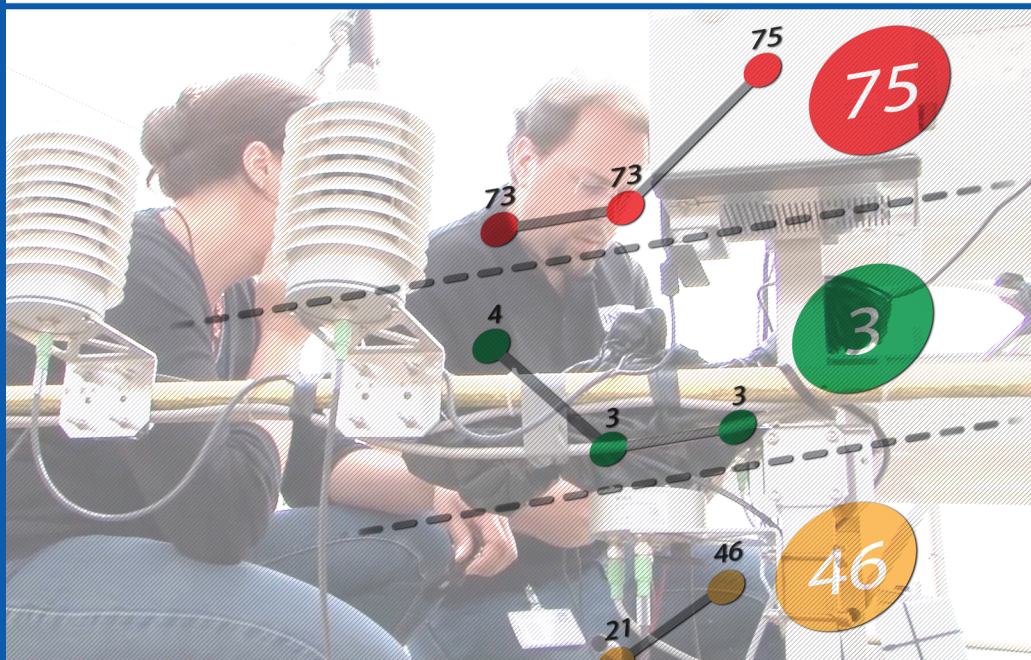


Les micro-capteurs

Dossier technique 2018



La situation nationale et internationale

Depuis mars 2017, le dispositif national de surveillance de la qualité de l'air s'est organisé autour d'un groupe de travail (GT) sur les micro-capteurs pour l'évaluation de la qualité de l'air. Il réunit des membres du LCSQA, des représentants de chacune des AASQA et des membres du ministère chargé de l'environnement. Son périmètre d'action, limité initialement à la qualité de l'air ambiant extérieur, aux espèces chimiques réglementées et aux mesures en sites fixes, s'est élargi à d'autres besoins identifiés par les membres du GT, tels que la cartographie, les mesures embarquées, ou les polluants émergents, comme représenté sur le schéma.

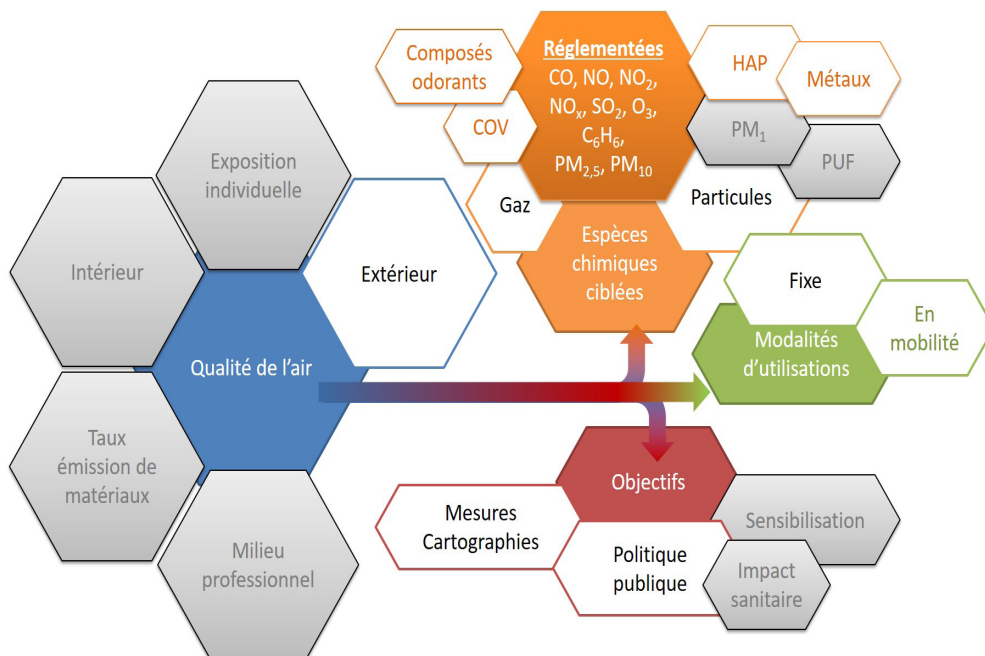
Ce GT a pour objectif de :

- définir les utilisations potentielles des micro-capteurs pour la surveillance réglementaire ;
- identifier des applications émergentes pour des polluants d'intérêt national, et/ou pour d'autres modalités d'usage que la surveillance en points fixes ;
- organiser le partage d'expérience et le retour d'informations vers les utilisateurs potentiels pour mieux appréhender les modalités d'usage et d'accompagnement à mettre en place.

Ce GT a permis la création de la base de données Capt'air ; une note stratégique sur le thème "quels capteurs pour quel usage ?" sera produite en 2019.

Au niveau international et par l'intermédiaire de ses membres, le LCSQA participe aux différentes instances européennes traitant de la surveillance de la qualité de l'air. Ces dernières années les instances européennes se sont emparées de la problématique des micro-capteurs. A ce titre, le LCSQA prend part aux discussions du groupe de normalisation européen CEN/TC 264/WG 42 en charge de la rédaction de spécifications techniques (TS) pour l'évaluation des performances des micro-capteurs utilisés pour l'évaluation de la qualité de l'air en site fixe. Deux livrables de ce groupe de travail européen définissant les critères d'évaluation des micro-capteurs pour leur utilisation dans un contexte réglementaire devraient paraître fin 2020 pour les gaz et à l'horizon 2025 pour les particules.

De même, le LCSQA apporte l'expérience française sur les micro-capteurs dans les réseaux d'experts sur la mesure (AQUILA, <https://ec.europa.eu/jrc/en/aquila>) et la modélisation (forum FAIRMODE, <https://fairmode.jrc.ec.europa.eu/>).



Les travaux du LCSQA

Etat de l'art

Les premiers travaux du LCSQA sur les micro-capteurs datent de la fin des années quatre-vingt-dix. A l'époque, leur usage n'avait pas percé au niveau du dispositif national. Ces dernières années, les micro-capteurs sont revenus sur le devant de la scène en lien avec le développement du numérique, de la connectivité de nouveaux outils (smartphones, objets connectés...) qui permettent de proposer à l'ensemble de la population des interfaces simples.

Le LCSQA a réalisé une veille technologique sur les capteurs en 2017 et 2018. Elle a permis de réaliser un inventaire des matériels disponibles sur le marché et des techniques de mesure associées. Malgré les constantes avancées technologiques et la mise sur le marché de nouveaux appareils, cet inventaire permet à ce jour d'identifier une trentaine de fabricants proposant des solutions pour mesurer les principaux polluants réglementés (gaz

La base de données Capt'air

L'ensemble des éléments issus de l'état de l'art associés aux retours d'expérience des AASQA ont servi de base au développement d'un nouvel outil dénommé « Capt'Air ».

Cette base de données a pour objectif d'accélérer et d'organiser le partage d'informations sur les systèmes capteurs et leurs usages en France et à l'international, afin de permettre aux utilisateurs de sélectionner le ou les micro-capteurs adaptés à un usage prédéfini. Elle répertorie des caractéristiques génériques des systèmes actuellement disponibles sur le marché (références fabricant, éléments sensibles des capteurs, potentialités de mesure, taille, poids, mode de transmission des données etc.), mais aussi les performances techniques par polluant dans le contexte d'une utilisation particulière (campagnes de terrain,

Le protocole en laboratoire

Les micro-capteurs constituent désormais des outils émergents qui peuvent enrichir le dispositif national de surveillance, en complément des méthodes de référence. Ces systèmes pourraient ainsi assurer une surveillance continue et spatialisée à coût modéré. En effet, la Directive européenne 2008/50/CE sur la qualité

et particules). Ces solutions s'accompagnent parfois de la mesure d'autres composés présents dans l'air (chlore, oxygène, ammoniac, etc.), voire de la mesure de certaines grandeurs physiques (température, humidité, etc.). Ces solutions sont proposées dans des gammes de concentrations variables en fonction de l'application visée et pouvant même être très larges pour certains composés.

Cette veille technologique a également conduit à réaliser un premier état des lieux des utilisations faites des micro-capteurs par les AASQA. Les usages suivants ont notamment été recensés : la sensibilisation des citoyens, la recherche de sources d'émission, l'amélioration de la couverture spatiale et/ou temporelle des mesures de concentrations en polluants.

Enfin, elle a permis de répertorier les essais réalisés en laboratoire ou sur le terrain en vue d'évaluer les performances des micro-capteurs.

qualifications en laboratoire, cartographie sur captage mobile, etc.).

L'accès à Capt'Air est actuellement réservé aux AASQA, au ministère chargé de l'environnement et au LCSQA, mais pourrait être accessible à terme, aux institutions intéressées par les retours d'expérience sur l'utilisation des micro-capteurs.



de l'air reprise dans l'arrêté du 19 avril 2017 modifié, définit pour les polluants gazeux et particulaires réglementés, des objectifs de qualité de données à atteindre en termes de mesures indicatives ou d'estimation objective. Lorsqu'une AASQA souhaite utiliser des capteurs dans le cadre de la surveillance réglementaire, il doit

être démontré que les données fournies présentent une incertitude inférieure à celle imposée pour la méthode de surveillance visée.

Pour la mise en œuvre d'une mesure dite « fixe », le guide de démonstration d'équivalence (2010) précise la marche à suivre pour montrer l'équivalence entre la méthode de mesure employée et la méthode de référence. Il n'indique cependant pas de protocole particulier destiné aux micro-capteurs utilisés pour les mesures de qualité de l'air. Devant ces manques en matière de protocole de caractérisation, le groupe de travail WG 42 « Air quality sensors » du Comité Européen de Normalisation s'est constitué. Ses réflexions s'inspirent des études menées par le JRC depuis 2013 et des démarches simplifiées de caractérisations des capteurs en laboratoire sur lesquelles le LCSQA travaille depuis 2015.

Ces protocoles en laboratoire ont été établis pour s'adapter aux contraintes des utilisateurs potentiels tout en maintenant une rigueur technique et scientifique suffi-

sante afin que la comparaison entre les différents types de capteurs de gaz ou de particules reste pertinente au regard d'un contexte de mesure réglementaire. Ainsi, des procédures permettant d'évaluer des paramètres tels que la limite de détection, la répétabilité et la reproductibilité des mesures, la dérive dans le temps ou encore l'influence des paramètres environnementaux ont été définies en 5 étapes (voir tableau). Elles permettent d'effectuer une caractérisation complète d'un capteur en un temps restreint.



Etape #	Paramètre métrologiques		Température	Humidité relative	Commentaires
1	Temps de réponse	Temps de mise en route	25°C	50%	Temps de stabilisation sous air zéro à la mise sous tension de 0 à 90% de la valeur finale pleine échelle de 100% de la valeur pleine échelle à 10% de la valeur pleine échelle
		Temps de montée			
		Temps de recouvrement			
2	Courbe de calibrage	Offset			
		Gain			
		Sensibilité			
		Limites de détection et de quantification			
3	Erreur de mesure	Répétabilité			
		Reproductibilité			
4	Dérive	Court terme			
		Moyen terme			
		Long terme			
5	Grandeurs d'influence	Température			de -10°C à 40°C
		Humidité relative			20% - 50% - 80%
		Vitesse de vent			25°C
		Interférents	50%		

Les campagnes d'évaluation sur le terrain

En l'absence d'un référentiel européen et national d'évaluation des performances des micro-capteurs, le LCSQA a décidé de réaliser en 2018 deux campagnes de mise en situation sur le terrain. L'objectif était d'évaluer les performances des micro-capteurs par comparaison aux mesures d'instruments de référence. Une attention particulière a également

été portée à d'autres paramètres tels que la simplicité de mise en œuvre, l'autonomie, la portabilité, la fiabilité de communication (GSM, Wifi, Bluetooth, filaire...), la convivialité des applications de récupération des données en tenant compte de l'objectif recherché. Chaque système a ainsi fait l'objet d'une fiche d'évaluation par polluant mesuré.

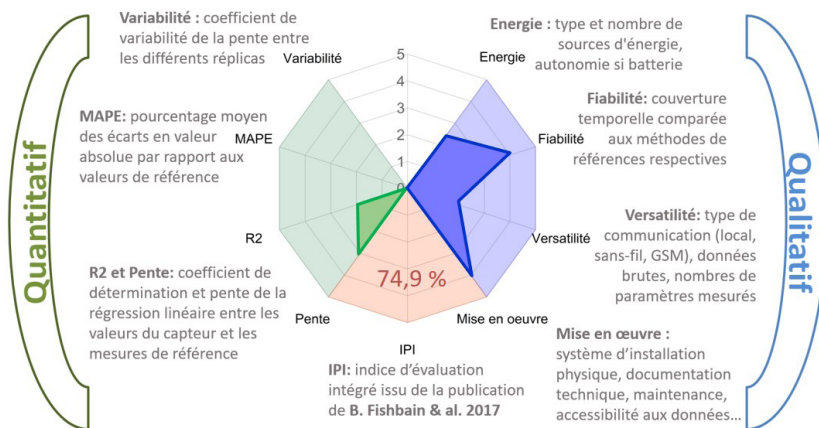
Cette fiche inclut un descriptif technique succinct, un tableau récapitulatif des performances, un radar « papillon » affichant des notations de 0 à 5 pour 8 critères qualitatifs ou quantitatifs, les relevés des séries temporelles de chacun des répliques testés comparés aux données de l'instrument de référence, les graphiques de corrélation, et enfin un avis général. Les deux essais d'aptitude nationaux ont été menés par le LCSQA sur une station fixe de mesure de la qualité de l'air de typologie urbaine située à Douai. Le premier exercice, conduit de début janvier à mi-février 2018, a regroupé 16 participants qui ont mis en œuvre 44 dispositifs au total, répliques inclus, soit 17 systèmes de conception et d'origine différentes (France, Pays-Bas, Royaume-Uni, Espagne, Italie, Pologne, Etats-Unis).

Les résultats obtenus lors de ce premier exercice montrent des différences selon les capteurs et les polluants mesurés. Ainsi, aucun des systèmes éva-

lués ne respecte les objectifs de qualité de données pour les mesures dites « fixes » pour le NO₂, l'O₃ et les PM. Certains peuvent cependant prétendre satisfaire aux critères définis pour les mesures indicatives, notamment pour les PM_{2,5}.

Par ailleurs, les radars d'évaluation construits pour cette évaluation donnent une vision de l'ensemble des critères de performance à prendre en compte et qui ont un poids plus ou moins important selon l'usage auquel les micro-capteurs sont destinés.

Afin de compléter cette première évaluation, un second essai d'aptitude a été réalisé durant l'été 2018 de manière à tenir compte d'un potentiel effet de saisonnalité, notamment dans la composition de la matrice d'air (concentrations plus élevées en O₃ et moins élevées en NO₂ et PM). Un rapport portant sur cette seconde évaluation sera prochainement publié et les résultats des deux exercices feront ensuite l'objet d'une synthèse complémentaire.



Réflexion sur l'intégration des données micro-capteurs

Les deux campagnes d'évaluation menées par le LCSQA ont été l'occasion d'étudier les modes de transmission et de récupération des données disponibles sur les différents systèmes présents afin d'entamer une réflexion sur les manières d'intégrer les données de micro-capteurs dans la chaîne d'acquisition des données de la qualité de l'air.

Les données issues des analyseurs automatiques qui transitent par la chaîne d'acquisition actuelle remontent selon un schéma relativement homogène, dans lequel sont définis le format des données, un pas de temps unique, le format des fichiers d'échange, les supports et protocoles de communication... Les modes de récupé-

ration des données issues des micro-capteurs ainsi que leurs formats sont quant à eux multiples et il n'est pas simple d'imaginer par quel biais ces données peuvent être intégrées à la chaîne d'acquisition actuelle. Différentes possibilités ont été ainsi envisagées.

La réflexion entamée par le LCSQA doit être poursuivie en fonction des usages qui seront définis par le GT selon les micro-capteurs. Si l'utilisation des micro-capteurs est retenue dans le cadre de la surveillance réglementaire, la question de l'intégration des données à la chaîne d'acquisition pourra devenir un critère de sélection.

Les données des micro-capteurs pour la cartographie

Les capteurs offrent la possibilité de mesurer les concentrations de polluants avec une couverture spatiale et temporelle unique. Ainsi, au-delà de leur utilisation pour la mise en œuvre de la mesure proprement dite, la quantité importante de données qui peut être récoltée ouvre de nouveaux horizons de développements pour la modélisation et la cartographie des polluants à l'échelle urbaine. En 2018, le LCSQA a entrepris des travaux consacrés au développement d'une méthode permettant d'utiliser les données de capteurs dans les cartographies.

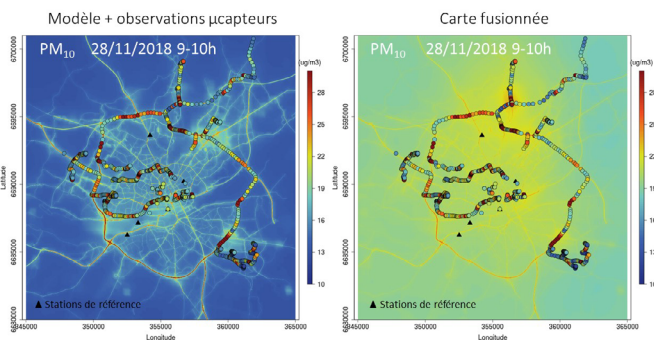
En premier lieu, une note bibliographique a été publiée pour rendre compte de l'état de l'art sur cette problématique.

Une réflexion a ensuite été initiée avec les AASQA volontaires sur les développements à réaliser. Cette collaboration a été étendue aux laboratoires universitaires et

aux startups afin de favoriser les échanges de connaissances et de données. Ainsi, une approche de fusion de données basée sur la géostatistique (krigeage en dérive externe) a été appliquée à Nantes à partir d'observations de capteurs fixes et mobiles de la PM₁₀ (capteurs

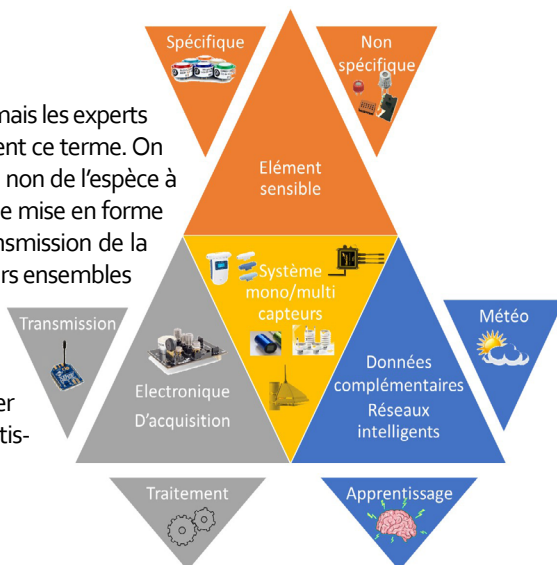
de la société Atmo-Track). Les premiers résultats montrent l'intérêt et les difficultés induites par l'intégration de telles données dans les cartographies de la qualité de l'air. Il s'avère que les principaux obstacles résident dans l'incertitude de mesure associée à ces

instruments et à la signification de la donnée en mobilité. L'amélioration et l'optimisation de l'approche par le LCSQA qui se poursuit en 2019, permettra de développer des algorithmes visant à intégrer micro-capteurs et modélisation dans les cartographies de qualité de l'air à diverses échelles.



Qu'est-ce qu'un micro-capteur ?

Il n'existe pas de définition universelle d'un micro-capteur, mais les experts français s'accordent sur les éléments constitutifs qui couvrent ce terme. On retrouve classiquement un élément sensible, spécifique ou non de l'espèce à détecter, auquel s'ajoute généralement une électronique de mise en forme du signal en charge également du traitement et de la transmission de la donnée. Un système complet peut regrouper un ou plusieurs ensembles "élément sensible + électronique", on parle alors de système mono ou multi-capteurs. Des données complémentaires, telles que la météo, les données de référence des AASQA, d'autres systèmes de capteurs, peuvent compléter le traitement de l'information par des algorithmes d'apprentissage automatique apparentés à du "machine learning".

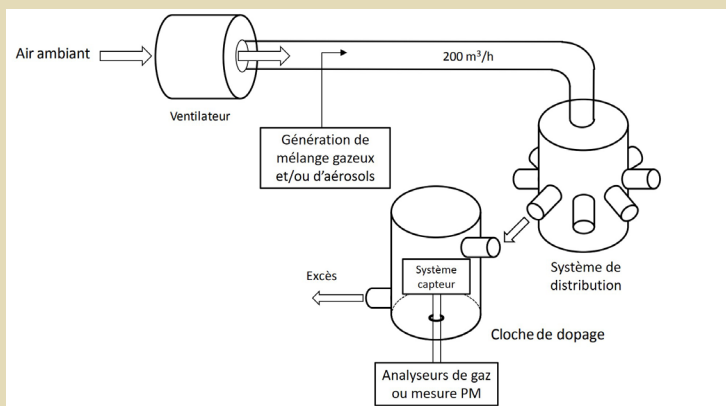


AUTRES TRAVAUX

la certification Ineris / LNE «Air Quality Sensor» des micro-capteurs

Des travaux européens pour l'élaboration de deux spécifications techniques (TS) sont en cours pour la définition des critères d'évaluation des micro-capteurs pour la mesure des gaz (fin 2020) et pour les particules en suspension (à l'horizon 2025).

Dans l'attente de la diffusion et de la mise à disposition de ces spécifications techniques et étant donné les attentes exprimées au niveau français de pouvoir disposer de données d'évaluation des performances des micro-capteurs, l'Ineris et le LNE se sont associés en 2018 afin de développer un schéma de certification dans le cadre d'une utilisation pour la surveillance de la qualité de l'air en site fixe selon la Directive européenne 2008/50/CE. Le référentiel technique d'évaluation permettra l'évaluation robuste de ces micro-capteurs afin de leur attribuer un niveau de performance pour chaque polluant mesuré. Ce référentiel se basera sur les compétences du LNE pour ce qui est de l'évaluation en laboratoire, couplées à l'expérience de l'Ineris pour l'évaluation de dispositifs de mesure en conditions réelles, basée sur un système de dopage (gaz/particules) de matrices réelles maîtrisé et homogène. Ce dernier permettra d'évaluer 10 à 15 micro-capteurs en simultanément sur différents niveaux de concentrations de polluants en un temps réduit par rapport à une campagne de comparaison menée sur le terrain en air ambiant.



Le schéma de certification a pour objectif de qualifier les micro-capteurs les plus performants et d'assurer la surveillance de la fabrication. Une marque de certification attestera de la conformité de ces produits. Les utilisateurs et prescripteurs pourront donc avoir une vision claire de la performance métrologique des micro-capteurs et adapter leur achat et cahier des charges à l'utilisation prévue.

Valorisation

Les résultats obtenus lors du premier essai d'aptitude ont été valorisés lors de la participation du LCSQA à des conférences /événements français et internationaux :

- Colloque Atmos'fair - Paris, juin 2018
- Participation aux assises nationales de l'air - Paris, 9-10 octobre 2018
- JTA - Besançon, octobre 2018
- Journée technique "le numérique au service de l'environnement" - Antony, novembre 2018
- Séminaire LCSQA «Capteurs et qualité de l'air : une révolution ?» - Paris, 23 novembre 2018
- International Symposium Individual Air Pollution Sensors - Lille, 2018
- Workshop «Low-cost Sensors and Microsystems for Environment Monitoring» - Toulouse, 2019

En savoir plus

- <https://www.lcsqa.org/fr/actualite/evaluation-de-micro-capteurs-pour-la-qualite-de-lair>
- <https://www.lcsqa.org/fr/actualite/capteurs-et-qualite-de-lair-une-revolution-retour-sur-le-seminaire-du-lcsqa-du-23>
- <https://www.ineris.fr/fr/ineris/actualites/micro-capteurs-gaz-particules-surveillance-qualite-air-premier-essai-national>
- <https://www.ineris.fr/fr/ineris/actualites/evaluation-micro-capteurs-qualite-air>
- Vidéo IMT Lille-Douai «Essai d'aptitude national micro-capteurs», mars 2019 : <https://www.youtube.com/watch?v=l-tTaFIMxjA&feature=youtu.be>

Bibliographie

L'ensemble des publications mentionnées dans ce dossier technique est disponible sur le site www.lcsqa.org, rubrique « Publications », mot clé : micro-capteurs.

- *1er Essai national d'Aptitude des micro-Capteurs (EA μ C) pour la surveillance de la qualité de l'air : synthèse des résultats*, N. Redon et L. Spinelle - Rapport LCSQA, novembre 2018
- *Réflexion sur la remontée des données issues des micro-capteurs, note technique LCSQA, C. Mantelle (Ineris), 2017*
- *Utilisation des données de micro-capteurs en modélisation et cartographie de la qualité de l'air, note technique LCSQA, A. Gressent (Ineris) - 2017*
- *Episodes de pollution particulière de mi-Janvier 2017 - Eléments de compréhension à partir des mesures automatiques (période du 18 au 23 janvier 2017), note technique LCSQA - Olivier Favez (Ineris) - 24 janvier 2017*
- *Validation du protocole de détermination métrologique micro-capteurs polluants gazeux réglementaires, Rapport LCSQA - N. Redon (IMT Lille-Douai) - mars 2017*
- *Faisabilité de la mise en oeuvre d'un protocole pour l'évaluation en laboratoire de micro-capteurs pour la mesure des concentrations massiques particulières, Note technique LCSQA - N. Redon (IMT Lille Douai), F. Gaie-Levrel (LNE), T. Amodéo (Ineris) - Juillet 2018*
- *Protocol of evaluation and calibration of low-cost gas sensors for the monitoring of air pollution – L. Spinelle, M. Aleixandre, M. Gerboles, JRC Technical Reports, 2013*
<http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC83791>
- *Guide to the demonstration of equivalence of ambient air monitoring methods – Jan 2010*
<http://ec.europa.eu/environment/air/quality/legislation/pdf/equivalence...>

direction et secrétariat du LCSQA

INERIS - parc technologique Alata - BP 2 - F60550 Verneuil-en-Halatte

tél. 03 44 55 69 16 - www.lcsqa.org

