

Note technique

Travaux financés par le ministère chargé de l'environnement

METHODOLOGIE D'EVALUATION DES MESURES DE POLLUANTS REGLEMENTES PAR MICRO- CAPTEURS MOBILES POUR UNE UTILISATION DANS UN CADRE REGLEMENTAIRE

Nathalie REDON, Sabine CRUNAIRE, Benoît HERBIN (IMT Lille
Douai)

REMERCIEMENTS

Le LCSQA remercie vivement ATMO HdF et la Direction Energie Développement Durable et Transition Energétique / Réseaux services et Mobilité Transport de la Métropole Européenne de Lille pour les moyens mis à disposition et leur accompagnement logistique autour du développement de cette méthodologie d'évaluation des (micro-)capteurs en mobilité, notamment lors des premiers essais de mise en œuvre terrain sur la Métropole de Lille.

SYNTHESE

Les (micro-)capteurs constituent, depuis quelques années, des outils émergents qui intéressent particulièrement le dispositif national de surveillance de la qualité de l'air (Ministère, AASQA, LCSQA), notamment pour un usage complémentaire aux données des stations de référence. De par leur faible coût et leur facilité de mise en œuvre, ils sont notamment de bons candidats pour des applications dédiées à la construction de cartographies pour de la surveillance continue et spatialisée. Ils peuvent aussi permettre d'enrichir la modélisation de la Qualité de l'Air grâce à des résolutions temporelle et spatiale plus fine [1]. L'application au cas de la pollution atmosphérique en milieu urbain est particulièrement concernée par le déploiement en réseau de ces outils avec de nombreuses initiatives dans le cadre d'actions citoyennes ou de politiques de développement de type « smart city ». En effet, le milieu urbain constitue une cible prioritaire pour l'évaluation des impacts sanitaires car il est caractérisé par une densité de population importante et des

niveaux de concentrations en polluants plus élevés que pour les environnements ruraux par exemple. Une surveillance renforcée des concentrations ambiantes en polluants réglementés tels que le dioxyde d'azote (NO₂) et les particules (PM₁₀ et PM_{2,5}) permettrait de mieux comprendre l'origine de ces polluants, leur étendue spatiale, leur niveau de concentrations et ainsi d'évaluer la pertinence de différentes stratégies de réduction. Pour réduire les coûts, la plupart des solutions « capteurs » déployées en ce sens, s'appuient sur des dispositifs placés sur des véhicules mobiles, afin de couvrir une grande surface pour un nombre réduit de systèmes. Or, si la question de la validité des mesures de capteurs en site fixe commence à être mieux cernée, celle de leurs mesures en situation de mobilité est rarement étudiée. Cette note technique rend compte de l'opportunité d'établir un protocole pour la caractérisation métrologique de capteurs de polluants réglementés en mobilité afin de déterminer la gamme de validité des données fournies, en confrontant les paramètres liés au déplacement aux objectifs de qualité de données (OQD) au sens de la Directive européenne 2008/50/CE.

ABSTRACT

In recent years, sensors have been identified by the French national air quality monitoring system (Ministry, AASQA, LCSQA), as very interesting tools, in particular to complete the data from reference stations. Due to their low cost and ease of implementation, they are good candidates for applications dedicated to build maps for continuous and spatial surveillance. They can also enrich the modeling of Air Quality by refining temporal and spatial resolutions [1]. The case of air pollution in urban areas is particularly concerned by the deployment of sensor networks with many initiatives involving citizen actions or development of "smart city" policies. Indeed, the urban environment is a priority target for the evaluation of health impacts because it is characterized by a high population density and higher levels of pollutant concentrations than for rural environments for example. To better understand the origin of pollutants, it is necessary to reinforce the monitoring of ambient concentrations of regulated pollutants such as nitrogen dioxide (NO₂) and particles (PM₁₀ and PM_{2,5}) and sensors make this possible, especially by addressing their spatial extent, their level of concentrations and thus by assessing the relevance of different reduction strategies. To reduce costs, most "sensor" solutions rely on devices placed on mobile vehicles, in order to cover a large area for a reduced number of systems. However, if the validity of sensor measurements on a fixed site is nowadays better understood, the question of their measurements in a mobile situation is rarely studied. This technical note gives an approach of establishing a protocol for the metrological characterization of sensors of pollutants regulated in mobility, in order to determine the range of validity of the data provided, by comparing the parameters related to movement with the objectives of data quality (OQD) within the meaning of European Directive 2008/50 / EC.

1. CONTEXTE

La grande variété d'applications des micro-capteurs et des systèmes micro-capteurs montre un besoin commun à tout le dispositif national de surveillance de la qualité de l'air d'être en capacité de pouvoir identifier les capteurs adaptés à un usage prédéfini d'intérêt. Parmi les expériences recensées notamment sur la plateforme Capt'Air (<https://captair-lcsqa.fr/>) et les usages identifiés par la note stratégique à paraître définissant le « Cadre d'utilisation des outils micro-capteurs pour la surveillance des polluants réglementés et d'intérêt national » [à paraître en 2020], les utilisations mobiles se multiplient. La plupart d'entre elles se situent en environnement urbain, avec des déploiements en nombre de capteurs sur des moyens de transport privé ou public, pour des objectifs allant de la construction de cartographie (temps réel ou non), au suivi de l'exposition individuelle, ou encore comme outils de sensibilisation à la qualité de l'air.... Les responsables à l'initiative de ces projets peuvent être des acteurs traditionnels de la surveillance, des collectivités locales, mais aussi des opérateurs privés. Par ailleurs, la bibliographie, portant sur la validation métrologique de capteurs dans un usage en mobilité est beaucoup moins foisonnante que celle en usage fixe. Dans la quinzaine d'études relevées, les auteurs associent généralement directement la mesure de chaque capteur mobile à sa géolocalisation, sans se préoccuper de la dynamique de mouvement. Autrement-dit, si les auteurs tiennent compte d'une incertitude de la donnée des capteurs, celle-ci a généralement été déterminée à partir de qualifications métrologiques en situation fixe (en laboratoire ou en conditions réelles par comparaison à une instrumentation de référence), et ne relève presque jamais de l'impact de la mobilité sur la qualité de la mesure. Or l'influence de la vitesse de déplacement sur la qualité de la donnée pose question : quelle est la zone de validité d'une mesure par micro-capteur lors d'un déplacement ? La vitesse de déplacement perturbe-t-elle la mesure et si oui comment en fonction de l'espèce ciblée ? Faut-il raccorder les capteurs mobiles à des points fixes et si oui selon quelle procédure et à quelle fréquence ?

2. ETAT DE L'ART

Afin de proposer une méthodologie judicieuse, un bilan des pratiques en matière de qualification métrologique des capteurs de la qualité de l'air, intégrant la notion de mobilité, a été réalisé. Une revue récente des méthodes d'étalonnage in situ des capteurs pour la qualité de l'air [1], recense dans la bibliographie plus d'une quinzaine de papiers en lien avec l'utilisation de capteurs en mobilité stricte [9, 10] ou associant un usage fixe à un usage mobile [12-16]. La plupart de ces articles évoquent :

- i/ **les algorithmes d'étalonnage** par rapport à des outils de référence [2], en aveugle, c'est-à-dire sans aucun outil de référence [3-9, 11, 16] ou en mode partiellement aveugle [3-8, 10, 14].
- ii/ **différentes stratégies de regroupement de capteurs**, deux à deux [3-5, 8, 9, 15], par groupes restreints [2,6-11], en groupes macroscopiques [10-14, 16].
- iii/ **l'impact des différents paramètres d'étalonnage** sur la qualité de la mesure, en prenant en compte la seule espèce à mesurer, ou bien plusieurs variables d'influence (humidité relative, température, interférents), avec ou sans intégration de la dérive dans le temps [7].

Dans l'ensemble de ces études, la donnée du capteur en mobilité est la plupart du temps assimilée à une donnée fixe associée à ses différentes géolocalisations, comme autant de capteurs différents indépendants placés temporairement tels les points du maillage d'un réseau fixe. La qualité de la donnée du capteur mobile est alors évaluée par comparaison à une donnée considérée comme d'un niveau de qualité supérieure (instrumentation de référence, ou autre capteur lui-même étalonné par comparaison à une instrumentation de référence), placée à proximité du capteur sous test. Deux facteurs sont identifiés comme des éléments clefs d'évaluation de la qualité de la mesure :

- la donnée du capteur mobile n'est prise en compte que lorsque celui-ci est situé dans un rayon limité autour du point de mesure de référence fixe. Les distances proposées varient de quelques dizaines de mètres à plusieurs kilomètres selon l'usage et les contraintes de mises en œuvre sur le terrain [17]. Plus le maillage en points fixes de référence ou équivalent est important, plus la distance entre le capteur mobile et son point de raccordement peut être faible.
- la résolution temporelle entre les mesures des capteurs mobiles et les données de référence sont rarement les mêmes ; il est le plus souvent proposé de prendre comme base temporelle, celle de l'instrument le plus lent, généralement la référence. Les mesures sont alors moyennées sur la durée entre deux pas de la base temporelle de référence.

Les conclusions tirées de ces publications démontrent souvent que la qualité des données des capteurs utilisés en mobilité est moindre que celles de capteurs équivalents placés en réseaux distribués fixes mais sans pourtant quantifier l'impact de la dynamique du mouvement sur l'augmentation de l'incertitude de mesures.

Outre la comparaison à des réseaux de points fixes de référence, certaines stratégies de qualifications en mode embarqué proposées reposent sur deux démarches complémentaires :

- une méthodologie sans instrumentation de référence embarquée. Dans ce cas, les capteurs sont généralement qualifiés préalablement puis à la fin de la campagne mobile soit en conditions contrôlées en laboratoire, soit en conditions réelles sur un site fixe de référence par comparaison à une instrumentation de référence ; on procède alors à une collecte de données en mobilité dans les conditions d'usage prévues pour les capteurs sélectionnés ; par inter-comparaison entre les différents exemplaires d'un même modèle de capteurs, on évalue d'une part l'évolution de l'écart relatif entre capteurs en situation de mobilité, et d'autre part, on en déduit l'impact de la dynamique du mouvement sur la Qualité de Données par rapport à leurs performances en situation fixe [18]
- une méthodologie avec instrumentation de référence embarquée simultanément aux capteurs. Les étapes sont les mêmes que précédemment, mais cette fois en embarquant l'instrumentation de référence associée à l'espèce à détecter dans les mêmes conditions d'usage que celles des capteurs à tester [19]. Outre le fait qu'il est parfois difficile de mettre en œuvre l'instrumentation de référence dans toutes les types d'usage en mobilité, **le verrou majeur de cette méthodologie réside dans l'absence d'étude de l'impact du déplacement sur la qualité de la mesure de référence elle-même.**

Dans tous les cas, les études insistent sur la nécessité de qualifier simultanément plusieurs exemplaires du même modèle de capteur afin d'accéder à l'évaluation de la reproductibilité des systèmes qui est un paramètre métrologique clé pour les exploitations de données associées à un usage en mobilité.

Si en situation fixe, les protocoles de qualifications portent indifféremment sur les capteurs de gaz et de particules, en revanche, dès lors qu'il s'agit de mobilité, les études s'intéressent majoritairement aux capteurs de PM. Ceci peut s'expliquer par deux raisons principales i/ l'intérêt croissant de la population pour les particules fines dont l'impact sanitaire, souligné par l'OMS et largement mis en lumière dans les médias, induit un essor du marché pour ce type de mesures, ii/ le temps de réponse théoriquement très rapide du principe optique utilisé dans les éléments sensibles de ce type de capteurs, laisse supposer un décalage faible entre la donnée relevée et le lieu de passage. La vitesse de réaction de l'élément sensible à l'espèce à détecter est en effet un paramètre clé de l'usage en mobilité. Plus le temps de réponse est lent, plus le décalage entre la valeur vraie de l'espèce à détecter et la valeur relevée par le capteur en déplacement sera important. Dans le cas des capteurs de gaz, l'interaction physique ou chimique à la surface de l'élément sensible impose un temps de séjour suffisant pour que l'espèce cible puisse être détectée. Cette latence risque d'entacher la qualité des mesures lors des déplacements. C'est pourquoi, même si le protocole proposé dans le cadre de cette réflexion est pensé pour être aussi universel que possible, i .e. applicable aussi bien aux capteurs de gaz que de particules, sa mise en œuvre sera tout d'abord proposée pour des applications avec des capteurs de particules.

3. OBJECTIF & DEMARCHE

Dans ce contexte, la présente note a pour objectif d'étudier la faisabilité d'un protocole de qualification de l'impact de la mobilité sur la qualité de la donnée fournie par des capteurs de polluants réglementés, en s'attachant à proposer une méthodologie susceptible de répondre à l'ensemble des questionnements liés à ce type d'usage, en particulier l'influence quantifiée de la vitesse de déplacement sur la qualité des données des capteurs, ainsi que l'influence de la typologie et des conditions environnementales, sous réserve que celles-ci soient mesurées simultanément.

3.1 Méthodologie

Le protocole doit être représentatif d'un maximum d'usages en mobilité. Il repose donc sur une mise en œuvre sur le terrain utilisant le moyen de transport préconisé pour l'application ciblée : piéton, vélo, véhicule avec motorisation similaire à l'usage (électrique, gaz, hydrocarbures, etc.). Par ailleurs, quel que soit le mode de transport testé, **la géolocalisation horodatée**, avec des résolutions spatiale et temporelle élevées, est **le** critère indispensable à l'interprétation des données. L'information {coordonnées GPS ; temps} peut provenir du système capteur lui-même ou d'une instrumentation indépendante, comme le système de repérage du véhicule de transport, un téléphone mobile, une montre connectée, etc. Dans

ces derniers cas, il faut s'assurer de la bonne synchronisation des données entre le capteur et le système de géolocalisation.

Comme tous les protocoles de qualification dédiés à l'évaluation métrologique des capteurs de la Qualité de l'Air, celui-ci a été pensé de sorte à être le plus simple possible dans sa mise en œuvre, pour réduire au maximum les coûts associés, tout en permettant de garantir la qualité des données produites. Le protocole proposé se déroule en 5 phases dont chaque étape est ajustable pour correspondre aux différentes situations d'usages susceptibles d'être rencontrées sur le terrain. Les 5 étapes chronologiques proposées sont représentées sur le schéma suivant et détaillées dans le §3.2 :



Figure 1 : synoptique du protocole de qualification en mobilité

3.2 Descriptif détaillé du protocole

3.2.1 Sélection du ou des itinéraires

La première étape consiste à sélectionner un itinéraire répondant à un cahier des charges contraint. S'il faut répondre à plusieurs questions liées à l'impact de la mobilité sur la qualité des mesures, il sera peut-être nécessaire de définir plus d'un itinéraire.

Pour une situation donnée et son questionnement scientifique associé, l'itinéraire devra :

i/ être représentatif de la zone de mesures dans lequel le capteur sera déployé in fine.

Par exemple, si le capteur est destiné à de la cartographie de particules en milieu urbain en proximité trafic, se placer en zone rurale n'aura pas de sens puisque la nature des particules aura un impact probable sur les données de concentration. En effet le principe physique généralement utilisé pour les capteurs de particules est un comptage optique, et la donnée de concentration est recalculée à partir d'une particule modèle ou d'un modèle d'étalonnage.

ii/ pouvoir être parcouru avec le moyen de transport ciblé par l'étude

Par exemple, on ne pourra se rendre sur une voie rapide en vélo, ou encore un tram ne pourra pas emprunter un autre itinéraire que celui auquel il est destiné.

iii/ être suffisamment long pour atteindre la vitesse maximale à tester en plusieurs points. En outre, si possible, l'itinéraire doit disposer d'un tronçon dont la configuration permet de maintenir une vitesse moyenne constante, dans une gamme d'intérêt pour l'application, avec le véhicule de test.

Par exemple, la sélection d'une ligne droite, sans croisement, sans passage piéton, sans feu de signalisation, permettra à un véhicule de maintenir sa vitesse sans perturbation, éventuellement à différente vitesse de circulation, si la loi le permet.

Un circuit de circulation privé est susceptible d'être adapté, si toutefois il est situé dans un environnement similaire à celui du déploiement final des capteurs.

iv/ enfin, être choisi préférentiellement à proximité d'une ou plusieurs stations de référence du réseau de surveillance de la Qualité de l'Air, à moins d'être en capacité de déployer différents points de mesures avec une instrumentation de référence ou équivalente sur le parcours choisi. Plus, on multiplie les passages à proximité de points de référence, meilleures seront les conclusions associées à l'étude de l'impact de la mobilité. A défaut de stations physiques, les données de modélisation urbaine pourront être utilisées si celles-ci ont une bonne fiabilité et sont disponibles avec une grande résolution temporelle.

Application à un exemple de qualification de capteurs de particules

Pour illustrer le choix d'itinéraires, voici un exemple concernant la qualification de capteurs de particules en mobilité sur le territoire de la Métropole Européenne de Lille, expérimentation menée en partenariat avec ATMO HdF. Les deux questions scientifiques posées sont les suivantes :

- *Les mesures en mobilité sont-elles dépendantes de la typologie du site testé : trafic, urbain, péri-urbain ?*
- *Quelle est l'influence de vitesses comprises entre 0 et 50km sur la qualité des données des capteurs de particules ?*

Pour répondre à la 1^{ère} question, un itinéraire de 34 km passant à proximité des trois stations Atmo HdF représentatifs de trois typologies de sites différentes, a été défini. Sur chaque station, ont été ajoutés des systèmes capteurs de calage et des capteurs dédiés à la mesure mobilité – figure 2-a. Par ailleurs, les données de modélisation sur l'ensemble de la zone couverte étaient accessibles, fournies et validées par ATMO HdF.

Pour répondre à la 2^{ème} question, un itinéraire court de 1,5km, avec 5 points fixes régulièrement répartis sur l'ensemble du trajet, a été défini. Le premier point fixe est équipé d'une instrumentation de référence équivalente (Fidas) et de deux capteurs de calage, tandis que les 4 points fixes suivants sont équipés uniquement de capteurs de calage alimentés sur batteries rechargeables par panneaux solaires. Ce trajet permet de maintenir des vitesses constantes dans la gamme ciblée [0-50km] – figure 2-b.

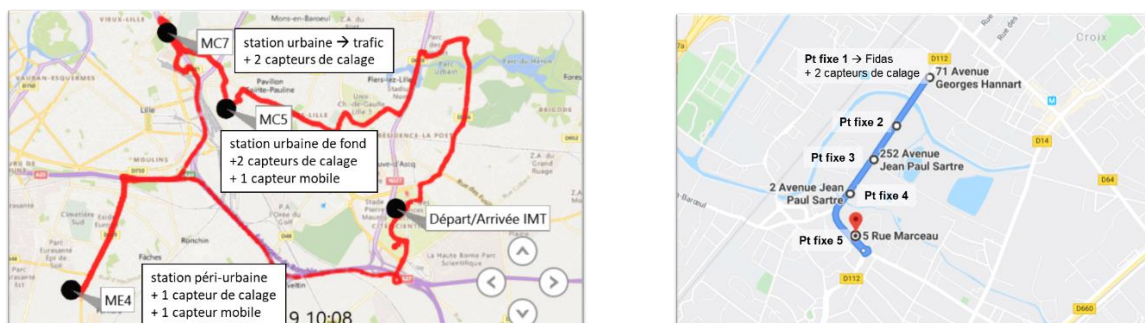


Figure 2 : exemples d'itinéraires pour l'étude de l'impact de la mobilité sur la réponse de capteurs de particules. a- itinéraire long 34km, impact de la typologie de site, b-itinéraire court 1,5km, impact de la vitesse

3.2.2 Installation des points fixes (calages) et mobiles

La deuxième étape consiste à installer d'une part un réseau de points fixes de calage en différents points stratégiques du parcours, et d'autre part à mettre en place les dispositifs de mesure à qualifier en mobilité sur le moyen de transport adéquat.

a. Conditions requises pour l'installation des points fixes/ de calage

Les points fixes, encore appelés dans la suite du document point de calage, ont trois fonctions principales :

- **Qualification métrologique pré-campagne** des capteurs dédiés à la mobilité et des capteurs de référence ou de calage à vitesse nulle. Les capteurs mobiles doivent être tous identiques (même référence constructeur), et les capteurs de calage également. Cependant, il n'est pas nécessaire que capteurs mobiles et capteurs de calage soient de la même référence. Par ailleurs, les capteurs de calage peuvent être des appareils de référence équipant habituellement des stations fixes. L'objectif sera de déterminer l'état initial de fonctionnement des capteurs et de choisir le cas échéant parmi le pool de capteurs à disposition, des dispositifs qui pourront également être déployés en tant que point fixes de calage sur le parcours.
- **Référence métrologique lors de la campagne en mobilité** : tout au long du parcours en mobilité, il faut distribuer des points de qualification en fixe, afin de caler les données mobiles. Plus la densité de points de calage pour la comparaison est importante, meilleures seront les conclusions de l'étude.
- **Qualification métrologique post-campagne** des capteurs dédiés à la mobilité et des capteurs de référence ou de calage à vitesse nulle. Les capteurs mobiles doivent être tous identiques (même référence constructeur), et les capteurs de calage également. Cependant, il n'est pas nécessaire que capteurs mobiles et capteurs de calage soient de la même référence. Par ailleurs, les capteurs de calage peuvent être des appareils de référence équipant habituellement des stations fixes. L'objectif sera de déterminer si le pool de capteurs ayant servi tant en mobilité, qu'en point de calage, a dérivé dans le temps durant la campagne.

Par conséquent, les contraintes de l'installation en point de calage sont les suivantes :

i/ être équipée d'une instrumentation de référence pour les polluants mesurés par le ou les capteurs à qualifier ; cette instrumentation de référence peut être suppléée et/ou remplacée par un capteur soit du même type que celui sous test, soit d'un niveau de Qualité de Données supérieur, et sous réserve que celui-ci ait été préalablement ajusté par comparaison à une instrumentation de référence, dans un environnement similaire à celui dans lequel il sera déployé. Ce capteur sera dénommé « capteur de calage ».

ii/ être située sur le parcours choisi en respectant une distance minimale entre le point d'installation et le passage du véhicule. Cette distance doit répondre aux critères de représentativité des stations fixes, i.e. passage dans un rayon de 25m autour du point pour les zones trafic, passage dans un rayon de 50m pour les autres situations [Rapport LCSQA R2].

iii/ disposer de toute l'infrastructure nécessaire permettant l'alimentation en énergie et la protection de l'instrumentation déployée (références et capteurs, pompe de prélèvement le cas échéant).

Pour l'un au moins des points fixes, il faudra prévoir si possible une instrumentation complémentaire permettant d'accéder aux paramètres environnementaux : température, humidité relative, orientation et vitesse de vent, pluviométrie, etc. Si l'itinéraire couvre une zone géographique assez large pour que la météo locale puisse différer d'un point à l'autre, il faudra multiplier l'instrumentation pour une bonne représentativité de mesure de ces paramètres environnementaux.

NB : s'agissant d'installations sur la voie publique, il est indispensable d'obtenir au préalable toutes les autorisations nécessaires auprès des administrations concernées (collectivités locales, services de police, etc.) sur la période d'essais (installation/désinstallation et expérimentation).

Application à un exemple de qualification de capteurs de particules

Sur l'itinéraire de 1,5km présenté en figure 2-a, l'installation de l'instrumentation de référence au point fixe n°1 a nécessité la mise en place d'une plateforme instrumentale (OMEGA – IMT Lille Douai, image de gauche sur la Figure 3), alimentée sur le secteur de la ville de Wasquehal, et équipée d'un FIDAS et de deux capteurs de particules de calage.

Les points fixes n°2 à 5, comportent uniquement un capteur de calage par point fixe, chacun alimenté sur batterie, elle-même rechargée par panneaux solaires – image de droite sur la Figure 3.



Figure 3 : exemples d'installation de points fixes sur l'itinéraire court lors de l'expérimentation MEL.

b. Conditions requises pour l'installation des capteurs qualifiés en mobilité

Les contraintes sur le véhicule supportant les capteurs mobiles sont les suivantes :

- disposer d'une source d'énergie :
 - apte à alimenter tous les capteurs installés sur une durée suffisante pour mener plusieurs essais à différentes vitesses de circulation
 - présentant une autonomie minimale d'une durée deux fois supérieure à la durée prévue des essais, sans coupure ni recharge ; en effet, pour être en mesure de décorrélérer l'impact de la vitesse de celui lié aux paramètres environnementaux, il faut pouvoir mener un maximum d'essais à différentes vitesses de circulation

tant que ces conditions environnementales sont stables (i.e. conditions météo, natures et niveaux de pollutions).

- être le moins impactant possible sur son environnement proche et donc sur les mesures capteurs, autrement dit, disposant lui-même d'une source d'énergie propre, de préférence électrique.
- être autorisé à circuler sur l'itinéraire sélectionné
- disposer si possible d'une géolocalisation horodatée synchronisée avec celle des capteurs
- être capable d'atteindre les vitesses d'intérêt pour l'application

Les contraintes sur les capteurs sont les suivantes :

- Disposer d'un nombre minimum de capteurs d'une même référence à tester. Le nombre minimum conseillé est cinq (5), de sorte à obtenir une bonne représentativité statistique des mesures
- Etre placés sur le véhicule dans leur mode d'usage habituel, en tenant compte de la fluide (par exemple collés ou surélevés par rapport au toit d'un véhicule motorisé, ou si placés dans un panier de vélo, les fixer dans le sens de circulation, etc.)
- présentant une autonomie minimale d'une durée deux fois supérieure à la durée prévue des essais, sans coupure ni recharge, ou pouvant être alimentés par le véhicule lui-même.
- La résolution temporelle des données des capteurs doit être assez fine pour que la probabilité d'obtenir une mesure lors du passage dans le rayon normalisé autour de chaque point fixe soit grande, et ce, pour toute la gamme de vitesse ciblée
- Etre équipé en propre si possible d'un système de géolocalisation horodatée des données
- Etre robuste en matière de remontée des données, car il est crucial de ne pas perdre l'information lorsque la vitesse est élevée et que la concordance avec les points fixes de référence et/ou calage est limitée.

Application à un exemple de qualification de capteurs de particules

Lors de l'expérimentation en mobilité sur le territoire de la MEL, 8 capteurs d'une même référence ont été placés sur des barres de toit et alimentés par la batterie d'une Renault Zoé électrique, présentant une autonomie de plus de 200km.



Figure 4 : exemples d'installation de capteurs sur un véhicule électrique.

Pour déterminer l'impact du choix du véhicule sur la qualité des mesures, une série de tests a été menée sur une journée et à différentes vitesses de circulation, en positionnant successivement les barres de toit avec leurs capteurs à tester sur la Zoé, puis sur un véhicule Renault clio Diesel de première génération.

3.2.3 Etalonnage en points fixes

Cet étalonnage doit intervenir en amont et en aval de la campagne de mesure en mobilité, et au plus proche de la période d'essai en mobilité. Il faut que l'ensemble des systèmes à tester (capteurs mobiles ou systèmes servant de points fixes de calage) soit placés simultanément sur un même site, représentatif du milieu environnemental de leur application et du ou des itinéraires de qualification. Pour l'ensemble des polluants ciblés, l'étalonnage doit suivre les protocoles proposés dans les notes LCSQA et la grille de qualification métrologique associé [Rapports LCSQA R1-1, R1-2, R1-3]. L'objectif sera de sélectionner, parmi le pool de capteurs à disposition, des systèmes dont la qualité des données est suffisante pour servir de point de calage fixe, mais aussi de déterminer si les capteurs dérivent sur la durée de la campagne afin d'en tenir compte pour exploiter les données le cas échéant.



Figure 5 : exemples d'installation de capteurs de calage sur station péri-urbaine ATMO HdF

3.2.4 Qualification en mobilité

Les essais de qualification métrologique en mobilité doivent être menés de sorte à répondre à une ou plusieurs questions scientifiques précises qu'il faut clairement expliciter au préalable, car les attentes sur la qualité des données ne sont pas la même selon l'usage auquel est destiné le capteur sous test (voir note LCSQA à paraître « quel capteur pour quel usage »).

Lors des essais en mobilité, il faudra s'assurer de respecter certaines conditions de réalisation comme :

- Garantir la représentativité des qualifications vis-à-vis de la situation prévisible lors du déploiement des capteurs en mobilité en menant par exemple les tests, à différentes saisons, sous différentes conditions météo, sur différents horaires (jour/nuit, matin, midi, après-

midi), sur différentes périodes d'activités anthropiques (jours ouvrés/week-end/vacances scolaires), en tenant compte des effets très locaux qui peuvent influencer la mesure (présence de travaux, bouche d'aération du métro, etc.)

- La vitesse de circulation doit pouvoir être déterminée, soit par mesure directe, soit par calcul à partir de l'horodatage et du positionnement en 2 points, lors des passages en concordance avec les points fixes de calage/référence.

Pour rappel, la géolocalisation horodatée du véhicule, synchronisée avec les capteurs mobiles, comme avec les instruments déployés en point fixe est essentielle. En effet, pour déterminer l'impact de la vitesse sur la qualité des mesures, il ne faut tenir compte que des points de concordance avec les points fixes, comme le montre la Figure 6 :

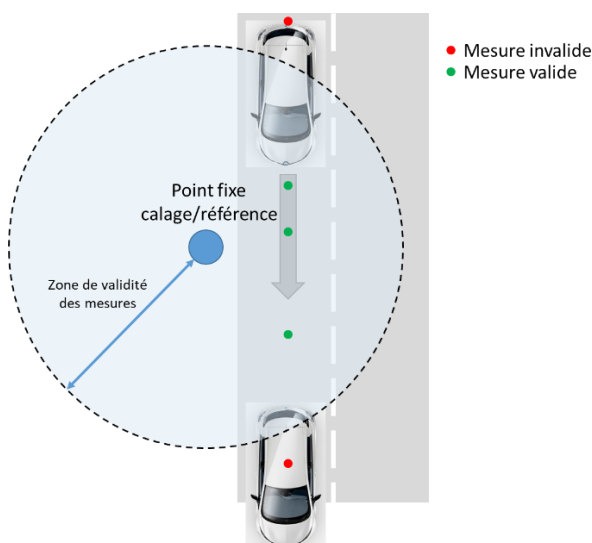


Figure 6 : zone de validité des mesures en mobilité autour des points fixes

La zone de validité des mesures répond aux mêmes critères que ce qui est demandé en matière de représentativité des stations de référence [Rapport LCSQA R2], c'est-à-dire :

- un rayon de 25m autour de station trafic
- un rayon de 50m autour des autres types de points

Il est par conséquent conseillé de tolérer une précision inférieure ou égale à $\pm 5\text{m}$ pour le système de géolocalisation déployé lors des essais.

Compte-tenu du faible nombre de points de concordance entre les mesures en mobilité et les points fixes, il faudra multiplier les passages pour augmenter la représentativité statistique des mesures. Cependant, pour permettre une interprétation judicieuse des données, il faut que les conditions environnementales durant ces passages restent stables. Par stable, on entend, des variations inférieures aux incertitudes associées aux capteurs testées, déterminées durant la phase de qualifications métrologiques préalables en site fixe. En conséquence, il faudra trouver **un compromis entre le nombre de passages et la durée entre le premier et le dernier passage.**

Application à un exemple de qualification de capteurs de particules

Lors de l'expérimentation en mobilité sur le territoire de la MEL, les capteurs ont été testés d'une part sur l'itinéraire long pendant 23 boucles d'une heure réparties sur une période de deux semaines, et d'autre part sur l'itinéraire court pendant 115 boucles d'une heure réparties sur une période de deux semaines comme indiqués dans le tableau suivant :

Vitesse testée	Durée du test	Nombre de tours	Date	Matinée (AM) ou Après-midi (PM)
10km/h	1h01	4	04/06/2019	AM
	54min	4	11/06/2019	AM
	1h07	4	12/06/2019	PM
	54min	3	14/06/2019	AM
20km/h	1h15	8	04/06/2019	AM
	1h03	6	07/06/2019	AM
	55min	7	13/06/2019	AM
	54min	7	13/06/2019	PM
30km/h	55min	8	04/06/2019	PM
	40min	7	05/06/2019	AM
	45min	7	07/06/2019	AM
40km/h	51min	9	07/06/2019	PM
	53min	10	12/06/2019	AM
46km/h	35min	6	07/06/2019	PM
	35min	6	13/06/2019	PM
	55min	11	14/06/2019	AM
50km/h	40min	8	14/06/2019	AM

3.2.5 Traitement horodaté et géolocalisé des données

Les pas de temps de remontée des données des différents instruments de référence, capteurs et systèmes de géolocalisation ont une forte probabilité de ne pas être synchronisés, et encore moins de tomber sur une valeur strictement exacte. C'est pourquoi un prétraitement pour homogénéiser l'horodatage global des données sera probablement nécessaire avant d'aborder le traitement des données en tant que tel. Le tempo de base choisi correspond à l'instrument disposant du pas de temps le moins rapide. On procède alors en 3 étapes :

i/ pour les données dont la résolution temporelle est plus élevée que le tempo de base, on recherche la valeur temporelle supérieure la plus proche du repère temporel du signal le plus lent $(t_n)_{\text{signal lent}}$, avec un écart acceptable au regard de l'usage attendu, au maximum égale à la résolution temporelle recherchée.

ii/ trois options sont proposées à ce stade, mais d'autres pourront être envisagées et documentées lors de la mise en application du protocole sur le terrain :

- soit on calcule la valeur moyenne du système le plus rapide sur la durée entre le repère temporel en cours et le repère précédent : $\text{durée} = (t_n)_{\text{signal lent}} - (t_{n-1})_{\text{signal lent}}$ et on affecte cette

valeur moyenne au repère en cours sur le tempo de base, i.e. t_n (conseillé dans le cas de mesures de concentrations en polluants)

- soit on calcule la valeur moyenne centrée sur le repère temporel en cours $(t_n)_{\text{signal lent}}$ du système le plus rapide, en prenant en compte les mesures entre le repère temporel précédent $(t_{n-1})_{\text{signal lent}}$ et le repère temporel suivant $(t_{n+1})_{\text{signal lent}}$
- soit on affecte directement la valeur du repère le plus proche au repère du tempo de base (conseillé dans le cas de coordonnées GPS)

iii/ on construit enfin un tableau disposant d'un horodatage commun à toutes données, instrumentation de référence, capteurs, données environnementales complémentaires, GPS, etc. en attribuant aux données recalculés, la valeur de l'horodatage du tempo de base.

La Figure 7 présente un exemple de méthode de synchronisation des données entre un instrument de référence plus rapide que la donnée d'un capteur sous-test. On recherche dans la colonne des temps de l'instrument de référence la valeur la plus proche du tempo de base du capteur.

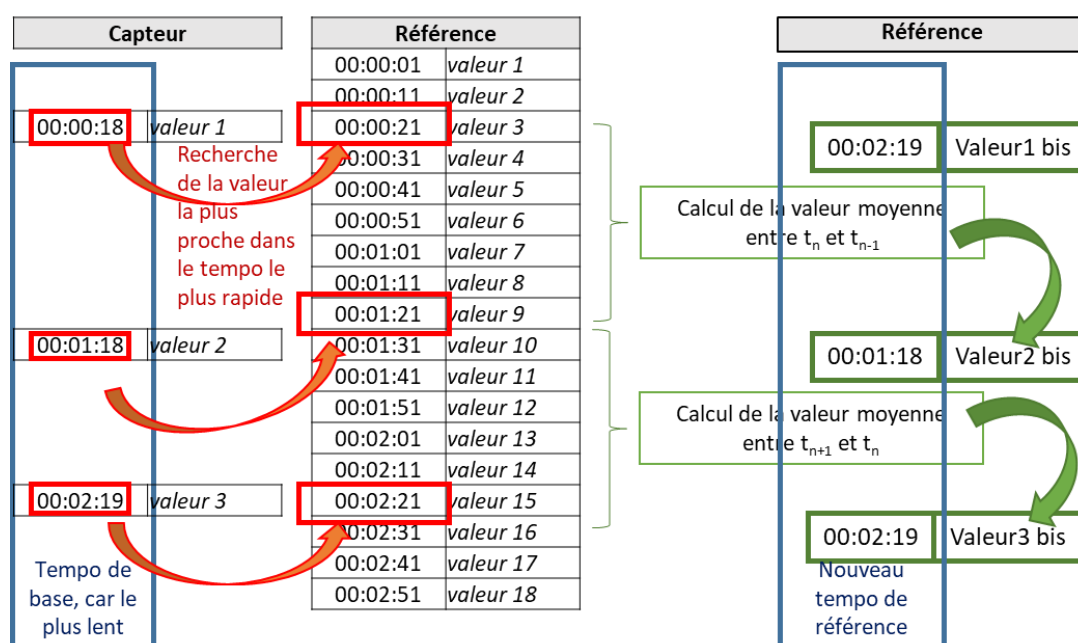


Figure 7 : exemple de méthodes de synchronisation de données polluants

Le traitement des données se déroule ensuite en deux temps :

- Détermination des paramètres métrologiques d'intérêt en situation fixe, en amont et en aval de la campagne :

Cette première phase est similaire aux comparaisons de terrain déjà décrites dans les Essais d'Aptitudes de Micro-capteurs déjà réalisées par le LCSQA : [Rapports LCSQA R3 & R4]

Les quatre résultats majeurs de la qualification métrologique en points fixes sont respectivement :

- la courbe de corrélation {capteurs de calage} = fonction (instrumentation de référence)
- la courbe de corrélation {capteurs mobiles} = fonction (instrumentation de référence)

iii/ la courbe de corrélation {capteurs mobiles} = fonction (capteurs de calage)

iv/ pour l'ensemble des trois courbes, la dérive éventuelle entre les évaluations amont et aval

b. Détermination des paramètres métrologiques d'intérêt en situation de mobilité

Comme indiqué sur la figure 6, seules les données collectées à proximité des points de référence sont interprétables, ainsi que la dynamique de passage d'un point à un autre.

L'idée sera de comparer les valeurs moyennes des points de référence sur une période de stabilité environnementale (météo/pollution), aux valeurs moyennes des mesures effectuées par les capteurs en mobilité.

Une représentation graphique typique est proposée sur la Figure 8. Sur l'axe des ordonnées, on reporte la valeur moyenne de la mesure du polluant ciblé, sur l'axe des abscisses, on reporte les différents points fixes de référence distribués sur le parcours. En vert sont données les valeurs moyennes et écart-types des instruments de référence et en bleu sont notées les valeurs moyennes et écart-types des capteurs de calage.

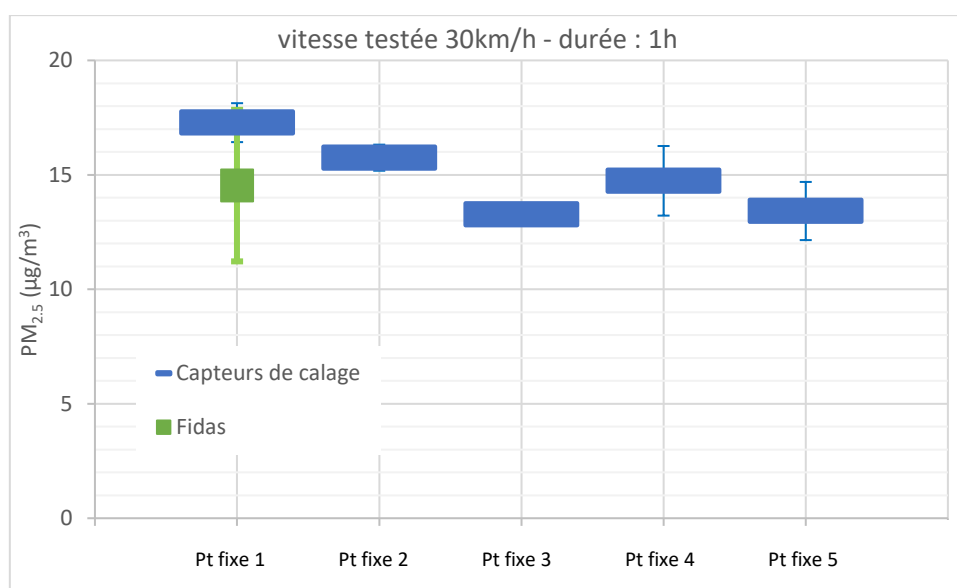


Figure 8 : représentation graphique des mesures en points fixes (mesures issues de l'instrumentation de référence et/ou mesures issues de capteurs de calage)

Sous réserve d'avoir vérifié les données de calage, ce graphique permet de déterminer la variabilité géographique de la pollution sur le parcours. On constate également dans l'exemple donné un écart entre la mesure de référence et la donnée de calage. Il faudra se reporter aux qualifications métrologiques en site fixe pour ajuster la donnée de calage le cas échéant.

On ajoute ensuite les valeurs moyennes calculées sur l'ensemble des capteurs installés sur le véhicule en mobilité lors des passages dans la zone de concordance géographique avec les points fixes.

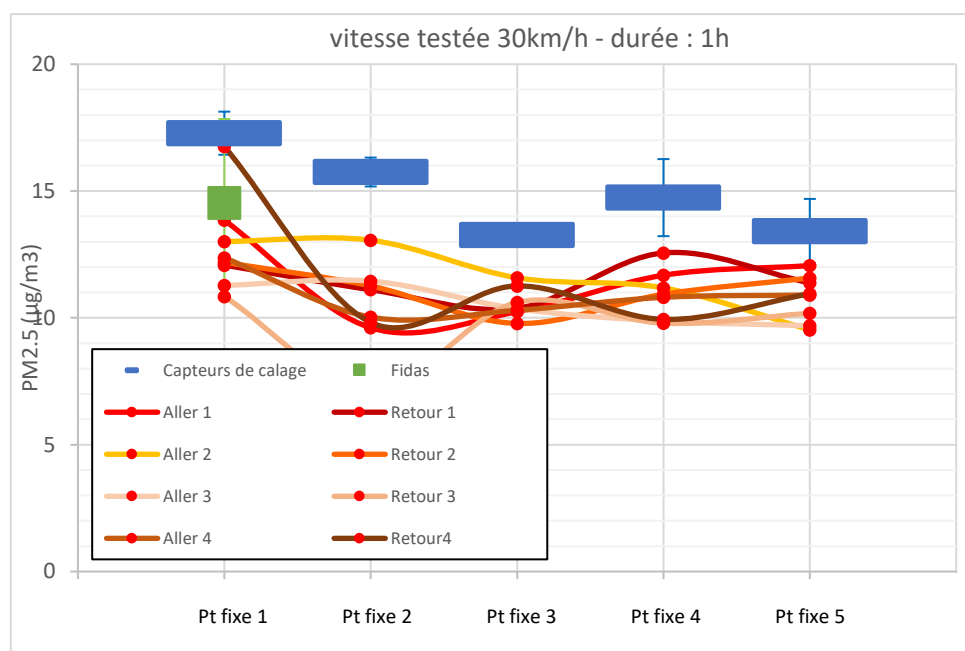


Figure 9 : représentation graphique des mesures par capteurs mobiles (moyenne tous capteurs) par rapport aux données de calage

En déterminant ce graphe pour différentes vitesses de circulation, il est alors possible d'extraire plusieurs paramètres indicateurs de l'influence de la vitesse sur la qualité des mesures : par exemple, l'écart relatif de la donnée mobile à la donnée de calage ainsi que son écart-type associé, ce qui peut notamment informer l'utilisateur sur le rôle de la fluidique dans la conception du capteur, ou permettre de définir une gamme de validité de mesure au regard des OQD attendus pour l'usage défini.

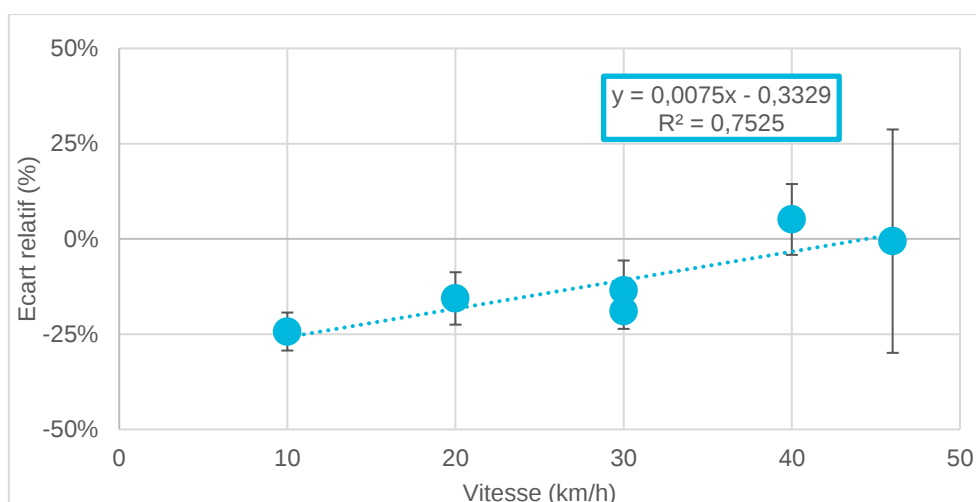


Figure 10 : exemple de représentation graphique de l'écart relatif de la donnée mobile (moyenne tous capteurs) à la donnée de calage avec écart-type associé, en fonction de la vitesse de déplacement

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Déterminer l'impact du déplacement sur la Qualité de la Donnée d'un capteur utilisé en mobilité est essentiel si on veut interpréter correctement l'information qu'il fournit. Les enjeux sont particulièrement lourds lorsqu'il s'agit de construire une cartographie en temps réel, par exemple pour déclencher des alertes ou identifier des sources de pollution ultra-localisées, ou encore si on souhaite enrichir des modèles à moindre coût. Profiter d'une augmentation radicale de la résolution spatiale en profitant de la multiplication des points géographiques offerts par un véhicule en déplacement est une bonne idée en soi. Encore faut-il être capable de démontrer que les mesures fournies par le capteur associé au véhicule en déplacement ne sont que peu voire pas dégradées, ou si c'est le cas, dans quelles proportions.

Le protocole proposé ici se veut aussi universel que possible et prétend répondre à une multitude de situations et d'usages déjà identifiés dans le domaine des capteurs de la qualité de l'air. Deux mises en situation ont pu être testées sur le terrain en partenariat avec une AASQA (ATMO HdF) et les résultats feront l'objet d'une publication postérieure.

Les premières conclusions des différents acteurs impliqués dans la construction de ce protocole mettent en lumière que les étapes proposées, quoique parfois délicates à mettre en œuvre sur le terrain, répondent de manière rigoureuse aux différentes questions scientifiques posées sur le sujet de la mobilité.

R1-1 :

www.lcsqa.org/fr/rapport/developpement-dun-protocole-pour-levaluation-en-laboratoire-des-capteurs-de-pm

R1-2 :

www.lcsqa.org/fr/rapport/2016/mines-douai/protocole-determination-caracteristiques-performance-metrologique-micro-cap

R1-3 :

www.lcsqa.org/fr/rapport/2015/mines-douai/etablissement-protocole-determination-laboratoire-caracteristiques-performa

R2 :

www.lcsqa.org/fr/rapport/2016/imt-ld-ineris/guide-methodologique-stations-francaises-surveillance-qualite-air

R3 :

www.lcsqa.org/fr/rapport/premier-essai-national-daptitude-des-micro-capteurs-eamc-pour-la-surveillance-de-la-qualite

R4 :

EAMC 2 - Résultats du 2nd Essai national d'Aptitude des micro-Capteurs (EAMC) utilisés pour la surveillance de la qualité de l'air – à paraître en 2020

BIBLIOGRAPHIE

1 - Florentin Delaine, Delaine Bérengère, Lebental, Hervé Rivano "In Situ Calibration Algorithms for Environmental Sensor Networks: A Review", *IEEE Sensors Journal* 19(15), DOI: 10.1109/JSEN.2019.2910317

2 - E. Miluzzo, N. D. Lane, A. T. Campbell, and R. Olfati-Saber, "CaliBree: A self-calibration system for mobile sensor networks," in *Distributed Computing in Sensor Systems*. Berlin, Heidelberg:

Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp. 314–33

3 - W. Tsujita, H. Ishida, and T. Moriizumi, "Dynamic gas sensor network for air pollution monitoring and its auto-calibration," in *SENSORS, 2004 IEEE*, Vienna, 2004, pp. 56–59. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1426098/>

4 - Y. Xiang, L. Bai, R. Piedrahita, R. P. Dick, Q. Lv, M. Hannigan, and L. Shang, "Collaborative calibration and sensor placement for mobile sensor networks," in *2012 ACM/IEEE 11th International*

Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN), 2012, pp. 73–83. [Online]. Available: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2185677.2185687>

5 - K. Fu, W. Ren, and W. Dong, "Multihop Calibration for Mobile Sensing: k-hop Calibratability and Reference Sensor Deployment," in *IEEE INFOCOM 2017 - IEEE Conference on Computer Communications*, 2017, pp. 1–9

6 - B. Maag, Z. Zhou, O. Saukh, and L. Thiele, "SCAN: Multi-Hop Calibration for Mobile Sensor Arrays," in *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, vol. 1, no. 2, 2017, pp. 19:1–19:21.

[Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/3090084>

7 - A. Arfire, A. Marjovi, and A. Martinoli, "Model-based rendezvous calibration of mobile sensor networks for monitoring air quality," in *2015 IEEE SENSORS*, 2015, pp. 1–4.

8 - J.-F. Markert, M. Budde, G. Schindler, M. Klug, and M. Beigl, "Privacy-Preserving Collaborative Blind Macro-Calibration of Environmental Sensors in Participatory Sensing," *EAI Endorsed Transactions on Internet of Things*, vol. 18, no. 10, pp. 1–8, 2018.

9 - F. Sailhan, V. Issarny, and O. Tavares-Nascimento, "Opportunistic Multiparty Calibration for Robust Participatory Sensing," in *Proceedings - 14th IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems*, MASS 2017, 2017, pp. 435–443.

10 - M. Takruri, K. Aboura, and S. Challa, "Distributed recursive algorithm for auto calibration in drift aware wireless sensor networks," *Innovations and Advanced Techniques in Systems, Computing Sciences and Software Engineering*, pp. 21–25, 2008

11 - S. Buadhachain and G. Provan, "A model-based control method for decentralized calibration of wireless sensor networks," in *2013 American Control Conference*, 2013, pp. 6571–6576

12 - C. Wang, P. Ramanathan, and K. K. Saluja, "Blindly Calibrating Mobile Sensors Using Piecewise Linear Functions," in *2009 6th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*, 2009, pp. 1–9

13 - C. Xiang and P. Yang, "An Iterative Method of Sensor Calibration in Participatory Sensing Network," in *2013 IEEE 10th International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems*, 2013, pp. 431–432. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6680278/>

14 - C. Dorffer, M. Puigt, G. Delmaire, and G. Roussel, "Blind Calibration of Mobile Sensors Using Informed Nonnegative Matrix Factorization," in *12th International Conference on Latent Variable Analysis and Signal Separation (LVA/ICA 2015)*, 2015, pp. 497–505

15 - H. Ye, T. Gu, X. Tao, and J. Lu, "SBC : Scalable Smartphone Barometer Calibration through Crowdsourcing," in *11th International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services*, 2014.

16 - S.-c. Son and B.-t. Lee, "A Blind Calibration Scheme using a Graph Model for Optical Mobile Sensor Network," in *2014 12th International Conference on Optical Internet 2014 (COIN)*, no. 3, 2014, pp. 5–6

17 - X. Qin, L. Hou, J. Gao, S. Si, "The evaluation and optimization of calibration methods for low-cost particulate matter sensors: inter-comparison between fixed and mobile methods", *Science of the Total Environment* 715 (2020), doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136791

18 - B. Languille, V. Gros, N. Bonnaire, C. Pommier, C. Honoré, C. Debert, L. Gauvin, S. Srairi, I. Annesi-Maesano, B. Chaix, K. Zeitouni, « A methodology for the characterization of portable sensors for air quality measure with the goal of deployment in citizen science, *Science to the Total Environment* 708 (2020), doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134698

19 - Challenge Micro-capteurs – AirLab – édition 2019

http://www.airlab.solutions/sites/default/files/airlab/2018_output_v2019_FR.pdf