

Evaluation des micro-capteurs Clarity pour la mesure des poussières en suspension PM2.5 Campagne de mesure février-juin. 2018

Référence : 4300-003-A

Diffusion : avril 2019

Atmo Normandie

3 Place de la Pomme d'Or, 76000 ROUEN

Tél. : +33 2.35.07.94.30

Fax : +33 2.35.07.94.40

contact@atmonormandie.fr

Avertissement

Atmo Normandie est l'association agréée de surveillance de la qualité de l'air en Normandie. Elle diffuse des informations sur les problématiques liées à la qualité de l'air dans le respect du cadre légal et réglementaire en vigueur et selon les règles suivantes :

La diffusion des informations vers le grand public est gratuite. Atmo Normandie est libre de leur diffusion selon les modalités de son choix : document papier, communiqué, résumé dans ses publications, mise en ligne sur son site internet (www.atmonormandie.fr), ... Les documents ne sont pas systématiquement rediffusés en cas de modification ultérieure.

Lorsque des informations sous quelque forme que ce soit (éléments rédactionnels, graphiques, cartes, illustrations, photographies...) sont susceptibles de relever du droit d'auteur elles demeurent la propriété intellectuelle exclusive de l'association. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle de ces informations faite sans l'autorisation écrite d'Atmo Normandie est illicite et constituerait un acte de contrefaçon sanctionné par les articles L.335-2 et suivants du Code de la Propriété Intellectuelle.

Pour le cas où le présent document aurait été établi pour partie sur la base de données et d'informations fournies à Atmo Normandie par des tiers, l'utilisation de ces données et informations ne saurait valoir validation par Atmo Normandie de leur exactitude. La responsabilité d'Atmo Normandie ne pourra donc être engagée si les données et informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées, quelles qu'en soient les répercussions.

Atmo Normandie ne peut en aucune façon être tenue responsable des interprétations, travaux intellectuels et publications diverses de toutes natures, quels qu'en soient les supports, résultant directement ou indirectement de ses travaux et publications.

Les recommandations éventuellement produites par Atmo Normandie conservent en toute circonstance un caractère indicatif et non exhaustif. De ce fait, pour le cas où ces recommandations seraient utilisées pour prendre une décision, la responsabilité d'Atmo Normandie ne pourrait en aucun cas se substituer à celle du décideur.

Toute utilisation totale ou partielle de ce document, avec l'autorisation contractualisée d'Atmo Normandie, doit indiquer les références du document et l'endroit où ce document peut être consulté.

Rapport n° 4300-003_A

Le 15/05/2019

Le rédacteur,
Benoit Wastine

Le responsable de pôle,
Sébastien Le Meur

Atmo Normandie – 3, Place de la Pomme d'Or - 76000 ROUEN

Tél. : 02 35 07 94 30 - mail : contact@atmonormandie.fr

www.atmonormandie.fr

Résumé

La surveillance de la qualité de l'air voit depuis plusieurs années se développer l'utilisation des micro-capteurs pour la mesure des polluants atmosphériques. Plus petits, plus autonomes, moins onéreux, mais aussi moins fiables, ils ouvrent de nouvelles perspectives pour notamment une surveillance au plus proche du citoyen. Comme inscrit dans son PRSQA 2017-2021, Atmo Normandie souhaite « Innover et s'adapter » autour de l'utilisation de ces nouvelles technologies. Il s'agit non seulement de se maintenir au fait des nouvelles solutions disponibles et des nouvelles applications, mais aussi de tester des dispositifs afin de renforcer son expertise pour in fine mieux conseiller et accompagner ses membres sur l'utilisation des micro-capteurs.

Dans le cadre d'un partenariat mené avec la société CITEOS sur l'étude de la qualité de l'air à l'échelle d'un quartier de la ville de Rouen, Atmo Normandie a testé les micro-capteurs PM2.5¹ du fabricant américain Clarity Movement Co entre février et juin 2018. Quatre micro-capteurs PM2.5 ont ainsi été mis à disposition d'Atmo Normandie qui les a installés par paire sur ses deux sites de mesures des PM2.5 à Rouen, en situation de fond urbain et en situation de proximité automobile. Après une période d'environ 1 mois et demi qui a permis à Clarity de mettre au point son modèle pour corriger les données 'brutes' de ses capteurs, deux des quatre instruments ont été mis à disposition de CITEOS tandis que l'exercice d'intercomparaison s'est poursuivi sur les deux sites d'Atmo Normandie avec les deux micro-capteurs Clarity restants.

Dans la continuité d'un rapport écrit par Clarity détaillant les résultats d'intercomparaison obtenus lors de la 1^{ère} phase de l'expérimentation, le présent document complète l'analyse avec l'exploitation des données obtenues lors de la seconde phase. Une attention particulière est portée à l'apport des méthodes de correction des données, en comparant aux mesures de référence PM2.5 à la fois les mesures Clarity 'brutes' et les mesures Clarity 'corrigées' par différents algorithmes, dont celui utilisé par Clarity. Les résultats obtenus montrent que les méthodes de correction permettent d'améliorer significativement la qualité des mesures, avec cependant une tendance à la sous-estimation des concentrations pour les niveaux de PM2.5 supérieurs à 30 µg/m³. L'analyse des données accumulées pendant près de 5 mois a permis de mettre une évidence une légère dérive des capteurs Clarity. La question de la stabilité dans le temps des méthodes de correction, construite sur un jeu de données fini, est donc posée tout comme celle de leur 'transférabilité' dans l'espace sachant que la méthode de mesure utilisée (comptage optique) est sensible à la composition des particules analysées. Cette dernière question n'a pas pu être évaluée dans le cadre de cette expérimentation.

¹ PM2.5 : particules en suspension de diamètre inférieure à 2.5 µm

Sommaire

1.	Introduction.....	5
2.	Éléments nécessaires à la compréhension du document	5
2.1	Contexte.....	5
2.2	Objectifs et approche choisie	5
3.	Matériels et Méthodes.....	6
3.1	Les sites de mesure.....	6
3.2	Les instruments de mesure PM2.5 d'Atmo Normandie.....	7
3.3	Les micro-capteurs Clarity	8
3.4	La « smart-calibration » par Clarity	9
3.5	Méthodologie pour l'analyse des données.....	10
4.	Resultats.....	10
4.1	Période#1, du 07-février au 21-mars 2018	10
4.1.1.1	<i>Conditions expérimentales</i>	<i>11</i>
4.1.1.2	<i>Variabilité inter-capteurs</i>	<i>11</i>
4.1.1.3	<i>Apport de la correction par Clarity.....</i>	<i>12</i>
4.2	Période#2, du 08-avril au 25-juin 2018.....	13
4.2.1.1	<i>Conditions expérimentales</i>	<i>13</i>
4.2.1.2	<i>Dérive des capteurs Clarity.....</i>	<i>14</i>
4.2.1.3	<i>Evaluation de quelques modèles de correction de données.....</i>	<i>15</i>
5.	Conclusion et perspectives.....	19
6.	Annexe : Rapport rédigé par Clarity.....	20



1. Introduction

Atmo Normandie a récemment collaboré avec la société CITEOS qui gère la régulation des feux de signalisation pour le compte de la métropole rouennaise. Le partenariat s'est inscrit dans le cadre d'une étude pilote menée par CITEOS sur la ville de Rouen visant à étudier, à l'échelle d'un quartier, l'impact de la régulation du trafic automobile sur la qualité de l'air environnante, en utilisant à la fois la modélisation fine échelle et la mesure par micro-capteurs. C'est dans ce contexte qu'Atmo Normandie a eu l'occasion de tester les capteurs PM2.5 de la société américaine Clarity Movement Co qui a proposé de participer à l'étude. Une spécificité du fabricant Clarity est qu'il associe à ses capteurs des méthodes de traitement de données censées corriger les biais inhérents à la technique de mesure (comptage optique) utilisée. Pour adapter son modèle de correction aux conditions locales du déploiement de ses capteurs, Clarity recommande de disposer d'une période d'intercomparaison entre ses capteurs et des mesures de référence. C'est ainsi qu'il a été convenu entre Clarity et Atmo Normandie une collaboration visant à installer des capteurs Clarity PM2.5 sur des stations de mesure d'Atmo Normandie équipées pour la mesure de PM2.5 à Rouen. Pour Clarity, il s'agissait de pouvoir disposer de données d'intercomparaison afin d'établir son modèle de correction des données. Pour Atmo Normandie, l'opportunité était offerte de continuer ses travaux sur la thématique 'micro-capteurs' avec l'évaluation métrologique de nouveaux capteurs et surtout l'évaluation de la plus-value apportée par les modèles de correction implémentés par le fabricant. Atmo Normandie s'était en effet mis d'accord avec Clarity pour disposer à la fois des mesures corrigées par Clarity mais aussi des mesures 'brutes' issues des capteurs.

2. Éléments nécessaires à la compréhension du document

2.1 Contexte

La surveillance de la qualité de l'air voit depuis plusieurs années se développer l'utilisation des micro-capteurs pour la mesure des polluants atmosphériques. Plus petits, plus autonomes, moins onéreux, mais aussi moins fiables, ils ouvrent de nouvelles perspectives pour notamment une surveillance au plus proche du citoyen. Comme inscrit dans son PRSQA 2017-2021, Atmo Normandie souhaite « Innover et s'adapter » autour de l'utilisation de ces nouvelles technologies. Il s'agit non seulement de se maintenir au fait des nouvelles solutions disponibles et des nouvelles applications, mais aussi de tester des dispositifs afin de renforcer son expertise pour in fine mieux conseiller et accompagner ses membres sur l'utilisation des micro-capteurs en apportant des jugements factuels sur l'exactitude des mesures, la stabilité dans le temps des dispositifs, la facilité d'utilisation et d'accès aux données, etc...

2.2 Objectifs et approche choisie

Menée entre février et juin 2018, l'évaluation des micro-capteurs Clarity s'est déroulée en deux temps. Tout d'abord, de février à avril, les 4 capteurs prêtés par Clarity furent installés par paire sur deux sites de mesure



d'Atmo Normandie à Rouen équipés pour la mesure des PM2.5. Cette étape d'intercomparaison avec les mesures de référence PM2.5 d'Atmo Normandie a été utilisée par Clarity pour mettre au point le modèle de correction des données qui a ensuite été appliquée à ses capteurs jusqu'à la fin de la campagne. Cette 1^{ère} période d'analyse a fait l'objet d'un rapport écrit par Clarity et joint en annexe qui détaille notamment l'apport de la correction des mesures, et dont les principaux résultats sont repris ici. A partir d'avril, 2 capteurs ont été utilisés par CITEOS pour les besoins de leur étude, l'exercice d'intercomparaison avec les instruments de référence d'Atmo Normandie se poursuivant avec les 2 capteurs restants sur les deux sites de mesure.

Au total, Atmo Normandie a disposé d'environ 5 mois de données d'intercomparaison PM2.5 pour deux capteurs, installés sur deux sites de typologie différente, à savoir un site de fond urbain et un site de proximité trafic. Parmi les paramètres métrologiques qui ont pu être évalués figurent la dérive dans le temps des capteurs ainsi que leur capacité à reproduire des mesures identiques. Pour ce qui est de la justesse, ou de l'étroitesse de l'accord entre les mesures des micro-capteurs et les mesures de référence, l'analyse a pu être faite sur l'ensemble de l'expérimentation à partir des données 'brutes' et des données corrigées par différents modèles. Reprenant la démarche de Clarity, le choix a en effet été fait de construire à partir des données de la 1^{ère} période différents algorithmes de correction et de les tester ensuite sur l'ensemble des jeux de données. L'objectif ici était de caractériser le potentiel de correction des mesures fournis par les micro-capteurs et les performances de différents modèles.

3. Matériels et Méthodes

3.1 Les sites de mesure

L'expérimentation d'intercomparaison a été menée sur les deux sites de mesure d'Atmo Normandie équipés pour la mesure des PM2.5 à Rouen, à savoir les sites dits de « Justice » (JUS) et de Quai de Paris (QDP). Ces deux sites de mesure situés à environ 700m l'un de l'autre sont de typologie différente ; la station de mesure de JUS est une station dite 'urbaine' localisée dans un secteur piétonnier, alors que celle de QDP est une station dite 'trafic', influencée directement par la proximité du trafic routier.

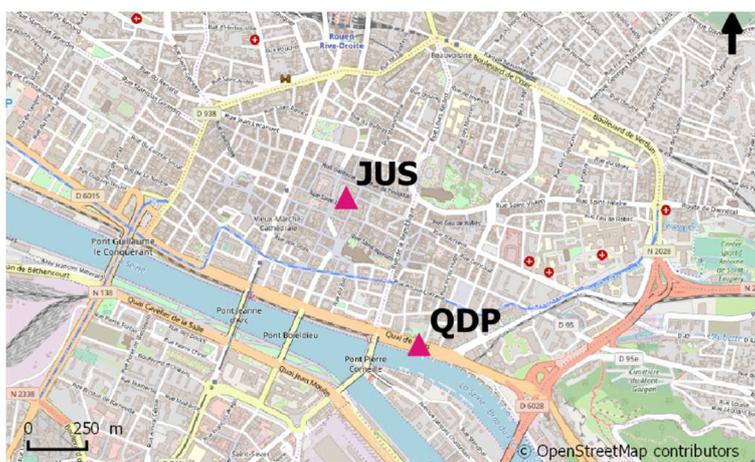


Figure 1 : plan de situation des stations de mesures d'Atmo Normandie à Rouen



Figures 2a,b: photographie des stations JUS (à gauche) et QDP (à droite)

3.2 Les instruments de mesure PM2.5 d'Atmo Normandie

La méthode de référence pour la mesure de la concentration massique des particules en suspension, est pour la fraction PM2.5, comme pour la fraction PM10², la méthode gravimétrique, c'est-à-dire la pesée de la masse de particules prélevées sur des filtres. Cette méthode n'est que peu utilisée pour la surveillance opérationnelle de la qualité de l'air car elle ne permet pas un suivi en temps réel des niveaux de particules. Comme l'autorise la directive 2008/50/CE, d'autres méthodes, cette fois automatiques, peuvent être utilisées pour peu que des tests d'évaluation aient pu démontrer leur équivalence à la méthode de référence. En France, le LCSQA³ tient ainsi à jour une liste d'instruments déclarés conformes techniquement pour la mesure de la concentration particulaire. Atmo Normandie s'est notamment équipée de TEOM FDMS (Thermo Scientific) sur le site de JUS et de BAM 1020 (Met One) sur le site de QDP qui font partie des instruments figurant sur cette liste

Brièvement, dans un instrument TEOM FDMS l'air est prélevé continuellement sur un filtre solidaire d'un élément oscillant dont la fréquence va varier avec la masse de particules collectées au cours du temps. La mesure de la concentration particulaire est ainsi déduite de la mesure d'une variation de fréquence. Un module appelé FDMS permet de mesurer la fraction semi-volatile⁴ des particules prélevées. L'instrument BAM 1020 du fabricant Met One repose lui sur l'absorption d'un rayonnement beta qui est fonction de la masse de matière traversée par les rayons, indépendamment de sa nature physico-chimique. Les particules sont collectées continuellement sous forme de tâches sur une bande filtrante qui va defiler au cours du temps. La tâche est soumise à une quantité connue de rayonnement beta émis par une source radioactive de très faible activité tandis qu'un détecteur mesure la quantité de rayonnement qui traverse la tâche. L'atténuation de rayonnement observée, directement dépendante de la quantité de particules prélevée sur la tâche, permet ainsi d'estimer la concentration particulaire dans l'air prélevé.

L'instrument TEOM permet d'effectuer des mesures de concentration de PM2.5 sur un pas de temps de 15 minutes tandis qu'avec l'instrument BAM 1020 les concentrations massiques sont mises à jour toutes les heures.

² PM10 : particules en suspension dans l'air d'un diamètre inférieur à 10 µm

³ LCSQA : Laboratoire Centrale de la Surveillance de la Qualité de l'Air (www.lcsqa.org)

⁴ Particules qui peuvent passer à l'état de gaz lorsque la température ambiante augmente et que l'humidité relative diminue.



Figures 3a,b: instrument BAM 1020 (à gauche) et instrument TEOM FDMS (à droite)

3.3 Les micro-capteurs Clarity

Les micro-capteurs Clarity PM_{2.5} se présentent sous la forme d'un boîtier de faible encombrement conçu pour être installé typiquement sur du mobilier urbain et pour fonctionner de façon autonome, avec panneau solaire pour l'alimentation électrique et avec module GSM pour le transfert des données.



Figures 4a,b: capteur Clarity Node-S et installation sur la station de JUS

La technologie utilisée est le comptage optique qui permet de convertir un nombre de particules (comptage) en masse de particules (concentration massique en $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Brièvement, une source lumineuse (diode laser ou LED) illumine en continu les particules qui traversent la cellule de mesure tandis qu'un photodétecteur mesure la quantité de lumière diffractée par les particules pour en déduire, considérant des hypothèses simplificatrices notamment sur la nature des particules, tout d'abord un nombre de particules par unité de volume puis une concentration massique. Cette technologie est connue pour souffrir de plusieurs interférents, en 1^{er} lieu la nature

(taille, forme, propriétés optiques) des particules mais également les facteurs environnementaux température et humidité. C'est pourquoi, comme c'est le cas ici, la plupart de ces capteurs intègrent également une mesure de température et d'humidité qui permet une correction a posteriori des effets de ces interférents.

Une fois installé, les capteurs Clarity ont fonctionné de façon autonome grâce à leur panneau solaire et à leur module GSM. Les mesures PM2.5 ont été effectuées avec un pas de temps de 15 minutes. Les mesures étaient transférées automatiquement en temps réel vers un serveur Clarity et pouvaient être visualisées et téléchargées via une interface web.

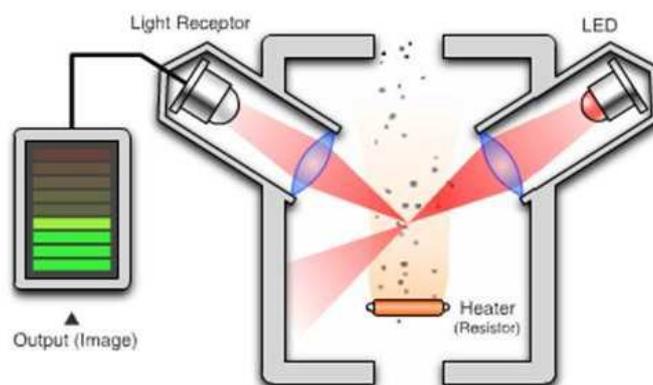


Figure 5 : description schématique du fonctionnement d'un compteur optique de particules (source : www.aqmd.gov)

3.4 La « smart-calibration » par Clarity

Les capteurs Clarity mesurent un nombre de particules par unité de volume et cette mesure est ensuite convertie en concentration massique sur la base d'un certain nombre d'hypothèses concernant les propriétés des aérosols analysés. La nature des particules étant susceptible de varier dans le temps et dans l'espace, ces hypothèses simplificatrices peuvent conduire à des biais sur la conversion nombre / masse plus ou moins prononcés. Les capteurs utilisés n'étant pas capables de mesurer en temps réel la composition des particules pour adapter les facteurs de calibration (conversion nombre / masse), Clarity propose avec sa 'smart-calibration' de corriger périodiquement les mesures de ses capteurs en fonction de mesures de référence. Comme illustré sur la figure 6 tirée du rapport écrit par Clarity, dans le schéma d'un réseau de capteurs déployés à l'échelle d'une ville par exemple, Clarity recommande ainsi d'avoir au moins un capteur installé en colocation avec un instrument de référence. De la comparaison avec les mesures de référence, des facteurs de calibration pourraient ainsi être périodiquement calculés selon un modèle qui d'après Clarity repose sur la régression linéaire. Cette calibration serait ensuite transférée aux autres capteurs du réseau en prenant en compte leur environnement géographique ainsi que leurs mesures de température et d'humidité relative. Comme expliqué par Clarity, ce modèle suppose que tous les capteurs déployés sont de base bien reproductibles entre eux. Peu de détails sont par contre donnés sur la méthodologie utilisée pour adapter géographiquement la correction des capteurs et la périodicité à laquelle cette correction doit être mise à jour.

Dans le cadre de l'expérimentation, il a été possible d'évaluer la pertinence de la smart-calibration pour les capteurs déployés sur les sites de colocation, c'est-à-dire sa capacité à corriger efficacement les mesures brutes par rapport aux mesures de référence. Par contre, nous n'avons pas pu évaluer la transférabilité de la smart calibration à des capteurs qui auraient été déployés sur d'autres sites.

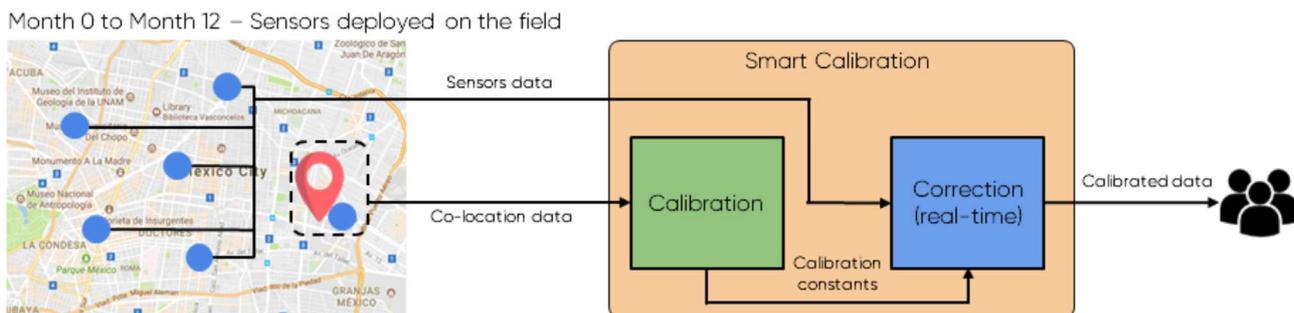


Figure 6 : modèle de déploiement d'un réseau de microcapteurs tel que préconisé par Clariy (source : Clarity)

3.5 Méthodologie pour l'analyse des données

L'analyse des données a été effectuée à partir des moyennes horaires calculées pour les capteurs Clarity et les instruments de référence d'Atmo Normandie.

L'évaluation des micro-capteurs Clarity déployés sur les sites de JUS et QDP a été effectuée en calculant les indicateurs suivants :

- Biais moyen : moyenne des écarts entre la valeur de la concentration horaire PM2.5 mesurée par le micro-capteur Clarity et celle mesurée par l'instrument de référence ;
- Biais moyen absolu : moyenne des écarts en valeur absolue entre la valeur de la concentration horaire PM2.5 mesurée par le capteur Clarity et celle mesurée par l'instrument de référence. A l'inverse du 'Biais moyen', ce paramètre permet de mieux rendre compte de l'amplitude de l'erreur systématique ;
- Pente : valeur tirée de la régression linéaire appliquée aux mesures horaires Clarity en fonction des mesures horaires de l'instrument de référence. La valeur de la pente (coefficient directeur de la droite de régression linéaire) caractérise la capacité du capteur à produire des mesures justes par rapport aux mesures de référence. Plus la valeur de la pente sera proche de 1 et plus l'accord entre les deux mesures sera bon.
- Coefficient de détermination R^2 : valeur tirée de la régression linéaire appliquée aux mesures horaires Clarity en fonction des mesures horaires de l'instrument de référence. Critère de dispersion, le coefficient de détermination caractérise la capacité du capteur Clarity à produire des mesures fidèles au regard des mesures de référence.
- % des différences entre les mesures horaires Clarity et celles de référence comprises entre -5 et +5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

4. Resultats

4.1 Période#1, du 07-février au 21-mars 2018

Une partie des résultats présentés ci-après est extraite de l'analyse réalisée par Clarity (cf. rapport joint en annexe).

4.1.1.1 Conditions expérimentales

Durant cette 1^{ère} période d'intercomparaison, les températures moyennes horaires mesurées par les micro-capteurs Clarity déployés sur les sites de JUS et QDP ont varié entre -7°C et 22°C, avec une température moyenne sur la période de l'ordre de 6°C. Les conditions d'humidité relative ont varié entre 22% et 95% avec une valeur moyenne de l'ordre de 68% sur la période.

Les niveaux de PM2.5 et PM10 mesurés par les instruments de référence d'Atmo Normandie sont présentés dans le tableau 1. Ils sont restés faibles sur la période considérée et plutôt homogènes sur les deux sites, avec néanmoins des pointes horaires plus fortes sur le site trafic de QDP.

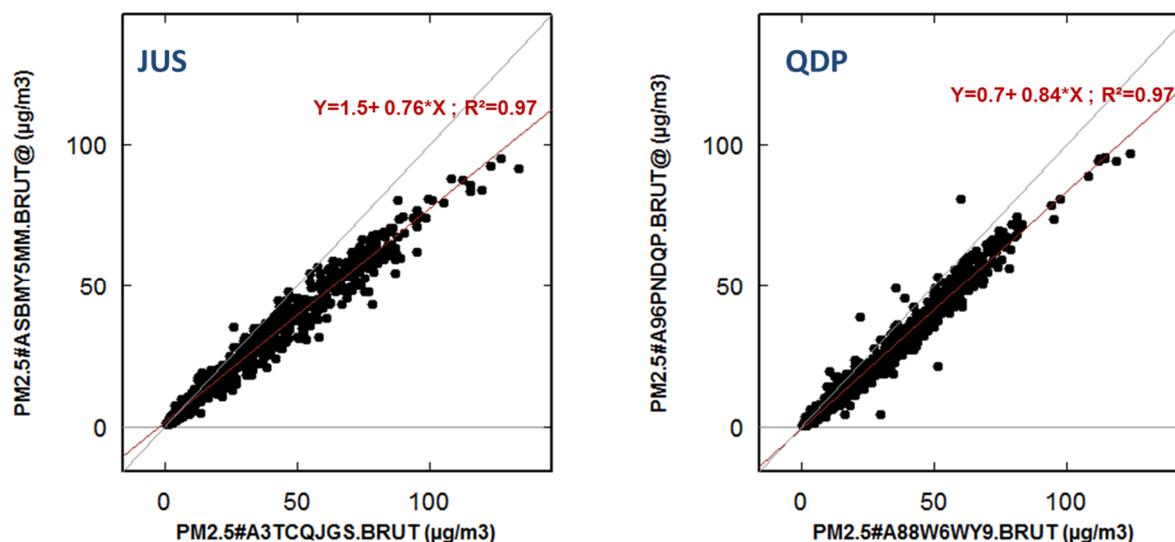
Enfin, concernant les taux de fonctionnement, ils ont été supérieurs à 95% pour 3 des 4 capteurs Clarity. Le capteur ASBMY5MM installé à JUS à quant lui souffert d'un taux de fonctionnement plus faible à 86% sans qu'une explication n'ait pu être avancée par le constructeur. Dans le même temps, les taux de fonctionnement des instruments de référence d'Atmo Normandie étaient de l'ordre de 97% sur les sites de JUS et QDP.

en µg/m ³		Moy	Perc.75	Max
JUS	PM2.5	13.8	20.2	71.4
	PM10	18.8	24.8	73.3
QDP	PM2.5	19.2	25.2	74.5
	PM10	26.9	33.9	97.9

Tableau 1 : statistiques descriptives (moyennes horaires) des niveaux de PM enregistrés par les instruments d'Atmo Normandie à JUS et QD du 07-février au 21-mars

4.1.1.2 Variabilité inter-capteurs

Sur les deux sites de mesures, deux micro-capteurs Clarity Node-S étaient installés en colocation avec la mesure de référence PM2.5 d'Atmo Normandie. Il a ainsi été possible d'évaluer la capacité des micro-capteurs Clarity à reproduire des mesures identiques. Comme illustré sur les figures 6a,b, même si les couples de micro-capteurs ne donnent pas exactement les mêmes résultats (la pente de la droite de régression linéaire étant différente de 1), ceux-ci sont néanmoins très corrélés et peu dispersés. Sur la durée de la période, l'écart moyen absolu relatif entre les deux capteurs est ainsi de l'ordre de 20% sur les deux sites

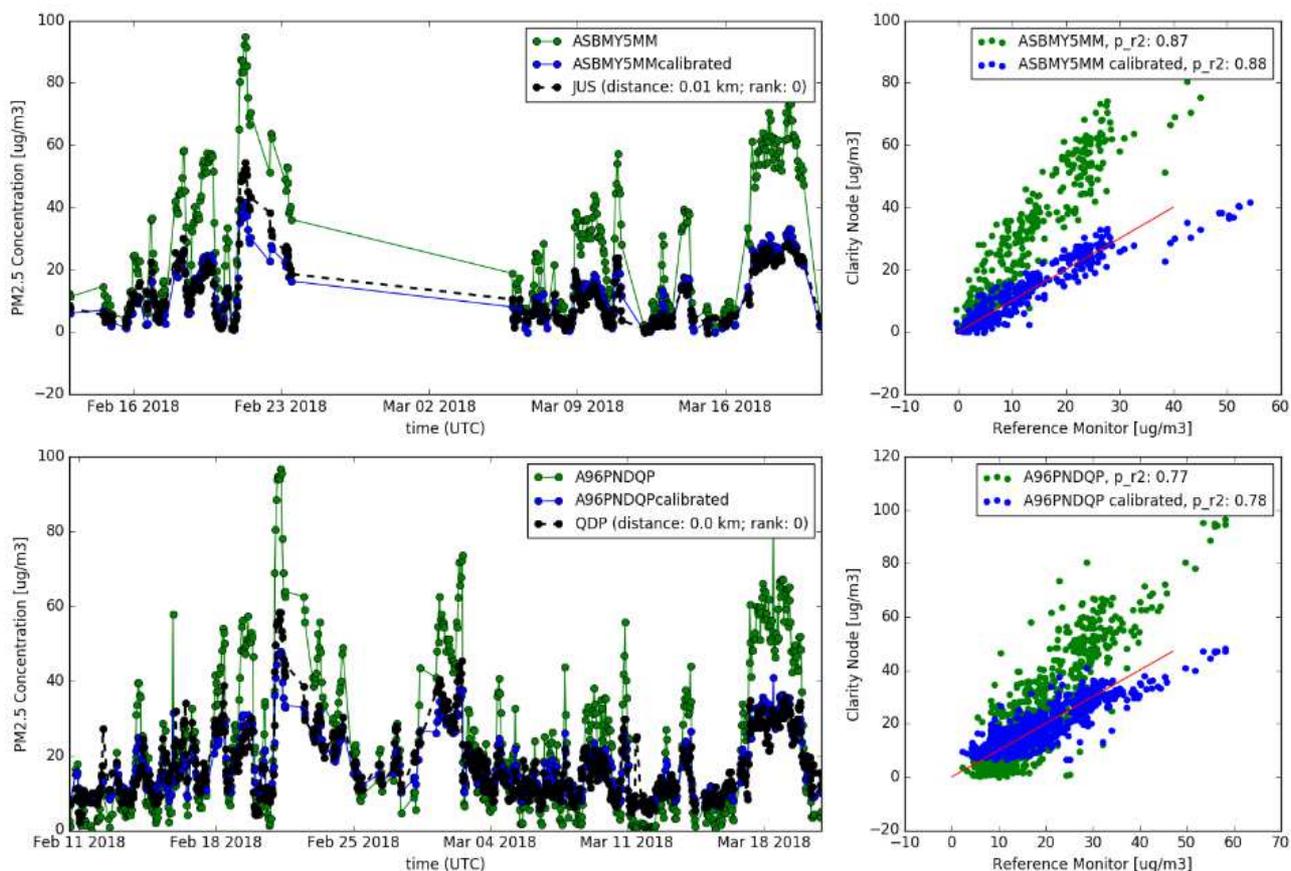


Figures 7a,b : comparaison entre les concentrations horaires PM2.5 mesurées par chacun des deux capteurs Clarity installés en colocation sur les sites de JUS (à gauche) et de QDP (à droite)

4.1.1.3 Apport de la correction par Clarity

Dans son rapport transmis à Atmo Normandie, Clarity présente la comparaison de ses capteurs avec les instruments de référence avec et sans utilisation de leur algorithme de correction des mesures. Pour rappel, cet algorithme a été justement mis au point pour chaque site à partir des données accumulées pendant la période d'intercomparaison.

Plusieurs points sont à souligner à la lecture des résultats. Tout d'abord, les micro-capteurs Clarity, même sans l'apport de la correction, reproduisent correctement la variabilité temporelle des niveaux de PM2.5 enregistrés sur les deux sites de mesure. Par contre, ils surestiment significativement les mesures de référence, de l'ordre de 100 à 150% sur le site 'JUS' et dans une moindre mesure sur le site de QDP (de l'ordre 50 à 90%). La correction des données mise au point par Clarity permet d'améliorer très nettement l'accord avec les mesures de référence avec des biais moyens absolus inférieurs à $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour tous les capteurs alors qu'ils étaient compris entre 10 et $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sans correction des mesures. Néanmoins, il apparaît que la correction appliquée par Clarity est moins performante quand les niveaux de PM2.5 sont supérieurs à $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$; les mesures corrigées ont alors plutôt tendance à sous-estimer les mesures de référence. Ceci peut s'expliquer par le fait que, sur la période d'étude considérée, il n'y a eu que peu d'évènements avec des niveaux de PM2.5 élevés pour pouvoir contraindre efficacement le modèle mis au point par Clarity. Enfin, il faut également noter une plus grande dispersion des données entre les mesures Clarity et les mesures de référence sur le site 'trafic' de QDP qui n'a pas été compensée avec l'apport des corrections et qui pourrait être liée à la nature des particules mesurées en situation de proximité automobile.



Figures 8a,b : séries temporelles et comparaison des concentrations horaires PM2.5 mesurées sur les sites de JUS (en haut) et de QDP (en bas) par l'instrument de référence d'Atmo Normandie (en noir) et par un capteur Clarity avec (en bleu) et sans (en vert) l'apport de la correction par Clarity

		capteurs Clarity à JUS		capteurs Clarity à QDP	
		A3TCQJGS	ASBMY5MM	A88W6WY9	A96PNDQP
Mesures brutes	Biais Moyen $\mu\text{g}/\text{m}^3$	20.1	13.0	10.5	5.2
	Biais Moy. Absolu $\mu\text{g}/\text{m}^3$	20.3	13.2	14.1	10.3
	R^2	0.90	0.87	0.75	0.77
Mesures corrigées	Biais Moyen $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
	Biais Moy. Absolu $\mu\text{g}/\text{m}^3$	2.5	2.6	3.6	3.6
	R^2	0.91	0.88	0.75	0.78

Tableau 2 : indicateurs de comparaison avec les mesures de référence calculés pour chacun des capteurs Clarity installés sur les sites d'Atmo Normandie entre le 07-février et le 21-mars

4.2 Période#2, du 08-avril au 25-juin 2018

4.2.1.1 Conditions expérimentales

Du 08-avril au 25-juin, l'expérimentation s'est poursuivie à JUS et à QDP avec respectivement les micro-capteurs Clarity A3TCQJGS et A88W6WY9. Les températures relevées par les micro-capteurs ont été plus élevées sur cette période, de l'ordre de 19°C, avec des moyennes horaires comprises entre 3°C et 41°C à JUS et QDP. Les conditions d'humidité relative sont restées sensiblement comparables à la 1^{ère} période, de l'ordre de 61% avec des moyennes horaires variant entre 17% et 95%. A la différence des niveaux PM10, les niveaux de PM2.5 mesurés par les instruments de référence d'Atmo Normandie ont été globalement plus faibles que lors de la période précédente (tableau 3), avec des concentrations horaires inférieures à 16 et 20 µg/m³ 75% du temps à JUS et QDP respectivement.

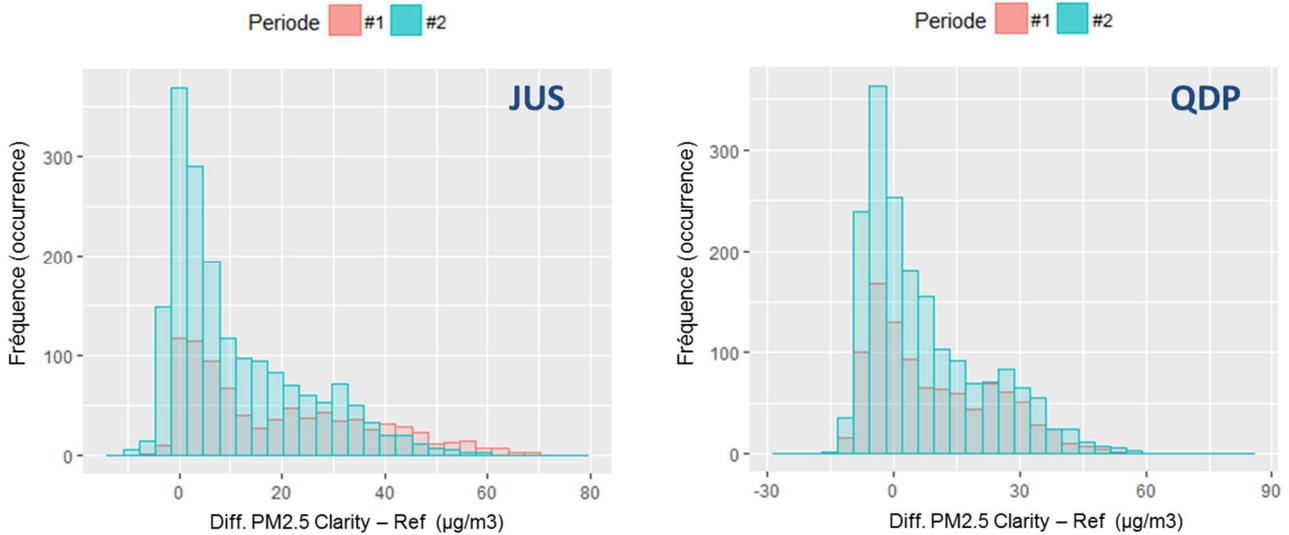
Sur les 1873 heures disponibles sur la période, les 2 micro-capteurs Clarity ont fourni des données plus de 98% du temps.

en µg/m ³		Moy	Perc.75	Max
JUS	PM2.5	11.5	15.2	63.2
	PM10	20.4	27.3	89.8
QDP	PM2.5	16.0	19.3	107.7
	PM10	25.3	32.2	133.3

Tableau 3 : statistiques descriptives (moyennes horaires) des niveaux de PM enregistrés par les instruments d'Atmo Normandie à JUS et QD du 08-avril au 25-juin

4.2.1.2 Dérive des capteurs Clarity

L'expérimentation a permis d'évaluer en 1^{ère} approche la stabilité dans le temps des capteurs PM2.5 Clarity avec, pour deux d'entre eux, un fonctionnement continu pendant près de 5 mois en colocation sur les sites de JUS et QDP. Comme le montre la figure 9 et les indicateurs listés dans le tableau 4, la comparaison entre les mesures brutes des capteurs Clarity et les mesures de référence PM2.5 est restée plutôt stable sur le site de QDP avec néanmoins, sur la seconde période, une légère réduction du biais moyen observé avec la méthode de référence. Cette réduction du biais est plus marquée encore sur le site de JUS, ce qui tend à conclure à une dérive des micro-capteurs au cours du temps marquée par une baisse de la sensibilité ; les mesures Clarity sont globalement moins sur-estimées lors de la seconde période d'étude.



Figures 9a,b: histogrammes des différences 'Mesure brute Clarity' – 'Mesure de référence' calculé pour les deux périodes d'analyse à JUS (à gauche) et à QDP (à droite)

Mesures Clarity 'Brutes'		Période #1	Période #2
A3TCQJGS à JUS	Biais Moyen $\mu\text{g}/\text{m}^3$	20.1	11.0
	Biais Moy. Absolu $\mu\text{g}/\text{m}^3$	20.3	11.7
	R^2	0.90	0.82
A88W6WY9 à QDP	Biais Moyen $\mu\text{g}/\text{m}^3$	10.5	7.3
	Biais Moy. Absolu $\mu\text{g}/\text{m}^3$	14.1	11.3
	R^2	0.75	0.75

Tableau 4 : indicateurs de comparaison des mesures Clarity avec les mesures de référence calculés pour les deux périodes d'analyse sur les sites de JUS et de QDP

4.2.1.3 Evaluation de quelques modèles de correction de données

L'idée ici est d'évaluer le potentiel de correction des mesures PM2.5 Clarity en testant des modèles de correction construits, comme a pu le faire Clarity, à partir des données 'brutes' accumulées sur les sites de JUS et de QDP lors de la 1^{ère} période d'intercomparaison.

4.2.1.3.1 Les modèles de régression testés

Dans notre contexte, le modèle de régression est utilisé pour prédire au mieux la valeur 'vraie' de la concentration en PM2.5, i.e la mesure de référence, à partir de la mesure PM2.5 d'un micro-capteur Clarity. Autrement dit, il doit permettre de corriger les mesures 'brutes' d'un micro-capteur Clarity pour les rendre les plus justes possibles au regard des mesures de référence.

Le choix a été fait ici de tester en première approche des modèles de régression simples, fréquemment utilisés comme la régression linéaire univariée et la régression linéaire multivariée. Par ailleurs, profitant des travaux issus d'une collaboration récente avec l'INSA de Rouen et son laboratoire d'informatique, de traitement de l'information et des systèmes (LITIS), l'occasion a été saisie de tester également un modèle de régression basé sur l'utilisation des réseaux de neurones artificiels. Dans le détail, ce sont donc 3 modèles de régression qui ont été testés pour chacun des micro-capteurs Clarity installés respectivement sur les sites de JUS et de QDP, avec le paramétrage suivant :

Modèle	Variable expliquée	Variable(s) explicative(s)
Reg. Linéaire simple		PM2.5#Clarity
Reg. Linéaire multiple	PM2.5#Ref	PM2.5#Clarity, Température#Clarity, HumiditéRelative#Clarity
Réseau de neurones artificiels (RNA)		PM2.5#Clarity, Température#Clarity, HumiditéRelative#Clarity

Tableau 5 : détails des modèles de régression testés

A noter que les modèles ont été construits sur la base des données accumulées du 07-février au 21-mars 2018 avec les capteurs Clarity A3TCQJGS et A88W6WY9 installés respectivement à JUS et à QDP. Ils ont ensuite été appliqués à l'ensemble des jeux de données, de février à juin à 2018.

4.2.1.3.2 Résultats

L'ensemble des résultats obtenus avec les différents modèles de régression appliqués aux deux micro-capteurs Clarity à JUS et à QDP est résumé dans le tableau 6. Globalement, les résultats sont moins bons sur la seconde période d'étude, quel que soit le modèle de correction utilisé. Ceci n'est pas étonnant dans la mesure où, d'une part les modèles ont été construits à partir des données accumulées sur la 1^{ère} période, et que d'autre part, une certaine dérive des capteurs Clarity a pu être constatée entre les deux périodes d'étude (cf. paragraphe 4.2.2). Ceci étant dit, il faut souligner que dans l'ensemble les modèles de régression testés permettent de corriger de façon encourageante les mesures des micro-capteurs Clarity. Des résultats satisfaisants sont ainsi obtenus avec la régression linéaire simple, avec pour les deux sites sur l'ensemble de l'expérimentation, des biais moyens absolus de l'ordre de 3 µg/m³ et des écarts entre mesures corrigées et mesures de référence inférieurs ± 5 µg/m³ près de 80% du temps. Ces scores sont légèrement améliorés avec la régression linéaire multiple et le réseau de neurone artificiel, ce qui laisse supposer que les variables explicatives température et humidité relative ont bien un effet sur la mesure PM2.5 Clarity. A noter également que ces deux modèles de régression aboutissent à des résultats très similaires, alors que ceux obtenus avec la correction appliquée par Clarity sont plus proches de ceux issus de la régression linéaire simple, comme le montre également la figure 12. Les régressions testées, comme celle utilisée par Clarity, peinent à corriger efficacement les concentrations de PM2.5 supérieures à 30 µg/m³, avec une nette tendance à la sous-estimation (cf figures 10 et 11). Comme évoqué plus haut, il aurait fallu plus d'évènements avec des niveaux de PM2.5 élevés lors de la 1^{ère} période pour pouvoir contraindre efficacement les modèles.

		A3TCQJGS à JUS		A88W6WY9 à QDP	
		Phase 2	Phase1	Phase2	Phase1
Avec Régression linéaire simple	Nb points	1830	872	1853	993
	% biais € [-5;5] µg/m3	77.5	86.6	76.0	77.0
	Biais Moyen µg/m ³	-2.2	0	0.5	0.0
	Biais Moy. Absolu µg/m ³	3.4	2.7	3.6	3.4
	Pente	0.69	0.87	0.72	0.78
	R ²	0.82	0.87	0.75	0.78
Avec Régression linéaire multi	Nb points	1830	870	1853	992
	% biais € [-5;5] µg/m3	83.7	89.3	80.9	81.0
	Biais Moyen µg/m ³	-1.3	0	0.2	0.0
	Biais Moy. Absolu µg/m ³	2.9	2.3	3.2	3.1
	Pente	0.64	0.90	0.68	0.82
	R ²	0.86	0.90	0.81	0.82
Avec RNA	Nb points	1830	870	1853	992
	% biais € [-5;5] µg/m3	82.7	90.5	81.2	80.8
	Biais Moyen µg/m ³	-0.9	-0.1	0.2	-0.1
	Biais Moy. Absolu µg/m ³	3.0	2.2	3.2	3.1
	Pente	0.66	0.89	0.68	0.82
	R ²	0.85	0.91	0.81	0.82
Avec Correction Clarity	Nb points	1830	909	1853	1024
	% biais € [-5;5] µg/m3	73.0	NC	71.7	NC
	Biais Moyen µg/m ³	-2.8	-0.1*	-1.1	-0.1*
	Biais Moy. Absolu µg/m ³	3.8	2.5*	4.0	3.6*
	Pente	0.69	NC	0.68	NC
	R ²	0.80	0.91*	0.71	0.75*

Tableau 6 : indicateurs de comparaison des mesures Clarity avec les mesures de référence calculés pour les deux périodes d'analyse avec et sans utilisation d'un modèle de correction (* : données fournies par Clarity)

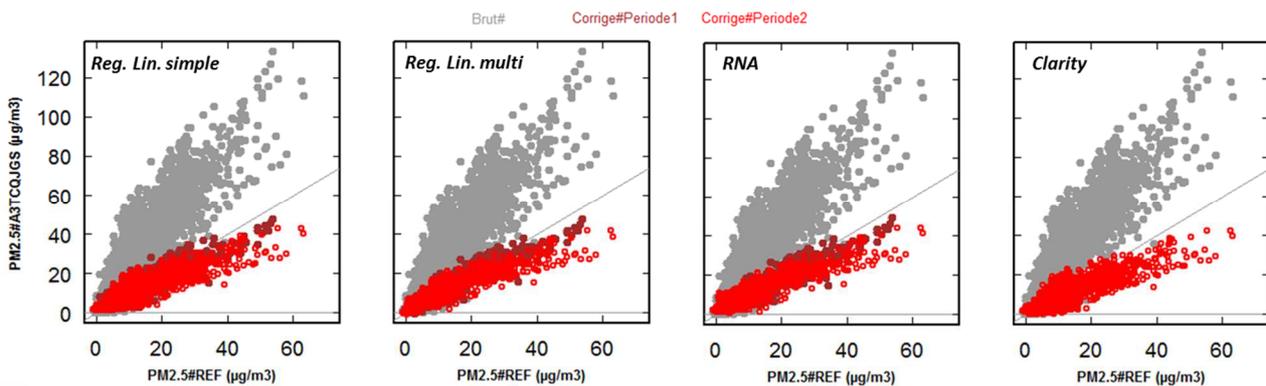


Figure 10: comparaison des mesures PM2.5 Clarity 'brutes' et corrigées par différents modèles avec les mesures de référence PM2.5 enregistrées sur le site de JUS pour les deux périodes d'analyse

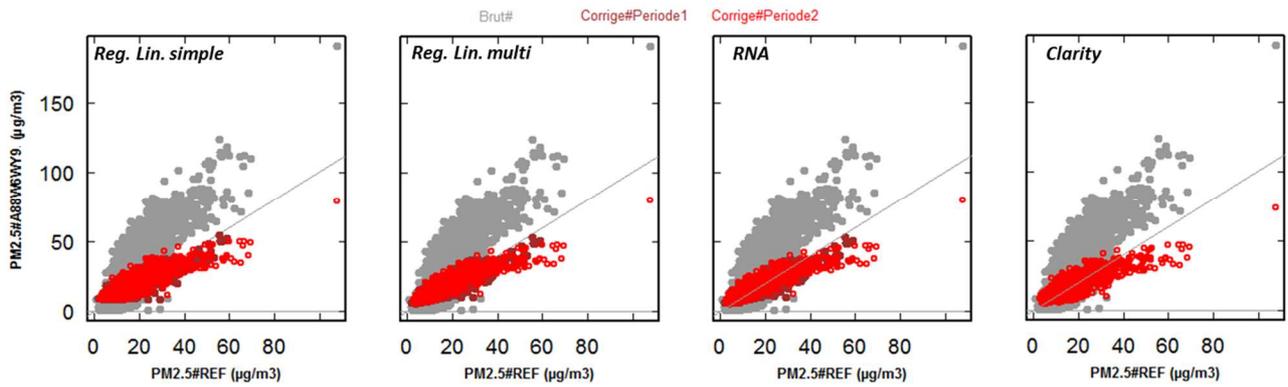


Figure 11: comparaison des mesures PM2.5 Clarity 'brutes' et corrigées par différents modèles avec les mesures de référence PM2.5 enregistrées sur le site de QDP pour les deux périodes d'analyse

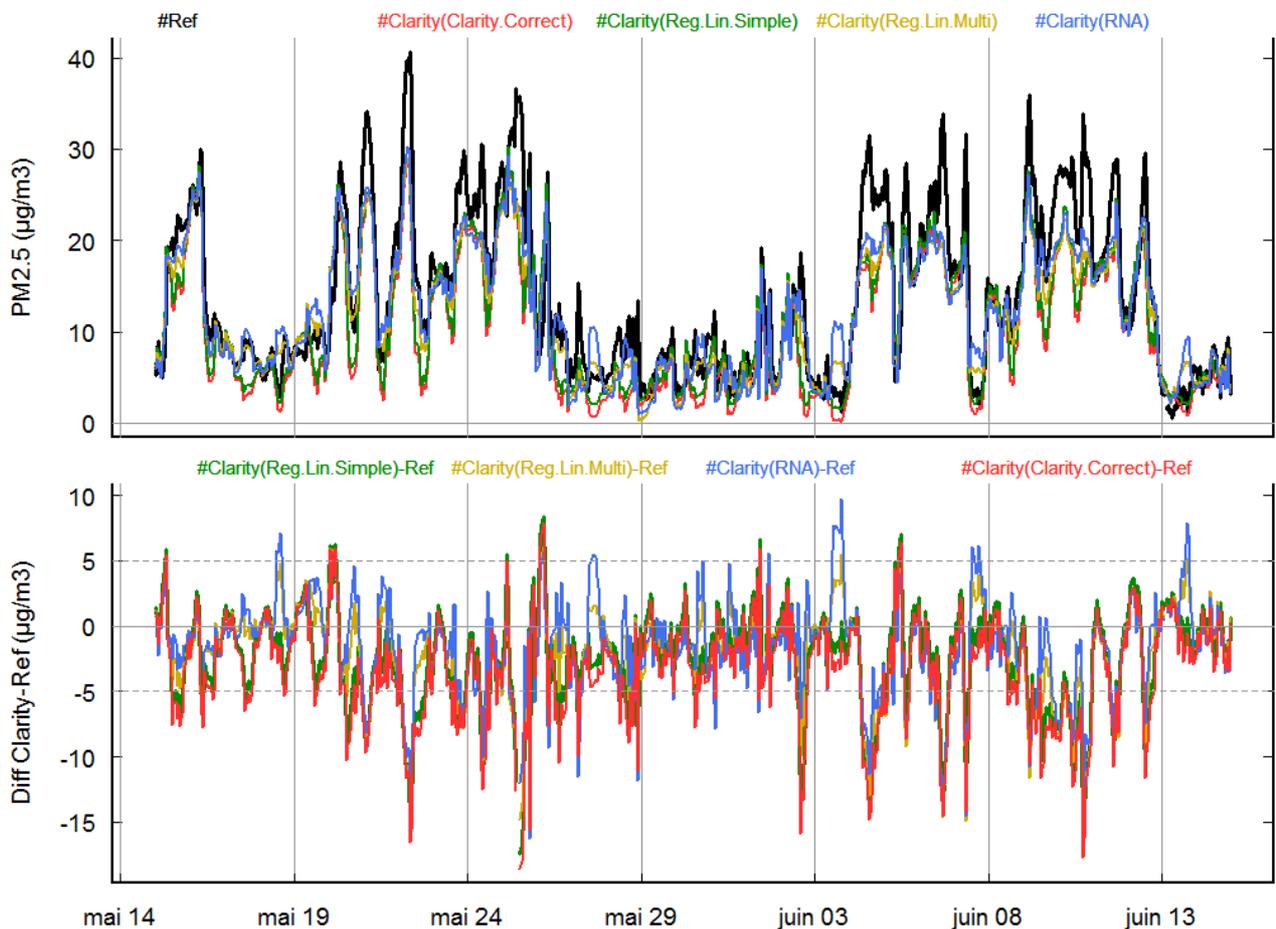


Figure 12: concentrations PM2.5 horaires mesurées sur le site de JUS entre le 15 mai et le 15 juin par l'instrument de référence d'Atmo Normandie et par la capteur Clarity corrigé par différents modèles et différences entre les mesures Clarity corrigées et les mesures de référence.

5. Conclusion et perspectives

Dans le cadre d'un partenariat mené avec la société CITEOS sur une étude de la qualité de l'air à l'échelle d'un quartier de la ville de Rouen en lien avec la régulation du trafic automobile, Atmo Normandie a eu l'occasion de tester les micro-capteurs PM2.5 du fabricant américain Clarity Movement Co. Cette évaluation a été réalisée sur deux typologies de site, en situation de fond urbain et en situation 'trafic', et découpée en deux périodes, du 07 février et 22 mars, et du 08-avril au 25-juin. Durant la 1^{ère} période, 2 micro-capteurs Clarity étaient installés sur chacun des deux sites de mesure d'Atmo Normandie, ce qui a permis de mettre en évidence, en 1^{ère} approche, une bonne reproductibilité des micro-capteurs Clarity. Ensuite, lors de la seconde période, un seul capteur Clarity sur les deux a été conservé sur chaque site. Pour ces deux micro-capteurs, il a donc été possible de suivre la stabilité des mesures sur près de 5 mois en comparaison avec les mesures de référence. Une certaine dérive a ainsi pu être mise en évidence au long de la campagne, dérive caractérisée par une baisse de sensibilité des micro-capteur Clarity et plus marquée pour un des deux capteurs. Comme a pu le faire Clarity, les données accumulées pendant la 1^{ère} période ont été utilisées pour construire différents modèles de correction qui ont ensuite été évalués sur l'ensemble de l'expérimentation. En l'absence de correction, les mesures des micro-capteurs Clarity sont caractérisées par une nette tendance à la surestimation des mesures de référence avec des biais moyens absolus de l'ordre de 10 à 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sur les deux sites de mesure. La variabilité temporelle des niveaux de PM2.5 est quant à elle bien reproduite. En appliquant les différents modèles de correction, dont celui utilisé par Clarity, la justesse des micro-capteurs est sensiblement améliorée avec des biais moyens absolus ramenés à environ 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sur chaque période d'analyse. Les modèles multivariés testés, régression linéaire et réseau de neurones artificiels, prenant en compte les paramètres environnementaux température et humidité relative comme variables explicatives, améliorent légèrement la correction par rapport à la régression linéaire simple et au modèle utilisé par Clarity. Tous les modèles testés, dont celui appliqué par Clarity, aboutissent à une sous-estimation des mesures PM2.5 quand celles-ci sont supérieures à 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Le fait qu'il n'y a eu que peu d'évènements lors de la 1^{ère} période d'étude avec des niveaux élevés de PM2.5 pour contraindre efficacement les modèles peut expliquer ce constat. La question de la représentativité de la période utilisée pour construire les modèles de correction est donc cruciale. De même, il sera nécessaire, comme le suggère d'ailleurs Clarity, de mettre à jour régulièrement le modèle de correction pour pouvoir prendre en compte la dérive des capteurs au cours du temps. Quant à la multiplication de ces capteurs à moindre coûts à l'échelle d'un quartier ou d'une agglomération à des fins de cartographies haute résolution, cela suppose également que le modèle de correction appliqué puisse être efficacement adapté à l'ensemble des dispositifs du réseau. A noter que ce point particulier n'a pas pu être évalué dans le cadre de la campagne. Dans tous les cas, le recours à des méthodes statistiques apparaît comme un pré-requis à l'utilisation en 'masse' de ces dispositifs. Des travaux exploratoires sont actuellement en cours chez Atmo Normandie à ce sujet.

6. Annexe : Rapport rédigé par Clarity





RETROUVEZ TOUTES
NOS **PUBLICATIONS** SUR :
www.atmonormandie.fr

Atmo Normandie

3 Place de la Pomme d'Or, 76000 ROUEN

Tél. : +33 2.35.07.94.30

Fax : +33 2.35.07.94.40

contact@atmonormandie.fr

