

Mesure des particules fines PM10 et PM2.5 par micro-capteurs

**Etude exploratoire – résultat des tests de mesures
par micro-capteurs SDS011 utilisés dans le projet
collaboratif Sensor Community (Luftdaten)**

Période de mesure : 2020

Commune et département d'étude : Mérignac (33), Périgny (17)

Référence : R&D_INT_21_036

Version du : 12/02/2021

Auteur : Agnès Hulin
E-mail : contact@atmo-na.org
Tél. : 09 84 200 100

www.atmo-nouvelleaquitaine.org

Titre : Mesure des particules fines par micro-capteurs / Etude exploratoire – résultat des tests de mesures par micro-capteurs SDS011 utilisés dans le projet collaboratif Sensor Community (Luftdaten)

Reference : R&D_INT_21_036

Version : 12/02/2021

Nombre de pages : 45 (couverture comprise)

	Rédaction	Approbation
Nom	Agnès Hulin	Patrick Bourquin
Qualité	Responsable service Partenariat/Innovations	Directeur délégué Partenariat/Communication
Visa		

Conditions d'utilisation

Atmo Nouvelle-Aquitaine fait partie du dispositif français de surveillance et d'information sur la qualité de l'air. Sa mission s'exerce dans le cadre de la loi sur l'air du 30 décembre 1996 et de ses décrets d'application.

A ce titre et compte tenu de ses statuts, Atmo Nouvelle-Aquitaine est garant de la transparence de l'information sur les résultats de ces travaux selon les règles suivantes :

- Atmo Nouvelle-Aquitaine 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.atmo-nouvelleaquitaine.org)
- les données contenues dans ce rapport restent la propriété d'Atmo Nouvelle-Aquitaine. En cas de modification de ce rapport, seul le client sera informé d'une nouvelle version. Tout autre destinataire de ce rapport devra s'assurer de la version à jour sur le site Internet de l'association.
- en cas d'évolution de normes utilisées pour la mesure des paramètres entrant dans le champ d'accréditation d'Atmo Nouvelle-Aquitaine, nous nous engageons à être conforme à ces normes dans un délai de 6 mois à partir de leur date de parution
- toute utilisation totale ou partielle de ce document doit faire référence à Atmo Nouvelle-Aquitaine et au titre complet du rapport.

Atmo Nouvelle-Aquitaine ne peut en aucune façon être tenu responsable des interprétations, travaux intellectuels, publications diverses résultant de ses travaux pour lesquels l'association n'aura pas donnée d'accord préalable. Dans ce rapport, les incertitudes de mesures ne sont pas utilisées pour la validation des résultats des mesures obtenues.

En cas de remarques sur les informations ou leurs conditions d'utilisation, prenez contact avec Atmo Nouvelle-Aquitaine :

- depuis le [formulaire de contact](#) de notre site Web
- par mail : contact@atmo-na.org
- par téléphone : 09 84 200 100

Sommaire

1. Introduction.....	5
2. Campagne de test : mesure des particules fines par micro-capteurs de type sensor community (Luftdaten).....	5
2.1. Le projet Sensor Community.....	5
2.2. Les capteurs de particules SDS011.....	8
2.2.1 Influence de l'humidité sur la mesure PM du SDS011	9
2.3. Le capteur de température et d'humidité DHT22	9
2.4. La campagne de test réalisée par Atmo Nouvelle Aquitaine	9
2.5. Polluants suivis et méthodes de mesure	11
2.5.1 Les PM10 et PM2.5	11
3. Résultat des tests sur Mérignac (Bordeaux Métropole)	14
3.1. Mesures horaires PM10 et PM2.5 des capteurs SDS011	14
3.1.1 Mesures horaires sur la période.....	14
3.1.2 Comparaison des mesures PM10 et PM2.5 entre capteurs SDS011	15
3.2. Mesures horaires des paramètres humidité et température des capteurs DHT22	16
3.2.1 Mesure de la température extérieure	16
3.2.2 Mesure de l'humidité relative	17
3.3. Comparaison du capteur PM SDS011 35691 aux stations du réseau Atmo.....	19
3.3.1 Comparaison des données du SDS011 de Mérignac avec des données du réseau de mesure des stations Atmo	20
3.3.2 Comparaison statistique des données du SDS011 de Mérignac avec des données du réseau de mesure des stations Atmo	22
3.3.3 Influence de l'humidité sur la mesure du SDS011 35691	23
3.3.4 Influence de la température sur la mesure du SDS011 35691.....	25
3.4. Conclusions de la campagne de test menée sur le site de Mérignac	26
4. Résultat des tests sur Périgny (Agglomération de La Rochelle)	27
4.1. Mesures horaires PM10 et PM2.5 des capteurs SDS011	27
4.1.1. Mesures horaires sur la période.....	27
4.1.2. Comparaison des mesures PM10 et PM2.5 entre capteurs SDS011	28
4.2. Mesures horaires des paramètres humidité et température des capteurs DHT22	30
4.2.1 Mesure de la température extérieure	30
4.2.2 Mesure de l'humidité relative	31
4.3. Comparaison du capteur PM SDS011 37037 aux stations du réseau Atmo.....	32
4.3.1 Comparaison des données moyennes du SDS011 de Mérignac avec des données du réseau de mesure des stations Atmo	33
4.3.2 Comparaison statistique des données du SDS011 37037 de Périgny avec des données du réseau de mesure des stations Atmo	35
4.3.3 Influence de l'humidité sur la mesure du SDS011 37037	36
4.2.3 Influence de la température sur la mesure du SDS011 37037.....	37
4.4. Conclusions sur la campagne de test menée sur le site de Périgny.....	39
5. Conclusions	40

Lexique

AASQA :	Association Agréée pour la Surveillance de la Qualité de l'Air
COFRAC :	COMité Français d'ACrréditation
$\mu\text{g}/\text{m}^3$:	microgramme par mètre cube
μm :	micromètre (= 1 millionième de mètre = 10^{-6} m)
m :	mètre
m^3 :	mètre cube (d'air)
PM2.5 :	Particules fines dont le diamètre est inférieur à 2.5 μm
PM10 :	Particules fines dont le diamètre est inférieur à 10 μm
R2 :	Coefficient de corrélation
RAE :	Erreur Absolue Relative
RMSE :	Root Mean Square Error

Résumé

Le projet Sensor Community mené par le OK Lab de Stuttgart, initialement nommé Luftdaten, connaît un grand engouement depuis son lancement en 2016. Il propose, via des guides en ligne et des logiciels open source, un principe de construction DIY (Do It Yourself) d'un système de mesures des particules fines, relié par wifi à un serveur qui centralise et permet de visualiser sous forme de cartes ou de graphiques l'ensemble des données mondiales de mesures du système. Le coût d'achat des différents composants nécessaires à la conception du système est inférieur à 100€.

Atmo Nouvelle-Aquitaine a inscrit le développement des tests portant sur les micro-capteurs sur le territoire régionale dans son PRSQA (2016-2021). C'est dans ce cadre qu'une expérimentation a été initiée fin 2019 dans le but d'évaluer la qualité de la mesure des particules fines par les capteurs SD011 majoritairement utilisés par le projet Sensor Community.

Les tests se sont déroulés sur deux sites de la région : Périgny, dans l'agglomération de La Rochelle, et Mérignac, dans Bordeaux Métropole. Les deux sites ont été équipés respectivement de 2 et 3 capteurs de particules SDS011 et du même nombre de capteurs pour la mesure de l'humidité et de la température.

Dans l'ensemble, les résultats des tests sont très prometteurs. Ils montrent une très bonne répétabilité des mesures entre les capteurs. Il montrent également dans l'ensemble une bonne cohérence des mesures de particules, meilleures pour les PM2.5 que pour les PM10, avec les stations du réseau fixe d'Atmo Nouvelle Aquitaine.

Un problème sur l'installation des micro-capteurs a fortement dégradé les résultats de mesures : autant sur Périgny que sur Mérignac, les capteurs ont régulièrement été saturés d'eau (humidité relative à 100%), en raison d'une mauvaise protection vis-à-vis de l'eau de pluie. Or les statistiques montrent une dégradation nette des résultats de mesures lorsque l'humidité est supérieure à 90%.

Une meilleure protection du système, par exemple dans un abris, permettrait d'améliorer sensiblement la qualité de la mesure.

1. Introduction

Le développement technologique des capteurs durant ces deux dernières décennies a conduit à l'émergence d'appareils de mesures de la qualité de l'air miniaturisés, de faible coût, généralement désignés sous le terme de micro-capteurs. Leur apparition a entraîné le développement de par le monde de communautés citoyennes participant activement à la mesure sur leur territoire. Le faible coût combiné à une relative facilité d'utilisation permet potentiellement d'installer une forte densité de points de mesures sur un territoire, assurant une couverture spatiale bien supérieure à celle du réseau des stations de mesure réglementaire.

Un projet de micro-capteurs citoyens en particulier connaît un vrai engouement en Europe depuis son lancement en 2016, il s'agit de Sensor Community, anciennement appelé Luftdaten, mené par le le OK Lab de Stuttgart.

En février 2021, plus de 13 400 micro-capteurs Sensor Community sont opérationnels sur 74 pays. Les systèmes Sensor Community sont généralement équipés d'un capteur de mesure des PM10 et PM2.5 développé par NOVA FITNESS, le SDS011.

Malgré les progrès réalisés ces dernières années sur la conception des capteurs, les tests menés montrent qu'ils ne peuvent pas encore rivaliser avec les appareils de mesure de particules fines PM10 ou PM2.5 qui équipent les stations de mesures des AASQA. Les variables environnementales comme l'humidité relative peuvent notamment biaiser de manière significative leurs mesures. Des recherches montrent que la performance des micro-capteurs diminue lorsque l'humidité relative est supérieure à 75%, en raison principalement de l'augmentation de la taille des particules due à la condensation des gouttes d'eau (Zheng et al. 2018; Jayaratne et al. 2018; Crilley et al. 2018).

Atmo Nouvelle-Aquitaine a inscrit le développement de l'expérimentation des micro-capteurs sur le territoire Néo-Aquitain pour la mesure de la qualité de l'air dans son PRSQA (2016-2021). C'est pourquoi l'observatoire a souhaité tester la fiabilité des mesures de particules fines PM10 et PM2.5 par les capteurs SDS011, et a pour cela rejoint le programme Sensor Community à travers deux sites de mesure (Mérignac en Gironde, et Périgny en Charente-Maritime) équipés respectivement de 3 et 2 systèmes de micro-capteurs. L'objectif de ce rapport est d'évaluer la répétabilité des mesures entre micro-capteurs, l'impact des paramètres humidité et température, ainsi que la cohérence des mesures avec les résultats obtenus sur le réseau permanent des stations de mesure d'Atmo Nouvelle-Aquitaine.

2. Campagne de test : mesure des particules fines par micro-capteurs de type sensor community (Luftdaten)

2.1. Le projet Sensor Community

Le projet sensor community (anciennement Luftdaten) est mené par le OK Lab de Stuttgart et fait partie du programme « Code for Germany » de la fondation Allemande « Open Knowledge ». Il vise à promouvoir un développement transparent et open data en lien avec les sciences sociales.

Le logiciel utilisé pour la mesure via le capteur a été développé en open source et mis à disposition du public, accompagné de guides de montage et d'installation du capteur. Cette mise à disposition de l'information, ainsi que le faible coût d'achat du capteur ont amené plusieurs programmes citoyens de par le monde, mais en particulier en Europe, à utiliser le système, démultipliant le nombre de mesures.

Une interface est à disposition des usagers des capteurs et du public, sur laquelle, une fois la mesure déclarée, l'utilisateur peut consulter les données en direct sur une carte mondiale, et avoir accès à l'historique des mesures. Toutes les données des capteurs déclarés sur le système sont disponibles et ouvertes à tous sans restrictions.

- Sensor community : résultats sous forme de carte mise à jour en direct : <https://sensor.community/fr/>
- Air Tube : graphiques et historique des données sous forme de courbes : <https://airtube.info/>

Les deux cartes suivantes sont des extraits des données disponibles en ligne. La première carte représente les concentrations de PM2.5 mesurées par les systèmes Sensor Community, la seconde représente l'indice de qualité de l'air des réseaux de stations de mesures réglementaires en Europe. L'extrait a été réalisé au mois de février, soit en période hivernale, durant laquelle l'indice de qualité de l'air dépend principalement des concentrations de particules. On observe une très bonne corrélation spatiale entre les deux cartes.

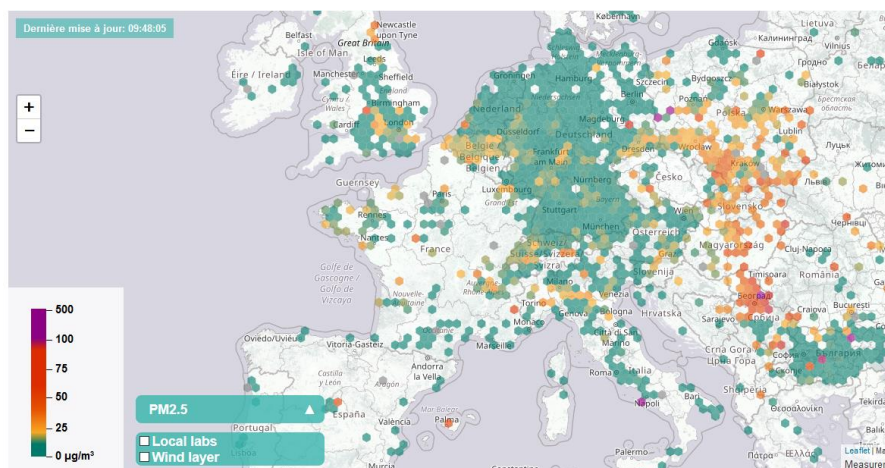


Figure 1 : Carte des concentrations PM2.5 mesurées par les capteurs de type Sensor Community du 11/02/2021 aux environs de 10H (<https://sensor.community/fr/>)

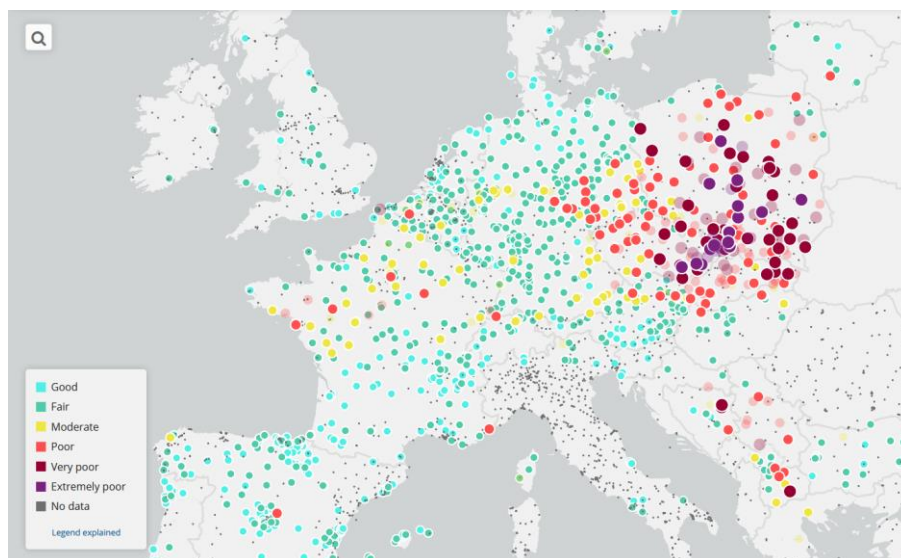


Figure 2 : Indice de la qualité de l'air Européen du 11/02/2021 aux environs de 10H (<https://airindex.eea.europa.eu/Map/AQI/Viewer/>)

Les mesures de particules dans le système Sensor Community sont réalisées par le capteur SDS011 produit par la société Nova Fitness. Un autre capteur, optionnel, est généralement installé pour fournir une aide à la validation/exploitation des mesures : le DHT22, qui assure la mesure de la température et de l'humidité.

WiFi module ESP8266



Temperature and humidity sensor, DHT22



Particulate matter sensor, SDS011



2m micro-usb cable



Elbow pipe, 75mm diameter (2x)



Flexible cable (6mm x 20cm)



Cables (7x)



5V usb adaptor



Cable ties, 2,5mm width



Figure 3 : pièces nécessaires pour construire un système de type Sensor Community

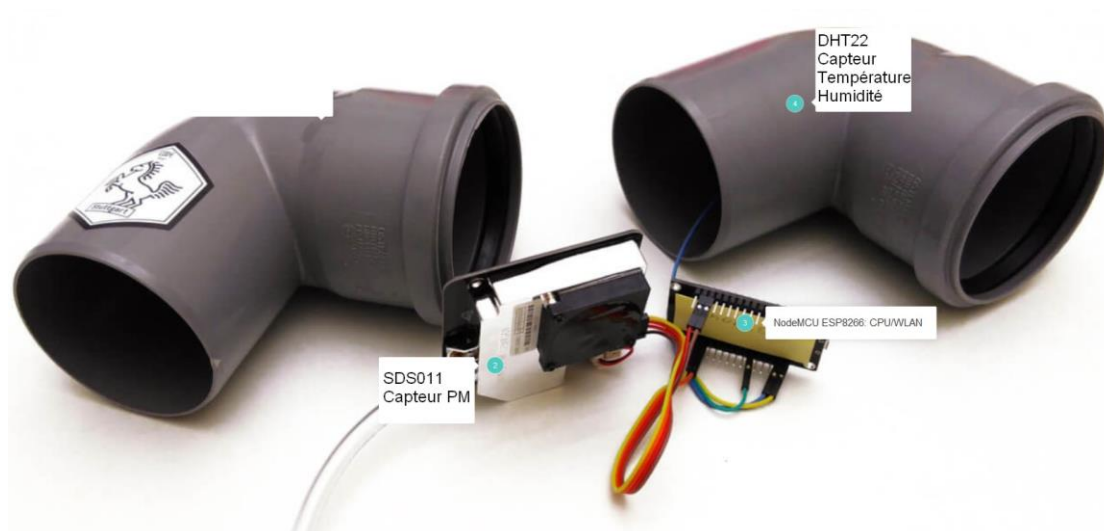


Figure 4 : Montage des éléments du système Sensor Community

Le graphique suivant représente l'évolution du nombre de capteurs SDS011 et DHT22 depuis le début du projet. Il est mis à jour en temps réel sur le site <https://stats.sensor.community/growth.html>. Il y a en février 2021 plus de 13 400 capteurs PM de type SDS011 opérationnels sur Sensor Community de par le monde.

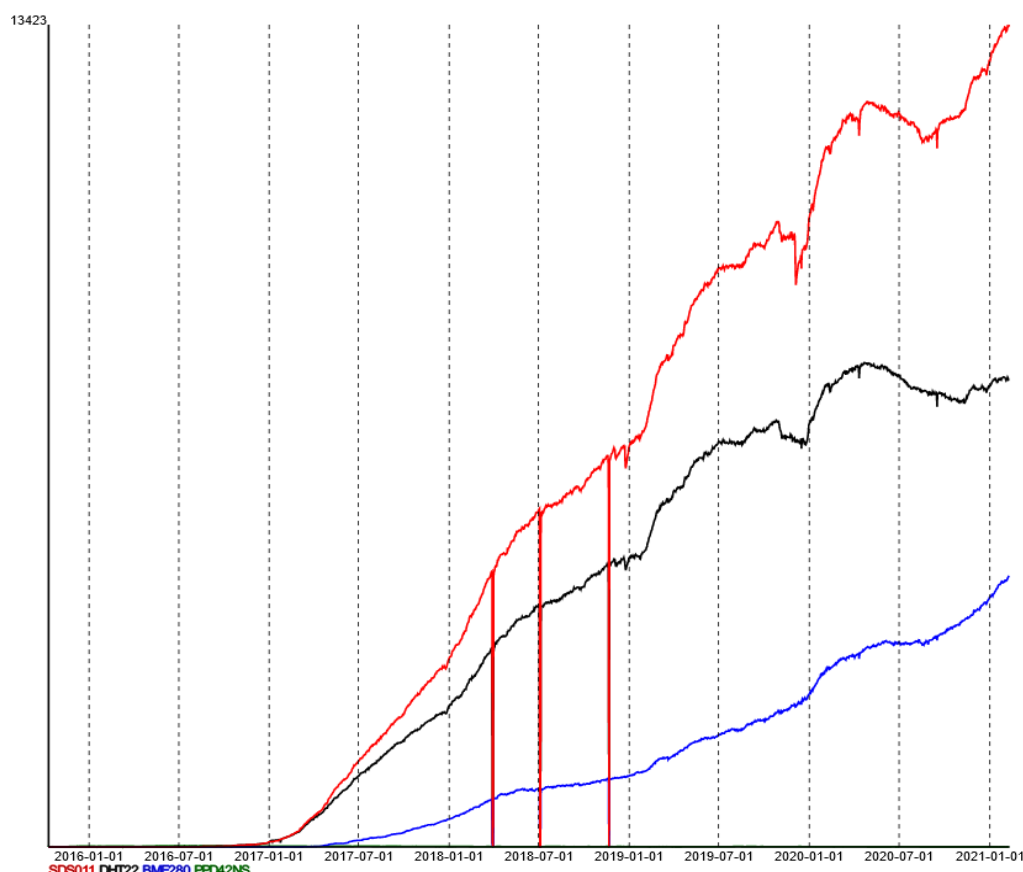


Figure 5 : évolution du nombre de capteurs en opération de type sensor community depuis le début du projet.

2.2. Les capteurs de particules SDS011

Les capteurs utilisés pour la mesure des particules dans les systèmes Sensor Community/Luftdaten testés par Atmo Nouvelle-Aquitaine sont des capteurs par mesure laser SDS011 produit par NOVA FITNESS Co.

Le SDS011 utilise le principe de la diffusion de la lumière produite par un laser, pour mesurer la concentration de particules dans l'air de diamètre compris entre 0.3 et 10µm. La diffusion de la lumière est traduite en signal électronique. Le nombre et la taille des particules est obtenu par analyse du signal. La résolution affichée par le constructeur est de 0.3 µg/m³.

Eléments	Paramètres
Paramètres mesurés	PM2.5, PM10
Plage de mesures	0.0 – 999.9 µg/m ³
Voltage	5V
Consommation en mesure	70 mA +- 10mA
Plage de température recommandée en condition de mesure	-10 à +50 °C
Plage d'humidité recommandée en condition de mesure	Max 70%
Diamètre minimal des particules	0.3 µm
Rendement de comptage	70% @ 0.3µm 98% @ 0.5µm
Erreur relative	Maximum de 15% et +-10µg/m ³ (à 25°C et 50% RH)
Taille du capteur	71 x 70 x 23 mm
Certification	CE/FCC/RoHS
Alimentation	437 – 5.3 V / >1W
Durée de vie optimale	8 000 heures

Tableau 1 : Paramètres constructeur pour le SDS011, NOVA Fitness CO., Ltd.

Le SDS011 est un capteur très populaire, notamment en raison de son prix de vente peu élevé (<40€). De ce fait, de nombreuses publications portent sur l'évaluation de leur performance.

Les résultats peuvent être résumés ainsi :

- Les performances sont meilleures sur les PM_{2.5} que sur les PM₁₀
- Les résultats sont meilleurs dans des conditions standard (humidité relative 20-50% et concentrations en PM₁₀ < 20 µg/m³) et se dégradent lorsque l'humidité est élevée (Budde, 2018 ; LUBW 2017).

2.2.1 Influence de l'humidité sur la mesure PM du SDS011

Un fort taux d'humidité de l'air peut affecter les performances des capteurs optiques de particules comme celui du SDS011 de plusieurs manières (Badura, 2018). Le premier groupe de problèmes concerne la défaillance des circuits électroniques dans un environnement très humide, qui peut conduire à des mesures biaisées, voire à la dégradation du capteur. Le second groupe de problèmes est lié aux propriétés des particules et au principe de mesure par diffusion de la lumière. L'augmentation hygroscopique de la taille de certaines particules est une cause connue de surestimation des résultats et d'un artefact positif dans le signal du capteur [Crilley 2018, Allen 1977]. De plus, lorsque l'humidité est proche de 100%, la formation de brouillard crée des gouttelettes qui sont détectées comme des particules.

2.3. Le capteur de température et d'humidité DHT22

Le capteur de température et d'humidité DHT22 communique avec un microcontrôleur via un port série. Il n'est pas nécessaire à la mesure des PM, mais sert à fournir les paramètres de contrôle de la mesure, potentiellement fortement influencée par les conditions ambiantes.

Chacun des capteurs PM SDS011 installé par Atmo Nouvelle-Aquitaine a été couplé avec un capteur DHT22.

- | | |
|--------------------------------|------------------------------|
| • Alimentation: 3,3 à 6 Vcc | • Précision: |
| • Consommation maxi: 1,5 mA | - température: ± 0,5 °C |
| • Consommation au repos: 50 µA | - humidité: ± 2 % RH |
| • Plage de mesure: | • Dimensions: 25 x 15 x 9 mm |
| - température: -40 à +80 °C | |
| - humidité: 0 à 100 % RH | |

2.4. La campagne de test réalisée par Atmo Nouvelle Aquitaine

Atmo Nouvelle Aquitaine a inscrit le développement de l'expérimentation des micro-capteurs pour la mesure de la qualité de l'air dans son PRSQA (2016-2021). Le projet Sensor Community est l'un des plus avancés en Europe. Atmo a souhaité installer des mesures sur deux sites de la région pour tester la fiabilité des mesures.

Les stations de mesures du réseau d'Atmo n'étant pas équipées du WIFI nécessaire au fonctionnement des micro-capteurs, il n'a pas été possible d'installer les micro-capteurs sur ou à proximité immédiate d'une station.

Les comparaisons des mesures micro-capteurs/stations sont donc réalisées de manière qualitative, la distance entre les points de mesures pouvant à elle seule justifier une partie des différences observées sur les concentrations.

Deux villes de la Nouvelle-Aquitaine ont servi de sites tests : Mérignac en Gironde (33), et Périgny en Charente-Maritime (17).

- **Mérignac** : dans la Métropole de Bordeaux, en zone péri-urbaine, au cœur d'une zone commerciale, à moins de 100m de la rocade. Trois micro-capteurs de type Sensor Community (équipés chacun d'un SDS011 et d'un DHT22) ont été installés côte à côte sur le site.

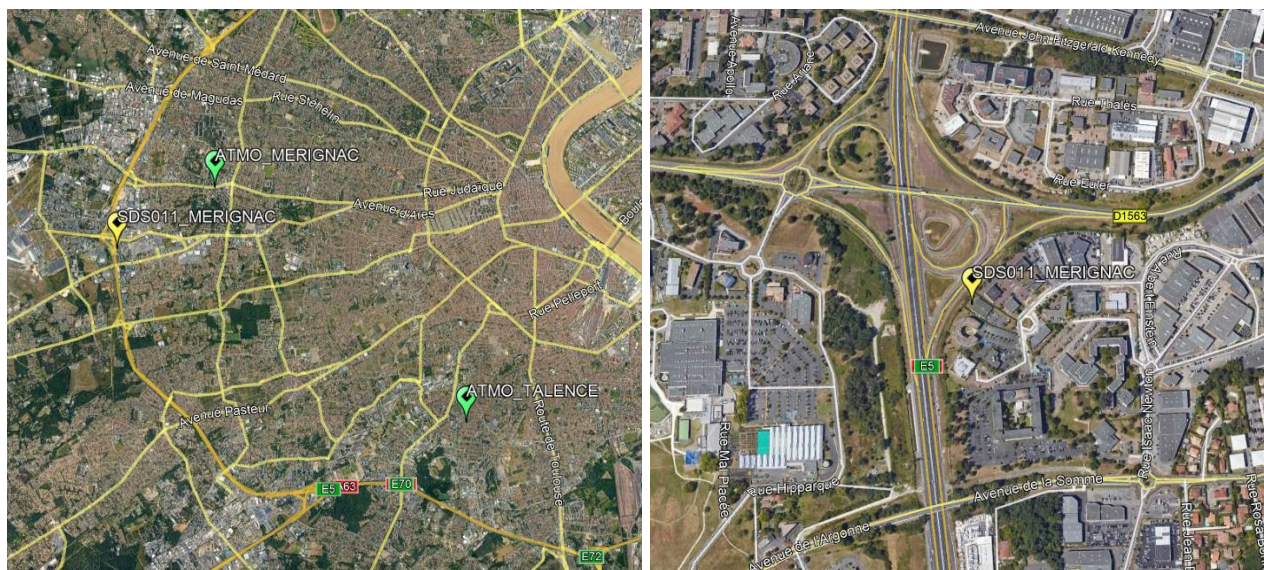


Figure 6 : Emplacement du site test microcapteur (en jaune) et des stations Atmo de référence (en vert) sur Bordeaux Métropole

Paramètres microcapteurs				
Micro-capteurs	Site	Mérignac		
	Département	33 (Gironde)		
	X (Lambert 93)	409660		
	Y (Lambert 93)	6421366		
	Capteurs PM (SDS011)	35689	35691	35683
	Capteurs T/RH (DHT22)	35690	35692	35684
	Période de mesure	Du 10/02/2020 au 25/01/2021		
Stations Atmo de référence	Taux de fonctionnement sur la période	80%	85%	15%
	Sites	TALENCE		MERIGNAC
	Typologie	Fond urbain		Urbaine sous influence du trafic routier
	Mesures	PM10, PM2.5		PM10
	Appareil de mesures PM	FIDAS200		BAM1020

- **Périgny** : dans l'agglomération de La Rochelle, en zone péri-urbaine, au cœur d'une zone industrielle, sans axes majeurs de circulation à proximité. Deux micro-capteurs de type Sensor Community (équipés chacun d'un SDS011 et d'un DHT22) ont été installés côte à côte sur le site.

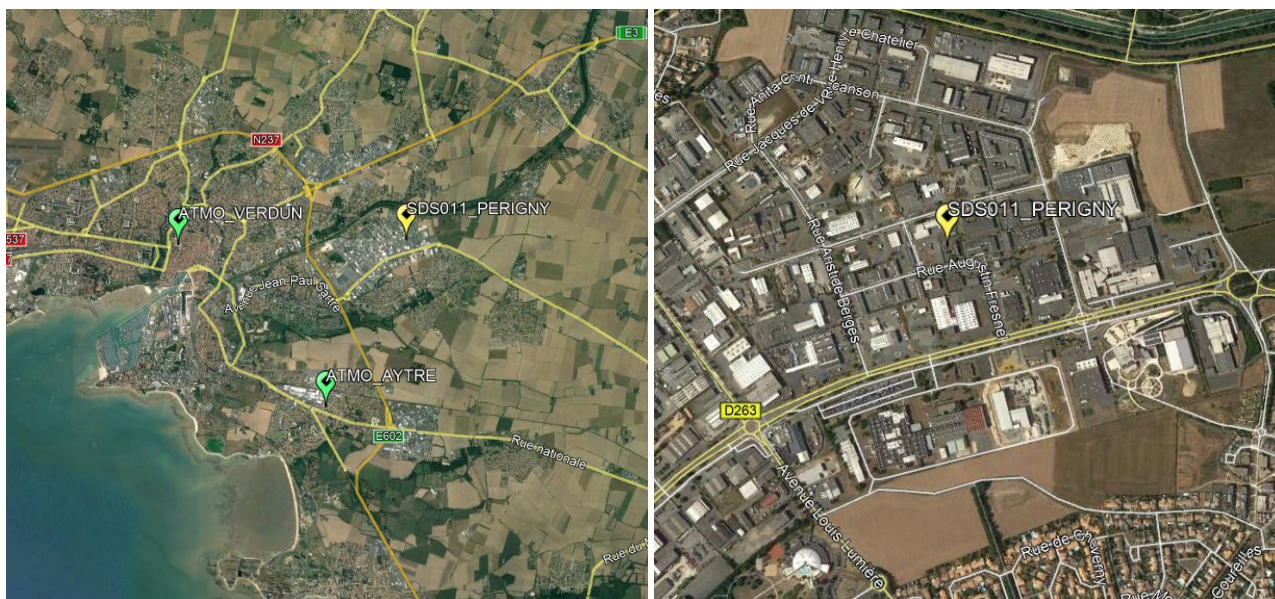


Figure 7 : Emplacement du site test microcapteur (en jaune) et des stations Atmo de référence (en vert) sur l'agglomération de La Rochelle

Paramètres			
Micro-capteurs	Site	Périgny	
	Département	17 (Charente – Maritime)	
	X (Lambert 93)	383973	
	Y (Lambert 93)	6570823	
	Capteurs PM (SDS011)	37035	37037
	Capteurs T/RH (DHT22)	37036	37038
	Période de mesures	Du 2019-12-24 au 2020-06-02	
Stations Atmo de référence	Taux de fonctionnement du capteur sur la période	16%	90%
	Sites	La Rochelle-Verdun	Aytré
	Typologie	Fond urbain	Fond péri-urbain
	Mesures	PM10, PM2.5	PM10
	Appareil de mesures PM	BAM1020	BAM1020

2.5. Polluants suivis et méthodes de mesure

2.5.1 Les PM10 et PM2.5

Les particules en suspension dans l'air appartiennent à la classe des PM10 dans le cas où leur diamètre aérodynamique est inférieur à 10 μm , ou à la classe des PM2,5 dans le cas où celui-ci est inférieur à 2,5 μm . A noter que les PM2,5 sont comptabilisées au sein de la classe PM10.

Origines

Les sources de particules ou « aérosols » sont nombreuses et variées d'autant qu'il existe différents processus de formation.

Les méthodes de classification des sources sont basées sur les origines (activités humaines, marines, biogéniques, volcaniques) ou sur les modes de formation. Deux types d’aérosols peuvent être distingués :

- Les aérosols primaires : émis directement dans l’atmosphère sous forme solide ou liquide. Les particules liées aux activités humaines proviennent majoritairement de la combustion de combustibles tels que le chauffage au bois, du transport automobile ainsi que des activités agricoles et industrielles. Leur taille et leur composition sont très variables.
- Les aérosols secondaires : directement formés dans l’atmosphère par des processus de transformation des gaz en particules. La majorité des particules organiques sont des aérosols secondaires.

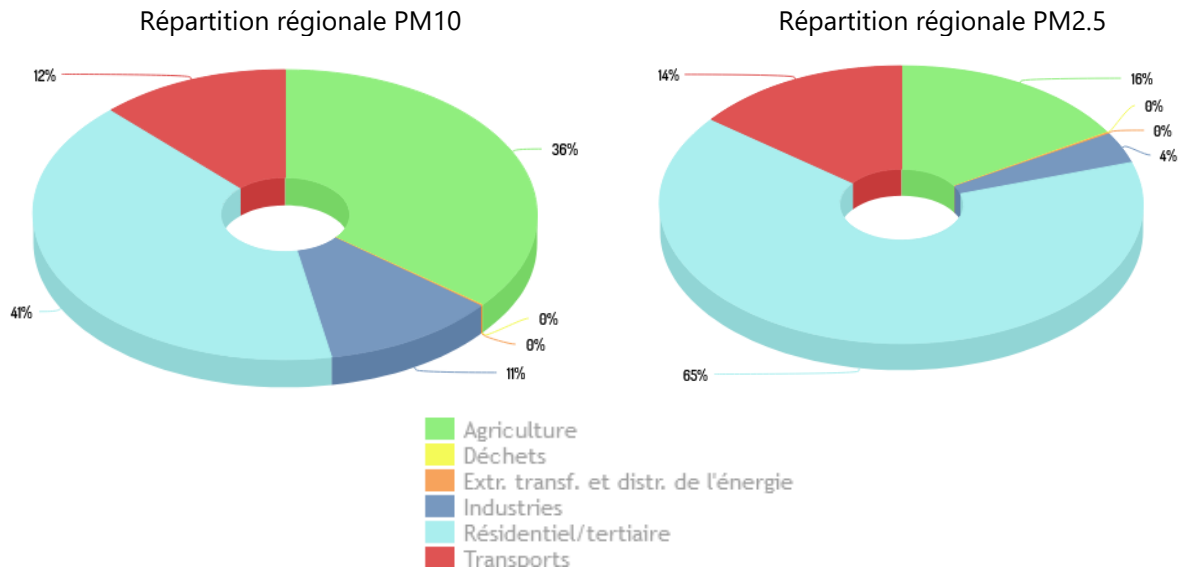


Figure 8 : Répartition des sources d’émissions régionales de PM10 et PM2.5 (Icare 3.2.2 Atmo-NA2016)

Effets sur la santé

Selon leur taille, les particules pénètrent plus ou moins profondément dans l’appareil respiratoire. Les particules les plus fines peuvent, à des concentrations relativement basses, irriter les voies respiratoires inférieures et altérer la fonction respiratoire dans son ensemble.

Effets sur l’environnement

Les effets de salissure des bâtiments et des monuments sont les atteintes à l’environnement les plus évidentes.

Réglementation pour les PM10 et recommandation OMS

Valeurs limites pour la protection de la santé humaine	50 µg/m³ (en moyenne journalière) pas plus de 35 jours de dépassement/an 40 µg/m³ en moyenne annuelle
Seuil d’Information et de Recommandations	50 µg/m³ en moyenne journalière
Seuil d’alerte	80 µg/m³ en moyenne journalière
Objectif de qualité	30 µg/m³ en moyenne annuelle
Recommandation OMS	50 µg/m³ (en moyenne journalière) pas plus de 3 jours de dépassement/an 20 µg/m³ en moyenne annuelle

Tableau 2 : Valeurs réglementaires des PM10 (Arrêté du 19 avril 2017 relatif au dispositif national de surveillance de la qualité de l’air ambiant) et recommandation OMS

Réglementation pour les PM2.5 et recommandation OMS

Valeur limite :	25 µg/m³ en moyenne annuelle
Valeur cible	20 µg/m³ en moyenne journalière
Objectif de qualité	10 µg/m³ en moyenne annuelle
Recommandation OMS	25 µg/m³ (en moyenne journalière) pas plus de 3 jours de dépassement/an 10 µg/m³ en moyenne annuelle

Tableau 3 : Valeurs réglementaires des PM2.5

(Arrêté du 19 avril

2017 relatif au dispositif national de surveillance de la qualité de l'air ambiant) et recommandation OMS

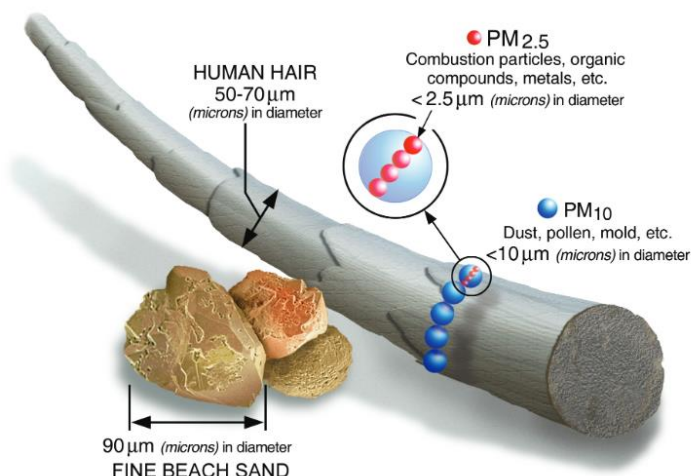


Figure 9 : Taille des PM10 et PM2.5, en comparaison d'un cheveux humain et du sable de plage. Source : United States Environmental Protection Agency, 2017

Les mesures de particules par micro-capteurs ne font pas l'objet d'une norme ou d'une accréditation COFRAC. En revanche, dans ce rapport, sont également utilisées comme base de comparaison les données de mesures PM10 et PM2.5 des analyseurs automatiques du réseau ATMO, qui répondent aux caractéristiques du tableau ci-dessous :

Caractéristique mesurée	Matériel	Référence et / ou principe de la méthode	Accréditation
Concentration en particules	Mesure par micro-capteurs SDS011	Mesure de la diffusion de la lumière produite par un laser	-
	Analyseurs automatiques	NF EN 16450 - Systèmes automatisés de mesurage de la concentration de matière particulaire (PM10 ; PM2.5)	 ACCREDITATION COFRAC N° 1-6354* Portée disponible sur www.cofrac.fr

Tableau 4 : Matériel et méthodes de mesure

Les avis et interprétations ne sont pas couverts par l'accréditation COFRAC d'Atmo Nouvelle-Aquitaine. Toute utilisation des données d'Atmo Nouvelle-Aquitaine couvertes par l'accréditation doit faire mention : "Ces essais ont été réalisés par Atmo Nouvelle-Aquitaine – Accréditation n°1-6354, portée disponible sous www.cofrac.fr".

3. Résultat des tests sur Mérignac (Bordeaux Métropole)

3.1. Mesures horaires PM10 et PM2.5 des capteurs SDS011

3.1.1 Mesures horaires sur la période

La Figure 10 représente les moyennes horaires PM10 et PM2.5 mesurées par les trois micro-capteurs SDS011 installés côte à côte sur le site de Mérignac. Les micro-capteurs sont chacun désignés par un numéro enregistré sur le site Sensor-Community : 35683, 35689 et 35691.

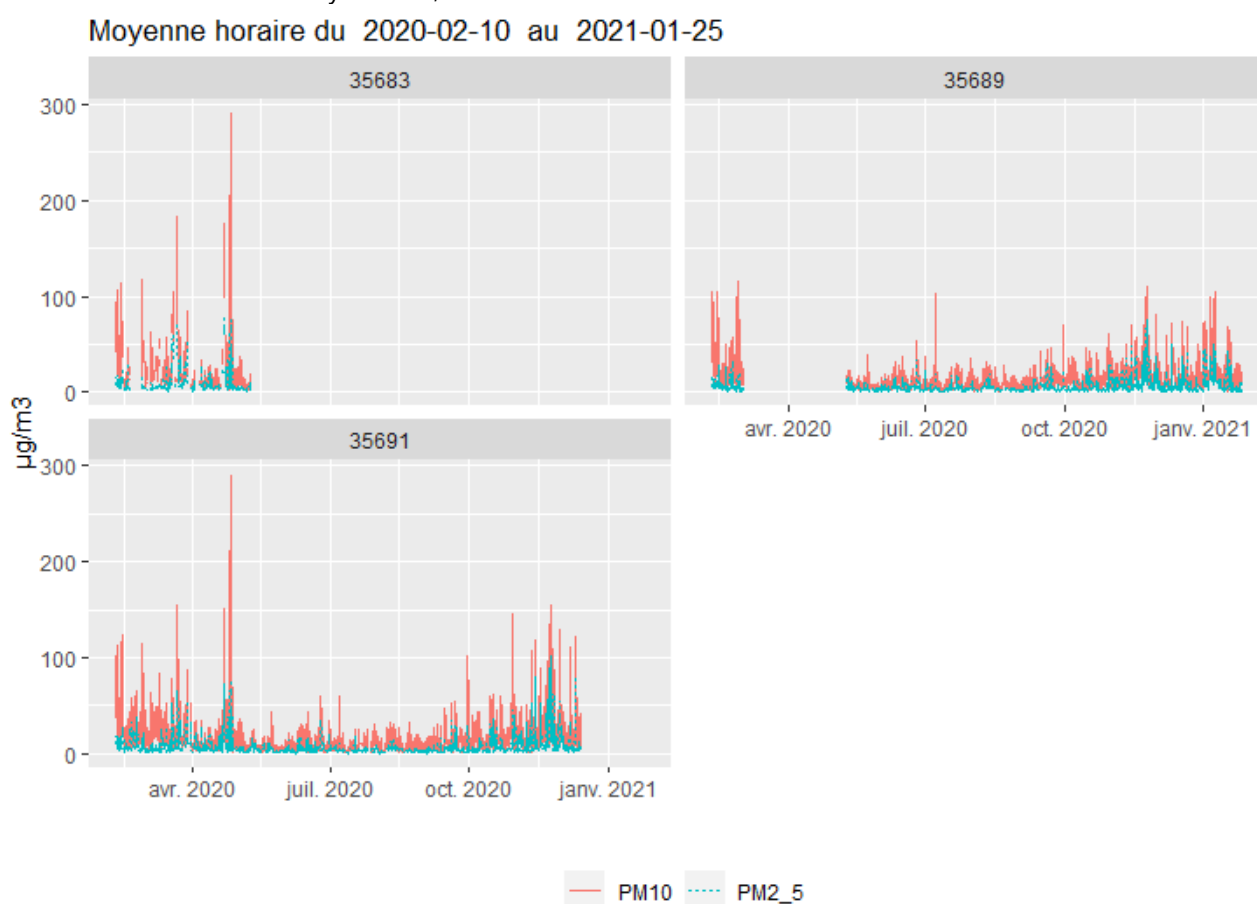


Figure 10 : Moyennes horaires des trois capteurs SDS011 installés sur Mérignac

Sur une année de mesure, le taux de fonctionnement a été particulièrement bon pour deux des capteurs : le 35691 (85%) et le 35689 (80%). Le 35683 n'a en revanche fonctionné que 15% du temps. A noter que contrairement au réseau de mesure officiel d'Atmo, les micro-capteurs n'ont pas fait l'objet d'un suivi technique régulier qui aurait pu permettre d'augmenter leur taux de fonctionnement.

La dynamique saisonnière est respectée sur l'année ; les valeurs les plus élevées sont mesurées à l'hiver et au printemps, les concentrations baissent durant l'été.

3.1.2 Comparaison des mesures PM10 et PM2.5 entre capteurs SDS011

La Figure 11 représente les moyennes journalières PM10 et PM2.5 mesurées par les trois capteurs SDS011 de Mérignac. Les courbes des moyennes journalières des trois micro-capteurs sont extrêmement proches, montrant une très bonne répétabilité de la mesure entre capteurs.

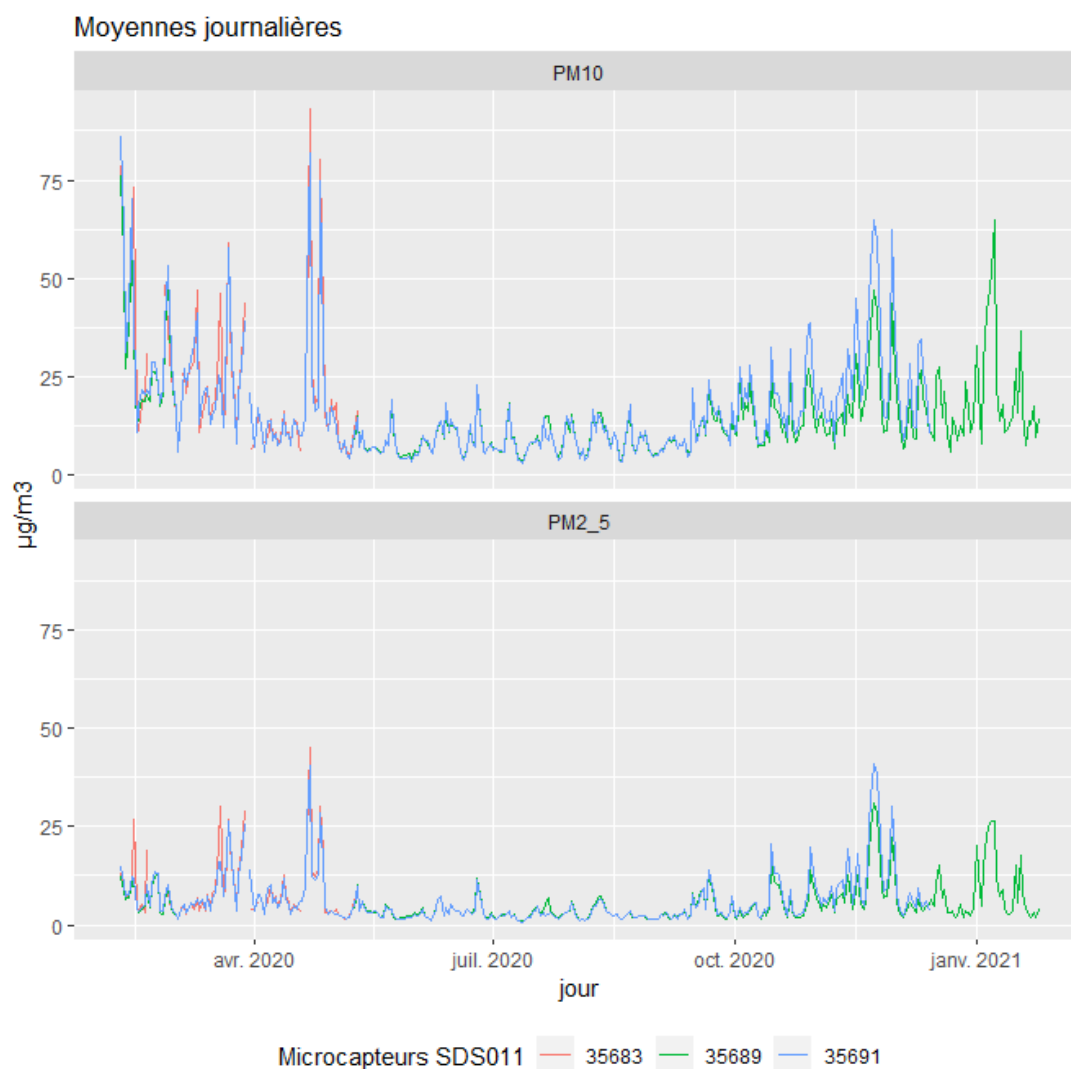


Figure 11 : Moyennes journalières des trois capteurs SDS011 installés sur Mérignac

Les graphiques de la Figure 12 représentent les corrélations horaires des trois capteurs sous forme de nuages de points, pour les PM10 et les PM2.5. Les coefficients de corrélation sont tous supérieurs à 0.99, il y a donc une très bonne répétabilité à l'échelle horaire de la mesure PM10 et PM2.5 entre les trois capteurs SDS011.

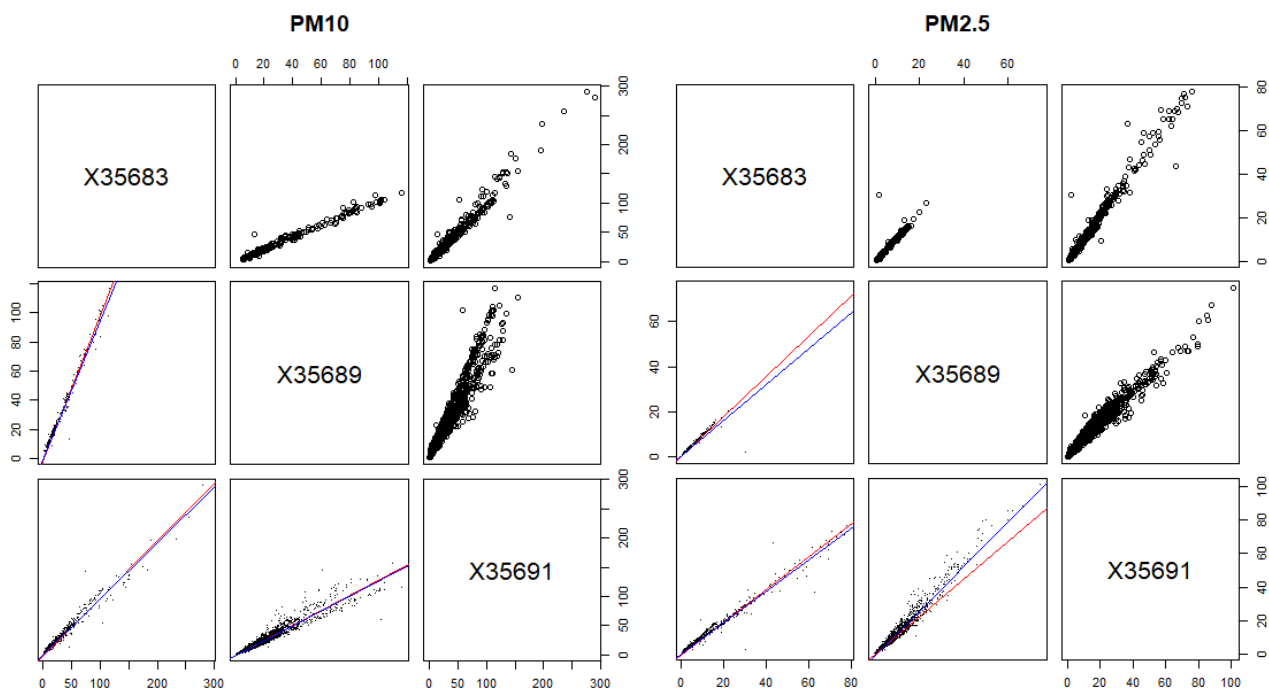


Figure 12 : nuages de points des mesures horaires PM10 et PM2.5 mesurées sur les trois SDS011 de Mérignac.

3.2. Mesures horaires des paramètres humidité et température des capteurs DHT22

3.2.1 Mesure de la température extérieure

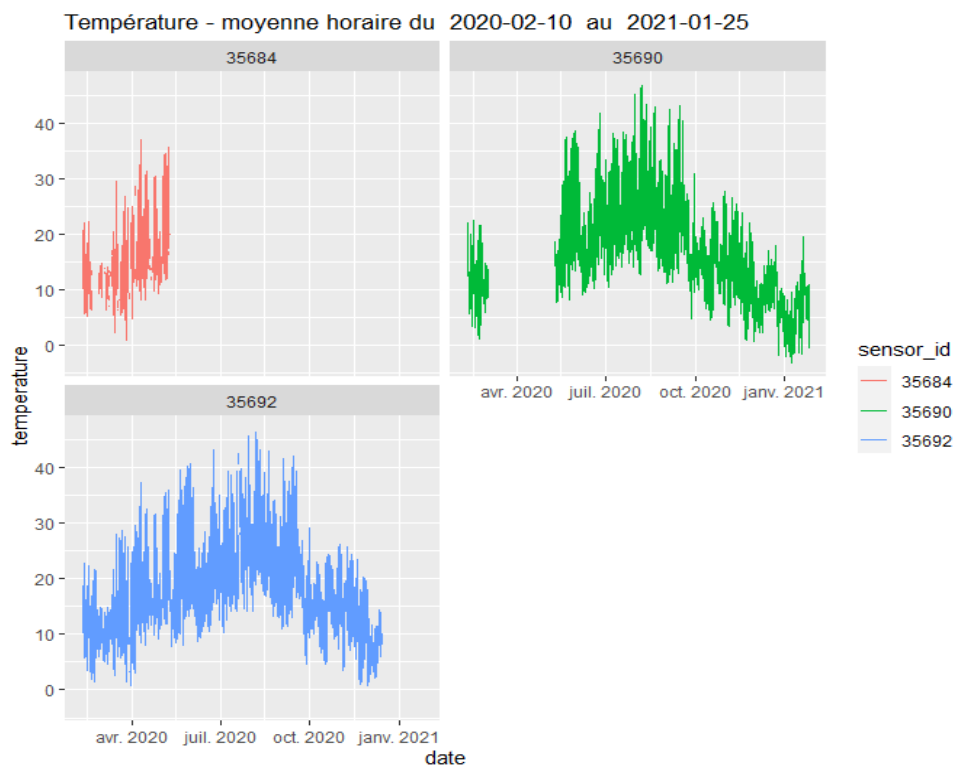


Figure 13 : mesure horaire de la température par les micro-capteurs DHT22 de Mérignac.

Chaque capteurs de particules DSDS011 est accompagné d'un capteur pour la mesure de la température et de l'humidité de type DHT22. La Figure 13 représente les mesures horaires de température des 3 capteurs DHT22. Les taux de fonctionnement sont identiques à ceux des capteurs de particules. L'évolution saisonnière de la mesure est respectée, avec des températures plus faibles en hiver, plus élevées en été. Les gammes de valeurs sont identiques entre les capteurs.

Sur la Figure 14, les mesures horaires de la température des trois capteurs DHT22 sont comparées à la mesure de la station Météo-France de Mérignac. On observe une très bonne corrélation entre les micro-capteurs et les mesures météo-France (corrélation de 0.97 sur les 3 capteurs), ce qui permet de conclure à une bonne fiabilité des mesures de températures par le DHT22.

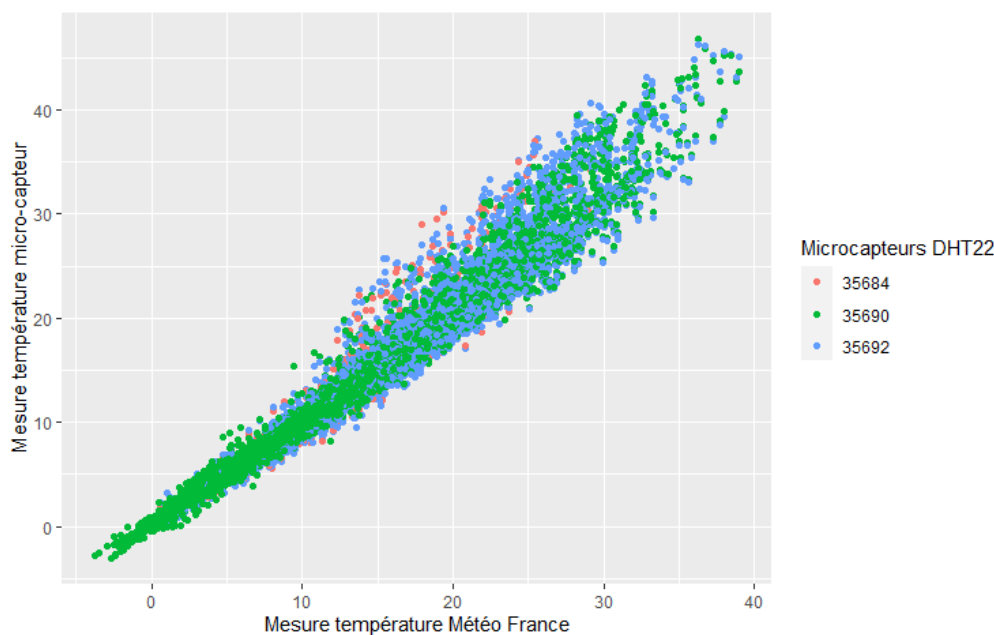


Figure 14 : nuage de points des moyennes horaires de température mesurées par les trois capteurs DHT22 de Mérignac du 10 février 2020 au 25 janvier 2021 et la station Météo-France de Mérignac

3.2.2 Mesure de l'humidité relative

La Figure 15 représente les mesures horaires d'humidité des 3 capteurs DHT22. De même que pour la température les taux de fonctionnement sont identiques à ceux des capteurs de particules. On observe plus de différences entre les capteurs sur la mesure d'humidité que sur la mesure de température.

Pour les trois capteurs, l'humidité est très fréquemment saturée à 100%, ce qui n'est pas le reflet de l'humidité ambiante extérieure, mais d'une exposition trop importante des capteurs à l'eau de pluie ou à de l'eau condensée. Cette dernière atteint les capteurs et fausse la mesure.

Sur la Figure 16, les mesures horaires de l'humidité des trois capteurs DHT22 sont comparées à la mesure de la station Météo-France de Mérignac. La corrélation est moins bonne qu'avec la température (corrélation de 0.8 sur les 3 capteurs). La mesure d'humidité par micro capteurs est presque systématiquement surestimée par rapport à la mesure Météo-France.

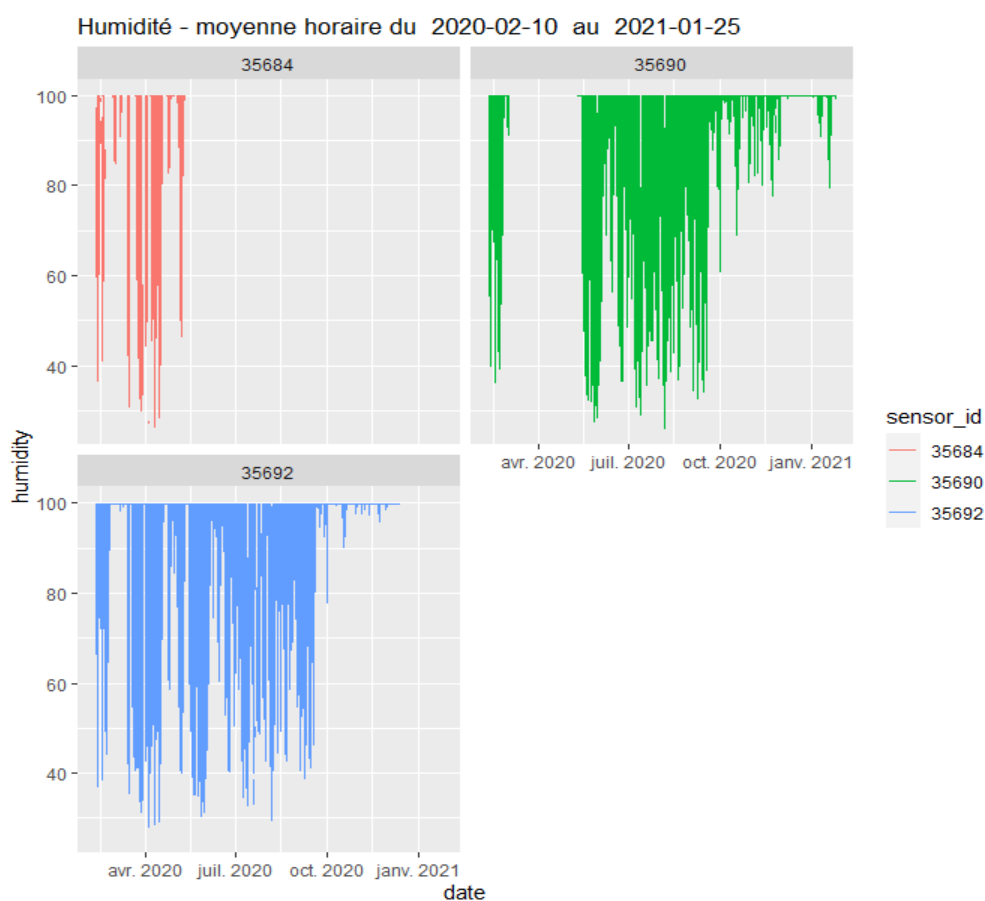


Figure 15 : mesure horaire de l'humidité par les micro-capteurs DTH22 de Mérignac.

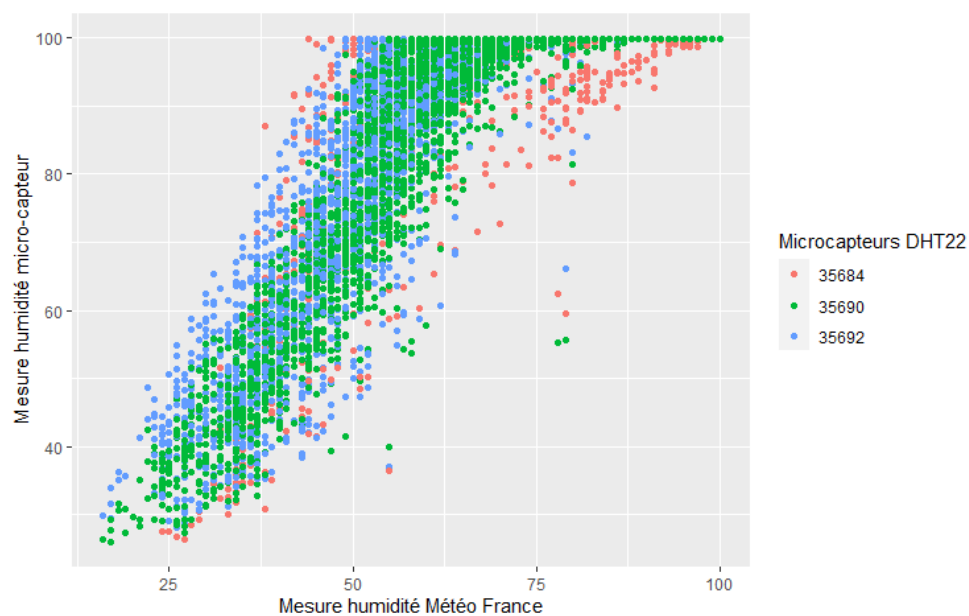


Figure 16 : nuage de points des moyennes horaires d'humidité mesurées par les trois capteurs DHT22 de Mérignac du 10 février 2020 au 25 janvier 2021 et par la station Météo-France de Mérignac

3.3. Comparaison du capteur PM SDS011 35691 aux stations du réseau Atmo

Les stations de mesures du réseau d'Atmo n'étant pas équipées de WIFI, il n'a pas été possible d'installer les micro-capteurs sur ou à proximité immédiate d'une station.

Les comparaisons des mesures micro-capteurs/stations sont donc réalisées de manière qualitative.

Les particules, contrairement à un polluant comme le dioxyde d'azote, ont une distribution spatiale relativement homogène sur un secteur de quelques kilomètres, comme le montre la Figure 17 qui représente les concentrations des stations de Mérignac et de Talence, distantes de plus de 6 km.

Bien que la distance entre les points de mesures puisse à elle seule justifier une partie des différences observées sur les concentrations, mais la comparaison des valeurs reste pertinente pour évaluer les performances des micro-capteurs.

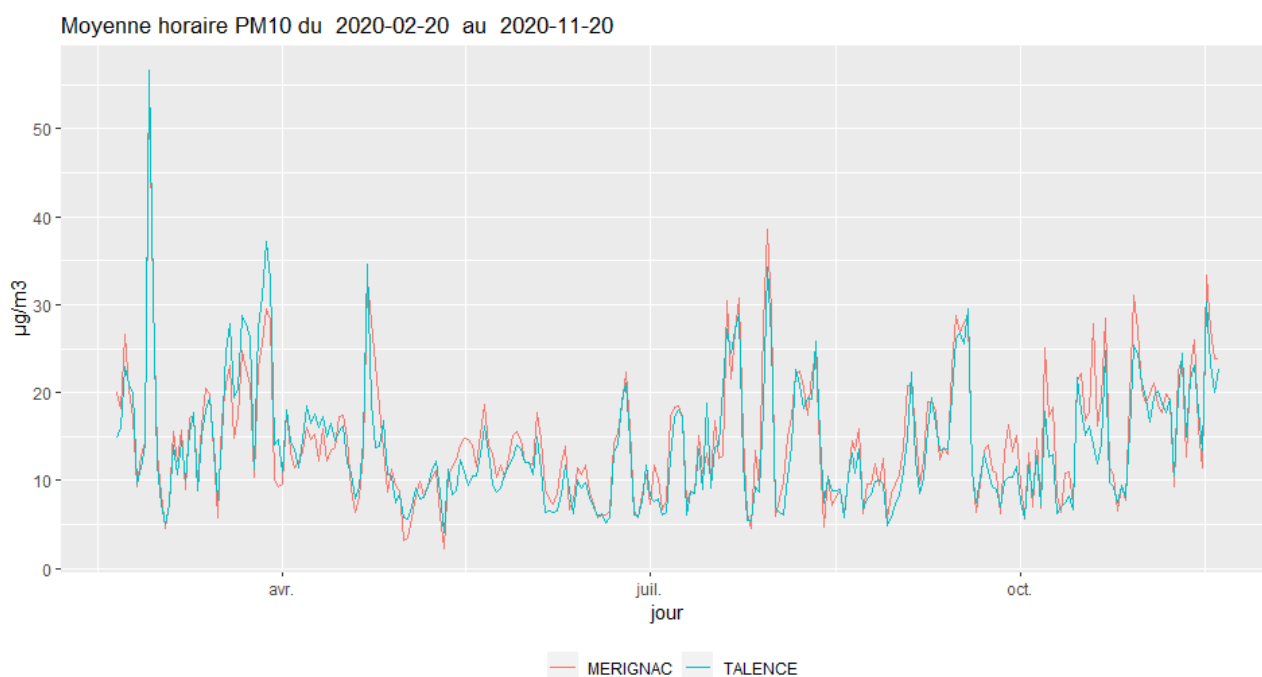


Figure 17 : moyennes journalières PM10 mesurées sur les stations Atmo de Mérignac et de Talence

Le capteur **35691** est celui des trois capteurs installés à Mérignac qui présente le taux de fonctionnement le plus élevé, il est donc utilisé ici comme base de comparaison entre la mesure PM par micro-capteurs SDS011 et les stations de référence du réseau Atmo : **Talence** (station de Fond urbain) et **Mérignac** (station urbaine sous influence du trafic routier).

3.3.1 Comparaison des données du SDS011 de Mérignac avec des données du réseau de mesure des stations Atmo

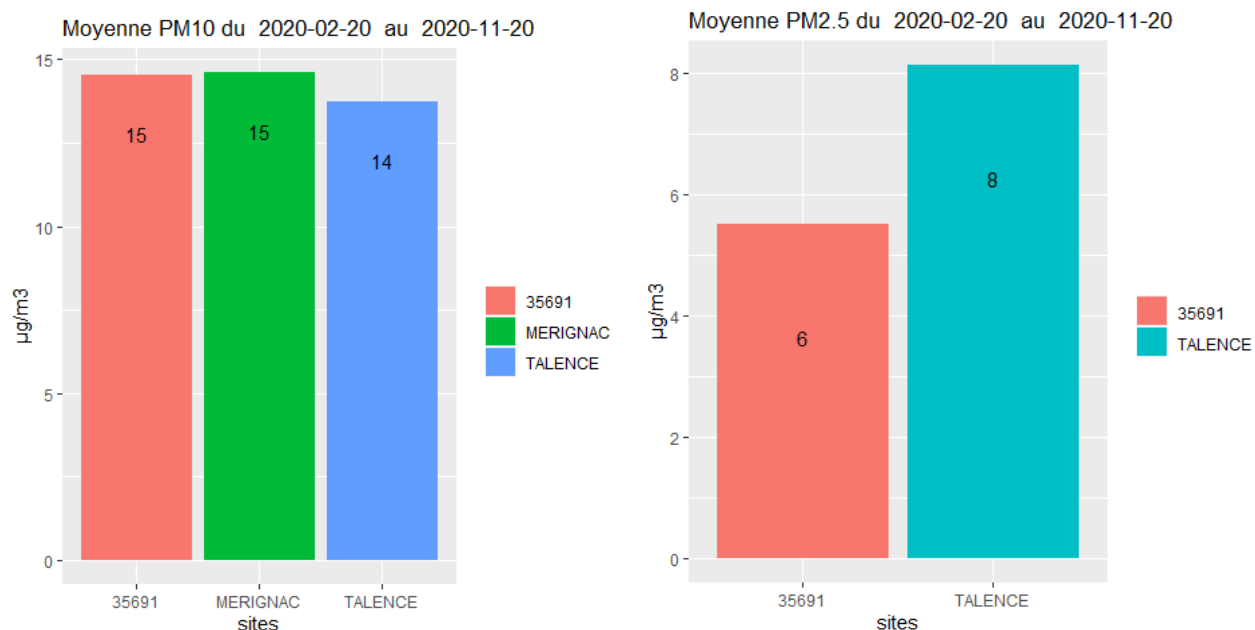


Figure 18 : concentrations moyennes PM10 et PM2.5 mesurées du 20/02/2020 au 20/11/2020 sur le capteur 35691 et les stations du réseau Atmo de Talence et Mérignac

Etant donné la distance entre les stations et les capteurs ainsi que les différences d'environnement, on ne peut attendre des concentrations similaires sur les moyennes PM. Les concentrations moyennes en PM10 et PM2.5 sont cohérentes entre sur le capteurs SDS011 35691 en comparaison de celle du réseau de mesure d'Atmo.

L'évolution des moyennes journalières du SDS011 (Figure 19 et Figure 20) est également relativement cohérente avec celles des stations de Mérignac ou Talence, malgré des périodes de sur ou sous-estimation des valeurs.

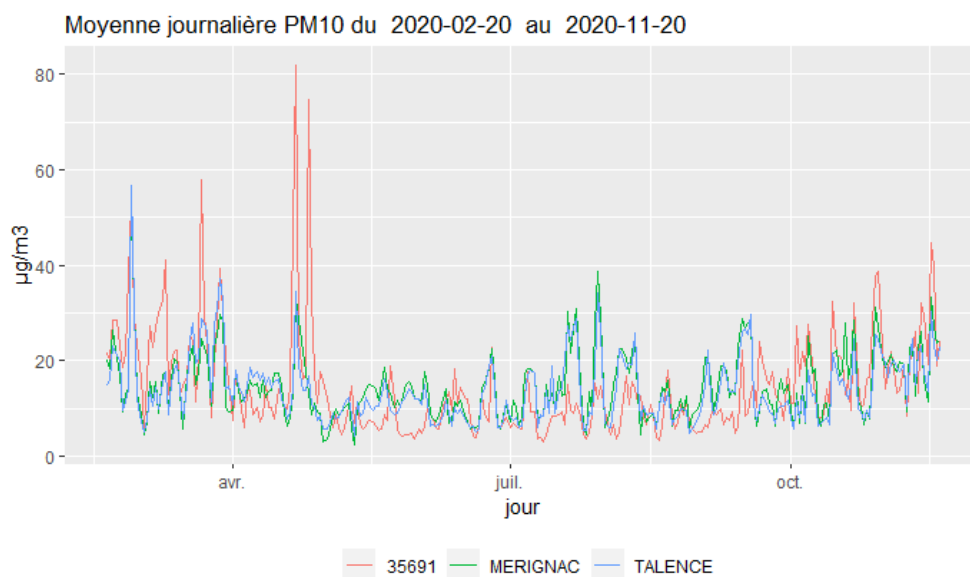


Figure 19 : moyennes journalières PM10 du capteurs 35691 et des stations du réseau Atmo de Mérignac et Talence.

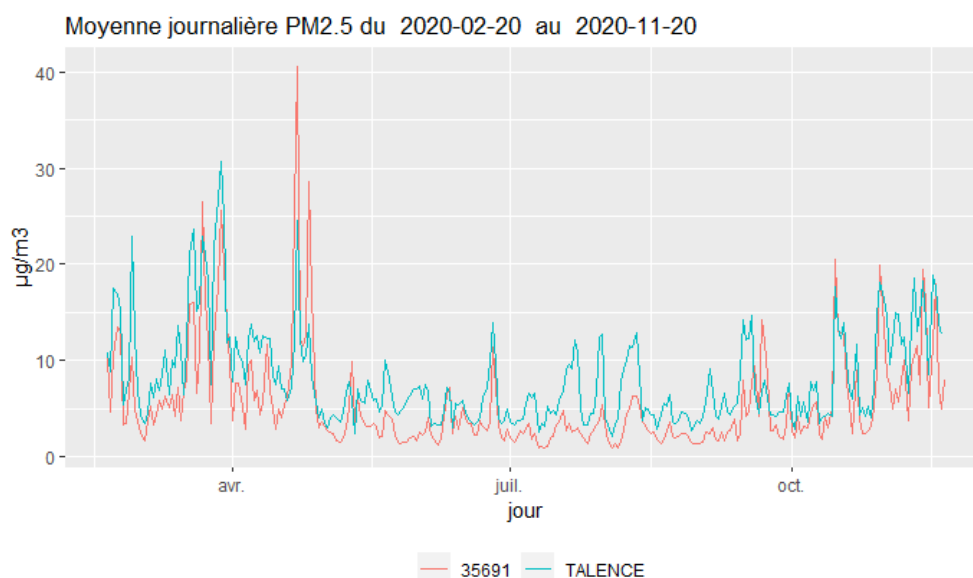


Figure 20 : moyennes journalières PM2.5 du capteur 35691 et la station du réseau Atmo de Talence.

Les Figure 21 et Figure 22 montrent les profils horaires des concentrations PM10 et PM2.5 sur une journée moyenne calculée sur la période de mesure. Le profil du capteur SDS011 35691 est proche de ceux des stations Atmo. Pour les PM10, les valeurs semblent malgré tout surestimées pendant la nuit, et sous estimées durant le jour. La Figure 23 montre que le profil PM10 du SDS011 est très proche de celui de la mesure d'humidité, qui peut potentiellement influencer et fausser la mesure PM10.

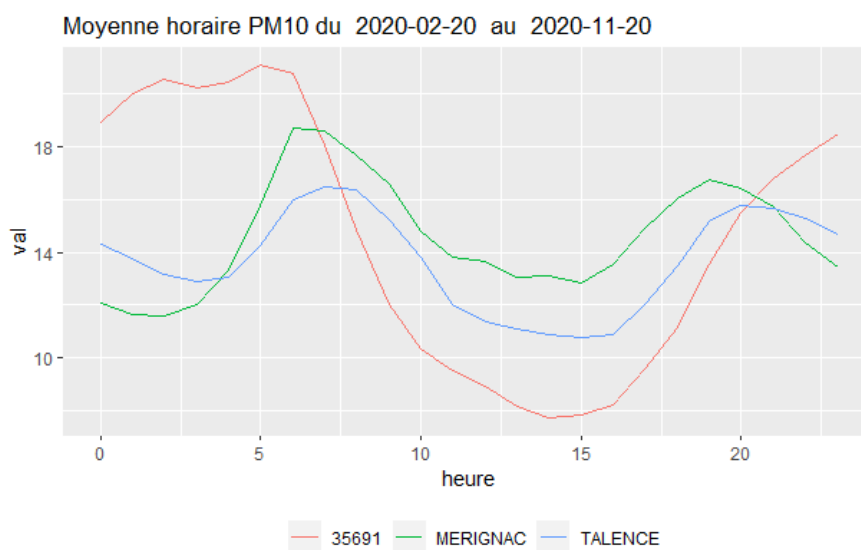


Figure 21 : profils journalier des moyennes horaires PM10 du capteurs 35691 et des stations du réseau Atmo de Mérignac et Talence.

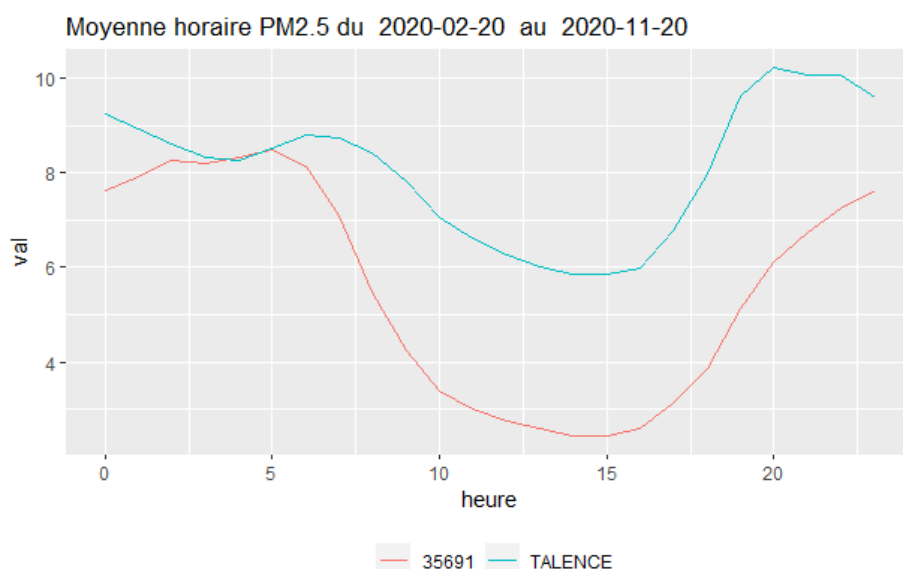


Figure 22 : profils journalier des moyennes horaires PM2.5 du capteurs 35691 et de la station du réseau Atmo de Talence.

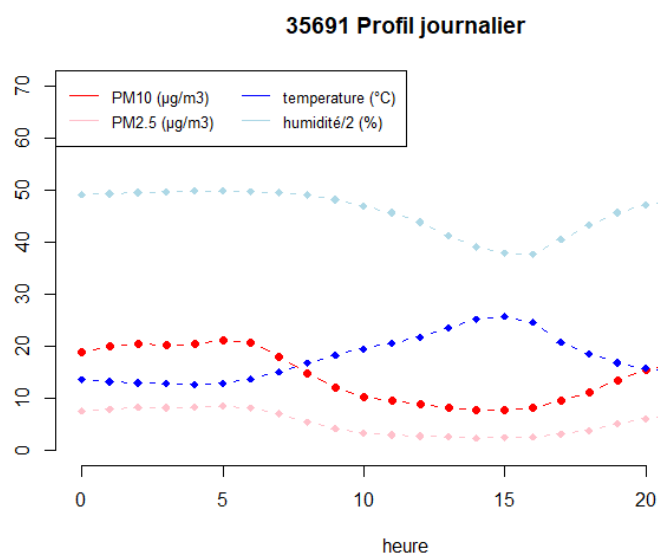


Figure 23 : profils journalier des moyennes horaires PM2.5, PM10, température et humidité du capteurs SDS011 35691 et DHT22 35692

3.3.2 Comparaison statistique des données du SDS011 de Mérignac avec des données du réseau de mesure des stations Atmo

Polluant	Microcapteur SDS011	Station Atmo de référence	Corrélation (R2)	RMSE	Erreur absolue relative	Biais
PM10	35691	MERIGNAC	0.45	13.19	0.94	-0.29
PM10	35691	TALENCE	0.50	14.04	0.80	1.25
PM2.5	35691	TALENCE	0.70	5.96	0.90	-2.37

Tableau 5 : Comparaison statistique des valeurs moyennes horaires des mesures PM10 et PM2.5, entre un micro-capteur SDS011 (le 35691) et les stations Atmo de Mérignac et Talence.

Les statistiques sur les moyennes horaires sont bien meilleures sur les PM2.5 que sur les PM10. La corrélation est relativement faible sur les PM10, qu'il s'agisse de la station de Mérignac ($R^2=0.45$) ou Talence ($R^2=0.5$).

Elle est très correcte, compte tenu de la distance, pour les PM2.5 ($R^2=0.7$). La RMSE, qui reflète les écarts de concentrations à l'échelle horaire, est également bien meilleure (plus faible) sur les PM2.5 que sur les PM10.

A noter que les corrélations entre SDS011 et analyseurs automatiques (TEOM, BAM) dans les articles publiés sur le sujet, pour des mesures réalisées sur un même site, sont souvent nettement plus élevées (ex : $R^2 = 0.86$ sur les PM2.5 (Badura,2018))

Pour illustrer ces résultats, les graphiques ci-dessous représentent sous forme de nuages de points la relation entre les mesures horaires du capteur SDS011 35691 et la station de Talence, qui présente la corrélation la plus proche du micro-capteur. Les deux nuages de points sont relativement dispersés, celui des PM2.5 est plus resserré, reflète d'une meilleure corrélation entre les mesures.

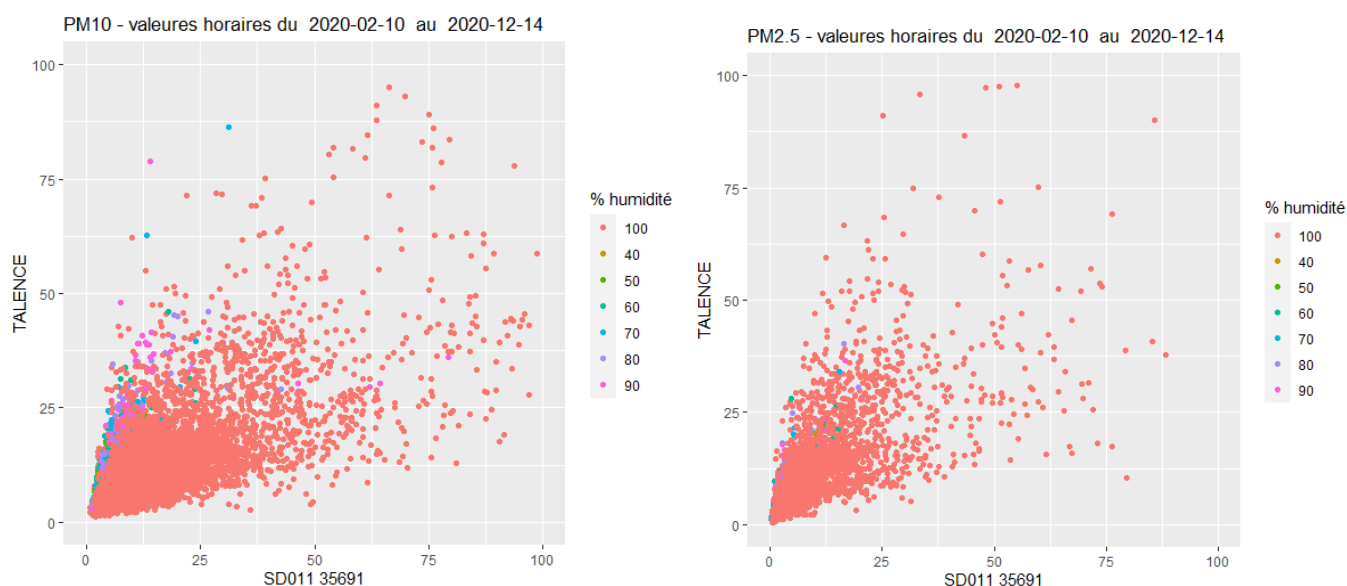


Figure 24 : nuage de points des valeurs horaires PM10 et PM2.5, mesurées sur un capteur SDS011 (35691) et la station Atmo de Talence.

3.3.3 Influence de l'humidité sur la mesure du SDS011 35691

Statistiques de comparaison des moyennes horaires du SDS011 35691 et de la station Atmo de Talence du 10/02/2020 au 14/12/2020 en fonction de l'humidité relative mesurée par le micro-capteur DHT22 35692 (seule la station de Talence a été conservée dans ce paragraphe, car c'est la seule à avoir à la fois une mesure PM10 et PM2.5).

Classe de % d'humidité (RH)	PM10					PM2.5				
	Corrélation (R2)	RMSE	RAE	BIAIS	Nombre de valeurs	Corrélation (R2)	RMSE	RAE	BIAIS	Nombre de valeurs
<40%	0.91	7.59	2.51	-7.06	59	0.97	5.02	2.02	-4.36	59
40%-50%	0.80	7.87	3.34	-7.36	142	0.93	4.77	3.77	-4.41	142
50%-60%	0.74	8.21	3.18	-7.13	184	0.86	4.92	3.44	-4.31	184
60%-70%	0.78	9.50	3.21	-7.44	227	0.91	5.19	3.97	-4.50	227
70%-80%	0.80	9.09	2.55	-7.51	241	0.92	5.59	2.84	-4.72	241
80%-90%	0.71	10.38	2.33	-7.29	286	0.92	5.35	2.89	-4.56	286
90%-100%	0.53	14.94	0.76	3.23	4941	0.70	6.12	0.79	-1.87	4941

Tableau 6 : Comparaison statistique des valeurs moyennes horaires des mesures PM10 et PM2.5, entre un micro-capteur SDS011 (le 37037) et la station Atmo de Talence (du 10/02/2020 au 14/12/2020) en fonction des classes d'humidité relative mesurées par le DHT22 35692.

Les deux graphiques suivants représentent la corrélation et la RMSE entre les valeurs horaires du SDS011 35691 et la station Atmo de Talence, par classe d'humidité relative (HR) mesurée par le DHT22.

Pour les PM10 comme pour les PM2.5, les corrélations les plus élevées correspondent aux conditions les plus sèches (HR<50%). Elles restent élevées jusqu'à 90% pour les PM2.5, et diminuent à partir de 80% pour les PM10. Pour les PM10 comme pour les PM2.5, les corrélations sont fortement dégradées pour une humidité comprise entre 90 et 100%. Cette classe d'humidité représente la très large majorité de la mesure (81% des valeurs). En dessous de 90% d'humidité, les coefficients de corrélation sont tous compris entre 0.71 et 0.97, soit une très bonne corrélation entre les mesures du micro-capteur et de la station.

L'impact de l'humidité est moins flagrante pour la RMSE. On voit cependant qu'elle augmente, et que donc les écarts entre les mesures augmentent, sur la gamme d'humidité comprise entre 50 et 100% pour les PM10, et entre 60% et 90% pour les PM2.5.

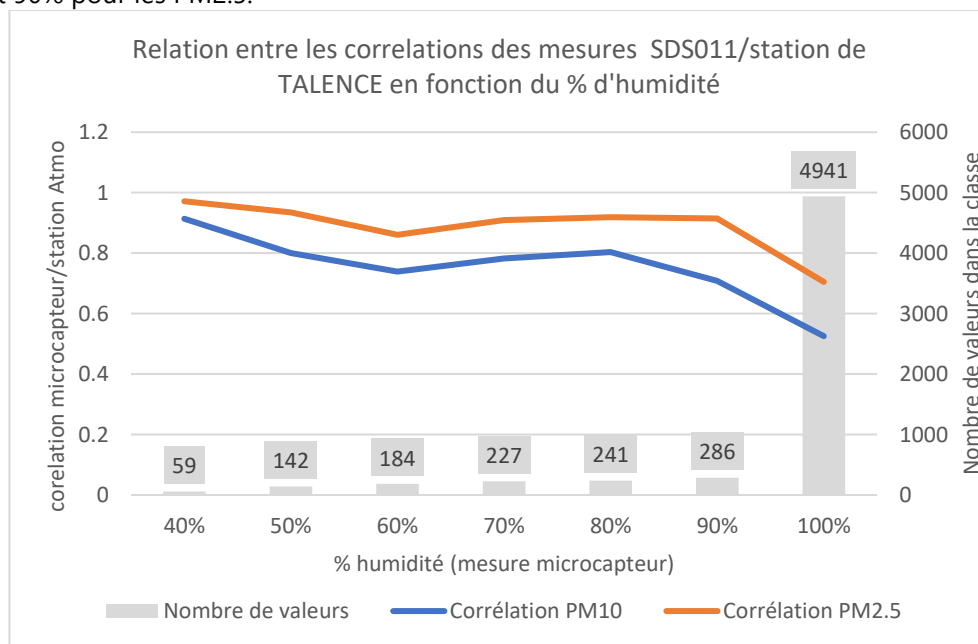


Figure 25 : Relation entre les corrélations des mesures SDS011/station de TALENCE en fonction du % d'humidité (la valeur en abscisse désigne la borne haute de la classe d'humidité)

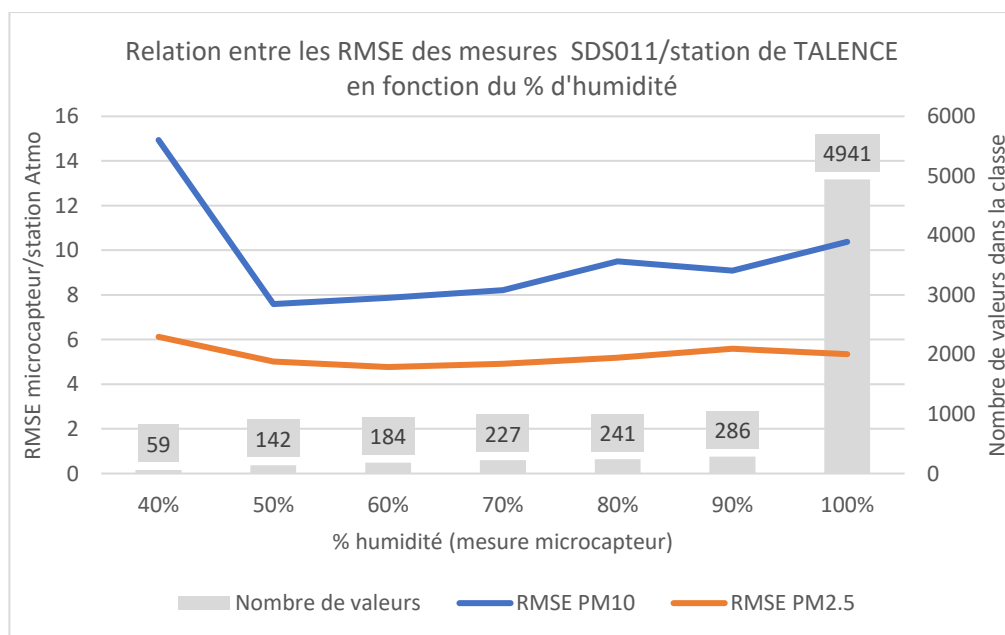


Figure 26 : Relation entre les RMSE des mesures SDS011/station de TALENCE en fonction du % d'humidité (la valeur en abscisse désigne la borne haute de la classe d'humidité)

3.3.4 Influence de la température sur la mesure du SDS011 35691

Statistiques de comparaison des moyennes horaires du SDS011 35691 et de la station Atmo de Talence du 10/02/2020 au 14/12/2020 en fonction de la température mesurée par le micro-capteur DHT22 35692.

Classe de température (°C)	PM10					PM2.5				
	Corrélation (R2)	RMSE	RAE	BIAIS	Nombre de valeurs	Corrélation (R2)	RMSE	RAE	BIAIS	Nombre de valeurs
<10°C	0.56	19.60	0.91	9.83	793	0.71	8.56	0.69	-2.03	793
10°C - 15°C	0.46	18.85	0.84	5.63	1787	0.61	7.15	0.81	-1.45	1787
15°C - 20°C	0.53	7.96	0.88	0.08	1734	0.65	4.19	1.14	-1.99	1734
20°C - 25°C	0.47	8.98	1.52	-4.88	1049	0.75	4.31	2.22	-3.58	1049
25°C - 30°C	0.80	9.57	2.68	-7.20	492	0.90	4.83	3.91	-4.15	492
30°C - 35°C	0.86	9.37	3.63	-7.61	176	0.92	4.88	5.02	-4.21	176
35°C - 40°C	0.88	8.52	4.88	-8.07	49	0.93	4.66	6.45	-4.18	49

Tableau 7 : Comparaison statistique des valeurs moyennes horaires des mesures PM10 et PM2.5, entre un micro-capteur SDS011 (le 37037) et la station Atmo de Talence (du 10/02/2020 au 14/12/2020) en fonction des classes de températures mesurées par le DHT22 37038.

Les deux graphiques suivants représentent la corrélation et la RMSE entre les valeurs horaires du SDS011 35691 et la station Atmo de Talence, par classe de température ambiante mesurée par le DHT22.

Dans l'ensemble, les corrélations sont plus élevées pour les températures les plus hautes. Pour les PM10, les corrélations augmentent à partir des températures >20°C pour atteindre un palier maximal entre 25 et 40°C. Le même palier de corrélation maximale est observé sur les PM2.5 pour les températures les plus élevées. Les résultats sont similaires pour la RMSE, les valeurs (et donc les écarts entre mesures) les plus faibles correspondent aux classes de températures les plus élevées (>15°C).

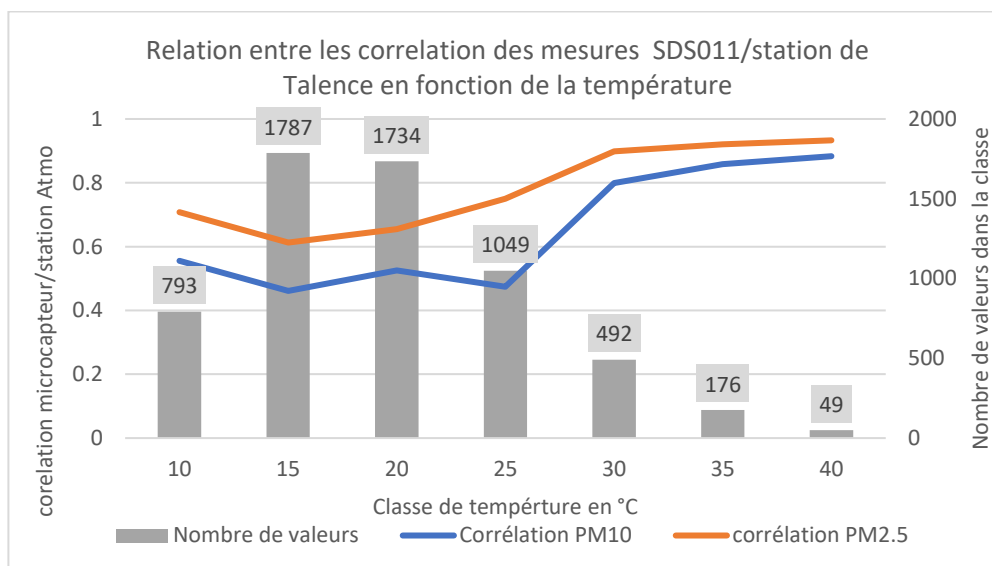


Figure 27 : Relation entre les corrélations des mesures SDS011/station de TALENCE en fonction de la température ambiante (la valeur en abscisse désigne la borne haute de la classe de température)

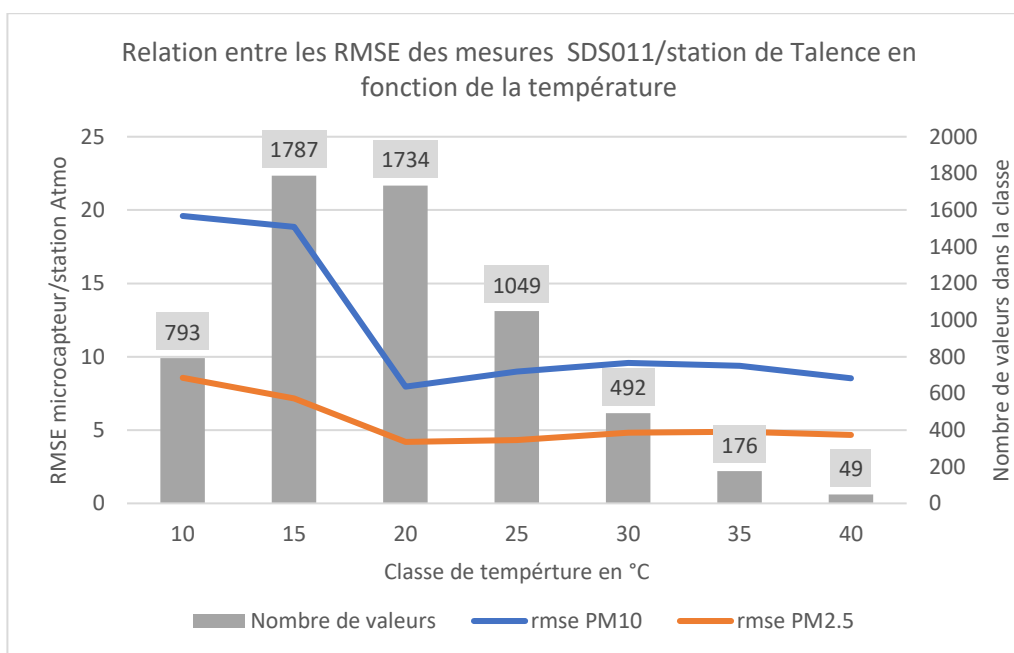


Figure 28 : Relation entre les RMSE des mesures SDS011/station de TALENCE en fonction de la température ambiante (la valeur en abscisse désigne la borne haute de la classe de température)

3.4. Conclusions de la campagne de test menée sur le site de Mérignac

- ➔ Les taux de fonctionnement sont très variables d'un micro-capteurs à l'autre (de 15 à 85%)
- ➔ Les concentrations moyennes mesurées sur les PM10 et PM2.5 par le SDS011 sont cohérentes avec les niveaux attendus sur cette typologie de site.
- ➔ La répétabilité des mesures entre micro-capteurs SDS011 est très bonne.
- ➔ La comparaison des mesures des SDS011 avec les mesures des stations du réseau Atmo montre :
 - des périodes de sur ou sous-estimation des moyennes journalières, qui ne peuvent être attribuée à la seule distance entre les sites.
 - Une meilleure corrélation sur les PM2.5 que sur les PM10
 - Une corrélation moyenne faible pour les PM10 (R^2 compris entre 0.45 et 0.5) mais qui monte entre 0.7 et 0.9 lorsque l'humidité relative est inférieure à 90%
 - Une corrélation moyenne correcte pour les PM2.5 ($R^2=0.7$) mais qui monte entre 0.86 et 0.97 lorsque l'humidité relative est inférieure à 90%
- ➔ Les micro-capteurs ont été exposés à l'eau de pluie, avec un taux de saturation de l'humidité relative à 100% durant 81% du temps pour le capteur 35691.
- ➔ Les taux d'humidité élevés (>70% pour les PM10 et >80% pour les PM2.5) dégradent la corrélation entre le micro-capteur et les stations Atmo.
- ➔ La température influence également la mesure des micro capteurs : les meilleures corrélations et RMSE entre les valeurs des micro-capteurs et des stations Atmo ont été obtenues pour les températures les plus élevées (>25°C)

4. Résultat des tests sur Périgny (Agglomération de La Rochelle)

4.1. Mesures horaires PM10 et PM2.5 des capteurs SDS011

4.1.1. Mesures horaires sur la période

La Figure 29 représente les moyennes horaires PM10 et PM2.5 mesurées par les 2 micro-capteurs SDS011 installés côte à côte sur le site de Périgny. Les micro-capteurs sont chacun désignés par un numéro enregistré sur le site Sensor-Community : 37035 et 37037.

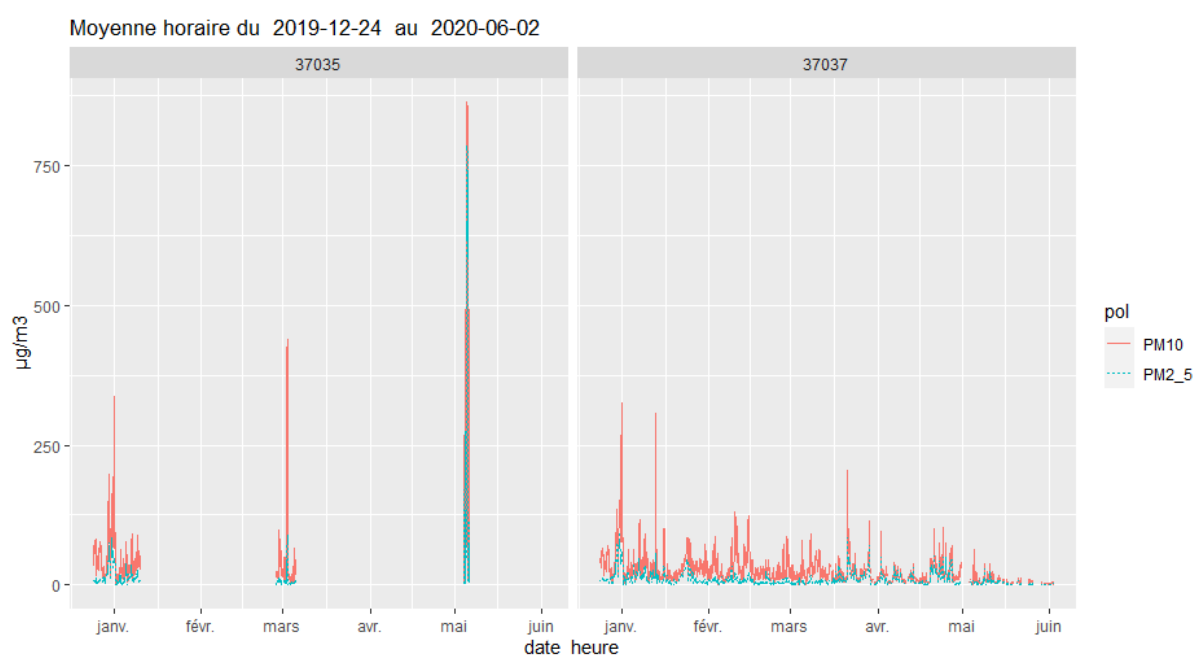


Figure 29 : Moyennes horaires des 2 capteurs SDS011 installés sur Périgny

Sur la période de décembre 2019 à juin 2020, le taux de fonctionnement a été très bon sur le 37037 (90%) et très faible sur le 37035 (16%). Ce dernier a correctement fonctionné jusqu'à mi-janvier. Il a été relancé en mars et mai 2020, mais les mesures sur ces courtes périodes de fonctionnement sont incohérentes et ont été invalidées. Des traces de corrosions liées à l'humidité ont été relevées sur ce capteur.

Seule la période du 24/12/2019 au 10/01/2020 peut être utilisée pour comparer les capteurs sur le site de Périgny.

A noter que contrairement au réseau de mesure officiel d'Atmo, les micro-capteurs n'ont pas fait l'objet d'un suivi technique régulier qui aurait pu permettre d'augmenter leur taux de fonctionnement.

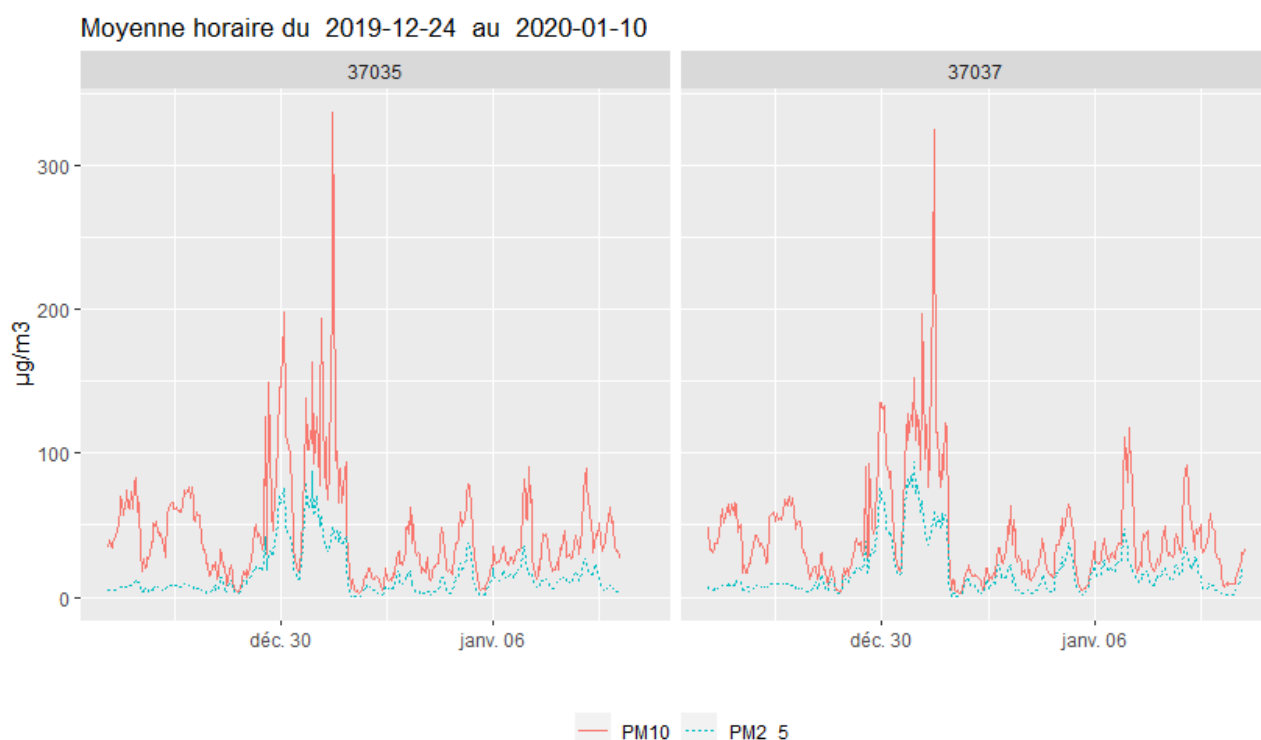


Figure 30 : Moyennes horaires des 2 capteurs SDS011 installés sur Périgny du 24/12/2019 au 10/01/2020

4.1.2. Comparaison des mesures PM10 et PM2.5 entre capteurs SDS011

La Figure 31 et la Figure 32 représentent les moyennes horaires et journalières des PM10 et PM2.5 mesurées par les deux SDS011 de Périgny entre le 24 décembre 2019 et le 10 janvier 2020.

Les courbes des moyennes journalières des 2 micro-capteurs sont extrêmement proches, montrant une très bonne répétabilité de la mesure entre capteurs.

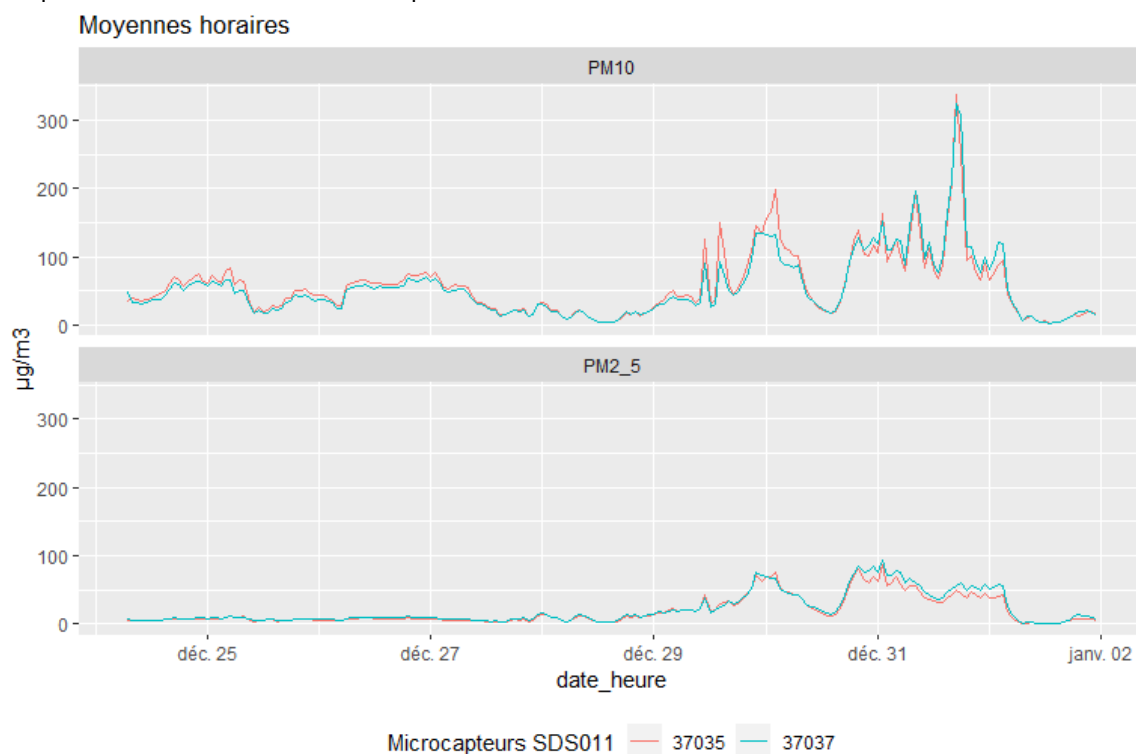


Figure 31 : Moyennes horaires en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ des 2 capteurs SDS011 installés sur Périgny

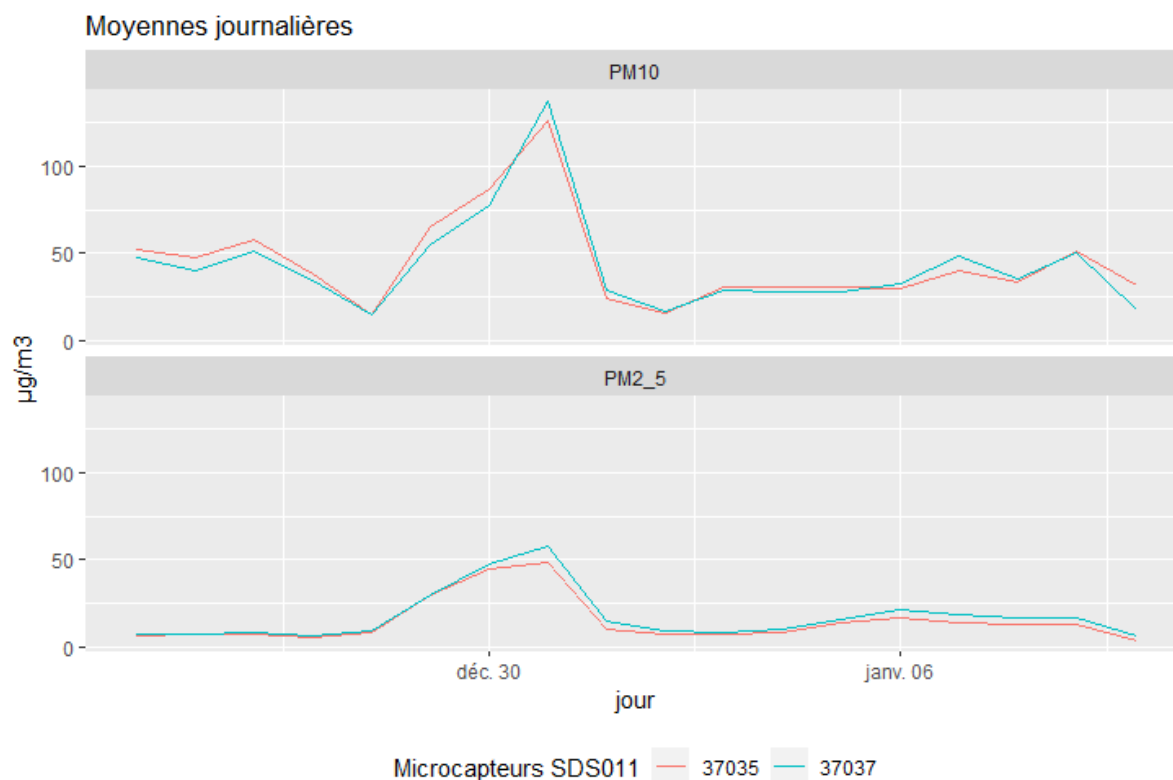


Figure 32 : Moyennes journalières des 2 capteurs SDS011 installés sur Périgny

Les graphiques ci-dessous représentent les corrélations horaires des 2 micro-capteurs sous forme de nuages de points, pour les PM10 et les PM2.5. Les coefficients de corrélation sont supérieurs à 0.97, il y a donc une très bonne répétabilité à l'échelle horaire de la mesure PM10 et PM2.5 entre les deux capteurs SDS011.

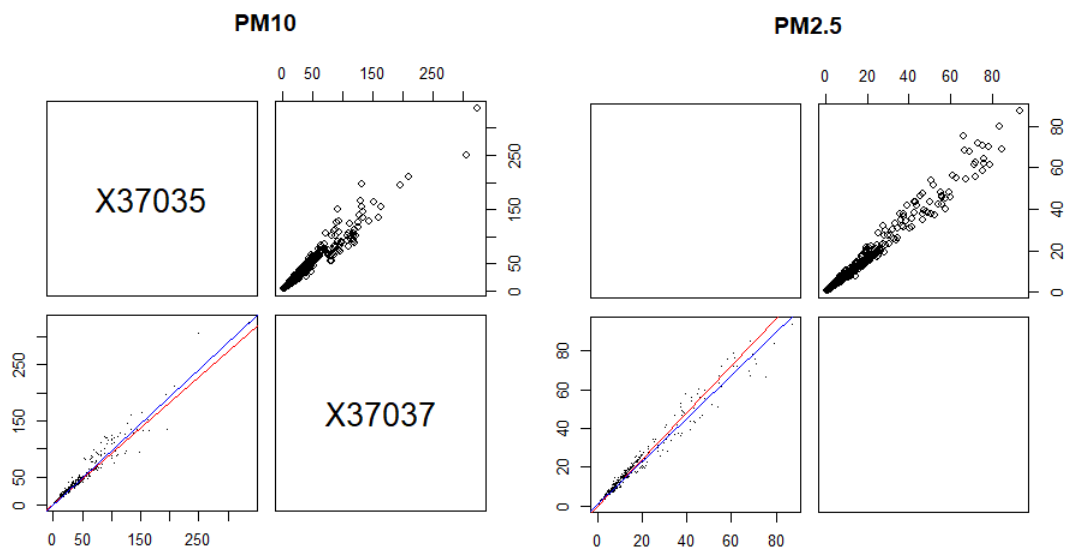


Figure 33 : nuages de points des mesures horaires PM10 et PM2.5 mesurées sur les deux SDS011 de Périgny.

4.2. Mesures horaires des paramètre humidité et température des capteurs DHT22

4.2.1 Mesure de la température extérieure

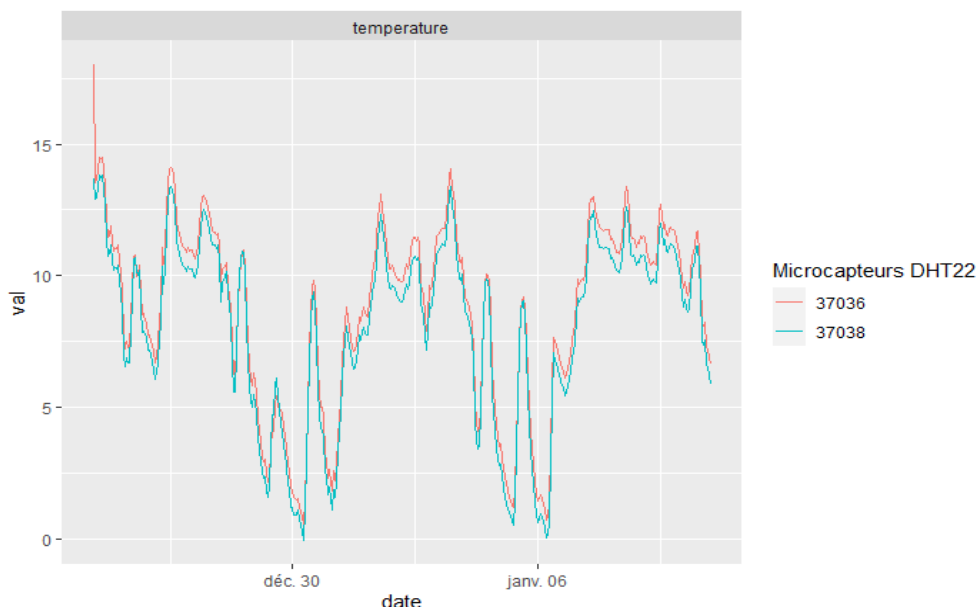


Figure 34 : mesure horaire de la température par les micro-capteurs DHT22 de Périgny.

Chaque capteurs de particules DSDS011 est accompagné d'un capteur pour la mesure de la température et de l'humidité de type DHT22. La Figure 34 représente les mesures horaires de températures des 2 capteurs DHT22 de Périgny. Les courbes sont là encore très proches, la répétabilité de la mesure sur cette période est très bonne.

Sur la Figure 35 les mesures horaires de la température des 2 capteurs DHT22 sont comparées à la mesure de la station Météo-France de La Rochelle-Laleu. On observe une très bonne corrélation entre les micro-capteurs et les mesures météo-France, ce qui permet de conclure à une bonne fiabilité des mesures de température du DHT22.

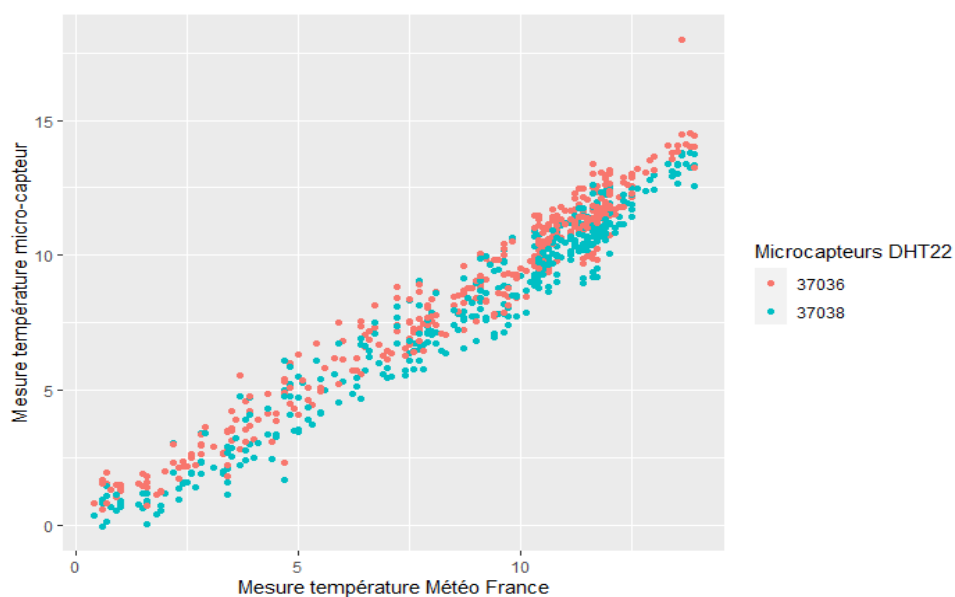


Figure 35 : nuage de points des moyennes horaires de température mesurées par les deux capteurs DHT22 de Périgny et la station Météo-France de La Rochelle-Laleu

4.2.2 Mesure de l'humidité relative

La Figure 36 représente les mesures horaires d'humidité des 2 capteurs DHT22. On observe plus de différences entre les capteurs sur la mesure d'humidité que sur la mesure de température, malgré une bonne corrélation entre les deux mesures sur la période.

Pour le 37038, l'humidité est très fréquemment saturée à 100%, ce qui n'est pas le reflet de l'humidité ambiante extérieure, mais d'une exposition trop importante des capteurs à l'eau de pluie ou à de l'eau condensée. Cette dernière atteint les capteurs et fausse la mesure. Le 37036 en revanche n'a jamais atteint le taux de saturation de 100% sur la période.

Sur la Figure 37, les mesures horaires de l'humidité des 2 capteurs DHT22 sont comparées à la mesure de la station Météo-France de La rochelle-Laleu. La corrélation est moins bonne qu'avec la température. Les valeurs d'humidité mesurées par micro capteurs sont plus élevées que celles de la mesure Météo-France.

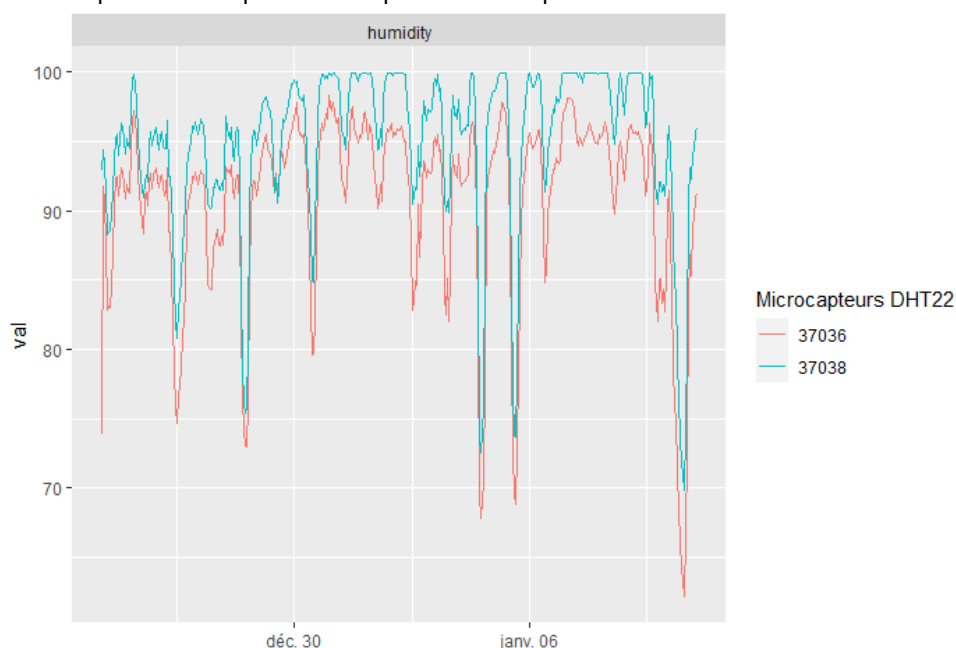


Figure 36 : mesure horaire de l'humidité par les micro-capteurs DHT22 de Périgny.



Figure 37 : nuage de points des moyennes horaires d'humidité mesurées par les 2 capteurs DHT22 de Périgny et la station Météo-France de La Rochelle-Laleu

4.3. Comparaison du capteur PM SDS011 37037 aux stations du réseau Atmo

Les stations de mesures du réseau d'Atmo n'étant pas équipées du WIFI nécessaire au fonctionnement des micro-capteurs, il n'a pas été possible d'installer les micro-capteurs sur ou à proximité immédiate d'une station. Les comparaisons des mesures micro-capteurs/stations sont donc réalisées de manière qualitative avec les stations de mesures ATMO les plus proches : **Place de Verdun** à La Rochelle (station de Fond urbain) et **Aytré** (station de fond péri-urbaine).

Les particules, contrairement à un polluant comme le dioxyde d'azote, ont une distribution spatiale relativement homogène sur un secteur de quelques kilomètres, comme le montre la Figure 38, qui représente les concentrations des stations d'Aytré et de La Rochelle, distantes de 4km.

La distance entre les points de mesures peut à elle seule justifier une partie des différences observées sur les concentrations, mais la comparaison des valeurs reste pertinente pour évaluer les performances des micro-capteurs.

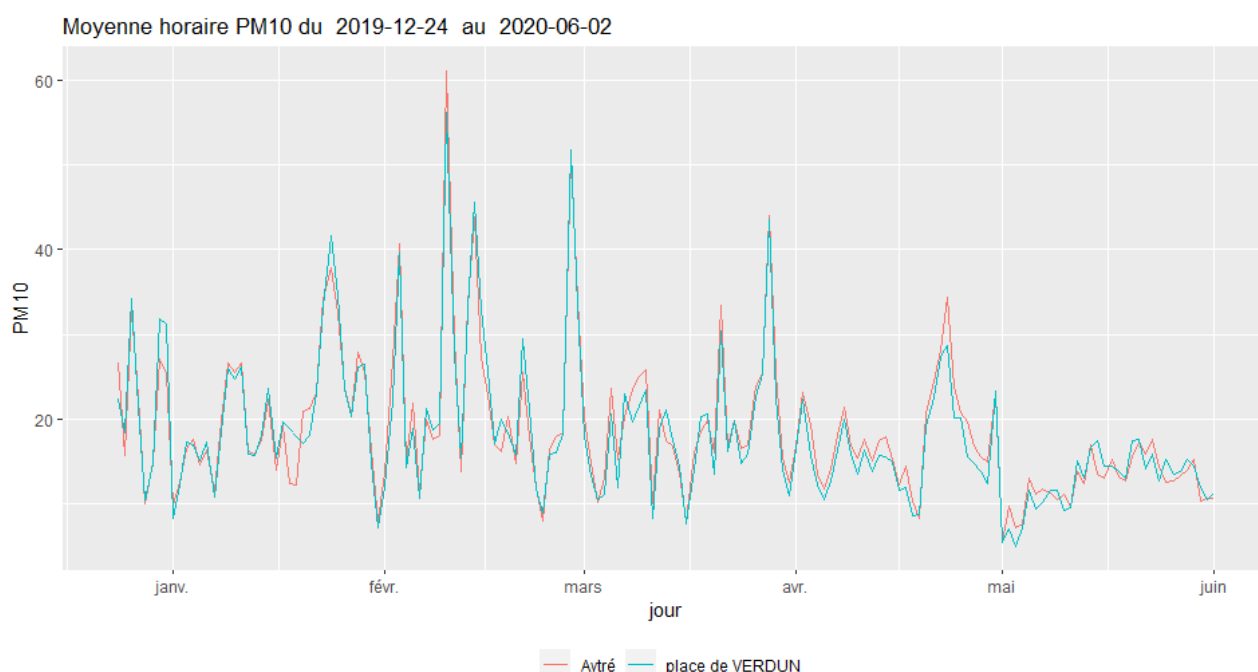


Figure 38 : moyennes journalières PM10 mesurées sur les stations Atmo d'Aytré et de la place de Verdun à La Rochelle

Le capteur **37037** est celui qui présente, sur les deux micro-capteurs installés à Périgny, le taux de fonctionnement le plus élevé, il est donc utilisé ici comme base de comparaison entre la mesure PM par micro-capteurs SDS011 et les stations de référence du réseau Atmo.

La comparaison a été réalisée sur la période de fonctionnement du capteur 37037, soit du 24/12/2019 au 02/06/2020.

4.3.1 Comparaison des données moyennes du SDS011 de Mérignac avec des données du réseau de mesure des stations Atmo

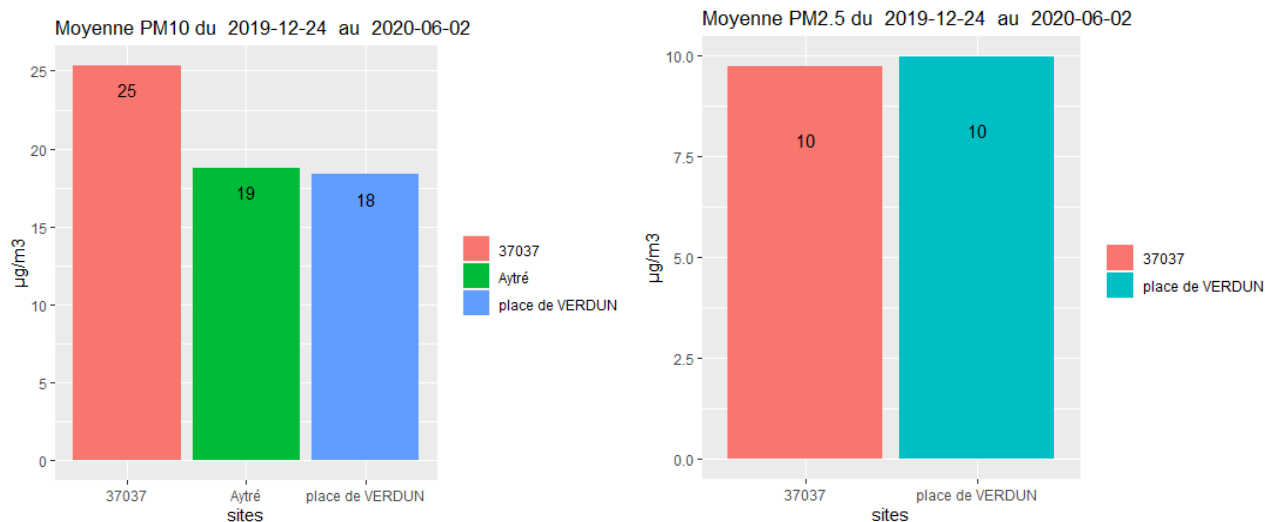


Figure 39 : concentrations moyennes PM10 et PM2.5 mesurées sur le capteur 37037 et les stations du réseau Atmo de la place de Verdun et Aytré

Les concentrations du capteurs SDS011 37037 sont vraisemblablement surestimées pour les PM10 en comparaison avec les stations du réseau Atmo, elles semblent en revanche cohérentes pour les PM2.5.

De même, l'évolution des moyennes journalières du SDS011 37037 est particulièrement surestimée par rapport aux stations Atmo sur le mois de janvier, puis semblent plus cohérentes de février à juin. La courbe des concentrations moyennes journalières du SDS011 est plus proche de celles des stations Atmo pour les PM2.5 que pour les PM10.

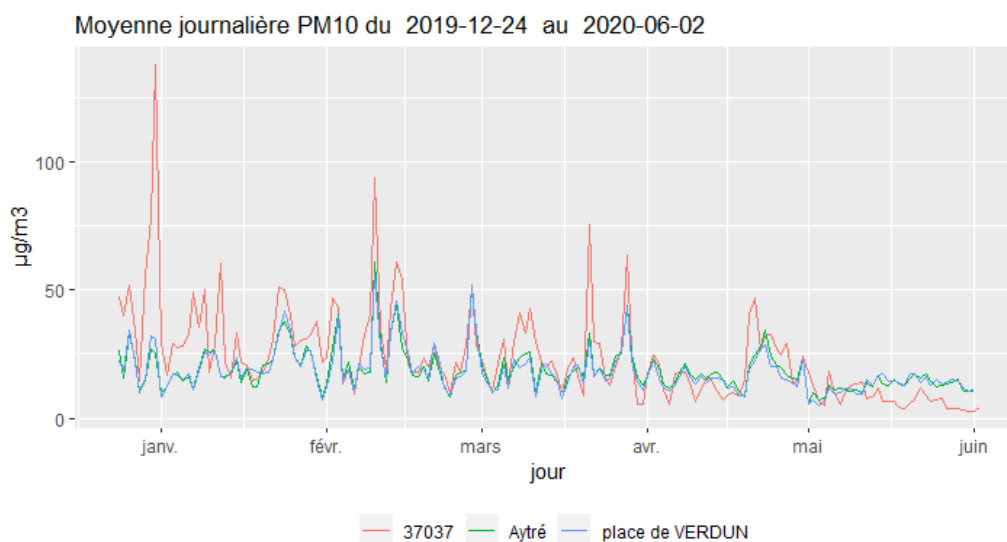


Figure 40 : moyennes journalières PM10 du capteurs 37037 et des stations du réseau Atmo de la place de Verdun et d'Aytré.

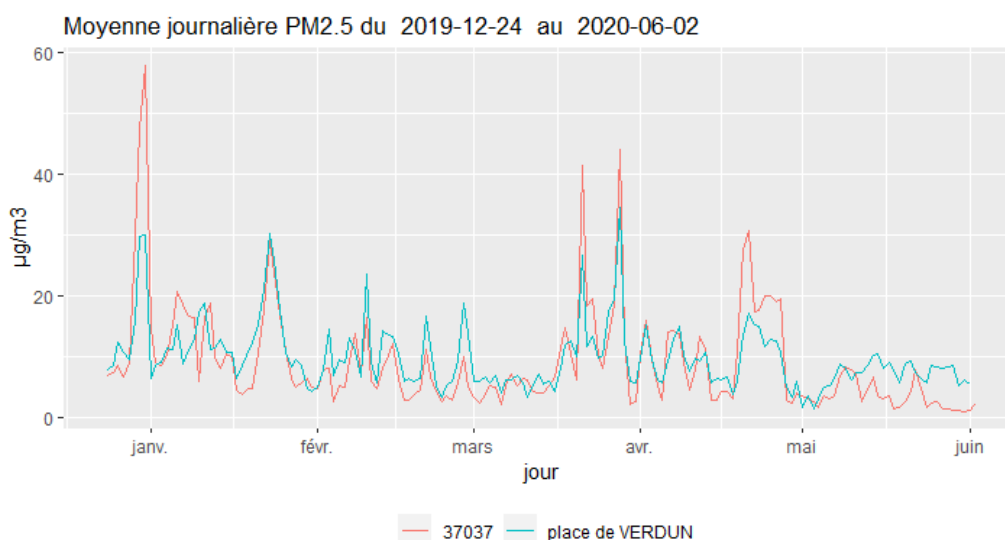


Figure 41 : moyennes journalières PM10 du capteurs 37037 et de la station du réseau Atmo de la place de Verdun.

La Figure 42 montrent les profils horaires des concentrations PM10 et PM2.5 sur une journée moyenne calculée sur la période de mesure. Le profil du capteur SDS011 37037 est très différent de ceux des stations Atmo pour les PM10 et les PM2.5. Les valeurs sont particulièrement surestimées pendant la nuit, et sous estimées pour les PM2.5 durant le jour. La Figure 43 montre que les profils PM10 et PM2.5 du SDS011 sont très proches de celui de la mesure d'humidité, qui peut potentiellement influencer et fausser la mesure PM.

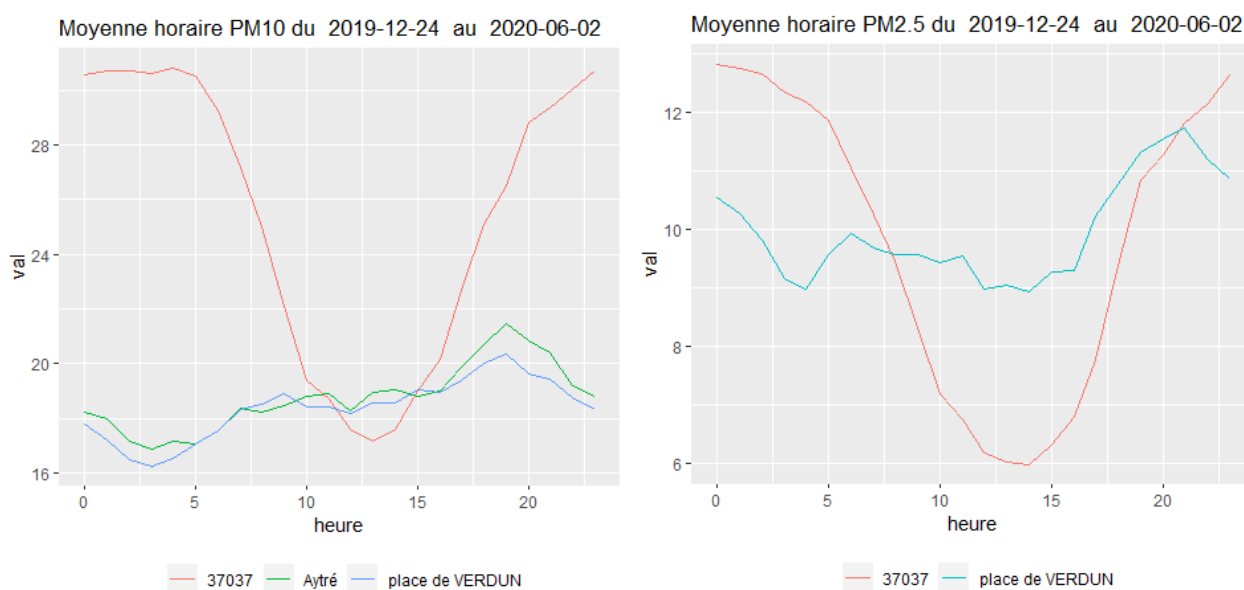


Figure 42 : moyennes journalières PM10 du capteurs 37037 et des stations du réseau Atmo de la place de Verdun et Aytré.

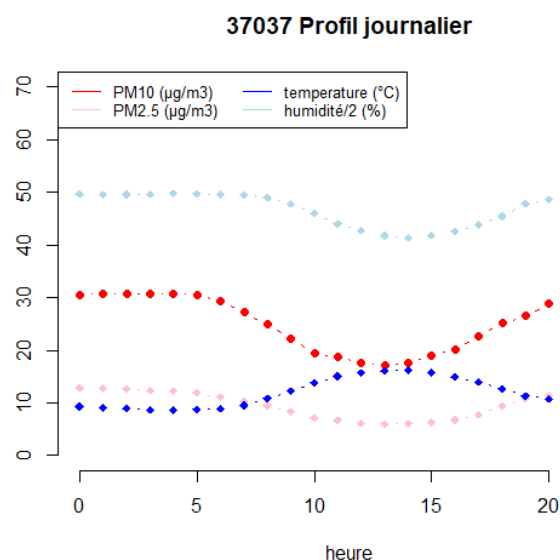


Figure 43 : profils journalier des moyennes horaires PM2.5, PM10, température et humidité du capteurs SDS011 37037 et DHT22 37038

4.3.2 Comparaison statistique des données du SDS011 37037 de Périgny avec des données du réseau de mesure des stations Atmo

Comparaison statistique des données du SDS011 de Périgny avec des données du réseau de mesure des stations Atmo

Polluant	Microcapteur SDS011	Station Atmo de référence	Corrélation	RMSE	Erreur absolue relative	Biais
PM10	37037	Place de Verdun	0.54	21.75	0.73	6.72
PM10	37037	Aytré	0.54	21.57	0.72	6.21
PM2.5	37037	Place de Verdun	0.72	7.74	0.69	-0.33

Tableau 8 : Comparaison statistique des valeurs moyennes horaires des mesures PM10 et PM2.5, entre un micro-capteur SDS011 (le 37037) et les stations Atmo de la place de Verdun et d'Aytré (du 24/12/2019 au 02/06/2020).

Les statistiques sur les moyennes horaires sont bien meilleures sur les PM2.5 que sur les PM10. La corrélation est relativement faible ($R^2=0.54$) sur les PM10. Elle est très correcte, compte tenu de la distance, pour le PM2.5 ($R^2=0.72$). La RMSE, qui reflète les écarts de concentrations à l'échelle horaire, est également bien meilleure sur les PM2.5 que sur les PM10.

A noter que les corrélations entre SDS011 et analyseurs automatiques (TEOM, BAM) dans les articles publiés sur le sujet, pour des mesures réalisées sur un même site, sont souvent nettement plus élevées (ex : $R^2 = 0.86$ sur les PM2.5 (Badura,2018))

Pour illustrer ces résultats, les graphiques ci-dessous représentent sous forme de nuages de points la relation entre les mesures horaires du capteur SDS011 37037 et la station de Talence, qui présente la corrélation la plus proche du micro-capteur. Les deux nuages de points sont relativement dispersés, celui des PM2.5 est plus resserré, reflet d'une meilleure corrélation entre les mesures.

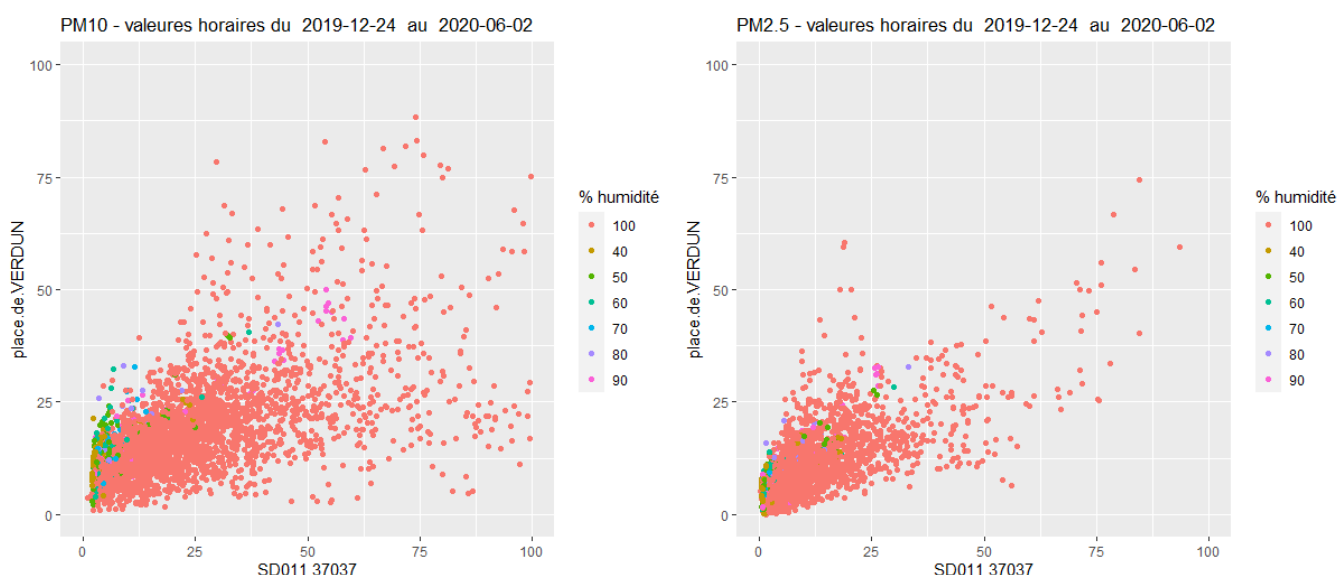


Tableau 9 : nuage de points des valeurs horaires PM10 et PM2.5, mesurées sur un capteur SDS011 (37037) et la station Atmo de la place de Verdun à La Rochelle.

4.3.3 Influence de l'humidité sur la mesure du SDS011 37037

Statistiques de comparaison des moyennes horaires du SDS011 37037 et de la station Atmo de la place de Verdun à La Rochelle du 24/12/2019 au 02/06/2020 en fonction de l'humidité mesurée par le micro-capteur DHT22 37038.

	PM10					PM2.5				
Classe de % d'humidité (RH)	Corrélation (R2)	RMSE	RAE	BIAIS	Nombre de valeurs	Corrélation (R2)	RMSE	RAE	BIAIS	Nombre de valeurs
<40%	0.74	8.78	2.55	-8.11	93	0.77	4.44	1.51	-3.56	93
40%-50%	0.75	8.92	2.30	-7.90	100	0.86	4.91	1.41	-4.21	96
50%-60%	0.68	9.59	2.43	-8.02	53	0.79	4.98	1.69	-4.02	53
60%-70%	0.65	9.10	2.86	-7.92	39	0.64	4.32	1.91	-3.71	39
70%-80%	0.72	7.31	1.28	-5.33	63	0.84	5.53	1.67	-4.78	62
80%-90%	0.94	7.63	0.49	-1.47	89	0.90	5.35	1.01	-4.47	89
90%-100%	0.52	23.08	0.76	8.66	2931	0.71	8.07	0.67	0.24	2924

Tableau 10 : Comparaison statistique des valeurs moyennes horaires des mesures PM10 et PM2.5, entre un micro-capteur SDS011 (le 37037) et la station Atmo de la place de Verdun (du 24/12/2019 au 02/06/2020) en fonction des classes d'humidité relative mesurées par le DHT22 37038.

Les deux graphiques suivants représentent la corrélation et la RMSE entre les valeurs horaires du SDS011 37037 et la station Atmo la place de Verdun à La rochelle, par classe d'humidité relative (HR) mesurée par le DHT22.

Pour les PM10 les corrélations sont fortement dégradées pour une humidité comprise entre 90 et 100%. Cette classe d'humidité représente la très large majorité de la mesure (87% des valeurs). Les corrélations sur les PM10 pour les classes d'humidité inférieures à 90% sont toutes beaucoup plus élevées que la corrélation moyenne ($R^2=0.54$), comprises entre 0.65 et 0.94. L'impact est moins net sur les PM2.5.

L'impact de l'humidité est flagrant pour la RMSE sur les PM10. Elle augmente, fortement lorsque l'humidité est supérieure à 90%. L'impact sur les PM2.5 est revanche peu visible.

Pour les PM10 et les PM2.5, le biais, qui est négatif (sous-estimation) pour les classes d'humidité <90%, est positif (surestimation) pour les classes d'humidité >90%.

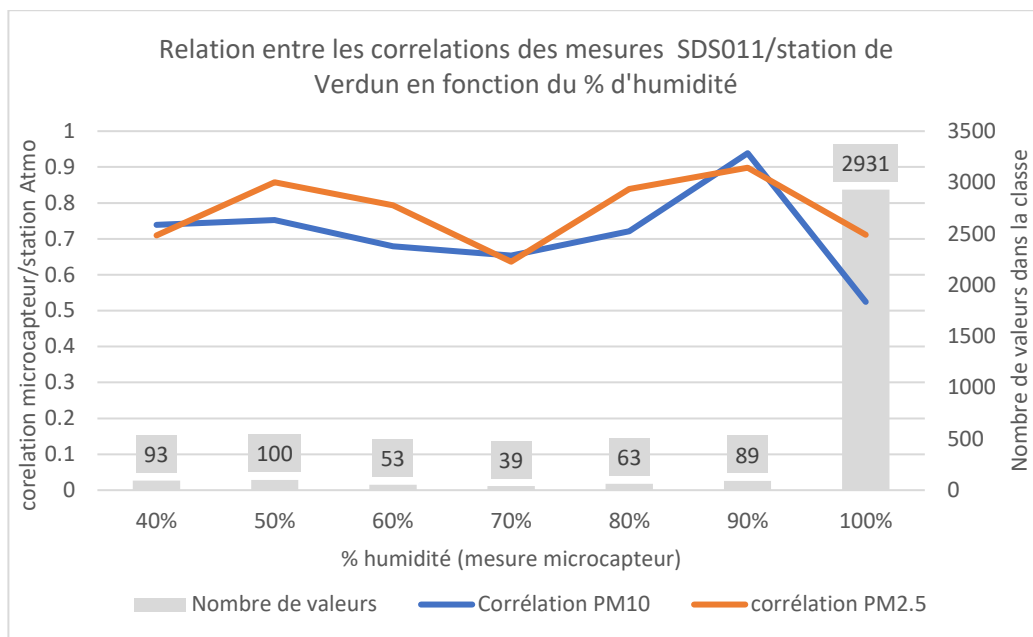


Figure 44 : Relation entre les corrélations des mesures SDS011/station de la place de Verdun en fonction du % d'humidité (la valeur en abscisse désigne la borne haute de la classe d'humidité)

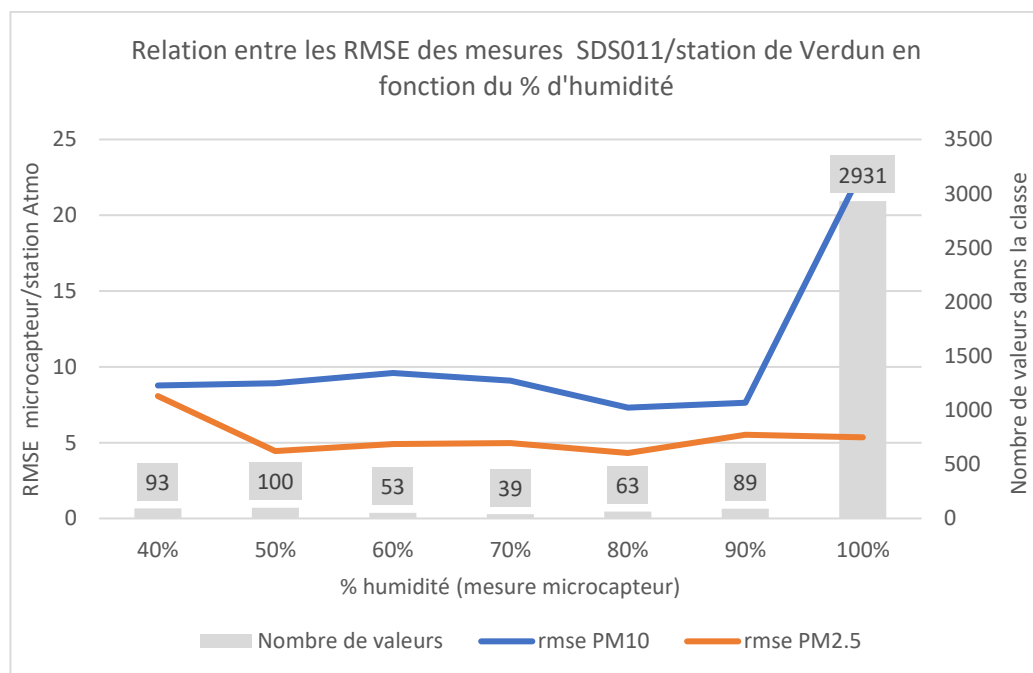


Figure 45 : Relation entre les RMSE des mesures SDS011/station de la place de Verdun en fonction du % d'humidité (la valeur en abscisse désigne la borne haute de la classe d'humidité)

4.2.3 Influence de la température sur la mesure du SDS011 37037

Statistiques de comparaison des moyennes horaires du SDS011 37037 et de la station Atmo de la place de Verdun à La Rochelle du 24/12/2019 au 02/06/2020 en fonction de la température mesurée par le microcapteur DHT22 37038.

	PM10					PM2.5				
Classe de température (°C)	Corrélation (R2)	RMSE	RAE	BIAIS	Nombre de valeurs	Corrélation (R2)	RMSE	RAE	BIAIS	Nombre de valeurs
<10°C	0.43	29.79	0.82	12.38	1335	0.74	9.46	0.62	0.88	1337
10°C - 15°C	0.69	16.25	0.73	7.12	1305	0.59	6.92	0.83	-0.48	1301
15°C - 20°C	0.66	9.84	0.75	-1.60	394	0.81	5.52	0.64	-0.85	389
20°C - 25°C	0.74	7.64	2.27	-6.58	205	0.80	4.29	1.51	-3.52	204
25°C - 30°C	0.54	10.02	5.89	-9.00	99	0.46	5.33	4.58	-4.57	95
30°C - 35°C	0.73	11.14	14.30	-10.42	30	0.45	5.62	13.29	-5.42	30

Tableau 11 : Comparaison statistique des valeurs moyennes horaires des mesures PM10 et PM2.5, entre un micro-capteur SDS011 (le 37037) et la station Atmo de la place de Verdun (du 24/12/2019 au 02/06/2020) en fonction des classes de températures mesurées par le DHT22 37038.

Les deux graphiques suivants représentent la corrélation et la RMSE entre les valeurs horaires du SDS011 37037 et la station Atmo de la place de Verdun, par classe de température ambiante mesurée par le DHT22.

Les corrélations sont plus élevées sur les PM10 pour les températures moyennes comprises entre 10 et 25 °C, et pour les températures supérieures à 30°C.

Pour les PM2.5, les corrélations sont meilleures pour les températures comprises entre 15 et 25°C.

Pour la RMSE, les valeurs (et donc les écarts entre mesures) les plus faibles sur les PM10 correspondent aux classes de températures les plus élevées (> 15°C). L'impact de la température est moins marqué pour les PM2.5.

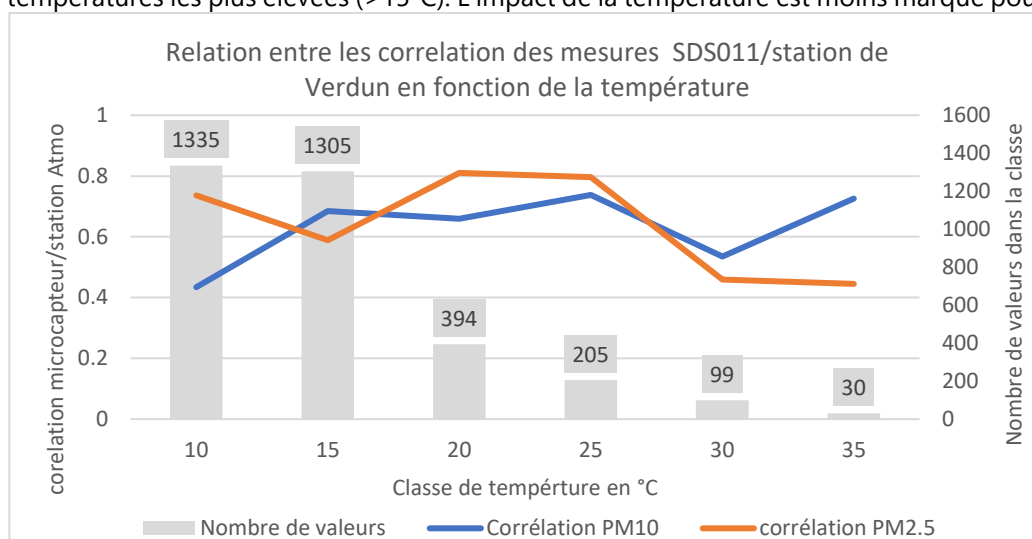


Figure 46 : Relation entre les corrélations des mesures SDS011/station de la place de Verdun en fonction de la température (la valeur en abscisse désigne la borne haute de la classe de température)

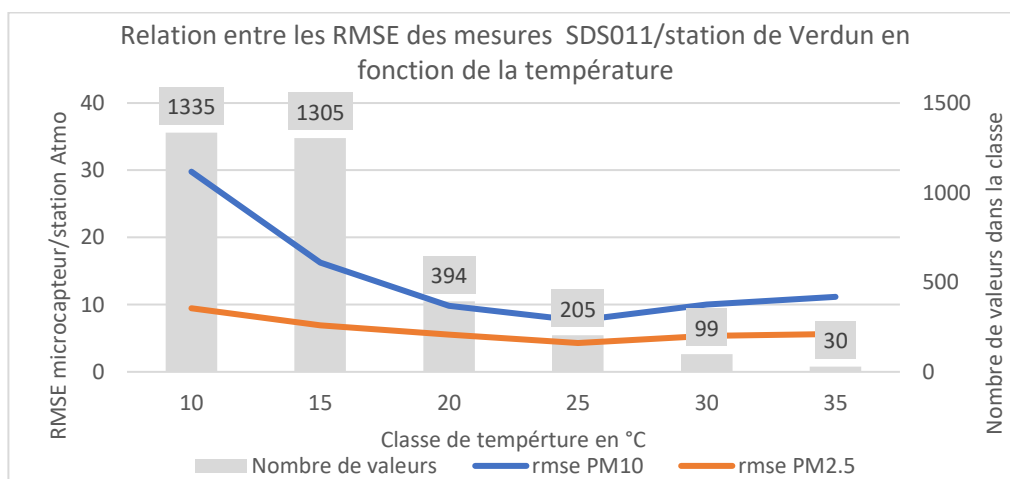


Figure 47 : Relation entre les RMSE des mesures SDS011/station de la place de Verdun en fonction de la température (la valeur en abscisse désigne la borne haute de la classe de température)

4.4. Conclusions sur la campagne de test menée sur le site de Périgny

- Les taux de fonctionnement sont très variables d'un micro-capteurs à l'autre (de 16 à 90%)
- Les concentrations moyennes mesurées sur les PM2.5 par le SDS011 sont cohérentes avec les niveaux attendus sur cette typologie de site. Les concentrations de PM10 semblent surestimées, en particulier durant le mois de janvier 2020.
- La répétabilité des mesures entre micro-capteurs SDS011 est très bonne.
- La comparaison des mesures des SDS011 avec les mesures des stations du réseau Atmo montre :
 - des périodes de sur ou sous-estimation des moyennes journalières, qui ne peuvent être attribuée à la seule distance entre les sites.
 - Une meilleure corrélation sur les PM2.5 que sur les PM10
- Les micro-capteurs ont été exposés à l'eau de pluie, avec un taux de saturation de l'humidité relative à 100% durant 87% du temps pour le capteur 37037.
- Les taux d'humidité élevés (>90%) dégradent la corrélation et la RMSE pour les PM10 sur la comparaison microcapteurs/stations Atmo. L'impact est moins net pour les PM2.5.
- Les valeurs PM10 et dans une moindre mesure PM2.5 sont surestimées lorsque l'humidité est supérieure à 90%
- La température influence également la mesure des micro capteurs : les meilleures corrélations entre les valeurs des micro-capteurs et des stations Atmo ont été obtenues pour les températures moyennes (10-25°C). Dans le cas des RMSE, elles sont meilleures lorsque les températures sont les plus élevées.

5. Conclusions

Les tests menés sur les sites de Mérignac et Périgny montrent dans l'ensemble des résultats très prometteurs. La répétabilité des mesures est très bonne entre les capteurs SDS011. Ils montrent également dans l'ensemble une bonne cohérence des mesures de particules, meilleures pour les PM2.5 que pour les PM10, avec les stations du réseau fixe d'Atmo Nouvelle Aquitaine.

Pour les deux sites :

- Les taux de fonctionnement sont très variables d'un micro-capteur à l'autre (de 15 à 90%)
- Les concentrations moyennes mesurées sur les PM2.5 par le SDS011 sont cohérentes avec les niveaux attendus sur cette typologie de site. Les concentrations de PM10 semblent surestimées pour le site de Périgny, mais plus cohérentes sur le site de Mérignac.
- La répétabilité des mesures entre micro-capteurs SDS011 est très bonne.
- La comparaison des mesures des SDS011 avec les mesures des stations du réseau Atmo montre :
 - des périodes de sur ou sous-estimation des moyennes journalières, qui ne peuvent être attribuées à la seule distance entre les sites.
 - une meilleure corrélation sur les PM2.5 que sur les PM10
- Les micro-capteurs ont été exposés à l'eau de pluie, avec un taux de saturation de l'humidité relative à 100% durant plus de 80% du temps pour certains capteurs.
- Les taux d'humidité élevés (>90%) dégradent la corrélation et la RMSE pour les PM10 sur la comparaison micro-capteurs/stations Atmo. L'impact est moins net pour les PM2.5 selon les sites.
- Les corrélations sur les PM10 pour les classes d'humidité inférieures à 90% sont toutes beaucoup plus élevées (comprises entre 0.65 et 0.94) que la corrélation moyenne ($R^2=4.45$ pour Périgny et 0.54 Pour Mérignac). L'impact est moins net sur les PM2.5.
- Les valeurs PM10 sont surestimées lorsque l'humidité est supérieure à 90%

Un problème sur l'installation des micro-capteurs a fortement dégradé les résultats des mesures : autant sur Périgny que sur Mérignac, les capteurs ont régulièrement été saturés d'eau (humidité relative à 100%), en raison d'une mauvaise protection vis-à-vis de l'eau de pluie. Or les statistiques montrent une dégradation nette des résultats de mesures lorsque l'humidité est supérieure à 90%.

Une meilleure protection du système, par exemple dans un abris, permettrait d'améliorer sensiblement la qualité de la mesure.

Table des figures

Figure 1 : Carte des concentrations PM2.5 mesurées par les capteurs de type Sensor Community du 11/02/2021 aux environs de 10H (https://sensor.community/fr/).....	6
Figure 2 : Indice de la qualité de l'air Européen du 11/02/2021 aux environs de 10H (https://airindex.eea.europa.eu/Map/AQI/Viewer/).....	6
Figure 3 : pièces nécessaires pour construire un système de type Sensor Community.....	7
Figure 4 : Montage des éléments du système Sensor Community.....	7
Figure 5 : évolution du nombre de capteurs en opération de type sensor community depuis le début du projet.	8
Figure 6 : Emplacement du site test microcapteur (en jaune) et des stations Atmo de référence (en vert) sur Bordeaux Métropole	10
Figure 7 : Emplacement du site test microcapteur (en jaune) et des stations Atmo de référence (en vert) sur l'agglomération de La Rochelle	11
Figure 8 : Répartition des sources d'émissions régionales de PM10 et PM2.5 (Icare 3.2.2 Atmo-NA2016).....	12
Figure 9 : Taille des PM10 et PM2.5, en comparaison d'un cheveux humain et du sable de plage. Source : United States Environmental Protection Agency, 2017	13
Figure 10 : Moyennes horaires des trois capteurs SDS011 installés sur Mérignac	14
Figure 11 : Moyennes journalières des trois capteurs SDS011 installés sur Mérignac.....	15
Figure 12 : nuages de points des mesures horaires PM10 et PM2.5 mesurées sur les trois SDS011 de Mérignac.	16
Figure 13 : mesure horaire de la température par les micro-capteurs DTH22 de Mérignac.	16
Figure 14 : nuage de points des moyennes horaires de température mesurées par les trois capteurs DHT22 de Mérignac du 10 février 2020 au 25 janvier 2021 et la station Météo-France de Mérignac.....	17
Figure 15 : mesure horaire de l'humidité par les micro-capteurs DTH22 de Mérignac.	18
Figure 16 : nuage de points des moyennes horaires d'humidité mesurées par les trois capteurs DHT22 de Mérignac du 10 février 2020 au 25 janvier 2021 et par la station Météo-France de Mérignac.....	18
Figure 17 : moyennes journalières PM10 mesurées sur les stations Atmo de Mérignac et de Talence.....	19
Figure 18 : concentrations moyennes PM10 et PM2.5 mesurées du 20/02/2020 au 20/11/2020 sur le capteur 35691 et les stations du réseau Atmo de Talence et Mérignac	20
Figure 19 : moyennes journalières PM10 du capteurs 35691 et des stations du réseau Atmo de Mérignac et Talence.....	20
Figure 20 : moyennes journalières PM2.5 du capteur 35691 et la station du réseau Atmo de Talence.....	21
Figure 21 : profils journalier des moyennes horaires PM10 du capteurs 35691 et des stations du réseau Atmo de Mérignac et Talence.....	21
Figure 22 : profils journalier des moyennes horaires PM2.5 du capteurs 35691 et de la station du réseau Atmo de Talence.....	22
Figure 23 : profils journalier des moyennes horaires PM2.5, PM10, température et humidité du capteurs SDS011 35691 et DHT22 35692.....	22
Figure 24 : nuage de points des valeurs horaires PM10 et PM2.5, mesurées sur un capteur SDS011 (35691) et la station Atmo de Talence.....	23
Figure 25 : Relation entre les corrélations des mesures SDS011/station de TALENCE en fonction du % d'humidité (la valeur en abscisse désigne la borne haute de la classe d'humidité)	24
Figure 26 : Relation entre les RMSE des mesures SDS011/station de TALENCE en fonction du % d'humidité (la valeur en abscisse désigne la borne haute de la classe d'humidité)	24
Figure 27 : Relation entre les corrélations des mesures SDS011/station de TALENCE en fonction de la température ambiante (la valeur en abscisse désigne la borne haute de la classe de température).....	25
Figure 28 : Relation entre les RMSE des mesures SDS011/station de TALENCE en fonction de la température ambiante (la valeur en abscisse désigne la borne haute de la classe de température)	26
Figure 29 : Moyennes horaires des 2 capteurs SDS011 installés sur Périgny.....	27

Figure 30 : Moyennes horaires des 2 capteurs SDS011 installés sur Périgny du 24/12/2019 au 10/01/2020 ...	28
Figure 31 : Moyennes horaires en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ des 2 capteurs SDS011 installés sur Périgny	28
Figure 32 : Moyennes journalières des 2 capteurs SDS011 installés sur Périgny	29
Figure 33 : nuages de points des mesures horaires PM10 et PM2.5 mesurées sur les deux SDS011 de Périgny.	29
Figure 34 : mesure horaire de la température par les micro-capteurs DTH22 de Périgny.	30
Figure 35 : nuage de points des moyennes horaires de température mesurées par les deux capteurs DHT22 de Périgny et la station Météo-France de La Rochelle-Laleu	30
Figure 36 : mesure horaire de l'humidité par les micro-capteurs DTH22 de Périgny.	31
Figure 37 : nuage de points des moyennes horaires d'humidité mesurées par les 2 capteurs DHT22 de Périgny et la station Météo-France de La Rochelle-Laleu.....	31
Figure 38 : moyennes journalières PM10 mesurées sur les stations Atmo d'Aytré et de la place de Verdun à La Rochelle.....	32
Figure 39 : concentrations moyennes PM10 et PM2.5 mesurées sur le capteur 37037 et les stations du réseau Atmo de la place de Verdun et Aytré.....	33
Figure 40 : moyennes journalières PM10 du capteurs 37037 et des stations du réseau Atmo de la place de Verdun et d'Aytré.	33
Figure 41 : moyennes journalières PM10 du capteurs 37037 et de la station du réseau Atmo de la place de Verdun.	34
Figure 42 : moyennes journalières PM10 du capteurs 37037 et des stations du réseau Atmo de la place de Verdun et Aytré.	34
Figure 43 : profils journalier des moyennes horaires PM2.5, PM10, température et humidité du capteurs SDS011 37037 et DHT22 37038.....	35
Figure 44 : Relation entre les corrélations des mesures SDS011/station de la place de Verdun en fonction du % d'humidité (la valeur en abscisse désigne la borne haute de la classe d'humidité).....	37
Figure 45 : Relation entre les RMSE des mesures SDS011/station de la place de Verdun en fonction du % d'humidité (la valeur en abscisse désigne la borne haute de la classe d'humidité)	37
Figure 46 : Relation entre les corrélations des mesures SDS011/station de la place de Verdun en fonction de la température (la valeur en abscisse désigne la borne haute de la classe de température)	38
Figure 47 : Relation entre les RMSE des mesures SDS011/station de la place de Verdun en fonction de la température (la valeur en abscisse désigne la borne haute de la classe de température).....	38

Table des tableaux

Tableau 1 : Paramètres constructeur pour le SDS011, NOVA Fitness CO., Ltd.	8
Tableau 2 : Valeurs réglementaires des PM10 (Arrêté du 19 avril 2017 relatif au dispositif national de surveillance de la qualité de l'air ambiant) et recommandation OMS.....	12
Tableau 3 : Valeurs réglementaires des PM2.5 https://www.airparif.asso.fr/_pdf/directive21042008.pdf (Arrêté du 19 avril 2017 relatif au dispositif national de surveillance de la qualité de l'air ambiant) et recommandation OMS.....	13
Tableau 4 : Matériel et méthodes de mesure.....	13
Tableau 5 : Comparaison statistique des valeurs moyennes horaires des mesures PM10 et PM2.5, entre un micro-capteur SDS011 (le 35691) et les stations Atmo de Mérignac et Talence.....	22
Tableau 6 : Comparaison statistique des valeurs moyennes horaires des mesures PM10 et PM2.5, entre un micro-capteur SDS011 (le 37037) et la station Atmo de Talence (du 10/02/2020 au 14/12/2020) en fonction des classes d'humidité relative mesurées par le DHT22 35692.	23
Tableau 7 : Comparaison statistique des valeurs moyennes horaires des mesures PM10 et PM2.5, entre un micro-capteur SDS011 (le 37037) et la station Atmo de Talence (du 10/02/2020 au 14/12/2020) en fonction des classes de températures mesurées par le DHT22 37038.....	25

Tableau 8 : Comparaison statistique des valeurs moyennes horaires des mesures PM10 et PM2.5, entre un micro-capteur SDS011 (le 37037) et les stations Atmo de la place de Verdun et d'Aytré (du 24/12/2019 au 02/06/2020).	35
Tableau 9 : nuage de points des valeurs horaires PM10 et PM2.5, mesurées sur un capteur SDS011 (37037) et la station Atmo de la place de Verdun à La Rochelle.	36
Tableau 10 : Comparaison statistique des valeurs moyennes horaires des mesures PM10 et PM2.5, entre un micro-capteur SDS011 (le 37037) et la station Atmo de la place de Verdun (du 24/12/2019 au 02/06/2020) en fonction des classes d'humidité relative mesurées par le DHT22 37038.	36
Tableau 11 : Comparaison statistique des valeurs moyennes horaires des mesures PM10 et PM2.5, entre un micro-capteur SDS011 (le 37037) et la station Atmo de la place de Verdun (du 24/12/2019 au 02/06/2020) en fonction des classes de températures mesurées par le DHT22 37038.	38

Bibliographie

G. Allen, C. Sioutas, P. Koutrakis, R. Reiss, F. W. Lurmann, and P. T. Roberts, "Evaluation of the TEOM® method for measurement of ambient particulate mass in urban areas," *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 47, no. 6, pp. 682–689, 1997.

Crilley, L. R., Shaw, M., Pound, R., Kramer, L., Price, R., Young, S., Lewis, A. C., & Pope, F. (2018). Evaluation of a low-cost optical particle counter (alphasense OPC-N2) for ambient air monitoring. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(2), 709–720.

Jayaratne, R., Liu, X., Thai, P., Dunbabin, M., & Morawska, L. (2018). The influence of humidity on the performance of a low-cost air particle mass sensor and the effect of atmospheric fog. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(8), 4883–4890.

LUBW (2017). Messungen mit dem Feinstaubsensor SDS011 - Ein Vergleich mit einem eignungsgeprüften Feinstaubanalysator. <https://www4.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/268831/> (accessed 01/24/2018).

Marek Badura, Piotr Batog, Anetta Drzeniecka-Osiadacz, and Piotr Modzel, (2018) Evaluation of Low-Cost Sensors for Ambient PM_{2.5} Monitoring, *Journal of Sensors* Volume 2018, Article ID 5096540, 16 pages

Matthias Budde, Almuth D. Schwarz, Thomas Müller, Bernd Laquai, Norbert Streibl, Gregor Schindler, Marcel Köpke, Till Riedel, Achim Dittler, Michael Beigl. (2018) Potential and Limitations of the Low-Cost SDS011 Particle Sensor for Monitoring Urban Air Quality. *ProScience* 5 (2018) 6-12. 3rd International Conference on Atmospheric Dust - DUST2018.

Tagle, M., Rojas, F., Reyes, F. *et al.* Field performance of a low-cost sensor in the monitoring of particulate matter in Santiago, Chile. *Environ Monit Assess* **192**, 171 (2020) <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8118-4>

Zheng, T., Bergin, M. H., Johnson, K. K., Tripathi, S. N., Shirodkar, S., Landis, M. S., Sutaria, R., & Carlson, D. E. (2018). Field evaluation of low-cost particulate matter sensors in high- and low-concentration environments. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11, 4823–4846.



RETROUVEZ TOUTES
NOS **PUBLICATIONS** SUR :
www.atmo-nouvelleaquitaine.org

Contacts

contact@atmo-na.org
Tél. : 09 84 200 100

Pôle Bordeaux (siège Social) - ZA Chemin Long
13 allée James Watt - 33 692 Mérignac Cedex

Pôle La Rochelle (adresse postale-facturation)
ZI Périgny/La Rochelle - 12 rue Augustin Fresnel
17 180 Périgny

Pôle Limoges
Parc Ester Technopole - 35 rue Soyouz
87 068 Limoges Cedex

