

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

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

Muriel Fernandes (LCSQA-LNE)

Octobre 2019



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	8
2. OBJECTIF.....	10
3. DEFINITIONS	10
3.1 Elément sensible	10
3.2 Capteur.....	11
3.3 Système multi-capteurs	11
4. DESCRIPTION DES PRINCIPALES TECHNIQUES DE MESURE UTILISEES POUR LES ELEMENTS SENSIBLES INTEGRES DANS LES CAPTEURS	12
4.1 Elément sensible de type électrochimique	12
4.2 Elément sensible de type PID (détecteur à photo-ionisation).....	13
4.3 Elément sensible de type semi-conducteur.....	14
4.4 Elément sensible optique utilisé pour la mesure de particules.....	15
4.5 Elément sensible optique utilisé pour la mesure des polluants gazeux.....	16
5. SYNTHESE DES CAPTEURS COMMERCIAUX ACTUELLEMENT DISPONIBLES SUR LE MARCHE	18
5.1 Focus sur les PM.....	19
5.2 Focus sur les composés gazeux.....	20
6. RETOUR D'EXPERIENCE DES AASQA SUR LE DEPLOIEMENT DES CAPTEURS	24
6.1 Atmo Auvergne-Rhône-Alpes.....	24
6.2 Airparif.....	25
6.3 Atmo Grand-Est.....	27
6.4 ATMO Sud.....	27
6.5 QUALITAIR CORSE	28
6.6 Atmo Normandie.....	28
6.7 Atmo Occitanie.....	29
7. RECENSEMENT DES ESSAIS D'EVALUATION REALISES SUR LES CAPTEURS EN LABORATOIRE OU SUR SITE.....	29
7.1 Fonction de linéarité	30
7.2 Coefficient de régression	30
7.3 Fiabilité.....	33
8. PRESENTATION DE L'OUTIL CAPT'AIR	34
9. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	36

10. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	38
ANNEXE 1 - SYNTHÈSE DES CAPTEURS COMMERCIAUX ACTUELLEMENT DISPONIBLES SUR LE MARCHÉ	42
ANNEXE 2 – RECENSEMENT NON EXHAUSTIF DES ESSAIS MENÉS PAR DES LABORATOIRES ET RESULTATS OBTENUS	52

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

Pour répondre à cette pression citoyenne et ce besoin d'accéder à l'information rapidement, une multitude de capteurs à coût réduit, pour certains couplés à des smartphones, ont été développés et mis sur le marché : ils permettent un recueil collaboratif des données et une démultiplication des observations afin de pouvoir réaliser un diagnostic rapide de la qualité environnementale. Certains de ces capteurs se sont largement développés et ont été mis en œuvre par les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) afin d'étudier l'évolution des mesures de concentrations en polluants avec une fréquence de mesure élevée pour évaluer l'exposition humaine ainsi que les tendances à court et moyen termes.

Compte tenu des avancées technologiques et mises sur le marché permanentes de nouveaux appareils, ce rapport présente une synthèse de la veille technologique effectuée sur les capteurs disponibles sur le marché à fin octobre 2018. Il présente un inventaire aussi exhaustif que possible des capteurs ainsi que des techniques mises en œuvre, des résultats d'essais d'évaluation de leurs performances et un premier recensement des utilisations de ces 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 quelles caractéristiques un capteur devrait satisfaire pour répondre à une série d'usages prédéfinis.

Dans la poursuite des travaux du LCSQA sur les capteurs, il a été convenu de développer une base de données sur les capteurs (CAPT'AIR) afin de permettre, pour les acteurs du dispositif national de surveillance de la qualité de l'air, un accès simplifié (mise en place de requêtes) aux informations techniques et aux usages (caractéristiques techniques, retours d'expérience, essais métrologiques, évaluation sur le terrain, etc.) ainsi qu'une mise à jour rapide de la veille technologique.

Le but ultime d'un tel outil est de pouvoir identifier simplement quel capteur ou quel type de capteur serait le mieux adapté à un usage donné.

1. INTRODUCTION

Un sondage mené en 2017 par l'IRSN (Baromètre IRSN - La perception des risques et de la sécurité par les Français – Juillet 2017), sur le sujet d'actualité le plus préoccupant pour les Français, indique que les deux préoccupations majeures sont le réchauffement climatique et la pollution de l'air.

Le réchauffement climatique est le plus souvent cité : 42 % des personnes interrogées le mentionnent comme le problème d'environnement le plus préoccupant. Cependant, les réponses portant sur ce problème reculent par rapport à 2016, et de manière significative (- 6 points) ; ceci pourrait s'expliquer par le fait que les travaux de la COP21 menés en 2016 s'estompent des mémoires et que le réchauffement climatique occupe moins les esprits.

Le deuxième sujet de préoccupation, presque autant cité que le réchauffement climatique, est la pollution de l'air, avec un score de 41 %, qui est le plus haut jamais enregistré. L'an passé, ce score avait déjà augmenté de 4 points, probablement en lien avec l'affaire du « dieselgate ». Cette année, il continue à progresser 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.

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 (cf. <https://www.lcsqa.org/fr>), le ministère de la Transition écologique et solidaire (MTES), les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) et le consortium PREV'AIR.

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 sont actuellement sur le marché pour des coûts modérés, permettant 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 le déploiement des capteurs).

De nombreuses applications de ces 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 (ambiant, 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 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 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 « 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 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 des membres des trois organismes du LCSQA (IMT Lille Douai, INERIS, LNE), du Bureau de la Qualité de l'air (Ministère en charge de l'Environnement) 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 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 capteurs capables d'être utilisés pour les mesures de polluants réglementés (O_3 , NO_2 , CO , SO_2 , $PM_{2.5}$, PM_{10}) et de polluants émergents (ex. : PM_1 , NH_3 , H_2S , COV , ...).

Cet inventaire **arrêté à fin octobre 2018** est basé sur une première exploitation de documents français et européens (cf. paragraphe 10 sur les 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 capteurs commercialisées ou dont le développement est avancé (à forte potentialité d'utilisation),
- d'élaborer une liste comparative sur des critères prédéfinis tels que les méthodes de mesure, les gammes de mesure, etc,
- de recenser des essais d'évaluation réalisés sur les capteurs en laboratoire ou sur site,
- de disposer d'un premier retour d'expérience des AASQA sur le déploiement des capteurs.

3. DEFINITIONS

3.1 Élément sensible

L'**élément sensible** parfois aussi appelé « sensor » 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 polluant recherché dans le milieu. Ces éléments sensibles, 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 encore des détecteur par photo-ionisation (PID). Trois exemples d'éléments sensibles 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 : Capteur à semi-conducteurs

Source :

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

TGS8100



Figure 3 : Capteur optique (diffusion lumineuse)

Source :

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

3.2 Capteur

Le **capteur** souvent aussi appelé « micro-capteur » est un système intégrant un élément sensible et fournissant des résultats en concentration pour un polluant donné ou une famille de polluant. La figure 4 illustre un exemple de capteur.

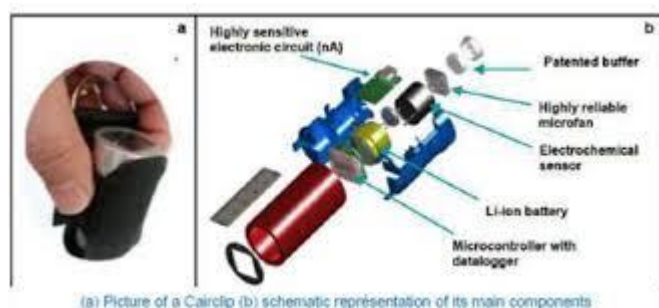


Figure 2 : Capteur « CairClip » de Envea-Cairpol

Source :

https://www.google.com/search?q=cairclip+sensor&safe=strict&sxsrf=ACYBGNRWJ9aAPMb8KxJGRiv1NqeCQvtE6g:1569827865989&source=lnms&tbn=sch&sa=X&ved=0ahUKEwiP673CgPjAhVSxoUKHajjD-4Q_AUIFCgD&biw=1164&bih=568#

3.3 Système multi-capteurs

Un **système multi-capteurs** aussi appelé parfois « mini-station » est un dispositif conçu par des fabricants (intégrateurs) qui assemblent un ou plusieurs éléments sensibles et/ou capteurs à d'autres composants mécaniques et/ou électriques et/ou électroniques nécessaires pour créer un système de détection entièrement fonctionnel et autonome destiné à réaliser des mesures de concentrations d'un ou plusieurs polluants (ou famille de polluants). Ces fabricants (intégrateurs) développent souvent des algorithmes afin de corriger les données délivrées par les éléments sensibles ou les capteurs. Les systèmes multi-capteurs permettent généralement d'évaluer plusieurs paramètres physico-chimiques en simultanément (ex. : concentrations en polluants, température, humidité relative, etc.). Un exemple de système multi-capteurs est illustré sur la figure 5.

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



Figure 3 : Système multi-capteurs « ECOMSMART » d'Ecomesure

Source : <https://ecomasure.com/fr/systemes-connectes/ecosmart>

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

De même, les unités utilisées pour exprimer les concentrations peuvent se présenter sous différents formats avec les correspondances suivantes dans la suite du document :

1 ppm = 1 μ mol/mol

1 ppb = 1 nmol/mol

4. DESCRIPTION DES PRINCIPALES TECHNIQUES DE MESURE UTILISEES POUR LES ELEMENTS SENSIBLES INTEGRES DANS LES CAPTEURS

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

Les principales technologies utilisées actuellement pour les éléments sensibles sont décrites ci-après.

4.1 Élément sensible de type électrochimique

Ces éléments sensibles sont généralement utilisés pour les capteurs qui mesurent la teneur de l'air ambiant en NO, NO₂, SO₂, O₃ ou CO. Les concentrations mesurables avec ces capteurs sont comprises dans la gamme [1 – 1000] μ mol/mol en fonction du gaz et de l'électrolyte utilisé.

Les éléments sensibles de type électrochimique 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 molécules de plus grand poids moléculaire. L'électrolyte est utilisé pour générer le courant par réaction électrochimique et permet d'ajuster la sensibilité du capteur.

Lorsque l'élément sensible 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 élément sensible 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 (élément sensible ampérométrique), soit une variation de tension (élément sensible potentiométrique), soit encore une variation de conductivité (élément sensible 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 polluant dans l'air.

Les capteurs intégrant ce type d'élément sensible ont les avantages de présenter une bonne sensibilité* (allant 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 capteurs intégrant un élément sensible de type électrochimique sont fortement influencés par les conditions ambiantes (pression, humidité et température). Ils peuvent subir des interférences chimiques en présence de molécules de même nature que 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 Élément sensible de type PID (détecteur à photo-ionisation)

Les éléments sensibles de type PID sont exclusivement dédiés à la mesure de certains 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 capteurs, des énergies de lampe à 9,8, 10,6 ou 11,7 eV sont utilisées. La lampe du détecteur est choisie en fonction du gaz à mesurer. Les éléments sensibles de type 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)). Mais, ils ne permettent pas la détection de certaines molécules présentant une énergie d'ionisation supérieure à 11,7 eV (ex. : méthane, oxygène, azote, ozone...).

La gamme de mesure des capteurs intégrant des éléments sensibles de type PID permet de quantifier des substances avec des concentrations comprises entre 0 et 1000 $\mu\text{mol/mol}$.

Les éléments sensibles de type 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.

La présence de composés détectables dans de très fortes concentrations peut également entraîner une contamination de l'élément sensible 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 ($\text{HR} > 70\%$), 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 Élément sensible de type semi-conducteur

Les éléments sensibles de type semi-conducteur 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 6).

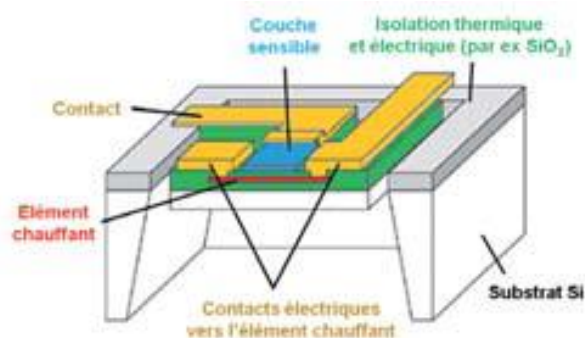


Figure 4 : Schéma d'un élément sensible de type semi-conducteur

La principale limite de ces éléments sensibles est d'être non sélectifs. De nombreux composés gazeux vont induire une réponse 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 Élément sensible optique utilisé 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'aboutir aux informations concernant la concentration en nombre et la taille des particules. Chaque particule contenue dans l'air et passant devant le faisceau lumineux diffuse une partie de ce faisceau vers le capteur positionné selon un angle défini (cf. Figure 7). 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 des capteurs optiques pour les mesures de particules est largement inférieur au prix des technologies de laboratoire. De plus, ces capteurs 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.

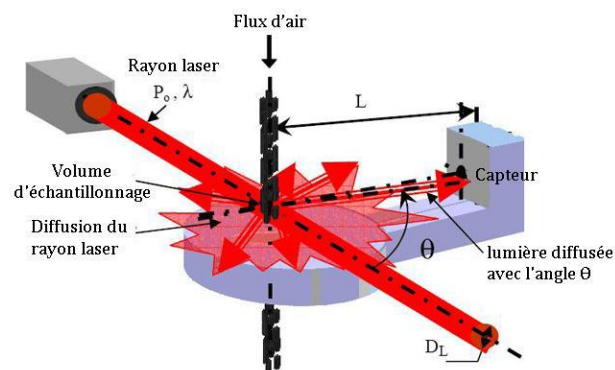


Figure 5 : Principe d'un élément sensible optique utilisé pour la mesure de particules (Source : <http://nanosense.com/index.php/produits/sonde-particules-fines-p4000/>)

4.5 Élément sensible optique utilisé pour la mesure des polluants gazeux

Pour les polluants gazeux, c'est le principe de la spectroscopie d'absorption qui est utilisé dans les éléments sensibles optiques pour 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 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).

4.6 Synthèse des principales technologies utilisées pour les éléments sensibles

Les principales technologies utilisées actuellement pour les éléments sensibles sont résumées dans le tableau ci-après.

Tableau 1 : Récapitulatif des différentes technologies utilisées actuellement pour les éléments sensibles

Technologie	Composés mesurés	Gamme de mesure	Avantages	Inconvénients
Electrochimie	NO, NO ₂ , SO ₂ , O ₃ , CO	1 – 1000 µmol/mol	Bonne sensibilité (µg/m ³ au mg/m ³) Temps de réponse assez rapide (30 à 200 s) Faible consommation électrique Bonne autonomie	Réponses Influencées par les conditions ambiantes (pression, humidité et température) Réponses influencées par les interférents chimiques Durée de vie limitée à 1 ou 2 ans Risque de saturation et difficultés de retour à zéro en cas de fortes concentrations
PID (détecteur à photo-ionisation)	Composés inorganiques (ammoniac, chlore) Composés organiques (aromatiques, cétones, aldéhydes, amines, amides, composés contenant du soufre, hydrures (phosphine))	0-1000 µmol/mol	Bonne sensibilité augmentant avec le nombre d'atomes de carbone de la molécule Temps de réponse rapide (quelques secondes) Détection simultanée mais de façon non spécifique de plusieurs composés	Contamination de l'élément sensible en cas de fortes concentrations Dépôt de particules sur les électrodes en cas de pollution particulaire Sensibilité à l'humidité (HR>70%) Dérive de la réponse dans le temps
Semi-conducteur	NO ₂ , O ₃ , CO	0-1000 µmol/mol	Faible coût Faible consommation d'énergie Temps de réponse rapide	Non sélectif Instabilité à long terme

Technologie	Composés mesurés	Gamme de mesure	Avantages	Inconvénients
Mesure optique	Particules	-	Temps de réponse rapide (de l'ordre de la seconde)	Limites de détection/quantification faibles, mais qui ont tendance à augmenter dans le temps à cause de l'encrassement Conversion des concentrations en nombre de particules en concentrations massiques basée sur un modèle théorique Signal dépendant de plusieurs paramètres (forme de la particule, couleur, densité, humidité, index de réfraction...)
Mesure optique	CO, CO ₂	CO ₂ : 350 – 2000 µmol/mol	Bonne sensibilité Temps de réponse rapide (de 20 à 120 s) Faible dérive dans le temps	Sensibles aux conditions ambiantes (température, humidité et pression)

5. SYNTHÈSE DES CAPTEURS 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 capteurs. Cet inventaire est ici arrêté à fin octobre 2018 et il a été effectué en exploitant une trentaine de documents référencés au paragraphe 10 et en consultant les sites web des fabricants.

Il permet de distinguer deux grandes classes de 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'Ecomesure ou encore GreenBee de Hägerservices environment, destinés à être installés à un endroit fixe afin de renseigner la pollution d'un environnement particulier.

Le tableau en annexe 1 présente les fournisseurs identifiés et le nombre de capteurs commerciaux qu'ils proposent sur le marché.

Ce tableau fait état de 30 fabricants ou fournisseurs de capteurs différents, avec chacun leurs spécificités.

Les capteurs proposés permettent de mesurer les concentrations des polluants gazeux et des particules, mais également d'autres paramètres tels que les paramètres physiques (bruit, température, hygrométrie, pression).

On remarquera que c'est pour la mesure des particules que le nombre de capteurs est prépondérant (33%) : seulement 3 fournisseurs sur les 30 répertoriés ne proposent pas de capteurs pour la mesure des particules.

Concernant la mesure des polluants gazeux, c'est pour le CO et l'ozone qu'il existe le plus de capteurs.

Il est également à noter qu'Aeroqual, Bettair, ENVEA (CAIRPOL) et Winsen sont les fournisseurs qui proposent des capteurs permettant de mesurer plus de 10 paramètres différents.

Un focus a été réalisé sur chaque type de mesure effectuée par les capteurs dans les paragraphes ci-après.

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.

Sur un nombre total de 44 capteurs répertoriés pour la mesure des PM dans le tableau en annexe 1, la répartition en termes de fraction granulométrique est indiquée dans le tableau 2. Certains capteurs sont susceptibles de mesurer plusieurs fractions granulométriques (ex : PM_{2,5} et PM₁₀).

Tableau 2 : Répartition des capteurs PM disponibles commercialement en fonction de la fraction granulométrique

Fraction granulométrique	Nombre de capteurs
PM ₁ +PM _{2,5} +PM ₁₀	10
PM _{2,5} +PM ₁₀	12
PM _{2,5}	9
PM ₄	2
PM ₁₀	8
PM _{Total}	3

88% des capteurs recensés mesurent les PM_{2,5} et/ou les PM₁₀ ce qui peut s'expliquer par le fait que ces polluants sont réglementés et que des dépassements des niveaux réglementaires ont fréquemment lieu pour ces espèces.

On note que trois capteurs distribués par Nova Fitness, Sharp et Ecomesure sont destinés à la mesure des concentrations en PM_{total} . Deux fabricants, Thermofischer (réf. : MIE pDR-1500) et Palas (réf. : Fidas Frog), proposent sur le marché des capteurs permettant de mesurer les 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 dans les lieux de travail pour le contrôle de valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP), 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, 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. tableaux et commentaires ci-après).

Concernant la mesure de CO, seuls 8 fournisseurs ont été recensés, pour un total de 11 capteurs. L'étendue de mesure s'étend de 10 $\mu\text{mol/mol}$ pour les capteurs Vaisala à 1000 $\mu\text{mol/mol}$ pour ceux de Winsen, celle-ci dépendant de l'utilisation visée (par exemple, air ambiant, air intérieur, air des lieux de travail...).

Tableau 3 : Fournisseurs de capteurs mesurant les concentrations de monoxyde de carbone (CO), nombre de capteurs disponibles et gammes de mesure

Fournisseurs	Nombre de capteurs	Gamme de mesure
Wuhan Cubic Optoelectronics Co	1	0-500 $\mu\text{mol/mol}$
Aeroqual	2	0-25 $\mu\text{mol/mol}$ 0-100 $\mu\text{mol/mol}$
BETTAIR	1	Non renseignée
ENVEA (Cairpol)	1	0-20 $\mu\text{mol/mol}$
Ecomesure	1	0-400 $\mu\text{mol/mol}$
Liberaintentio	2	0-200 $\mu\text{mol/mol}$ 0-500 $\mu\text{mol/mol}$
VAISALA	1	0-10 $\mu\text{mol/mol}$
Winsen	2	0-12,5 $\mu\text{mol/mol}$ 0-1000 $\mu\text{mol/mol}$

Concernant la mesure de CO₂, seuls 5 fournisseurs de capteurs ont été recensés, pour un total de 7 appareils. La gamme de mesure des capteurs recensés pour CO₂ s'étend de 2000 µmol/mol pour Aeroqual à 50000 µmol/mol pour Winsen.

Tableau 4 : Fournisseurs de capteurs mesurant les concentrations de dioxyde de carbone (CO₂), nombre de capteurs disponibles et gammes de mesure

Fournisseurs	Nombre de capteurs	Gamme de mesure
Wuhan Cubic Optoelectronics Co	2	0-5000 µmol/mol 0-10000 µmol/mol 0-20000 µmol/mol
Aeroqual	1	0-2000 µmol/mol
ENVEA (Cairpol)	1	0-5000 µmol/mol
Ecomesure	1	0-5000 µmol/mol
Winsen	2	0-2000 µmol/mol 0-6000 µmol/mol 0-10000 µmol/mol 0-30000 µmol/mol 0-50000 µmol/mol

Neuf fournisseurs de capteurs ont été recensés, pour **la mesure de l'ozone et/ou du NO₂** pour un total de 12 appareils. La gamme de mesure des capteurs recensés s'étend de 0,15 µmol/mol pour Aéroqual à 20 µmol/mol pour l'ozone avec deux fournisseurs (Liberaintentio et Ecomesure) tandis que celle pour le NO₂ s'étend jusqu'à 250 nmol/mol (ENVEA – CAIRPOL et Azimut Hager).

Tableau 5 : Fournisseurs de capteurs mesurant les concentrations de dioxyde d'azote (NO₂) et/ou d'ozone (O₃), nombre de capteurs disponibles et gammes de mesure

Fournisseurs	Nombre de capteurs	Polluant mesuré	Gamme de mesure
Aeroqual	2	O ₃	0-0,15 µmol/mol 0-0,5 µmol/mol
BETTAIR	1	O ₃	Non renseignée
Ecomesure	1	O ₃	0-20 µmol/mol
ENVEA (Cairpol)	1	O ₃ /NO ₂	0-250 nmol/mol
Plume labs	1	O ₃	Non renseignée
Liberaintentio	3	O ₃	0-1 µmol/mol 0-5 µmol/mol 0-20 µmol/mol
Azimut Hager	1	NO ₂ ou NO ₂ /O ₃	20-250 nmol/mol
VAISALA	1	O ₃	0-5 µmol/mol
Winsen	1	O ₃	0-2 µmol/mol

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

Dix fournisseurs de capteurs pour la mesure des NO_x, sont répertoriés, répartis comme suit : 4 fournisseurs pour le monoxyde d’azote (NO), 9 pour le dioxyde d’azote (NO₂) et un fournisseur pour les oxydes d’azote (NO_x).

Les gammes de mesure associées aux capteurs spécifiques à la mesure de NO₂, lorsqu’elles sont connues, s’étend de 250 nmol/mol (ENVEA-CairPol) à 50 µmol/mol (Liberaintentio). Pour la mesure de NO, la gamme la plus importante s’étend de 0 à 100 µmol/mol.

Tableau 6 : Fournisseurs de capteurs mesurant les concentrations de NO, NO_x et NO₂ et gammes de mesure

Fournisseurs	Polluant mesuré	Gamme de mesure
Aeroqual	NO ₂	0-1 µmol/mol
BETTAIR	NO/NO ₂	Non renseignée
Clarity	NO ₂	Non renseignée
ENVEA (Cairpol)	NO ₂	0-250 nmol/mol
Ecomesure	NO ₂	0-20 µmol/mol
Plume labs	NO _x	Non renseignée
Liberaintentio	NO	0-100 µmol/mol
	NO	0-25 µmol/mol
	NO ₂	0-50 µmol/mol
Rubix	NO/NO ₂	Non renseignée
VAISALA	NO ₂	0-2 µmol/mol
Winsen	NO ₂	0-2 µmol/mol

Concernant la mesure de SO₂, 5 fournisseurs ont été recensés proposant chacun un capteur. La gamme de mesure des capteurs recensés s’étend de 1 µmol/mol pour ENVEA (CairPol) à 10 µmol/mol pour AEROQUAL.

Tableau 7 : Fournisseurs de capteurs mesurant les concentrations de dioxyde de soufre (SO₂) et gammes de mesure

Fournisseur	Gamme de mesure
Aeroqual	0-10 µmol/mol
BETTAIR	Non renseignée
ENVEA (CairPol)	0-1 µmol/mol
VAISALA	0-2 µmol/mol
Winsen	0-2 µmol/mol

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

La gamme de mesure des capteurs recensés s'étend de 16 µmol/mol pour ENVEA-Cairpol à 5000 µmol/mol pour Ionscience.

Tableau 8 : Fournisseurs de capteurs mesurant les concentrations de composés organiques volatils (COV) et gammes de mesure

Fournisseur	Polluants	Gamme de mesure
Aeroqual	COV	0-20 µmol/mol
	COV	0-25 µmol/mol
	HCNM	0-25 µmol/mol
ENVEA (CairPol)	COV	0-16 µmol/mol
Clarity	COV	Non renseignée
Ecomasure	COV	0-50 µmol/mol
Ionscience	COV	0,1-5000 µmol/mol
Plume labs	COV	Non renseignée

De même, **pour la mesure du NH₃**, 3 fournisseurs (ENVEA-CairPol, Clarity et RUBIX) ont été recensés et la gamme de mesure définie uniquement dans le cas du capteur ENVEA-CairPol (0 à 25 µmol/mol). A noter que cette gamme n'est pas compatible avec les mesures habituelles faites pour le NH₃ en air ambiant (0-100 nmol/mol), mais peut être utile pour de la détection de fuites par exemple.

Des capteurs sont proposés pour la mesure de composés d'intérêt en milieux industriels. Deux fournisseurs (Winsen et Aeroqual) proposent respectivement un capteur pour la mesure d'O₂ (0 à 25%) et de Cl₂ (0 à 10 µmol/mol).

Plusieurs capteurs, permettant de mesurer **des paramètres physiques**, en complément des polluants, ont également été recensés.

Tableau 9 : Fournisseurs de capteurs déterminant les paramètres physiques des conditions ambiantes

Fabricants ou assembleurs	Nombre de capteurs				
	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

6. RETOUR D'EXPERIENCE DES AASQA SUR LE DEPLOIEMENT DES 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, afin de partager les enseignements des expérimentations réalisées mais également de démontrer la diversité des applications effectives ou potentielles des capteurs, comme l'illustrent les exemples ci-après.

6.1 Atmo Auvergne-Rhône-Alpes

Le projet Mobicit'Air disponible sur le site <https://www.atmo-auvergnerhonealpes.fr> 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 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 capteurs notamment du type Greenbee de Azimut https://www.atmo-auvergnerhonealpes.fr/sites/ra/files/atoms/files/rapport_atmo_aura_azimut_microcapteurs_final_v2.pdf),

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 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 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 capteurs sur les toits de tramways et/ou de bus. Pour cette expérimentation, une première campagne de mesure, faite avec les 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 capteurs dans les outils de l'observatoire et apporter aux habitants et pouvoirs publics des cartographies de la qualité de l'air géolocalisées et 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.

Des 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 capteurs, de deux fournisseurs différents (Cairnet de chez ENVEA-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 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 d'essais menés au SIRTa (Site Instrumental de Recherche par Télédétection Atmosphérique) à réaliser des tests de performance sur les 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. Dix appareils ont été testés (http://sirta.ipsl.fr/documents/JSS2017/talks/JSS2017_OralS1-O3_Languille.pdf) 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 (prototype UPMC - Sorbonne Université Campus Pierre et Marie Curie) 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 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 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.

En 2018, Airparif et les partenaires d'AIRLAB ont lancé un Challenge pour tester des solutions disponibles sur le marché pour les fabricants qui le souhaitent et apporter un appui aux utilisateurs. Pendant trois mois, les tests menés par Airparif, et validés par le jury du Challenge, ont porté sur 28 capteurs mis à disposition par les fabricants volontaires pour participer à cette évaluation multi-critères, avec 41 paramètres testés, pour 12 polluants. Chaque capteur concourait pour un ou plusieurs usages (mesure en air extérieur ou en air intérieur, capteur fixe ou en mobilité, sensibilisation du public etc...) et a été évalué suivant 3 grandes familles de critères : exactitude, ergonomie, pertinence des polluants mesurés, coût et portabilité, pondérés selon l'usage. Les résultats sont présentés sous forme d'un nombre d'étoiles allant de 1 (niveau le plus faible) à 5 (performance la plus élevée).

Avec un résultat de 4 étoiles sur 5, 8 capteurs commercialisés par 5 sociétés sont les lauréats de ce challenge :

- Dans la catégorie « piloter et gérer l'air dans un bâtiment » : les capteurs E4000NG, E 5000M, P 5000, QAA M commercialisés par Nano-Sense, le capteur OurAir distribué par Mann+Hummel et le RAM000x d'Azimut-Hager,
- Dans la catégorie « sensibilisation sur la qualité de l'air intérieur » : les capteurs AirVisual Pro d'IQAir AG ainsi que DLR13 et Multisensor de Dencentlab.

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 capteurs et des actions de sensibilisation.

Les 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 capteurs, en cas de doute sur la qualité de l'air et l'équipement d'un panel de volontaires de capteurs, reliés à une application téléphonique, utilisés lors de leurs déplacements (phase 2 du projet).

Préalablement à ce déploiement (phase 1 du projet 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 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 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 capteurs pour mesurer l'ammoniac.

6.4 AtmoSud

L'association de surveillance de la qualité en région Provence-Alpes-Côte d'Azur (AtmoSud) 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. AtmoSud 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 capteurs PM utilisés. Dans le cadre de ce projet, AtmoSud a testé 8 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 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 capteurs dans la réalisation de cartographie de pollution en particules fines, AtmoSud est actuellement en train de produire les cartographies finales du projet.

6.5 Qualitair Corse

Dix capteurs AirMatrix pour mesurer la concentration particulière ont été utilisés dans le cadre de la Journée Nationale de la Qualité de l'Air (septembre 2017) afin d'équiper des personnes. 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'Ile Rousse.

La proposition était faite aux passants de s'équiper d'un capteur et de se promener dans la ville. Les déplacements et les concentrations mesurées par ces 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 capteurs sont cependant apparus comme étant des objets ludiques attirant les gens.

De plus, Qualitair Corse a réalisé l'évaluation de deux capteurs $PM_{2.5}$ 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. Les résultats obtenus montrent une bonne corrélation entre le NPM W12394 et le TEOM-FDMS dans la période de fonctionnement (Pente > 75% et $R^2 = 0,96$) alors que les résultats sont en deçà pour le NPM W12354 (Pente << 75% et $R^2 = 0,57$). L'étude n'a pas permis de disposer de données suffisantes pour le ES642 pour avoir une évaluation correcte du capteur.

6.6 Atmo Normandie

L'association de surveillance de la qualité en Normandie (Atmo Normandie) a utilisé des capteurs (Tera e- NO_2 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 capteurs ont été confrontées aux sorties de modélisation fine échelle (les données capteurs ne sont pas utilisées comme données d'entrée du modèle). Cette étude s'est poursuivie par l'installation d'une station rue Saint-Gervais à Rouen. Des capteurs, directement reliés à un ordinateur, permettent d'avoir accès aux données, chaque jour, en temps réel, sur la qualité de l'air à Rouen. Les résultats obtenus permettront à CITEOS d'assurer une meilleure régulation du trafic.

6.7 Atmo Occitanie

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. RECENSEMENT DES ESSAIS D'EVALUATION REALISES SUR LES CAPTEURS EN LABORATOIRE OU SUR SITE

L'émergence sur le marché de capteurs connectés a conduit de nombreux laboratoires et organismes travaillant dans le domaine de la surveillance de la qualité de l'air à s'intéresser à la fiabilité de ces nouveaux dispositifs.

Le tableau en annexe 2 recense de façon non exhaustive des essais menés aux niveaux national et international et les résultats obtenus.

Les laboratoires et les organismes ayant organisé ces études sont le LCSQA, les AASQA, l'EPA (U.S. Environmental Protection Agency), State of Colorado Department of Public Health and Environment (CDPHE), Oak Ridge Institute for Science and Education (USA), South Coast Air Quality Management District (SCAQMD), Joint Research Center (JRC).

Cette bibliographie non exhaustive arrêtée à fin janvier 2019 montre que si l'on raisonne en termes de polluant mesuré, au moins une centaine de capteurs ont été testés, soit en laboratoire soit sur le terrain. Les essais ont porté essentiellement sur la mesure de PM_{2,5} et PM₁₀ ainsi que sur la mesure de polluants gazeux à savoir NO₂, O₃ et CO.

Les paramètres de performance principalement évalués en laboratoire et sur site et renseignés dans les différents rapports sont la fonction de linéarité ou la pente, le coefficient de régression et la fiabilité (taux de recouvrement des données lors de la période d'essais). Les résultats sont tous issus d'une comparaison avec une méthode de référence (les références et les liens vers les publications sont donnés en annexe 2).

7.1 Fonction de linéarité

Les résultats portant sur la détermination de la fonction de linéarité en laboratoire et sur site montrent des valeurs (pente et ordonnée à l'origine) très différentes d'un capteur à l'autre aussi bien pour les composés gazeux que pour les particules. En effet, certains capteurs fournissent des valeurs proches des valeurs de référence (ex : l'AQY v0.5 de Aéroqual pour les particules et le Caidclip NO2 pour les composés gazeux), tandis que d'autres conduisent à des réponses très éloignées des valeurs de référence (ex : AQT420 de Vaisala pour les particules et le AGG V.2 d'Air Quality pour les composés gazeux).

Ces éléments mettent en évidence l'importance d'ajuster la réponse de ces instruments avec les valeurs fournies par une méthode de référence sur une période à déterminer avant de les mettre en œuvre.

7.2 Coefficient de régression

Concernant le coefficient de régression, sur l'ensemble des capteurs testés en laboratoire, tous polluants confondus, les coefficients de régression (R^2), qui caractérisent l'aptitude du capteur à reproduire des mesures fidèles (suivi temporel des concentrations) au regard des mesures de référence, sont compris entre 0,78 pour le capteur Shinyei et $\geq 0,99$ pour plusieurs autres capteurs (ex : Aéroqual, AlphaSense ...) (cf. Figure 8).

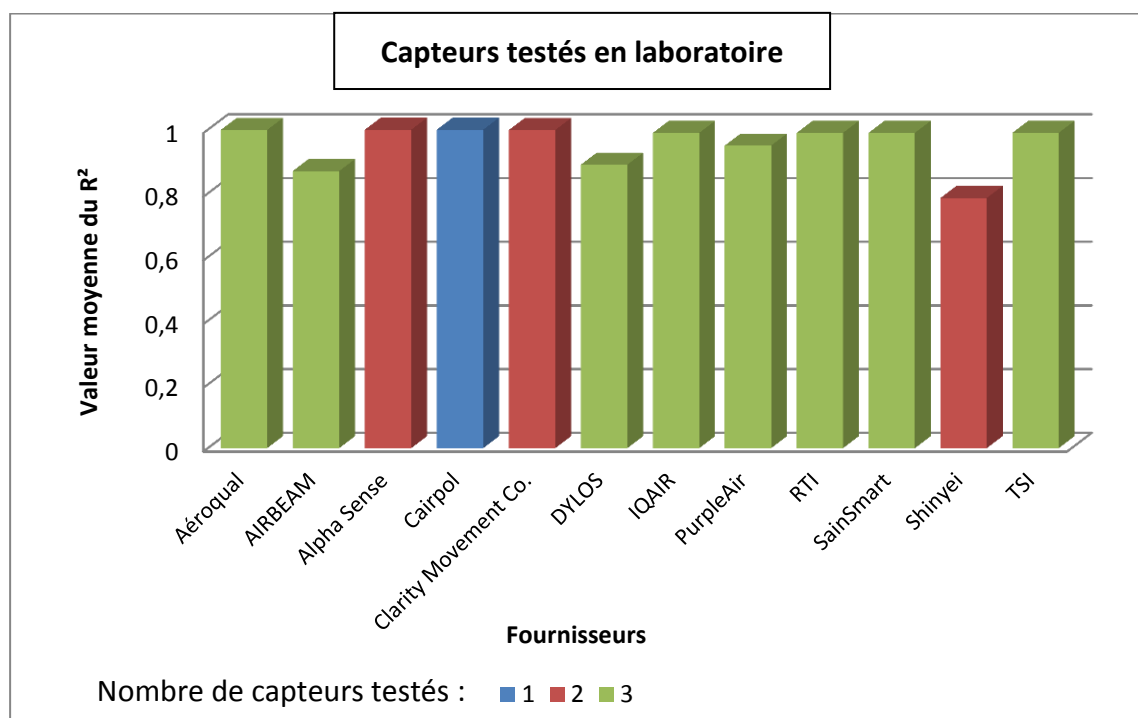


Figure 6 : Valeur de R^2 en fonction des capteurs pour des essais en laboratoire tous polluants confondus

Concernant les essais sur le terrain, les valeurs des coefficients de régression sont comprises dans une fourchette beaucoup plus large, allant de 0 pour le capteur Alphasense à 0,96 pour le capteur PurpleAir pour les mesures particulaires (cf. figure 9) et allant de 0 pour Air Quality à 1 pour GreenBee pour les mesures de gaz (cf. figure 10).

Pour ces essais, il est difficile de savoir si les disparités obtenues sont imputables au capteur uniquement, ou également aux conditions des tests qui ne sont pas identiques (période estivale ou hivernale, type de site de test, altitude, niveaux de concentration des polluants ou encore présence d'interférents).

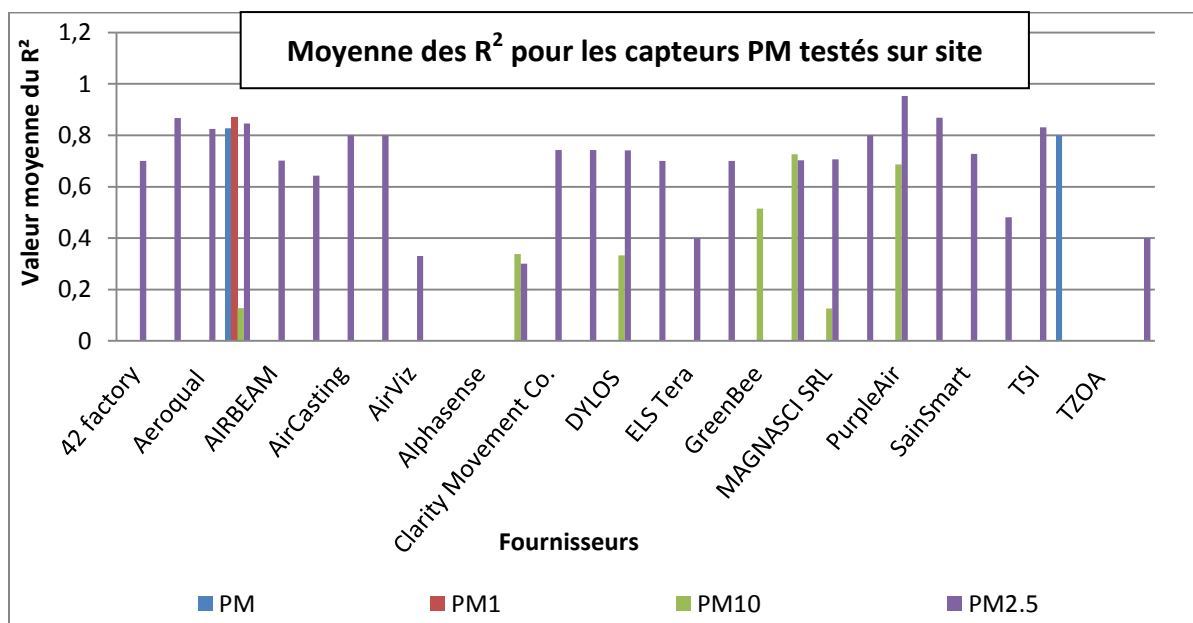


Figure 7 : Valeur de R² en fonction des capteurs PM pour des essais sur site

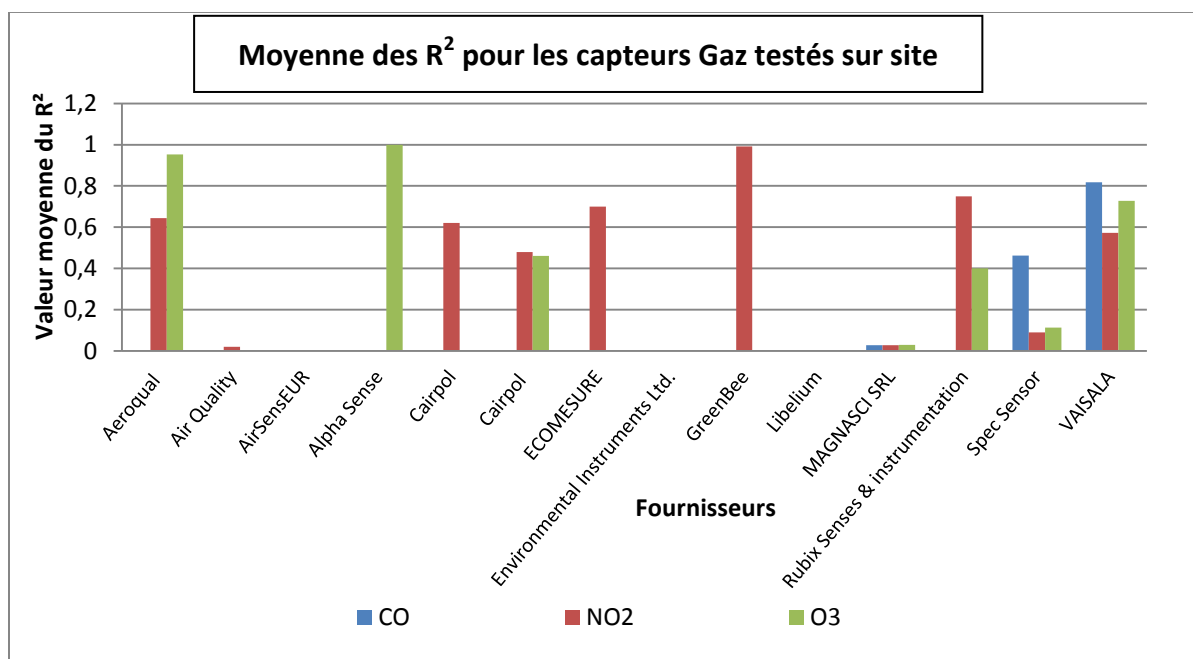


Figure 8 : Valeur de R² en fonction des capteurs gaz pour des essais sur site

On peut remarquer que la valeur du R^2 peut être différente en fonction des conditions des tests, c'est-à-dire en laboratoire et sur site. Les figures 11 et 12 ci-après donnent les valeurs des R^2 obtenus pour les mêmes références des capteurs Aéroqual (AQY v0.5) et Shinyei.

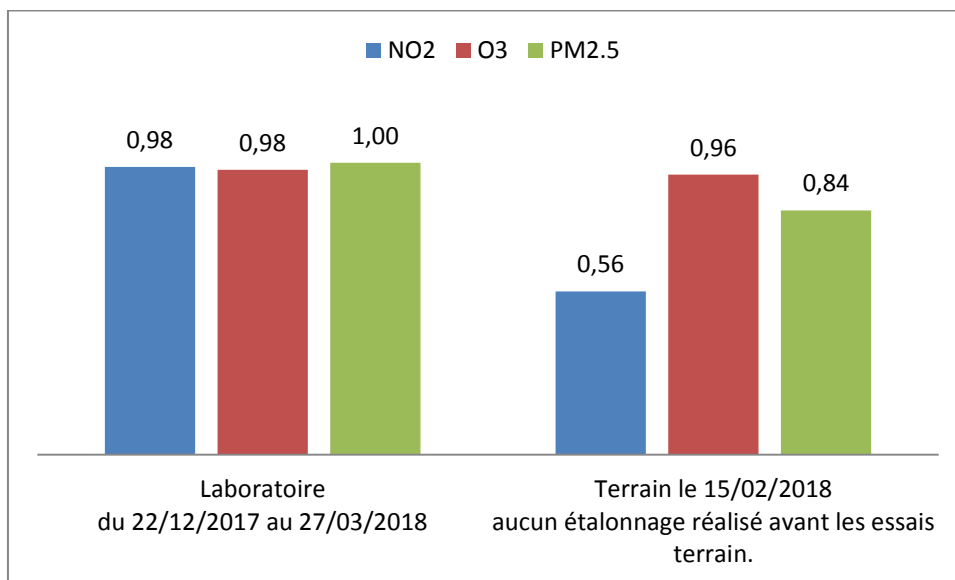


Figure 9 : Valeur moyenne du R^2 pour le capteur Aeroqual (AQY v0.5) en fonction des conditions de test (laboratoire et site)

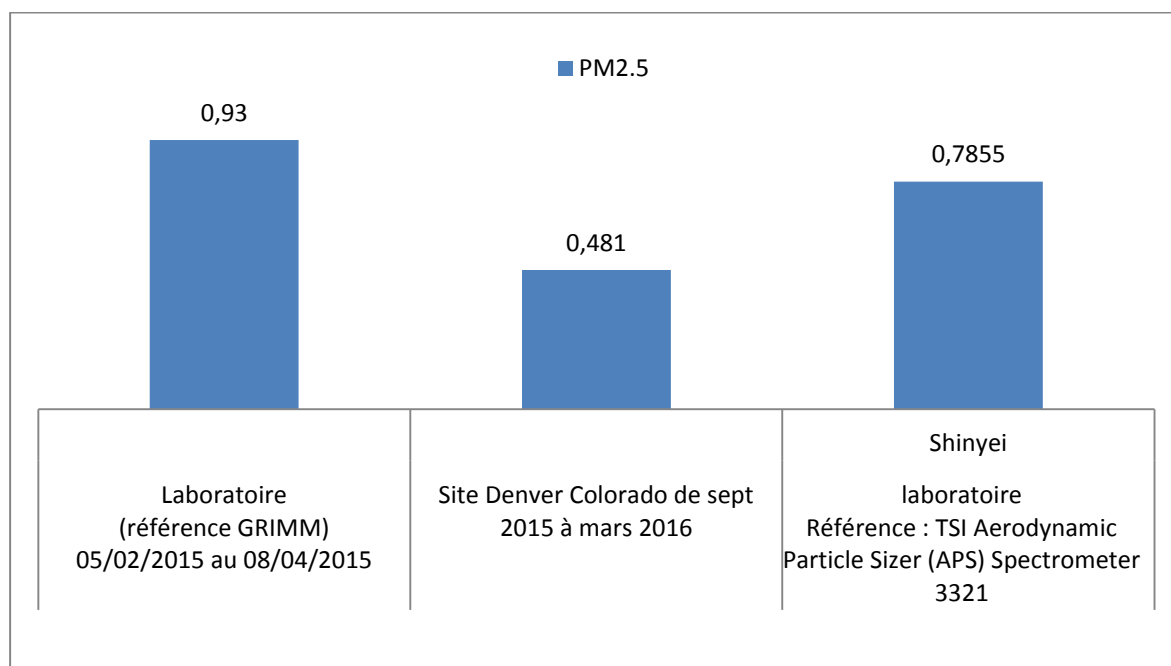


Figure 10 : Valeur moyenne du R^2 pour le capteur Shinyei en fonction des conditions de test (laboratoire et site)

7.3 Fiabilité

Pour les capteurs testés en laboratoire, leur fiabilité (taux de recouvrement des données lors de la période d'essai) est comprise entre 66% pour le capteur purpleAir et 100 % pour plusieurs capteurs par exemple Aéroqual, Airbeam ou Shinyei (cf. figure 13).

Pour les capteurs testés sur site, la variation de la fiabilité est beaucoup plus importante. En effet, la fiabilité est comprise entre 4,3 % (pour un capteur ENVEA-Cairpol) et 100 % (pour plusieurs capteurs tels que Airqualité, Dylos ou encore Magnasci SRL) (cf. figure 14).

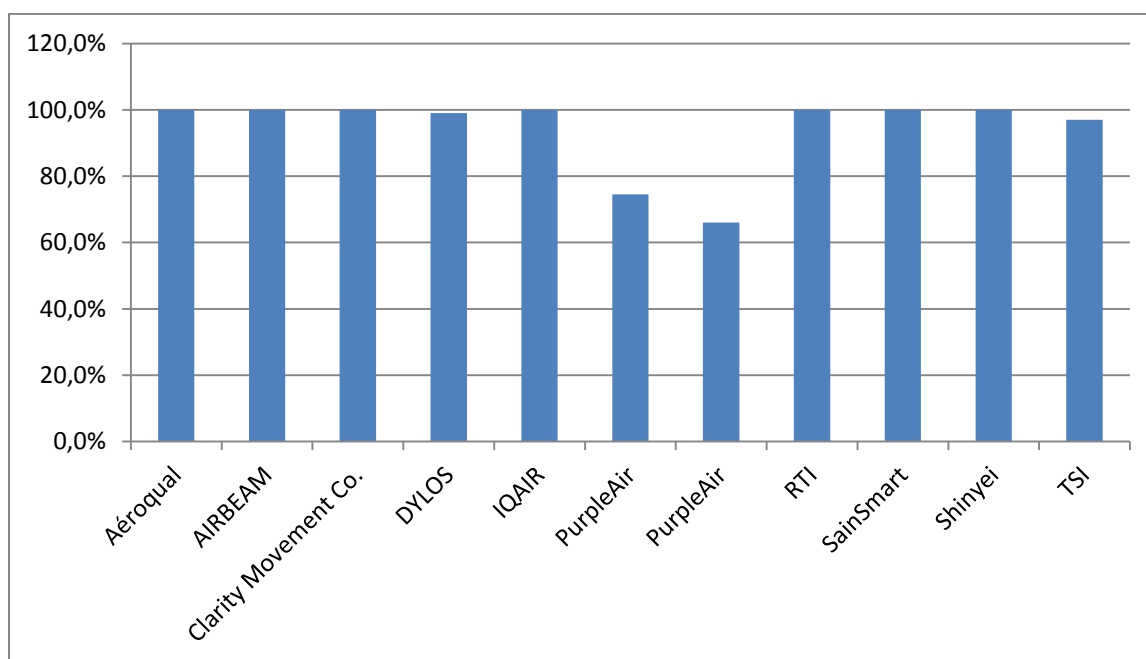


Figure 11 : Fiabilité des capteurs testés en laboratoire tous polluants confondus

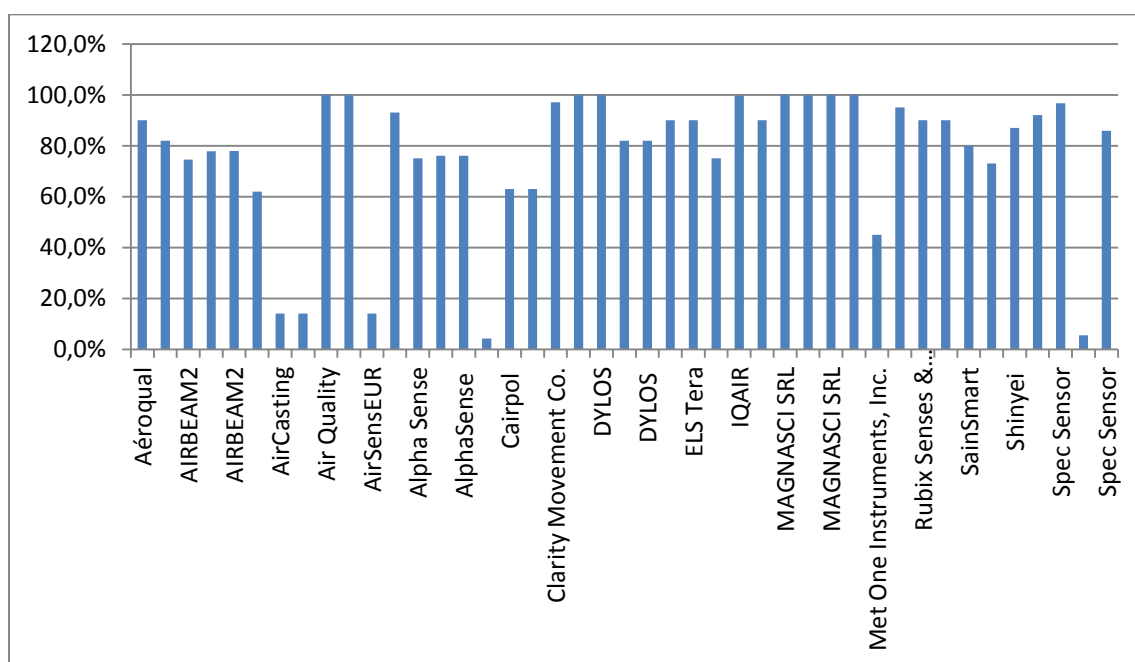


Figure 12 : Fiabilité des capteurs testés sur site tous polluants confondus

8. PRESENTATION DE L'OUTIL CAPT'AIR

Le recensement des capteurs et des essais effectués en laboratoire et sur site avec ces capteurs (cf. paragraphe 7) a nécessité un temps de recherche relativement long. De plus, même si les tableaux montrent un nombre de documents examinés conséquents, il est possible que certains documents intéressants n'aient pas été identifiés, ce qui explique que cette bibliographie ne soit pas exhaustive.

Par conséquent, pour pallier ces problèmes et disposer d'une base de données plus complète et plus facile à exploiter (ex : réalisation de requêtes) sur les différents capteurs et les expérimentations menées, le LCSQA/IMT Lille Douai a développé un outil dénommé Capt'Air.

Cet outil permet d'enregistrer les informations liées aux essais réalisés en laboratoire et sur site et sert de base de données consultable par les membres du LCSQA, les AASQA, les DREAL/DRIEE et le Bureau de la qualité de l'Air (BQA) du ministère en charge de l'environnement.

Les principales fonctionnalités de l'outil sont les suivantes :

- Des informations concernant les caractéristiques générales du capteur en test (cf. figure 15). Un capteur est unique par sa référence et sa version ;
- Des informations concernant les acquisitions et le traitement des données (cf. figure 16) ;
- Des informations concernant les documents techniques et qui a utilisé et/ou testé le capteur (Cf. figure 17). Il est possible de joindre différents types de documents (fiche descriptive, expérimentations). En fonction du document joint, il peut être décidé de le rendre visible ou pas (ex : dans le cas d'un article scientifique, on peut simplement indiquer le lien sur un site INTERNET) ;
- Des informations concernant chaque polluant testé associé au capteur (cf. figure 18). Pour chaque polluant, on retrouve les informations notées dans la figure 19. Pour un même polluant et un même capteur, il n'y a aucune limite pour renseigner les expérimentations en laboratoire et sur site.

Identification et caractéristiques générales du système

Fabricant : *
42FACTORY

Fournisseur en France : *
42FACTORY

Modèle : *
ATMOTRACK

Version : *
1.2

Hauteur : *
8.2 cm

Profondeur : *
14.0 cm

Largeur : *
14.0 cm

Poids :
0.2 kg

Mode d'alimentation : *
☐ Batterie ☒ Secteur ☐ Solaire ☒ Autre 12V

Autonomie sur batterie :
h

Mode de mesure :
☒ Continu ☐ Discontinu

Résolution temporelle : *
☐ 1 s ☐ 1 mn ☐ 15 mn ☐ 1 h ☐ Réglable ☒ Autre 30s

Mode de communication : *
☐ USB ☐ Ethernet ☐ RS485 ☐ Analogique ☒ GSM ☐ Bluetooth ☐ GPIB ☐ Zigbee ☐ Autre

Figure 15 : Identification et caractéristiques du capteur

Acquisition et traitement des données

Logiciel d'acquisition / traitement : Oui

Localisation du traitement : Déporté

Accès aux données brutes : Non

Correction possible des données par l'utilisateur : Non

Correction possible des données par le fabricant : Oui

Version du logiciel : NC

Espace de stockage : Oui

Propriété des données : Acheteur

Lieu de stockage des données : ☒ Cloud ☐ Sur le système (disque dure, carte SD, etc.) ☐ Sur un PC externe ☐ Autre (à préciser)

Observations / informations complémentaires :

Figure 16 : Information concernant le traitement des données

Document technique

[Consulter les documents](#)

Qui a testé et/ou utilisé ?

Organisme : * LCSQA

Nom : * Redon-Spinelle

Mél : nathalie.redon@imt-lille-douai.fr

Téléphone :

Figure 17 : Information sur qui a testé et/ou utilisé le capteur

Liste des polluants

Polluant	Référence	Prix	Objectif évaluation métrologique	Objectif utilisation terrain	Actions
PM10	LED ROUGE		Comparaison inter-laboratoire - Essai d'aptitude		  
PM2,5	LED ROUGE		Comparaison inter-laboratoire - Essai d'aptitude		  
PM1	LED ROUGE		Comparaison inter-laboratoire - Essai d'aptitude		  

Figure 18 : Liste des polluants

- Détails des sous-éléments du système testé
- Qui a testé et/ou utilisé ?
- Caractéristiques générales de la configuration testée
- Objectif du projet
-  Détails concernant l'évaluation métrologique menée
- Utilisation terrain

Figure 19 : Informations renseignées pour chaque polluant de chaque capteur

9. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette veille technologique effectuée sur les capteurs a permis de réaliser un inventaire des capteurs actuellement disponibles sur le marché ainsi que des techniques de mesure associées. Cet inventaire **arrêté à fin octobre 2018** est aussi exhaustif que possible 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 conduit à réaliser un premier état des lieux des utilisations faites des 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 a également permis de répertorier de façon non exhaustive les essais réalisés en laboratoire ou sur site pour déterminer les performances des capteurs.

Ces résultats ainsi que les retours d'expérience des AASQA vont servir à renseigner le nouvel outil Capt'Air développé par le LCSQA/IMT Lille Douai, afin d'obtenir une base de données suffisante et exhaustive et de pouvoir ainsi déterminer le ou les capteur(s) qu'il convient d'utiliser pour un usage défini. Le Tableau 10 qui suit répertorie les différents objectifs qu'il est possible d'envisager pour des utilisations des 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 10 : Objectifs envisagés pour des utilisations des 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 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 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>).

Ces différents éléments seront aussi utilisés pour poursuivre les travaux sur cette thématique, notamment dans le cadre de la rédaction d'une « Note stratégique définissant le cadre d'utilisation des outils micro-capteurs pour la surveillance des polluants réglementés et d'intérêt national ».

10. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

L'ensemble des articles identifiés lors de cette recherche bibliographique sont reportés ci-après.

De nombreuses références bibliographiques ont été identifiées sur le sujet des 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. Sur la période 2016-2018, plus de 40 publications ont été recensées, ce qui montre l'intérêt grandissant pour ces nouvelles technologies.

I. ZDANEVITCH, Utilisation de microcapteurs, LCSQA, Convention 31/2001, INERIS, 2002, <https://www.lcsqa.org/fr/rapport/2002/ineris/utilisation-microcapteurs>

Laurent Spinelle, Michel Gerboles, Manuel Aleixandre, JRC Technical reports, Report of laboratory and in-situ validation of micro-sensor for monitoring ambient air pollution, NO₉: CairClipNO₂ of CAIRPOL (F), Report EUR 26394 EN, 2013, <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/report-laboratory-and-situ-validation-micro-sensor-monitoring-ambient-air-pollution-no9>

Laurent Spinelle, Michel Gerboles, Manuel Aleixandre, JRC Technical reports, Report of laboratory and in-situ validation of micro-sensor for monitoring ambient air, Ozone micro-sensor, αSense, model B4-O3 sensor, Report EUR 26681 EN, 2014, <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/report-laboratory-and-situ-validation-micro-sensor-monitoring-ambient-air-ozone-micro>

Michele Penza, Domenico Suriano, Gennaro Cassano, Valerio Pfister, Martino Amodio, Livia Trizio, Magda Brattoli, Gianluigi De Gennaro, A case-study of microsensors for landfill air-pollution monitoring applications, Urban Climate 14 (2015) 351–369, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.09.002>

Laurent Spinelle, Michel Gerboles, Manuel Aleixandre, Performance evaluation of amperometric sensors for the monitoring of O₃ and NO₂ in ambient air at ppb level, Procedia Engineering, Volume 120, 2015, Pages 480-483, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.676>

Laurent Spinelle, Michel Gerboles, Maria Gabriella Villani, Manuel Aleixandre, Fausto Bonavitacola, Field calibration of a cluster of low-cost available sensors for air quality monitoring. Part A: Ozone and nitrogen dioxide, Sensors and Actuators B: Chemical, Volume 215, August 2015, Pages 249-257, <https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.03.031>

Peter M Edwards, Alastair C Lewis, James D Lee, Marvin Shaw, Mat J Evans, Sarah J Moller, Katie Smith, Matthew Ellis, Stefan Gillot, A White, Evaluating low cost chemical sensors for air pollution measurement, National Centre for Atmospheric Science, 2015

Elena Austin, Igor Novosselov, Edmund Seto, Michael G. Yost, Laboratory Evaluation of the Shinyei PPD42NS Low-Cost Particulate Matter Sensor, PLOS ONE, September 14, 2015, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0137789>

Feinberg, S., R. Williams, J. Rickard, R. Brown, D. Garver, G. Harshfield, P. Stauffer, E. Mattson, R. Judge, AND S. Garvey. CAIRSENSE Study: Real-world evaluation of low cost sensors in Denver, Colorado. Presented at National Ambient Air Monitoring Conference, St. Louis, Missouri, August 08 - 11, 2016

Andrea Polidori, Vasileios Papapostolou, Hang Zhang, Laboratory Evaluation of Low-Cost Air Quality Sensors, South Coast Air Quality Management District, Laboratory Evaluation of Low-Cost Air Quality Sensors, August 2016

Lewis AC, Lee JD, Edwards PM, Shaw MD, Evans MJ, Moller SJ, Smith KR, Buckley JW, Ellis M, Gillot SR, White A, Evaluating the performance of low cost chemical sensors for air pollution research, Faraday Discuss. 2016 Jul 18;189:85-103. doi: 10.1039/c5fd00201j

Karoline K. Johnson, Michael H. Bergin, Armistead G. Russell and Gayle S. W. Hagler, Using Low Cost Sensors to Measure Ambient Particulate Matter Concentrations and On-Road Emissions Factors, Atmos. Meas. Tech. Discuss., doi:10.5194/amt-2015-331, 2016

Abhisek Manikonda, Naděžda Zíková, Philip K. Hopke, Andrea R. Ferro, Laboratory assessment of low-cost PM monitors, Journal of Aerosol Science, Volume 102, December 2016, Pages 29-40, <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2016.08.010>

Qualitair Corse, Evaluation de micro-capteurs PM, NPM MET ONE, ES642 MET ONE, présentation, 2016

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, Community Air Sensor Network (CAIRSENSE) project: evaluation of low-cost sensor performance in a suburban environment in the southeastern United States, Atmos. Meas. Tech., 9, 5281–5292, 2016, <https://doi.org/10.5194/amt-9-5281-2016>

Laurent Spinelle, Michel Gerboles, Maria Gabriella Villani, Manuel Aleixandre, Fausto Bonavitacola, Field calibration of a cluster of low-cost commercially available sensors for air quality monitoring. Part B: NO, CO and CO₂, Sensors and Actuators B: Chemical, Volume 238, January 2017, Pages 706-715, <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.07.036>

Aakash C. Rai, Prashant Kumar, Francesco Pilla, Andreas N. Skouloudis, Silvana Di Sabatino, Carlo Ratti, Ansar Yasar, David Rickerby, End-user perspective of low-cost sensors for outdoor air pollution monitoring, Science of the Total Environment, Volumes 607–608, 31 December 2017, Pages 691-705, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.266>

Spinelle, L., Gerboles, M., Kotsev, A. and Signorini, M., JRC Technical reports, Evaluation of low-cost sensors for air pollution monitoring, Effect of gaseous interfering compounds and meteorological conditions, Report EUR 28601 EN, 2017, <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/evaluation-low-cost-sensors-air-pollution-monitoring-effect-gaseous-interfering-compounds-and>

Philipp Schneider, Nuria Castell, Matthias Vogt, Franck R. Dauge, William A. Lahoz, Alena Bartonova, Mapping urban air quality in near real-time using observations from low-cost sensors and model information, Environment International, Volume 106, September 2017, Pages 234-247, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.05.005>

Jerrett, Michael; DonaireGonzalez, David; Popoola, Olalekan; Jones, Roderic; Cohen, Ronald C.; Almanza, Estela; de Nazelle, Audrey; Mead, Iq; Carrasco-Turigas, Glòria; Cole-Hunter, Tom; Triguero-Mas, Margarita; Seto, Edmund; Nieuwenhuijsen, Mark, Validating novel air pollution sensors to improve exposure estimates for epidemiological analyses and citizen science, *Environmental Research*, Volume 158, October 2017, Pages 286-29, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.04.023>

Mikko Laakso, Eero Alkkiomäki, Tuukka Pekkanen, Jarkko Niemi, Joel Kuula, Hilka Timonen, Riina Hietikko, Topi Rönkkö, Field test results of a compact air quality sensor in urban environment, Tampere University of Technology. Presented at Atmosfair conference, Lyon, 10 octobre 2017

Spinelle L, Gerboles M, Kok G, Persijn S, Sauerwald TT, Review of Portable and Low-Cost Sensors for the Ambient Air Monitoring of Benzene and Other Volatile Organic Compounds, *Sensors* 2017, 17(7), 1520; <https://doi.org/10.3390/s17071520>

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes & Azimut Monitoring, Evaluation des micro-capteurs Greenbee, 2017, <https://www.atmo-auvergnerhonealpes.fr/publications/mobicitair-evaluation-des-champs-dapplication-des-micro-capteurs-la-surveillance-de-la>

K.E.Kelly, J.Whitaker, A.Petty, C.Widmer, A.Dybwad, D.Sleeth, R.Martin, A.Butterfield, Ambient and laboratory evaluation of a low-cost particulate matter sensor, *Environmental Pollution*, Volume 221, February 2017, Pages 491-500, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.039>

Jingjin Shi, Fei'er Chen, Yunfei Cai, Shichen Fan, Jing Cai, Renjie Chen, Haidong Kan, Yihan Lu, Zhuohui Zhao, Validation of a light-scattering PM_{2.5} sensor monitor based on the long-term gravimetric measurements in field tests, *PLOS ONE*, 2017, doi: 10.1371/journal.pone.0185700

Toby Hanna, Leonard Bielory, Richard E. Opiekun, What Can Be Learned from Low Cost Air Quality Monitors, Best Uses and the Current State of Technology, New Jersey Clean Air Council Website, CAC hearing report, 2017, https://www.state.nj.us/dep/cleanair/hearings/ph_2017.htm

GERBOLES Michel, SPINELLE Laurent, BOROWIAK Annette, Measuring air pollution with low-cost sensors, European commission, 2017, <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/brochures-leaflets/measuring-air-pollution-low-cost-sensors>

Alastair C Lewis, Christoph Zellweger, Martin G Schultz, Oksana A Tarasova and Reactive Gases Science Advisory Group, GAW, Technical advice note on lower cost air pollution sensors, WMO, 2017

Kira Sadighi, Evan Coffey, Andrea Polidori, Brandon Feenstra, Qin Lv, Daven K. Henze, Michael Hannigan, Intra-urban spatial variability of surface ozone in Riverside, CA: viability and validation of low-cost sensors, *Atmos. Meas. Tech.*, 11, 1777–1792, 2018, <https://doi.org/10.5194/amt-11-1777-2018>

Peng Wei, Zhi Ning, Sheng Ye, Li Sun, Fenhuan Yang, Ka Chun Wong, Dane Westerdahl and Peter K. K. Louie, Impact analysis of Temperature and Humidity conditions on electrochemical sensor response in ambient Air Quality monitoring, *Sensors* 2018, 18(2), 59; <https://doi.org/10.3390/s18020059>

Leigh R. Crilley, Marvin Shaw, Ryan Pound, Louisa J. Kramer, Robin Price, Stuart Young, Alastair C. Lewis, Francis D. Pope, Evaluation of a low-cost optical particle counter (Alphasense OPC-N2) for ambient air monitoring, *Atmos. Meas. Tech.*, 11, 709–720, 2018, <https://doi.org/10.5194/amt-11-709-2018>

Alastair C Lewis, Erika von Schneidemesser and Richard Peltier, Low-cost sensors for the measurement of atmospheric composition: overview of topic and future applications, WMO, 2018, <https://www.ccacoalition.org/en/resources/low-cost-sensors-measurement-atmospheric-composition-overview-topic-and-future>

ANNEXE 1 - SYNTHESE NON EXHAUSTIVE DES CAPTEURS COMMERCIAUX ACTUELLEMENT DISPONIBLES SUR LE MARCHÉ (A FIN OCTOBRE 2018)

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/m ³	µg/m ³	diffraction laser	/
Nova Fitness	Laser PM2.5 Monitor--SDL607	Non renseignée	Non renseignée	PM2.5+PM10		0-1000 µg/m ³	µg/m ³	diffraction laser	/
Nova Fitness	Laser PM2.5 Sensor--SDS018	Non renseignée	Non renseignée	PM2.5+PM10		0-1000 µg/m ³	µg/m ³	diffraction laser	/
Nova Fitness	Laser PM2.5 Sensor--SDS011	Non renseignée	Non renseignée	PM2.5+PM10		0-1000 µg/m ³	µg/m ³	diffraction laser	/
Nova Fitness	Laser PM100 Sensor specification--SDS198	Non renseignée	Non renseignée	PM100		0-20000 µg/m ³	µg/m ³	diffraction laser	/
PLANTOWER	PMS1003 series/PMS3003 series	Non renseignée	Non renseignée	PM1+PM2.5+PM10		0-500 µg/m ³	µg/m ³	diffraction laser	<10s
PLANTOWER	PMS5003 series/PMS7003 series	Non renseignée	Non renseignée	PM1+PM2.5+PM10		0-500 µg/m ³	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	GP2Y1010A.UOF	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/m ³	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/m ³	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/m ³	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/m ³	µg/m ³	laser	rapide
Wuhan Cubic Optoelectronics Co.,Ltd	SRH Series	Non renseignée	Miniature Infrared Carbon Dioxide Sensor SRH Series	CO ₂		0-500ppm, 0-10000ppm, 0-2000ppm	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	Particle Sensor: Shinyei PPD60PV Temperature & Relative Humidity Sensor: MaxDetect RH03	Version 2.1+EDR	Non renseignée	PM2,5		Non renseignée	Non renseignée	Non	/
AirBeam	Particle Sensor: Shinyei PPD60PV Temperature & Relative Humidity Sensor: MaxDetect RH03	Version 2.1+EDR	Non renseignée	Température		Non renseignée	Non renseignée	Non	/
AirBeam	Particle 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/m ³	diffraction laser	/
ThermoFisher	MIE pDR-1500	Non renseignée	Non renseignée	PM4		1-400000 µg/m3	µg/m ³	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	CO ₂		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/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
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/Informations 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/m ³	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/cm ³	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/cm ³	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

ANNEXE 2 - RECENSEMENT NON EXHAUSTIF DES ESSAIS MENES PAR DES LABORATOIRES/ORGANISMES (A FIN JANVIER 2019)

Fournisseur	Type de l'appareil	Cout de l'appareil	Type de test	Condition test	mesurande	Nb de µcapteurs testés	Linéarité	Pente	R ² régression	Fiabilité	Période de traitement des données	Source
Alpha Sense	O3 sensors (B4)		Laboratoire	22°C/60%	O3	2	1,46e-3x+6,26e-2(1)		0,99965			http://publications.jrc.ec.europa.eu/rep-ostory/bistream/18C90463/1b-na-26881-en-n.pdf
							1,30e-3x+4,24e-2(1)		0,99931			
Aéroqual	AQV0.5	3000\$ (inclus 2 ans de support technique + licence software)	Laboratoire du 22/12/2017 au 27/03/2018	20°C/40%	PM2.5	3	0,6224x+1,3376		0,9989	100,0%		http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/summary-evaluations/aeroqual-aqv-(v0-5)-lab-evaluation.pdf?sfvrsn=6
					O3		12,721x-191,01		0,975	100,0%		
					NO2		4,7552x+21,847		0,9802	100,0%		
					NO2 (V2)		4,3323x-3,0806		0,9897	100,0%		
					PM2.5		0,9973x+4,1665		0,8669			http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/summary/aeroqual-aqv-(v0-5)-pm-summary-report.pdf?sfvrsn=12
					O3		0,9633x+49,107		0,8412			
Aéroqual	AQV0.5	3000\$ (inclus 2 ans de support technique + licence software)	Terrain le 15/02/2018 aucun étalonnage réalisé avant les essais terrain.		NO2 (avec Correction O3)	4	0,9539x+3,5351		0,7842			http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/summary/aeroqual-aqv-(v0-5)-ozone-summary-report.pdf?sfvrsn=12
							0,9872x+40,137		0,8481			
							1,438x-1,4532		0,951			
							1,2943x-1,2815		0,9684			
							1,5153x-22,029		0,9492			
							1,2611x-6,6195		0,9635			
							1,2859x-4,8639		0,4802	>90%		
							1,2888x+6,2862		0,56			
							1,1129x+3,2771		0,4169			
							1,2541x+8,3544		0,5185			
							1,1845x-1,7229		0,7477			
							0,9549x-0,2971		0,7831			
Aéroqual	SW-50		Site Denver Colorado de sept 2015 à mars 2016	Altitude, temps sec et température basse Concentration moyenne (1h) de référence 18,8 ppb	O3, ppb		0,9153x+4,5088		0,165			https://www.atmos-meas-tech.net/11/4605/2018/
							0,9801x+2,0031		0,7972			
							0,56x-0,004		0,99	82 %		
							0,58x-0,004		0,92	73 %	Moyenne horaire	
							0,77x-0,004		0,96	81 %		

Fournisseur	Type de l'appareil	Cout de l'appareil	Type de test	Condition test	mesurande	Nb de µcapteurs testés	Linéarité	Pente	R ² régression	Fiabilité	Période de traitement des données	Source
AIRBEAM		200\$	Laboratoire (référence GRIMM)	20°C/40%	PM2,5 (concentration massique)	3	0,16x-8,52 (entre 0 et 50 µg/m³) - Saturation à 315 µg/m³ (pour 50µg/m³ GRIMM)		0,87	100,0%		http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/laboratory-evaluations/airbeam---field-evaluation.pdf?sfvrsn=10
AIRBEAM		200\$	Laboratoire (référence GRIMM)	20°C/40%	PM2,5 (comptage)	3	5,66x-3,8,106 (jusqu'à 2,106 particules/L)		0,87	100,0%	Moyenne 5 min	
AIRBEAM		200\$	Terrain du 30 avril au 19 juin 2015 (référence GRIMM)		PM2,5 (concentration massique)	3	0,1387x+9,3182 0,1807x+9,0211 0,1038x+9,7253		0,6567 0,6654 0,6617		Moyenne 5 min Moyenne 5 min Moyenne 5 min	http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/airbeam---field-evaluation.pdf?sfvrsn=4
AIRBEAM		200\$			PM2,5 (comptage)	3	7,9076x+82050 9,4347x+77809 6,5552x+89100		0,7365 0,7402 0,7458		Moyenne 5 min Moyenne 5 min Moyenne 5 min	
AIRBEAM2		250\$	Terrain du 20 juillet au 19 septembre 2018 aucun étalonnage réalisé avant les essais terrain. (référence GRIMM)		PM1,0 (concentration massique)	3	0,985x+2,146 0,9492x+1,8382 1,0648x+2,288		0,7359 0,7117 0,7248	74,5%	Moyenne 5 min Moyenne 5 min Moyenne 5 min	http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/airbeam2---field-evaluation.pdf?sfvrsn=18
AIRBEAM2		250\$	Terrain du 20 juillet au 19 septembre 2018 aucun étalonnage réalisé avant les essais terrain. (référence GRIMM)		PM2,5 (concentration massique)	3	y = 0,775x + 3,8921 y = 0,7474x + 3,887 y = 0,7864x + 4,4013		0,6451 0,6349 0,6495	77,8%	Moyenne 5 min Moyenne 5 min Moyenne 5 min	http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/airbeam2---field-evaluation.pdf?sfvrsn=18
AIRBEAM2		250\$	Terrain du 20 juillet au 19 septembre 2018 aucun étalonnage réalisé avant les essais terrain. (référence GRIMM)		PM10 (concentration massique)	3	0,1535x+42,424 0,1332x+42,576 0,1161x+43,173		0,0042 0,0038 0,0027	77,9%	Moyenne 5 min Moyenne 5 min Moyenne 5 min	http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/airbeam2---field-evaluation.pdf?sfvrsn=18
AirCasting	AirBeam		Site Denver Colorado de sept 2015 à mars 2016	Altitude, temps sec et température basse Concentration moyenne (1h) de référence 7,8 µg/m	Particle count, hundreds of particles per cubic foot (hpcf)		273x-323 278x-124 322x-352		0,82 0,84 0,82	62 % 62 % 29 %	Moyenne horaire	https://www.atmos-meas-tech.net/11/4605/2018/
AirCasting	AirBeam		Terrain janvier à mi-février 2018		PM2,5	2		-0,58	>0,75	≤14%		https://www.lcsqa.org/system/files/rap-gor/LCSQA2017-Clmicrocapteurs-synthese_resultats.pdf

Fournisseur	Type de l'appareil	Cout de l'appareil	Type de test	Condition test	mesurande	Nb de µcapteurs testés	Linéarité	Pente	R ² régression	Fiabilité	Période de traitement des données	Source	
Airmatrix	Airmatrix		Terrain janvier à mi-février 2018		PM2,5	2		1,09	>0,75	≤14%		https://www.lcsqa.org/system/files/rapport/LCSQA2017-CLmicrocapteurs-synthese_resultats.pdf	
Air Quality	EGG V.2		Terrain du 31 décembre 2014 au 23 février 2015		CO	3	-0,0088x+0,4129		0,0025	≈100%	Moyenne 5 min	http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/air-quality-egg-v2-co-no2-field-evaluation.pdf?sfvrsn=0	
							-0,0723x+0,4121		0,0013		Moyenne 5 min		
							-0,1364x+0,4134		0,003		Moyenne 5 min		
					NO2		-0,5731x+20,345		0,0277		Moyenne 5 min		
							0,1351x+14,535		0,0207		Moyenne 5 min		
							0,0674x+14,888		0,0095		Moyenne 5 min		
Air Quality	EGG 2018	249\$	Terrain du 25 avril au 26 juin 2018 aucun étalonnage réalisé avant les essais terrain.		PM1	3	0,8401x-0,0995		0,8656	99,8%	Moyenne 5 min	http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/summary/air-quality-egg-2018-model-summary-report3460a3efc2b6627bf6ff000491a9.pdf?sfvrsn=6	
							0,8563x-0,0514		0,868		Moyenne 5 min		
							0,8294x+0,0746		0,8755		Moyenne 5 min		
					PM2,5		0,5649x+3,4367		0,8423		Moyenne 5 min		
							0,589x+3,513		0,8543		Moyenne 5 min		
							0,551x+3,5134		0,841		Moyenne 5 min		
AirSensEUR	AirSensEUR		Terrain janvier à mi-février 2018		PM10	1	0,5088x+24,687		0,1235	≤14%	Moyenne 5 min	https://www.lcsqa.org/system/files/rapport/LCSQA2017-CLmicrocapteurs-synthese_resultats.pdf	
							0,551x+26,38		0,1304		Moyenne 5 min		
							0,517x+23,812		0,1283		Moyenne 5 min		
					O3			MAPE>100%					
					NO2			MAPE>100%					
AirViz	Speck		Site Denver Colorado de sept 2015 à mars 2016	Altitude, temps sec et température basse Concentration moyenne (1h) de référence 7,8 µg.m ⁻³	PM2.5, µg m ⁻³		0,76x+13		0,24	99 %	Moyenne horaire	https://www.atmos-meas-tech.net/11/4605/2018/	
							0,74x+15		0,4	96 %			
							0,62x+10		0,35	61 %			

Fournisseur	Type de l'appareil	Cout de l'appareil	Type de test	Condition test	mesurande	Nb de µcapteurs testés	Linéarité	Pente	R ² régression	Fiabilité	Période de traitement des données	Source
Alpha Sense	OPC-N2		Terrain janvier à mi-février 2018		PM2,5	1		MAPE=100%		75%<p<90%		https://www.lcsqa.org/system/files/report/LCSQA2017-CLmicrocapteurs-synthese_resultats.pdf
Alphasense	OPC-N2		Terrain (3 novembre 2016 pdt 1 mois) Caroline du Nord US		PM2,5	1	-0,0202x + 22,744		0,0002		Moyenne sur 24h	https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/evaluation-emerging-air-pollution-sensor-performance#pm_sensors
					PM10		0,0183x + 25,025		0,0002		Moyenne sur 24h	https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/evaluation-emerging-air-pollution-sensor-performance#pm_sensors
AlphaSense	OPC-N2		Site Denver Colorado de sept 2015 à mars 2016	altitude, temps sec et température basse Concentration moyenne (1h) de référence 7,8 µg.m ⁻³	PM2,5, µg m ⁻³		0,4x-0,30		0,45	76 %		https://www.atmos-meas-tech.net/11/4605/2018/
							0,49x-1,66		0,34	71 %	Moyenne horaire	
							0,07x+0,6		0,11	82 %		
AlphaSense	OPC-N2		Site Denver Colorado de sept 2015 à mars 2016	Altitude, temps sec et température basse Concentration moyenne (1h) de référence 19,6 µg.m ⁻³	PM10, µg m ⁻³		0,45x+2,98		0,47	76 %		https://www.atmos-meas-tech.net/11/4605/2018/
							0,54x-1,06		0,68	71 %	Moyenne horaire	
							0,12x+2,86		0,2	82 %		
Cairpol	Cairclip NO2		Laboratoire	22°C/60%	NO2	1	0,8950x+5,5		0,9997			JRC Report EUR 26394 EN 2013
Cairpol	Cairsens NO2		Terrain du 22 novembre 2018 au 18 janvier 2019 (référence FRM)		NO2	3	0,2225x + 34,922		0,1636	4,3%	Moyenne 5 min	http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/cairpol-cairsens-no2-field-evaluations.pdf
							0,2113x + 38,996		0,1593		Moyenne 5 min	
							-0,0344x + 43,639		0,0458		Moyenne 5 min	https://www.lcsqa.org/system/files/report/LCSQA2017-CLmicrocapteurs-synthese_resultats.pdf
Cairpol	Cairclip NO2	200 €	Terrain janvier à mi-février 2018		NO2	3		0,52	0,5<R ² <0,75			https://www.lcsqa.org/system/files/report/LCSQA2017-CLmicrocapteurs-synthese_resultats.pdf
							NA	NA	NA	63 %		https://www.atmos-meas-tech.net/11/4605/2018/
											Moyenne horaire	
							-0,04x-23,6		-0,06	63 %		
							1,03x-39,0		0,46	82 %		
Cairpol	CairClip		Site Denver Colorado de sept 2015 à mars 2016	Altitude, temps sec et température basse	NO2, ppb		NA	NA	NA	63 %	Moyenne horaire	https://www.atmos-meas-tech.net/11/4605/2018/
							0,65x-10		0,87	63 %		
							0,67x-15		0,84	82 %		

Fournisseur	Type de l'appareil	Cout de l'appareil	Type de test	Condition test	mesurande	Nb de µcapteurs testés	Linéarité	Pente	R ² régression	Fiabilité	Période de traitement des données	Source
Clarity Movement Co.	Node	1300\$	Laboratoire (référence GRIMM)	20°C/40%	PM2,5 (concentration massique)	2	0,9994x-6,7763		0,9988	100,0%		http://www.aqmd.gov/docs/default-source/daq-spec/summary/clarity-node-summary-report.pdf?sfvrsn=12
Clarity Movement Co.	Node	1300\$	Terrain du 15 février au 25 avril 2018 (référence GRIMM)		PM2,5 (concentration massique)	3	7,726x+2,8856 0,8029x+1,9937 0,7181x+2,9473		0,7327 0,7579 0,7384	97,0%	Moyenne horaire Moyenne horaire Moyenne horaire	https://doi.org/10.1371/journal.pone.0137789 septembre 14, 2015
Shinyei	PPD42NS		laboratoire	<50 µg/m ³	PM2,5	2	3,3731x-0,6629		0,7855			
DYLOS	DC1700 PM	500\$	Laboratoire (référence GRIMM)	20°C/40%	PM0,5-2,5 (comptage)	3	0,93x-23404 (jusqu'à 2,105 particules/L)		0,89	99,0%	Moyenne 5 min	http://www.aqmd.gov/docs/default-source/daq-spec/laboratory-evaluations/dylos-lab-evaluation.pdf?sfvrsn=8
DYLOS	DC1700 PM	500\$	Terrain du 22 août au 10 novembre 2018 (référence GRIMM)		PM2,5 (concentration massique)	3	0,2101x+7,1626 0,2055x+7,2513 0,1822x+7,1903		0,6762 0,6663 0,6727	≈100%	Moyenne 5 min Moyenne 5 min Moyenne 5 min	http://www.aqmd.gov/docs/default-source/daq-spec/field-evaluations/dylos-dc1700-pm-field-evaluation.pdf?sfvrsn=12
DYLOS	DC1100 PRO	300\$	Terrain du 14 novembre 2014 au 9 janvier 2015 (référence GRIMM)		PM0,5-2,5 (comptage)	3	-8E-12x+5E-5x+3,9773		0,81	≈100%	Moyenne 5 min	http://www.aqmd.gov/docs/default-source/daq-spec/field-evaluations/dylos-dc1100-field-evaluation.pdf?sfvrsn=2
DYLOS	DC1100/DC1100 Pro		Site Denver Colorado de sept 2015 à mars 2016	Altitude, temps sec et température basse Concentration moyenne (1h) de référence 7,8 µg m ⁻³	"Small" particle count, hppcf		64x-152 428x-1182 431x-941		0,86 0,78 0,73	82 % 72 % 77 %	Moyenne horaire	https://www.atmos-meas-tech.net/11/4605/2018/
DYLOS	DC1100/DC1100 Pro		Site Denver Colorado de sept 2015 à mars 2016	Altitude, temps sec et température basse Concentration moyenne (1h) de référence 12,0 µg m ⁻³	"Large" particle count, hppcf		1,3x+5,5 5,7x+73 4,9x+84		0,4 0,33 0,27	82 % 72 % 77 %	Moyenne horaire	https://www.atmos-meas-tech.net/11/4605/2018/

Fournisseur	Type de l'appareil	Cout de l'appareil	Type de test	Condition test	mesurande	Nb de µcapteurs testés	Linéarité	Pente	R ² régression	Fiabilité	Période de traitement des données	Source
ECOMESURE	Ecomsmart		Terrain janvier à mi-février 2018		O3	3		MAPE>100%				https://www.lcsqa.org/system/files/rapport/LCSQA2017-CLmicrocapteurs-synthese_resultats.pdf
					NO2			0,81	0,5<R ² ≤0,75	>90%		https://www.lcsqa.org/system/files/rapport/LCSQA2017-CLmicrocapteurs-synthese_resultats.pdf
					PM2,5			2,25	0,5<R ² ≤0,75			https://www.lcsqa.org/system/files/rapport/LCSQA2017-CLmicrocapteurs-synthese_resultats.pdf
ELS Tera	e-PM		Terrain janvier à mi-février 2018		PM2,5	4		0,3	<0,5	>90%		https://www.lcsqa.org/system/files/rapport/LCSQA2017-CLmicrocapteurs-synthese_resultats.pdf
Environmental Instruments Ltd.	AQMesh		Terrain janvier à mi-février 2018		O3	3		MAPE>100%		75%<p≤90%		https://www.lcsqa.org/system/files/rapport/LCSQA2017-CLmicrocapteurs-synthese_resultats.pdf
					NO2			MAPE>100%		75%<p≤90%		https://www.lcsqa.org/system/files/rapport/LCSQA2017-CLmicrocapteurs-synthese_resultats.pdf
					PM2,5			0,8	0,5<R ² ≤0,75	75%<p≤90%		https://www.lcsqa.org/system/files/rapport/LCSQA2017-CLmicrocapteurs-synthese_resultats.pdf
GreenBee	GreenBee		Site de proximité, Site Urbain (Les Frenes Grenoble)	mai-juin 2016	PM10	3	NA ²		de 0,05 à 0,18			https://www.atmo-auvergneonealpes.fr/sites/ra/files/atoms/files/rapport_atmo_aura_azimut_microcapteurs_final_v2.pdf
			Proximité automobile (Le Rondeau)	juillet-septembre 2016		3	0,0362x-0,1584(2) 0,0276x-0,0457(2) 0,033x-0,1735(2)		0,6489 0,6975 0,6479			
			Urbain de fond (Lyon centre)	novembre 2015 - mars 2016		3	0,0347x+0,0799(2) 0,0297x+0,0977(2) 0,0325x+0,0591(2)		0,5071 0,4897 0,5086			
						Moyenne 2 sites PM10	y=18.10 ⁶ x + 11(3)					
						Moyenne 2 sites PM2,5	y=13.10 ⁶ x+7(3)					
						3	NA ²					
GreenBee	GreenBee		site Urbain (Les Frenes Grenoble)	mai-juin	NO2	3	1,1804x 1,1914x 1,305x		0,5459 0,8106 0,9358			
			Proximité automobile (Le Rondeau)	juillet septembre			1,0737x 1,3199x		2,079 1,468			
			Urbain de fond (Lyon centre)	novembre - mars		3	1,3704x		0,107			

Fournisseur	Type de l'appareil	Cout de l'appareil	Type de test	Condition test	mesurande	Nb de µcapteurs testés	Linéarité	Pente	R ² régression	Fiabilité	Période de traitement des données	Source
IQAIR	AirVisual Pro	2695\$	Laboratoire (référence GRIMM)	20°C/40%	PM2,5 (concentration massique)	3	0,53x-0,88		0,99	100,0%	Moyenne 5 min	http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aa-spec/laboratory-evaluations/iair-airvisual-pro---lab-evaluation.pdf?sfvrsn=12
IQAIR	AirVisual Pro	2695\$	Terrain du 2 aout au 5 octobre 2017 (Référence FEMBAM) aucun étalonnage réalisé avant les essais terrain.		PM2,5 (concentration massique)	3	0,6017x+5,8046 0,5073x+6,7944 0,5485x+5,9376		0,6919 0,6933 0,7224		Moyenne horaire Moyenne horaire Moyenne horaire	http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aa-spec/field-evaluations/iair-airvisual-pro---field-evaluation.pdf?sfvrsn=6
IQAIR	AirVisual Pro (V1.1683)	2705\$	Terrain du 15 aout au 11 octobre 2018 (Référence FEMBAM) aucun étalonnage réalisé avant les essais terrain.		PM10 (concentration massique)	3	1,0722x+3,1783 0,8979x+3,9363 0,7547x+5,0982		0,7576 0,7277 0,6929	99,7%	Moyenne horaire Moyenne horaire Moyenne horaire	http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aa-spec/field-evaluations/iair-airvisual-pro---field-evaluation.pdf?sfvrsn=6
Libellium	Waspnote Plug & Sense/Smart Environment PRO		Terrain janvier à mi-février 2018		NO2	1		MAPE<100%		>90%		https://www.lcsqa.org/system/files/rap-port/LCSQA2017-CLmicrocapteurs-synthese_resultats.pdf
			Terrain du 02/11/2018 au 08/01/2019 (référence FEW)		O3		-0,051x+20,733 0,2065x+17,276 -5,1733x+148,88		0,001 0,0042 0,0807	99,9% 84,5% 99,9%	Moyenne horaire	
			Terrain du 02/11/2018 au 08/01/2019 (référence FEW)		NO2		0,0945x+17,374 -0,4463x+41,976 -1,3023x+45,29		0,003 0,0503 0,0302	99,8% 99,9% 99,8%	Moyenne horaire	
MAGNASC SRL	uRADMonitor INDUSTRIAL (Version HW101)	1300 \$	Terrain du 02/11/2018 au 08/01/2019 (référence FRM)		CO	3	-0,1752x+0,5106 1,0486x+0,2217 2,8241x+0,0043		0,0012 0,0128 0,0697	99,9% 99,9% 99,9%	Moyenne horaire	http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aa-spec/field-evaluations/uradmonitor_industrial---field-evaluation.pdf?sfvrsn=6
			Terrain du 02/11/2018 au 08/01/2019 (référence GRIMM)		PM1,0 (concentration massique)		1,3001x+0,5629 1,0553x+2,6248 1,0153x+1,8624		0,7675 0,7405 0,8339		Moyenne horaire	
					PM2,5 (concentration massique)		1,0917x+4,2703 0,8831x+4,2627 0,8418x+4,689		0,7027 0,6735 0,7449	99,9%	Moyenne horaire	
					PM10 (concentration massique)		0,9849x+23,822 0,7821x+26,866 0,7029x+26,706		0,1336 0,1234 0,1215		Moyenne horaire	
Met One Instruments, Inc.	NPM2		Terrain janvier à mi-février 2018		PM2,5	2		1,13	>0,75	45%<pd>75		https://www.lcsqa.org/system/files/rap-port/LCSQA2017-CLmicrocapteurs-synthese_resultats.pdf
	ES-642				PM2,5	1		<0,01	>0,75	45%<pd>75		https://www.lcsqa.org/system/files/rap-port/LCSQA2017-CLmicrocapteurs-synthese_resultats.pdf

Fournisseur	Type de l'appareil	Cout de l'appareil	Type de test	Condition test	mesurande	Nb de µcapteurs testés	Linéarité	Pente	R ² régression	Fiabilité	Période de traitement des données	Source	
PurpleAir	PA-I	150\$	Laboratoire (référence GRIMM) 19/02 au 19/04/2016	20°C/40%	PM1 (concentration massique)	3	0,76x-20,2		0,95	100/100/74,5%	Moyenne 1 min	http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/purpleair---field-evaluation.pdf?sfvrsn=2	
					PM2,5 (concentration massique)		0,35x-2,41		0,997	100,0%	Moyenne 1 min		
			Laboratoire (référence GRIMM) 19/02 au 19/04/2016		PM10 (concentration massique)		0,57x-1,96		0,96	100/66/100%	Moyenne 1 min		
			Laboratoire (référence TSI APS 3321) 19/02 au 19/04/2016				3,11x-28,98		0,97		Moyenne 1 min		
PurpleAir	PA-II	200	Terrain du 8 décembre 2016 au 28 janvier 2017 (Référence GRIMM) aucun étalonnage réalisé avant les essais terrain.		PM1 (concentration massique)	3	0,8125x+1,626		0,9822	95%<p<99%	Moyenne 5 min	http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/purple-air-pa-ii---field-evaluation.pdf?sfvrsn=4	
							0,6969x+1,4848		0,9784		Moyenne 5 min		
							0,638x+1,8793		0,855		Moyenne 5 min		
					PM2,5 (concentration massique)		0,6241x+2,7288		0,9791		Moyenne 5 min		
							0,5655x+2,4318		0,9785		Moyenne 5 min		
							0,5302x+2,5956		0,9028		Moyenne 5 min		
							0,6882x+7,3073		0,7037		Moyenne 5 min		
					PM10 (concentration massique)		0,6099x+6,9361		0,6967		Moyenne 5 min		
RTI	MicroPEM	2000\$	Laboratoire (référence GRIMM)	20°C/40%	PM2,5 (concentration massique)	3	0,31x+9,41		0,99	100,0%	Moyenne 5 min	http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/laboratory-evaluations/rti-micropem---lab-evaluation.pdf?sfvrsn=14	
											Moyenne 5 min	http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/rti-micropem---field-evaluation.pdf?sfvrsn=2	
RTI	MicroPEM	2000\$	Terrain du 10 février au 14 avril 2015 (Référence GRIMM) aucun étalonnage réalisé avant les essais terrain.		PM2,5 (concentration massique)	3	0,5529x+4,3356		0,8684		Moyenne 5 min	http://www.lcsqa.org/system/files/report/LCSQA2017-Clmicrocapteurs-synthese_resultsats.pdf	
					NO2	1		1,52	>0,75	>90%			https://www.lcsqa.org/system/files/report/LCSQA2017-Clmicrocapteurs-synthese_resultsats.pdf
Rubix Senses & instrumentation	Watchtower 1		Terrain janvier à mi-février 2018		PM2,5	1		MAPE>100%		>90%			

Fournisseur	Type de l'appareil	Cout de l'appareil	Type de test	Condition test	mesurande	Nb de µcapteurs testés	Linéarité	Pente	R ² régression	Fiabilité	Période de traitement des données	Source
Rubix Senses & instrumentation	Watchtower 1		Terrain janvier à mi-février 2018		O3	1		<0,01	<0,5	>90%		https://www.lsga.org/system/files/lap-port/LCSQA2017-CLmicrocapteurs-synthese_resultats.pdf
					NO2			1,9	0,5aR ² ≤0,75	>90%		https://www.lsga.org/system/files/lap-port/LCSQA2017-CLmicrocapteurs-synthese_resultats.pdf
					PM2,5			MAPE>100%		>90%		https://www.lsga.org/system/files/lap-port/LCSQA2017-CLmicrocapteurs-synthese_resultats.pdf
SainSmart		170\$	Laboratoire (référence GRIMM)	20°C/40%	PM2,5 (concentration massique)	3	0,79x-4,13 Sur 3 appareils, un est très proche de la référence		0,99	≈100%	Moyenne 5 min	http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aa-spec/laboratory-evaluations/sainSMART-lab-evaluation.pdf?sfvrsn=12
SainSmart		170\$	Terrain du 17 mars au 12 mai 2017 aucun étalonnage réalisé avant les essais terrain		PM2,5 (concentration massique)	3	0,5665x-2,8438		0,7425		Moyenne horaire	http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aa-spec/field-evaluations/sainSMART-field-evaluation.pdf?sfvrsn=6
							0,4781x+3,9572		0,7277		Moyenne horaire	
							0,4975x+4,2246		0,7133		Moyenne horaire	
Shinyei	PM sensor Evaluation Kit	1000\$	Laboratoire (référence GRIMM) 05/02/2015 au 08/04/2015	20°C/40%	PM2,5 (µg/m ³)	3	0,84x-18,46			100,0%	Moyenne 5 min	http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aa-spec/laboratory-evaluations/shinyei-pm-eval-kit-lab-evaluation.pdf?sfvrsn=14
Shinyei	PMS-SYS-1		Site Denver Colorado de sept 2015 à mars 2016	Altitude, temps sec et température basse Concentration moyenne (1h) de référence 7,8 µg.m ⁻³	PM2,5, µg m-3		0,58x+0,24		0,71	73 %		https://www.atmos-meas-tech.net/11/4605/2018/
							0,54x+0,8		0,72	87 %	Moyenne horaire	
							0,42x+4,35		0,013	92 %		
Spec Sensor		500\$	Terrain du 23 novembre 2015 au 26 janvier 2016 référence FRM1 intrument correction de la concentration en fonction de la température (capteur de T° interne)		NO2	4	-0,3172x+28,252 (ppb)		0,1379	96,7%	Moyenne 5 min	http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aa-spec/field-evaluations/spec-sensors-field-evaluation249f86fc2b66f27b16ff000004a91a9.pdf?sfvrsn=2
							-0,2835x+34,701 (ppb)		0,1601	99,5%	Moyenne 5 min	
							-0,0094x+6,1318 (ppb)		0,0004	0,4%	Moyenne 5 min	
							-0,1567x+27,758 (ppb)		0,0586	98,5%	Moyenne 5 min	
Spec Sensor		500\$	Terrain du 23 novembre 2015 au 26 janvier 2016 référence FRM1 intrument correction de la concentration en fonction de la température (capteur de T° interne)		CO	4	-0,1267x+596,21 (ppb)		0,0628	5,5%	Moyenne 5 min	http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aa-spec/field-evaluations/spec-sensors-field-evaluation249f86fc2b66f27b16ff000004a91a9.pdf?sfvrsn=2
							0,6855x+170,6 (ppb)		0,8297	77,3%	Moyenne 5 min	
							-0,2104x+779,71 (ppb)		0,0751	10,2%	Moyenne 5 min	
							0,7736x+120,46 (ppb)		0,8779	89,2%	Moyenne 5 min	
Spec Sensor		500\$	Terrain du 23 novembre 2015 au 26 janvier 2016 référence FRM1 intrument correction de la concentration en fonction de la température (capteur de T° interne)		O3	4	0,164x+10,819		0,0611	85,9%	Moyenne 5 min	http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aa-spec/field-evaluations/spec-sensors-field-evaluation249f86fc2b66f27b16ff000004a91a9.pdf?sfvrsn=2
							0,1953x+5,7843		0,2363	97,0%	Moyenne 5 min	
							0,0396x+14,377		0,0061	90,3%	Moyenne 5 min	
							0,1627x+8,4929		0,1453	95,0%	Moyenne 5 min	

Fournisseur	Type de l'appareil	Cout de l'appareil	Type de test	Condition test	mesurande	Nb de µcapteurs testés	Linéarité	Pente	R² régression	Fiabilité	Période de traitement des données	Source	
TSI	AirAssure	1500\$	Laboratoire (référence GRIMM)	20°C/40%	PM2,5 (concentration massique)	3	0,50x - 5,37 sature au dessus de 150 µg/m3		0,99	≈97%	Moyenne 5 min	http://www.aqmd.gov/docs/default-source/daq-spec/laboratory-evaluations/tsi-airassure---lab-evaluation.pdf?sfvrsn=12	
			Terrain du 18 décembre 2015 au 15 février 2016 (Référence GRIMM) aucun étalonnage réalisé avant les essais terrain.		PM2,5 (concentration massique)	3	0,6959x+0,9655		0,8304	≈100%	Moyenne 5 min	http://www.aqmd.gov/docs/default-source/daq-spec/field-evaluations/tsi-airassure---field-evaluation.pdf?sfvrsn=2	
TSI	AirAssure		Site Denver Colorado de sept 2015 à mars 2016	Altitude, temps sec et température basse	PM1 µg m-3		1,14x+2,64	1,14	0,8	87 %	Moyenne horaire	https://www.atmos-meas-tech.net/11/4605/2018/	
				Concentration moyenne (1h) de référence			1,13x-0,04	1,13	0,78	87 %			
				7,8 µg m-3			1,19x-1,38	1,19	0,81	74 %			
TZOA	PM Research Sensor		Site Denver Colorado de sept 2015 à mars 2016	Altitude, temps sec et température basse	Particle count, hppcf		NA	NA	NA	47 %	Moyenne horaire	https://www.atmos-meas-tech.net/11/4605/2018/	
				Concentration moyenne (1h) de référence			6,68x+1,37	6,68	0,66	47 %			
				7,8 µg m-3			6,75x+2,16	6,75	0,72	47 %			
VAISALA	AQT 410 V1.15	3700\$	Terrain du 6 mars au 3 mai 2018 référence Nox instrument FRM		NO2	3	0,5114x-0,319		0,5447	>96%	Moyenne 5 min	http://www.aqmd.gov/docs/default-source/daq-spec/field-evaluations/vaisala-aqt410-v1-15---field-evaluation.pdf?sfvrsn=6	
			Terrain du 6 mars au 3 mai 2018 référence Nox instrument FRM				0,3927x+1,6073		0,4372		Moyenne 5 min		
							0,5003x-1,7053		0,6051		Moyenne 5 min		
			Terrain du 6 mars au 3 mai 2018 référence Nox instrument FRM		CO		0,9572x+0,2333		0,8026	>96%	Moyenne 5 min		
							0,8902x+0,2417		0,8219		Moyenne 5 min		
							1,0079x+0,2316		0,8297		Moyenne 5 min		
			Terrain du 6 mars au 3 mai 2018 référence Nox instrument FEM		O3		0,7531x+9,8999		0,6653	>85%	Moyenne 5 min		
							0,8882x+666974		0,7077		Moyenne 5 min		
							0,9888x+2,5717		0,8118		Moyenne 5 min		

Fournisseur	Type de l'appareil	Cout de l'appareil	Type de test	Condition test	mesurande	Nb de µcapteurs testés	Linéarité	Pente	R ² régression	Fiabilité	Période de traitement des données	Source
VAISALA	AQ1420		Terrain janvier à mi-février 2018 Références : AS32M (NO2 en ppb) BAM1020 (PM2.5 µg/m ³)		O3	3		MAPE>100%		45%<p<0,75		https://www.lcsqa.org/system/files/report/LCSQA-2017-CI-microcapteurs-synthese_resultats.pdf
					NO2			1,12	0,5<R ² <0,75			https://www.lcsqa.org/system/files/report/LCSQA-2017-CI-microcapteurs-synthese_resultats.pdf
					PM2,5			-0,01	<0,5			https://www.lcsqa.org/system/files/report/LCSQA-2017-CI-microcapteurs-synthese_resultats.pdf
VAISALA	AQ1420		Terrain janvier à mi-février 2018 Référence AS32M (NO2 en ppb) BAM1020 (PM2.5 µg/m ³)		O3	2		MAPE>100%		>90%		https://www.lcsqa.org/system/files/report/LCSQA-2017-CI-microcapteurs-synthese_resultats.pdf
					NO2			MAPE>100%				https://www.lcsqa.org/system/files/report/LCSQA-2017-CI-microcapteurs-synthese_resultats.pdf
					PM2,5			-0,02	<0,5			https://www.lcsqa.org/system/files/report/LCSQA-2017-CI-microcapteurs-synthese_resultats.pdf
42factory	Atmotrack		Terrain janvier à mi-février 2018 Références : BAM1020 (PM2.5 µg/m ³)		PM2,5	3		1,33	0,5<R ² <0,75	45%<p<0,75		https://www.lcsqa.org/system/files/report/LCSQA-2017-CI-microcapteurs-synthese_resultats.pdf

Légendes du tableau précédent :

(1) : réponse du capteur en tension pour une concentration de référence en nmol/mol

(2) : Concentration exprimée en particule par m³ pour les capteurs et en microgramme par m³ pour le TEOM

(3) : Relation de conversion sur nombre de particules en masse

NA : résultats de corrélation non affichés en raison du grand nombre de données manquantes ou invalides

Fiabilité : taux de recouvrement des données « p » lors de la période d'essai.

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

Pour plus de clarté, les publications indiquées dans le tableau ci-dessus ont été compilées ci-après.

Alpha Sense O3 sensors (B4) :

<http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC90463/lb-na-26681-en-n.pdf>

Aéroqual AQY v0.5 : [http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/laboratory-evaluations/aeroqual-aqy-\(v0-5\)---lab-evaluation.pdf?sfvrsn=6](http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/laboratory-evaluations/aeroqual-aqy-(v0-5)---lab-evaluation.pdf?sfvrsn=6)

Aéroqual AQY v0.5 : [http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/summary/aeroqual-aqy-\(v0-5\)-pm-summary-report.pdf?sfvrsn=12](http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/summary/aeroqual-aqy-(v0-5)-pm-summary-report.pdf?sfvrsn=12)

Aeroqual SM-50 : <https://www.atmos-meas-tech.net/11/4605/2018/>

AIRBEAM : <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/laboratory-evaluations/airbeam---laboratory-evaluation.pdf?sfvrsn=10>

AIRBEAM : <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/airbeam---field-evaluation.pdf?sfvrsn=4>

AIRBEAM2 : <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/airbeam2---field-evaluation.pdf?sfvrsn=18>

AirCasting AirBeam : <https://www.atmos-meas-tech.net/11/4605/2018/>

AirCasting Airbeam : https://www.lcsqa.org/system/files/rapport/LCSQA2017-CILmicrocapteurs-synthese_resultats.pdf

Air Quality EGG V.2 : http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/air-quality-egg-v2_co-no2---field-evaluation.pdf?sfvrsn=0

Air Quality EGG 2018 : <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/summary/air-quality-egg-2018-model---summary-report34b0a3efc2b66f27bf6fff00004a91a9.pdf?sfvrsn=6>

AirSensEUR AirSensEUR : https://www.lcsqa.org/system/files/rapport/LCSQA2017-CILmicrocapteurs-synthese_resultats.pdf

AirViz Speck : <https://www.atmos-meas-tech.net/11/4605/2018/>

Alpha Sense OPC N2 : https://www.lcsqa.org/system/files/rapport/LCSQA2017-CILmicrocapteurs-synthese_resultats.pdf

Alphasense OPC N2 : https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/evaluation-emerging-air-pollution-sensor-performance#pm_sensors

AlphaSense OPC-N2 : <https://www.atmos-meas-tech.net/11/4605/2018/>

CairpolCairclip NO2 : JRC Report EUR 26394 EN 2013

CairpolCairsens NO2 : <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/cairpol-cairsens-no2---field-evaluationed40a0efc2b66f27bf6fff00004a91a9.pdf?sfvrsn=6>

CairpolCairclip NO2 : https://www.lcsqa.org/system/files/rapport/LCSQA2017-CILmicrocapteurs-synthese_resultats.pdf

Cairpol CairClip : <https://www.atmos-meas-tech.net/11/4605/2018/>

Clarity Movement Co.Node : <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/summary/clarity-node---summary-report.pdf?sfvrsn=12>

Shinyei PPD42NS : PLOS ONE / DOI:10.1371/journal.pone.0137789 septembre 14,2015

DYLOS DC1700 PM : <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/laboratory-evaluations/dylos---lab-evaluation.pdf?sfvrsn=8>

DYLOS DC1700 PM : <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/dylos-dc1700-pm---field-evaluation.pdf?sfvrsn=12>

DYLOS DC1100 PRO : <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/dylos-dc1100---field-evaluation.pdf?sfvrsn=2>

DYLOS DC1100/DC1100 Pro : <https://www.atmos-meas-tech.net/11/4605/2018/>

ECOMESURE Ecomsmart : https://www.lcsqa.org/system/files/rapport/LCSQA2017-CILmicrocapteurs-synthese_resultats.pdf

ELS Tera e-PM : https://www.lcsqa.org/system/files/rapport/LCSQA2017-CILmicrocapteurs-synthese_resultats.pdf

Environmental Instruments Ltd. AQMesh : https://www.lcsqa.org/system/files/rapport/LCSQA2017-CILmicrocapteurs-synthese_resultats.pdf

GreenBee "GreenBee" : https://www.atmo-auvergnerhonealpes.fr/sites/ra/files/atoms/files/rapport_atmo_aura_azimut_microcapteurs_final_v2.pdf

IQAIR AirVisual Pro : <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/laboratory-evaluations/iqair-airvisual-pro---lab-evaluation.pdf?sfvrsn=12>

IQAIR AirVisual Pro : <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/iqair-airvisual-pro---field-evaluation.pdf?sfvrsn=6>

Libelium Wasp mote Plug & Sense!/Smart Environment PRO : https://www.lcsqa.org/system/files/rapport/LCSQA2017-CILmicrocapteurs-synthese_resultats.pdf

MAGNASCI SRL uRADMonitor INDUSTRIAL (Version HW101) : http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/uradmonitor_industrial---field-evaluationde40a0efc2b66f27bf6fff00004a91a9.pdf?sfvrsn=6

Met One Instruments, Inc. NPM2 : https://www.lcsqa.org/system/files/rapport/LCSQA2017-CILmicrocapteurs-synthese_resultats.pdf

ES-642 : https://www.lcsqa.org/system/files/rapport/LCSQA2017-CILmicrocapteurs-synthese_resultats.pdf

PurpleAir PA-I : <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/purpleair---field-evaluation.pdf?sfvrsn=2>

PurpleAir PA-II : <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/purple-air-pa-ii---field-evaluation.pdf?sfvrsn=4>

RTI MicroPEM : <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/laboratory-evaluations/rti-micropem---lab-evaluation.pdf?sfvrsn=14>

RTI MicroPEM : <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/rti-micropem---field-evaluation.pdf?sfvrsn=2>

Rubix Senses & instrumentation Watchtower 1 :
https://www.lcsqa.org/system/files/rapport/LCSQA2017-CILmicrocapteurs-synthese_resultats.pdf

Rubix Senses & instrumentation Watchtower 1:
https://www.lcsqa.org/system/files/rapport/LCSQA2017-CILmicrocapteurs-synthese_resultats.pdf

SainSmart : <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/laboratory-evaluations/sainsmart---lab-evaluation.pdf?sfvrsn=12>

SainSmart : <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/sainsmart---field-evaluation.pdf?sfvrsn=6>

ShinyeiPM sensor Evaluation Kit : <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/laboratory-evaluations/shinyei-pm-eval-kit---lab-evaluation.pdf?sfvrsn=14>

Shinyei PMS-SYS-1 : <https://www.atmos-meas-tech.net/11/4605/2018/>

Spec Sensor : <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/spec-sensors---field-evaluation249fa8efc2b66f27bf6fff00004a91a9.pdf?sfvrsn=2>

Spec Sensor : <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/spec-sensors---field-evaluation249fa8efc2b66f27bf6fff00004a91a9.pdf?sfvrsn=2>

TSI AirAssure : <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/laboratory-evaluations/tsi-airassure---lab-evaluation.pdf?sfvrsn=12>

TSI AirAssure : <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/tsi-airassure---field-evaluation.pdf?sfvrsn=2>

TSI AirAssure : <https://www.atmos-meas-tech.net/11/4605/2018/>

TZOA PM Research Sensor : <https://www.atmos-meas-tech.net/11/4605/2018/>

VAISALA AQT 410 V1.15 : <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/vaisala-aqt410-v-1-15---field-evaluation.pdf?sfvrsn=6>

VAISALA AQT420 : https://www.lcsqa.org/system/files/rapport/LCSQA2017-CILmicrocapteurs-synthese_resultats.pdf

42 factory Atmotrack : https://www.lcsqa.org/system/files/rapport/LCSQA2017-CILmicrocapteurs-synthese_resultats.pdf



direction et secrétariat du LCSQA

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