



**HAL**  
open science

# 1er Essai national d'Aptitude des micro-Capteurs (EA $\mu$ C) pour la surveillance de la qualité de l'air : Synthèse des résultats

Sabine Crunaire, Nathalie Redon, Laurent Spinelle

## ► To cite this version:

Sabine Crunaire, Nathalie Redon, Laurent Spinelle. 1er Essai national d'Aptitude des micro-Capteurs (EA $\mu$ C) pour la surveillance de la qualité de l'air : Synthèse des résultats. LCSQA. 2018. <hal-04250973>

**HAL Id: hal-04250973**

**<https://imt-nord-europe.hal.science/hal-04250973v1>**

Submitted on 20 Oct 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization



### 1<sup>er</sup> Essai national d'Aptitude des micro-Capteurs (EA $\mu$ C) pour la surveillance de la qualité de l'air : Synthèse des résultats






# Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air

## 1<sup>ER</sup> ESSAI NATIONAL D'APTITUDE DES MICRO-CAPTEURS (EA<sub>μ</sub>C) POUR LA SURVEILLANCE DE LA QUALITE DE L'AIR : SYNTHESE DES RESULTATS

---

Sabine CRUNAIRE et Nathalie REDON (IMT Lille Douai)  
Laurent SPINELLE (Ineris)

Novembre 2018

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Laurent SPINELLE	Caroline MARCHAND	Marc DURIF
Qualité	Ingénieur de l'Unité « Accompagnement à la SURveillance de la qualité de l'air et des eaux de surface (ASUR) »  Direction des Risques Chroniques	Responsable de l'Unité « Accompagnement à la SURveillance de la qualité de l'air et des eaux de surface (ASUR) »  Direction des Risques Chroniques	Responsable du Pôle « CARActérisation de l'environnement »  Direction des Risques Chroniques
Visa			



## LE LABORATOIRE CENTRAL DE SURVEILLANCE DE LA QUALITÉ DE L'AIR

---

Le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air est constitué des laboratoires de l'IMT Lille Douai, de l'INERIS et du LNE. Il mène depuis 1991 des études et des recherches à la demande du Ministère chargé de l'environnement, et en concertation avec les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA). Ces travaux en matière de pollution atmosphérique ont été financés par la Direction Générale de l'Énergie et du Climat (bureau de la qualité de l'air) du Ministère chargé de l'Environnement. Ils sont réalisés avec le souci constant d'améliorer le dispositif de surveillance de la qualité de l'air en France en apportant un appui scientifique et technique au ministère et aux AASQA.

L'objectif principal du LCSQA est de participer à l'amélioration de la qualité des mesures effectuées dans l'air ambiant, depuis le prélèvement des échantillons jusqu'au traitement des données issues des mesures. Cette action est menée dans le cadre des réglementations nationales et européennes, mais aussi dans un cadre plus prospectif destiné à fournir aux AASQA de nouveaux outils permettant d'anticiper les évolutions futures.

## TABLE DES MATIERES

---

<b>RESUME .....</b>	<b>7</b>
<b>REMERCIEMENTS ET COLLABORATIONS .....</b>	<b>10</b>
<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>12</b>
<b>2. DESCRIPTIF DU PROTOCOLE D'ESSAI .....</b>	<b>13</b>
2.1 Conditions de l'essai.....	13
2.1.1 Lieu .....	13
2.1.2 Calendrier .....	14
2.1.3 Instrumentation de référence.....	14
2.1.4 Listes des dispositifs qualifiés.....	15
<b>3. METHODOLOGIE D'EVALUATION.....</b>	<b>18</b>
3.1 Traitement des données .....	18
3.2 Radar d'évaluation .....	18
3.3 Critères qualitatifs .....	19
3.3.1 Critère « énergie ».....	19
3.3.2 Critère « fiabilité ».....	19
3.3.3 Critère « versatilité ».....	19
3.3.4 Critère « mise en œuvre ».....	20
3.4 Critères quantitatifs .....	20
3.4.1 Critère « variabilité ».....	21
3.4.2 Critères « pente » et « R <sup>2</sup> » .....	21
3.4.3 Critère « MAPE » .....	22
3.5 Index IPI (Integrated Performance Index).....	22
<b>4. SYNTHESE DES RESULTATS .....</b>	<b>23</b>
4.1 Résumé des conditions expérimentales .....	23
4.2 Résultats par système .....	23
4.2.1 Evaluation qualitative.....	24
4.2.2 Evaluation quantitative pour NO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> et PM <sub>2,5</sub> .....	25
<b>5. CONCLUSION/PERSPECTIVE .....</b>	<b>27</b>
<b>6. LISTE DES ANNEXES.....</b>	<b>29</b>
<b>ANNEXE 1.....</b>	<b>31</b>
<b>ANNEXE 2.....</b>	<b>35</b>
<b>ANNEXE 3.....</b>	<b>37</b>



## RESUME

---

L'émergence sur le marché de micro-capteurs connectés a conduit le dispositif national de surveillance de la qualité de l'air à s'intéresser à la fiabilité de ces nouveaux dispositifs. Il n'existe à l'heure actuelle aucun cadre normatif national ou européen permettant de comparer les performances de ces différents appareils commercialisés aux appareils de mesures de référence.

Le premier essai d'aptitude national sur le terrain de micro-capteurs de gaz et de particules installés en site fixe, coordonné par le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA), s'inscrit dans la continuité des travaux amorcés ces deux dernières années en laboratoire pour déterminer les caractéristiques de performance des micro-capteurs<sup>1</sup>. Ces travaux ont notamment permis de comprendre les effets de différents paramètres de mesures sur les systèmes capteurs mais il est cependant difficile en laboratoire de reproduire l'ensemble des facteurs d'influences sur la mesure. C'est pourquoi, les essais sur le terrain utilisant une comparaison directe avec des mesures de référence permettent d'obtenir une meilleure représentativité de ces effets.

Cet essai, conduit de début janvier à mi-février 2018, avait pour objectif de placer en conditions réelles sur un site de typologie urbaine, un grand nombre de systèmes différents afin d'évaluer leur aptitude à suivre les principaux polluants d'intérêt pour l'air ambiant : le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>), l'ozone (O<sub>3</sub>) et les particules (PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub>).

Organisé par le LCSQA/IMT Lille Douai sur la station de mesure de la qualité de l'air de son Centre de Recherche, **cet essai a regroupé 16 participants qui ont mis en œuvre 44 dispositifs au total, répliques inclus. 17 systèmes étaient de conception et d'origines différentes** (France, Pays-Bas, Royaume-Uni, Espagne, Italie, Pologne, États-Unis). Les systèmes mis à disposition ont été fournis par des fabricants, des distributeurs ou des utilisateurs volontaires œuvrant dans le cadre du dispositif national de surveillance (Associations Agréées de surveillance de la qualité de l'air, AASQA, et membres du LCSQA). Ainsi, les systèmes mis à disposition avaient des historiques d'utilisation différents. Cet essai a été réalisé conformément aux pratiques en vigueur pour l'organisation des comparaisons inter-laboratoires ou des essais d'aptitude. Ainsi, dans ce document, chaque système testé est identifié à l'aide d'un code alphanumérique unique. Une liste des participants est cependant fournie, laissant ainsi la possibilité de contacter chacun d'entre eux pour obtenir son numéro d'identification. Cependant, une discussion est en cours avec chaque participant concernant une possible levée d'anonymat afin de pouvoir documenter par exemple l'influence de l'usage ou des différentes versions de logiciel ou d'algorithme.

---

<sup>1</sup> N. REDON, F. DELCOURT, S. CRUNAIRE, N. LOCOGE, Protocole de détermination des caractéristiques de performance métrologique des micro-capteurs - étude comparative des performances en laboratoire de micro-capteurs de NO<sub>2</sub>, Rapport LCSQA, mars 2017. <https://www.lcsqa.org/fr/rapport/2016/mines-douai/protocole-determination-caracteristiques-performance-metrologique-micro-cap>

N. REDON, S. CRUNAIRE, B. HERBIN, E. MORELLE, F. GAIE-LEVREL, T. AMODEO, Faisabilité de la mise en œuvre d'un protocole pour l'évaluation en laboratoire de micro-capteurs pour la mesure des concentrations massiques particulières, Note technique LCSQA, juillet 2018. <https://www.lcsqa.org/fr/rapport/faisabilite-de-la-mise-en-oeuvre-dun-protocole-pour-levaluation-en-laboratoire-de-micro>

Les données ont été exploitées par le LCSQA/Ineris par comparaison aux mesures d'instruments de référence. Un volume de plus de **70 millions de données minutes a dû être traité par des méthodes élaborées spécifiquement**. Outre les performances métrologiques de ces instruments, une attention particulière a été portée à d'autres paramètres tels que la simplicité de mise en œuvre, l'autonomie, la portabilité, la fiabilité de communication (GSM, Wifi, Bluetooth, filaire, ...), la convivialité des applications de récupération des données en tenant compte de l'objectif recherché. Chaque système a fait l'objet d'une fiche d'évaluation par polluant mesuré. Cette fiche inclut un descriptif technique succinct, un tableau récapitulatif des performances métrologiques, un radar « papillon » affichant des notations de 0 à 5 pour 8 critères qualitatifs ou quantitatifs, les relevés des séries temporelles de chacun des répliques testés comparés aux données de l'instrument de référence, les graphiques de corrélation, et enfin un avis général.

Ce document a pour objectif de présenter la méthodologie mise en œuvre avec un comparatif des notations qualitatives ainsi qu'une synthèse des résultats pour NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> et PM<sub>2,5</sub>. Un rapport détaillé suivra et inclura en complément les résultats obtenus pour les capteurs PM<sub>10</sub>, ainsi que l'intégralité des fiches individuelles d'évaluation produites. Celles-ci intégreront l'ensemble des données chiffrées, les radars, les séries temporelles de concentrations, les graphiques de corrélation et enfin les avantages et inconvénients à retenir pour chaque couple système/polluant.

En termes de polyvalence (systèmes multi-capteurs), seul le système C se démarque des autres systèmes testés durant la campagne. En effet il présente des performances métrologiques avec les notes les plus élevées en considérant la combinaison PM<sub>2,5</sub> et NO<sub>2</sub> : MAPE (pourcentage moyen des écarts en valeur absolue) inférieur à 100%, R<sup>2</sup> compris entre 0,5 et 0,75 mais pente et variabilité variable selon le polluant (PM<sub>2,5</sub> : pente = 2,25 et variabilité = 5% ; NO<sub>2</sub> : pente = 0,81 et variabilité = 41%). Il présente de surcroît de bonnes caractéristiques qualitatives avec une note de 5 pour la fiabilité et 4,7 pour sa facilité de mise en œuvre. C'est donc le système qui présente le plus de polyvalence parmi ceux testés.

En ne considérant qu'un seul polluant, NO<sub>2</sub> et PM<sub>2,5</sub> indépendamment, d'autres systèmes présentent des performances globales allant de moyennes à très bonnes. En particulier, les systèmes KA et B pour les PM<sub>2,5</sub> et le système EB pour le NO<sub>2</sub> présentent les meilleurs résultats avec un MAPE inférieur à 100%, un R<sup>2</sup> supérieur à 0,75, une pente de corrélation proche de 1 et une variabilité inter-système inférieur à 5%. Cependant, les systèmes KA et B présentent des notes qualitatives plus faibles, notamment en raison de leur manque de polyvalence et de la perte de données durant la période d'exercice.

D'autres systèmes, G et J pour les PM<sub>2,5</sub> et D pour le NO<sub>2</sub>, présentent une dispersion plus importante que les systèmes précédents ( $0,5 < R^2 < 0,75$ ). Ils restent cependant de bons candidats potentiels en raison d'une faible variabilité (<15%). Ces systèmes obtiennent quant à eux de bonnes notes qualitatives.

Enfin, même si aucun des systèmes évalués ne respecte les objectifs de qualité de données (OQD) des Directives Européennes 2008/50/CE et 2015/14/80 pour les mesures en sites fixes en NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> et PM (OQD respectifs de 15 %, 15% et 25%), certains peuvent prétendre satisfaire aux critères des méthodes indicatives, notamment pour les PM<sub>2,5</sub> (OQD de 50%).

Il est important de rappeler que les systèmes micro-capteurs ont été testés en conditions fixes. Ainsi, les résultats obtenus ne peuvent pas être extrapolés à une mise en œuvre en mobilité. Par ailleurs, les radars d'évaluation construits pour cette évaluation donnent une vision de l'ensemble des critères de performance à prendre en compte qui ont un poids plus ou moins important selon l'usage auquel les micro-capteurs sont destinés.

En termes de perspectives de ces travaux et afin de compléter cette première évaluation, un second essai d'aptitude a été réalisé durant l'été 2018 afin de tenir compte d'un potentiel effet de saisonnalité, notamment dans la constitution de la matrice d'air (concentrations plus élevées en O<sub>3</sub> et moins élevées en NO<sub>2</sub> et PM). Ces résultats seront disponibles début 2019.

Néanmoins, la dépendance des conditions environnementales ne permet d'évaluer les systèmes capteurs que dans des situations très précises. Il semble donc nécessaire pour une évaluation complète des systèmes de mesures de pouvoir combiner la complexité d'une matrice réelle aux spécificités de concentrations contrôlées. Ainsi, une étude sur la faisabilité d'un dopage de matrice réelle par des mélanges gazeux et particulaires est en cours de réalisation par le LCSQA/Ineris.

## REMERCIEMENTS ET COLLABORATIONS

Le LCSQA remercie vivement l'ensemble des AASQA qui ont contribué à cet essai, ainsi que les fabricants/distributeurs pour la mise à disposition de plusieurs de leurs systèmes capteurs.

- **Fabricants/Distributeurs** :

Participant	Référence du/des système(s) mis à disposition	Personne référente
<b>ADDAIR</b> <a href="http://www.addair.fr/">http://www.addair.fr/</a>	AQMesh (Environmental Instruments Ltd.)	Alexandre MARPILLAT <a href="mailto:a.marpillat@addair.fr">a.marpillat@addair.fr</a>
<b>AtmoTrack by 42 Factory</b> <a href="https://atmotrack.fr/fr/">https://atmotrack.fr/fr/</a>	Atmotrack	Pascal ERMEL <a href="mailto:pascal@atmotrack.fr">pascal@atmotrack.fr</a>
<b>Cairpol - Environnement S.A</b> <a href="http://cairpol.com/fr/">http://cairpol.com/fr/</a>	Cairnet	Brice BERTHELOT <a href="mailto:b.berthelot@environnement-sa.com">b.berthelot@environnement-sa.com</a>
<b>Clarity Movement</b> <a href="https://clarity.io/">https://clarity.io/</a>	Clarity Node	Christelle ROHAUT <a href="mailto:christelle@clarity.io">christelle@clarity.io</a>
<b>ECOMESURE</b> <a href="http://www.ecomesure.com/fr">http://www.ecomesure.com/fr</a>	ECOMSMART	Damien PELLETIER <a href="mailto:damien.pelletier@ecomesure.com">damien.pelletier@ecomesure.com</a>
<b>Envicontrol</b> <a href="https://www.envicontrol.com/">https://www.envicontrol.com/</a>	- NPM 2 - ES-642 (Met One Instruments, Inc.)	Stéphane LOYEN <a href="mailto:s.loyen@envicontrol.com">s.loyen@envicontrol.com</a>
<b>Normandie Tech'Air</b> <a href="https://fr-fr.facebook.com/AirmatrixFrance/">https://fr-fr.facebook.com/AirmatrixFrance/</a>	Airmatrix	Jérôme SPINELLI <a href="mailto:airmatrix.fr@gmail.com">airmatrix.fr@gmail.com</a>
<b>Rubix Senses &amp; Instrumentation</b> <a href="https://www.rubixsi.com/fr/">https://www.rubixsi.com/fr/</a>	Watchtower 1 (WT1)	Jean-Christophe MIFSUD <a href="mailto:jean.christophe.mifsud@rubixsi.com">jean.christophe.mifsud@rubixsi.com</a>
<b>Vaisala</b> <a href="https://www.vaisala.com/fr">https://www.vaisala.com/fr</a>	AQT420	Caroline CHARRON <a href="mailto:caroline.charron@vaisala.com">caroline.charron@vaisala.com</a>

- **AASQA** :

Participant	Référence du/des système(s) mis à disposition	Personne référente
Atmo Auvergne-Rhône-Alpes <a href="https://www.atmo-auvergnerhonealpes.fr/">https://www.atmo-auvergnerhonealpes.fr/</a>	- OPC-N2 (Alphasense) - GreenBee (Azimut Monitoring)	Nicolas DALLEAU <a href="mailto:ndalleau@atmo-aura.fr">ndalleau@atmo-aura.fr</a>
ATMO Grand Est <a href="http://www.atmo-grandest.eu/">http://www.atmo-grandest.eu/</a>	- Wasmote Plug & Sense!/Smart Environment PRO (Libelium) - Watchtower 1 (Rubix Senses & Instrumentation) - AQT420 (Vaisala)	Damien DURANT <a href="mailto:damien.durant@atmo-grandest.eu">damien.durant@atmo-grandest.eu</a>
Atmo Hauts-de-France <a href="http://www.atmo-hdf.fr/">http://www.atmo-hdf.fr/</a>	Cairnet (Cairpol - Environnement S.A)	Bruno DECHERF <a href="mailto:b.decherf@atmo-hdf.fr">b.decherf@atmo-hdf.fr</a>
Atmo Normandie <a href="http://www.atmonormandie.fr/">http://www.atmonormandie.fr/</a>	AirSenseEUR	Benoît WASTINE <a href="mailto:benoit.wastine@atmonormandie.fr">benoit.wastine@atmonormandie.fr</a>
Qualitair Corse <a href="http://www.qualitaircorse.org/">http://www.qualitaircorse.org/</a>	Airmatrix (Normandie Tech'Air)	Guillaume GRIGNION <a href="mailto:g.grignion@qualitaircorse.org">g.grignion@qualitaircorse.org</a>

- **LCSQA** :

Participant	Référence du/des système(s) mis à disposition	Personne référente
IMT Lille Douai <a href="http://sage.imt-lille-douai.fr/">http://sage.imt-lille-douai.fr/</a>	- OPC-N2 (Alphasense) - Series 500 - Portable Ozone Monitor (Aeroqual) - Cairclip (Cairpol - Environnement S.A) - Airbeam (AirCasting)	Nathalie REDON <a href="mailto:nathalie.redon@imt-lille-douai.fr">nathalie.redon@imt-lille-douai.fr</a>
Ineris <a href="https://www.ineris.fr/fr">https://www.ineris.fr/fr</a>	AirSenseEUR	Clothilde MANTELLE <a href="mailto:clothilde.mantelle@ineris.fr">clothilde.mantelle@ineris.fr</a>

## 1. INTRODUCTION

---

Afin d'évaluer la fiabilité des capteurs de gaz et de particules, le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA), a organisé le premier Essai national d'Aptitude de systèmes micro-capteurs (EA $\mu$ C). Celui-ci était ouvert aux fabricants/distributeurs volontaires ainsi qu'aux AASQA et aux membres du LCSQA souhaitant mettre à disposition leurs propres systèmes afin d'élargir au maximum le panel des dispositifs testés. En effet, l'objectif de cet essai était de rassembler un maximum de systèmes aboutis, mono ou multi-polluants, destinés à la mesure des PM<sub>2,5</sub>, des PM<sub>10</sub>, de l'ozone et du dioxyde d'azote. Par « systèmes aboutis », on entend tout dispositif commercialisé disposant d'une référence en tant que modèle dans un catalogue avec un prix de vente associé. Ces systèmes ont été mis en œuvre simultanément sur un même site (station de typologie urbaine) durant une période significative de 6 semaines de janvier à mi-février 2018.

En termes d'évaluation, cette étude a pour objectifs :

- de comparer, polluant par polluant, les mesures des systèmes micro-capteurs aux mesures des méthodes de référence ou équivalentes ;
- d'évaluer la reproductibilité de systèmes identiques (jusqu'à 4) ;
- d'estimer l'influence de l'électronique et du traitement de signal de systèmes de diverses références, équipés du même élément sensible.

Les systèmes micro-capteurs ont été testés en conditions fixes. Les résultats obtenus par rapport aux méthodes de référence ne peuvent en aucun cas être extrapolés à une mise en œuvre en mobilité pour laquelle il convient d'évaluer par ailleurs la capacité des systèmes à suivre les changements d'environnement, l'effet de la vitesse, les questions d'isocinétisme au point prélèvement, etc.

## 2. DESCRIPTIF DU PROTOCOLE D'ESSAI

### 2.1 Conditions de l'essai

#### 2.1.1 Lieu

L'essai a eu lieu à la station de mesure de le LCSQA/IMT Lille Douai, sur son site de Dorignies, et dont les caractéristiques sont les suivantes :

- coordonnées GPS : 50.384419, 3.085736 ;
- typologie : urbaine avec route à proximité ;
- surface du shelter : 6mx2,5m

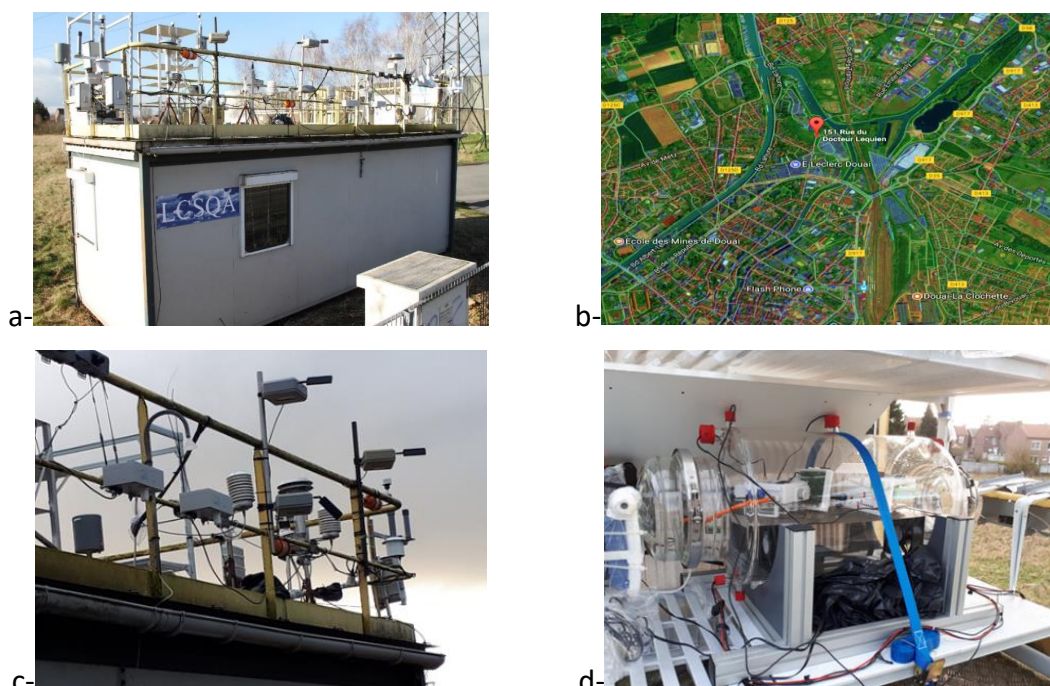


Figure 1 – Station urbaine site de Dorignies IMT Lille Douai. a-shelter avec vue de la plate-forme extérieure, b-positionnement géographique, c-installation des capteurs sur le pourtour de la plateforme, d-chambre d'exposition permettant l'accueil des capteurs non-adaptés en l'état aux conditions extérieures

La station, présentée sur la Figure 1, est de typologie urbaine. Située près d'une rue passante (rue du Dr Lequien à Douai), elle peut subir également une influence de type trafic. Les capteurs ont été placés sur le pourtour de la plateforme supérieure du shelter, à l'exception des systèmes non destinés initialement à un usage extérieur. Ces derniers ont été mis à l'abri dans une chambre d'exposition en verre de 50L, elle-même placée à l'extérieur sur le toit du shelter. Le balayage à l'intérieur de la chambre par l'air extérieur est assuré par une pompe permettant un débit constant de 13L/min.

## 2.1.2 Calendrier

L'EA $\mu$ C a eu lieu du 12 janvier au 22 février 2018. Les données de référence des deux premières semaines de mesure ont été fournies postérieurement à l'essai aux participants pour application de corrections éventuelles à leurs données brutes. Cependant, les résultats présentés ici ne portent que sur les mesures effectuées sans application de ces éventuelles corrections.

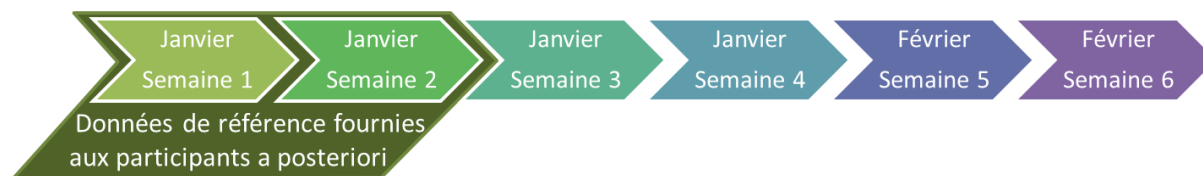


Figure 2 – Calendrier de l'EA $\mu$ C n°1

## 2.1.3 Instrumentation de référence

Les instruments de référence installés dans la station climatisée de Dorignies durant l'EA $\mu$ C sont listés ci-après.

Polluant	Matériel de référence ou équivalent	Résolution temporelle
Ozone	O342e (Environnement SA)	minute + ¼ horaire
NO <sub>2</sub>	AS32M (Environnement SA)	minute + ¼ horaire
NO/NO <sub>x</sub> /NO <sub>2</sub>	T200UP (Teledyne API)	minute + ¼ horaire
PM <sub>2,5</sub>	BAM 1020 (Met One Instruments, Inc. - massique)	horaire
PM <sub>10</sub>	TEOM 1405-F (Thermo Scientific - massique)	horaire
PM <sub>10</sub> et PM <sub>2,5</sub>	FIDAS 200 S (PALAS - massique) FIDAS 200 S (PALAS - comptage et répartition granulométrique)	minute minute

Figure 3 – Instrumentation de référence de l'EA $\mu$ C n°1

Pour l'analyse des résultats présentés dans cette synthèse, nous avons conservé uniquement les données NO<sub>2</sub> issues de l'AS32M de chez Environnement SA. Pour faciliter le traitement des données, le pas de temps des instruments de référence a été uniformisé en données horaires. Du côté des capteurs, quel que soit leur pas de temps (de quelques secondes à une heure), il a été choisi de calculer la moyenne des mesures de l'heure précédente pour les comparer aux données de référence.

## 2.1.4 Listes des dispositifs qualifiés

Au final, 17 systèmes différents ont été testés, dont 9 capteurs mono-espèces et 8 systèmes multi-capteurs aptes à mesurer simultanément plusieurs espèces polluantes.

La Figure 4 présente les systèmes mono-capteurs testés durant l'essai. 7 de ces systèmes sont spécifiquement dédiés à la mesure des particules et sont tous basés sur la détection optique de la lumière (issue d'une LED ou d'une diode laser) diffusée par les particules, tandis que 3 systèmes sont dédiés à la mesure d'espèces gazeuses (NO<sub>2</sub> ou O<sub>3</sub>) par cellules électrochimiques.

Micro-capteurs	
PM	Airmatrix (Normandie Tech'Air) Airbeam (AirCasting) OPC-N2 (Alphasense) Clarity Node (Clarity Movement) NPM 2 (Met One Instruments Inc.) ES-642 (Met One Instruments Inc.) Atmotrack (AtmoTrack by 42 Factory)
NO <sub>2</sub>	Cairclip (Cairpol-Environnement SA)
O <sub>3</sub>	Serie 500 Monitor (Aeroqual)




Figure 4 – Liste des capteurs mono-espèces présents sur l'EAμC n°1

Sans doute en raison d'une étanchéité défectueuse, le module d'acquisition électronique du système Aeroqual a dysfonctionné dès la première semaine de l'essai. De fait, ses résultats ont été écartés du bilan final.

La Figure 5 présente les 8 systèmes multi-capteurs testés durant l'essai.

Mini-stations multi-capteurs		
Commercialisés	ECOMSMART (ECOMESURE)	$O_3$ , $NO_2$ , $PM_{10}$ , $PM_{2,5}$ et $PM_1$
	AQT420 (Vaisala)	$SO_2$ , $CO$ , $O_3$ , $NO_2$ , $PM_{10}$ , $PM_{2,5}$
	Watchtower 1 (Rubix Senses & Instrumentation)	$NO$ , $NO_2$ , $PM_{10}$ , $PM_{2,5}$ , $PM_1$
	Cairnet (Cairpol-Environnement SA)	$NO_2$ , $O_3/NO_2$ , $PM_{10}$ et $PM_{2,5}$
	AQMesh (Environmental Instruments Ltd)	$NO$ , $NO_2$ , $O_3$ , $SO_2$ , $PM_{10}$ , $PM_{2,5}$ , $PM_1$
	GreenBee (Azimut Monitoring)	$O_3$ , $NO_2$ , $PM_{10}$ , $PM_{2,5}$ et $PM_1$
Do it yourself/ Opensource	Wasmote Plug & Sense!/Smart Environnement PRO (Libelium)	$NO$ , $NO_2(x3)$ , $PM_{10}$ , $PM_{2,5}$ , $PM_1$
	AirSensEUR	$NO_2$ , $CO$ , $O_3$ , $NO$

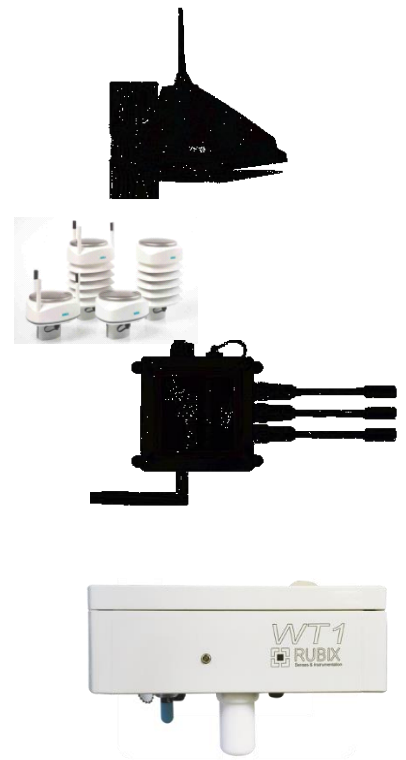


Figure 5 – Liste des capteurs multi-espèces présents sur l'EAμC n°1

On note que sur les 17 systèmes qualifiés, ce sont les particules qui sont majoritairement ciblées avec notamment 13 systèmes annonçant la mesure des  $PM_{2,5}$ . C'est l'ozone qui est le moins représenté avec seulement 6 systèmes capables de le mesurer. Enfin 10 systèmes proposent la mesure du  $NO_2$  (cf. Figure 6).

Sur ces 17 systèmes, plus de 77% renvoient leurs données par des technologies sans fil, dont plus de la moitié par GSM (cf. Figure 6). En fonction du mode de communication, plusieurs problèmes ont été rencontrés durant l'EAμC n°1 : pour la communication par Bluetooth, Wifi ou en USB, il y a eu beaucoup de pertes de données en raison de problème d'émission/réception ou encore parce que les logiciels d'acquisition subissaient régulièrement des interruptions anormales (i.e. plantage informatique). Pour la communication par GSM, il est apparu des périodes entières de données manquantes, souvent en raison de pannes des serveurs hôtes.

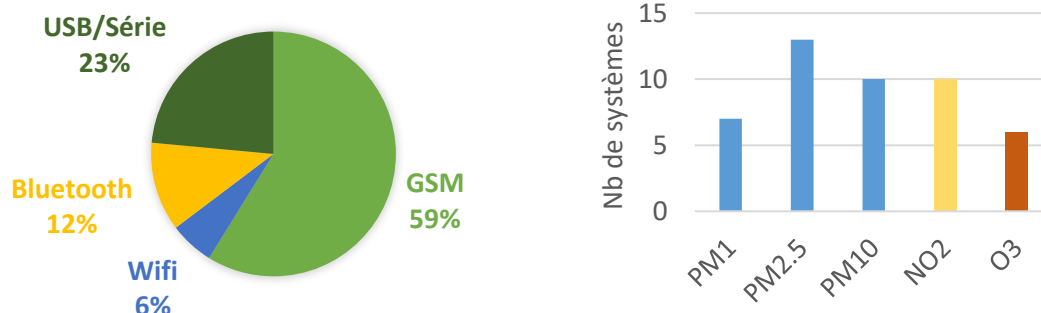


Figure 6 – Répartition des modes de communication et des espèces mesurées des systèmes testés

Dans le paragraphe 4-Synthèse des résultats, les systèmes sont identifiés sous un code alphanumérique allant de AA à O afin de préserver l’anonymat. Ainsi, il peut arriver qu’un même système, fournis par deux participants différents, bénéficie de deux codes différents. En fonction de sa provenance, le système pourra avoir eu un historique différent, de neuf à très usité, ce qui justifie la différenciation d’identification. Il y a donc au final 23 références pour 17 systèmes. Les participants restent libres de dévoiler ou non le code alphanumérique correspondant aux systèmes qu’ils ont mis à disposition pour la campagne.

*Tableau 1 – Liste des codes alphanumériques référençant les systèmes ayant participé à l’EAμC n°1*

N° de système	Code alpha-numérique	Nombre de répliques
1	AA	2
2	AB	3
3	AC	1
4	AD	1
5	B	2
6	C	3
7	D	3
8	EA	1
9	EB	1
10	EC	2
11	F	1
12	G	3
13	HA	2
14	HB	1
15	I	3
16	J	3
17	KA	2
18	KB	1
19	L	1
20	MA	2
21	MB	2
22	N	1
23	O	4

### 3. METHODOLOGIE D'ÉVALUATION

#### 3.1 Traitement des données

Sur l'ensemble des 6 semaines de campagne, plus de 70 millions de données capteurs ont été enregistrées, avec des pas de temps très variables, mais toujours de l'ordre de la seconde à la minute. Cette quantité colossale de données rend la phase de traitement complexe et lourde à gérer. Par conséquent, pour faciliter le traitement, comme indiqué dans le §2.1.3, les pas de temps des capteurs ont été uniformisés pour être calés sur les pas de temps des instruments de référence. Quel que soit le « tempo initial » du système considéré (de quelques secondes à quelques minutes), il a été choisi de calculer la moyenne des mesures de l'heure précédente pour la comparer aux données de référence. Cela a permis de réduire la dimension de la base de données à « seulement » 290000 données horaires au total.

#### 3.2 Radar d'évaluation

Les systèmes ont tous été notés selon 4 critères qualitatifs (représentés en mauve sur le radar « papillon » de la Figure 7) et 4 critères quantitatifs (représentés en vert sur le radar « papillon » de la Figure 7), dont les descriptions sont données ci-après. Au final, on obtient, système par système et polluant par polluant un radar d'évaluation dont la représentation est donnée Figure 7.

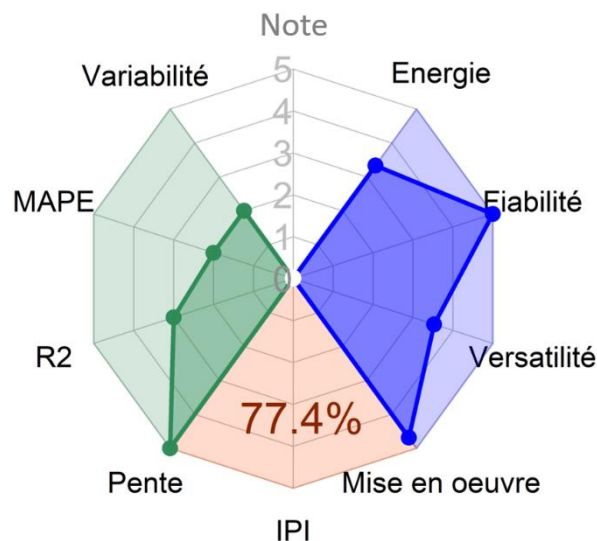


Figure 7 – Radar d'évaluation d'un système « capteurs » pour un polluant donné

Un système idéal, serait ainsi représenté par un radar « papillon » avec des « ailes » totalement déployées et avec une note maximale de 5 pour chacun des critères qualitatif et quantitatif, ainsi qu'une note de 100% au niveau de l'indice IPI (Integrated Performance Index, représenté en orange sur le radar « papillon » de la Figure 7).

### 3.3 Critères qualitatifs

Les critères qualitatifs, au nombre de 4, sont propres à un système, quel que soit le polluant mesuré, et en tenant compte de l'ensemble des options offertes par la version commercialement disponible. Ainsi, les paramètres « énergie », « fiabilité », « versatilité » et « mise en œuvre » ont été évalués.

#### 3.3.1 Critère « énergie »

Il se décompose en trois volets :

- le nombre de sources d'énergie possibles pour alimenter le système : secteur, batterie ou les deux → 1 point attribué par type de source disponible ;
- dans le cas d'une alimentation par batterie, la possibilité d'un apport d'énergie renouvelable (ex. : panneaux solaires, éolien, etc.) pour la recharge en ligne de la batterie a été prise en compte → 1 point si oui ;
- autonomie annoncée par le constructeur :
  - non-connue ou <1 jour → 1 point
  - de 1 jour à 1 mois → 2 points
  - >1 mois → 3 points

#### 3.3.2 Critère « fiabilité »

Il correspond au taux de recouvrement des données « p » lors de la période d'essai.

$$p(\%) = \frac{\text{nb de données capteur}}{\text{nb total de données durant la campagne}} * 100$$

Période minimale de couverture mesure indicative Directive européenne 2008/50/CE	<b>p ≤ 14%</b>	<b>1 point</b>
Peu de données, représentativité de la dynamique faible	<b>14% &lt; p ≤ 45%</b>	<b>2 points</b>
Pertes raisonnables Représentativité acceptable	<b>45% &lt; p ≤ 75%</b>	<b>3 points</b>
Couverture dynamique équivalente site fixe Directive européenne 2008/50/CE – situation hivernale	<b>75% &lt; p ≤ 90%</b>	<b>4 points</b>
Couverture dynamique équivalente site fixe Directive européenne 2008/50/CE	<b>p &gt; 90%</b>	<b>5 points</b>

#### 3.3.3 Critère « versatilité »

Ce critère rend compte de l'adaptabilité du système à toute sorte de contraintes extérieures autres que celles liées directement à la mesure du polluant ciblé.

Ce critère se décompose selon quatre volets :

- le nombre de types de communication des données possibles : locale, filaire (câble propriétaire, USB, Ethernet), sans fil local (Wifi, Bluetooth, ZigBee, LoRa), sans fil GSM → 1 point par type, max 3 points ;
- le type de visualisation, remontée et stockage des données (local, carte SD, logiciel tiers, serveur, API) → 1 point par type, max 4 points ;
- la nature et l'accès aux données brutes, traitées, étalonnées ou vérifiées, ajustables → 1 point par type, max 4 points ;
- le nombre de paramètres mesurés (autres polluants, localisation GPS, température, humidité relative, etc.) → 1 à 4 points.

La note attribuée au système correspond à :

$$note\ finale = \frac{Somme\ des\ points\ du\ système}{Total\ max\ possible\ (15)} * 5$$

### 3.3.4 Critère « mise en œuvre »

Ce critère se décompose en 5 volets :

- l'installation physique du système : éléments de fixation et facilité de mise en place, étanchéité, tenue à la rouille, ... → 0 à 2 points ;
- la documentation associée au système : présence ou non d'une documentation technique (version papier/téléchargeable), manuel d'utilisation, fiche d'évaluation des performances, diagnostics préalables, QA/QC → 0 à 1 point ;
- l'installation électrique : alimentation fournie ou non, compatibilité avec la prise secteur, longueur de câble, ... → 0 à 2 points ;
- l'accessibilité de la donnée (dématérialisée ou non), si locale, par câble ou action de démontage nécessaire, nécessité d'un logiciel tiers, etc. → 0 à 2 points

La note attribuée au système correspond à :

$$note\ finale = \frac{Somme\ des\ points\ du\ système}{Total\ max\ possible\ (7)} * 5$$

## 3.4 Critères quantitatifs

Contrairement aux critères qualitatifs, les critères quantitatifs sont propres au couple {système/polluant mesuré}. Ils sont constitués de 4 paramètres, « variabilité », « pente », « R<sup>2</sup> », « MAPE » (Mean Absolute Percentage Error), calculés d'une part à partir de la régression linéaire déterminée sur les courbes de corrélation entre les mesures capteurs et les mesures de référence, d'autre part en comparant les différents réplicas d'un même système entre eux. Le détail de la note attribuée à chaque critère est donné ci-après.

### 3.4.1 Critère « variabilité »

La variabilité témoigne de l'écart de reproductibilité entre différents réplicas d'un même système. Elle est calculée en utilisant la formule suivante :

$$\text{variabilité} = \frac{\text{écart - type}}{\text{moyenne}} \times 100$$

La note attribuée dépend du pourcentage ainsi calculé :

Variabilité					
>75%	<75%	<50%	<25%	<10%	<5%
0	1	2	3	4	5

### 3.4.2 Critères « pente » et « R<sup>2</sup> »

Le graphique des concentrations mesurées par les capteurs en fonction des concentrations mesurées par les instruments de référence permet de tracer la courbe de corrélation. Un exemple est donné Figure 8 pour les mesures d'ozone du système J.

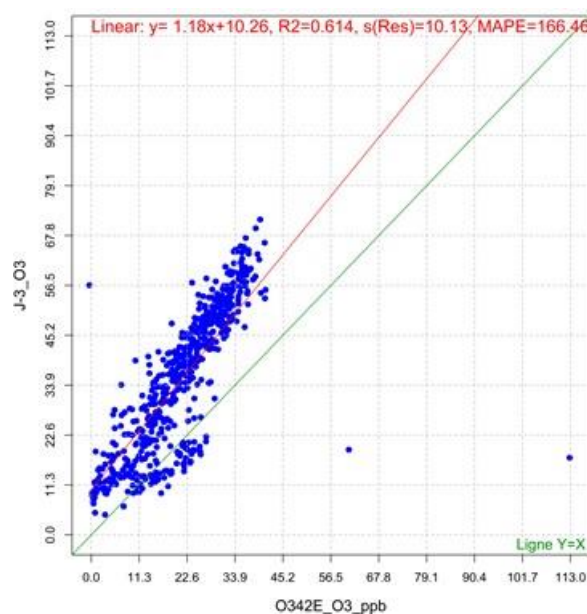


Figure 8 – Exemple de graphique de corrélation pour les mesures d'ozone du système J.

Dans cet exercice, seule la régression linéaire a été retenue comme modèle commun à l'ensemble des capteurs. Ainsi, **la valeur de la pente** (Figure 8, ligne rouge) caractérise la capacité du capteur à produire des mesures justes par rapport à l'instrument de référence. Si les deux mesures sont identiques, la pente idéale sera égale à 1 (Figure 8, ligne verte). Le **R<sup>2</sup>**, appelé coefficient de détermination (Figure 8, R2) caractérise la capacité du capteur à produire des mesures fidèles au regard des mesures de référence. On appelle cette caractéristique "la dispersion des mesures" et sa valeur idéale de 1 signifie que le capteur et la méthode de référence sont parfaitement synchrones.

Ainsi, dans notre schéma de notation, plus on s'éloigne d'une pente de la valeur idéale de 1 pour  $R^2$  et pour la pente, plus la note attribuée est basse, comme présenté dans les tableaux suivants :

Pente						
Valeur	$p > 5$ ou $p \leq 0,02$	$5 \geq p > 4$ ou $0,02 < p \leq 0,25$	$4 \geq p > 3$ ou $0,25 < p \leq 0,33$	$3 \geq p > 2$ ou $0,33 < p \leq 0,5$	$2 \geq p > 1,5$ ou $0,5 < p \leq 0,75$	$1,5 \geq p \geq 1$ ou $0,75 < p \leq 1$
Note	0	1	2	3	4	5

$R^2$						
Valeur	NC	$\leq 0,3$	$\leq 0,5$	$\leq 0,7$	$\leq 0,9$	$> 0,9$
Note	0	1	2	3	4	5

### 3.4.3 Critère « MAPE »

Le critère MAPE (Mean Absolute Percentage Error) correspond à la moyenne des écarts en valeur absolue entre mesures corrigées et mesures de référence rapportées aux valeurs de référence :

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{|corrigée_k - référence_k|}{référence_k}$$

Il traduit la dispersion des erreurs après application de la correction par le modèle de régression linéaire dans notre cas.

MAPE						
Valeur	$> 75\%$	$< 75\%$	$< 50\%$	$< 25\%$	$< 10\%$	$< 5\%$
Note	0	1	2	3	4	5

Cependant, ce coefficient surestime la valeur de l'erreur lorsque la valeur de référence est proche ou égale à 0, donnant une valeur de MAPE infinie. Pour éviter cela, et seulement pour les cas décrits précédemment, il a été choisi de dénombrer le nombre de données affectées et de les extraire du calcul si ce nombre est inférieur à 10%.

## 3.5 Index IPI (Integrated Performance Index)

Ce coefficient, issu de la publication de B. Fishbain et al.<sup>2</sup> intitulée "An evaluation tool kit of air quality micro-sensing units" est une combinaison de 8 paramètres :

- l'erreur moyenne quadratique (RMSE) ;
- le coefficient de détermination ( $R^2$ ) ;
- les coefficients de corrélation de Kendall et de Spearman ;
- le taux de fiabilité ;

<sup>2</sup> Science of the Total Environment 575 (2017) 639-648

- la capacité à identifier une source (utilise des mesures de la vitesse et de la direction du vent) ;
- le taux de correspondance (correspondance entre les mesures capteurs et les mesures de référence par bloc et non individuelles) ;
- et enfin un paramètre permettant d'évaluer la capacité du capteur à mesurer la variabilité temporelle (Lower Frequencies Energy).

La valeur finale de ce coefficient est exprimée en pourcentage, 0% correspondant à un capteur peu « fiable » (sémantique de la publication) et 100% étant l'équivalent d'une méthode de référence.

## 4. SYNTHÈSE DES RESULTATS

### 4.1 Résumé des conditions expérimentales

Le tableau ci-dessous regroupe les valeurs minimales, maximales, moyennes et médianes pour chaque polluant pour cet exercice ainsi que les valeurs annuelles 2017. Ces valeurs sont représentatives des niveaux de concentration d'un site urbain à proximité trafic.

Tableau 2 – Résumé des conditions expérimentales

Polluants, données de référence durant l'exercice	Minimale	Maximale	Moyenne urbain/trafic		Médiane
	Essai	Essai	Essai	France, année 2017	Essai
PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	< LD	98	22	18/23	17
PM <sub>2,5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	< LD	74	15	13/11	10
O <sub>3</sub> (ppb)	< LD	113	20	NC	21
NO <sub>2</sub> (ppb)	2	46	13	9/20	11
T (°C)	-3	14	4		4
HR (%)	47	98	86		88

### 4.2 Résultats par système

L'ensemble des critères décrits précédemment a permis d'établir une notation pour chacun des systèmes participant à cet exercice. Les paragraphes suivants présentent une synthèse des résultats obtenus lors de l'évaluation. Les données ayant permis de calculer les différentes notations sont reprises en Annexe 1 et Annexe 2, avec respectivement un tableau reprenant les détails des critères de l'évaluation qualitative et un tableau reprenant les critères de l'évaluation quantitative. Le rapport détaillé à venir proposera une fiche d'évaluation détaillée par couple système/polluant basée sur le modèle de fiche présentée en Annexe 3.

## 4.2.1 Evaluation qualitative

Le tableau ci-après regroupe les notes moyennes attribuées pour chaque système. Le détail des notations est repris en Annexe 1. Un code couleur basé sur la note a été appliqué : rouge pour une note strictement inférieure à 2 et vert pour une note supérieure ou égale à 4.

Tableau 3 – Synthèse de l'évaluation qualitative

Système	Energie	Fiabilité	Versatilité	Mise en œuvre
AA	1,7	1,0	1,5	2,2
AB	2,5	4,0	1,8	3,8
AC	0,8	4,0	1,8	1,3
AD	2,5	1,0	2,4	2,8
B	1,7	1,0	1,3	1,6
C	3,3	5,0	3,5	4,7
D	0,8	3,0	2,8	3,1
EA	3,3	5,0	2,1	3,8
EB	4,2	5,0	2,9	4,4
EC	0,8	5,0	2,8	2,5
F	4,2	5,0	2,9	4,4
G	3,3	5,0	1,8	3,8
HA	4,2	3,5	2,2	4,7
HB	n/a			
I	0,8	3,0	1,5	3,1
J	5,0	4,0	3,2	4,4
KA	0,8	3,0	1,2	3,1
KB	0,8	1,0	1,8	3,1
L	3,3	3,0	3,4	3,1
MA	0,8	-	1,8	1,3
MB	3,3	-	2,1	3,8
N	3,3	1,0	3,4	3,1
O	3,3	5,0	2,5	4,7

*n/a : non applicable, non disponible*

Aucun système ne cumule des notes supérieures à 4 sur l'ensemble des 4 critères qualitatifs. La fiabilité est le critère présentant les meilleures notes tandis que le critère de versatilité semble le moins abouti avec des notes toutes inférieures à 3,5. Seuls les systèmes EB, F et J obtiennent des notes supérieures ou égales à 4 pour trois des quatre critères qualitatifs. A l'opposé, les systèmes AA, AC, B, KB et MA, obtiennent les notes minimales avec au moins trois notations sur quatre jugées faibles (< 2). Les systèmes C, HA et O sont également à retenir car, même s'ils n'obtiennent que deux notes élevées sur quatre, celles-ci sont proches de la note maximum de 5.

#### 4.2.2 Evaluation quantitative pour NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> et PM<sub>2,5</sub>

Le tableau ci-après regroupe les valeurs de reproductibilité (pente moyenne des courbes de corrélation des réplicas et variabilité associée) pour chaque système présentant plusieurs réplicas durant l'essai. L'Annexe 2 regroupe l'ensemble des notes attribuées à chaque système basé sur les critères décrits dans le paragraphe 3.4, ainsi que la valeur IPI obtenue à partir de la publication de Fishbain et al.

Dans ce document, et de manière à hiérarchiser les résultats obtenus, le coefficient MAPE a été choisi comme coefficient d'élimination si sa valeur est supérieure à 100%. En effet, le MAPE caractérisant le pourcentage d'erreur restant après avoir appliqué le modèle linéaire obtenu, cela signifie que le modèle de régression n'est pas suffisant. De ce fait, il est inutile de considérer les valeurs de R<sup>2</sup> et de pente des droites de régression.

Dans le cas où le MAPE est inférieur à 100%, un code couleur basé sur la valeur de R<sup>2</sup> a été appliqué à la pente et à la variabilité : orange pour R<sup>2</sup> < 0,5, violet lorsque le R<sup>2</sup> est compris entre 0,5 et 0,75 et bleu pour R<sup>2</sup> > 0,75. Comme décrit dans le paragraphe 3.4.2, un faible R<sup>2</sup> traduit le fait que le capteur et l'instrument de référence ne sont pas synchrones. De ce fait, il est difficile de se fier aux résultats obtenus et la valeur de la pente devient donc secondaire. En revanche dans le cas d'un R<sup>2</sup> proche de 1, même si la valeur de la pente s'éloigne de l'idéal (trop élevée ou trop faible), le comportement du capteur est répétable dans le temps, il est donc possible de lui attribuer une fonction de correction linéaire.

Les systèmes AD, MA, MB et N n'apparaissent pas du tout dans ce tableau car le nombre de données étaient insuffisants pour effectuer une évaluation sur la période d'essai (dysfonctionnements). Par ailleurs, les cellules sont laissées vides lorsque le système référencé ne permet pas de mesurer le polluant de la colonne correspondante. Lorsqu'un seul réplica du système a été fourni par le participant, la pente de la corrélation est donnée, tandis que la cellule de la variabilité affiche « n/a ».

Tableau 4 – Synthèse de l'évaluation quantitative

Système	Nombre de répliqués	O <sub>3</sub> , ppb		NO <sub>2</sub> , ppb		PM <sub>2,5</sub> , µg.m <sup>-3</sup>	
		Pente	Variabilité	Pente	Variabilité	Pente	Variabilité
AA	2					-0,58	-71%
AB	3			0,52	80%		
AC	1					MAPE>100%	MAPE>100%
B	2					1,09	n/a
C	3	MAPE>100%	MAPE>100%	0,81	41%	2,25	5%
D	3	MAPE>100%	MAPE>100%	1,12	9%	-0,01	-150%
EA	1			MAPE>100%	MAPE>100%	MAPE>100%	MAPE>100%
EB*	1			1,52	3%	MAPE>100%	MAPE>100%
EC	2	MAPE>100%	MAPE>100%	MAPE>100%	MAPE>100%	-0,02	-3%
F	1	< -0,01	n/a	1,90	n/a	MAPE>100%	MAPE>100%
G	3					1,84	5%
HA	2	MAPE>100%	MAPE>100%	MAPE>100%	MAPE>100%	0,36	31%
HB	1					0,07	n/a
I	3					1,33	26%
J	3	MAPE>100%	MAPE>100%	MAPE>100%	MAPE>100%	0,85	14%
KA	2					1,13	2%
KB	1					< 0,01	n/a
L	1	MAPE>100%	MAPE>100%	MAPE>100%	MAPE>100%		
O	4					0,30	87%

\* Le système EB présente la particularité de posséder deux capteurs physiquement différents pour la mesure du NO<sub>2</sub>, il a donc été possible de calculer une reproductibilité intra-système malgré le fait qu'un seul système participait à l'exercice.

Il est important de noter que, concernant **l'ozone et le dioxyde d'azote**, le fait que seulement 6 systèmes (1 seul pour l'ozone et 5 pour le NO<sub>2</sub>) n'ont pas été écartés sur la base du MAPE est lié à la gamme de concentration durant l'essai. En effet, **les niveaux observés sont restés généralement faibles, inférieurs à 15ppb, gamme dans laquelle les capteurs de gaz présentent la plus grande incertitude et par conséquent la plus grande erreur de mesure.**

Ainsi, seul le système EB obtient de très bons résultats pour la mesure de NO<sub>2</sub> avec un MAPE inférieur à 100%, un R<sup>2</sup> supérieur à 0,75, une pente de 1,52 et une variabilité de seulement 3%. Cependant, le système D présente également un intérêt car, même si la dispersion des données est jugée intermédiaire (couleur violette), la pente de 1,12 et surtout la faible variabilité de 9% font de lui un bon candidat potentiels.

Concernant les  $PM_{2,5}$ , sur les 4 systèmes jugés bons (couleur bleue), seuls 2 présentent de l'intérêt. En effet, même si le  $R^2$  des systèmes AA et KB sont supérieurs à 0,75, la valeur des pentes montre un manque de sensibilité important et la variabilité du système AA est trop grande. A l'opposé, les systèmes KA et B présentent de bonnes caractéristiques (pente proche de 1 et faible variabilité pour KA), même si la variabilité du système B n'a pas pu être évaluée. Les autres systèmes ont un  $R^2$  intermédiaire ( $0,5 < R^2 < 0,75$ , couleur violette) synonyme d'une dispersion plus importante. Cependant, les systèmes C, G et J présentent une variabilité inter-système faible et faisant ainsi d'eux de bons candidats potentiels. Enfin, les cinq systèmes en orange (D, EC, HA, HB et O) présentent une importante dispersion des données ( $R^2 < 0,5$ ), un manque de sensibilité (faible valeur de pente) et une importante variabilité. Ils sont donc peu adaptés à une finalité d'usage en station fixe, y compris pour de la mesure indicative.

Dans le cas d'un système multi-polluants, aucun ne parvient à cumuler de bons résultats sur l'ensemble des polluants ciblés. Seul le système C obtient des notes intermédiaires qui, sous réserve d'un ré-étalonnage préalable, peuvent s'avérer intéressante pour la mesure du couple  $NO_2/PM_{2,5}$ ,

## 5. CONCLUSION/PERSPECTIVES

---

Même si aucun des systèmes évalués ne respecte les objectifs de qualité de données (OQD) des Directives Européennes 2008/50/CE et 2015/14/80 pour les mesures en sites fixes en  $NO_2$ ,  $O_3$  et PM (OQD respectifs de 15%, 15% et 25%), certains peuvent prétendre satisfaire capables de répondre aux critères des méthodes indicatives, notamment pour  $PM_{2,5}$  (OQD de 50%).

En termes de polyvalence (systèmes multi-capteurs), seul le système C se démarque des autres systèmes testés durant la campagne. En effet il présente des performances métrologiques avec les notes les plus élevées en considérant la combinaison  $PM_{2,5}$  et le  $NO_2$ : MAPE (pourcentage moyen des écarts en valeur absolue) inférieur à 100%,  $R^2$  compris entre 0,5 et 0,75 mais pente et variabilité variable selon le polluant ( $PM_{2,5}$ : pente = 2,25 et variabilité = 5%;  $NO_2$ : pente = 0,81 et variabilité = 41%). Il présente de surcroît de bonnes caractéristiques qualitatives avec une note de 5 pour la fiabilité et 4,7 pour sa facilité de mise en œuvre.

En ne considérant qu'un seul polluant,  $NO_2$  et  $PM_{2,5}$  indépendamment, d'autres systèmes présentent des performances globales avec des notes de moyennes à très bonnes. En particulier, les systèmes KA et B pour les  $PM_{2,5}$  et le système EB pour le  $NO_2$  présentent les meilleurs résultats avec un MAPE inférieur à 100%, un  $R^2$  supérieur à 0,75, une pente de corrélation proche de 1 et une variabilité inter-système inférieur à 5%. Cependant, les systèmes KA et B ont des notes qualitatives plus faibles, notamment en raison de leur manque de polyvalence et de la perte de données durant la période d'exercice.

D'autres systèmes, G et J pour les  $PM_{2,5}$  et D pour le  $NO_2$ , présentent une dispersion plus importante que les systèmes précédents ( $0,5 < R^2 < 0,75$ ). Ils restent cependant de bons candidats potentiels en raison d'une faible variabilité (<15%). Ces systèmes obtiennent quant à eux de bonnes notes qualitatives.

Un rapport détaillé sur ces résultats est également à venir et inclura en complément les résultats obtenus pour les capteurs PM<sub>10</sub>, ainsi que l'intégralité des fiches individuelles d'évaluation produites. Celles-ci intégreront l'ensemble des données chiffrées, les radars, les séries temporelles de concentrations, les graphiques de corrélation et enfin les avantages et inconvénients à retenir pour chaque couple système/polluant.

Il est important de rappeler que les systèmes micro-capteurs ont été testés en conditions fixes. Ainsi, les résultats obtenus ne peuvent pas être extrapolés à une mise en œuvre en mobilité. Par ailleurs, les radars d'évaluation construits pour cette évaluation donnent une vision de l'ensemble des critères de performance à prendre en compte qui ont un poids plus ou moins important selon l'usage auquel les micro-capteurs sont destinés.

En termes de perspectives de ces travaux et afin de compléter cette première évaluation, un second essai d'aptitude a été réalisé durant l'été 2018 afin de tenir compte d'un potentiel effet de saisonnalité, notamment dans la constitution de la matrice d'air (concentrations plus élevées en O<sub>3</sub> et moins élevées en NO<sub>2</sub> et PM). Ces résultats seront disponibles début 2019.

Enfin, les essais sur le terrain étant fortement dépendants des conditions environnementales, ne permettent d'évaluer les systèmes capteurs que dans des situations très précises. Il semble donc nécessaire pour une évaluation complète des systèmes de mesures de pouvoir combiner la complexité d'une matrice réelle aux spécificités de concentrations contrôlées. Ainsi, une étude sur la faisabilité d'un dopage de matrice réelle par des mélanges gazeux et particulaires est en cours de réalisation par le LCSQA/Ineris.

## 6. LISTE DES ANNEXES

---

<b>Annexes</b>	<b>Titres</b>
<b>Annexe 1</b>	Récapitulatif des critères qualitatifs par système
<b>Annexe 2</b>	Récapitulatif des critères quantitatifs par polluant
<b>Annexe 3</b>	Mémo descriptif d'une fiche d'évaluation



## ANNEXE 1

### Récapitulatif des critères qualitatifs par système

Système	Energie			NOTE
	Nombre de type de sources possibles (Secteur, Batterie)	+apport NRJ recharge hors secteur (solaire/éolien)	Autonomie annoncée (<1 jour ou NC, 1jour/1mois, >1mois)	
	1 à 2	1	1 à 3 (si batterie sinon 0)	
				$\Sigma*(5/6)$
AA	1	0	1	1,67
AB	1	0	2	2,50
AC	1	0	0	0,83
AD	2	0	1	2,50
B	1	0	1	1,67
C	2	1	1	3,33
D	1	0	0	0,83
EA	2	1	1	3,33
EB	2	1	2	4,17
EC	1	0	0	0,83
F	2	1	2	4,17
G	2	1	1	3,33
HA	2	1	2	4,17
HB	n/a	n/a	n/a	n/a
I	1	0	0	0,83
J	2	1	3	5
KA	1	0	0	0,83
KB	1	0	0	0,83
L	2	0	2	3,33
MA	1	0	0	0,83
MB	2	1	1	3,33
N	2	0	2	3,33
O	2	0	2	3,33

Système	Fiabilité					NOTE
	Période minimale de couverture mesure indicative - Directive européenne 2008/50/CE	Peu de données, représentativité de la dynamique faible	Pertes raisonnables Représentativité acceptable	Couverture dynamique équivalente site fixe Directive européenne 2008/50/CE - situation hivernale	Couverture dynamique équivalente site fixe Directive européenne 2008/50/CE	
	$p \leq 0,14$	$0,14 < p \leq 0,45$	$0,45 < p \leq 0,75$	$0,75 < p \leq 0,9$	$p > 0,9$	
						de 1 à 5
AA	X					1,0
AB				X		4,0
AC				X		4,0
AD						1,0
B	X					1,0
C					X	5,0
D			X			3,0
EA					X	5,0
EB					X	5,0
EC					X	5,0
F					X	5,0
G					X	5,0
HA			X (PM)	X (gaz)		3,5
HB	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
I			X			3,0
J				X		4,0
KA			X			3,0
KB	X					1,0
L			X			3,0
MA						-
MB						-
N	X					1,0
O					X	5,0

Système	Versatilité				
	Communication locale, Filaire (propriétaire, USB, Ethernet), sans fil local (Wifi, Bluetooth, ZigBee, LoRa), sans fil GSM : 1 pt/type	Visualisation/Remontée/Stockage des données (local, SD, logiciel tiers, serveur, API) (1 pt/type)	Données brutes/ Données traitées/Données étalonnées ou vérifiées/Données étalonnables (1 pt/type)	Nb possible de paramètres mesurés (autres polluants, localisation, Température, Humidité relative, etc.) (1, ≤4, ≤10, >10)	NOTE
	Σ	Σ	Σ	de 1 à 4	Σ*(5/17)
AA	1	1	1	2	1,47
AB	1	2	1	2	1,76
AC	1	1	2	2	1,76
AD	2	2	2	2	2,35
B	1	0,5	1	2	1,32
C	4	3	2	3	3,53
D	3,5	2	1	3	2,79
EA	3	0	1	3	2,06
EB	2	3	1	4	2,94
EC	3,5	2	1	3	2,79
F	2	3	1	4	2,94
G	1	1	1	3	1,76
HA	1	2,5	1	3	2,21
HB	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
I	1	1	1	2	1,47
J	1	3	3	4	3,24
KA	1	1	1	1	1,18
KB	1	2	1	2	1,76
L	3	3,5	2	3	3,38
MA	1	1	2	2	1,76
MB	1	2	1	3	2,06
N	3	3,5	2	3	3,38
O	2	2,5	2	2	2,50

Système	Mise en œuvre					NOTE
	Installation physique (patte de fixation, étanchéité, IP, tenue à la rouille, etc.)	Documentation technique (absente, fournie avec le système, téléchargeable en ligne, manuel d'utilisation, performances, diagnostics QA/QC, ...)	Facilité de maintenance, contrôle du bon fonctionnement	Installation électrique (alimentation fournie ou pas, compatibilité avec prise secteur, longueur de câble)	Accessibilité à la donnée (dématérialisée ou pas, si local, par câble ou action de démontage, nécessité d'un logiciel tiers, etc.)	
	0 à 2	0 à 1	0 à 1	0 à 2	0 à 2	$\Sigma *(5/8)$
AA	1	0,5	0	1	1	2,19
AB	1	1	1	2	1	3,75
AC	0,5	0,5	0	0	1	1,25
AD	0,5	1	0	2	1	2,81
B	0,5	0	1	1	0	1,56
C	2	1	0,5	2	2	4,69
D	2	1	0	0	2	3,12
EA	2	1	1	2	0	3,75
EB	2	1	1	1	2	4,38
EC	2	1	0	0	1	2,50
F	2	1	1	1	2	4,38
G	2	0	0	2	2	3,75
HA	1,5	1	1	2	2	4,69
HB	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
I	1	0	0	2	2	3,13
J	2	1	0	2	2	4,38
KA	1	1	0	2	1	3,13
KB	1	1	1	1	1	3,13
L	0,5	1	0,5	1	2	3,13
MA	0,5	0,5	0	0	1	1,25
MB	2	1	0	2	1	3,75
N	0,5	1	0,5	1	2	3,13
O	2	1	0,5	2	2	4,69

## ANNEXE 2

### Récapitulatif des critères quantitatifs par polluant

Polluants	Système	Variabilité	MAPE	R <sup>2</sup>	Pente	IPI (%)
<b>NO<sub>2</sub>, ppb</b>	AB	0,0	0,0	2,0	3,0	74,9
	C	2,0	2,0	3,0	5,0	77,4
	D	4,0	3,0	3,0	5,0	77,3
	EA	3,0	0,0	3,0	4,0	80,9
	EB	5,0	0,5	4,5	4,5	89,2
	EC	4,0	0,0	2,5	0,0	77,2
	F	n/a	0,0	3,0	5,0	68,6
	HA	0,0	1,0	1,5	2,0	69,4
	J	1,0	0,0	3,0	4,0	68,7
L	n/a	0,0	4,0	0,0	30,8	
<b>O<sub>3</sub>, ppb</b>	C	2,0	0,0	1,0	4,0	69,3
	D	3,0	0,0	2,0	5,0	65,4
	EC	4,0	0,0	2,0	0,0	66,9
	F	n/a	0,0	0,0	0,0	36,0
	HA	0,0	0,0	1,0	1,0	67,5
	J	1,0	0,0	3,0	4,0	74,2
	L	n/a	0,0	1,0	4,0	33,0
<b>O<sub>3</sub> et NO<sub>2</sub> combinés, ppb</b>	HA	0,0	0,0	1,0	1,0	67,5
<b>NO, ppb</b>	EA	n/a	0,0	4,0	5,0	86,6
	L	n/a	0,0	0,0	5,0	43,6
<b>PM<sub>1</sub>, µg.m<sup>-3</sup></b>	AC	n/a	0,0	2,0	3,0	74,1
	B	n/a	4,0	5,0	5,0	73,2
	C	4,0	0,0	3,0	3,0	86,3
	EA	n/a	4,0	1,0	5,0	77,6
	EB	n/a	0,0	3,0	2,0	82,3
	F	n/a	0,0	2,0	4,0	65,1
	I	4,0	4,0	5,0	5,0	89,1
	J	2,0	1,0	4,0	3,0	85,9

Polluants	Système	Variabilité	MAPE	R <sup>2</sup>	Pente	IPI (%)
PM <sub>2,5</sub> , µg.m <sup>-3</sup>	AA	1,0	0,5	4,0	3,5	19,7
	AC	n/a	0,0	0,0	3,0	64,4
	B	n/a	3,0	4,0	5,0	63,3
	C	5,0	0,0	1,0	3,0	76,4
	D	0,0	1,0	0,0	0,0	44,7
	EA	n/a	0,0	0,0	5,0	66,8
	EB	n/a	0,0	2,0	2,0	75,5
	EC	5,0	0,5	0,0	1,0	47,2
	F	n/a	0,0	1,0	2,0	54,4
	G	4,0	0,0	3,0	4,0	82,8
	HB	n/a	0,0	0,0	1,0	61,4
	I	2,0	0,0	3,0	4,0	78,5
	J	3,0	3,0	3,0	5,0	80,4
	KA	5,0	2,0	4,0	5,0	82,0
	KB	n/a	0,0	4,0	0,0	70,4
O	0,0	1,0	0,0	1,0	46,3	
PM <sub>10</sub> , µg.m <sup>-3</sup>	AC	n/a	0,0	0,0	0,0	51,6
	B	n/a	1,0	4,0	5,0	67,9
	C	2,0	0,0	0,0	3,0	62,1
	D	3,0	2,0	0,0	4,0	54,9
	EA	n/a	0,0	0,0	3,0	60,8
	EB	n/a	0,0	0,0	0,0	59,8
	EC	3,0	2,5	0,0	3,5	55,1
	F	n/a	0,0	0,0	0,0	34,9
	HB	n/a	1,0	0,0	1,0	59,4
	I	2,0	1,0	3,0	5,0	76,4
	J	4,0	1,0	0,0	5,0	66,6
	O	2,0	2,0	1,0	2,0	50,9

## ANNEXE 3

### Mémo descriptif d'une fiche d'évaluation

Système testé	Version de test	Location/Acch
<b>Dimensions</b>	<b>Poids</b>	<b>Transmission</b>
Volume du système complet, si disponible	En kg, si disponible	USB, Data, Bluetooth, wifi
<b>Principe physique</b>	Type de capteur utilisé	

### Spécifications techniques du système

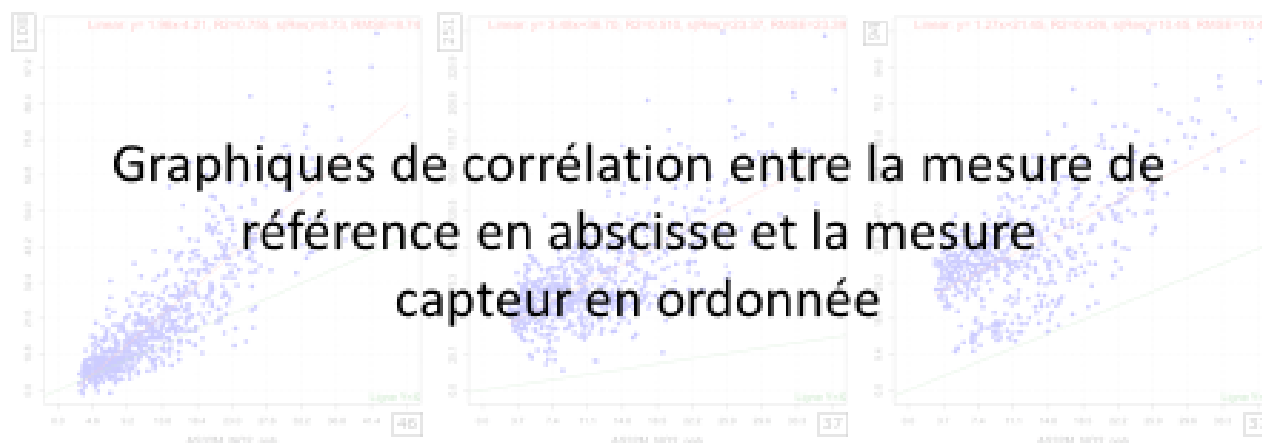
<b>Polluants mesurés</b>	NO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , PM <sub>2,5</sub> , PM <sub>10</sub> , SO <sub>2</sub> ...
<b>Usage</b>	Utilisation recommandée
<b>Type d'alimentation</b>	Secteur, Batterie, Solaire
<b>Résolution temporelle</b>	Durée entre deux données consécutives
<b>Stockage des données</b>	Local, SD, serveur, API ...

### Paramètres métrologiques mesurés

Capteur	Différents réplicas testés
<b>Pente</b>	Pente de la régression linéaire entre la mesure capteur et la méthode de référence
<b>Offset</b>	Ordonnée à l'origine
<b>R<sup>2</sup></b>	Coefficient de corrélation
<b>Reproductibilité</b>	Pente moyenne ± variabilité en %
<b>RMSE</b>	Erreur-standard = validité modèle, plus petits est la valeur plus réduite est la dispersion



Polluant



### Avis général :

Les + : ...

Les - : ...



---

**direction et secrétariat du LCSQA**

INERIS - parc technologique Alata - BP 2 - F60550 Verneuil-en-Halatte  
tél. 03 44 55 64 04 - [www.lcsqa.org](http://www.lcsqa.org)