



Veille technologique sur les systèmes micro-capteurs pour les mesures de polluants de l'air ambiant

**Laboratoire Central de Surveillance
de la Qualité de l’Air**

**VEILLE TECHNOLOGIQUE SUR LES SYSTEMES MICRO-CAPTEURS
POUR LES MESURES DE POLLUANTS DE L’AIR AMBIANT**

Muriel Fernandes (LNE)

Novembre 2018



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

RESUME	7
1. INTRODUCTION	9
2. OBJECTIF.....	11
3. DEFINITIONS	12
3.1 Sensor.....	12
3.2 Micro-capteur (Mono polluant)	12
3.3 Système micro-capteur (multi polluants)	13
4. DESCRIPTION DES PRINCIPALES TECHNIQUES DE MESURE UTILISEES POUR LES MICRO-CAPTEURS.....	14
4.1 Micro-capteur électrochimique	14
4.2 Micro-capteur PID (détecteur à photo-ionisation)	15
4.3 Semi-conducteurs	16
4.4 Capteurs optiques pour la mesure de particules.....	17
4.5 Capteurs optiques pour la mesure des polluants gazeux	18
5. SYNTHÈSE DES MICRO-CAPTEURS ET SYSTEMES INTEGRES COMMERCIAUX ACTUELLEMENT DISPONIBLES SUR LE MARCHÉ	18
5.1 Focus sur les PM.....	21
5.2 Focus sur les composés gazeux.....	22
6. RETOUR D'EXPERIENCE DES AASQA SUR LA MISE EN ŒUVRE ET L'UTILISATION DES MICRO-CAPTEURS/SYSTEMES MICRO-CAPTEURS	39
6.1 Atmo AuRA	39
6.2 Airparif.....	40
6.3 Atmo Grand-Est.....	41
6.4 Air PACA	42
6.5 QUALITAIR CORSE	43
6.6 Atmo Normandie.....	43
6.7 Atmo Occitanie.....	43
7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	44
8. LISTE DES ANNEXES.....	45

Dans le domaine de la qualité de l'air, les citoyens sont de plus en plus demandeurs d'information en temps réel relatives aux polluants de l'air qu'ils respirent (nature, concentrations, etc.). Ainsi, les nouvelles technologies (internet, réseaux, blogs, vidéos ...) permettent un partage d'informations en temps réel.

Face à cette pression citoyenne à laquelle s'ajoutent un contexte réglementaire de plus en plus contraignant et un besoin de priorisation des actions et d'exigences de connaissances, une multitude de capteurs à coût réduit, pour certains couplés aux smartphones, permettent un recueil collaboratif des données et une démultiplication des observations afin de pouvoir réaliser un diagnostic rapide de la qualité environnementale. Certains capteurs se sont largement développés et ont été mis en œuvre par les Associations Agréées de la Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) afin de disposer d'informations en temps réel sur l'évolution des mesures et des expositions humaines ainsi que sur les tendances à court et moyen termes.

Ce rapport présente une synthèse de la veille technologique effectuée sur les micro-capteurs. Elle permet de réaliser d'une part, un inventaire aussi exhaustif que possible des micro-capteurs à fin octobre 2018 actuellement disponibles sur le marché ainsi que des techniques mises en œuvre, compte tenu des avancées technologiques et mises sur le marché permanentes de nouveaux appareils. D'autre part, elle a conduit à réaliser un premier recensement des utilisations de ces micro-capteurs par les AASQA.

Grâce à cette étude, il a été répertorié de premiers éléments clés qu'un futur utilisateur doit connaître afin de déterminer quel micro-capteur utiliser en fonction de l'usage prédestiné.

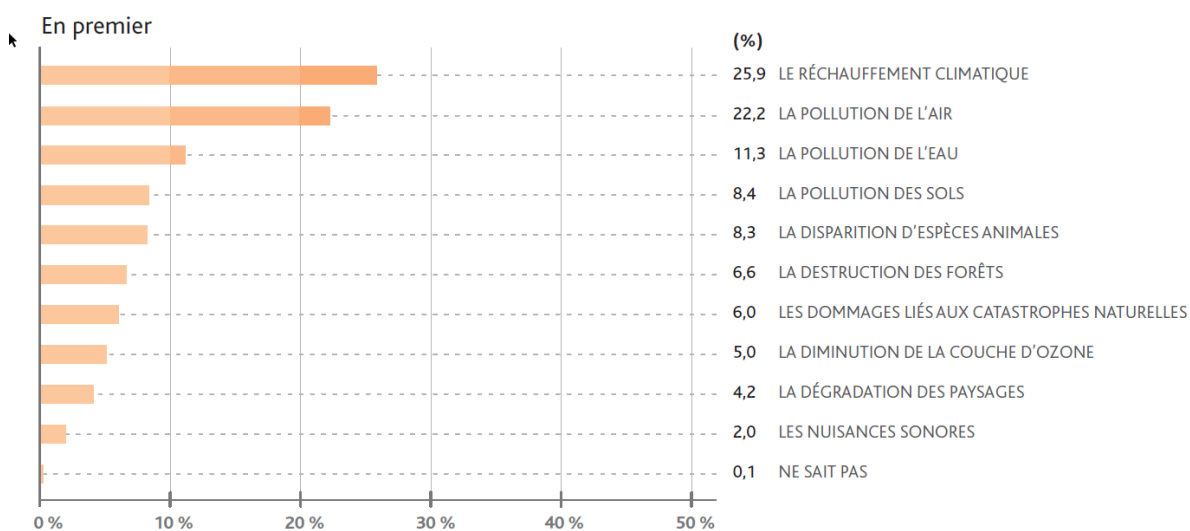
Dans la poursuite des travaux du LCSQA sur les micro-capteurs en 2018, il a été convenu de développer une base de données sur les micro-capteurs et les expérimentations qui y sont associées afin de permettre aux acteurs du dispositif, un accès simplifié (mise en place de requêtes) aux informations (caractéristiques techniques, retours d'expérience, essais métrologiques, évaluation sur le terrain, etc.) et une mise à jour rapide de la veille technologique.

Le but final étant de pouvoir identifier quel capteur serait le mieux adapté pour un usage donné.

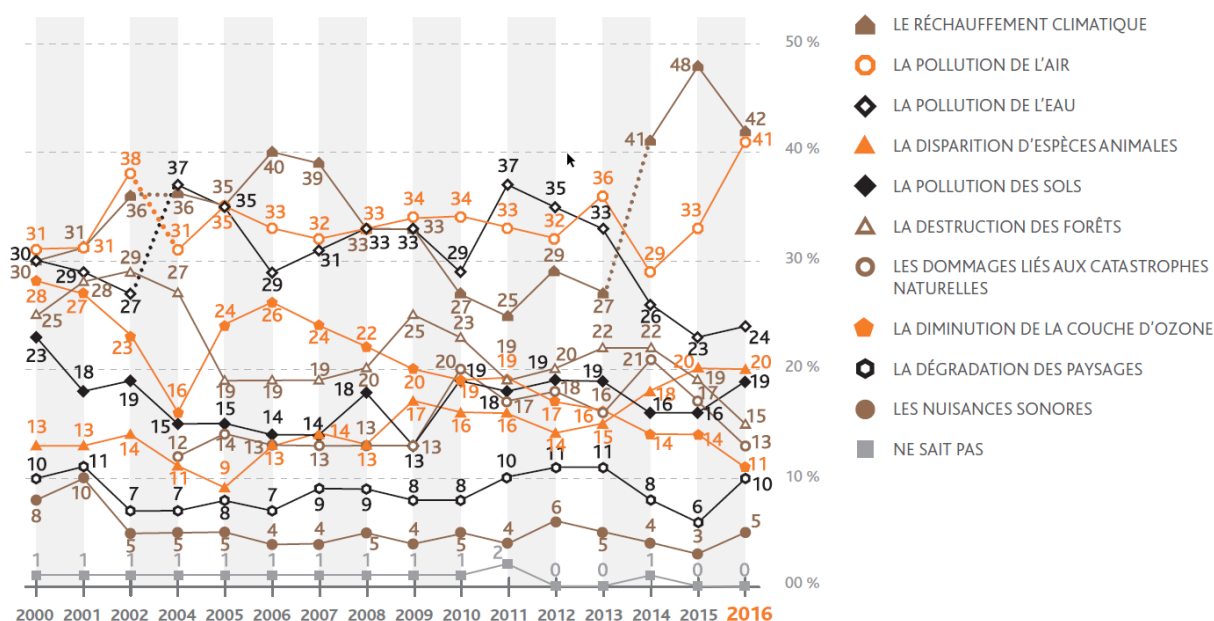
1. INTRODUCTION

Selon le baromètre 2017 de l'IRSN (Baromètre IRSN - La perception des risques et de la sécurité par les Français – Juillet 2017), les résultats du sondage concernant le sujet le plus préoccupant pour les français en 2016 donne la dégradation de l'environnement en 6^{ème} position. Les deux préoccupations au sommet des problèmes environnementaux pour les Français sont le réchauffement climatique (cité par 42 % des personnes interrogées) et la pollution de l'air (avec un score de 41 %), qui est le plus haut jamais enregistré.

Cet item progresse assez fortement, avec 8 points de hausse. Ce mouvement peut s'expliquer par le fait qu'une partie des personnes ait été interrogée au moment de l'épisode des pics de pollution aux particules fines du mardi 6 au vendredi 9 décembre 2016, période de la deuxième semaine de l'enquête du Baromètre IRSN.



Graphique 1 : Problème d'environnement le plus préoccupant pour les français ?



Graphique 2 : Evolution des résultats cumulés de 2000 à 2016

A ces considérations citoyennes, s'ajoutent un contexte réglementaire fort tant au niveau national qu'europpéen et un besoin de définir et prioriser les actions d'amélioration à mettre en place. Ainsi, depuis une trentaine d'années (Loi LAURE - LOI n° 96-1236 du 30 décembre 1996 sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie), la France a déployé une infrastructure pour la mesure de plusieurs polluants de l'air qui repose sur plus de 600 stations de mesures réparties sur le territoire national et sur la mise en œuvre de la modélisation.

Cette action s'inscrit dans un dispositif national de surveillance de la qualité de l'air qui regroupe le LCSQA, le ministère de la Transition écologique et solidaire (MTES) et les Associations Agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA) (cf. <https://www.lcsqa.org/fr>).

Cependant, les citoyens sont désireux d'en savoir plus sur la pollution atmosphérique et plus particulièrement sur la qualité de l'air qu'ils respirent au quotidien (type de polluant, concentrations, etc.). Les nouveaux vecteurs numériques de communication permettent de partager rapidement les informations et d'échanger.

Face à cette pression citoyenne de disposer de données individualisées de pollution en temps réel, une multitude de capteurs disponibles sur le marché pour des coûts modérés, permettent un recueil collaboratif des données et une démultiplication des observations afin de pouvoir réaliser un diagnostic rapide. Certains capteurs ont déjà été mis en œuvre par les AASQA afin de disposer d'informations en temps réel sur l'évolution des mesures et des expositions humaines ainsi que sur les tendances à court et moyen termes (Cf. §6 : Retour d'expérience des AASQA sur la mise en œuvre et l'utilisation des micro-capteurs/système micro-capteurs).

De nombreuses applications de ces micro-capteurs sont donc en cours ou envisagées par les AASQA, nous pouvons par exemple citer (en termes de mesures indicatives):

- l'étude d'une source ponctuelle de pollution dans l'air (ambient, intérieur...),
- la mise en œuvre de la surveillance d'une zone/d'un territoire limitée dans le temps,
- la mesure de l'exposition des personnes,
- la recherche d'une nouvelle implantation pour une station fixe de surveillance de la qualité de l'air,
- la réalisation de cartographies de polluants avec un maillage plus fin que ce qui est effectué actuellement avec les données des stations fixes de mesure.

Cette grande variété d'applications des micro-capteurs (non exhaustive) en cours ou envisagées par les AASQA montre un besoin commun à tout le dispositif national de surveillance de la qualité de l'air d'être en capacité de pouvoir identifier "quel capteur ou quel type de capteur est adapté à quel usage".

Au vu de ces enjeux, il a été décidé de créer, en mars 2017, le groupe de travail (GT) « Micro-capteurs pour l'évaluation de la qualité de l'air » au sein du dispositif national de surveillance de la qualité de l'air, dont l'une des finalités est de définir la stratégie nationale pour le déploiement des micro-capteurs pour la surveillance de la qualité de l'air en France.

Les différents objectifs de ce groupe de travail sont les suivants :

1. Définir de manière concertée un cadre d'utilisation des outils du type «micro-capteurs» pour la surveillance réglementaire de la qualité de l'air dans sa globalité (mesure indicative, estimation objective, support pour la modélisation, la cartographie, etc.) ;
2. Organiser un partage d'expérience et d'informations efficace et dynamique au sein du dispositif national de surveillance de la qualité de l'air ;
3. Informer les utilisateurs (AASQA, collectivités locales, DREAL, ...) sur les capacités des micro-capteurs (potentialités et limites) et définir des modalités pour leur accompagnement ;
4. Identifier des applications émergentes associées à ces nouvelles technologies pertinentes pour la surveillance de la qualité de l'air.

Ce groupe comprend les membres des trois organismes du LCSQA (IMT-Lille-Douai, INERIS, LNE) ainsi que les AASQA.

La présente étude s'inscrit dans l'objectif n°2 du groupe de travail « Micro-capteurs pour l'évaluation de la qualité de l'air ».

2. OBJECTIF

L'objectif de ce travail est de réaliser une veille technologique sur les micro-capteurs, aussi exhaustive que possible, compte tenu des avancées technologiques et mises sur le marché permanentes de nouveaux instruments, afin de disposer d'une base de données de l'ensemble des systèmes de micro-capteurs capables d'être utilisés pour les mesures de polluants réglementés et de polluants émergents.

Cette veille technologique a consisté à réaliser un inventaire technique des micro-capteurs. Ce dernier a nécessité en amont la mise en place d'un fichier Excel qui a été validé dans le cadre du groupe de travail « Micro-capteurs pour l'évaluation de la qualité de l'air » (cf. annexe 1). Ce fichier a permis de déterminer et de structurer les informations permettant de répondre aux différents objectifs listés au paragraphe 1.

Cet inventaire est également basé sur une première exploitation de documents français et européens référencés en annexe 2 (références bibliographiques) ainsi que sur la consultation des sites internet des différents fabricants et/ou distributeurs identifiés. Ces consultations ont permis au LCSQA de recenser les différentes techniques de micro-capteurs commercialisées ou dont le développement est avancé (à forte potentialité d'utilisation) et d'élaborer une liste comparative sur des critères prédéfinis tels que les méthodes de mesure, les gammes de mesure, etc.

3. DEFINITIONS

3.1 Sensor

Le sensor ou élément sensible est un dispositif transformant l'état d'une « grandeur physique » observée en une grandeur utilisable de type signal électrique dont l'amplitude est relative à la concentration du gaz recherché dans le milieu. Ces sensors, dont le coût est faible au regard des systèmes intégrés (facteur 5 minimum), peuvent être des capteurs capacitifs, des capteurs électrochimiques, des capteurs à oxydes métalliques, des capteurs optiques (ex. : cellules d'absorption UV ou infrarouge, détecteur de diffusion de lumière) ou des PID. Trois exemples de sensors sont illustrés par les figures 1, 2 et 3.



Figure 1 : Capteurs électrochimiques

Source :

<http://www.alphasense.com/index.php/products/ozone-2>

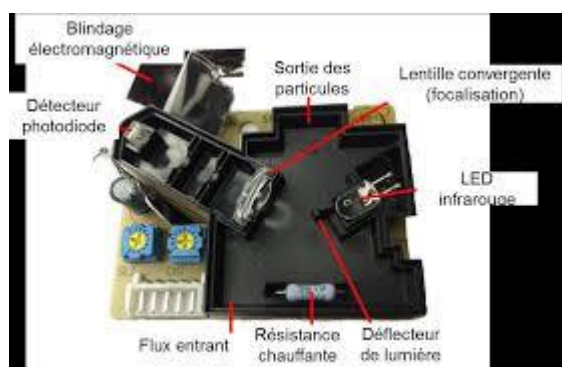
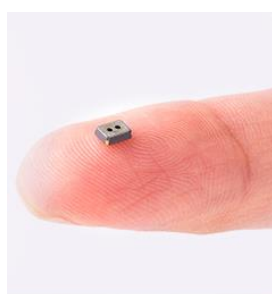


Figure 2 : Capteurs optiques

Source :

<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0137789>



TGS8100

Figure 3 : Capteurs semi-conducteurs

Source :

<http://www.figarosensor.com/feature/tgs8100.html>

3.2 Micro-capteur (Mono polluant)

Le micro-capteur est un système intégrant un sensor et fournissant des résultats en concentration pour un polluant donné ou une famille de polluant. La figure 4 illustre un exemple de micro-capteur.

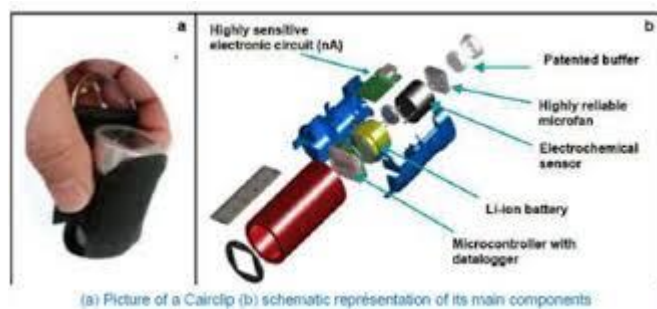


Figure 4 : CairClip (Cairpol)

Source : <http://cairpol.com/fr/accueil/>

3.3 Système micro-capteur (multi polluants)

Un système micro-capteur est un dispositif conçu par des fabricants (intégrateurs) qui assemblent un ou plusieurs sensors et/ou micro-capteurs à d'autres composants de soutien nécessaires pour créer un système de détection entièrement fonctionnel et autonome. Ces fabricants (intégrateurs) développent souvent des algorithmes afin de corriger les données délivrées par les sensors. Les systèmes micro-capteurs permettent généralement d'évaluer plusieurs paramètres en simultanément (ex. : polluants, température, humidité, etc.). Deux exemples de systèmes micro-capteurs sont illustrés sur les figures 5 et 6.

Un certain nombre de systèmes micro-capteurs, parmi lesquels on retrouve les équipements portatifs, sont des « boîtes noires » pour lesquelles il est difficile d'identifier la nature des sensors et la méthode de traitement des données.



Figure 5 : ECOMSMART (Ecomesure)

Source : <http://ecomesure.com/fr/produit/ecosmart>



Figure 6 : GreenBee (Azimut)

Source : <https://pro.hagerservices.fr/wp-content/uploads/sites/2/2017/08/HSE-Fiche-technique-greenbee.pdf>

Cependant, il est parfois difficile de faire la différence entre les micro-capteurs et les systèmes micro-capteurs. Par conséquent, par abus de langage, seul le terme « micro-capteur » regroupant les micro-capteurs à proprement dit et les systèmes micro-capteurs sera employé dans le reste du document.

Dans le même état d'esprit, les unités utilisées pour exprimer les concentrations peuvent se présenter sous différentes formes avec par exemple les correspondances suivantes :

1 ppm = 1 μ mol/mol

1 ppb = 1 nmol/mol

4. DESCRIPTION DES PRINCIPALES TECHNIQUES DE MESURE UTILISEES POUR LES MICRO-CAPTEURS

Les principes de mesure mis en œuvre pour les micro-capteurs dépendent de la nature du polluant que l'on cherche à mesurer.

Les principales technologies utilisées actuellement pour les micro-capteurs sont décrites ci-après (cf. annexe 2).

4.1 Micro-capteur électrochimique

Ces capteurs sont généralement utilisés pour mesurer la teneur de l'air ambiant en NO, NO₂, SO₂, O₃ et CO. La gamme des concentrations mesurables avec ces capteurs est [1 – 1000] μ mol/mol en fonction du gaz et de l'électrolyte utilisé.

Les capteurs électrochimiques sont composés d'une membrane semi-perméable, d'un électrolyte et de deux ou trois électrodes.

La membrane semi-perméable permet le passage du polluant tout en servant de barrière vis à vis des particules et des grosses molécules. L'électrolyte est utilisé pour générer le courant par réaction électrochimique et permet d'ajuster la sensibilité du capteur.

Lorsque le capteur comporte 2 électrodes, la première sert de référence et la seconde électrode va réagir à la nature du gaz détecté. Dans le cas d'un capteur avec trois électrodes, la troisième (de référence également) va permettre d'éviter les dérives de la mesure dans le temps.

La réaction électrochimique liée au composé détecté va induire soit une variation de courant (capteur ampérométrique), soit une variation de tension (capteur potentiométrique), soit encore une variation de conductivité (capteur conductimétrique).

La mesure aux bornes des électrodes va permettre de déterminer la quantité d'électrons en mouvement et de la relier à la concentration du gaz dans l'air.

Ils ont les avantages de présenter une bonne sensibilité* (du $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au mg/m^3), un temps de réponse assez rapide (entre 30 et 200s) et une faible consommation électrique (bonne autonomie).

Cependant, les micro-capteurs électrochimiques sont fortement influencés par les conditions ambiantes (pression, humidité et température). Ils peuvent subir des interférences en présence de molécules de même nature dans le gaz à tester (par exemple, O_3 peut interférer sur les mesures de NO_2 et inversement). Leur durée de vie est généralement limitée à 1 ou 2 ans (consommation de l'électrolyte). Enfin, en cas de « bouffées » de fortes concentrations, ils risquent la saturation et des difficultés de retour à zéro.

*Définition de la sensibilité : quotient de la variation d'une indication d'un système de mesure par la variation correspondante de la valeur de la grandeur mesurée (source : Vocabulaire international de métrologie ISO/CEI Guide 99 :2007)

4.2 Micro-capteur PID (détecteur à photo-ionisation)

Ces capteurs sont exclusivement dédiés à la mesure des polluants gazeux.

Le principe consiste à bombarder le gaz à analyser avec des photons, dont l'énergie est supérieure à l'énergie de liaison des électrons de la couche périphérique de la molécule à détecter. Ces électrons sont ainsi arrachés et le courant induit par les molécules ionisées est mesuré et converti dans une unité de concentration (nmol/mol, $\mu\text{mol}/\text{mol}$, mmol/mol, etc.).

Le détecteur à photo-ionisation utilise le rayonnement ultraviolet comme source d'ionisation. En fonction des systèmes, des lampes à 9,8, 10,6 ou 11,7 eV sont utilisées. La lampe du détecteur est choisie en fonction du gaz que l'on souhaite mesurer. Les micro-capteurs PID permettent de détecter de nombreux composés tels que les composés inorganiques (ammoniac, chlore) ou organiques (aromatiques, cétones, aldéhydes, amines, amides, composés contenant du soufre, hydrures (phosphine)). La gamme de mesure des micro-capteurs PID permet de quantifier des substances avec des concentrations de 0-100 ppm et 0-1000 ppm.

Les micro-capteurs PID présentent les avantages d'être sensibles (sensibilité augmentant avec le nombre d'atomes de carbone de la molécule), d'avoir un temps de réponse rapide (quelques secondes) et permettent de détecter simultanément mais de façon non spécifique plusieurs composés.

Cependant, les détecteurs à photo-ionisation ne sont pas spécifiques, et rencontrent donc des problèmes d'analyse lorsqu'un mélange contenant différents composés organiques volatils doit être analysé.

Néanmoins, ils ne permettent pas la détection de certaines molécules présentant une énergie d'ionisation supérieure à 11,7 eV (méthane, gaz naturel), les composés couramment présents dans l'air (oxygène, azote, gaz inorganiques (ozone...)) et les particules et gouttelettes d'aérosol.

La présence de COV à très forte concentration peut également entraîner une contamination du capteur et la pollution particulaire de l'air ambiant peut induire un dépôt de particules sur les électrodes (cathode et anode) créant ainsi des faux positifs.

Ils sont également sensibles à l'humidité ($HR > 70\%$), car le risque de condensation dans le capteur peut avoir une influence sur les composés analysés (réactions secondaires...).

Enfin, leurs réponses dérivent dans le temps. Certains peuvent même montrer des dérives de concentration sur la journée.

4.3 Semi-conducteurs

Ces sensors sont constitués d'une couche sensible semi-conductrice dont la conductivité dépend du matériau qui la compose et de la composition de l'atmosphère à laquelle elle est soumise. Le signal résultant est une valeur variable de résistivité. Les couches sensibles exploitées peuvent être constituées d'un semi-conducteur minéral, essentiellement des oxydes métalliques, ou d'un semi-conducteur organique (cf. figure 7).

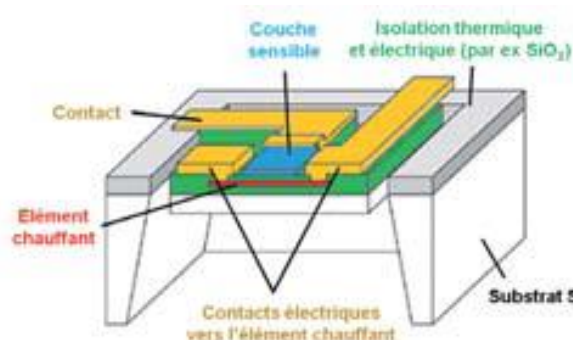


Figure 7 : Schéma d'un sensor à gaz de type semi-conducteur

Le principal défaut de ces micro-capteurs est d'être non sélectif. De nombreux composés gazeux vont induire une réponse du sensor sans que l'on puisse différencier ces composés. De plus, ils manquent de stabilité à long terme.

Ils ont cependant l'avantage d'être peu coûteux en termes de fabrication, peu consommateurs d'énergie du fait de la miniaturisation des capteurs et ont un temps de réponse rapide.

4.4 Capteurs optiques pour la mesure de particules

Le principe physique est le suivant : dans un milieu homogène et transparent, la lumière se propage en ligne droite ; lorsque les photons émis par une source lumineuse (généralement une diode laser ou une LED émettant dans le domaine du visible ou du proche infrarouge) rencontrent une particule, une partie du rayon lumineux est diffusée. Un capteur photosensible convertit alors la lumière diffusée en signaux électriques, analysés par un algorithme qui permet de classer les particules par taille, connaissant l'angle de diffusion, la distance séparant la particule du détecteur, ainsi que l'intensité et la longueur d'onde λ . La diffusion par les particules dont le rayon se situe entre 0,1 et 10 fois la longueur d'onde est déterminée par la diffusion de Mie. On note que l'intensité diffusée est maximale lorsque λ est proche du rayon de la particule. L'intensité de cette diffusion est inversement proportionnelle à λ^2 et dépend de la taille et de la nature de la particule (différents indices de réfraction) pour un angle d'observation donné.

La lumière diffusée « vers l'avant » est toujours plus importante que la lumière rétro-diffusée et est moins sensible aux variations de l'indice complexe de réfraction. C'est pourquoi la lumière diffusée vers l'avant est exploitée dans la plupart des compteurs optiques.

Pour les particules, c'est la mesure de l'intensité et de l'angle avec lequel la lumière est diffusée qui permet d'obtenir les informations concernant la concentration en nombre et la taille des particules. Chaque particule contenue dans l'air et passant devant le faisceau laser diffracte une partie de ce faisceau vers le capteur positionné selon un angle optimal (cf. Figure 8). Les données obtenues par le détecteur permettent d'obtenir la quantité de particules recherchées par unité de volume. Le flux d'air qui pénètre est maintenu constant de sorte que la largeur de l'impulsion mesurée permet de classer les particules par taille.

Le prix de ces micro-capteurs est largement inférieur au prix des technologies de laboratoire. Ils ont l'avantage d'avoir un temps de réponse rapide (de l'ordre de la seconde).

Lorsque les capteurs sont neufs, ils présentent des limites de détection/quantification raisonnablement faibles, mais comme ils ont tendance à s'encrasser dans le temps, ceci induit une dérive de la réponse. De ce fait, ils ont besoin d'être vérifiés ou étalonnés régulièrement à l'aide de moyens de référence.

De plus, leur principe de mesure, basé sur une conversion de concentrations en nombre de particules par unité de volume en des concentrations massiques, repose sur des modèles théoriques, utilisant des approximations sur la forme et la nature des particules, ce qui peut conduire à des biais sur les concentrations massiques particulières.

Enfin, le signal mesuré dépend de plusieurs paramètres tels que l'indice de réfraction de la particule, l'humidité de l'air, la densité et la forme des particules ..., ce qui là encore, peut influencer sur la justesse des mesures.

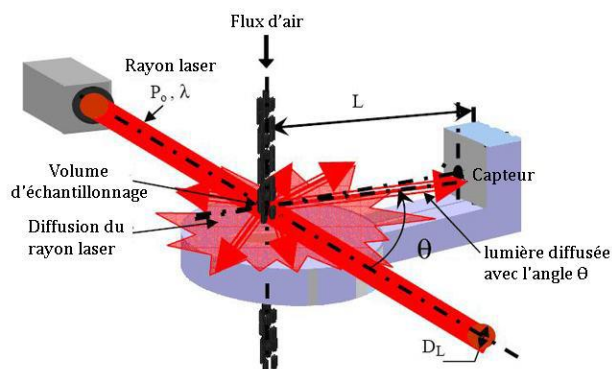


Figure 8 : Principe du capteur P4000 de NanoSense

Source : <https://www.nano-sense.com/fr/P4000/sonde-particules-fines-p4000.html>

4.5 Capteurs optiques pour la mesure des polluants gazeux

Pour les polluants gazeux, c'est le principe de la spectroscopie d'absorption qui permet de déterminer la concentration d'un polluant donné.

C'est une méthode fiable et relativement stable dans le temps. Malheureusement, on ne trouve ces petits capteurs à infra-rouge que pour très peu de gaz (technologie utilisée pour la mesure de CO₂ et de CO).

Ces micro-capteurs ont une bonne sensibilité (de 350 à 2000 µmol/mol pour le CO₂), leur temps de réponse est relativement rapide (de 20 à 120s) et leur dérive est limitée dans le temps.

Ils sont cependant sensibles aux conditions ambiantes (température, humidité et pression).

5. SYNTHÈSE DES MICRO-CAPTEURS ET SYSTÈMES INTÉGRÉS COMMERCIAUX ACTUELLEMENT DISPONIBLES SUR LE MARCHÉ

Ce premier inventaire réalisé est aussi exhaustif que possible, compte tenu des avancées technologiques et mises sur le marché permanentes de nouveaux micro-capteurs. Cet inventaire s'est arrêté fin octobre 2018.

Il a été effectué en exploitant une trentaine de documents référencés en annexe 2 et en consultant les sites web des fabricants.

De plus, il a nécessité en amont la mise en place d'un fichier Excel qui a été validé dans le cadre du groupe de travail « Micro-capteurs pour l'évaluation de la qualité de l'air » (cf. annexe 1) et qui a permis de déterminer et de structurer les informations permettant de répondre aux différents objectifs listés au chapitre 1. Ce fichier, dont la description est faite en annexe 1 de ce rapport, permet de faire le lien entre les spécifications techniques des micro-capteurs (spécifications constructeurs) et les retours d'expérience des AASQA ou des travaux menés par la communauté scientifique.

Ainsi, nous avons pu lister jusqu'alors 30 fabricants ou fournisseurs de micro-capteurs différents, avec chacun leurs spécificités. La plupart d'entre eux proposent des systèmes micro-capteurs (polluants gazeux, particules et autres paramètres tels que les paramètres physiques odeurs, bruit, température, hygrométrie). Le tableau ci-après (cf. tableau 1) présente les fournisseurs identifiés et le nombre de systèmes commerciaux qu'ils proposent sur le marché.

Tableau 1 : Nombre et type de micro-capteurs proposés sur le marché par les fabricants

Fabricants ou assembleur	Nombre de micro-capteurs suivant les polluants																						
	H ₂ S/ CH ₄ S	Bruit	CH ₂ O/ Solvants organiques	PM	CO	CO ₂	COV	Cl ₂	H ₂ S	HCnm	NH ₃	NO	NO ₂	NO ₂ ou NO ₂ /O ₃	NOx	O ₂	O ₃	SO ₂	O ₃ /NO ₂	P	HR	T°	Total général
42 Factory		1		1																1	1	1	5
Aeroqual				1	2	1	2	1	1	1			1				2	1					13
AirBeam				1																	1	1	3
AirMatrix				1																			1
Alphasense				1																			1
Azimut Hager				1					1					1									3
BETTAIR		1		1	1				1			1	1				1	1		1	1	1	11
CairPol	3		1	0	1	1	1				1		1					1		1			11
Clarity				1			1				1		1								1	1	6
Comde Derenda				1																			1
Dylos				1																			1
EcologicSense				1																			1
Ecomesure				2	1	1	1						1				1						7
GROUPE TERA (EcologicSense)				4																			4
Ionscience				0			1																1
LiberaIntentio				0	2							2	1				3						8
Luftdaten				1																	1	1	3
Nano Sense				1																			1
Nova Fitness				5																			5
Palas				2																			2
PLANTOWER				2																			2
Plume labs				1			1								1		1				1	1	6
RUBIX				1					1		1	1	1										5
SHARP				1																			1
Shinyei				2																			2
ThermoFisher				2																			2
TZAO				1																			1
VAISALA				2	1								1				1	1					6
Winsen				2	2	2			2				1			1	1	1					12
Wuhan Cubic Optoelectronics Co.,Ltd				4	1	2																	7
Total général	3	2	1	44	11	7	7	1	6	1	3	4	9	1	1	1	10	5	1	2	6	6	132

Le tableau 1 montre que ces micro-capteurs peuvent mesurer différents types de polluants (polluants gazeux et particulaires), mais également donner des informations sur d'autres facteurs tels que la température, l'hygrométrie, le bruit ...

Ce premier inventaire permet de distinguer deux grandes classes de micro-capteurs et de systèmes micro-capteurs, destinés à la surveillance de la qualité de l'air aussi bien ambiant qu'intérieur :

- les appareils « portatifs », type Flow de Plumelab ou AirMatrix de Normandie Tech'air, destinés à être portés en tous lieux par des personnes afin de renseigner leur exposition individuelle ;
- les appareils « à fixer ou à poser », type EcomZen d'Ecomasure, Airbeam de AirCasting ou encore GreenBee de Hägerservices environment, destinés à être installés à un endroit fixe afin de renseigner la pollution d'un environnement particulier.

5.1 Focus sur les PM

Concernant les mesures de particules, les capteurs sont essentiellement basés sur la technologie optique, avec comme principe la diffusion optique.

Les micro-capteurs recensés permettent de déterminer la concentration particulaire pour des particules ayant des diamètres aérodynamiques compris entre 0,3 et 100 μm . Sur un nombre total de 44 micro-capteurs ou systèmes micro-capteurs répertoriés pour la mesure des PM, la répartition de la gamme de mesure est indiquée sur la figure 9.

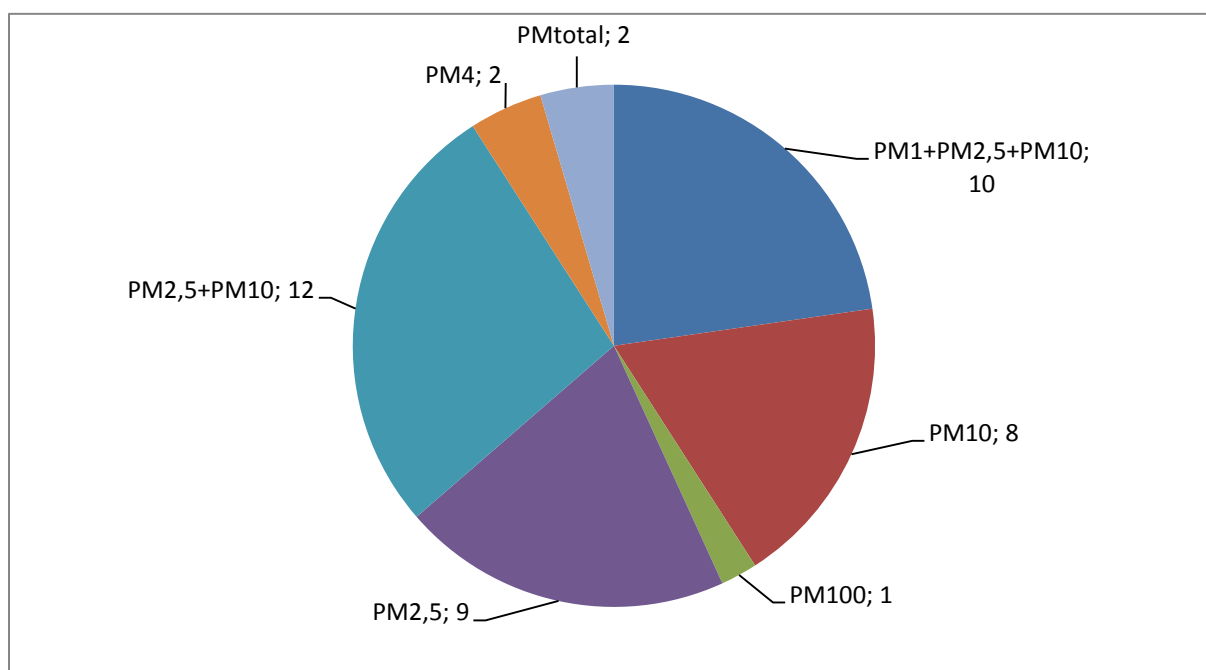


Figure 9 : Répartition des micro-capteurs mesurant des PM en fonction des tailles de particules

On remarque qu'à ce jour, les micro-capteurs sont principalement développés pour la détermination des concentrations en PM_{10} et $\text{PM}_{2,5}$.

88% des micro-capteurs recensés mesurent les $PM_{2,5}$ et les PM_{10} ce qui semble normal, du fait que ces polluants sont réglementés.

On note qu'un seul de ces micro-capteurs est destiné à la mesure des concentrations en PM_{100} ; le fabricant de cet équipement est Nova Fitness. Deux fabricants, Thermofischer (réf. : MIE pDR-1500) et Palas (réf. : Fidas Frog), proposent sur le marché des micro-capteurs permettant de mesurer des PM_4 . Cette taille de particule est définie, tout comme les $PM_{2,5}$ et les PM_{10} , dans la norme NF ISO 7708, mai 1996 : « Définitions des fractions de taille des particules pour l'échantillonnage lié aux problèmes de santé ». Les deux capteurs sont destinés à être utilisés pour des mesures d'air intérieur, ce qui explique cette référence aux PM_4 .

5.2 Focus sur les composés gazeux

Concernant les mesures de composés gazeux, le principe physique des capteurs dépend de la nature du polluant mesuré.

Aussi, pour les polluants gazeux tels que les oxydes d'azote (NO_x), le dioxyde de soufre et le monoxyde de carbone, on trouve essentiellement des capteurs électrochimiques. Pour les COV, ce sont principalement les détecteurs à photo-ionisation et les semi-conducteurs qui sont utilisés, alors que, pour l'ozone, ce sont les semi-conducteurs et les électrochimiques.

Une analyse a été effectuée de façon détaillée pour les principaux polluants gazeux mesurés dans l'air ambiant (cf. figures et commentaires ci-après).

Concernant la mesure de CO, seuls 8 fournisseurs de micro-capteurs ont été recensés, pour un total de 11 systèmes. La figure 10 représente les fournisseurs répertoriés et le nombre de capteurs CO associés.

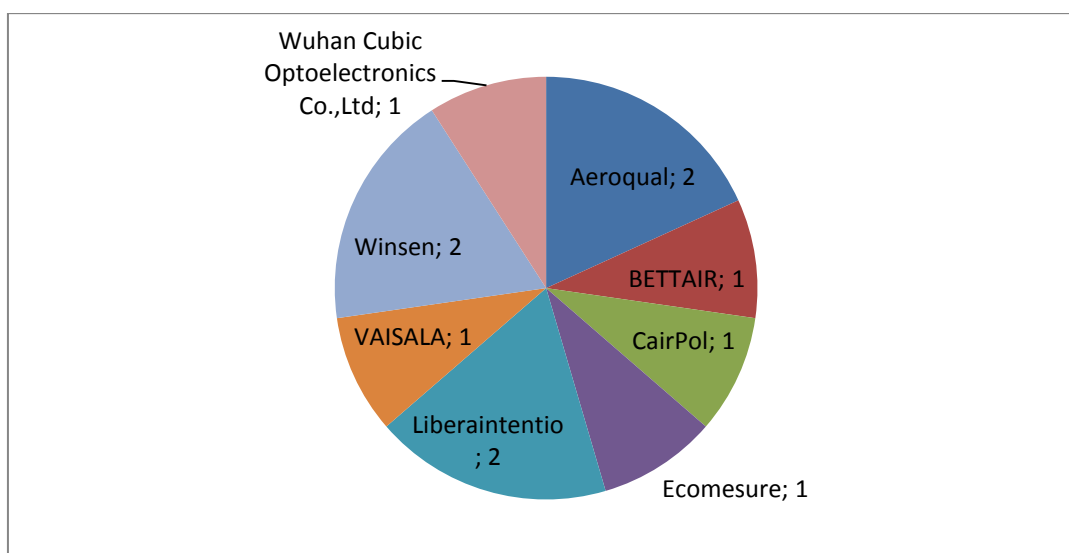


Figure 10 : Fournisseurs de micro-capteurs mesurant les concentrations de monoxyde de carbone (CO)

L'étendue de mesure des micro-capteurs recensés s'étend de 10000 nmol/mol pour les micro-capteurs Vaisala (soit 10 µmol/mol) à 1000 µmol/mol pour ceux de Winsen.

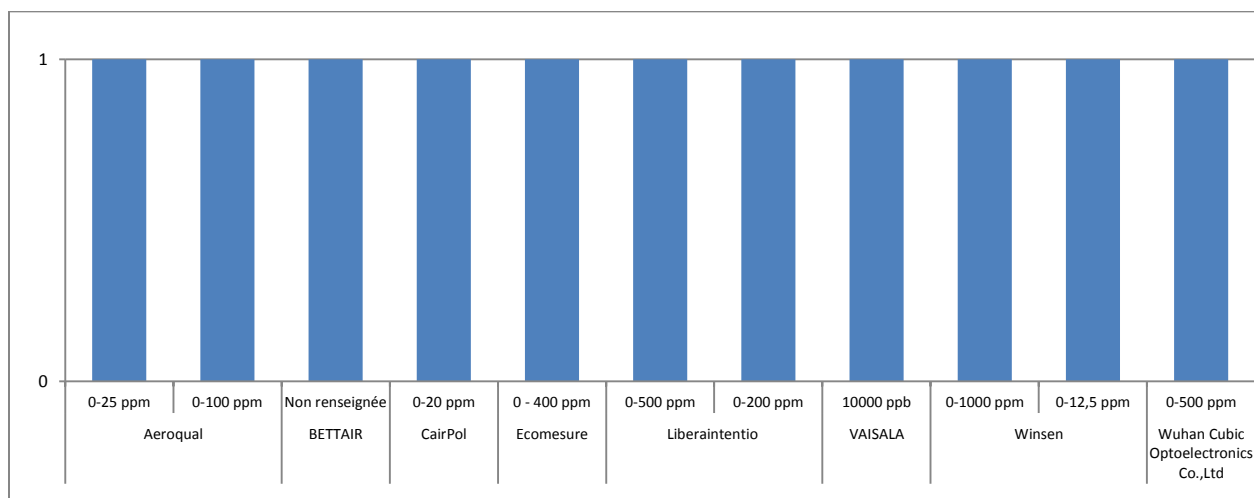


Figure 11 : Nombre de micro-capteurs par fournisseur et par gamme de mesure pour le monoxyde de carbone (CO)

Concernant la mesure de CO₂, seuls 5 fournisseurs de micro-capteurs ont été recensés, pour un total de 7 appareils.

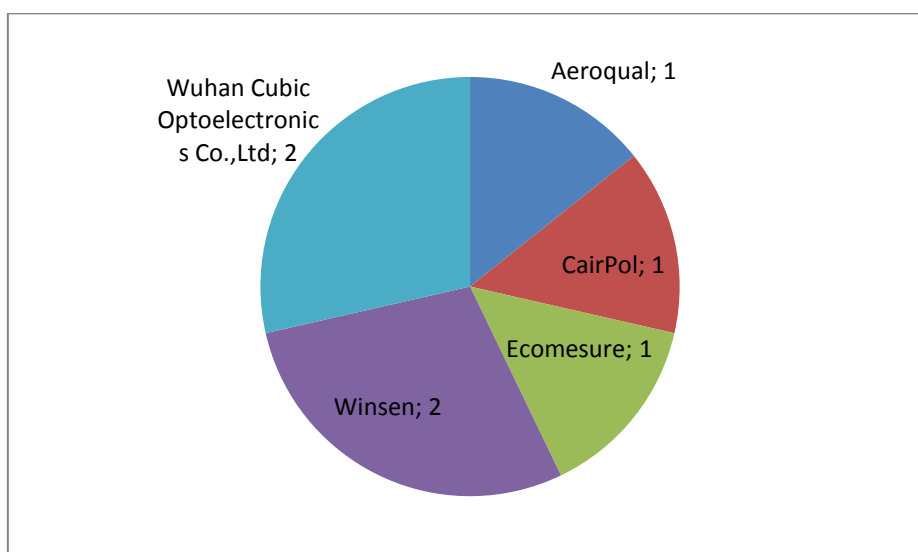


Figure 12 : Fournisseurs de micro-capteurs mesurant les concentrations de dioxyde de carbone (CO₂)

La gamme de mesure des micro-capteurs recensés s'étend de 0 à 20000 µmol/mol pour Wuhan Cubic qui présente 3 gammes différentes (0-5000 µmol/mol ; 0-10000 µmol/mol et 0-20000 µmol/mol), les 2 dernières gammes essentiellement dédiées à des applications industrielles. Sur les 5 fournisseurs listés, 3 fournissent des micro-capteurs sur la gamme 0-5000 µmol/mol.

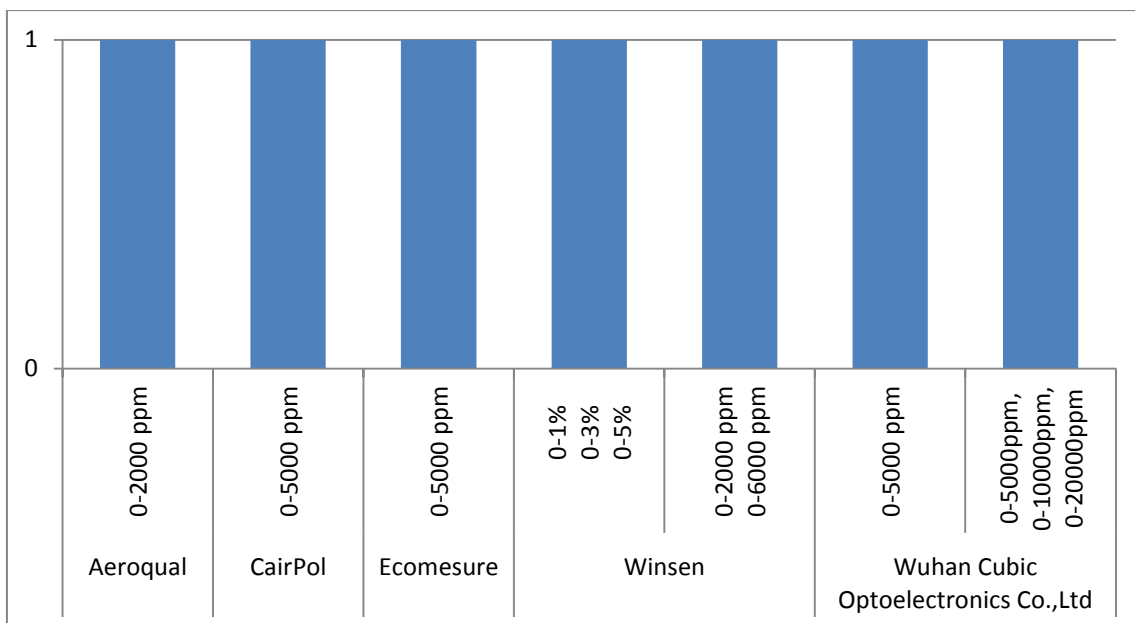


Figure 13 : Fournisseurs de micro-capteurs mesurant les concentrations de dioxyde de carbone (CO₂)

Sept fournisseurs de micro-capteurs ont été recensés, pour **la mesure de l’ozone et/ou du NO₂** pour un total de 10 appareils.

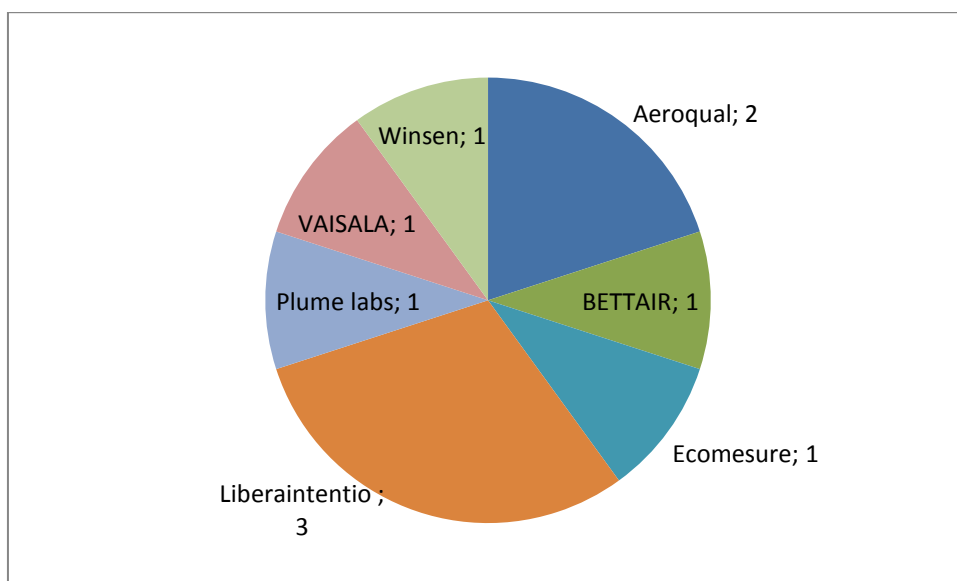


Figure 14 : Fournisseurs de micro-capteurs mesurant les concentrations de dioxyde d’azote (NO₂) et/ou d’ozone (O₃)

La gamme de mesure des micro-capteurs recensés s’étend de 0 à 5 µmol/mol pour l’ozone avec deux fournisseurs (Liberaintentio et Vaisala) et de 0 à 0,15 µmol/mol pour Aéroqual. Pour deux des sept fournisseurs listés, l’information concernant la gamme de mesure des NO₂/O₃ pour les micro-capteurs n’est pas disponible.

En effet, les informations concernant les systèmes ne sont pas toujours disponibles dans la documentation commerciale.

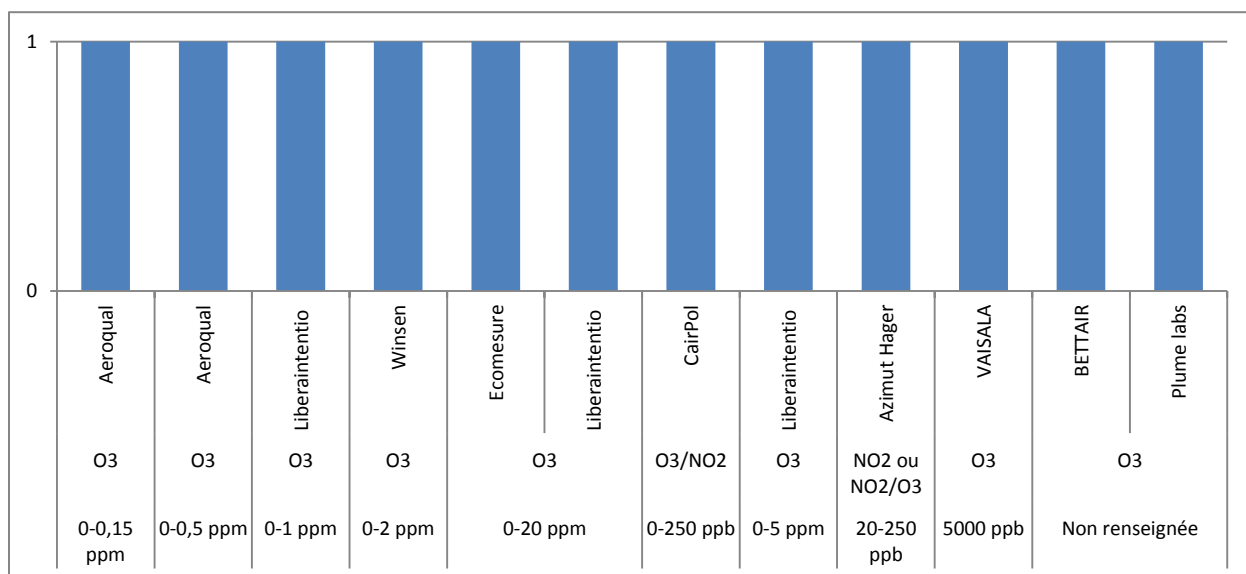


Figure 15 : Fournisseurs de micro-capteurs mesurant les concentrations de NO_2/O_3

Outre les micro-capteurs détectant l’ozone et le dioxyde d’azote, ont été recensés des **micro-capteurs mesurant les concentrations de NO_x** .

Sont répertoriés 10 fournisseurs de micro-capteurs pour NO_x , et plus spécifiquement 4 fournisseurs pour le monoxyde d’azote, 9 pour le dioxyde d’azote et un fournisseur pour les oxydes d’azote.

Les gammes de mesure associées aux micro-capteurs spécifiques à la mesure de NO_2 , lorsqu’elles sont connues, sont comprises entre 0 et 250 nmol/mol (CairPol) et entre 0 à 50 $\mu\text{mol/mol}$ (Liberaintentio). Pour la mesure de NO, la gamme la plus importante s’étend de 0 à 100 $\mu\text{mol/mol}$.

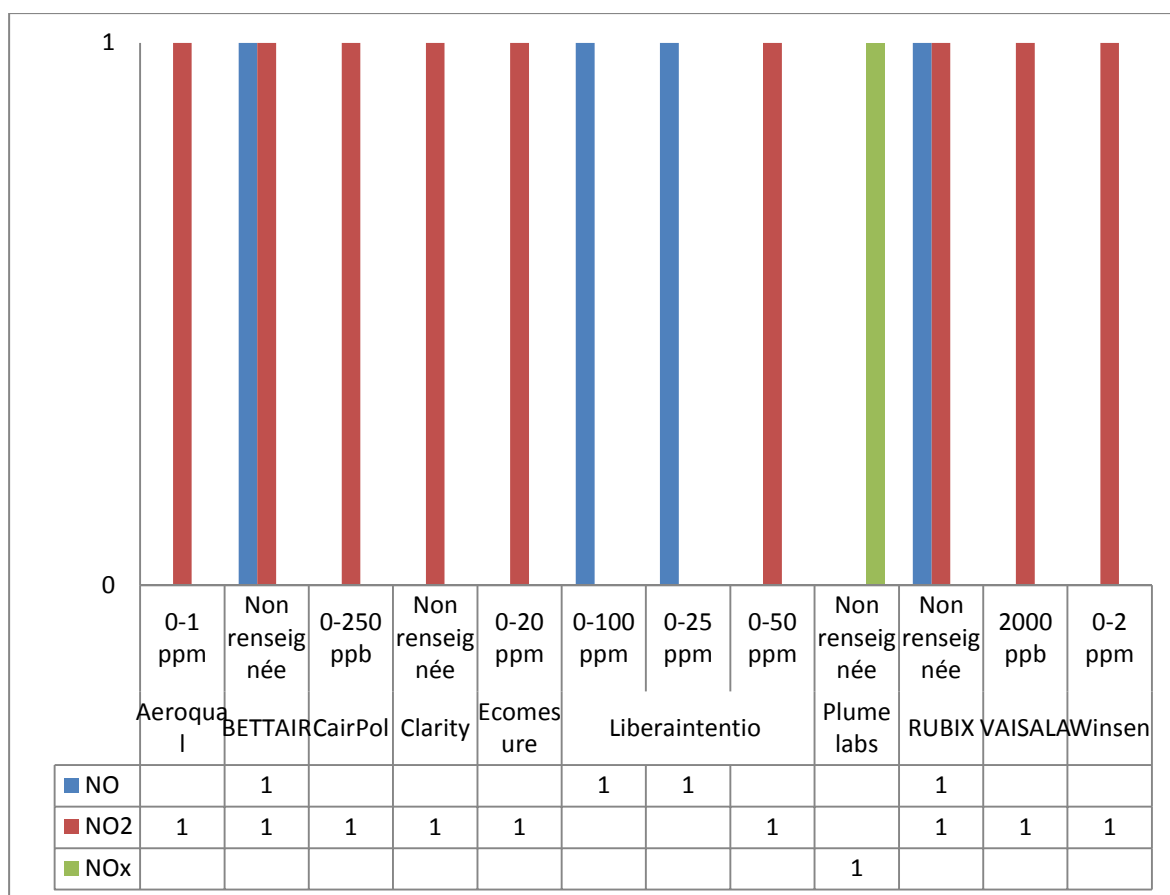


Figure 16 : Fournisseurs de micro-capteurs mesurant les concentrations de NO, NO_x et NO₂

Concernant le composé SO₂, 5 fournisseurs ont été recensés proposant chacun un micro-capteur.

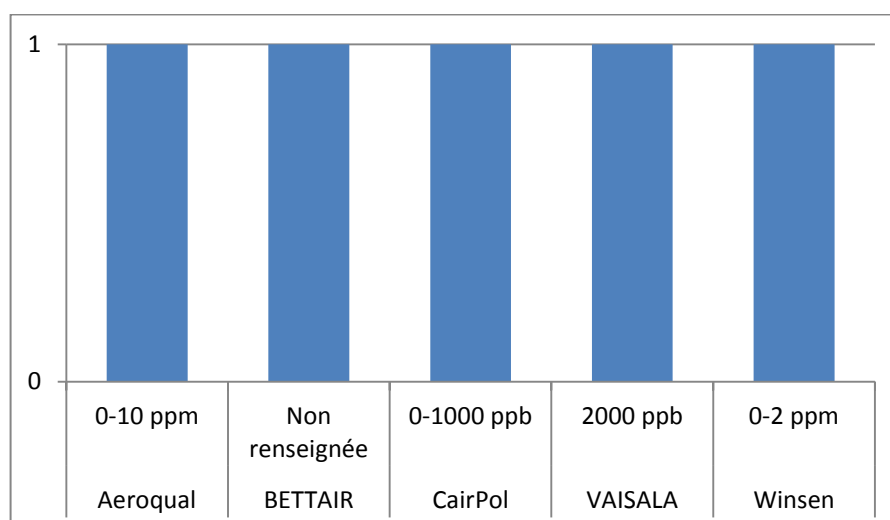


Figure 17 : Fournisseurs de micro-capteurs mesurant les concentrations de dioxyde de soufre (SO₂)

La gamme de mesure des micro-capteurs recensés s'étend, pour la plus petite gamme, de 0 à 2 µmol/mol pour Vaisala et de 0 à 0,1 µmol/mol pour la plus grande gamme avec

Aéroqual. Pour un fournisseur listé (BETTAIR), l'information concernant la gamme de mesure du SO₂ n'est pas disponible ; il s'agit d'un système micro-capteur.

Concernant les polluants surveillés mais non réglementés, seuls 6 fournisseurs de micro-capteurs ont été recensés pour la mesure des **COV**, pour un total de 8 appareils, dont un fournisseur qui propose un micro-capteur d'hydrocarbures non méthaniques (HCNM).

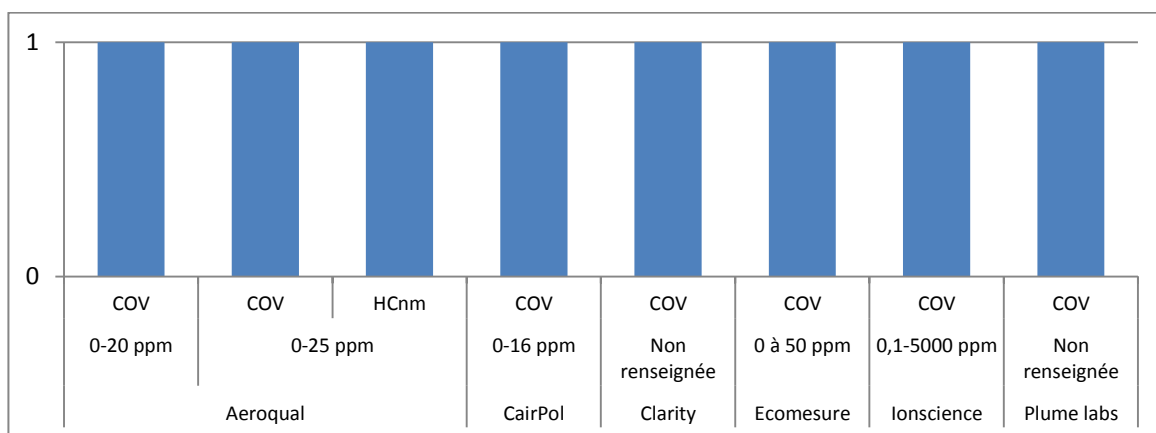


Figure 18 : Fournisseurs de micro-capteurs mesurant les concentrations de composés organiques volatils (COV)

La gamme de mesure des micro-capteurs recensés s'étend de 0 à 16 µmol/mol pour Cairpol à 0,1-5000 µmol/mol pour Ionscience. Pour 2 des 6 fournisseurs listés, l'information concernant la gamme de mesure des COV n'est pas disponible.

De même, **pour le NH₃**, 3 fournisseurs ont été recensés, pour des gammes de mesure définies uniquement dans le cas d'un micro-capteur (0 à 25 µmol/mol).

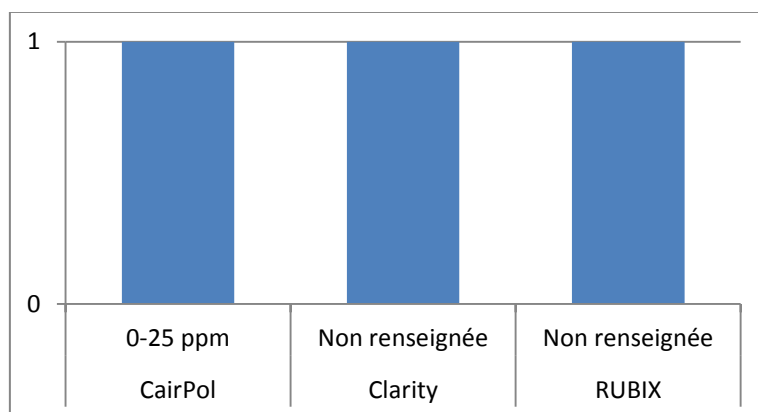


Figure 19 : Fournisseurs de micro-capteurs mesurant les concentrations de l'ammoniac (NH₃)

Deux fournisseurs proposent chacun un capteur pour des polluants non réglementés suivis en milieux industriels c'est à dire **l'O₂ et le Cl₂**.

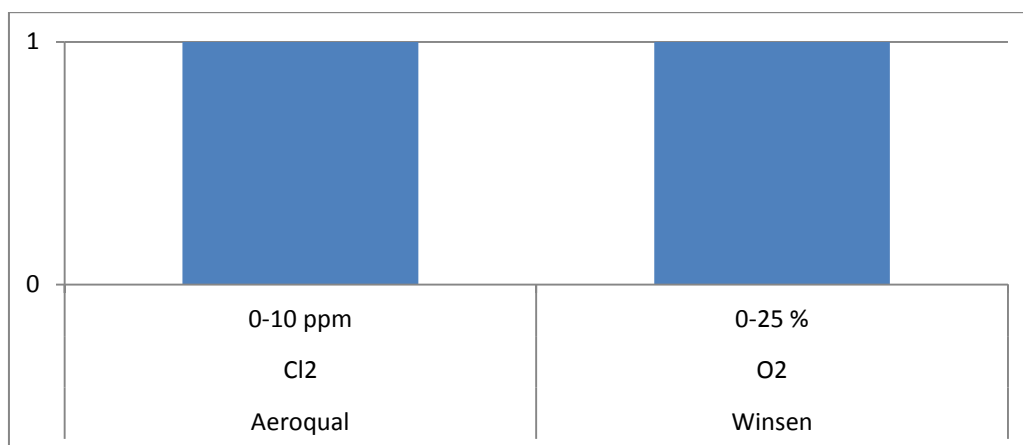


Figure 20 : Fournisseurs de micro-capteurs mesurant les concentrations d'O₂ et Cl₂

Il a également été recensé des micro-capteurs qui permettent de mesurer **des paramètres physiques** autres que les polluants chimiques.

Fabricants ou assembleurs	Nombre de micro-capteurs suivant les polluants				
	Bruit	Hygrométrie	Pression	Température	Total général
42 Factory	1	1	1	1	4
AirBeam		1		1	2
BETTAIR	1	1	1	1	4
Clarity		1		1	2
Luftdaten		1		1	2
Plume labs		1		1	2
Total général	2	6	2	6	16

Figure 21 : Capteurs déterminant les paramètres physiques des conditions ambiantes

Les informations traitées dans ce paragraphe ont été regroupées dans les tableaux ci-après qui fournissent une première synthèse des micro-capteurs et systèmes intégrés commerciaux actuellement disponibles sur le marché (documents commerciaux).

Fournisseur du système (si différent du fabricant)	Référence du système	Version du système	Référence de l'élément sensible	Polluant(s) (et paramètres physiques le cas échéant)	Observations complémentaires	Gamme de mesures	Unité	Principe de mesure	Temps de réponse
Nova Fitness	Laser PM2.5 Monitor--SDL301	Non renseignée	Non renseignée	PM2,5+PM10		0-3000 µg/m3	µg/m ³	diffraction laser	/
Nova Fitness	Laser PM2.5 Monitor--SDL607	Non renseignée	Non renseignée	PM2,5+PM10		0-1000 µg/m3	µg/m ³	diffraction laser	/
Nova Fitness	Laser PM2.5 Sensor--SDS018	Non renseignée	Non renseignée	PM2,5+PM10		0-1000 µg/m3	µg/m ³	diffraction laser	/
Nova Fitness	Laser PM2.5 Sensor--SDS011	Non renseignée	Non renseignée	PM2,5+PM10		0-1000 µg/m3	µg/m ³	diffraction laser	/
Nova Fitness	Laser PM100 Sensor specification--SDS198	Non renseignée	Non renseignée	PM100		0-20000 µg/m3	µg/m ³	diffraction laser	/
PLANTOWER	PMS1003 series/PMS3003 series	Non renseignée	Non renseignée	PM1+PM2,5+PM10		0-500 µg/m3	µg/m ³	diffraction laser	<10s
PLANTOWER	PMS5003 series/PMS7003 series	Non renseignée	Non renseignée	PM1+PM2,5+PM10		0-500 µg/m3	µg/m ³	diffraction laser	≤10s
Dylos	Dylos DC 1100 PRO	Non renseignée	Non renseignée	0,5-2,5 µm et 2,5-10 µm	Indoor			diffraction laser	/
SHARP		Non renseignée	GP2Y1010AU0F	PMtotal				diffraction laser	/
Wuhan Cubic Optoelectronics Co.,Ltd	PM2008	Non renseignée	Laser Particle Sensor Module PM0.3/PM2.5/PM10	de 0,3 à 10 µm		0-1000 µg/m3	µg/m ³	laser	1s
Wuhan Cubic Optoelectronics Co.,Ltd	PM2107	Non renseignée	Laser Particle Sensor Module PM1/PM2.5/PM10	PM1+PM2,5+PM10		0-1000 µg/m3	µg/m ³	diffraction laser	< 8s
Wuhan Cubic Optoelectronics Co.,Ltd	PM1003	Non renseignée	Laser Particle Sensor Module PM1/PM2.5/PM10	de 1 à 10 µm		0-500 µg/m3	µg/m ³	diffraction infrarouge	/
Wuhan Cubic Optoelectronics Co.,Ltd	PM2500	Non renseignée	Laser Particle Sensor Module PM0.3/PM2.5/PM10	de 0,3 à 10 µm		0-1000 µg/m3	µg/m ³	laser	rapide
Wuhan Cubic Optoelectronics Co.,Ltd	SRH Series	Non renseignée	Miniature Infrared Carbon Dioxide Sensor SRH Series	CO ₂		0-5000ppm, 0-10000ppm, 0-20000ppm	ppm	diffraction infrarouge	<25s
Wuhan Cubic Optoelectronics Co.,Ltd	TDB Series	Non renseignée	Handheld Carbon Monoxide Gas Detector	CO		0-500 ppm	ppm	Electrochimique	30s
Wuhan Cubic Optoelectronics Co.,Ltd	RHB Series	Non renseignée	Handheld Infrared Carbon Dioxide Gas Detector	CO ₂		0-5000 ppm	ppm	diffraction infrarouge	30s

Fournisseur du système (si différent du fabricant)	Référence du système	Version du système	Référence de l'élément sensible	Polluant(s) (et paramètres physiques le cas échéant)	Observations/Informations complémentaires	Gamme de mesures	Unité	Principe de mesure	Temps de réponse
Nano Sense	P4000	Non renseignée	Non renseignée	PM1+PM2,5+PM10		0-950 µg/m3	µg/m ³	diffraction laser	/
GROUPE TERA (EcologicSense)	e-PM AQ Feel	Non renseignée	Non renseignée	PM2,5		0-100 µg/m3	µg/m ³	diffraction laser	/
GROUPE TERA (EcologicSense)	e-PM AQ Feel	Non renseignée	Non renseignée	PM10		0-200 µg/m3	µg/m ³	diffraction laser	/
GROUPE TERA (EcologicSense)	e-PM AQ Sense	Non renseignée	Non renseignée	PM2,5		0-100 µg/m3	µg/m ³	diffraction laser	/
GROUPE TERA (EcologicSense)	e-PM AQ Sense	Non renseignée	Non renseignée	PM10		0-200 µg/m3	µg/m ³	diffraction laser	/
Plume labs	Flow	Non renseignée	Non renseignée	PM2,5		Non renseignée	Non renseignée	Non	/
Plume labs	Flow	Non renseignée	Non renseignée	NOx		Non renseignée	Non renseignée	Non	/
Plume labs	Flow	Non renseignée	Non renseignée	O ₃		Non renseignée	Non renseignée	Non	/
Plume labs	Flow	Non renseignée	Non renseignée	COV		Non renseignée	Non renseignée	Non	/
Plume labs	Flow	Non renseignée	Non renseignée	Température		Non renseignée	Non renseignée	Non	/
Plume labs	Flow	Non renseignée	Non renseignée	Hygrométrie		Non renseignée	Non renseignée	Non	/
AirBeam	Partide Sensor: Shinyei PPD60PV Temperature & Relative Humidity Sensor: MaxDetect RH03	Version 2.1+EDR	Non renseignée	PM2,5		Non renseignée	Non renseignée	Non	/
AirBeam	Partide Sensor: Shinyei PPD60PV Temperature & Relative Humidity Sensor: MaxDetect RH03	Version 2.1+EDR	Non renseignée	Température		Non renseignée	Non renseignée	Non	/
AirBeam	Partide Sensor: Shinyei PPD60PV Temperature & Relative Humidity Sensor: MaxDetect RH03	Version 2.1+EDR	Non renseignée	Hygrométrie		Non renseignée	Non renseignée	Non	/
TZAO	Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	PM2,5+PM10		Non renseignée	Non renseignée	diffraction laser	/

Fournisseur du système (si différent du fabricant)	Référence du système	Version du système	Référence de l'élément sensible	Polluant(s) (et paramètres physiques le cas échéant)	Observations/informations complémentaires	Gamme de mesures	Unité	Principe de mesure	Temps de réponse
BETTAIR	Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	NO2		Non renseignée	PPb ou µg/m³	Non renseignée	
BETTAIR	Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	NO		Non renseignée	PPb ou µg/m³	Non renseignée	
BETTAIR	Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	CO		Non renseignée	PPb ou µg/m³	Non renseignée	
BETTAIR	Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	H₂S		Non renseignée	PPb ou µg/m³	Non renseignée	
BETTAIR	Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	O₃		Non renseignée	PPb ou µg/m³	Non renseignée	
BETTAIR	Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	SO2		Non renseignée	PPb ou µg/m³	Non renseignée	
BETTAIR	Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	PM1+PM2,5+PM10		Non renseignée	µg/m³	Non renseignée	
BETTAIR	Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	Température		Non renseignée	°C	Non renseignée	
BETTAIR	Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	Hygrométrie		Non renseignée	%HR	Non renseignée	
BETTAIR	Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	Pression		Non renseignée	hPa	Non renseignée	
BETTAIR	Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	Bruit		Non renseignée	dBa	Non renseignée	
Palas	FIDAS FROG	Non renseignée	Non renseignée	PM1+PM2,5+PM10		0,18 à 40	µm	diffraction laser	/
Palas	FIDAS FROG	Non renseignée	Non renseignée	PM4		0,18 à 40	µm	diffraction laser	/
Shinyei	PPD42NS	??	PPD42NS	PM2,5		0-800 µg/m³	µg/m³	diffraction laser	/
Shinyei	PPD60PV	Non renseignée	Non renseignée	PM sup à 0,5 µm				diffraction laser	/

Fournisseur du système (si différent du fabricant)	Référence du système	Version du système	Référence de l'élément sensible	Polluant(s) (et paramètres physiques le cas échéant)	Observations/Informations complémentaires	Gamme de mesures	Unité	Principe de mesure	Temps de réponse
ThermoFisher	MIE pDR-1500	Non renseignée	Non renseignée	PM1+PM2,5+PM10		1-400000 µg/m3	µg/m³	diffraction laser	/
ThermoFisher	MIE pDR-1500	Non renseignée	Non renseignée	PM4		1-400000 µg/m3	µg/m³	diffraction laser	/
CairPol	Cairsens ou Cairclip	Non renseignée	Non renseignée	O3/NO2		0-250 ppb	ppb	Electrochimique	/
CairPol	Cairsens ou Cairclip	Non renseignée	Non renseignée	NO2		0-250 ppb	ppb	Electrochimique	/
CairPol	Cairsens ou Cairclip	Non renseignée	Non renseignée	CO		0-20 ppm	ppm	Electrochimique	/
CairPol	Cairsens ou Cairclip	Non renseignée	Non renseignée	H2S/CH4S		0-1000 ppb	ppb	Electrochimique	/
CairPol	Cairsens ou Cairclip	Non renseignée	Non renseignée	H2S/CH4S		0-200 ppm	ppm	Electrochimique	/
CairPol	Cairsens ou Cairclip	Non renseignée	Non renseignée	H2S/CH4S		0-20 ppm	ppm	Electrochimique	/
CairPol	Cairsens ou Cairclip	Non renseignée	Non renseignée	NH3		0-25 ppm	ppm	Electrochimique	/
CairPol	Cairsens ou Cairclip	Non renseignée	Non renseignée	SO2		0-1000 ppb	ppb	Electrochimique	/
CairPol	Cairsens ou Cairclip	Non renseignée	Non renseignée	CH2O/Solvants organiques		0-1000 ppb	ppb	Electrochimique	/
CairPol	Cairsens ou Cairclip	Non renseignée	Non renseignée	COV		0-16 ppm	ppm	PID (détecteur à photo-ionisation)	/
CairPol	Cairsens ou Cairclip	Non renseignée	Non renseignée	CO2		0-5000 ppm	ppm	Electrochimique	/
Comde Derenda	APM-2	Non renseignée	Non renseignée	PM2,5+PM10	poids approximatif : 15 kg	0-1000 µg/m3	µg/m³	diffraction laser	

Fournisseur du système (si différent du fabricant)	Référence du système	Version du système	Référence de l'élément sensible	Polluant(s) (et paramètres physiques le cas échéant)	Observations/Informations complémentaires	Gamme de mesures	Unité	Principe de mesure	Temps de réponse
Aeroqual	PM10 / PM2.5 Portable Particulate Monitor	Non renseignée	Non renseignée	PM2,5+PM10		Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	/
Aeroqual	Series 200/300 ou 500 – Portable Air Quality Monitor (capteur interchangeable - pas de mesure de plusieurs paramètres en même temps)	Non renseignée	Non renseignée	CO		0-25 ppm	ppm	Electrochimique	/
Aeroqual	Series 200/300 ou 500 – Portable Air Quality Monitor (capteur interchangeable - pas de mesure de plusieurs paramètres en même temps)	Non renseignée	Non renseignée	CO		0-100 ppm	ppm	Electrochimique	/
Aeroqual	Series 200/300 ou 500 – Portable Air Quality Monitor (capteur interchangeable - pas de mesure de plusieurs paramètres en même temps)	Non renseignée	Non renseignée	CO ₂		0-2000 ppm	ppm	Non-dispersive infra-red (NDIR)	/
Aeroqual	Series 200/300 ou 500 – Portable Air Quality Monitor (capteur interchangeable - pas de mesure de plusieurs paramètres en même temps)	Non renseignée	Non renseignée	H ₂ S		0-10 ppm	ppm	Electrochimique	/
Aeroqual	Series 200/300 ou 500 – Portable Air Quality Monitor (capteur interchangeable - pas de mesure de plusieurs paramètres en même temps)	Non renseignée	Non renseignée	NO ₂		0-1 ppm	ppm	Electrochimique	/
Aeroqual	Series 200/300 ou 500 – Portable Air Quality Monitor (capteur interchangeable - pas de mesure de plusieurs paramètres en même temps)	Non renseignée	Non renseignée	HCnm		0-25 ppm	ppm	Semiconducteur	/
Aeroqual	Series 200/300 ou 500 – Portable Air Quality Monitor (capteur interchangeable - pas de mesure de plusieurs paramètres en même temps)	Non renseignée	Non renseignée	O ₃		0-0,15 ppm	ppm	Semiconducteur	/

Fournisseur du système (si différent du fabricant)	Référence du système	Version du système	Référence de l'élément sensible	Polluant(s) (et paramètres physiques le cas échéant)	Observations/informations complémentaires	Gamme de mesures	Unité	Principe de mesure	Temps de réponse
Aeroqual	Series 200/300 ou 500 – Portable Air Quality Monitor (capteur interchangeable - pas de mesure de plusieurs paramètres en même temps)	Non renseignée	Non renseignée	O ₃		0-0,5 ppm	ppm	Semiconducteur	/
Aeroqual	Series 200/300 ou 500 – Portable Air Quality Monitor (capteur interchangeable - pas de mesure de plusieurs paramètres en même temps)	Non renseignée	Non renseignée	SO ₂		0-10 ppm	ppm	Electrochimique	/
Aeroqual	Series 200/300 ou 500 – Portable Air Quality Monitor (capteur interchangeable - pas de mesure de plusieurs paramètres en même temps)	Non renseignée	Non renseignée	COV		0-25 ppm	ppm	Semiconducteur	/
Aeroqual	Series 200/300 ou 500 – Portable Air Quality Monitor (capteur interchangeable - pas de mesure de plusieurs paramètres en même temps)	Non renseignée	Non renseignée	COV		0-20 ppm	ppm	PID (détecteur à photo-ionisation)	/
Ionscience	CUB	Non renseignée	Non renseignée	COV		0,1-5000 ppm	ppm	PID (détecteur à photo-ionisation)	/
Alphasense	OPC-N2 Particle Monitor	Non renseignée	Non renseignée	PM2,5+PM10		0,38-17	µm	diffraction laser	/
AirMatrix	Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	PM2,5+PM10		0-1000	µg/m ³	diffraction laser	<30s
EcologicSense	GSM AQ Feel	Non renseignée	Non renseignée	PM2,5+PM10		Non renseignée	µg/m ³	diffraction laser	/

Fournisseur du système (si différent du fabricant)	Référence du système	Version du système	Référence de l'élément sensible	Polluant(s) (et paramètres physiques le cas échéant)	Observations/informations complémentaires	Gamme de mesures	Unité	Principe de mesure	Temps de réponse
Azimut Hager	Greenbee S	Non renseignée	Cairpol	NO2 ou NO2/O3		20-250 ppb	ppb	Electrochimique	/
Azimut Hager	Greenbee S	Non renseignée	Cairpol	H ₂ S		10-1000 ppb	ppb	Electrochimique	/
Azimut Hager	Greenbee	Non renseignée	Cairpol	PM10		1·10 ⁵ - 5·10 ⁷ part/n	part/m ³		/
Clarity	Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	PM2,5		Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	/
Clarity	Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	COV		Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	/
Clarity	Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	NO ₂		Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	/
Clarity	Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	NH ₃		Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	/
Clarity	Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	Température		Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	/
Clarity	Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	Hygrométrie		Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	/
42 Factory	AtmoTrack	Non renseignée	Non renseignée	PM1+PM2,5+PM10		Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	/
42 Factory	AtmoTrack	Non renseignée	Non renseignée	Température		Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	/
42 Factory	AtmoTrack	Non renseignée	Non renseignée	Hygrométrie		Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	/
42 Factory	AtmoTrack	Non renseignée	Non renseignée	Pression		Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	/
42 Factory	AtmoTrack	Non renseignée	Non renseignée	Bruit		Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	/

Fournisseur du système (si différent du fabricant)	Référence du système	Version du système	Référence de l'élément sensible	Polluant(s) (et paramètres physiques le cas échéant)	Observations/informations complémentaires	Gamme de mesures	Unité	Principe de mesure	Temps de réponse
Liberaintentio	AirSensEur		City Tech NO 3E100	NO		0-100 ppm	ppm	Electro-chimique	<20s
Liberaintentio	AirSensEur		City Tech CO 3E300	CO		0-500 ppm	ppm	Electro-chimique	<30s
Liberaintentio	AirSensEur		City Tech O3 3E1F	O ₃		0-1 ppm	ppm	Electro-chimique	<60s
Liberaintentio	AirSensEur		City Tech NO2 3E50	NO2		0-50 ppm	ppm	Electro-chimique	<30s
Liberaintentio	AirSensEur		AlphaSense O3 B4	O ₃		0-20 ppm	ppm	Electro-chimique	<45s
Liberaintentio	AirSensEur		Membrapor CO MF-200	CO		0-200 ppm	ppm	Electro-chimique	<25s
Liberaintentio	AirSensEur		Membrapor O3 M-5	O ₃		0-5 ppm	ppm	Electro-chimique	<60s
Liberaintentio	AirSensEur		Membrapor NO C-25	NO		0-25 ppm	ppm	Electro-chimique	<10s
VAISALA	AQT 420	Non renseignée	Non renseignée	SO2		2000 ppb	ppb	Electro-chimique	/
VAISALA	AQT 420	Non renseignée	Non renseignée	CO		10000 ppb	ppb	Electro-chimique	/
VAISALA	AQT 420	Non renseignée	Non renseignée	O ₃		5000 ppb	ppb	Electro-chimique	/
VAISALA	AQT 420	Non renseignée	Non renseignée	NO2		2000 ppb	ppb	Electro-chimique	/
VAISALA	AQT 420	Non renseignée	Non renseignée	PM10		0-5000 µg/m3	µg/m ³	Diffusion optique	/
VAISALA	AQT 420	Non renseignée	Non renseignée	PM2,5		0-2000 µg/m3	µg/m ³	Diffusion optique	/
RUBIX	WT1	Non renseignée	Non renseignée	NO		Non renseignée	Non renseignée	Electro-chimique	/
RUBIX	WT1	Non renseignée	Non renseignée	NO2		Non renseignée	Non renseignée	Electro-chimique	/
RUBIX	WT1	Non renseignée	Non renseignée	PM1+PM2,5+PM10		Non renseignée	Non renseignée	diffraction laser	/
RUBIX	WT1	Non renseignée	Non renseignée	H ₂ S		Non renseignée	Non renseignée	Electro-chimique	/
RUBIX	WT1	Non renseignée	Non renseignée	NH3		Non renseignée	Non renseignée	Electro-chimique	/

Fournisseur du système (si différent du fabricant)	Référence du système	Version du système	Référence de l'élément sensible	Polluant(s) (et paramètres physiques le cas échéant)	Observations complémentaires	Gamme de mesures	Unité	Principe de mesure	Temps de réponse
Luftdaten	Laser PM2.5 Sensor--SDS011	Non renseignée	Non renseignée	PM2,5		0-1000 µg/m3	µg/m ³	diffraction laser	/
Luftdaten	DHT22/AM2305	Non renseignée	DHT22/AM2305	Température		-40 à 80	°C	Non renseignée	/
Luftdaten	DHT22/AM2305	Non renseignée	DHT22/AM2305	Hygrométrie		0 à 100	% de HR	Non renseignée	/
Ecomasure	Ecosmart	Non renseignée	Non renseignée	PM2,5+PM10		0-10 ⁵ part/cm3	part/cm ³	diffraction laser	/
Ecomasure	Ecosmart	Non renseignée	Non renseignée	NO2		0-20 ppm	ppm	Electro-chimique	/
Ecomasure	Ecosmart	Non renseignée	Non renseignée	O ₃		0-20 ppm	ppm	Electro-chimique	/
Ecomasure	Ecomzen	Non renseignée	Non renseignée	PMtotal	indoor	0-10 ⁷ part/cm3	part/cm ³	diffraction laser	/
Ecomasure	Ecomzen	Non renseignée	Non renseignée	CO ₂	indoor	0-5000 ppm	ppm	Infra rouge	/
Ecomasure	Ecomzen	Non renseignée	Non renseignée	COV	indoor	0 à 50 ppm	ppm	PID (détecteur à photo-ionisation)	/
Ecomasure	Ecomzen	Non renseignée	Non renseignée	CO	indoor	0 - 400 ppm	ppm	Electro-chimique	/

Fournisseur du système (si différent du fabricant)	Référence du système	Version du système	Référence de l'élément sensible	Polluant(s) (et paramètres physiques le cas échéant)	Observations/Informations complémentaires	Gamme de mesures	Unité	Principe de mesure	Temps de réponse
Winsen	ZH03	2.0	Non renseignée	PM1+PM2,5+PM10		Non renseignée	µg/m ³	diffraction laser	< 45s
Winsen	ZHP01	1.0	Non renseignée	PM2,5		Non renseignée	µg/m ³	diffraction laser	< 45s
Winsen	ME2-CO	Non renseignée	Non renseignée	CO		0-1000 ppm	ppm	Electro-chimique	< 50s
Winsen	ME2 -O2 -φ20	Non renseignée	Non renseignée	O2		0-25 %	VOL	Electro-chimique	< 15s
Winsen	ZE12	V1.2	Non renseignée	O ₃	compensation de la température	0-2 ppm	ppm	Electro-chimique	< 30s
Winsen	ZE12	V1.2	Non renseignée	CO	compensation de la température	0-12,5 ppm	ppm	Electro-chimique	< 30s
Winsen	ZE12	V1.2	Non renseignée	H ₂ S	compensation de la température	0-2 ppm	ppm	Electro-chimique	< 30s
Winsen	ZE12	V1.2	Non renseignée	SO2	compensation de la température	0-2 ppm	ppm	Electro-chimique	< 30s
Winsen	ZE12	V1.2	Non renseignée	NO2	compensation de la température	0-2 ppm	ppm	Electro-chimique	< 30s
Winsen	GM -602B	V1.1	Non renseignée	H ₂ S		0,5 - 50 ppm	ppm	Semi-conducteur	
Winsen	MH-410D	2.7	Non renseignée	CO ₂	compensation de la température	0-1% 0-3% 0-5%	VOL	Infra rouge	< 30s
Winsen	MH-410D	2.7	Non renseignée	CO ₂	compensation de la température	0-2000 ppm 0-6000 ppm	ppm	Infra rouge	< 30s

6. RETOUR D'EXPERIENCE DES AASQA SUR LA MISE EN ŒUVRE ET L'UTILISATION DES MICRO-CAPTEURS/SYSTEMES MICRO-CAPTEURS

Dans le cadre des réunions du GT « Micro-capteurs pour l'évaluation de la qualité de l'air », un état des lieux des travaux menés par les différentes AASQA a été fait. Certaines ont présenté les utilisations faites des micro-capteurs et leurs retours d'expérience figurent ci-après.

Les caractéristiques des micro-capteurs utilisés lors des travaux des AASQA sont accessibles dans le tableau ci-dessus.

6.1 Atmo AuRA

Le projet Mobicit'Air : https://www.atmo-auvergnerhonealpes.fr/sites/ra/files/atoms/files/atmo_mobicitair_dp_bat_def.pdf piloté par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes (ATMO AURA) entre 2015 et 2017, avec le soutien financier de la Métropole de Grenoble, de l'Etat et de la Région Auvergne-Rhône-Alpes, proposait d'étudier l'apport pour les citoyens des nouvelles technologies que sont les micro-capteurs et d'expérimenter leur utilisation en conditions réelles, avec une trentaine de grenoblois volontaires.

Le projet a consisté à équiper ces expérimentateurs, sélectionnés auprès de la métropole Grenobloise, de micro-capteurs notamment du type :

- e-PM d'EcologicSense https://www.atmoauvergnerhonealpes.fr/sites/ra/files/atoms/files/rapport_mobicitair_evaluation_des_micro-capteurs_tera.pdf),
- Greenbee de Azimut https://www.atmo-auvergnerhonealpes.fr/sites/ra/files/atoms/files/rapport_atmo_aura_azimut_microcapteurs_final_v2.pdf),
- Airbeam, afin de réaliser des mesures sur les paramètres particules (PM₁₀ et PM_{2,5}) dioxyde d'azote et ozone, chez eux, dans la ville, en mobilité ou pas, pendant une période allant de deux semaines à un mois et demi.

Cette étude a permis aux expérimentateurs de mieux appréhender différents phénomènes. Ainsi, certains d'entre eux ont pu se rendre compte - et accepter - que certaines pratiques quotidiennes pouvaient s'avérer très polluantes comme le brûlage des déchets végétaux, le chauffage au bois dans une cheminée ouverte ou encore l'utilisation de la voiture, en particulier en centre-ville.

La dimension sociologique de ce projet, avec l'appropriation de l'enjeu qualité de l'air, a permis à la population de « mieux comprendre la pollution », ce qui peut constituer un premier pas vers un changement de comportement éclairé.

Sur la base de ces conclusions, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes est en train de déployer à l'échelle régionale un service de mise à disposition de micro-capteurs dénommé « Captothèque », afin de permettre à chacun d'évaluer son exposition personnelle à la pollution et de contribuer à une observation collaborative de la qualité de l'air. Ce service, dont une version bêta devrait être disponible début 2019, constituera l'infrastructure technique pour plusieurs projets locaux avec des citoyens dans la région Auvergne-Rhône-Alpes.

De nombreux capteurs ont été testés (et continuent à l'être) pour constituer l'offre de micro-capteurs de la Captothèque.

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes est également partenaire du projet GreenZenTag (<http://www.smtc-grenoble.org/sites/default/files/files/dp-greenzentag-bilan-2017.pdf>) visant à réaliser des mesures embarquées de pollution en installant des micro-capteurs sur les toits de tramways et/ou de bus. Pour cette expérimentation, une première campagne de mesure, faite avec les micro-capteurs e-PM d'EcoLogicSense, a eu lieu entre décembre 2016 et février 2017.

Une deuxième expérimentation sera reconduite en 2018 au cours de la période hivernale. Si les résultats de cette étude sont concluants, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes pourrait inclure ces microcapteurs dans les outils de l'observatoire et apporter aux habitants et pouvoirs publics des photographies de la qualité de l'air géolocalisées en temps réel.

Les capteurs mobiles permettent, grâce à une meilleure couverture géographique et temporelle, de détecter des épisodes ponctuels de pollution ou localisés à des endroits précis, ce qui permet de compléter et d'affiner la cartographie modélisée à l'aide des données issues des stations fixes.

Les micro-capteurs sont également intégrés dans plusieurs études menées sur la Région :

- Suivi de chantiers à Annemasse,
- Suivi de travaux d'aménagement sur le quartier de la Société Publique Locale Part Dieu à Lyon,
- Suivi d'une modification de voirie sur l'A46.

6.2 Airparif

L'association de surveillance de la qualité de l'air en Ile de France (Airparif) est impliquée dans plusieurs projets notamment « voies sur berge » (https://www.airparif.asso.fr/_pdf/publications/Rapport_voiesurberges_rapportfinal_101117.pdf) et « Polluscope » (<http://www.agence-nationale-recherche.fr/?Projet=ANR-15-CE22-0018>).

Une quarantaine de systèmes micro-capteurs, de deux fournisseurs différents (Cairnet de chez Cairpol et GreenBee de chez Azimut Monitoring) qualifiés préalablement en laboratoire ont été utilisés dans le projet « voies sur berge » pour la mesure de particules fines PM₁₀ et PM_{2,5} et pour la mesure du NO₂. Ce projet qui a duré un an (août 2016 à juillet 2017) s'est déroulé en deux campagnes, une hivernale et une estivale. Le but était de voir l'impact sur la qualité de l'air de la décision de fermeture au trafic routier de 3,5 km de voies sur berge (voie Georges Pompidou).

Il ressort de cette expérimentation que malgré les avantages en termes de prix, de poids et de facilité de déploiement et d'installation, ces systèmes micro-capteurs ne peuvent pas être utilisés en l'état. En effet, la mesure de NO₂ doit être corrigée en continu, du fait des erreurs systématiques évoluant aléatoirement dans le temps.

Airparif participe également au projet de recherche « Polluscope », qui se déroule sur quatre ans (à compter de septembre 2016).

Le but de ce projet est de concevoir, développer et tester une plateforme de collecte, de gestion et d'analyse de données issues de capteurs environnementaux individuels et mobiles, afin d'améliorer la compréhension des effets sanitaires de la pollution atmosphérique.

La participation d'Airparif va consister, en complément des essais au SIRTa (Site Instrumental de Recherche par Télédétection Atmosphérique) à réaliser des tests de performance sur les micro-capteurs susceptibles d'être utilisés pour les mesures d'expositions individuelles, notamment sur les problématiques : autonomie, communication, données temps-réel ... La période 2016-2018 a consisté en l'étude comparative des capteurs et leur qualification, jusqu'à leur sélection pour le projet. Huit appareils ont été testés in situ et en chambre d'exposition afin de sélectionner ceux qui seront utilisés dans le cadre du projet Polluscope. A la suite de cette première sélection, cinq appareils ont été testés en mobilité, il en est ressorti trois appareils sélectionnés pour les campagnes, soit AETHLABS AE51 pour la mesure de black Carbon, le Cairsens pour la mesure du NO₂ et le Canarin pour la mesure des particules.

La seconde période comprend cinq campagnes de mesure, prévues entre 2018 et 2020, à savoir, une semaine en juin 2018, 6 semaines entre octobre et décembre 2018, 6 semaines entre mars et mai 2019, 6 semaines entre octobre et décembre 2019 et une campagne au printemps/été ou automne/hiver 2020.

AirParif a également participé sur l'année scolaire 2017/2018, avec trois académies franciliennes, la DRIEE, l'association « Monde pluriel » ainsi que l'INRA au projet « Lycéens, collégiens, prenons notre air en main ! ». Ce projet avait pour but de permettre aux élèves de comprendre l'origine de la pollution de l'air, son impact sur la santé et les enjeux territoriaux. Des micro-capteurs ont été mis à disposition de 800 lycéens et collégiens, afin de les sensibiliser à la qualité de l'air (intérieur et ambiant). Les mesures ont été effectuées d'octobre 2017 à avril 2018, à l'aide de 2 types de micro-capteurs : AirVisual Node (pour l'air intérieur) mesurant le CO₂, les PM_{2,5}, la température et l'humidité, et AirBeam (pour l'air intérieur et ambiant) mesurant les PM_{2,5}, la température et l'humidité.

Un kit pédagogique devrait être édité à l'automne 2018.

6.3 Atmo Grand-Est

L'association de surveillance de la qualité de la région Grand-Est (Atmo Grand-Est) pilote le projet Atmo-VISION qui s'intéresse à la provenance géographique de la pollution de l'air ainsi qu'à l'origine sectorielle et énergétique des sources de pollution. Ce projet transfrontalier a pour but d'améliorer la qualité de l'air sur ce territoire. Ce projet se déroulera sur 3 ans à partir de 2018.

Le projet prévoit notamment la réalisation de campagnes de mesures, le déploiement de micro-capteurs et des actions de sensibilisation.

Les micro-capteurs, utilisés dans des systèmes micro-capteurs, installés à des endroits stratégiques du territoire, non couverts par les sites fixes de référence nationaux, seront testés afin d'évaluer leur justesse et de mettre en œuvre les plus pertinents.

Le projet prévoit l'instrumentation de 2 tramways, dont un sur une ligne transfrontalière, la mise à disposition de la société civile de systèmes micro-capteurs, en cas de doute sur la qualité de l'air et l'équipement d'un panel de volontaires de micro-capteurs, reliés à une application téléphonique, utilisés lors de leurs déplacements (phase 2 du projet).

Préalablement à ce déploiement (phase 1 du projet micro-capteurs), des essais seront réalisés sur différents microcapteurs/mini-stations pour les qualifier : tests en mobilité, mesures comparatives avec analyseurs sur le terrain...

D'autres projets, impliquant l'utilisation de micro-capteurs, sont en cours de validation pour l'année 2018, tels que :

- Projet ville respirable, pour l'Eurométropole de Strasbourg : ce projet consiste à agir sur la régulation des feux de circulation en fonction de la pollution en utilisant des micro-capteurs pour les mesures des particules fines dans l'air.

ou au stade de discussion/validation, tels que :

- Projet lié aux odeurs à proximité d'une station d'épuration, le but étant de coupler en temps réel les activités de la station et les odeurs.
- Projet en agro-écologie avec l'utilisation de micro-capteurs pour mesurer l'ammoniac.

6.4 Air PACA

L'association de surveillance de la qualité en région Provence-Alpes-Côte d'Azur (Air PACA) a lancé en 2016 un projet « Micro-capteurs PM », qui consiste à mener des investigations, en laboratoire et sur le terrain, pour évaluer la faisabilité et la valeur ajoutée de l'utilisation de ce type d'équipements innovants dans le processus de cartographie des concentrations particulières dans l'air ambiant. Air PACA souhaite ainsi améliorer la justesse et la représentativité de ses cartographies, s'agissant de niveaux de pollution ou de l'exposition des populations.

La première phase de ce projet, dont le rapport a été publié en octobre 2016 (Exposition des populations à la pollution particulaire - Utilisation de micro-capteurs pour cartographier la pollution aux particules fines - Phase de validation), consiste en la validation métrologique des micro-capteurs PM utilisés. Dans le cadre de ce projet, Air PACA a testé 8 micro-capteurs e-PM du groupe TERA/EcologicSense, ces appareils mesurant les PM₁₀. La valeur des concentrations en PM_{2,5} est déterminée par calcul à l'aide de l'application d'un facteur d'ajustement.

Le projet « Equivalence PM » a permis de définir une méthodologie et de réaliser des essais pour évaluer la précision des moyens de mesure de la concentration massique des PM dans l'air ambiant.

Le projet s'est poursuivi en 2017 par une phase de déploiement de ces 8 micro-capteurs et une phase de cartographie de la pollution et d'exposition sur la Plaine du Var de la Métropole Nice Côte d'Azur.

L'objectif du projet étant d'évaluer la pertinence et la valeur ajoutée des micro-capteurs dans la réalisation de cartographie de pollution en particules fines, Air PACA est actuellement en train de produire les cartographies finales du projet.

6.5 QUALITAIR CORSE

Dix micro-capteurs AirMatrix pour mesurer la concentration particulaire ont été utilisés dans le cadre de la Journée Nationale de la Qualité de l’Air (septembre 2017) afin d’équiper des personnes de ces capteurs. Le but de ce projet était de sensibiliser le grand public lors de la journée de la mobilité à Bastia et pendant la fête de la science à l’île Rousse.

La proposition était faite aux passants de s’équiper d’un micro-capteur et de se promener dans la ville. Les déplacements et les concentrations mesurées par ces micro-capteurs étaient suivis à l’aide d’une connexion internet et d’un téléviseur.

Sur ces deux journées, les mesures étaient tout le temps dans la zone verte de l’échelle, même si les passants étaient exposés sur des axes routiers très fréquentés. Il était donc difficile avec cette expérimentation de mettre en évidence l’influence du trafic par exemple sur la qualité de l’air. Ces micro-capteurs sont cependant apparus comme étant des objets ludiques attirant les gens.

De plus, Qualitair Corse a réalisé l’évaluation de deux systèmes PM_{2,5} de MetOne (le NPM et le ES642). L’évaluation a consisté à comparer la réponse de 2 capteurs NPM et d’un capteur ES652 à des valeurs de référence obtenues à l’aide d’un TEOM-FDMS. Les mesures ont été réalisées du 12 avril au 28 juin 2017 sur le site de la Station de Bastia Montesoro (MON). Un rapport (Evaluation de micro-capteurs PM - NPM MET ONE - ES642 MET ONE) fait le bilan de cette évaluation.

6.6 Atmo Normandie

L’association de surveillance de la qualité en Normandie (ATMO Normandie) a utilisé des micro-capteurs (Tera e-NO₂ et e-PM) sur quelques points de régulation du trafic (feux de signalisation).

L’évaluation a été réalisée sur deux sites « Trafic » et « Fond urbain » entre le 13 septembre et le 13 décembre 2017. L’objectif de l’étude pilote organisée par CITEOS (groupe Vinci) était d’étudier l’impact de la régulation du trafic sur la qualité de l’air locale à l’échelle d’un quartier. Les mesures réalisées par les micro-capteurs ont été confrontées aux sorties de modélisation fine échelle (les données capteurs ne sont pas utilisées comme données d’entrée du modèle).

6.7 Atmo Occitanie

L’association de surveillance de la qualité en région Occitanie (Atmo Occitanie) souhaitait déterminer l’impact de la croissance de la végétation autour d’une autoroute. Pour cela, l’AASQA a mis en œuvre 16 micro-capteurs (8 ePM et 8 ENO₂, ELS). Malheureusement, le site a été victime de vandalisme sur les panneaux solaires et l’étude n’a pas abouti.

Atmo Occitanie prévoit une étude pour essayer de déterminer une corrélation entre le taux de CO₂ dans les voitures des tramways à Montpellier et le nombre de passagers, afin de connaître les heures d’affluence. Dans ce cadre, l’AASQA doit équiper l’intérieur des voitures des tramways de capteurs de CO₂.

7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette veille technologique effectuée sur les micro-capteurs a permis de réaliser un inventaire des micro-capteurs actuellement disponibles sur le marché ainsi que des techniques de mesure associées. Cet inventaire est aussi exhaustif que possible à ce jour compte tenu des avancées technologiques et mises sur le marché permanentes de nouveaux appareils. A date, une trentaine de fabricants proposent des solutions pour mesurer les principaux polluants réglementés (gaz et particules), parfois en complément de la mesure d'autres composés présents dans l'air (chlore, oxygène, ammoniac, etc.), dans des gammes de concentrations variables en fonction de l'application visée et pouvant même être très larges pour certains composés comme par exemple l'oxygène jusqu'à 25%.

Par ailleurs, cette veille technologique a permis de réaliser un premier état des lieux des utilisations faites des micro-capteurs, par les AASQA. Ainsi, des objectifs variables sont affichés en fonction des études recensées tels que la sensibilisation des citoyens, la recherche de sources d'émission, l'amélioration de la couverture spatiale et temporelle des mesures de polluants, etc.

La présente synthèse permet de répertorier les premiers éléments clés qu'un utilisateur de micro-capteurs doit intégrer dans sa réflexion afin de déterminer le ou les micro-capteur(s) qu'il convient d'utiliser pour son usage. Le Tableau 2 qui suit répertorie les différents objectifs qu'il est possible d'envisager pour des utilisations des micro-capteurs en fonction du domaine (air intérieur ou air ambiant) et du type d'usage (i.e. : mesures en site fixe, mesures mobiles ou mesures de l'exposition personnelle).

Tableau 2 : Objectifs envisagés pour des utilisations des micro-capteurs en fonction du domaine (qualité de l'air ambiant (a) ou qualité de l'air intérieur(b)) et du type d'usage

Domaine	Type d'usage	Objectifs de la mesure
QAA (a) QAI (b)	Fixe	Sensibilisation (a, b)
		Cartographie(a)
		Recherche de sources (a, b)
		Amélioration du taux de couverture temporelle/suivi dynamique (b)
		Couplage mesure-modèle (a)
		Evaluation de sortie de modèles (a)
	Mobile	Sensibilisation (a)
		Cartographie (a)
		Recherche de sources (a)
		Amélioration du taux de couverture spatiale (a)
		Amélioration du taux de couverture temporelle/suivi dynamique (a)
		Couplage mesure-modèle (a)
		Evaluation de sortie de modèles (a)
	Exposition individuelle	Sensibilisation (a, b)
		Cartographie (a)
		Recherche de sources (a, b)
		Amélioration du taux de couverture spatiale (a)
		Amélioration du taux de couverture temporelle/suivi dynamique (a, b)

Rappelons également que d'autres paramètres seront à prendre en compte lors du choix d'une solution micro-capteur : dimensions, autonomie, source d'énergie, portabilité, moyen d'acquisition des données, interface de visualisation des données, etc., ce qui a été mis en évidence lors du premier essai national d'aptitude des micro-capteurs (EAμC) pour la surveillance de la qualité de l'air mené par le LCSQA en 2018 (cf. <https://www.lcsqa.org/fr/rapport/premier-essai-national-daptitude-des-micro-capteurs-eamc-pour-la-surveillance-de-la-qualite>).

Dans la poursuite des travaux du LCSQA sur les micro-capteurs en 2018, il a été convenu de développer une base de données sur ces systèmes permettant aux acteurs du dispositif, un accès simplifié aux informations (mise en place de requêtes) et une mise à jour rapide de la veille technologique. En parallèle, des essais d'évaluation des performances des micro-capteurs engagés pour un usage réglementaire en site fixe seront poursuivis.

8. LISTE DES ANNEXES

Annexes	Titre
Annexe 1	Présentation du fichier Excel de recensement des différents micro-capteurs
Annexe 2	Références bibliographiques

ANNEXE 1

Fichier de recensement des micro-capteurs :

Le fichier est composé de quatre parties :

- Identification du contributeur du fichier,
- Informations relatives au micro-capteur,
- Retour d'expérience d'AASQA ou travaux menés en laboratoire sur l'évaluation métrologique,
- Retour d'expérience d'AASQA ou travaux menés en laboratoire sur l'utilisation terrain.

1. Identification du contributeur

Identification du contributeur au fichier		
Organisme	Contact	Date de saisie
LCSQA-IMT Lille Douai	S. Crunaire	01/12/2017
LCSQA-IMT Lille Douai	S. Crunaire	01/12/2017

Cette partie permet d'assurer une traçabilité sur le fichier afin d'identifier le contributeur au fichier qui peut être différent de la personne qui aura participé aux essais sur les micro-capteurs.

2. Informations relatives au micro-capteur

Dans cette partie, nous allons retrouver les informations générales relatives au micro-capteur.

Ces informations vont concerner :

✓ L'identification du système :

Identification du système										
Fabricant du système	Fournisseur du système (si différent du fabricant)	Référence du système	Version du système	Référence de l'élément sensible	Polluant(s) (et paramètres physiques le cas échéant)	Observations/Informations complémentaires	Gamme de mesures	Unité	Principe de mesure	Information complémentaire concernant le principe de mesure
EcologicSense	EcologicSense	GSM AQ Feel			PM2,5			µg/m3	Diffusion optique	
Shinyei		PPD42NS	??	PPD42NS	PM2,5		0-800	µg/m3	Diffusion optique	Avec LED + convection particules par chauffage

On liste dans cette partie, les informations liées aux fournisseurs et fabricants, la référence du système, afin d'identifier la version utilisée lors des tests métrologiques ou sur le terrain, le polluant mesuré, l'unité et le principe de mesure ainsi que des informations complémentaires que pourrait donner le fournisseur du système dans la documentation technique.

✓ Les caractéristiques générales du système :

+ Caractéristiques générales du système				
Dimensions (H x l x L en cm)	Poids (en kg)	Mode d'alimentation (batterie/secteur/solaire/autre)	Autonomie sur batterie (en h)	Prix d'achat pour la configuration testée (HT)/prêt matériel
16x16x6	0,8	Panneau solaire	168 h (avec périodicité de 30 minutes)	
2 x 5 x 5	0,02	secteur (5 V)	N/A	*10 \$

On retrouve dans cette partie des informations « physiques » du système. Les dimensions et poids vont permettre de valider que le système rentre dans la définition de micro-capteur ou système micro-capteur. En effet, le LCSQA s'est donné des critères maximum, afin d'assurer un encombrement suffisamment modeste, à savoir un volume maximal de 30x30x30 cm et un poids maximal de 2 kg (http://www.lcsqa.org/system/files/gt_ucapteur_nredon_protocole_evaluation_gaz.pdf).

On note également les informations relatives à l'alimentation, l'autonomie et le coût d'acquisition du système.

✓ L'acquisition, le traitement des données et le lien vers la documentation :

Acquisition et traitement des données							Lien vers la documentation technique sur la plateforme
Logiciel d'acquisition/traitement (oui/non)	Logiciel en local et/ou déporté (serveur)	Accès aux données brutes (oui/non)	Correction des données par le fabricant (oui/non)	Version du logiciel	Espace de stockage des données (oui/non)	Lieu de stockage des données	
Oui	Déporté			Soft*Air	Non	Cloud	https://partage.mines-telecom.fr/index.php/s/iKngUZHF8H6zbou/download?path=%2FA%20-%20Docs%20fournisseur%20ou%20distributeur%2FA1%20-%20Doc%20commerciale%20FPM&files=e-PM-AQFeel.pdf
Oui	Déporté	Oui	Non	??	Non	PC déporté	https://partage.mines-telecom.fr/index.php/s/iKngUZHF8H6zbou?path=%2FA%20-%20Docs%20fournisseur%20ou%20distributeur%2FA2%20-%20Donn%C3%A9es%20techniques%20FPM

Les informations notées dans cette partie concernent la récupération des données, avec l'utilisation ou non d'un logiciel et sa version. Cette information est importante, car le traitement des données peut être différent suivant les versions ; cependant, elle est peu présente dans les documentations techniques des fournisseurs. On trouve également des informations sur le type de données obtenues (brutes ou corrigées) et leur lieu de stockage, s'il existe.

Enfin la dernière colonne de cette partie concerne le lien vers la documentation technique disponible sur la plateforme de partage protégée du groupe de travail micro-capteurs : <https://partage.mines-telecom.fr/index.php/s/iKngUZHF8H6zbou/authenticate>. Ceci permet de s'assurer qu'il n'y a pas de différence de versioning avec la documentation au moment où le fichier de recensement a été complété.

- ✓ Le lien avec les essais réalisés par l'AASQA ou le laboratoire :

Objectif du projet	Qui a testé et/ ou utilisé ? (si différent de celui qui saisit le fichier)		Suite à l'étude réalisée, achèteriez-vous le système ? (oui/non)
	Nom de l'organisme	Contact (nom, e-mail et téléphone)	
Evaluation métrologique (cf. colonnes AG à AT) et/ou utilisation terrain (cf. colonnes AV à BH)			
Evaluation métrologique	Air PACA	Thomas ALEIXO	
Evaluation métrologique	University of Washington - Seattle - USA	Elena Austin - elAustin@uw.edu	

Cette dernière partie relative aux informations sur le micro-capteur concerne l'objet du test, à savoir l'évaluation métrologique ou les essais terrain, l'organisme concerné par ces tests et les coordonnées du contact de l'organisme et enfin un avis lié à l'utilisation du système testé.

En fonction de l'objectif du test, le contributeur devra compléter la 3^{ème} et/ou la quatrième partie du fichier.

3. Retour d'expérience d'AASQA ou travaux menés en laboratoire sur l'évaluation métrologique

Cette partie, remplie par l'AASQA ou le laboratoire ayant réalisé les essais, est renseignée dans le cas où les objectifs du test, précisés dans la partie précédente du fichier, concernent l'évaluation métrologique.

✓ Les conditions d'essai :

Evaluation métrologique								
Objectif (CIL/comparaison avec la méthode de référence/reproductibilité des µcapteurs/facteurs d'influence/détermination des performances/autre ...)	lien vers le rapport d'étude disponible sur la plateforme	Conditions de tests						
		Utilisation en intérieur et/ou extérieur	Si intérieur, quel type d'environnement et quelle occupation (hall de gare, bureau, intérieur habitat ..., nombre de personnes)	Typologie de site extérieur (rural/trafic/urbain/péri-urbain/industriel/agricole)	Matrice Synthétique ou matrice réelle	Date de début des tests (année/mois/jour)	Date de fin des tests (année/mois/jour)	Méthode de référence utilisée en parallèle (gravimétrie sur filtre/ analyseur automatique/pas de méthode de référence)
Reproductibilité	https://partage.mines-telecom.fr/index.php/s/ikNgUZHf8H6zbou?path=%2FB%20-%20Evaluation%20de%20performances%2FB%20-%20test%20laboratoire%2C%20comparaison%20terrain%20FPM&files=2016_bilan_intermediaire_projet_	Extérieur			Matrice réelle	2016/04/30	2016/05/29	
Evaluation de performances en laboratoire	https://partage.mines-telecom.fr/index.php/s/ikNgUZHf8H6zbou?path=%2FB%20-%20Evaluation%20de%20performances%2FB%20-%20test%20laboratoire%2C%20comparaison%20terrain%20FPM	Intérieur	Laboratoire		Matrice synthétique	Non précisée	Non précisée	Compagme particules taille 0,5-20 µm par granulomètre laser TSI - Modèle 3321 Matrice synthétique : billes polystyrène différents diamètres monodispersés (0,75 ; 1 ; 2 ; 3 ; 6 µm) + polydispersés (ASHRAE test dust #1, 72% ISO 12103-1, A2 Fine Test Dust, 73% powdered carbon and 5% milled cotton linters) Conversion en masse par facteur de densité

Cette première partie relative à l'évaluation métrologique comporte plusieurs informations.

La première est liée à l'objectif de l'évaluation qui peut être lié à la participation à une CIL, à une comparaison à une méthode de référence, à des essais de reproductibilité de plusieurs micro-capteurs, à l'évaluation des facteurs d'influence sur la réponse des capteurs, à la détermination des performances du micro-capteurs ou à d'autres cas.

La référence du rapport d'étude relatif à ces tests ou le lien vers la plateforme d'échange sont notés dans la colonne suivante. Dans le cas de publications qui ne sont pas en "open-source", le lien vers la publication ne peut pas être fait, seule la référence du document ou sa référence « DOI¹ » sera notée.

Les colonnes suivantes reprennent les conditions des essais. On va retrouver les informations relatives au lieu (indoor/outdoor), la typologie du site environnant (rural, urbain, industriel ...), la période des essais et la matrice de gaz utilisée pour les tests. Enfin, sur cette partie, la méthode de référence utilisée pour les essais métrologiques sera mentionnée.

La méthode de référence peut être complétée par d'autres paramètres qui pourraient interférer sur les résultats tels que les conditions ambiantes.

¹DOI : « Digital object identifier ». Numéro d'identification de ressources en ligne qui permet notamment une identification pérenne et de retrouver l'emplacement d'un document en ligne si son URL a changé.

✓ Les résultats de l'évaluation métrologique :

Résultats synthétiques						
Equation de la droite de corrélation ($y=ax+b$) et R^2	Limites de détection/de quantification	Unité	Temps de réponse (en seconde)	Répétabilité	reproductibilité	Autres commentaires (étendue des concentrations, calcul en Z-score, utilisation d'équivalence)
					Reproductibilité moyenne de 6 μC (2 à 2 - données 24h) = 93%	calculs d'incertitudes menés à partir de la fiche du RIVM (comme suivi d'équivalence)
De 0 à 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$: linéaire --> Données sur particules ASHRAE : capteur 1 : $y = (5,40 \pm 0,03)x - R^2 = 0,97$ capteur 2 : $y = (8,15 \pm 0,04)x - R^2 = 0,97$ De 50 à 800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$: non-linéaire Supérieure à 800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$: saturation	LOD < 1	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	60 - 240 (100-0 %)	Répétabilité sur 20 capteurs / Billes 2 μm monodispersées / Après calibration / Gamme 0-50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ = 91%		

Dans cette partie du fichier, on va retrouver les résultats synthétiques des tests métrologiques réalisés par l'AASQA ou le laboratoire, avec l'équation de la droite de corrélation et le R^2 associé, les informations liées à la répétabilité et à la reproductibilité des tests, la limite de détection, l'unité et le temps de réponse du système ainsi qu'une colonne « commentaires » permettant de donner des précisions sur la méthode de calcul d'incertitude ou le calcul du Z-score ou encore l'utilisation de méthodes d'équivalence décrites dans la bibliographie.

4. Retour d'expérience d'AASQA ou travaux menés en laboratoire sur l'utilisation terrain

Cette partie, remplie par l'AASQA ou le laboratoire ayant réalisé les essais, est renseignée dans le cas où les objectifs du test, précisés dans la partie précédente du fichier, concernent les essais sur le terrain.

✓ Les conditions d'essai :

Utilisation terrain						
Objectif (recherche de source/cartographie par interpolation/évaluation sortie de modèle/couplage modèle-mesure/amélioration de la couverture du	lien vers le rapport d'étude disponible sur la plateforme	Conditions terrain				
		intérieur et/ou extérieur	Si intérieur, quel type d'environnement	Fixe et/ou exposition personnelle et/ou embarqué en véhicule	Typologie de site (rural/trafic/urbain /péri-urbain/industriel/autre: exemple agricole)	Date de début des mesures (année/mois/jour)

Par rapport à l'évaluation métrologique, dans cette partie-là, la matrice utilisée n'est plus indiquée, s'agissant d'essais terrain. Une précision est donnée concernant l'utilisation des capteurs lors des essais à savoir s'il s'agit d'une mesure fixe ou mobile.

- ✓ Les résultats de l'évaluation métrologique :

Traitement des acquisitions			Résultats synthétiques	
Traitement (temps réel/ différé)	Type d'agrégation pour l'exploitation (moyenne horaire/ journalière/ mensuelle ...)	Détail du traitement (automatique, validation a posteriori, corrections ...)	Informations obtenues répondent aux objectifs (oui/non)	Commentaires additionnels
				

Cette dernière partie sur les essais « terrain » donne des informations sur le traitement des données telles que la récupération des données en temps réel ou en différé, le traitement automatique ou non des données et le type d'informations récupérées (moyenne horaire, journalière, mensuelle...).

L'AASQA ou le laboratoire ayant réalisé les tests indiquera si les résultats sont conformes aux attentes et pourra faire quelques commentaires complémentaires.

Références bibliographiques :

De nombreuses références bibliographiques ont été trouvées sur le sujet des micro-capteurs, dont une trentaine depuis le début des années 2000. On y retrouve des articles publiés par des équipes françaises ainsi que des informations sur des travaux européens ou internationaux.

Le tableau de références ci-dessous, donne l'ensemble des articles trouvés lors de la recherche bibliographique, traitant sur des évaluations métrologiques de micro-capteurs ou des utilisations terrains de ces instruments.

Sur la période 2016-2017, plus de 20 publications ont été recensées, ce qui montre l'intérêt grandissant pour ces nouvelles technologies.

AUTEURS	Pays	TITRE	REVUE	année
Atmo Auvergne-Rhône-Alpes	France	Atmo Auvergne-Rhône-Alpes & Azimut Monitoring (2016) Evaluation des micro-capteurs Greenbee	/	2017
Laurent Spinelle, Michel Gerboles, Manuel Aleixandre	European commission	Report of laboratory and in-situ validation of micro-sensor for monitoring ambient air pollution NO9: CairClipNO2 of CAIRPOL (F)	JRC Technical report	2013
Laurent Spinelle, Michel Gerboles, Manuel Aleixandre	European commission	Report of laboratory and in-situ validation of micro-sensor for monitoring ambient air pollution Ozone micro-sensor, Sense, model B4-O3 sensor	JRC Technical report	2014
Michele Penza, Domenico Suriano, Gennaro Cassano, Valerio Pfister, Martino Amodio, Livia Trizio, Magda Brattoli, Gianluigi De Gennaro	Italie	A case-study of microensors for landfill air-pollution monitoring applications	Urban Climate	2014
Laurent Spinelle, Michel Gerboles, Maria Gabriella Villani, Manuel Aleixandre, Fausto Bonavitacola	Italie, Espagne, Suisse	Field calibration of a cluster of low-cost available sensors for airquality monitoring. Part A: Ozone and nitrogen dioxide	Sensors and Actuators B: Chemical	2015
Laurent Spinelle, Michel Gerboles, Maria Gabriella Villani, Manuel Aleixandre, Fausto Bonavitacola	Italie, Espagne, Suisse	Field calibration of a cluster of low-cost commercially availablesensors for air quality monitoring. Part B: NO, CO and CO2	Sensors and Actuators B: Chemical	2016
Aakash C. Rai, Prashant Kumar, Francesco Pilla, Andreas N. Skouloudis, Silvana Di Sabatino, Carlo Ratti, Ansar Yasar, David Rickerby	Royaume Uni, Italie, Etats Unis, Irlande, Belgique	End-user perspective of low-cost sensors for outdoor air pollution monitoring	Science of the Total Environment	2017
L Spinelle, M Gerboles, A Kotsev, M Signorini	European commission	Evaluation of low-cost sensors for air pollution monitoring Effect of gaseous interfering compounds and meteorological conditions	JRC Technical report	2017

AUTEURS	Pays	TITRE	REVUE	année
Philipp Schneider, Nuria Castell, Matthias Vogt, Franck R. Dauge, William A. Lahoz, Alena Bartonova	Norvège	Mapping urban air quality in near real-time using observations from low-cost sensors and model information	Environment International	2017
I. ZDANEVITCH	France	Utilisation de microcapteurs LCSQA Convention 31/2001	INERIS	2002
Stephen Feinberg, Ronald Williams, Gayle Hagler, Joshua Rickard, Ryan Brown, Daniel Garver, Greg Harshfield, Phillip Stauffer, Erick Mattson, Robert Judge, Sam Garvey	USA	CAIRSENSE Study: Real-world evaluation of low cost sensors in Denver, Colorado	EPA Office of Research and Development	2016
Michael Jerrett, David Donaire-Gonzalez, Olalekan Popoola, Roderic Jones, Ronald C. Cohen, Estela Almanza, Audrey de Nazelle, Iq Mead, Glòria Carrasco-Turigas, Tom Cole-Hunter, Margarita Triguero-Mas, Edmund Seto, Mark Nieuwenhuijsen	USA, Espagne, Royaume Uni	Validating novel air pollution sensors to improve exposure estimates for epidemiological analyses and citizen science	Environmental Research	2014
Kira Sadighi, Evan Coffey, Andrea Polidori, Brandon Feenstra, Qin Lv, Daven K. Henze, Michael Hannigan	USA	Intra-urban spatial variability of surface ozone in Riverside, CA: viability and validation of low-cost sensors	Atmospheric Measurement Techniques	2018
Peng Wei, Zhi Ning, Sheng Ye, Li Sun, Fenhuan Yang, Ka Chun Wong, Dane Westerdahl, Peter K. K. Louie	Chine	Impact analysis of Temperature and Humidity conditions on electrochemical sensor response in ambient Air Quality monitoring	MPDI	2018
Alastair C. Lewis, James D. Lee, Peter M. Edwards, Marvin D. Shaw, Mat J. Evans, Sarah J. Moller, Katie R. Smith, Jack W. Buckley, Matthew Ellis, Stefan R. Gillot, Andrew White	Royaume Uni	Evaluating the performance of low cost chemical sensors for air pollution research	The Royal Society of Chemistry	2016

AUTEURS	Pays	TITRE	REVUE	année
Philipp Schneider, Nuria Castell, Matthias Vogt, Franck R. Dauge, William A. Lahoz, Alena Bartonova	Norvège	Mapping urban air quality in near real-time using observations from lowcost sensors and model information	Environment International	2017
I. ZDANEVITCH	France	Utilisation de microcapteurs LCSQA Convention 31/2001	INERIS	2002
Stephen Feinberg, Ronald Williams, Gayle Hagler, Joshua Rickard, Ryan Brown, Daniel Garver, Greg Harshfield, Phillip Stauffer, Erick Mattson, Robert Judge, Sam Garvey	USA	CAIRSENSE Study: Real-world evaluation of low cost sensors in Denver, Colorado	EPA Office of Research and Development	2016
Michael Jerrett, David Donaire-Gonzalez, Olalekan Popoola, Roderic Jones, Ronald C. Cohen, Estela Almanza, Audrey de Nazelle, Iq Mead, Glòria Carrasco-Turigas, Tom Cole-Hunter, Margarita Triguero-Mas, Edmund Seto, Mark Nieuwenhuijsen	USA, Espagne, Royaume Uni	Validating novel air pollution sensors to improve exposure estimates for epidemiological analyses and citizen science	Environmental Research	2014
Kira Sadighi, Evan Coffey, Andrea Polidori, Brandon Feenstra, Qin Lv, Daven K. Henze, Michael Hannigan	USA	Intra-urban spatial variability of surface ozone in Riverside, CA: viability and validation of low-cost sensors	Atmospheric Measurement Techniques	2018
Peng Wei, Zhi Ning, Sheng Ye, Li Sun, Fenhuan Yang, Ka Chun Wong, Dane Westerdahl, Peter K. K. Louie	Chine	Impact analysis of Temperature and Humidity conditions on electrochemical sensor response in ambient Air Quality monitoring	MPDI	2018
Alastair C. Lewis, James D. Lee, Peter M. Edwards, Marvin D. Shaw, Mat J. Evans, Sarah J. Moller, Katie R. Smith, Jack W. Buckley, Matthew Ellis, Stefan R. Gillot, Andrew White	Royaume Uni	Evaluating the performance of low cost chemical sensors for air pollution research	The Royal Society of Chemistry	2016

AUTEURS	Pays	TITRE	REVUE	annee
Qualitair Corse	France	Evaluation micro-capteurs PM NPM MET ONE ES642 MET ONE	/	2016
Claire Kaiser	France	Mesures des particules dans les enceintes ferrovières souterraines de la RATO : Comparatif TEOM - Microcapteurs	/	2017
K.E. Kelly, J. Whitaker, A. Petty, C. Widmer, A. Dybwad, D. Sleeth, R. Martin, A. Butterfield	USA	Ambient and laboratory evaluation of a low-cost particulate matter sensor	Environmental Pollution	2017
Jingjin Shi, Fei'er Chen, Yunfei Cai, Shichen Fan, Jing Cai, Renjie Chen, Haidong Kan, Yihan Lu, Zhuohui Zhao	Chine, USA	Validation of a light-scattering PM2.5 sensor monitor based on the long-term gravimetric measurements in field tests	PLOS ONE	2017
Leigh R. Crilley, Marvin Shaw, Ryan Pound, Louisa J. Kramer, Robin Price, Stuart Young, Alastair C. Lewis, Francis D. Pope	Royaume Uni	Evaluation of a low-cost optical particle counter (Alphasense OPC-N2) for ambient air monitoring	Atmospheric Measurement Techniques	2018
Toby Hanna, P.E., Leonard Bielory, M.D., Richard E. Opiekun, M.A., M.S., Ph.D.	USA	What Can Be Learned from Low Cost Air Quality Monitors Best Uses and the Current State of Technology	New Jersey Clean Air Council Website	2017
Alastair C Lewis, Christoph Zellweger, Martin G Schultz, Oksana A Tarasova and Reactive, Gases Science Advisory Group, GAW	Rouayme Uni, Suisse, Allemagne	Technical advice note on lower cost air pollution sensors	WMO	2017
Wan Jiao, Gayle Hagler, Ronald Williams, Robert Sharpe, Ryan Brown, Daniel Garver, Robert Judge, Motria Caudill, Joshua Rickard, Michael Davis, Lewis Weinstock, Susan Zimmer-Dauphinee, and Ken Buckley	USA	Community Air Sensor Network (CAIRSENSE) project: evaluation of low-cost sensor performance in a suburban environment in the southeastern United States	Atmospheric Measurement Techniques	2016



direction et secrétariat du LCSQA

INERIS - parc technologique Alata - BP 2 - F60550 Verneuil-en-Halatte
tél. 03 44 55 64 04 - www.lcsqa.org