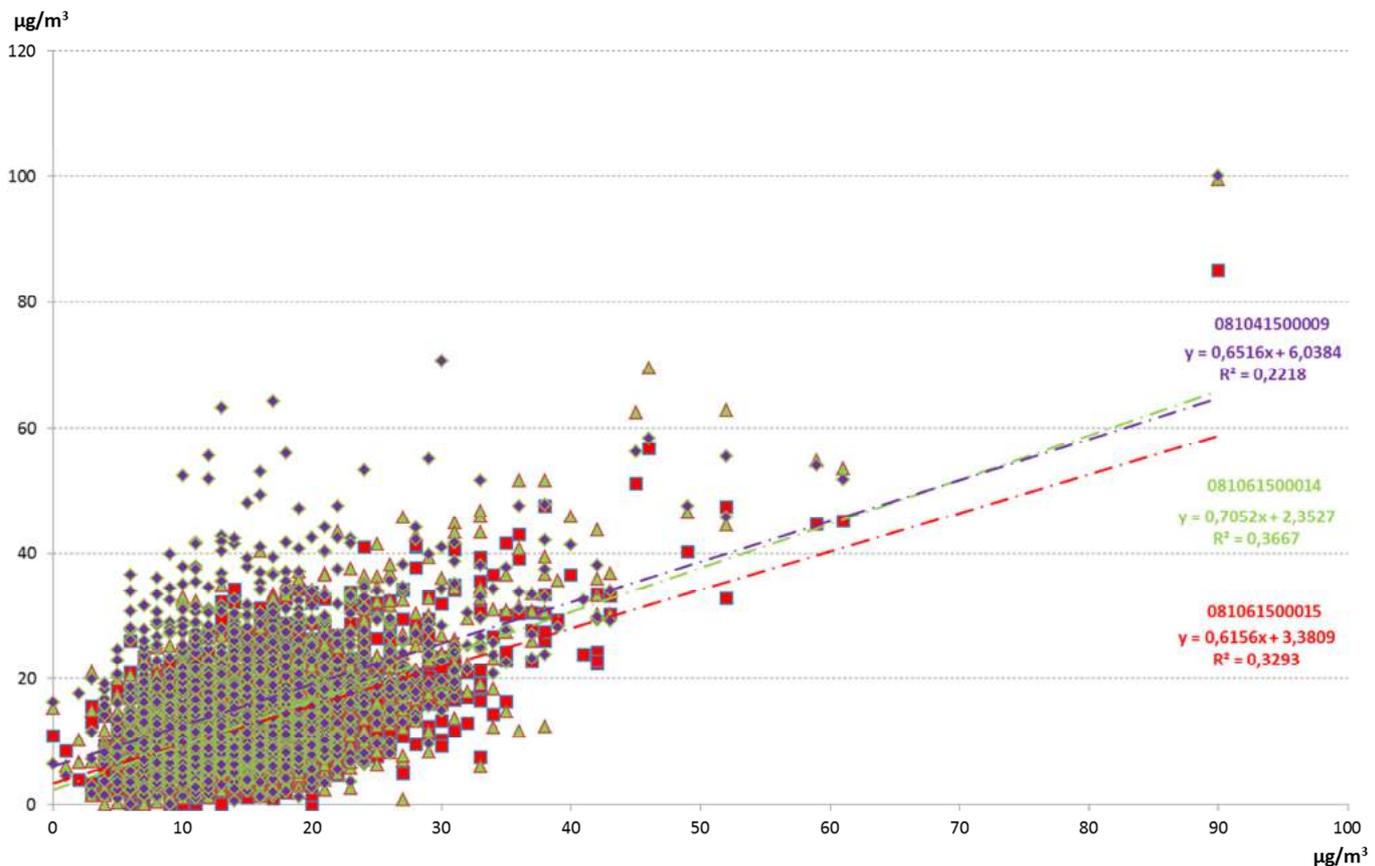


Figure 9 : Corrélations des valeurs PM10 horaires des différents micro-capteurs par rapport à l'analyseur automatique – Période d'équivalence

Les coefficients de détermination calculés à partir des données horaires sont du même ordre de grandeur que pour les données journalières ( $\approx 0.3$  en moyenne).

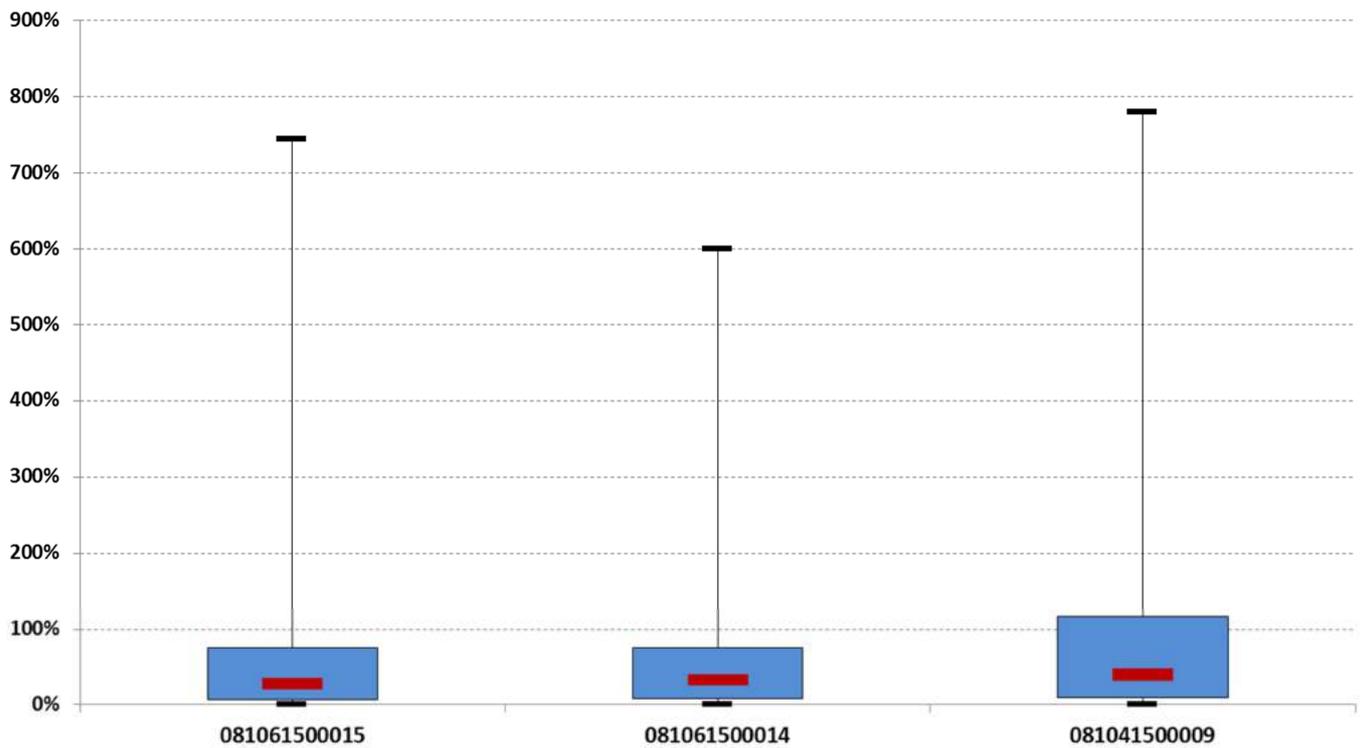


Figure 10 : Diagramme Box-Plot présentant la dispersion du biais moyen horaire en PM10, en valeur absolue, pour chaque micro-capteur par rapport à l'analyseur automatique – Période d'équivalence

Indications : La barrette rouge indique le biais moyen, la zone bleue regroupe 80 % des données et enfin, les barrettes noires indiquent les valeurs min et max.

	081061500015	081061500014	081041500009
<i>Biais moyen horaire</i>	43 %	43 %	57 %

Tableau 5 : Biais moyen horaire en PM10, en valeur absolue, de chaque micro-capteur par rapport à l'analyseur automatique – Période d'équivalence

En faisant abstraction de la surestimation du micro-capteur '081041500009', le biais moyen, en valeur absolue, des valeurs PM10 horaires par rapport à l'analyseur est de 43 % en moyenne.

## Conclusions sur la phase d'équivalence PM10

Les moyennes journalières des trois micro-capteurs suivent assez bien les niveaux obtenus avec la méthode de référence : la gravimétrie. Seul un micro-capteur (081041500009) présentait une surestimation des concentrations lors de la période estivale. Ce problème a été corrigé pour la seconde période (hivernale).

Le Z-Score est l'estimateur que nous avons choisi d'utiliser pour écrêter les valeurs « aberrantes ».

- ✓ En journalier : 13 % des données ont été écrêtées,
- ✓ En horaire : 21 % des données ont été écrêtées.

Durant les tests, il a été établi que la méthode d'échantillonnage optimale pour une utilisation avec panneaux solaires est d'un temps de mesure de 4 minutes par tranche de 10 minutes.

Les coefficients de détermination  $R^2$  des micro-capteurs par rapport aux méthodes de mesure de référence restent faibles (de l'ordre de 0.3 en moyenne).

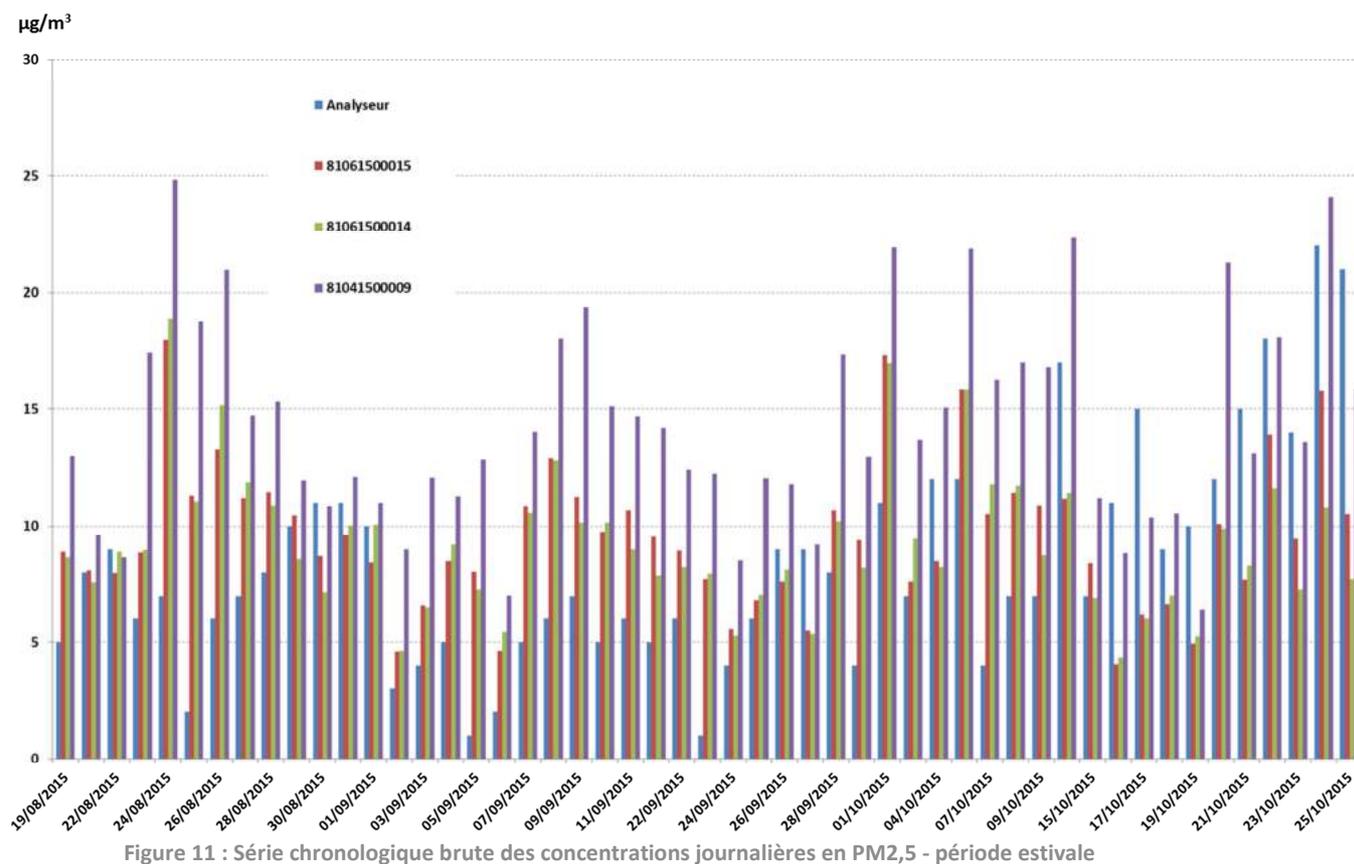
Sur les périodes de mesure considérées, les biais moyens journaliers, calculés par rapport à la gravimétrie, sont du même ordre de grandeur que celui de l'analyseur automatique ( $\approx 33\%$ ). Les biais moyens horaires, calculés quant à eux par rapport à l'analyseur automatique, sont de l'ordre de  $\approx 43\%$ .

Les données sont comprises dans une plage de concentration assez restreinte ( $5 - 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) ce qui ne permet pas de définir une droite de corrélation et une équation de calibration pertinentes.

### 3. PM2,5 : Traitement des données et principaux résultats

Les traitements relatifs aux PM2,5 sont sensiblement les mêmes que ceux effectués pour les PM10, si ce n'est que la comparaison des données horaires et journalières se font par rapport à l'analyseur automatique. La gravimétrie ne donnant qu'une information journalière en PM10 uniquement.

Dans un premier temps, un regard sur les données brutes des moyennes journalières en PM2,5 permet d'en arriver à la même conclusion que dans le cas des PM10.



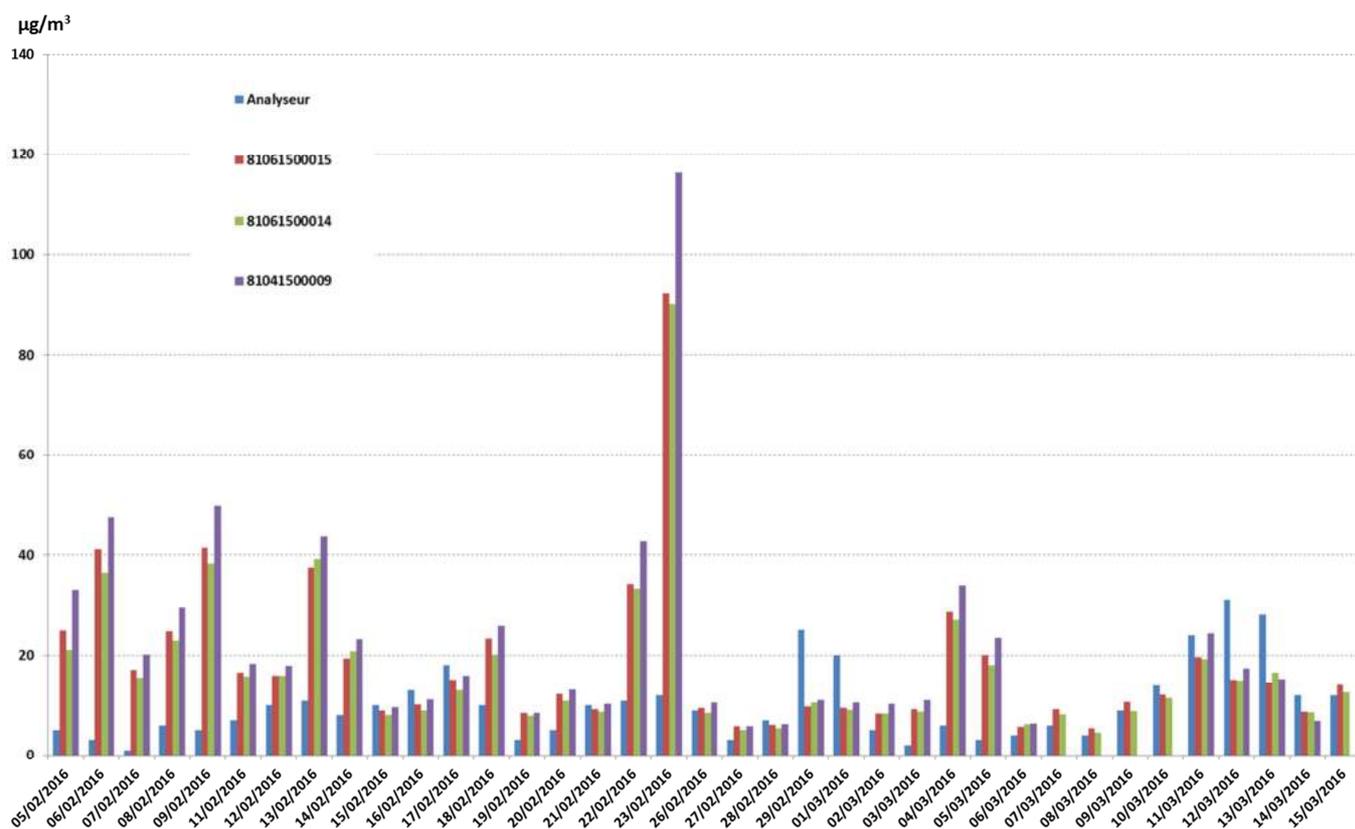


Figure 12 : Série chronologique brute des concentrations journalières en PM2,5 - période hivernale

Les données des micro-capteurs suivent, dans l'ensemble, relativement bien les niveaux journaliers mesurés avec l'analyseur automatique avec, là aussi, une surestimation des concentrations mesurées par le capteur '081041500009' en période estivale.

Les résultats du calcul du Z-Score sur les données journalières sont les suivants :

	081061500015	081061500014	081041500009
<b>Zscore ≤ 2</b>	<b>84 %</b>	<b>84 %</b>	<b>78 %</b>
<b>2 &lt; Zscore ≤ 3</b>	<b>8 %</b>	<b>9 %</b>	<b>10 %</b>
<b>Zscore &gt; 3</b>	<b>8 %</b>	<b>7 %</b>	<b>12 %</b>

Tableau 6 : Résultats (en pourcentage) de l'application du Z-Score sur les données journalières PM2,5 des micro-capteurs – Période d'équivalence

A noter : ≈ 88 données journalières ont été prises en compte pour les calculs du Z-Score

On note que plus de 80 % des données journalières sont acceptées par le Z-Score. Seul le capteur '081041500009' présente des résultats moins bons que les deux autres dus à la surestimation des concentrations en période estivale.

Voici donc les séries de concentrations journalières en PM2,5 pour lesquelles les couples jugés discordants par le calcul du Z-Score ont été écartés.

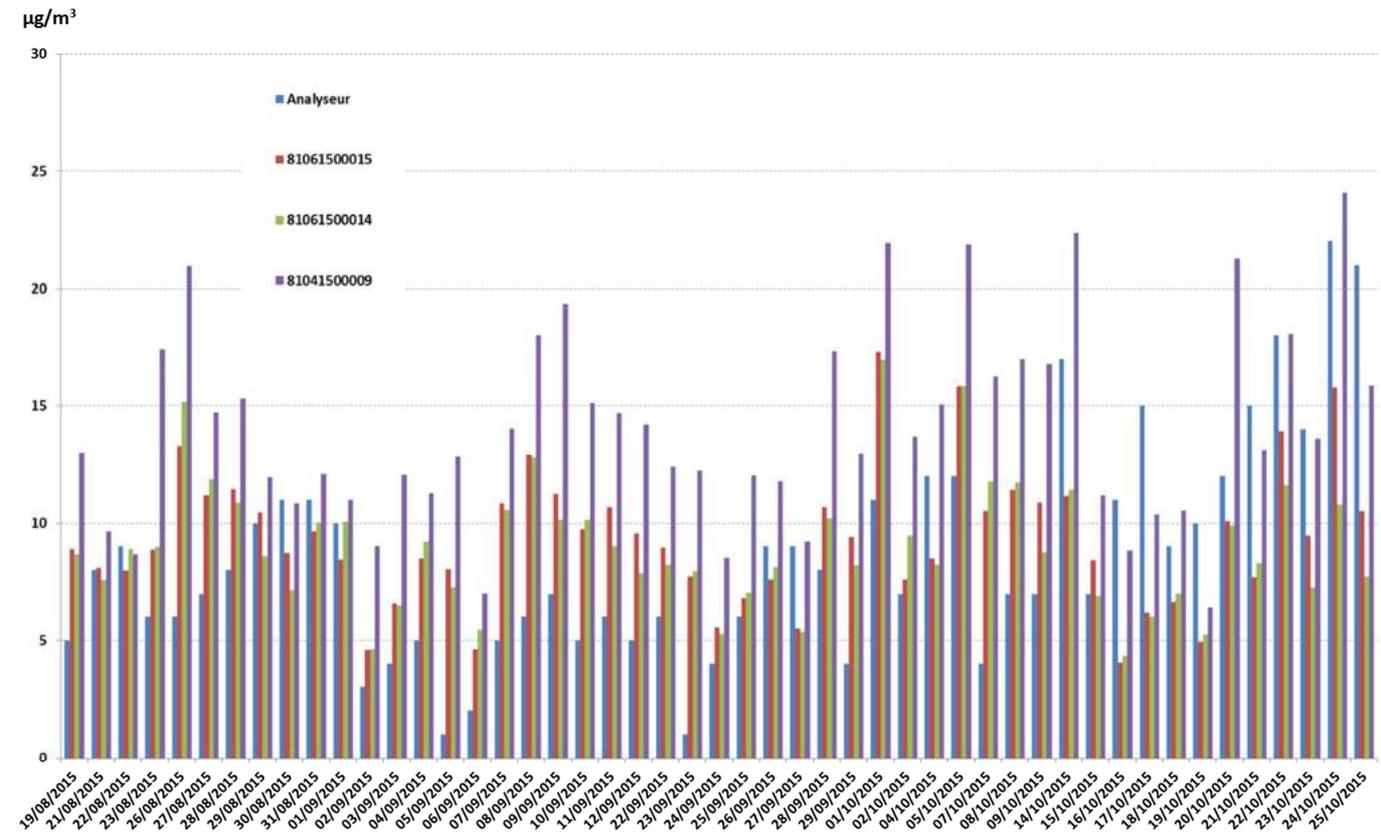


Figure 13 : Série chronologique des concentrations journalières en PM2,5, sans couples discordants – période estivale

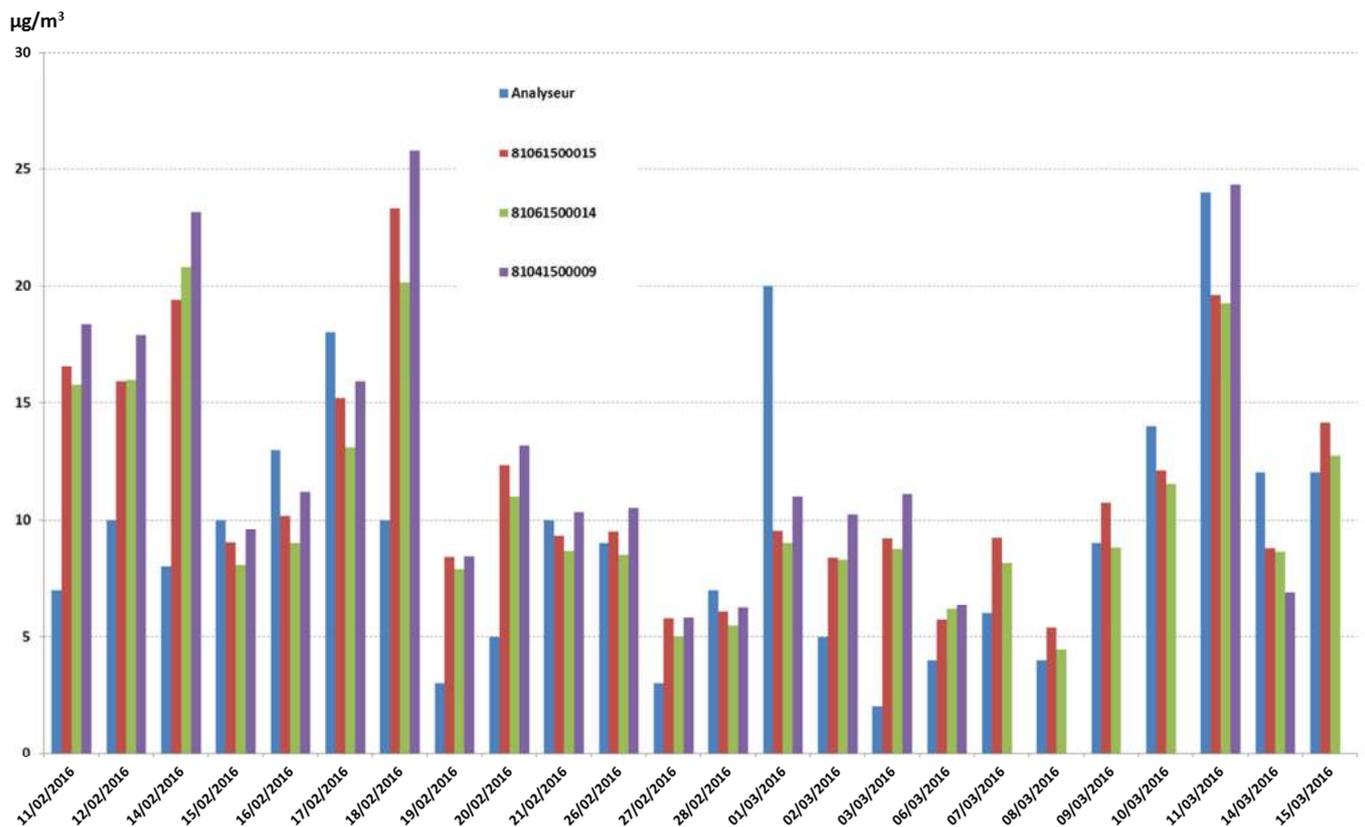


Figure 14 : Série chronologique des concentrations journalières en PM2,5, sans couples discordants – période hivernale

Ces concentrations journalières PM2,5, acceptées par le Z-Score, sont utilisées pour le calcul du biais par rapport à l'analyseur automatique.

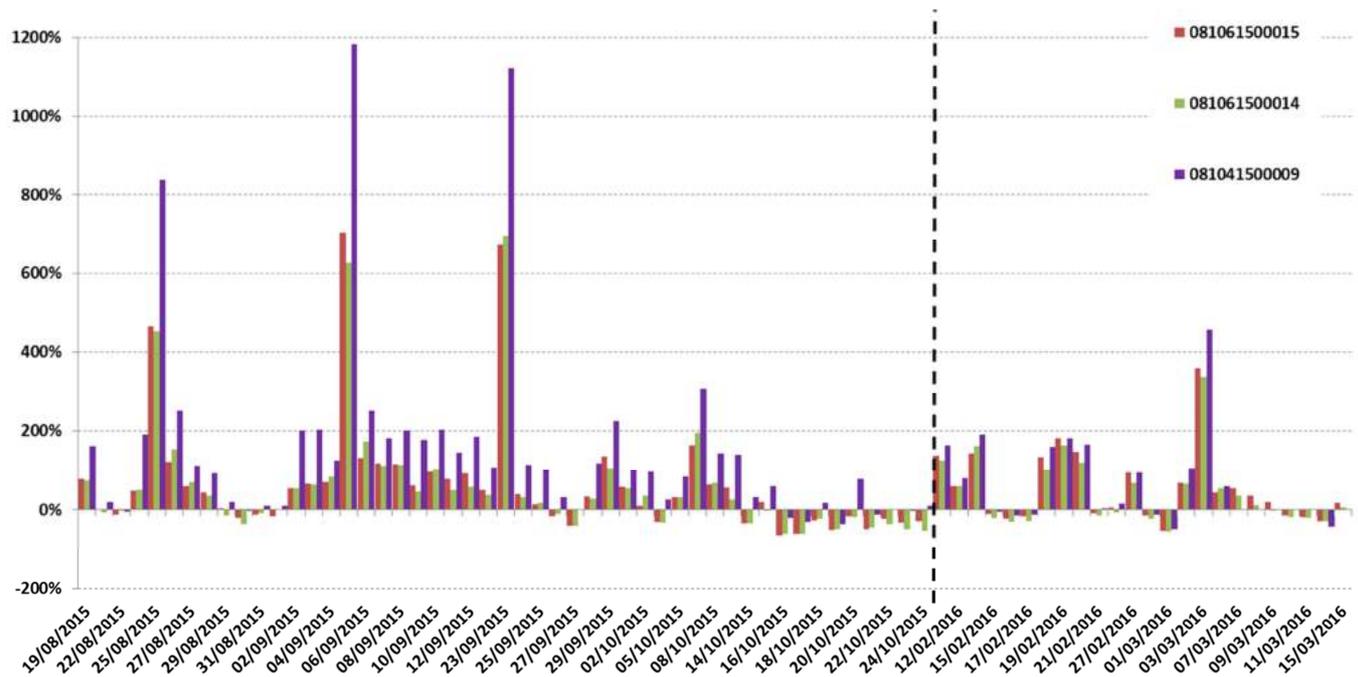


Figure 15 : Biais des valeurs journalières en PM2,5 des différents micro-captureurs par rapport à l'analyseur pour les deux périodes de mesure (estivale et hivernale)

Les biais calculés peuvent paraître important en raison de la tranche de concentration sur laquelle on mesure ces particules.

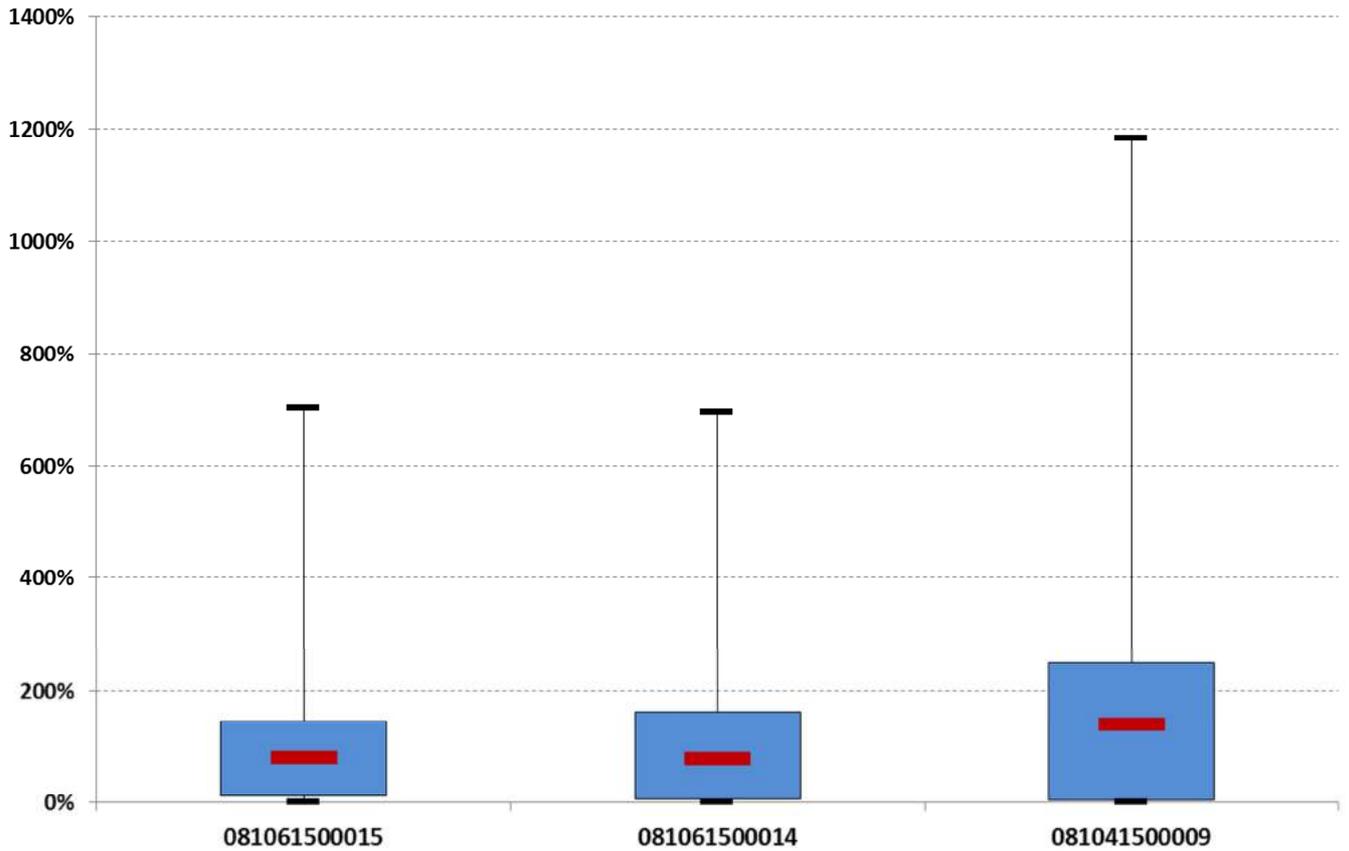


Figure 16 : Diagramme Box-Plot présentant la dispersion du biais moyen journalier en PM2,5, en valeur absolue, pour chaque micro-capteur par rapport à l'analyseur automatique – Période d'équivalence

Indications : La barrette rouge indique le biais moyen, la zone bleue regroupe 80 % des données et enfin, les barrettes noires indiquent les valeurs min et max.

	081061500015	081061500014	081041500009
<b>Biais moyen journalier</b>	<b>81 %</b>	<b>79 %</b>	<b>141 %</b>

Tableau 7 : Biais moyen journalier en PM2,5, en valeur absolue, de chaque micro-capteur par rapport à l'analyseur automatique – Période d'équivalence

Cependant, l'écart moyen en PM2,5, en valeur absolue, des différents micro-capteurs par rapport à l'analyseur automatique est de 4 µg/m<sup>3</sup>. Cela peut représenter un biais important à de très faibles concentrations.

Le calcul du coefficient de détermination  $R^2$  des valeurs journalières en PM<sub>2,5</sub> par rapport à l'analyseur automatique présente des résultats très faibles.

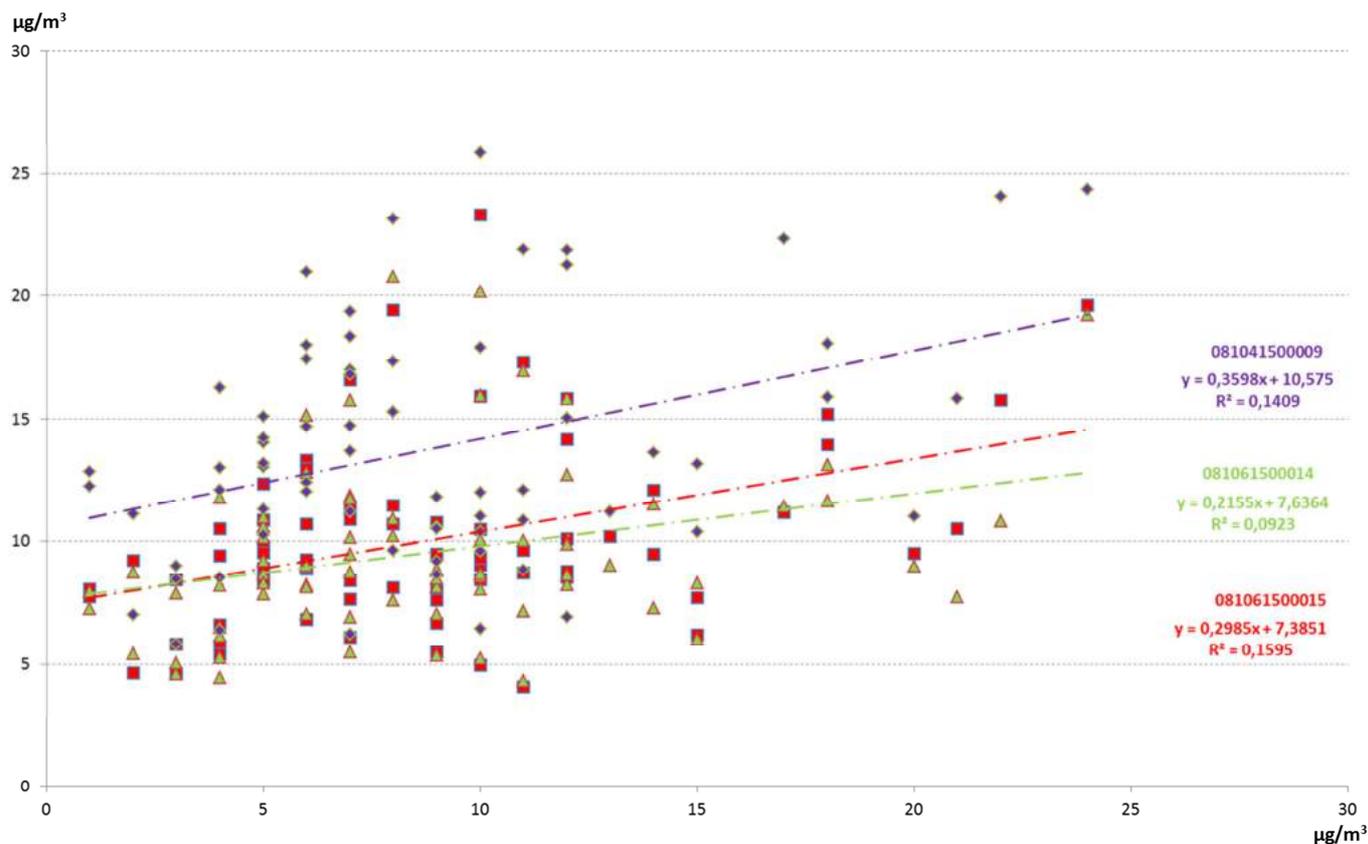


Figure 17 : Corrélations des valeurs journalières en PM<sub>2,5</sub> des différents micro-capteurs par rapport à l'analyseur automatique – Période d'équivalence

Les nuages de points concentrés sur une tranche de concentration réduite, l'incertitude et le seuil de détection des micro-capteurs, le nombre limité de données, etc... sont autant de facteurs qui peuvent expliquer ces résultats.

Comme pour les PM<sub>10</sub>, nous avons essayé de calculer une équation de calibration pour les moyennes journalières en PM<sub>2,5</sub> afin de se rapprocher au mieux de la référence.

Les résultats de ces calculs sont disponibles en Annexe 2.

Là encore, les nuages de points sont concentrés sur de très faibles concentrations. Les résultats de ces calculs montrent alors que l'application d'une équation de calibration, sur les jeux de données de chaque micro-capteur, dégrade le système de départ.

- **Traitements horaires**

Les résultats du calcul du Z-Score sur les données horaires sont les suivants :

	081061500015	081061500014	081041500009
<b>Zscore ≤ 2</b>	<b>78 %</b>	<b>80 %</b>	<b>68 %</b>
<b>2 &lt; Zscore ≤ 3</b>	<b>10 %</b>	<b>8 %</b>	<b>13 %</b>
<b>Zscore &gt; 3</b>	<b>12 %</b>	<b>12 %</b>	<b>19 %</b>

Figure 18 : Résultats (en pourcentage) de l'application du Z-Score sur les données horaires PM2,5 des micro-capteurs – Période d'équivalence

A noter : ≈ 2025 données horaires ont été prises en compte pour les calculs du Z-Score

En moyenne, près de 80 % des données horaires sont acceptées par le Z-Score après le calcul de celui-ci par rapport à l'analyseur automatique.

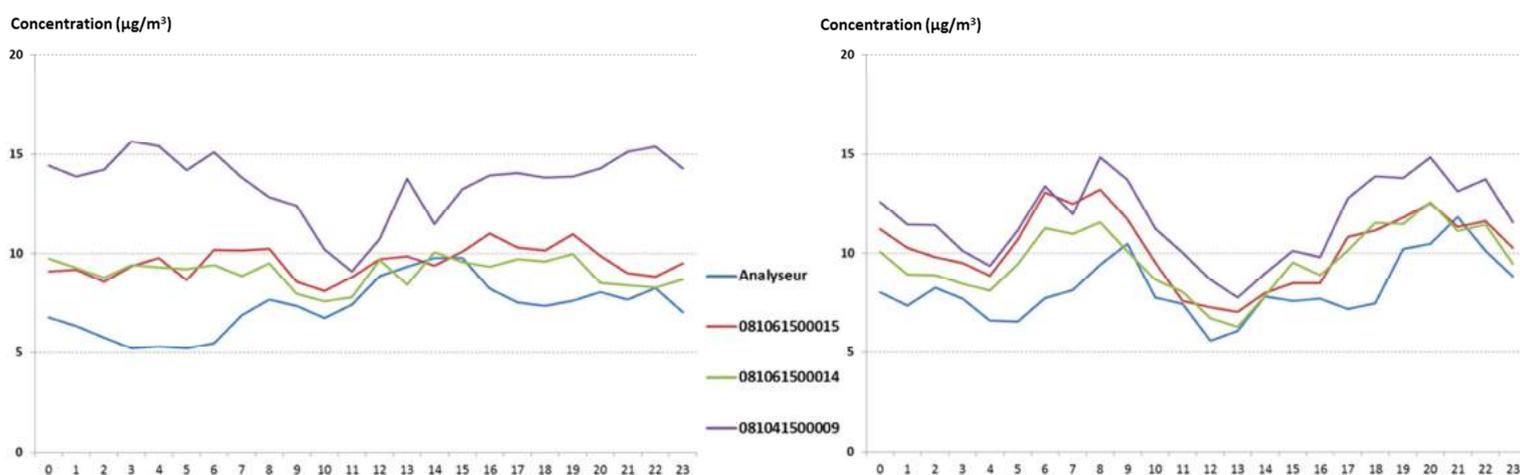


Figure 19 : Profil horaire des données PM10 des trois micro-capteurs et de l'analyseur automatique en période estivale (à gauche) et en période hivernale (à droite)

Le calcul des profils horaires moyens des données PM2,5, à partir des données acceptées par le Z-Score permet d'en arriver aux mêmes conclusions que dans le cas des PM10 : bien que réduisant l'autonomie du micro-capteur, la méthode d'échantillonnage testée en période hivernale (4 minutes de mesure / 10 minutes) permet un suivi horaire plus cohérent par rapport à la méthode d'échantillonnage testée en période estivale (1 minute de mesure / 10 minutes).

Dans la logique de ce qui a été observé pour les données journalières, les données horaires des micro-capteurs présentent un coefficient de détermination  $R^2$  assez faible par rapport à l'analyseur automatique.

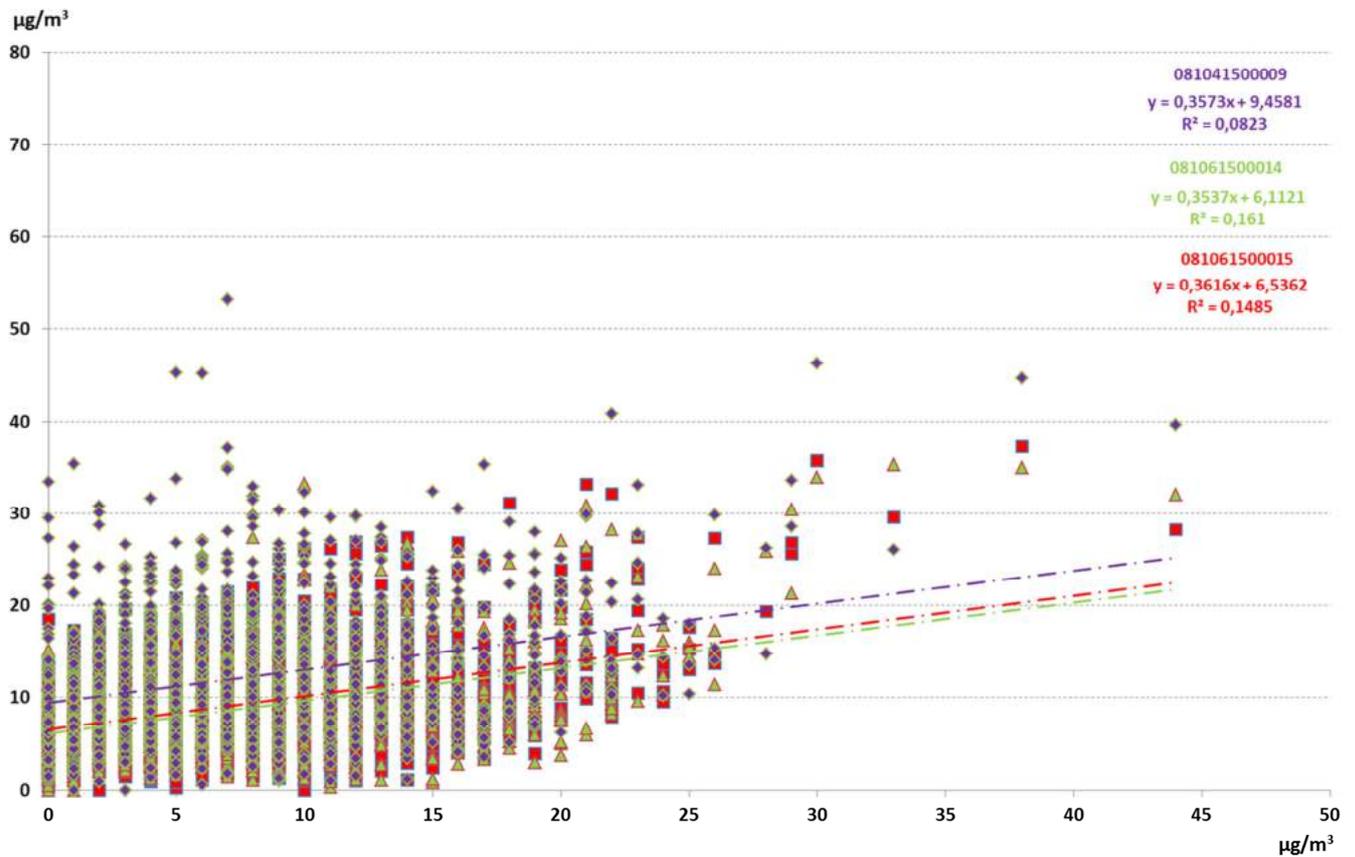


Figure 20 : Corrélations des valeurs PM10 horaires des différents micro-capteurs par rapport à l'analyseur automatique – Période d'équivalence

Les biais moyens horaires sont alors logiquement élevés :

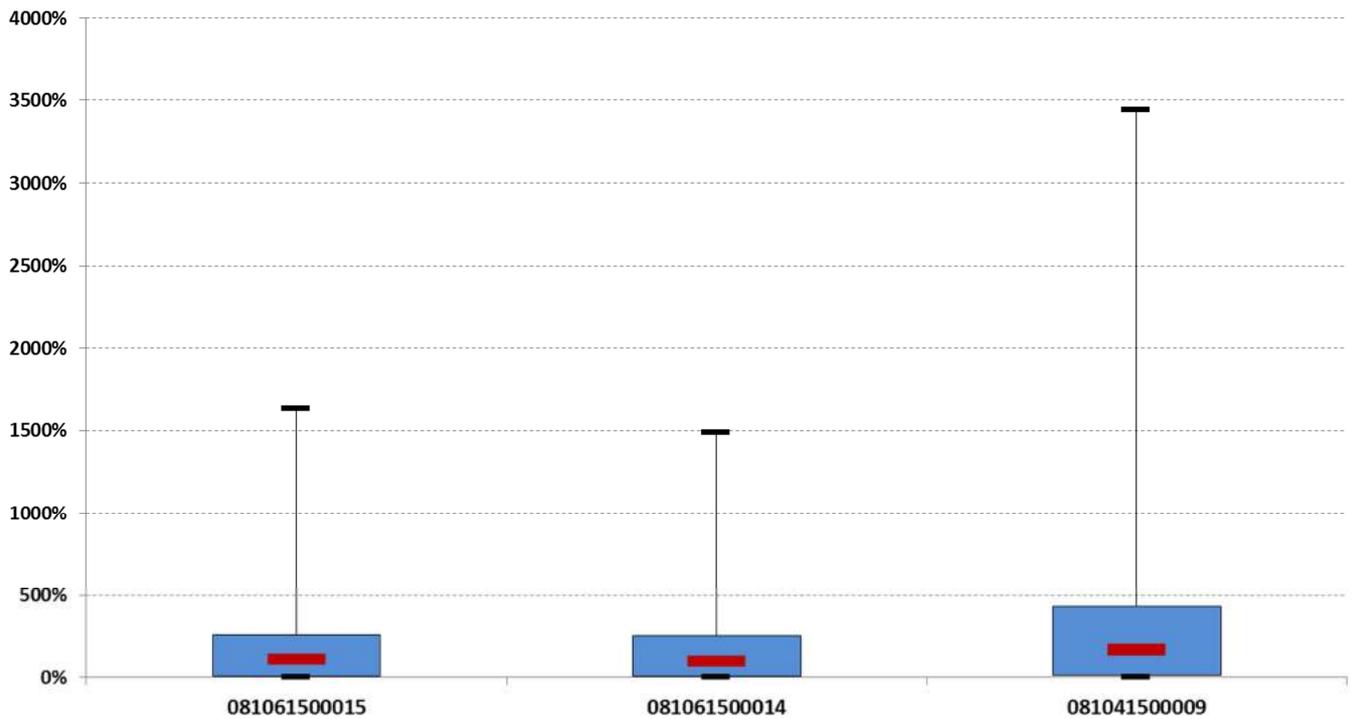


Figure 21 : Diagramme Box-Plot présentant la dispersion du biais moyen horaire en PM2,5, en valeur absolue, pour chaque micro-capteur par rapport à l'analyseur automatique – Période d'équivalence

Indications : La barrette rouge indique le biais moyen, la zone bleue regroupe 80 % des données et enfin, les barrettes noires indiquent les valeurs min et max.

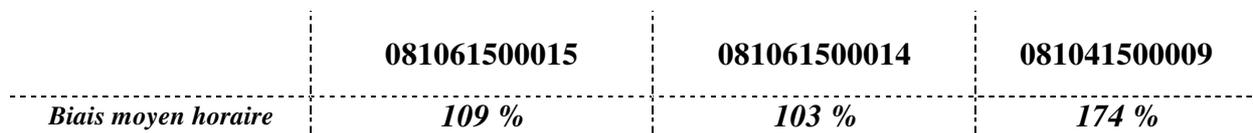


Figure 22 : Biais moyen horaire en PM2,5, en valeur absolue, de chaque micro-capteur par rapport à l'analyseur automatique – Période d'équivalence

Sur les périodes de mesure considérées, les biais moyens horaires pour les PM2,5, en valeur absolue par rapport à l'analyseur automatique, sont supérieurs à 100 %.

## Conclusion équivalence PM2,5

Les moyennes journalières des trois micro-capteurs suivent assez bien les niveaux obtenus avec l'analyseur automatique. Seul un micro-capteur (081041500009) présentait une surestimation des concentrations lors de la période estivale. Ce problème a été corrigé pour la seconde période (hivernale).

Le Z-Score est l'estimateur que nous avons choisi d'utiliser pour écrêter les valeurs « aberrantes ».

- ✓ En journalier : 17 % des données ont été écrêtées,
- ✓ En horaire : 21 % des données ont été écrêtées.

Durant les tests, il a été établi que la méthode d'échantillonnage optimale pour une utilisation avec panneau solaire est d'un temps de mesure de 4 minutes par tranche de 10 minutes.

Les biais moyens journaliers apparaissent importants en raison de la tranche de concentration sur laquelle interviennent les PM2,5. En effet, l'écart moyen journalier par rapport à l'analyseur automatique est de  $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et peut représenter un biais important à de très faibles concentrations.

Les coefficients de détermination  $R^2$  des micro-capteurs par rapport aux méthodes de mesure de référence restent faibles (de l'ordre de 0.1 en moyenne).

## Reproductibilité des Micro-capteurs

### 1. Description des essais

Les tests de reproductibilité se sont déroulés du 30 avril au 29 mai 2015. Durant cette période, huit micro-capteurs PM ont été positionnés sur le toit des locaux d'Air PACA à Martigues. Des mesures de gravimétrie étaient effectuées en parallèle au même endroit. L'établissement de Martigues abritant le Laboratoire de Gravimétrie, cela a permis une plus grande facilité dans le transport des filtres nécessaires pour la réalisation des mesures de gravimétrie.

Parmi ces huit micro-capteurs, on retrouve les trois micro-capteurs testés précédemment durant les tests d'équivalence. L'identification des micro-capteurs a été raccourcie pour plus de lisibilité.

*Identification :*

- 081061500015 → 6061
- 081061500014 → 6062
- 081041500009 → 6004

La homesense (boîtier abritant le micro-capteur et la batterie) et donc le micro-capteur lui-même sont idéalement exposés plein Nord tandis que le panneau solaire est, à l'inverse, exposé plein Sud.

Sur les huit micro-capteurs installés, deux ont pivoté en raison du vent. Les colliers serflex en plastique utilisés n'ayant pas suffisamment maintenus les micro-capteurs. De ce fait, les deux micro-capteurs ont subi une exposition trop importante à la lumière ce qui a eu pour conséquence de compromettre les données recueillies.

C'est pourquoi les résultats présentés ci-après tiennent compte de six micro-capteurs.

Dans un premier temps, une comparaison avec les mesures de gravimétrie a été faite, complétée par la suite par une comparaison entre les micro-capteurs eux-mêmes afin de juger de leur reproductibilité.

### 2. Traitement des données

Comme pour les traitements réalisés pour les tests d'équivalence, un premier regard sur les données brutes des six micro-capteurs et de la gravimétrie permet d'en arriver aux mêmes conclusions que précédemment.

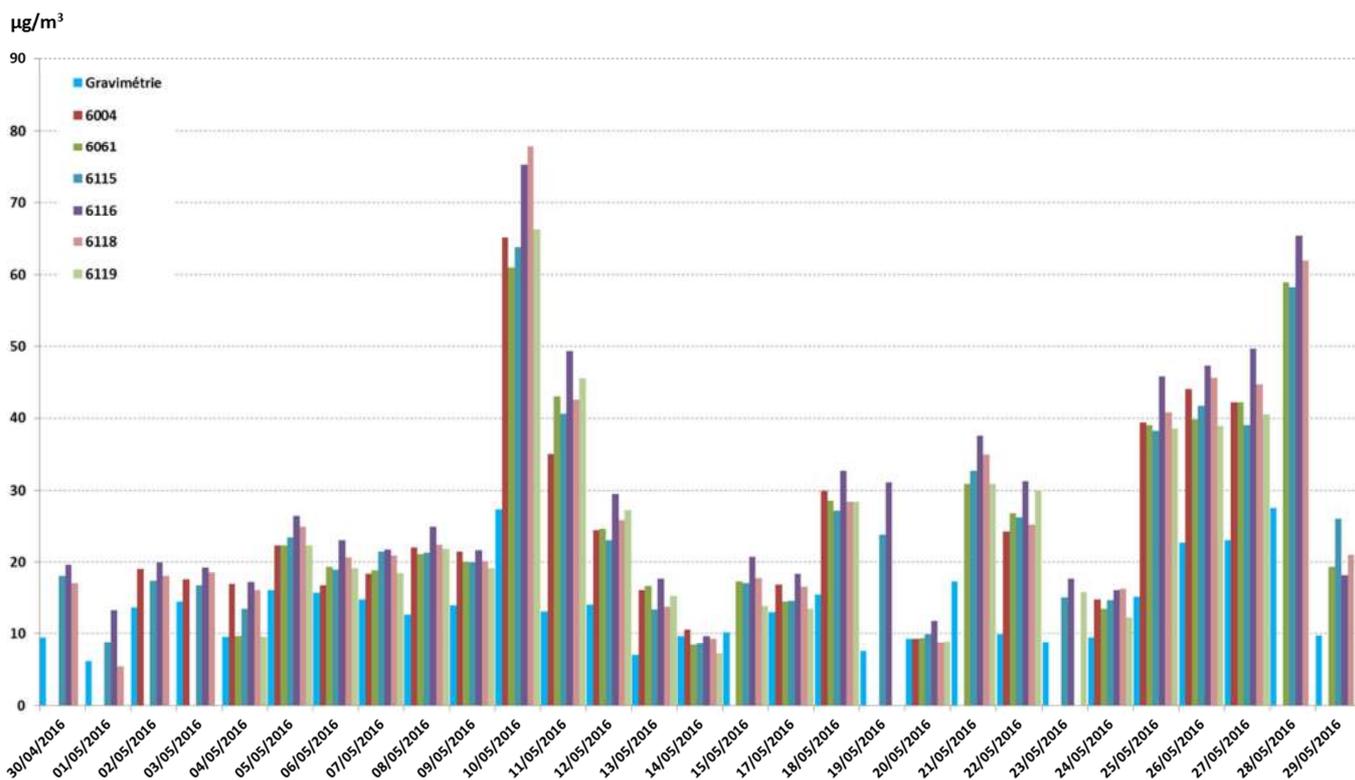


Figure 23 : Série chronologique brute des concentrations journalières en PM10 mesurées par les différents micro-capteurs et par gravimétrie – Période de reproductibilité

Le comportement journalier en PM10 des micro-capteurs suit relativement bien, dans l'ensemble, celui de la gravimétrie malgré la présence ponctuelle de décrochages.

	6004	6061	6062	6115	6116	6117	6118	6119
<b>Zscore ≤ 2</b>	48 %	44 %		52 %	31 %		48 %	50 %
<b>2 &lt; Zscore ≤ 3</b>	19 %	17 %		10 %	28 %		15 %	9 %
<b>Zscore &gt; 3</b>	33 %	39 %		38 %	41 %		37 %	41 %

Figure 24 : Résultats (en pourcentage) de l'application du Z-Score sur les données journalières PM10 des micro-capteurs – Période de reproductibilité

A noter : ≈ 25 données journalières ont été prises en compte pour les calculs du Z-Score

La période de reproductibilité n'ayant duré qu'un mois, ce sont près de trois fois moins de données journalières qui ont été prises en compte pour le calcul du Z-Score, par rapport aux précédents calculs de Z-Score de la période d'équivalence. De ce fait, les couples discordants représentent un poids plus important dans le calcul des pourcentages.

Le site de la Pagode peut être considéré comme périurbain étant donné son éloignement du centre-ville et des sources de pollutions majeures. De ce fait, les niveaux en particules sont assez faibles. Nous sommes partis du même principe que pour les tests d'équivalence (tolérance pour les valeurs faibles) et avons accepté une grande majorité de couples dont le Z-Score est compris entre 2 et 3. Au final, près de 30 % des données journalières ont été écartées.

Le graphe ci-dessous présente la série chronologique des valeurs journalières PM10 pour laquelle les couples discordants ont été écartés suite aux calculs du Z-Score.

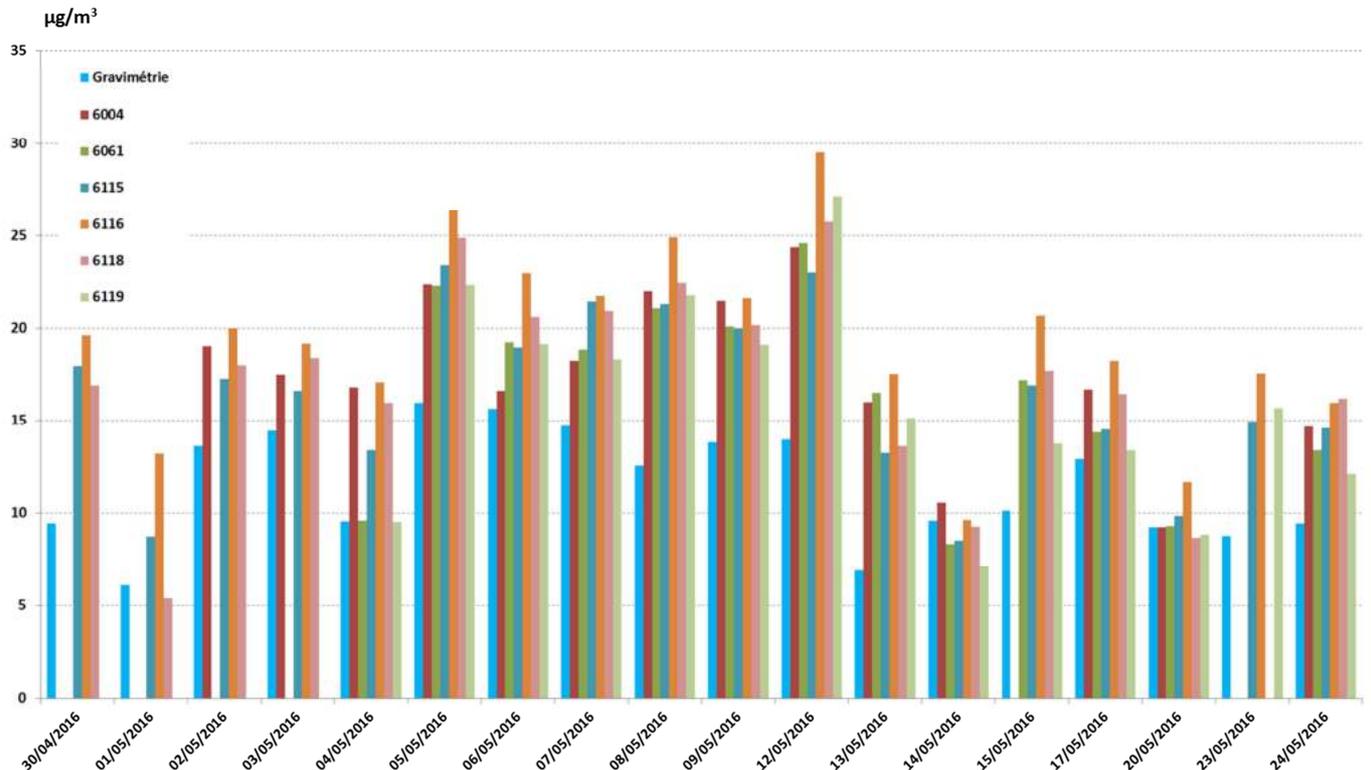


Figure 25 : Série chronologique des concentrations journalières en PM10, sans couples discordants – Période de reproductibilité

Ces jeux de données sans couples discordants sont alors utilisés pour calculer le biais moyen des valeurs journalières PM10, en valeur absolue, des différents micro-captureurs par rapport à la gravimétrie.

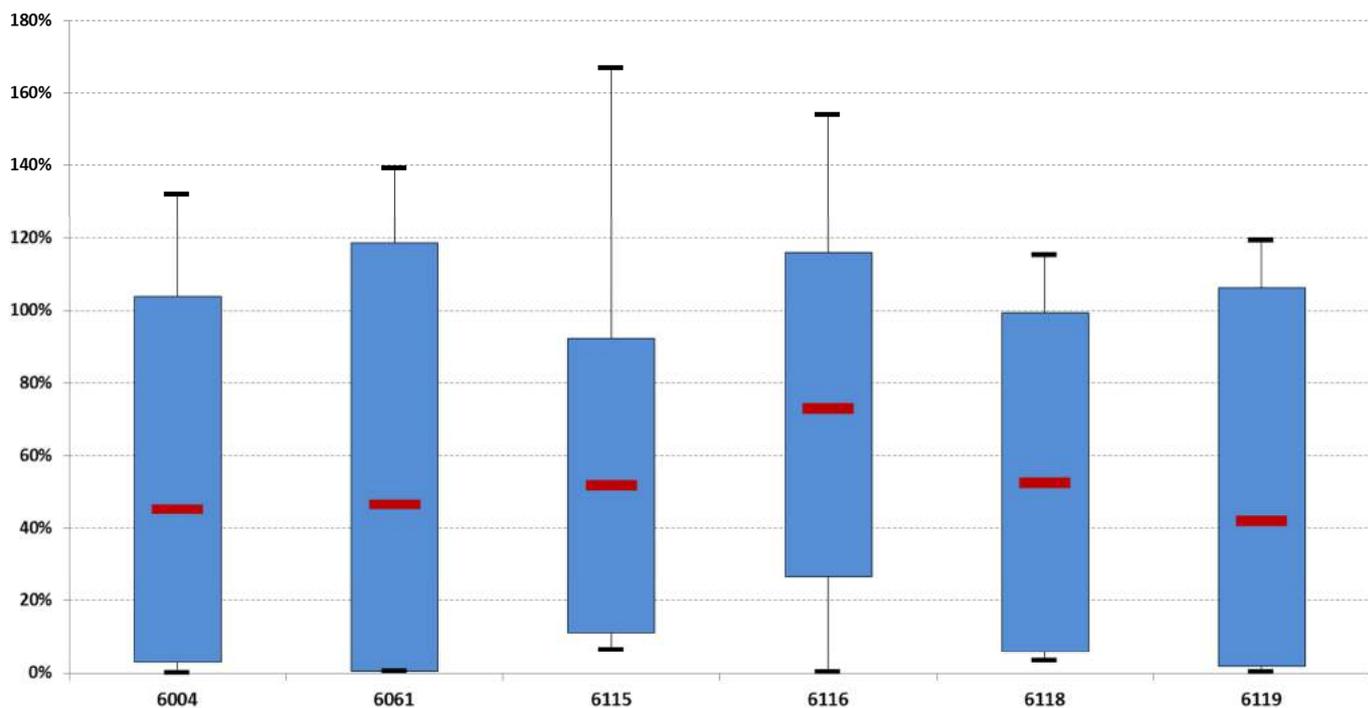


Figure 26 : Diagramme Box-Plot présentant la dispersion du biais moyen journalier en PM10, en valeur absolue, pour chaque micro-capteur par rapport à la gravimétrie – Période de reproductibilité

Indications : La barrette rouge indique le biais moyen, la zone bleue regroupe 80 % des données et enfin, les barrettes noires indiquent les valeurs min et max.

	6004	6061	6115	6116	6118	6119
<b>Biais moyen journalier</b>	<b>45 %</b>	<b>47 %</b>	<b>52 %</b>	<b>73 %</b>	<b>53 %</b>	<b>42 %</b>

Tableau 8 : Biais moyen, en valeur absolue, des valeurs journalières en PM10 des différents micro-capteurs par rapport à la gravimétrie – Période de reproductibilité

Le biais moyen, en valeur absolue, de ces micro-capteurs est de l'ordre de 50 % sur la période de mesure considérée par rapport à la gravimétrie.

Concernant la reproductibilité de ces micro-capteurs, le calcul du coefficient de détermination  $R^2$  des valeurs journalières en PM10 et PM2,5 entre les micro-capteurs eux-mêmes donne les résultats ci-dessous.

	6004	6061	6115	6116	6118	6119
6004		0,7939	0,8129	0,8103	0,8814	0,7434
6061			0,8383	0,9001	0,8855	0,8612
6115				0,7297	0,8906	0,8703
6116					0,8718	0,8327
6118						0,8411
6119						

Figure 27 : Coefficients de détermination  $R^2$  des valeurs journalières PM10 des micro-capteurs les uns par rapport aux autres – Période de reproductibilité

	6004	6061	6115	6116	6118	6119
6004		0,9190	0,9367	0,9450	0,9642	0,8827
6061			0,9274	0,9569	0,9449	0,9366
6115				0,8945	0,9507	0,9354
6116					0,9525	0,9326
6118						0,9083
6119						

Figure 28 : Coefficients de détermination  $R^2$  des valeurs journalières PM2,5 des micro-capteurs les uns par rapport aux autres – Période de reproductibilité

Sur la période d'un mois considérée, les coefficients de détermination PM10 et PM2,5 des micro-capteurs entre eux sont relativement élevés. Il apparaît alors qu'avec la dernière version de ces micro-capteurs, celle que nous avons testée, ces derniers sont assez reproductibles entre eux.

## **Conclusion phase de reproductibilité**

Les valeurs journalières PM10 des micro-capteurs ont relativement bien suivi les niveaux mesurés par gravimétrie. Les micro-capteurs ont surestimé la plupart du temps les valeurs journalières par rapport à la référence. Des décrochages ont été observés et 30 % des données journalières ont été identifiées, par le calcul du Z-Score, comme discordante par rapport à la gravimétrie sur le mois de mesure.

Le biais moyen des valeurs PM10 journalières par rapport à la gravimétrie est de 50 % en moyenne sur la période de mesure.

Le calcul du coefficient de détermination  $R^2$  présente de bons résultats, induisant une reproductibilité relativement bonne des micro-capteurs.

Deux des huit micro-capteurs ont subi une exposition trop importante à la lumière suite au pivotement du boîtier (homesense) en raison de plusieurs rafales de vent.

Suite à cela, EcologicSense prévoit de fournir des colliers serflex métalliques, plus solides, pour remplacer les colliers serflex en plastiques utilisés durant ces tests. Une pièce de la partie fluidique de ces capteurs a également été changée, rendant ceux-ci moins sensibles à la lumière.

## Conclusion

Le projet « Micro-capteur » d'Air PACA, labélisé par le PRSE, a pour objectif d'évaluer la pertinence des micro-capteurs dans la réalisation des cartographies de pollution et d'exposition des populations aux particules en suspension. Au préalable de la réalisation de ces cartographies, une phase de validation métrologique des micro-capteurs a été mise en place.

Plusieurs tests ont été réalisés durant cette phase :

- Des tests d'équivalence, réalisés en période estivale et hivernale, permettant d'évaluer la justesse des micro-capteurs par rapport aux méthodes de mesure de référence (gravimétrie pour les moyennes journalières en PM10 et analyseur automatique pour les données horaires et les données PM2,5). La justesse est quantifiée par une évaluation des biais et par un calcul des incertitudes.
- Des tests de reproductibilité permettant de vérifier que les mesures réalisées par les micro-capteurs sont cohérentes entre elles.

Les tests d'équivalence ont montré que les moyennes journalières, en PM10 et PM2,5, recueillies à partir des données des micro-capteurs suivent assez bien les niveaux observés par les méthodes de référence. On note toutefois des décrochages ponctuels dus, en partie, aux conditions météorologiques (vent, humidité, etc...) et à la nature chimique des particules.

Le Z-Score est l'estimateur mathématique choisi afin d'identifier les écarts significatifs entre les valeurs de référence et les valeurs expérimentales (valeurs des micro-capteurs).

Entre 50 % et 80 % des valeurs concordent avec les valeurs de référence selon les périodes de mesure. Cette première « correction » permet d'écarter les valeurs discordantes et de garder des jeux de données plus cohérents.

Les biais moyen, 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 en PM2,5 apparaissent plus importants en raison de la tranche de concentration sur laquelle on mesure ces particules.

Cependant, au vu du coefficient de détermination des micro-capteurs ainsi que de l'incertitude relative, calculés par rapport aux méthodes de référence, il convient de souligner le fait que, 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.

Les tests effectués sur les données horaires viennent confirmer que la méthode d'échantillonnage optimale pour un fonctionnement des micro-capteurs avec panneaux solaires est de 4 minutes de mesures par tranche de 10 minutes. L'objectif étant de trouver le meilleur compromis entre le temps de mesure et l'autonomie du capteur.

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

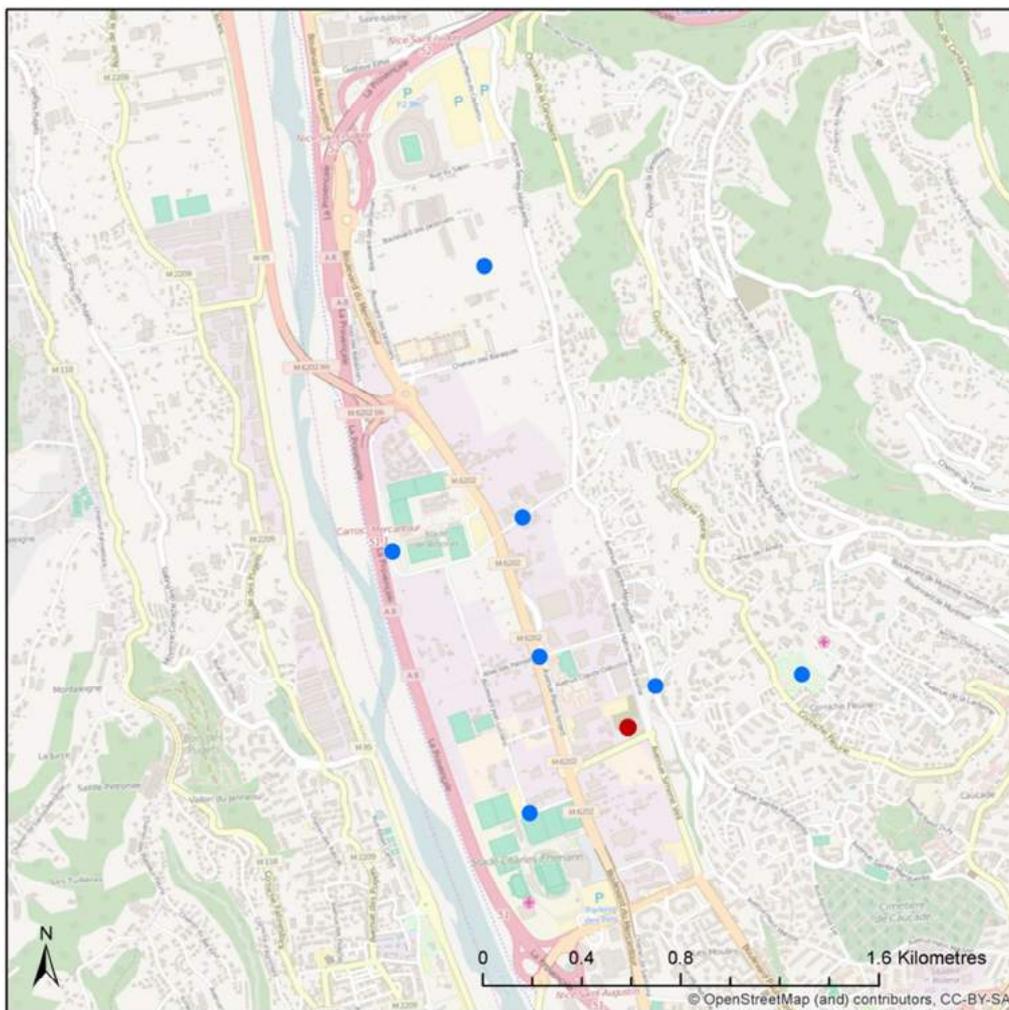
Pour l'utilisation future des micro-capteurs, il est donc envisagé de réaliser une première correction des données par l'intermédiaire du calcul du Z-Score. Il sera également intéressant de regarder les résultats qu'offre le calcul du Z-Score effectué pour différentes tranches de concentration. Une seconde correction pourra venir en complément afin de corriger les données aux mieux pour se rapprocher des données de référence. Le calcul et l'application d'une équation de calibration n'ayant pas donné de résultats satisfaisants, les investigations continuent pour trouver une méthode de correction pertinente. Une des pistes envisagées serait d'ajuster les données des différents micro-capteurs à l'aide du biais déterminé entre le couple « micro-capteur – analyseur automatique ».

## Perspectives : Suite du projet

Suite à cette phase de validation métrologique des micro-capteurs, Air PACA prévoit de les déployer sur une zone d'intérêt de la région PACA. Cette zone a été choisie comme étant 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 ont été déployés sur cet éco-quartier au cours du mois d'octobre 2016. Les mesures liées à cette phase d'observation seront 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 sur la carte ci-dessous), équipé d'un analyseur automatique de particules. Cela constituera un point de référence pour cette campagne de mesure.



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

Les capteurs seront déployés à une hauteur de 3.5 m du sol. Si les résultats de cette campagne sont satisfaisants, il est prévu une assimilation des données de ces micro-capteurs dans les outils de modélisation d'Air PACA. La réalisation d'une cartographie annuelle de pollution et d'exposition des populations aux particules fines, s'appuyant sur les données de référence et des micro-capteurs, reste l'objectif final.

## Annexe 1 : Calibration des valeurs journalières en PM10

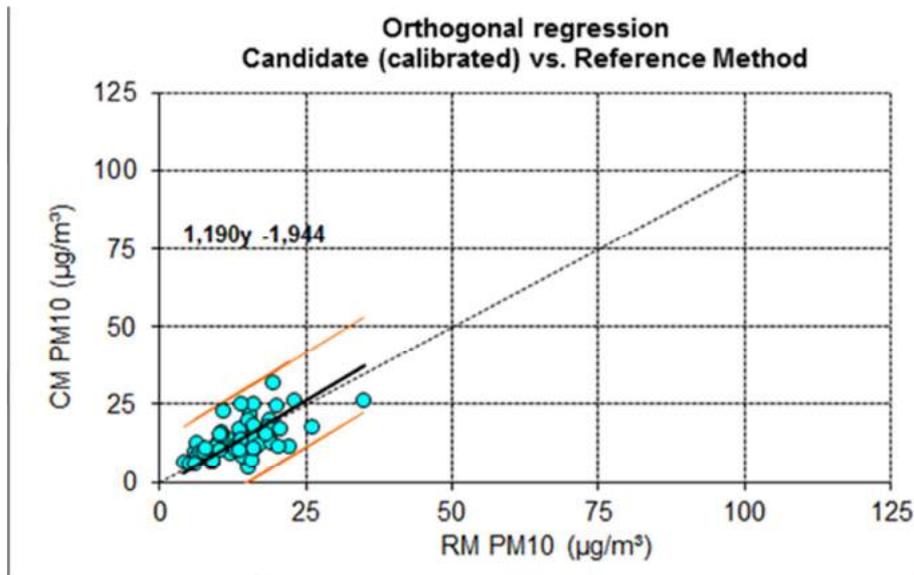


Figure 29 : Calibration des données journalières en PM10 – capteur 081061500015 – Période de reproductibilité

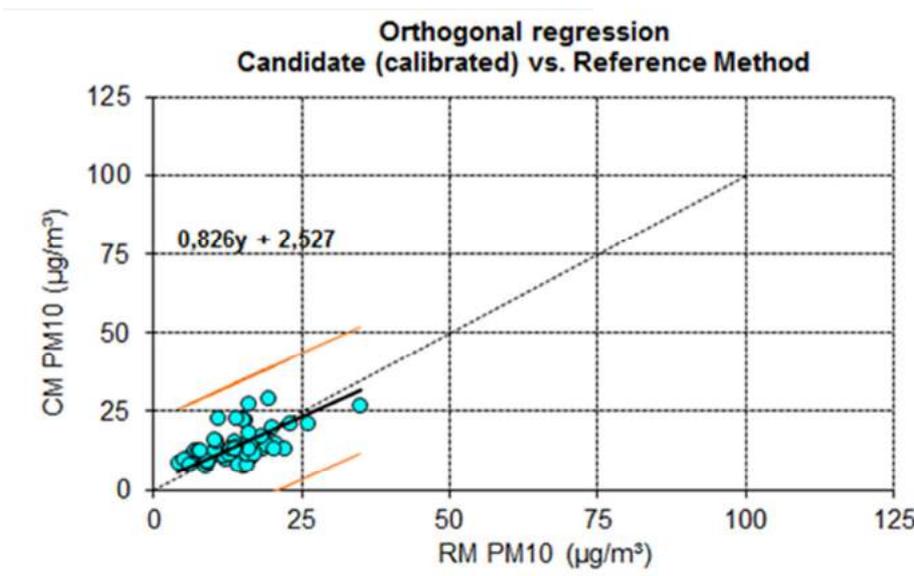


Figure 30 : Calibration des données journalières en PM10 – capteur 081061500014 – Période de reproductibilité

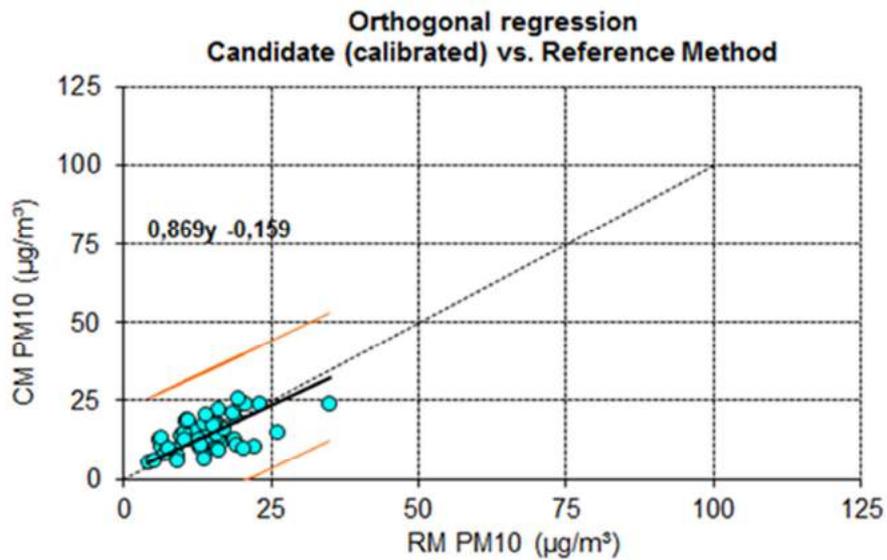


Figure 31 : Calibration des données journalières en PM10 – capteur 081041500009 – Période de reproductibilité

<i>Micro-capteur</i>	<i>Incertitude relative avant calibration</i>	<i>Incertitude relative après calibration</i>
<b>081061500015</b>	<b>31 %</b>	<b>35 %</b>
<b>081061500014</b>	<b>38 %</b>	<b>37 %</b>
<b>081041500009</b>	<b>39 %</b>	<b>36 %</b>

Tableau 9 : Incertitude relative avant et après calibration des données journalières PM10 pour chaque micro-capteur – Période de reproductibilité

## Annexe 2 : Calibration des valeurs journalières en PM2,5

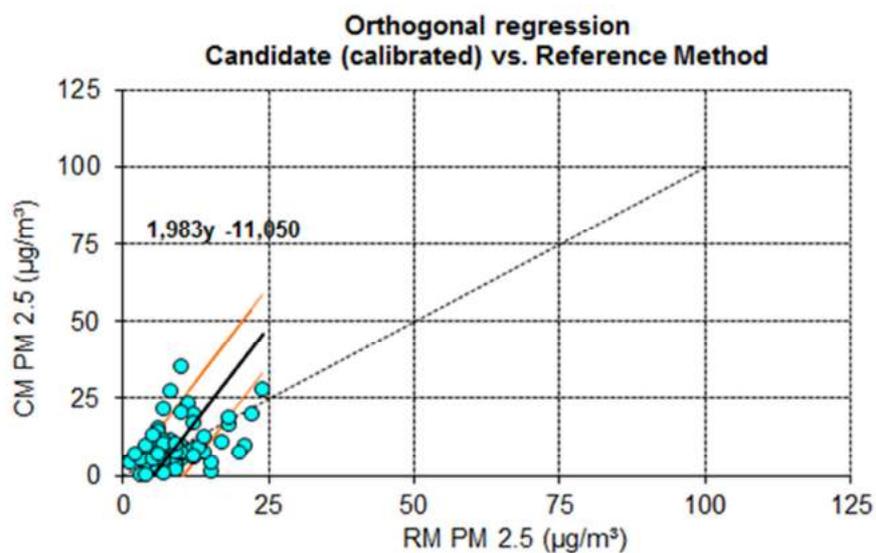


Figure 32 : Calibration des données journalières en PM2,5 – capteur 081061500015 – Période de reproductibilité

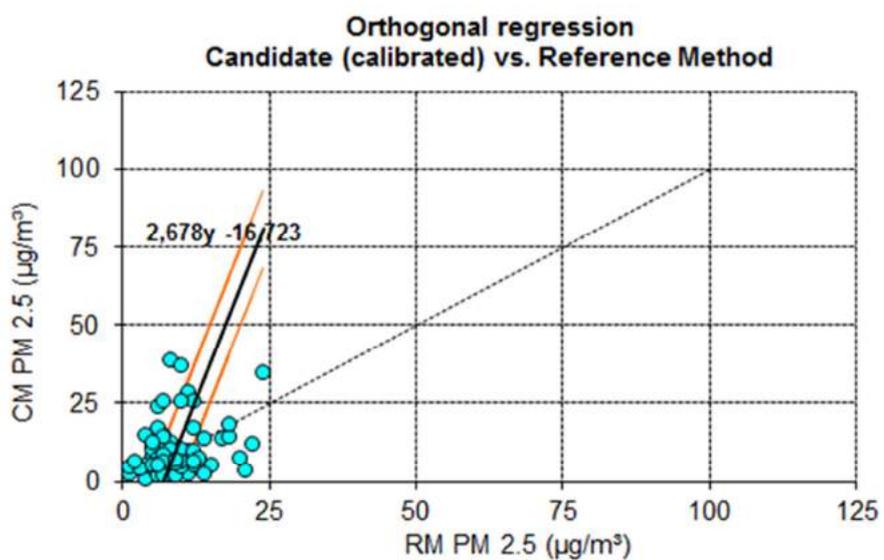


Figure 33 : Calibration des données journalières en PM2,5 – capteur 081061500014 – Période de reproductibilité

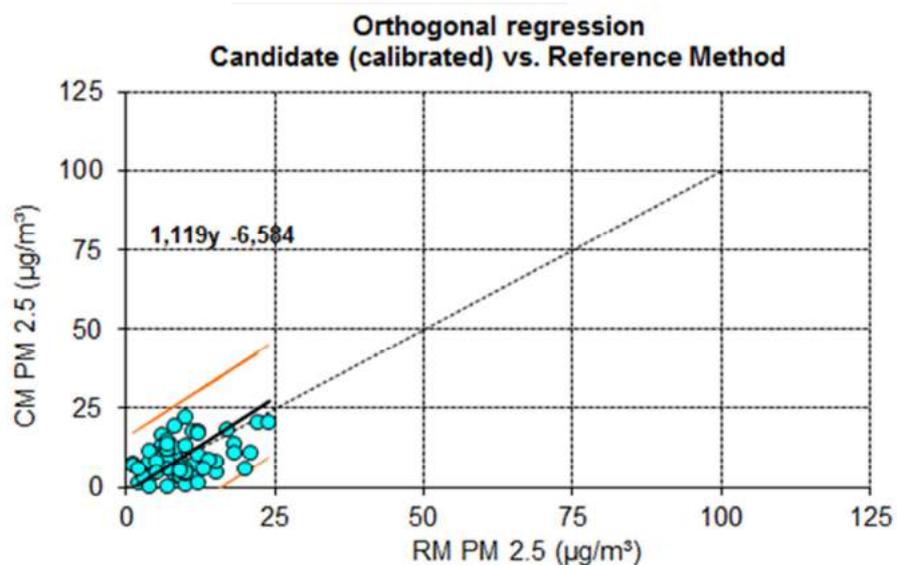


Figure 34 : Calibration des données journalières en PM<sub>2,5</sub> – capteur 081041500009 – Période de reproductibilité

<i>Micro-capteur</i>	<i>Incertitude relative avant calibration</i>	<i>Incertitude relative après calibration</i>
<b>081061500015</b>	<b>61 %</b>	<b>208 %</b>
<b>081061500014</b>	<b>80 %</b>	<b>517 %</b>
<b>081041500009</b>	<b>49 %</b>	<b>63 %</b>

Tableau 10 : Incertitude relative avant et après calibration des données journalières PM<sub>2,5</sub> pour chaque micro-capteur – Période de reproductibilité

# Liste des illustrations

## Liste des photos :

<i>Photo 1 : Micro-capteur, fixé à l'intérieur du boîtier blanc (homesense), équipé de son panneau solaire .....</i>	<i>6</i>
<i>Photo 2 : Préleveur Leckel 47/50-CD .....</i>	<i>6</i>
<i>Photo 3 : Vue d'ensemble du laboratoire de gravimétrie d'Air PACA .....</i>	<i>7</i>
<i>Photo 4 : Balances de précision utilisées dans le laboratoire de gravimétrie .....</i>	<i>8</i>

## Liste des graphes :

<i>Figure 1 : Série chronologique brute des concentrations journalières en PM10 - période estivale.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure 2 : Série chronologique brute des concentrations journalières en PM10 – période hivernale .....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 3 : Série chronologique des concentrations journalières en PM10, sans couples discordants – période estivale .....</i>	<i>12</i>
<i>Figure 4 : Série chronologique des concentrations journalières en PM10, sans couples discordants – période hivernale.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure 5 : Biais des valeurs journalières en PM10 des différents micro-capteurs et de l'analyseur automatique par rapport à la gravimétrie – Période d'équivalence.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure 6 : Diagramme Box-Plot présentant la dispersion du biais moyen journalier en PM10, en valeur absolue, pour chaque micro-capteur ainsi que pour l'analyseur automatique, par rapport à la gravimétrie – Période d'équivalence .....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 7 : Corrélations des valeurs PM10 journalières des micro-capteurs et de l'analyseur par rapport à la gravimétrie – Période d'équivalence.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 8 : Profil horaire moyen des données PM10 des trois micro-capteurs et de l'analyseur automatique en période estivale (à gauche) et en période hivernale (à droite).....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 9 : Corrélations des valeurs PM10 horaires des différents micro-capteurs par rapport à l'analyseur automatique – Période d'équivalence.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 10 : Diagramme Box-Plot présentant la dispersion du biais moyen horaire en PM10, en valeur absolue, pour chaque micro-capteur par rapport à l'analyseur automatique – Période d'équivalence .....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 11 : Série chronologique brute des concentrations journalières en PM2,5 - période estivale.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure 12 : Série chronologique brute des concentrations journalières en PM2,5 - période hivernale .....</i>	<i>21</i>
<i>Figure 13 : Série chronologique des concentrations journalières en PM2,5, sans couples discordants – période estivale .....</i>	<i>22</i>

<i>Figure 14 : Série chronologique des concentrations journalières en PM2,5, sans couples discordants – période hivernale</i> .....	22
<i>Figure 15 : Biais des valeurs journalières en PM2,5 des différents micro-capteurs par rapport à l'analyseur pour les deux périodes de mesure (estivale et hivernale)</i> .....	23
<i>Figure 16 : Diagramme Box-Plot présentant la dispersion du biais moyen journalier en PM2,5, en valeur absolue, pour chaque micro-capteur par rapport à l'analyseur automatique – Période d'équivalence</i> .....	24
<i>Figure 17 : Corrélations des valeurs journalières en PM2,5 des différents micro-capteurs par rapport à l'analyseur automatique – Période d'équivalence</i> .....	25
<i>Figure 18 : Résultats (en pourcentage) de l'application du Z-Score sur les données horaires PM2,5 des micro-capteurs – Période d'équivalence</i> .....	26
<i>Figure 19 : Profil horaire des données PM10 des trois micro-capteurs et de l'analyseur automatique en période estivale (à gauche) et en période hivernale (à droite)</i> .....	26
<i>Figure 20 : Corrélations des valeurs PM10 horaires des différents micro-capteurs par rapport à l'analyseur automatique – Période d'équivalence</i> .....	27
<i>Figure 21 : Diagramme Box-Plot présentant la dispersion du biais moyen horaire en PM2,5, en valeur absolue, pour chaque micro-capteur par rapport à l'analyseur automatique – Période d'équivalence</i> .....	28
<i>Figure 22 : Biais moyen horaire en PM2,5, en valeur absolue, de chaque micro-capteur par rapport à l'analyseur automatique – Période d'équivalence</i> .....	28
<i>Figure 23 : Série chronologique brute des concentrations journalières en PM10 mesurées par les différents micro-capteurs et par gravimétrie – Période de reproductibilité</i> .....	31
<i>Figure 24 : Résultats (en pourcentage) de l'application du Z-Score sur les données journalières PM10 des micro-capteurs – Période de reproductibilité</i> .....	31
<i>Figure 25 : Série chronologique des concentrations journalières en PM10, sans couples discordants – Période de reproductibilité</i> .....	32
<i>Figure 26 : Diagramme Box-Plot présentant la dispersion du biais moyen journalier en PM10, en valeur absolue, pour chaque micro-capteur par rapport à la gravimétrie – Période de reproductibilité</i> .....	33
<i>Figure 28 : Coefficients de détermination <math>R^2</math> des valeurs journalières PM10 des micro-capteurs les uns par rapport aux autres – Période de reproductibilité</i> .....	34
<i>Figure 29 : Coefficients de détermination <math>R^2</math> des valeurs journalières PM2,5 des micro-capteurs les uns par rapport aux autres – Période de reproductibilité</i> .....	34
<i>Figure 30 : Calibration des données journalières en PM10 – capteur 081061500015 – Période de reproductibilité</i> .....	38
<i>Figure 31 : Calibration des données journalières en PM10 – capteur 081061500014 – Période de reproductibilité</i> .....	38
<i>Figure 32 : Calibration des données journalières en PM10 – capteur 081041500009 – Période de reproductibilité</i> .....	39

<i>Figure 33 : Calibration des données journalières en PM2,5 – capteur 081061500015 – Période de reproductibilité</i>	40
<i>Figure 34 : Calibration des données journalières en PM2,5 – capteur 081061500014 – Période de reproductibilité</i>	40
<i>Figure 35 : Calibration des données journalières en PM2,5 – capteur 081041500009 – Période de reproductibilité</i>	41

### **Liste des tableaux :**

<i>Tableau 1 : Description du paramètre statistique (Z-Score)</i>	11
<i>Tableau 2 : Résultats (en pourcentage) de l'application du Z-Score sur les données journalières PM10 des micro-capteurs – Période d'équivalence</i>	11
<i>Tableau 3 : Biais moyen PM10 journalier, en valeur absolue, de chaque micro-capteur et de l'analyseur automatique – Période d'équivalence</i>	14
<i>Tableau 4 : Résultats (en pourcentage) de l'application du Z-Score sur les données horaires PM10 des micro-capteurs – Période d'équivalence</i>	16
<i>Tableau 5 : Biais moyen horaire en PM10, en valeur absolue, de chaque micro-capteur par rapport à l'analyseur automatique – Période d'équivalence</i>	18
<i>Tableau 6 : Résultats (en pourcentage) de l'application du Z-Score sur les données journalières PM2,5 des micro-capteurs – Période d'équivalence</i>	21
<i>Tableau 7 : Biais moyen journalier en PM2,5, en valeur absolue, de chaque micro-capteur par rapport à l'analyseur automatique – Période d'équivalence</i>	24
<i>Tableau 8 : Biais moyen, en valeur absolue, des valeurs journalières en PM10 des différents micro-capteurs par rapport à la gravimétrie – Période de reproductibilité</i>	33
<i>Tableau 9 : Incertitude relative avant et après calibration des données journalières PM10 pour chaque micro-capteur – Période de reproductibilité</i>	39
<i>Tableau 10 : Incertitude relative avant et après calibration des données journalières PM2,5 pour chaque micro-capteur – Période de reproductibilité</i>	41

### **Liste des cartes :**

<i>Carte 1 : Stratégie d'échantillonnage des micro-capteurs sur l'écoquartier de la Plaine du Var à Nice</i>	37
--	----

# Glossaire

## Définitions

**Valeur cible** : Un niveau de concentration fixé dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine et/ou l'environnement dans son ensemble, à atteindre dans la mesure du possible sur une période donnée.

**Valeur limite** : Un niveau de concentration fixé sur la base des connaissances scientifiques, dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine et/ou l'environnement dans son ensemble, à atteindre dans un délai donné et à ne pas dépasser une fois atteint.

## Polluants

**CO<sub>2</sub>** : Dioxyde de carbone

**NO** : Monoxyde d'azote

**NO<sub>2</sub>** : Dioxyde d'azote

**NO<sub>x</sub>** : Oxydes d'azote - Regroupe le Monoxyde d'azote (NO) et le Dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>)

**O<sub>3</sub>** : Ozone

**PM** : Particules en suspension (Particulate Matter)

**PM<sub>10</sub>** : Particules de diamètre inférieur à 10 microns

**PM<sub>2,5</sub>** : Particules de diamètre inférieur à 2,5 microns

## Abréviations

**AASQA** : Association Agréée pour la Surveillance de la Qualité de l'Air

**CM** : Candidate method

**FTP** : File Transfer Protocol

**Nb** : Nombre

**PRSE** : Plan Régional Santé Environnement

**RIVM** : Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (Netherlands National Institute for Public Health and the Environment)

**RM** : Reference method

**VL** : Valeur limite

**μ** : micro

## Unités de mesure

**HR** : Humidité relative

**mm** : millimètre(s)

**Ppb** : Nombre de molécules du gaz à effet de serre considéré par milliard de molécules d'air.

**μg/m<sup>3</sup>** : microgramme (1 μg = 10<sup>-6</sup> g = 0.000001 g) par mètre-cube. Unité de concentration la plus couramment utilisée pour quantifier la masse d'un polluant par mètre-cube d'air.

**°C** : Degré(s) Celsius

# Qualité de l'air

PROVENCE - ALPES - CÔTE D'AZUR

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

### Résumé

Air PACA 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.

La facilité d'implantation et le coût abordable des micro-capteurs communicants et autonomes sont les atouts mis en avant pour accroître le nombre de points de mesure. Il s'agit ici des micro-capteurs GSM AQ Feel du groupe TERA pour la mesure des PM10 et PM2,5.

Trois phases distinctes composent ce projet :

- 1. Phase préalable : validation métrologique des micro-capteurs
- 2. Phase de déploiement : application à une zone d'intérêt
- 3. Phase de cartographie : cartographie de pollution et d'exposition

La première phase de ce projet fait l'objet de ce rapport et consiste à évaluer la précision et la fiabilité des micro-capteurs lors de leur mise en œuvre opérationnelle pour la surveillance de l'air ambiant.

Ainsi, des tests d'équivalence ont été réalisés par rapport à la méthode de mesure de référence : la gravimétrie. Ces tests permettent de définir la justesse et l'incertitude relative des micro-capteurs par rapport à la référence.

Aussi, des tests de reproductibilité ont été effectués en complément et donnent une indication sur la dispersion des mesures entre les micro-capteurs eux-mêmes.

Enfin, l'ensemble des résultats permet d'établir des préconisations d'utilisation de ces micro-capteurs pour la suite du projet.

Responsable de publication : Thomas ALEIXO

Date : Octobre 2016

Photos : Archives Air PACA



**AirPACA**  
QUALITÉ DE L'AIR  
[www.airpaca.org](http://www.airpaca.org)

#### Siège social

146, rue Paradis  
« Le Noilly Paradis »  
13294 Marseille Cedex 06  
Tél. 04 91 32 38 00  
Télécopie 04 91 32 38 29

#### Établissement de Martigues

Route de la Vierge  
13500 Martigues  
Tél. 04 42 13 01 20  
Télécopie 04 42 13 01 29



#### Établissement de Nice

333, Promenade des Anglais  
06200 Nice  
Tél. 04 93 18 88 00  
Télécopie 04 93 18 83 06

[www.airpaca.org](http://www.airpaca.org)

**AirPACA**  
QUALITÉ DE L'AIR