



anses

Utilisation de micro-capteurs pour le suivi de la qualité de l'air intérieur et extérieur

Avis de l'Anses
Rapports d'expertise collective

Mai 2022



CONNAÎTRE, ÉVALUER, PROTÉGER

Le directeur général

Maisons-Alfort, le 31 mai 2022

AVIS

de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

**relatif à « l'utilisation de micro-capteurs pour le suivi de la qualité de l'air
intérieur et extérieur »**

L'Anses met en œuvre une expertise scientifique indépendante et pluraliste.

L'Anses contribue principalement à assurer la sécurité sanitaire dans les domaines de l'environnement, du travail et de l'alimentation et à évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter.

Elle contribue également à assurer d'une part la protection de la santé et du bien-être des animaux et de la santé des végétaux et d'autre part à l'évaluation des propriétés nutritionnelles des aliments.

Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui scientifique technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque (article L.1313-1 du code de la santé publique).

Ses avis sont publiés sur son site internet.

L'Anses a été saisie le 21 décembre 2018 par la Direction Générale de la Santé, la Direction Générale de la Prévention des Risques et la Direction Générale de l'Energie et du Climat pour la réalisation de l'expertise suivante : Etat des connaissances sur l'utilisation de micro-capteurs par des citoyens pour le suivi de la qualité de l'air extérieur et de l'air intérieur.

1. CONTEXTE ET OBJET DE LA SAISINE

Les systèmes capteurs, également dénommés micro-capteurs ou capteurs à bas coûts en raison de leur taille réduite et de leur faible coût d'achat initial, connaissent une expansion rapide ces dernières années. Plusieurs facteurs expliquent cet essor :

- le coût d'achat initial relativement faible de ces technologies par rapport aux instruments de mesure utilisés dans les méthodes de référence ;
- leur facilité d'usage et leur adaptabilité, qui offrent des champs d'application variés et une utilisation par un public large ;
- la sensibilisation croissante de la population à la pollution de l'air et à ses impacts sur la santé ;
- le développement des sciences participatives « *crowdsourcing*¹ » et un intérêt croissant de la population à produire des données et à les partager ;
- une demande et un intérêt croissant d'une partie de la population pour les objets connectés (internet des objets²) ;
- un besoin d'amélioration des connaissances sur la répartition spatio-temporelle à grande échelle de la pollution de l'air, et la couverture de différents microenvironnements ;
- des progrès en ingénierie électronique et en informatique permettant la gestion des grandes quantités de données générées.

Ces technologies ont fait et font encore l'objet d'une multitude d'études dans différents domaines d'application potentiels. Cependant l'utilisation de systèmes capteurs soulève plusieurs questions, dont celles de leur fiabilité météorologique mais également de la gestion, de l'exploitation et de l'interprétation des données qui en sont issues, et *in fine* de leur pertinence pour répondre aux enjeux liés à la qualité de l'air.

Dans ce contexte, la DGS, la DGEC et la DGPR ont saisi l'Anses le 21 décembre 2018 afin de :

1. dresser un état des lieux des travaux mettant en œuvre des micro-capteurs et des profils de leurs utilisateurs ;
2. évaluer l'intérêt et les limites, voire la complémentarité par rapport à la mesure classique, des données issues de micro-capteurs utilisés par les citoyens dans un objectif de caractérisation de l'exposition à des fins d'interprétation sanitaire ;
3. discuter du statut juridique des données générées par des micro-capteurs.

Dans la suite du document, le terme système capteur est utilisé au lieu du terme micro-capteur, selon la définition proposée par l'Agence française de normalisation (AFNOR).

¹ Le *crowdsourcing* consiste à externaliser une tâche auprès de contributeurs amateurs

² Matérialisation d'Internet dans le monde réel concernant les objets, voitures, bâtiments et d'autres éléments reliés à un réseau d'Internet physique par une puce électronique, un capteur ou système capteur, une connectivité réseau permettant ainsi de pouvoir récupérer, stocker, transférer et traiter (sans discontinuité entre les mondes physiques et virtuels) les données s'y rattachant (quelle que soit sa provenance géographique). Ce terme est également connu sous le sigle anglais « *IoT* » (Internet of Things) ((FD X43-121, 2021).

2. ORGANISATION DE L'EXPERTISE

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise (Mai 2003) ».

L'expertise relève du domaine de compétences du comité d'experts spécialisé (CES) « Evaluation des risques liés aux milieux aériens ». L'Anses a confié l'expertise au groupe de travail « Micro-capteurs ». Les travaux ont été présentés au CES tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques entre mars 2020 et mars 2022. Ils ont été adoptés par le CES « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » réuni le 10 mars 2022.

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont publiées sur le site internet : <https://dpi.sante.gouv.fr/>.

Pour répondre aux questions de l'expertise, les travaux ont été structurés en deux rapports d'expertise. Le premier rapport (Volume 1) présente les éléments suivants :

- proposition de définitions et de connaissances pré-requises concernant les systèmes capteurs, les données générées et les acteurs entrant en jeu dans leur mise en œuvre ;
- panorama des projets portant sur l'évaluation des systèmes capteurs et des projets impliquant le citoyen, en s'appuyant sur des revues de la littérature et des rapports de référence sur le sujet ;
- focus sur le cas particulier des systèmes capteurs de dioxyde de carbone (CO₂), en raison des préconisations de mesures de CO₂ dans les espaces intérieurs publics comme moyen de lutte contre la propagation de la Covid-19 et de la diversité du matériel disponible ;
- état des lieux des études portant spécifiquement sur l'utilisation de systèmes capteurs à des fins d'évaluation de l'exposition individuelle, avec une discussion sur les apports et limites potentiels des systèmes capteurs dans le cadre d'études ;
- identification de points clés à prendre en compte pour qu'une donnée générée par un système capteur puisse contribuer à l'évaluation de l'exposition individuelle ;
- discussion sur l'utilisation des systèmes capteurs à des fins d'évaluation des effets sanitaires de la pollution de l'air une fois que les données générées sont considérées « valides », c'est-à-dire qu'elles respectent les points clés de l'étape précédente ;
- discussion sur le cas particulier des utilisateurs de systèmes capteurs à titre privé ;
- discussion sur le statut juridique des données générées par les systèmes capteurs.

Ces travaux d'expertise ont également fait l'objet d'un état des lieux des profils et motivations des utilisateurs de systèmes capteurs réalisé sur la base d'un travail bibliographique de synthèse et d'une double enquête, présentés dans un rapport d'expertise complémentaire (Volume 2).

3. ANALYSE, CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DU GT ET DU CES

3.1. Résultats de l'expertise

3.1.1. Définitions et connaissances pré-requises

■ Définition des systèmes capteurs :

Les définitions retenues par le groupe de travail sont celles proposées par l'Agence française de normalisation (Afnor) dans son fascicule de documentation relatif aux capteurs pour la qualité de l'air (FD X43-121, 2021) :

- Élément sensible : « Dispositif transformant une grandeur physique observée en une grandeur utilisable de type signal électrique dont l'amplitude est relative notamment à la concentration d'un polluant recherché dans l'air » ;
- Capteur : « Dispositif équipé d'au moins un élément sensible servant à la prise d'informations relatives à la grandeur à mesurer ainsi que d'un système électronique pour l'acquisition et le traitement de données » ;
- Système capteur : « Matériel intégrant au moins un capteur ou un élément sensible et un logiciel pour détecter une quantité et/ou mesurer une concentration de composés (gaz, aérosol) sur un pas de temps prédéfini ».

Les systèmes capteurs portatifs³ correspondent aux dispositifs portés par l'individu et les systèmes capteurs fixes correspondent aux dispositifs installés dans un environnement intérieur ou en extérieur en un emplacement donné⁴.

■ Technologies disponibles :

Les principes de mesure des systèmes capteurs sont de quatre types : les semi-conducteurs et la photo-ionisation (gaz uniquement), les cellules électrochimiques et la détection optique (gaz et particules).

Les performances métrologiques et coûts des capteurs de particules, de carbone suie et de gaz sont présentés en annexe 1 et résumés ici.

Les capteurs à semi-conducteurs (MOX pour oxydes métalliques), parmi les moins chers du marché, sont appréciés pour la grande diversité des gaz qu'ils peuvent détecter - notamment certains composés organiques volatils (COV), avec un temps de réponse court, une sensibilité et une limite de détection adaptées aux niveaux ciblés pour la surveillance de l'air ambiant et des environnements intérieurs. Leur consommation énergétique et autonomie limitée sont un frein pour des applications embarquées. Des interférences croisées fortes (entre les conditions de mesure, certains co-polluants et le polluant cible) sont également signalées. Ce dernier point peut être corrigé par l'apprentissage supervisé.

La cellule électrochimique est recherchée pour son caractère sélectif notamment aux gaz inorganiques. Plus coûteuse, cette solution présente deux inconvénients majeurs : une durée

³ Les termes « système capteur personnel » et « système capteur individuel » sont parfois employés dans la littérature.

⁴ Le terme de système capteur mobile est utilisé dans le domaine du transport en général. Il intègre l'utilisation de systèmes capteurs embarqués sur des véhicules par défaut et également le déplacement des personnes équipées de systèmes capteurs portatifs

de vie limitée dans le temps, et un temps de réponse long, problématique notamment pour des dynamiques rapides de pollution, par exemple lors des phases de mobilité.

Le détecteur à photo-ionisation (PID) est plébiscité comme indicateur des COV totaux, et ce avec un temps de réponse très court, mais son prix limite souvent son usage à des systèmes capteurs moins accessibles au grand public.

Pour le CO₂, les capteurs infra-rouge NDIR (nondispersive infrared sensor) présentent d'excellentes performances métrologiques et sont à préférer à toute autre technologie.

Enfin en ce qui concerne les particules, les technologies optiques basées sur la diffraction infra-rouge, sont largement présentes sur le marché. La concentration massique est déduite d'un comptage en nombre des particules indépendamment de leur nature. Le coût de l'élément sensible est modeste et c'est ensuite la fluidique⁵, le traitement des données associées et les précautions de mise en œuvre qui garantissent la qualité des données obtenues du système capteur complet.

■ Chaîne d'utilisation des systèmes capteurs et terminologie associée :

Le schéma type d'utilisation d'un système capteur est présenté en figure 1.

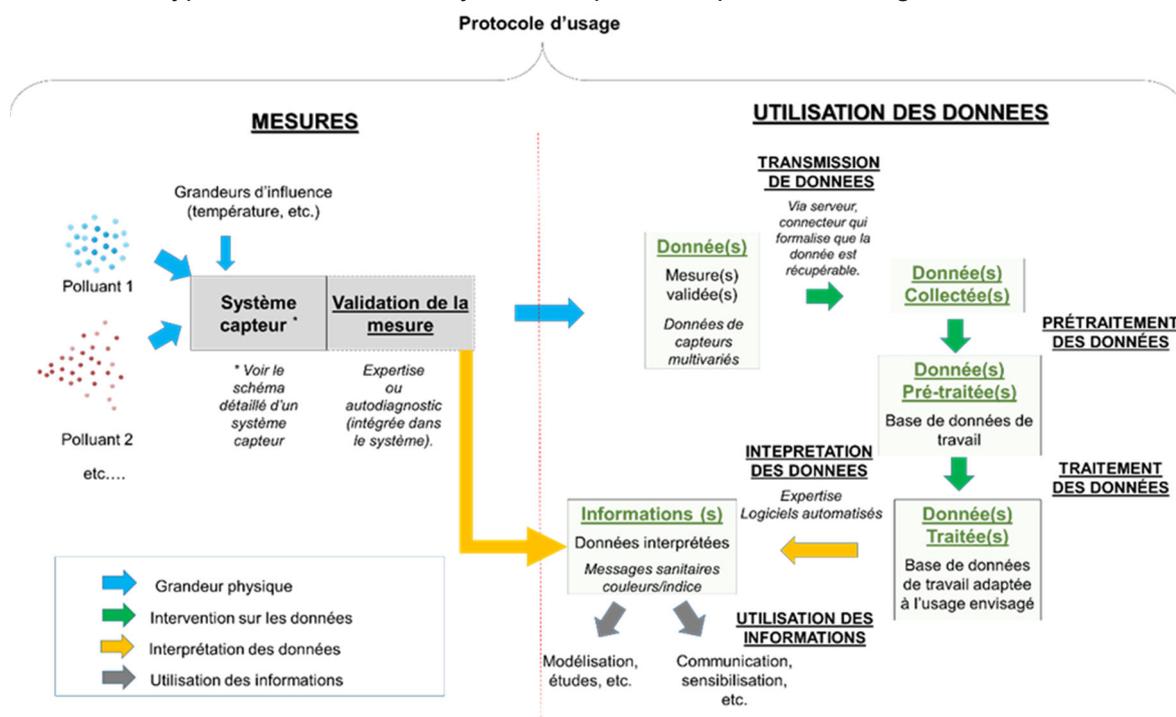


Figure 1 : Schéma type d'utilisation d'un système capteur

Les principales étapes de la chaîne d'utilisation des systèmes capteurs sont résumées ainsi :

- Mesure : détection ou mesure de la concentration d'un composé (gaz, aérosol) sur un pas de temps prédéfini. Cette étape comprend une phase de validation de la mesure correspondant à un contrôle de bon fonctionnement qui peut être soit intégré au système capteur (autodiagnostic), soit réalisé par le biais d'une expertise externe.

⁵ Par « fluidique », on entend un compartiment dans lequel est placé l'élément sensible, le capteur ou le système capteur, dont la géométrie est spécifiquement pensée pour optimiser l'écoulement de l'air, soit de manière passive, soit de manière active (par exemple avec une pompe) et ainsi maximiser la réponse globale du système capteur aux polluants ciblés.

Cette étape comprend également l'enregistrement de métadonnées et attributs de contexte servant à décrire le cadre et l'environnement de la mesure ;

- Transmission et stockage de données : étape dépendant du mode de communication utilisé par les systèmes capteurs et des modalités de stockage sur un serveur distant, une carte mémoire ou un appareil mobile ;
- Pré-traitement des données : constitution d'une base de travail cohérente en identifiant et supprimant les artefacts, le bruit de fond, et traitant les valeurs manquantes ;
- Traitement des données : transformation des données en vue d'exploitations et d'analyses spécifiques (par exemple : création de variables, agrégation spatiale, temporelle, enrichissement par des données externes telles que les mesures aux stations). Une estimation de l'exposition individuelle pourra alors être proposée en fonction du triplet durée, lieu, concentration ;
- Interprétation des données : Analyse spécifique des données traitées selon l'objectif des mesures. Cette étape nécessite une expertise mais peut également être intégrée au système capteur qui fournit alors des informations de type message sanitaire, indice de pollution ou recommandations à partir des indicateurs définis par les fabricants.
- Utilisation des informations : les données interprétées sont appelées informations et sont utilisées pour communiquer et sensibiliser la population. Elles peuvent être également utilisées dans des systèmes de modélisations ou dans des études de recherche. Le grand public, dans le cadre d'une utilisation à titre privé, aura généralement accès directement aux informations délivrées par le système capteur.

A noter qu'un processus de validation peut intervenir lors de chacune des étapes pour s'assurer que les différentes opérations ont été effectuées de manière conforme et adaptée à l'objectif des mesures réalisées.

■ Discussion sur les indicateurs utilisés par les fabricants de systèmes capteurs :

La plupart des fabricants de systèmes capteurs, en particulier ceux destinés au grand public, ne donnent pas seulement une valeur chiffrée des concentrations des polluants mesurés, mais proposent souvent différentes manières d'interpréter ces valeurs. Chaque fabricant peut proposer ses propres indicateurs pour chacun des polluants mesurés ou calculer un indice de la qualité de l'air à partir de l'ensemble des concentrations des polluants mesurés. Ces indicateurs sont parfois établis sur la base de valeurs guides existantes, telles que celles proposées par l'OMS, mais ce n'est pas toujours le cas ni toujours explicitement signalé par les fabricants. Les références associées et le mode de construction de ces indicateurs ou indices ne sont généralement pas documentés.

La comparaison des valeurs mesurées aux indicateurs préétablis peut se traduire par l'affichage sur le système capteur :

- D'une variation de couleur selon le niveau des valeurs mesurées au regard des indicateurs préétablis ;
- D'une catégorisation sémantique du niveau de pollution ou de son impact sur la santé par rapport aux indicateurs préétablis ;

Les systèmes capteurs permettent d'acquérir des données en temps quasi-réel. Or les valeurs guides telles que celles de l'OMS sont en général associées à des durées d'exposition horaires voire journalières ou annuelles nettement supérieures au pas de temps de mesure des

systèmes capteurs. De ce fait, ces valeurs guides ne sont pas utilisables pour interpréter des concentrations ponctuelles mesurées par les systèmes capteurs. De plus ces valeurs guides sont établies au niveau populationnel et ne peuvent pas être comparées à une donnée d'exposition individuelle. Il y a donc un décalage très net entre l'interprétation des données des systèmes capteurs et l'interprétation sanitaire à l'échelle individuelle qui peut en découler.

■ Acteurs entrant en jeu dans la mise en œuvre des systèmes capteurs :

Les différents acteurs de la mise en œuvre des systèmes capteurs identifiés par le groupe de travail sont : le fournisseur d'un capteur ou d'un système capteur, le porteur de l'initiative/projet, l'opérateur, l'utilisateur, le diffuseur de données et le responsable juridique du traitement des données. Ce dernier a un rôle clé dès lors que les données générées par les systèmes capteurs entrent dans le champ du Règlement Général de Protection des Données Personnelles (RGPD) ;

A noter qu'une même personne morale ou physique peut incarner un ou plusieurs rôles.

3.1.2. Panorama des projets portant sur les systèmes capteurs

Le groupe de travail a relevé de nombreux projets concernant différents domaines d'application potentiels des systèmes capteurs.

Les principaux travaux dans le domaine de la normalisation sont portés en Europe par le groupe de travail « capteurs pour la qualité de l'air » du Comité Européen de Normalisation (CEN – TC 264/WG42). Un premier rapport pour les polluants gazeux est attendu en avril 2022. En France, l'Afnor a publié en décembre 2021 un fascicule de documentation sur les « concepts relatifs à l'utilisation de dispositifs de type capteur / système capteur » (FD X43-121). Enfin, l'institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris) et le laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) ont mis en place en 2020 une certification volontaire des systèmes capteurs pour la surveillance de la qualité de l'air ambiant en point fixe (Air'Quality Sensor).

Par ailleurs, plusieurs travaux d'évaluation des systèmes capteurs ont été conduits en France, en Europe et aux Etats-Unis. Les principaux travaux sont les suivants :

- Essai national d'aptitude des systèmes capteurs pour la surveillance de la qualité de l'air (LCSQA) ;
- Challenges AIRLAB ;
- Travaux d'évaluation en laboratoire et sur le terrain du Joint research Centre (JRC), exercice d'inter comparaison dans le cadre du projet européen EuNetAir ;
- Travaux de l'Environmental Protection Agency (US-EPA) ;
- Travaux du centre d'évaluation des performances des systèmes capteurs de la qualité de l'air (AQ-SPEC).

L'analyse de ces travaux montre que le domaine d'évaluation des systèmes capteurs est en pleine évolution. Les travaux ont des objectifs différents et s'appuient sur des protocoles et critères différents au sein d'un même pays, d'un pays à un autre, d'un polluant à un autre. Les niveaux de performances attendues dépendent du système capteur et de l'objectif visé. Toutefois, en se plaçant dans des conditions équivalentes à celles préconisées par les réglementations en matière de surveillance de la Qualité de l'Air, les systèmes capteurs

présentent des objectifs de qualité de données inférieurs à ceux atteints par les appareils mis en œuvre dans les méthodes de référence.

De nombreux projets impliquant le citoyen ont également été conduits à ce jour ou sont en cours, avec différentes finalités. Certains ont pour objectifs l'information et la sensibilisation à la pollution de l'air. D'autres projets ont conduit au développement de plateformes de visualisation et de partage de données issues de systèmes capteurs.

Parmi ces projets, il convient de distinguer :

- Les plateformes issues de projets « *open source* », dont les principales sont *Sensor.community* et *Aircasting*. Ces plateformes s'appuient exclusivement sur des données de systèmes capteurs.
- Les plateformes opérées par des fabricants et distributeurs de systèmes capteurs, qui agrègent différentes sources de données de pollution de l'air. Ces plateformes ne permettent pas de faire la distinction entre les données générées par les systèmes capteurs et les données issues d'autres sources (stations de mesures de référence ou modélisation).

3.1.3. Cas particulier des systèmes capteurs de CO₂

Le marché des systèmes capteurs de CO₂ connaît une forte expansion du fait de l'épidémie de la Covid-19 et des circulaires ministérielles préconisant ou imposant la mesure de CO₂ dans l'air intérieur des espaces publics.

Le CO₂ est un indicateur du confinement mais pas un indicateur de la qualité de l'air intérieur. La sélection et l'évaluation des systèmes capteurs est à faire avec précaution au regard des technologies utilisées pour fournir une information fiable sur la concentration de CO₂ dans l'air (notamment principe de mesure, autocalibration, contrôle de dérive).

3.1.4. Etat des lieux des études portant spécifiquement sur l'évaluation de l'exposition individuelle

L'estimation de l'exposition individuelle s'appuie préférentiellement sur des dispositifs de mesure portatifs qui permettent de caractériser directement les différents microenvironnements fréquentés par les individus.

■ Apports des systèmes capteurs pour évaluer l'exposition individuelle

Du fait de leur faible encombrement et du coût d'achat initial réduit, les systèmes capteurs présentent de nombreuses opportunités dans le domaine de l'évaluation de l'exposition individuelle à savoir :

- L'augmentation substantielle du nombre de mesures et l'amélioration de la couverture spatio-temporelle : augmentation du nombre de participants équipés de systèmes capteurs portatifs, du nombre de points de mesure dans un microenvironnement et/ou du nombre de microenvironnements instrumentés, notamment dans des lieux peu ou pas étudiés. Cette multiplication du nombre de systèmes capteurs portés par un individu ou déposés dans un microenvironnement permet de mesurer différents polluants ;

- Pour les systèmes capteurs portatifs : une meilleure observance du port des systèmes capteurs, plus légers et plus ergonomiques. Ces dernières années, les améliorations des systèmes capteurs ont porté sur leur autonomie, leur design et leur ergonomie, avec une utilisation facilitée et confortable (confort acoustique par exemple) et donc potentiellement mieux acceptée ;
- Une plus haute résolution temporelle permettant, par exemple, une étude fine des différents microenvironnements contribuant à l'exposition totale d'un individu.

■ Limites des systèmes capteurs pour évaluer l'exposition individuelle

Les principales limites des systèmes capteurs dans le domaine de l'évaluation de l'exposition individuelle sont listées ci-dessous :

- Qualité métrologique limitée, manque de sélectivité des systèmes capteurs et sensibilité aux interférents ;
- Dans certains cas, non comparabilité⁶ des données générées entre systèmes capteurs ou entre un système capteur et un appareil de mesure mis en œuvre dans les méthodes de référence ;
- Coûts liés à la mise en œuvre des systèmes capteurs ;
- Impact environnemental, du fait de la durée de vie limitée des systèmes capteurs ;
- Opérations de maintenance non formalisées ou non suivies de manière rigoureuse ;
- Contraintes liées à l'acceptabilité du port de systèmes capteurs sur de longues périodes pour évaluer les expositions à long terme et au respect du bon usage et du bon positionnement des systèmes capteurs ;
- Pour certains systèmes capteurs, contraintes liées au manque de connectivité pour les personnes résidant en zone non couvertes par les réseaux téléphoniques (« zone blanche ») ;
- Contraintes liées à la prise en compte de la protection des données à caractère personnel.

■ Etudes portant sur l'évaluation de l'exposition individuelle à l'aide de systèmes capteurs

Un nombre relativement faible d'études sur l'utilisation de systèmes capteurs pour évaluer l'exposition individuelle a été identifié dans la littérature ou *via* la consultation internationale et les auditions (N = 62). Le nombre d'étude allant jusqu'à l'évaluation des effets sanitaires de la pollution de l'air est encore plus restreint (N = 11). Les objectifs des études recensées sont variés, allant de la simple mesure de concentrations dans l'air à une évaluation quantitative de l'exposition des individus, voire de la dose inhalée, et des effets sanitaires associés.

L'analyse de ces études a montré que les systèmes capteurs employés sont réservés au domaine de la recherche et non accessibles en raison notamment de leur coût. Par ailleurs,

⁶ Par « non-comparabilité », on entend le fait que deux systèmes capteurs, ou bien un système capteur et un appareil de mesure mis en œuvre dans les méthodes de référence, dédiés à un même polluant cible, ne partagent pas nécessairement les mêmes unités de mesure, les mêmes principes physiques de détection, les mêmes conditions d'usage, les mêmes performances métrologiques, etc. Par conséquent, mettre en regard les données issues de l'un et de l'autre de ces outils de mesure ne fait pas toujours sens.

près de la moitié des études identifiées ne mentionne pas de qualification métrologique des systèmes capteurs.

3.1.5. Points clés à prendre en compte pour qu'une donnée générée par un système capteur dans le cadre d'étude puisse contribuer à l'évaluation de l'exposition individuelle

Les points clés à prendre en compte pour qu'une donnée générée par un système capteur dans le cadre d'étude⁷ puisse contribuer à l'évaluation de l'exposition individuelle sont d'une part, des paramètres intrinsèques du système capteur, et d'autre part, des informations qui doivent être mentionnées dans l'étude en vue de l'utilisation d'une donnée générée par un système capteur pour évaluer l'exposition individuelle.

Ces points clés ont été identifiés en considérant les différents objectifs d'utilisation des systèmes capteurs ainsi que chaque maillon de la chaîne d'utilisation de ces systèmes capteurs. La criticité de chaque point clé a ensuite été cotée au regard de l'objectif visé, et selon les différentes possibilités de mise en œuvre des systèmes capteurs (fixes / portatifs / mobilité) :

- Indispensable : Si l'information relative au point clé n'est pas disponible, la mesure ne peut pas être retenue pour évaluer l'exposition individuelle ;
- Utile : La connaissance de ce point clé améliore la qualité de l'interprétation ou la confiance dans le résultat ;
- Optionnel : La connaissance de ce point clé permet d'affiner l'interprétation.

L'ensemble des points clés est présenté en annexe 2.

Parmi les points clés cotés indispensables, il convient de s'assurer que :

- Le système capteur permet d'identifier le polluant à mesurer de manière spécifique ;
- Le système capteur a fait l'objet d'une pré-qualification métrologique c'est-à-dire d'une vérification de la compatibilité de ses spécifications⁸ avec l'objectif visé ;
- La fiabilité des données est renseignée notamment la qualité des données, la robustesse de la transmission des données ;
- L'utilisation du système capteur est correcte et documentée, comme par exemple le positionnement et que la couverture spatio-temporelle est suffisante et permet la représentativité des mesures effectuées ;
- L'ensemble des environnements fréquentés, les activités prévues et événements imprévus sont décrits.

⁷ L'utilisation de systèmes capteurs dans le cadre d'étude est à distinguer de l'utilisation de systèmes capteurs.

⁸ Performances vis-à-vis de la détermination d'un mesurande de type concentration.

3.1.6. Interprétation sanitaire des données générées par les systèmes capteurs dans le cadre d'étude ou par comparaison avec des référentiels sanitaires

Pour la conduite d'études épidémiologiques de par leurs avantages et leurs limites pour évaluer l'exposition individuelle, les systèmes capteurs apparaissent particulièrement pertinents pour l'évaluation des expositions à court-terme c'est-à-dire de quelques heures à quelques jours plutôt que pour l'évaluation des expositions à long terme. Les mesures d'exposition individuelle peuvent servir à affiner les relations doses-réponses avec des indicateurs de santé recueillis à l'échelle individuelle.

Par ailleurs, pour la conduite d'évaluation quantitative des risques sanitaires (EQRS) ou d'évaluation quantitative des impacts sanitaires (EQIS), l'adéquation des données générées par les systèmes capteurs et des valeurs sanitaires (Valeur Toxicologique de Référence - VTR ou relation concentration-risque) doit être discutée au regard :

- De la temporalité : les données générées par les systèmes capteurs doivent être exprimées sur un pas de temps comparable à celui pour lequel la VTR ou la relation concentration-risque a été établie (EQRS) ou cohérent avec la période d'étude choisie (EQIS) ;
- De la grandeur mesurée par les relations doses-réponses ;
- De la population d'étude : les systèmes capteurs doivent être déployés en nombre suffisant pour être représentatifs de la population d'étude, étant donné qu'une interprétation ne peut se faire, à ce niveau, qu'à une échelle populationnelle.

3.1.7. Cas particulier des utilisateurs de systèmes capteurs à titre privé

Les données issues de certains systèmes capteurs peuvent induire l'individu en erreur sur ce qu'il pense « mesurer ». En effet, le système capteur délivre une indication de la concentration mesurée dans l'air à un instant précis et un lieu précis. Cette concentration ne reflète pas l'exposition de l'individu intégrée sur une durée donnée. De plus, une donnée individuelle de système capteur générée en temps quasi-réel ne peut pas être comparée à un indicateur s'appuyant sur une valeur guide ou à une VTR/relation concentration-risque établie au niveau populationnel pour un pas de temps plus long pour informer l'utilisateur sur un potentiel risque sanitaire.

Enfin, les appellations de type « micro-capteur d'air » ou « capteurs de la qualité de l'air » employés par certains fabricants/distributeurs de systèmes capteurs peuvent porter à confusion. En effet, l'assimilation de la mesure d'un ou quelques polluants de l'air à la « qualité de l'air » masque la complexité de la question de la pollution de l'air, que ce soit en air intérieur ou en air extérieur.

Par ailleurs, les systèmes capteurs sont utiles pour comparer de façon relative et qualitative des niveaux de concentration auxquels l'individu est exposé dans les différents microenvironnements qu'il côtoie, sous réserve d'une bonne utilisation de systèmes capteurs métrologiquement valides. Les systèmes capteurs sont également utiles pour identifier d'éventuelles sources de pollution et agir en conséquence.

La compilation et l'utilisation de données générées à titre privé à des fins d'études se heurtent aux nombreuses disparités associées à ces données, en l'absence de protocole d'utilisation des systèmes capteurs. Par ailleurs, la comparaison des données générées à des valeurs sanitaires soulève les mêmes problématiques que celles discutées pour les EQRS/EQIS

(temporalité, grandeur mesurée par les relations dose-réponse, représentativité de la population d'étude).

Il est avancé que la massification des données générées individuellement permettrait de lisser les imperfections de ces données, mais cela reste une question ouverte. Enfin, la massification des données permettrait d'approcher l'exposition d'une population d'étude et d'enrichir les cartographies et la modélisation de la pollution de l'air.

3.1.8. Statut juridique des données générées par des systèmes capteurs

Le déploiement de systèmes capteurs auprès d'individus amène à considérer la question de la protection des données personnelles dès lors que les données générées par les systèmes capteurs sont associées à des données de géolocalisation pouvant contribuer à l'identification directe ou indirecte des personnes physiques ayant participé à l'acquisition de ces données. La plupart du temps, une donnée de mesure dans l'air sera une donnée personnelle par rapport à sa géolocalisation.

Le responsable du traitement des données est en charge du contrôle du respect du cadre relatif à la protection des personnes physiques à l'égard du traitement des données à caractère personnel (RGPD). La base légale pour la collecte et le traitement des données personnelles est le consentement des participants, qui se fait sur la base d'informations concernant : la finalité du traitement des données, la durée de conservation des données, le rappel et la garantie des droits reconnus aux personnes concernées (droit d'accès, de rectification, d'opposition, de retrait sur toute la durée de conservation des données). L'anonymisation des données permet de s'affranchir des obligations du RGPD. Néanmoins l'anonymisation complète d'une donnée personnelle est un processus complexe.

Des données mises à dispositions en « données ouvertes » (*open data*) doivent respecter le RGPD.

3.1.9. Etat des lieux des profils et motivations des utilisateurs de systèmes capteurs

Les développements présentés dans le rapport (volume 2) sont basés à la fois sur un travail bibliographique de synthèse et de réflexions analytiques sur la problématique des mesures citoyennes de qualité de l'air. Une double enquête auprès de porteurs de projets *via* des entretiens et d'utilisateurs de systèmes capteurs sur la base de deux questionnaires en ligne a également fourni des résultats à la fois quantitatifs et qualitatifs. Le questionnaire A destiné aux participants à des campagnes de mesures encadrées a été diffusé *via* des coordinateurs de projets⁹, et le questionnaire B destiné aux utilisateurs à titre privé a été diffusé *via* des réseaux de communication de la plateforme *Sensor.community* en France, et plus rarement par des fabricants de systèmes capteurs auditionnés dans le cadre de l'expertise.

Les informations collectées *via* les questionnaires en ligne concernent très majoritairement des participants aux campagnes de mesures encadrées : 151 répondants pour le questionnaire A contre 8 répondants pour le questionnaire B. Ce faible taux de réponse pour le questionnaire B est lié à l'accès difficile aux utilisateurs à titre privé de systèmes capteurs, en l'absence de réseaux permettant de diffuser largement le questionnaire. De ce fait, les

⁹ Projets sollicités pour diffuser le questionnaire A : Polluscope, Captothèque, BBclean, Ambassad'air, Captothèque et Qalipso.

informations présentées dans la partie *ad hoc* du rapport concernant quasi exclusivement les participants à des campagnes de mesures.

Les conclusions du rapport sont les suivantes :

- La santé est déclarée comme premier motif de participation ;
- La mesure accompagnée est un gage de réussite des projets (formation, maintenance, prise des mesures et intelligibilité des mesures) : cela souligne l'importance du caractère collectif des campagnes citoyennes ;
- Les profils socio-démographiques identifiés dans cette étude sont à la fois des profils attendus et inattendus. Dans la majorité des cas, les participants ont un profil hautement diplômé. Des profils ouvriers et techniciens d'individus engagés dans des associations ont également été identifiés. Des profils « technophiles » sont également remarqués parmi les utilisateurs individuels ayant fabriqué leur système-capteur.
- Le système capteur constitue un apport décisif en termes de connaissances sur la pollution et les bonnes pratiques. Les systèmes capteurs permettent d'acquérir ou de consolider des connaissances sur la pollution de l'air et ses techniques de mesures, et amènent les individus à changer leur manière d'appréhender la pollution de l'air ;
- Une volonté de poursuivre les mesures et les actions est rapportée par la majorité des participants, se traduisant par :
 - L'approfondissement des connaissances, le développement de bonnes pratiques pour sa santé et celle des autres ;
 - L'enclenchement d'actions sur les modes de déplacement et la façon d'habiter.

3.2. Conclusions du CES

Le domaine des systèmes capteurs connaît une forte évolution depuis quelques années s'illustrant par une multiplication des technologies disponibles sur le marché et un nombre croissant d'études et de projets sur le sujet.

■ Etat des lieux des projets portant sur les systèmes capteurs

Jusqu'à présent, les études des systèmes capteurs portaient principalement sur l'évaluation de leurs performances métrologiques, en l'absence de cadre normatif permettant de comparer ces dispositifs aux instruments de mesure mis en œuvre dans les méthodes de référence. En ont découlé plusieurs projets visant à informer les utilisateurs sur les capacités des systèmes capteurs et à les guider sur le choix du dispositif selon l'usage. L'exactitude et la fiabilité des mesures des systèmes capteurs, bien que très variables selon les technologies et les polluants¹⁰, restent inférieures à celles attendues dans les méthodes de référence. Toutefois des améliorations sont en cours. Au-delà de la qualité métrologique, d'autres paramètres sont à prendre en compte lors du choix d'un système capteur tels que ses dimensions, son autonomie, sa portabilité et son prix. Au-delà de l'impact environnemental que peut engendrer le déploiement de systèmes capteurs, ce paramètre peut être un critère de choix des systèmes capteurs compte tenu de leur durée de vie, de leur lieu de fabrication et des modalités de stockage et de transmission des données. Depuis 2010, de très nombreux projets impliquant le citoyen ont été conduits pour sensibiliser les individus à la pollution de l'air. Des plateformes de visualisation, voire de partage des données générées, ont émergé dans un premier temps

¹⁰ Par exemple les systèmes capteurs de carbone suie offrent une bonne exactitude et fiabilité comparativement aux systèmes capteurs de COV.

à destination des participants des études, puis ouvertes plus largement. Certains fabricants proposent également leurs propres outils de cartographie, sans qu'il soit toujours évident de distinguer les données issues de systèmes capteurs d'autres données issues de stations de mesure de référence ou de modélisation.

Cet accès plus large aux données de la qualité de l'air qu'offrent les systèmes capteurs s'ajoute aux données produites par les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) et peut ainsi conduire les citoyens à s'interroger sur les différences observées entre les données de systèmes capteurs et les données officielles. Plusieurs paramètres expliquent ces différences, notamment la moindre qualité métrologique des systèmes capteurs par rapport aux méthodes de référence pour les données officielles, et les différences de résolution spatio-temporelle (zone et période d'intégration de la donnée). Ces nouvelles sources de données conduisent également les institutions à faire évoluer leurs pratiques et réfléchir aux modalités d'utilisation de ces dispositifs et des données produites pour divers objectifs (sensibilisation, changement de comportement, surveillance...).

- Utilisation des systèmes capteurs pour évaluer l'exposition individuelle à la pollution de l'air

Les systèmes capteurs offrent de nombreuses perspectives dans le domaine de l'évaluation de l'exposition individuelle. Les systèmes capteurs portatifs, du fait de la miniaturisation, sont facilement portés par les individus pendant leurs activités quotidiennes, ce qui permet d'intégrer les différents microenvironnements fréquentés et les conditions d'exposition propres à chaque individu, avec les mesures en temps quasi réel. A plus large échelle, le coût d'achat initial et l'encombrement réduit des systèmes capteurs permettent également la multiplication des points de mesure et l'instrumentation de microenvironnements jusque-là encore peu ou pas étudiés. Mais la qualité métrologique des mesures de concentration de polluant demeure la principale limite des systèmes.

L'utilisation de systèmes capteurs pour l'évaluation de l'exposition individuelle à la pollution de l'air est récente. Les projets dans ce domaine sont très hétérogènes en termes de moyens et d'objectifs associés allant de l'étude de faisabilité sur très peu de participants, au projet se déroulant sur plusieurs années auprès de larges populations. Dans la quasi-totalité des études, les systèmes capteurs sont des dispositifs réservés au domaine de la recherche (coûts plus élevés, complexité de mise en œuvre) ou développés spécifiquement pour les besoins de l'étude. La moitié des publications ne fait pas explicitement référence à une qualification métrologique des systèmes capteurs, même si on peut penser que les équipes se sont assurées de la validité du système utilisé, limitant de ce fait la confiance accordée aux résultats. Aucune étude ne fait référence à une qualification des systèmes capteurs en mobilité. Ceci peut être lié au caractère émergent des applications en mobilité et de leurs protocoles d'évaluation.

Bien que ces dispositifs soient faciles à porter, l'acceptabilité de leur port sur de longues périodes peut être problématique et leur autonomie est encore limitée, ce qui les destine préférentiellement à l'étude des expositions à court terme. Dans les études identifiées, les systèmes capteurs sont utilisés sur des périodes courtes (1 semaine à 10 jours), parfois répétées. L'évaluation de l'exposition s'appuie sur des données de Budget-Espace-Temps-Activités (BETA) et parfois sur des enquêtes de mobilité. Les données des systèmes capteurs sont régulièrement complétées par celles issues de stations de mesure de référence et/ou de modélisation.

Les systèmes capteurs apparaissent donc comme des dispositifs complémentaires aux sources de données ou méthodes d'évaluation de l'exposition déjà utilisées dans le cadre

d'études d'expologie. Par ailleurs, les systèmes capteurs pourraient permettre d'optimiser les cartographies (à l'échelle spatiale et temporelle) et les modèles à large échelle contribuant ainsi à une amélioration de l'estimation de l'exposition à la pollution de l'air.

- Points clés à prendre en compte pour qu'une donnée générée par un système capteur puisse contribuer à l'évaluation de l'exposition individuelle

L'analyse montre qu'au-delà de l'exactitude métrologique du système capteur, qui reste encore la principale condition pour évaluer l'exposition individuelle, de nombreux autres points doivent être satisfaits. Parmi ces points clés, ceux en lien avec la contextualisation et la mise en œuvre du/des systèmes capteurs (représentativité et couverture spatio-temporelle, description des microenvironnements fréquentés, des activités prévues et événements imprévus) sont primordiaux.

- Interprétation sanitaire des données générées par les systèmes capteurs dans le cadre d'étude ou par comparaison avec des référentiels sanitaires

Sur le plan sanitaire, l'utilisation des données d'exposition générées par les systèmes capteurs (considérées comme valides) en vue d'EQRS ou d'EQIS nécessite de s'interroger sur l'adéquation de ces données avec les relations dose-réponse établies pour une exposition horaire, journalière ou annuelle qui serviront à quantifier le risque sanitaire. Une utilisation adéquate nécessite en conséquence que les mesures de systèmes capteurs soient intégrées sur le même pas de temps que celui utilisé pour établir la relation dose-réponse. De plus ces mesures doivent être répétées sur l'année pour être représentatives de l'exposition étudiée sur le moyen ou long terme. De surcroît, une donnée générée par un système capteur portatif, intégrant les différentes sources auxquelles est exposé un individu, ne peut être considérée comme représentative de l'exposition d'une population. Il convient donc de s'assurer que les systèmes capteurs sont déployés en nombre suffisant pour être représentatif de la population d'étude.

Par ailleurs, si les systèmes capteurs sont particulièrement d'intérêt pour l'étude des effets de la pollution de l'air à court terme au niveau de l'individu, ils peuvent également contribuer à l'évaluation des effets de la pollution de l'air sur des échelles plus larges (systèmes capteurs fixes et/ou via l'amélioration des cartographies et des modèles).

- Cas particulier des utilisateurs de systèmes capteurs à titre privé

À titre privé, l'utilisation de systèmes capteurs est intéressante pour identifier des sources ou lieux d'exposition ou des variations spatio-temporelles, sous réserve de qualification métrologique du dispositif et de conditions appropriées d'utilisation. La compréhension des données de mesures nécessite un certain degré d'expertise, et notamment une bonne connaissance des capacités et limites des systèmes capteurs. Dans la majorité des cas, les systèmes capteurs délivrent une information visuelle du niveau de pollution ou des messages sur le risque encouru pour la santé (code couleur, alertes). De telles informations doivent être considérées avec prudence car leur élaboration n'est généralement pas explicitée ni adaptée à des mesures quasi-instantanées. Une compréhension correcte des informations nécessiterait également de bien connaître les différentes valeurs sanitaires et leurs modes de construction. Un accompagnement pour comprendre correctement ces informations est donc indispensable. Enfin, l'assimilation de la mesure d'un ou quelques polluants de l'air à la « qualité de l'air », masque la complexité de cette notion, qui ne se réduit pas à un ou quelques polluants, que ce soit en air extérieur ou en air intérieur ; pour exemple des systèmes capteurs dits « de qualité de l'air » ne mesurent que le CO₂ en air intérieur ou les particules en air extérieur).

L'utilisation de données de systèmes capteurs générées massivement par des individus, en dehors de tout cadre d'étude se heurte aux limites métrologiques. Il est avancé que la massification des mesures pourrait pallier cette faible qualité métrologique, qui nécessiterait cependant l'utilisation de systèmes capteurs de technologies et/ou d'algorithmes de calculs différents.

Par ailleurs, une utilisation massive de systèmes capteurs par des individus pose des difficultés pour la compilation des données générées. Ces difficultés peuvent par exemple être liées à la qualité métrologique, aux modalités de mise en œuvre, à l'accessibilité aux données générées, ou aux informations fournies par différents systèmes capteurs. Ce champ d'étude encore peu développé nécessiterait d'investiguer des modes de collecte, de traitement et de diffusion des données.

■ Etat des lieux des profils et motivations des utilisateurs de systèmes capteurs

L'état des lieux des profils et motivations des utilisateurs de systèmes capteurs (volume 2) montre que les systèmes capteurs peuvent constituer un support de médiation scientifique et de participation citoyenne à la condition que les collectifs de « citoyens capteurs » soient accompagnés lors de campagnes de mesures. Dès lors, engageant des publics aux profils diversifiés dont la motivation première est leur santé et celle de leurs proches, ces campagnes conduisent les participants à mettre en pratique de nouvelles habitudes dans les modes d'habitat et de déplacement. La fabrication de tout ou partie des systèmes capteurs constitue un motif d'intérêt pour certains utilisateurs technophiles. Une amélioration des connaissances scientifiques et une montée en compétences techniques sur tous les aspects de la qualité de l'air (physico-chimie de la pollution, effets sur la santé, disparités socio-géographiques) est rapportée par la plupart des personnes interrogées.

■ Statut juridique des données collectées par les systèmes capteurs

Enfin, une vigilance importante doit être portée sur l'utilisation de données générées par les systèmes capteurs en matière de protection des données personnelles dès lors que leur utilisation permet, de façon directe ou indirecte l'identification de la personne réalisant les mesures. En Europe, l'utilisation de données personnelles est encadrée par le RGPD qui donne un principe général sur la collecte et le traitement des données personnelles. Le responsable du traitement des données est un acteur central qui doit veiller au respect des données personnelles.

■ Perspectives

L'essor des systèmes capteurs, leurs développements technologiques et leur accès facilité contribuent à un marché qui se développe en dehors d'un cadre normatif. L'usage de systèmes capteurs par un nombre croissant d'utilisateurs et d'experts conduit à une multiplication des données, et les avancées technologiques de la chaîne de mesure stimulent le niveau d'exigence de qualité des données attendue par tous.

Il existe un fort potentiel de progrès au niveau des principes de détection. Bien que le marché des éléments sensibles ait peu évolué ces dernières années, des solutions issues de la recherche, comme l'usage de nouveaux nano-composites sensibles fonctionnalisés, la mesure à base d'ondes acoustiques ou de microbalances à quartz ou encore la miniaturisation de méthodes optiques ou photo acoustiques, pourraient aboutir à court ou moyen termes à de nouveaux sauts technologiques.

Par ailleurs, une amélioration notable des performances est envisagée par la mise en œuvre de ces éléments sensibles dans des boîtiers où la fluidique est pensée et optimisée pour maximiser leur réponse ; l'intégration de filtres fonctionnalisés et la compartimentation

physique entre l'espace de mesure et l'électronique d'acquisition permettront également de limiter les interférences croisées, et l'influence de paramètres comme l'humidité, la température, les ondes électromagnétiques.

Enfin, les avancées récentes en matière de traitement de données et d'intelligence artificielle, doivent également accroître la qualité de l'information délivrée par les systèmes capteurs.

3.3. Recommandations du CES

Le CES émet les recommandations suivantes à destination des fabricants et distributeurs de systèmes capteurs, des utilisateurs de systèmes capteurs à titre privé, des acteurs de la recherche, et des administrations publiques.

Le CES alerte ces différents acteurs sur le fait que des données de systèmes capteurs, du fait de leur géolocalisation, peuvent constituer des données personnelles incluant potentiellement des informations sur les habitudes de vie des utilisateurs. **Le CES recommande donc à l'ensemble des acteurs de veiller au respect de la réglementation relative à la protection des données personnelles (RGPD), en s'appuyant sur les recommandations de la CNIL.**

3.3.1. Recommandations aux fabricants et distributeurs de systèmes capteurs

Le CES recommande aux développeurs, fabricants, et entreprises commercialisant les systèmes capteurs :

- De poursuivre les efforts pour améliorer la qualité métrologique des systèmes capteurs ;
- De documenter et rendre accessibles à tous les utilisateurs les informations relatives aux performances métrologiques, aux conditions d'utilisation et à l'interprétation des données générées. Sur ce point, le CES encourage les fabricants de systèmes capteurs à participer aux différents dispositifs d'évaluation des systèmes capteurs allant de l'intercomparaison à une méthode de référence (challenges AIRLAB, LCSQA – essais d'aptitudes) jusqu'à la certification volontaire de leurs performances au regard de la directive de surveillance de la qualité de l'air¹¹ (LNE/INERIS – Air'Quality Sensor) ;
- De mener ou soutenir des recherches sur les principes physiques de détection tant pour les composés gazeux que particulaires ;
- De développer des systèmes capteurs de polluants d'intérêts sur le plan sanitaire notamment ceux identifiés par l'OMS¹² et d'autres agences officielles¹³ et des systèmes capteurs multipolluants.

Le CES rappelle que les données issues des systèmes capteurs peuvent être comparées aux valeurs guides de qualité de l'air si ces données générées en temps quasi-réel sont intégrées sur un pas de temps adéquat. De plus, le CES rappelle que ces valeurs guides, définies au niveau populationnel, ne sont pas adaptées pour interpréter un risque au niveau individuel. En conséquence le CES suggère, de développer des indicateurs d'exposition relatifs permettant de situer une mesure individuelle par rapport à des mesures comparables. Cela permettra

¹¹ DIRECTIVE 2008/50/CE concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe

¹² https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0013/301720/Evidence-future-update-AQGs-mtg-report-Bonn-sept-oct-15.pdf

¹³ Anses, LCSQA, OQAI, US-EPA.

d'informer l'utilisateur sur son exposition par rapport à celle des autres utilisateurs ou par rapport à sa propre exposition sur une période et dans des microenvironnements donnés.

3.3.2. Recommandations aux utilisateurs de systèmes capteurs à titre privé

Le marché des systèmes capteurs est en évolution, avec un nombre important de dispositifs dont les performances sont variables. La pertinence d'un système capteur dépendant de l'objectif visé, le CES recommande aux personnes ou collectifs souhaitant s'équiper et mettre en œuvre un ou des systèmes capteurs :

- De prendre connaissance des éléments d'évaluations métrologiques publics, en lien avec les challenges AIRLAB (Airparif), les essais d'aptitudes (LCSQA) ou la certification volontaire Air'Quality sensor (LNE/Ineris), ou de travaux internationaux pour choisir un système capteur adapté à l'usage envisagé ;
- De prendre connaissance de la documentation existante (notices d'utilisation fournies par les fabricants et distributeurs de systèmes capteurs, rapports, plateformes) pour :
 - La mise en œuvre du système capteur : fonctionnement, bon usage (port, emplacement), limites techniques (interférences, potentielle dérive dans le temps) ;
 - La compréhension des informations fournies par les systèmes capteurs et les recommandations en découlant :
 - Nature des polluants mesurés au regard des enjeux sanitaires de la pollution de l'air ;
 - Connaissance des indicateurs actuellement utilisés par les fabricants de systèmes capteurs au regard des valeurs limites réglementaires ou valeurs guides pour la qualité de l'air ;
 - Recommandations de bonnes pratiques permettant de limiter l'exposition à la pollution de l'air (modes de transport, aération...).

3.3.3. Recommandations aux acteurs de la recherche

Le CES rappelle que les systèmes capteurs offrent des opportunités pour évaluer l'exposition individuelle à la pollution de l'air intérieur et/ou extérieur.

- Recommandations pour la conduite d'études utilisant des systèmes capteurs pour évaluer l'exposition individuelle à la pollution de l'air intérieur et/ou extérieur.

Pour mener à bien de telles études, le CES recommande d'abord aux porteurs de projets souhaitant utiliser des systèmes capteurs, tout comme pour les utilisateurs, de prendre connaissance des éléments d'évaluations métrologiques publics. Le choix du système capteur, fixe ou portable, devra tenir compte de la finalité de l'étude. Pour les systèmes capteurs portatifs, l'appareil doit être ergonomique pour ne pas modifier le comportement des porteurs et refléter au mieux leurs expositions réelles.

Le CES recommande également :

- De s'appuyer sur l'ensemble des points clés définis dans cette expertise pour s'assurer qu'une donnée générée par un système capteur puisse contribuer à l'évaluation de l'exposition individuelle (cf. annexe 2) ;

- De veiller à la maintenance des systèmes capteurs¹⁴ ;
- D'accompagner les participants pour le bon usage des dispositifs et pour la compréhension des données générées et de leur utilisation.

Par ailleurs, le CES recommande :

- De poursuivre le développement de bases de données publiques recensant les travaux mettant en œuvre des systèmes capteurs pour évaluer l'exposition individuelle.

Enfin, le CES encourage :

- Un partage large et opérationnel des retours d'expérience des projets mettant en œuvre des systèmes capteurs pour évaluer l'exposition individuelle ;
- Le déploiement de projets pluridisciplinaires regroupant des compétences en métrologie, sciences des données, expologie, épidémiologie et sciences humaines et sociales, compte-tenu de la multitude des disciplines entrant en jeu dans ce type de projets.

- Recommandations pour améliorer les connaissances sur les risques sanitaires liés à la pollution de l'air

Le CES recommande de considérer les opportunités offertes par les systèmes capteurs pour :

- Améliorer les estimations de l'exposition individuelle ;
- Acquérir des données d'exposition dans des lieux habituellement peu ou pas documentés ;
- Etudier la contribution des différents microenvironnements dans l'exposition globale des individus ;
- Etudier les déterminants des expositions ;
- Etudier les liens entre exposition et santé.

Le CES souligne que les systèmes capteurs peuvent être couplés à des appareils de mesures de la fréquence cardiaque ou de la fréquence respiratoire permettant d'étudier plus finement des indicateurs d'exposition complémentaires tels que la dose inhalée.

Enfin, le CES identifie des perspectives de recherche :

- Sur le développement de modes de collecte et de traitement de données massives pour les coupler à d'autres données sur des déterminants des expositions et/ou de leurs effets ;
- Sur l'utilisation de systèmes capteurs dans l'accompagnement et l'éducation thérapeutique des patients.

- Recommandations pour la recherche relative au développement de systèmes capteurs :

Le CES recommande de développer des travaux sur :

¹⁴ Etalonnage avant déploiement, vérification de la dérive, vérification du niveau de batterie/état de charge et son éventuelle influence sur le signal, intercomparaison des capteurs / test de reproductibilité, vérification de la durée de vie des éléments sensibles.

- L'intégration de sources de données massives et hétérogènes, de l'étape de leur collecte à leur traitement ;
- Les réseaux de systèmes capteurs, en particulier, les techniques avancées de gestion et d'étalonnage, l'optimisation de leur déploiement ;
- La qualification des données ;
- Le développement de méthodes d'automatisation, de prétraitement des données ;
- La mise en œuvre de systèmes capteurs mobiles et l'évaluation de l'impact de la mobilité sur la qualité de la mesure.

Par ailleurs, le CES recommande de développer des travaux de recherche alliant modélisation atmosphérique et réseaux denses et/ou mobiles de systèmes capteurs.

3.3.4. Recommandations aux acteurs publics (agence, administration, etc.)

Le CES recommande aux administrations publiques :

- De mettre en place une évaluation ou une certification des systèmes capteurs en fonction des usages auxquels ils sont destinés ;
- D'encourager le développement et le financement de projets de recherche pluridisciplinaires, notamment à des fins d'évaluation de l'exposition et d'interprétation sanitaire ;
- De réaliser un retour d'expérience des projets en cours sur l'utilisation des systèmes capteurs à des fins d'évaluation de l'exposition individuelle ;
- De favoriser la mise à disposition auprès des utilisateurs des informations issues des évaluations des systèmes capteurs ;
- De sensibiliser les utilisateurs au bon usage des systèmes capteurs et à la compréhension et l'interprétation des informations générées.

Plus particulièrement, aux institutions en charge de la surveillance de la qualité de l'air, le CES recommande :

- De poursuivre les réflexions sur l'intégration des données de systèmes capteurs aux données produites par les réseaux de surveillance existants en concertation avec l'ensemble des acteurs impliqués.

4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE L'AGENCE

L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail endosse les conclusions et recommandations du CES « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » présentées ci-dessus.

L'Agence souligne que l'émergence des systèmes capteurs (également appelés micro-capteurs), combinée à la prise de conscience par la population de l'impact de la pollution de l'air sur sa santé et à l'expansion forte de l'usage d'objets connectés, a initié depuis une dizaine d'années une vague de démocratisation dans le domaine du suivi de la qualité de l'air, réservé jusqu'à présent au domaine de la recherche et de la surveillance réglementaire de la qualité de l'air.

L'Agence relève que malgré leur qualité métrologique limitée, les systèmes capteurs offrent de nombreuses opportunités pour répondre aux différents enjeux liés à la pollution de l'air intérieur et extérieur notamment au travers d'une amélioration de la couverture spatio-temporelle et de la possibilité d'étudier les différents microenvironnements contribuant à l'exposition totale d'un individu. Néanmoins, une évaluation précise de l'exposition doit s'appuyer sur des études répondant aux critères/listes de points clés identifiés dans l'expertise afin d'étayer la qualité des données. L'Agence alerte sur les modalités d'interprétation qui sont parfois intégrées aux systèmes capteurs et qui reposent sur une temporalité de données et des seuils inadaptés pour évaluer un risque sanitaire individuel. De ce fait, l'Agence informe les utilisateurs de systèmes capteurs à titre privé que ces dispositifs ne peuvent être considérés à l'heure actuelle que comme des outils de sensibilisation leur permettant uniquement de comparer de façon relative et qualitative des niveaux de concentration auxquels ils sont exposés, ou d'identifier d'éventuelles sources de pollution et agir en conséquence pour diminuer leur exposition (par exemple en modifiant ses habitudes de déplacements).

S'agissant plus spécifiquement de la mesure de CO₂, en particulier dans les établissements recevant du public, et au regard des nombreux systèmes capteurs commercialisés, l'Agence souligne que la sélection des dispositifs est à faire avec précaution pour fournir une information fiable et adaptée à l'objectif visé.

De plus, l'Agence insiste sur le fait que les systèmes capteurs ne sont pas adaptés pour communiquer au niveau individuel sur un risque potentiel sur la santé de l'utilisateur lié à la pollution de l'air. En revanche, la massification de données produites à titre privé permettrait d'approcher l'exposition d'une population et d'enrichir les cartographies et la modélisation de la pollution de l'air, contribuant ainsi à l'évaluation des effets de la pollution de l'air sur des échelles plus larges.

Par ailleurs, l'Agence mène actuellement des réflexions afin de sensibiliser ses comités d'experts et introduire progressivement dans ses expertises les différentes composantes de l'exposome¹⁵, comme les expositions multi-sources, multi-substances, multi-dangers, qui dépendent, entre autres, des habitudes de vie et de l'environnement urbain, rural et social. Dans ce cadre, les systèmes capteurs s'avèrent intéressants pour rendre opérationnel le concept de l'exposome dans les études menées dans le champ de la santé environnementale en améliorant les connaissances sur l'exposition individuelle et les risques sanitaires liés à la pollution de l'air.

Enfin, l'Agence relève que les initiatives citoyennes engagent plus largement des acteurs aux savoirs pluriels¹⁶ pour la préservation d'un bien commun. L'Agence souligne alors l'opportunité du montage d'expérimentations et d'actions en recherches et sciences participatives dans le domaine de la santé environnementale autour des systèmes capteurs sur un territoire donné, afin d'améliorer la production de connaissances. Cette opportunité permet également de mener des réflexions méthodologiques sur l'élaboration des savoirs experts non-experts et de favoriser le lien social et le développement de la culture scientifique et technique au sein de la population associée à la démarche. Cet apport de connaissances et une meilleure

¹⁵ L'Anses propose la définition de l'exposome suivante : « L'exposome correspond à la totalité des expositions néfastes comme bénéfiques à des agents chimiques, biologiques, et physiques, en interaction avec le milieu de vie et le contexte psycho-social, que connaît un organisme vivant de sa conception à sa fin de vie, complétant l'effet du génome afin d'expliquer son état de santé ».

¹⁶ Informatique, ingénierie, métrologie, électronique, chimie, géo-physique, géographie, sociologie, design, *data science*, etc.

compréhension des problématiques liées à la pollution de l'air sont des éléments favorables au passage à l'action citoyenne en faveur de la qualité de l'air.

Dr Roger Genet

MOTS-CLÉS

Micro-capteurs, Systèmes capteurs, air intérieur, air extérieur, exposition individuelle, pollution atmosphérique, effets sanitaires, sciences participatives, profils, motifs d'engagement

Sensors, indoor air, outdoor air, personal exposure, air pollution, health effects, participatory science, profiles, motivations

CITATIONS SUGGÉRÉES

Anses. (2022). Utilisation de micro-capteurs pour le suivi de la qualité de l'air intérieur et extérieur. (saisine 2018-SA-0271). Maisons-Alfort : Anses, 178 p.

Anses. (2022). Micro-capteurs pour le suivi de la qualité de l'air intérieur et extérieur. Vol. 2 Mesures citoyennes de qualité de l'air. Figures, Savoirs, Actions (saisine 2018-SA-00271). Maisons-Alfort : Anses, 106 p.

ANNEXE 1 : PERFORMANCES MÉTROLOGIQUES ET COÛTS DES PRINCIPAUX TYPES DE CAPTEURS DE PARTICULES, DE CARBONE SUIE ET DE GAZ

Technologies	Composés mesurés	Avantages	Inconvénients	Coût
Semi-conducteur	NO ₂ , O ₃ , CO, COV, COVT	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne sensibilité (µg/m³ au mg/m³). - Temps de réponse court (de quelques secondes à quelques minutes). 	<ul style="list-style-type: none"> - Généralement non sélectif. - Interférence avec le CO₂ pour la mesure des COVT et inversement - Instabilité à long terme. - Consommation électrique liée à l'élément chauffant 	€
Cellule électrochimique	NO, NO ₂ , SO ₂ , O ₃ , CO	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne sensibilité (µg/m³ au mg/m³). - Consommation électrique faible. 	<ul style="list-style-type: none"> - Forte interférence des conditions ambiantes comme l'humidité et/ou la température. - Sensible aux interférents chimiques dans une même famille d'oxydants (e.g. interférence de l'O₃ sur la mesure du NO₂). - Temps de réponse plutôt long (de plusieurs minutes à plusieurs dizaines de minutes). - Durée de vie directement liée à la concentration d'exposition 	€€
PID (détecteur à photo-ionisation)	- Composés inorganiques (ammoniac, chlore)	- Bonne sensibilité (jusqu'au mg/m ³ voire la dizaine de µg/m ³).	- Non sélectif : détection simultanée des composés organiques dont l'énergie	€€€

Technologies	Composés mesurés	Avantages	Inconvénients	Coût
	- Composés organiques volatils (liste variable en fonction de la lampe UV utilisé, couramment une lampe à 10,6 eV)	- Temps de réponse court (quelques secondes).	d'ionisation est inférieure à l'énergie de la lampe UV. - Sensibilité aux fortes humidités (HR>70%). - Dérive rapide de la réponse dans le temps.	
Mesure optique (spectroscopie d'absorption IR)	CO, CO ₂	- Bonne sensibilité (quelques centaines à quelques milliers de ppm). - Temps de réponse court (de 20 à 120 s). - Faible dérive dans le temps	- Sensible aux conditions ambiantes (température, humidité et pression).	€€
Comptage optique (photométrie, néphélométrie)	Particules	- Bonne sensibilité (quelques µg/m ³). - Temps de réponse court (quelques secondes sous réserve d'une fluidique adaptée)	- Incertitude induite lors du calcul en concentration massique à partir du comptage en nombre par la prise en compte d'un diamètre aérodynamique idéal ne tenant pas compte de la nature de la particule - Encrassement de la cellule photo sensible - diamètre minimal détecté = 300nm	€
Mesure optique (transmittance)	Carbone suie	- Excellente sensibilité (quelques centaines de ng/m ³).	- Incertitude élevée vis à vis de la mesure de référence thermo-optique	€€€

Technologies	Composés mesurés	Avantages	Inconvénients	Coût
		- Temps de réponse court (minute)	- Utilisation de consommable pour le prélèvement (coût élevé)	
€ : de quelques euros à quelques dizaines d'euros ; €€ : de quelques dizaines d'euros à quelques centaines d'euros ; €€€ : de quelques centaines d'euros à quelques milliers d'euros.				

ANNEXE 2 : LISTE DE POINTS CLÉS À PRENDRE EN COMPTE POUR QU'UNE DONNÉE GÉNÉRÉE PAR UN SYSTÈME CAPTEUR PUISSE CONTRIBUER À L'ÉVALUATION DE L'EXPOSITION INDIVIDUELLE

Points clés à considérer – Qualité de la mesure

Points clés	Exigences	Criticité		Objectifs	Intrinsèque au capteur ou disponible dans l'étude
		Fixe	Portatif / Mobilité		
Identification du polluant à mesurer dans l'environnement cible	Identification spécifique indispensable	Indispensable		Tout objectif	Intrinsèque
Suivi des niveaux du polluant dans l'environnement cible	Echelle ordinale	Indispensable		Tout objectif	Intrinsèque
Évaluations initiales avant manipulations / Préqualification métrologique, Etalonnage si nécessaire	Cohérence avec le contexte de l'étude : tests constructeurs ou tests utilisateurs. dans des conditions d'usage similaires	Indispensable		Tout objectif	Etude
Reproductibilité (variabilité entre capteurs dans les mêmes conditions d'usage)	Compatible avec l'objectif de l'étude	Utile		Tout objectif	Etude
Exactitude (<i>combinaison de justesse et fidélité</i>)	Compatible avec l'objectif de l'étude	Indispensable		Mesure de concentrations	Etude
		Utile		Autres objectifs	
Valeur de limite de détection et / ou limite de quantification	Les plus basses possibles et compatibles avec l'objectif de l'étude	Indispensable		Quantification exposition, lien effet sanitaire Mesure de concentrations	Intrinsèque
		Utile		Autres objectifs	
Plage de concentration (min - max)	Compatible avec l'environnement investigué	Indispensable		Tout objectif	Intrinsèque
Résolution de la mesure	Compatible avec l'usage	Indispensable		Tout objectif	Intrinsèque
Connaissance des autres paramètres : dérive, linéarité, influence T°, humidité, interférence avec d'autres espèces chimiques	-	Utile		Tout objectif	Intrinsèque
Temps de réponse du capteur	Doit permettre de détecter les changements rapides dans l'environnement	Utile	Indispensable	Tout objectif	intrinsèque
Fréquence d'échantillonnage sur le	Compatible avec l'objectif de l'étude	Utile		Intrinsèque	Intrinsèque

Points clés	Exigences	Criticité		Objectifs	Intrinsèque au capteur ou disponible dans l'étude
		Fixe	Portatif / Mobilité		
pas de temps d'acquisition	Connaître le rapport cyclique : durée de l'état actif par rapport à un phénomène périodique				
Horodatage / synchronisation	-	Indispensable		Tout objectif	Intrinsèque

Points clés à considérer – Contextualisation /Mise en œuvre du système capteur

Points clés	Exigences	Criticité		Objectifs	Intrinsèque au capteur ou disponible dans l'étude
		Fixe	Portatif / Mobilité		
Connaissance des moyens et délais de récupération et/ou transmission des données	Doit être adapté à l'usage. Savoir si les données sont accessibles depuis le capteur ou via un réseau.		Utile	Tout objectif	Intrinsèque
Connaissance des modalités de stockage des données	En adéquation avec l'objectif de l'étude - Connaître le type, la capacité et la durée de stockage possibles (local ou distant)		Utile	Tout objectif	Intrinsèque
Alimentation	Préciser la source d'alimentation, et l'impact sur la mesure. Si batterie : précision de l'autonomie vérifiée		Utile	Tout objectif	Intrinsèque
Position du système capteur : hauteur en fixe, localisation (voies respiratoires)	Doit être adapté à l'objectif et représentatif (par exemple un capteur de COV positionné près d'une fenêtre ne sera pas représentatif de la pièce)	Utile	Indispensable	Tout objectif	Etude
Couverture spatiale	Compatible avec l'objectif de l'étude Permet de juger de la robustesse de l'étude : Distribution des capteurs de manière représentative d'une zone géographique ; Taille de la flotte pour représenter en mobilité un lieu (ville, territoire, chambre, etc.).		Indispensable	Tout objectif	Etude
Couverture temporelle	Compatible avec l'objectif de l'étude Vérifier que la durée est adaptée (horaire, journalière, mensuelle, saison, campagne de mesure).		Indispensable	Tout objectif	Etude

Points clés	Exigences	Criticité		Objectifs	Intrinsèque au capteur ou disponible dans l'étude
		Fixe	Portatif / Mobilité		
Modifications des conditions d'utilisation (par rapport aux conditions préconisées)	Savoir s'il y a des modifications, les raisons et l'évaluation de leur impact (détérioration du prélèvement ou de l'aérosol par exemple)	Indispensable		Tout objectif	Etude
(Géo) localisation (GPS ou autre définition de localisation)	Doit permettre l'interprétation	Indispensable sous réserve du respect du RGPD		Tout objectif	Intrinsèque ou étude
Description des environnements fréquentés : ensemble des attributs de contexte (directement par le remplissage d'un journal de bord ou indirectement via la recherche de signature*)	Compatible avec l'objectif de l'étude Connaître la méthode pour sa mise en œuvre	Utile		Mesure d'exposition intégrée	Etude
	Connaître : - les conditions de ventilation des environnements intérieurs (a minima type de ventilation et état général d'ouvertures de fenêtres) ; - le type de pièces pour les environnements intérieurs - les conditions météorologiques	Indispensable		Comparaison d'environnement	
	Compatible avec l'objectif de l'étude Connaître la méthode pour sa mise en œuvre	Indispensable		Autre objectif	
Description des activités prévues (tâches réalisées, données circulation) et événements imprévus (chantier, incidents, épisodes de pollution, etc.) (BET + journal de bord)	Pas de temps du BET compatible avec l'objectif de l'étude - Connaître la méthode pour déterminer le BET pour sa mise en œuvre	Utile		Tout objectif	Etude
Description de l'activité physique (marche, course, etc.) Ou autres activités (BET + journal de bord, données volontaire ou indirecte par déduction d'autres informations)	Compatible avec l'objectif de l'étude Connaître la méthode pour déterminer le BET pour sa mise en œuvre (données volontaire ou indirecte par déduction d'autres informations)	Optionnel		Tout objectif	Etude

Points clés	Exigences	Criticité		Objectifs	Intrinsèque au capteur ou disponible dans l'étude
		Fixe	Portatif / Mobilité		
<p>* recherche de signature* c'est-à-dire qu'il peut être possible d'associer des évènements passés au cours de la mesure à des signaux enregistrés : par exemple brutale chute de concentration associée à une ouverture de fenêtre, augmentation soudaine de la concentration lors d'un changement de microenvironnement) BET : budget espace temps</p>					

Points clés à considérer – Stockage et accessibilité des données + Pré-Traitement des données

Points clés	Exigences	Criticité		Objectifs	Intrinsèque au capteur ou disponible dans l'étude
		Fixe	Portatif / Mobilité		
Accessibilité à l'utilisateur, coordinateur étude, grand public	Description suffisante	Utile		Tout objectif, modulo respect réglementation RGPD en vigueur	Etude
Disposer d'une base de données unique de travail - 1 ^{er} niveau de traitement	Description des actions de traitement réalisées Nettoyage : <i>Erreur de codage, de transmission</i>	Indispensable		Tout objectif	Etude
Corrections apportées par l'utilisateur	Description des actions de traitement réalisées (Algorithme fourni et argumenté Préparation de la base de données : définir la stratégie de traitement des valeurs manquantes, catégorisation des valeurs : aberrantes, suspectes, etc.)	Indispensable		Tout objectif	Etude
Présence/absence de pré-traitement des métadonnées (<i>position GPS, pertes de données GPS, BET, carnet bord, tags...</i>)	Connaître la qualité de ces métadonnées et si elles ont subi un pré-traitement	Indispensable		Tout objectif	Etude
<p>NB : Le pré-traitement des données correspond à la validation des sorties brutes du capteur et à la préparation de la base de données</p>					

Points clés à considérer – Traitement des données

Points clés	Exigences	Criticité		Objectifs	Intrinsèque au capteur ou disponible dans l'étude
		Fixe	Portatif / Mobilité		
Transformation des données <i>(création de variables, agrégation spatiale, temporelle, sur des variables, etc.)</i>	Description des transformations réalisées Savoir s'il y a eu des transformations et leur type	Indispensable		Tout objectif	Etude
Traitement des données censurées (< limite basse et > limite haute)	Connaitre les modalités de traitement	indispensable		Tout objectif	Etude
Enrichissement par des données externes <i>(ex. mesures aux stations, sorties de modèles de qualité de l'air, météo, POI, trafic, données géographiques, etc.)</i>	Description de l'enrichissement réalisé Source des données externes	Utile		Tout objectif	Etude
Méthodes statistiques ou d'analyse de données de concentration, fouille de données, etc.	Description de la méthode	Indispensable si traitement réalisé		Tout objectif	Etude
Capacité à traiter un volume important de données et en un temps adapté à l'usage	-	Utile mais indispensable si contexte large échelle		Tout objectif	Etude
Méthode d'évaluation de l'exposition (durée, lieu, concentration)	Pertinence de la méthode	Indispensable si objet de l'étude		Quantification exposition	Etude
Méthode d'analyse du lien exposition (durée, lieu, concentration) et effets sanitaires, dose inhalée (en fonction de l'activité et de l'âge, etc.) et réponse de l'individu.	Pertinence de la méthode	Indispensable si objet de l'étude		lien effet sanitaire	Etude

Point Clé clés à considérer – Interprétation

Points clés	Exigences	Criticité		Objectifs	Intrinsèque au capteur ou disponible dans l'étude
		Fixe	Portatif / Mobilité		
Discussion/conclusion des auteurs heuristique et réflexive sur les éléments donnés de l'étude	Compréhensible	Utile		Tout objectif	Etude

Micro-capteurs pour le suivi de la qualité de l'air intérieur et extérieur

**Volume 1 « De l'usage de micro-capteurs à des fins d'évaluation de
l'exposition individuelle »**

Saisine « n° 2018-SA-0271 »

RAPPORT d'expertise collective

« CES Évaluation des risques liés aux milieux aériens »

« GT Micro-capteurs »

Mars 2022

Citation suggérée

Anses. (2022). Micro-capteurs pour le suivi de la qualité de l'air intérieur et extérieur. Volume 1. De l'usage des micro-capteurs à des fins d'évaluation de l'exposition individuelle (saisine 2018-SA-00271). Maisons-Alfort : Anses, 178 p.

Mots clés

Micro-capteurs, Systèmes capteurs, air intérieur, air extérieur, exposition individuelle, pollution atmosphérique, effets sanitaires

Sensors, indoor air, outdoor air, personal exposure, air pollution, health effects

Présentation des intervenants

PRÉAMBULE : Les experts membres de comités d'experts spécialisés, de groupes de travail ou désignés rapporteurs sont tous nommés à titre personnel, *intuitu personae*, et ne représentent pas leur organisme d'appartenance.

GROUPE DE TRAVAIL

Présidente

Mme Nathalie REDON – Enseignante-Chercheuse, Institut Mines-Télécom (IMT) Nord Europe, Centre d'Enseignement, de Recherche et d'Innovation (CERI) Energie Environnement - Spécialités : électronique, instrumentation, capteurs, qualité de l'air.

Membres

Mme Laurence ALLARD – Maîtresse de conférences, Université de Lille-Ircav-Sorbonne Nouvelle – Spécialités : sociologie des usages numériques.

M. Christophe DEBERT – Responsable du service Métrologie et Innovation (Airparif) - Spécialités : métrologie, qualité de l'air.

M. Stephan GABET – Attaché temporaire d'enseignement et de recherche, Département "Toxicologie et Santé Publique", ULR 4483-IMPacts de l'Environnement Chimique sur la Santé (IMPECS), Faculté de Pharmacie, Faculté de Médecine, Université de Lille - Spécialités : santé publique, épidémiologie, effets et impacts sanitaires des polluants de l'air.

M. Benjamin HANOUNE – Chargé de recherches, Centre national de la recherche scientifique (CNRS), Directeur du laboratoire Physicochimie des Processus de Combustion et de l'Atmosphère (PC2A), UMR 8522 CNRS/Université de Lille – Spécialités : chimie atmosphérique, qualité de l'air, métrologie.

Mme Tatiana MACE – Responsable du Département Métrologie des gaz, Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) - Spécialités : métrologie, qualité de l'air.

Mme Malika MADELIN – Enseignante-chercheuse en géographie, Université de Paris (Paris Diderot), UMR 8586 PRODIG – Spécialités : géographie, climatologie urbaine, qualité de l'air, sciences participatives.

M. Olivier RAMALHO – Chef de projet multi-expositions au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) et responsable de la métrologie à l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI) – Spécialités : qualité de l'air intérieur, métrologie, odeurs, chimie analytique - santé environnement.

Mme Karine ZEITOUNI – Professeure des Universités, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ), membre associé de l'Université Paris-Saclay, Responsable de l'équipe ADAM du laboratoire Données et Algorithmes pour une Ville Intelligente et Durable (DAVID), UR 7431 - Spécialités : informatique, sciences de données et intelligence artificielle pour des données spatiales et temporelles, analyse de données de capteurs, application aux domaines de l'environnement et de la santé.

RAPPORTEURS

Mme Laurence ALLARD – Maîtresse de conférences, Université de Lille-Ircav-Sorbonne Nouvelle – Spécialités : sociologie des usages numériques.

COMITÉ D'EXPERTS SPÉCIALISÉ

Les travaux, objets du présent rapport ont été suivis et adoptés par le CES « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » qui a été renouvelé au cours de l'instruction de cette expertise. Les compositions du CES ayant suivi ces travaux étaient les suivantes :

- CES « Évaluation des risques liés aux milieux aériens (2019-2020)

Présidente

Mme Rachel NADIF – Chargée de recherche (Institut national de la santé et de la recherche médicale – Responsable Équipe, CESP U1018) – Spécialité : épidémiologie, santé respiratoire.

Vice-président

M. Christophe PARIS – Professeur des universités, praticien hospitalier (Université de Rennes 1 - Institut de recherche en santé, environnement et travail Inserm 1085 – Centre hospitalier universitaire de Rennes). Spécialités : épidémiologie des risques professionnels, pathologies professionnelles, santé au travail.

Membres

Mme Sophie ACHARD – Enseignant chercheur, maître de conférence (Université Paris Descartes) – Spécialité : toxicologie environnementale.

Mme Christina ASCHAN-LEYGONIE – Enseignant-chercheur (Université Lumière Lyon 2 - UMR 5600 Environnement Ville Société (EVS)) - Spécialités : géographie, milieux urbains, inégalités de santé.

M. Denis BÉMER – Responsable d'études (Institut national de recherche et de sécurité) – Spécialités : physique et métrologie des aérosols - filtration de l'air. (Démission le 3 juillet 2020)

Mme Valérie BEX – Responsable de la cellule santé habitat (Service parisien de santé environnementale) – Spécialités : métrologie des polluants biologiques, qualité de l'air intérieur.

Mme Nathalie BONVALLOT – Enseignant chercheur (Ecole des hautes études en santé publique) – Spécialités : toxicologie, évaluation des risques sanitaires.

M. Denis CAILLAUD – Professeur des universités, praticien hospitalier (Centre hospitalier universitaire de Clermont-Ferrand) – Spécialités : pneumologie, allergologie, épidémiologie-environnement (pollens, moisissures).

M. Jean-Dominique DEWITTE - Professeur des universités, praticien hospitalier (Université de Brest) – Spécialités : santé travail, pneumologie.

M. Marc DURIF – Responsable de Pôle (Institut national de l'environnement industriel et des risques) – Spécialités : métrologie et méthode d'analyse des polluants de l'air, caractérisation des expositions.

Mme Émilie FREALLE – Praticien Hospitalier (Centre Hospitalier Régional Universitaire de Lille, Institut Pasteur de Lille) – Spécialités : écologie microbienne de l'air, microbiologie analytique, évaluation et prévention du risque microbiologique, surveillance de l'environnement intérieur.

M. Philippe GLORENNEC – Enseignant chercheur (Ecole des hautes études en santé publique – Institut de recherche sur la santé, l'environnement et le travail, UMR Inserm 1085) – Spécialités : évaluation des expositions et des risques sanitaires d'origine chimique.

Mme Ghislaine GOUPIL – Chef de département, adjoint au chef du pôle environnement (Laboratoire Central de la Préfecture de Police) – Spécialités : métrologie des polluants (air intérieur, air ambiant et air des lieux de travail), techniques d'analyses, réglementation air.

Mme Marianne GUILLEMOT – Responsable d'études (Institut national de recherche et de sécurité) – Docteur en Chimie – Spécialités : métrologie, surveillance atmosphérique et des environnements professionnels.

Mme Bénédicte JACQUEMIN – Chargée de recherche (Institut national de la santé et de la recherche médicale, Institut de recherche en santé, environnement et travail) – Spécialités : épidémiologie environnementale, pollution atmosphérique.

M. Olivier JOUBERT – Maître de conférences (Université de Lorraine) – Spécialités : toxicologie, sécurité sanitaire.

Mme Danièle LUCE – Directrice de recherche (Institut national de la santé et de la recherche médicale, Institut de recherche en santé, environnement et travail) – Spécialités : Epidémiologie, santé travail.

Mme Corinne MANDIN – Chef de division (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) – Spécialités : évaluation des expositions et des risques sanitaires, environnements intérieurs.

M. Fabien MERCIER – Ingénieur de recherche, Responsable R&D (Ecole des hautes études en santé publique / Laboratoire d'étude et de recherche en environnement et santé) – Spécialités : métrologie des polluants, méthodes d'analyse, air intérieur.

Mme Christelle MONTEIL – Enseignant-chercheur (Université de Rouen Normandie) – Spécialité : toxicologie.

Mme Anne OPPLIGER – Privat-Docent & Maître d'Enseignement et de Recherche (Institut universitaire romand de Santé au Travail, Lausanne) – Spécialités : Santé travail, risques biologiques, bioaérosols, agents zoonotiques.

M. Pierre PERNOT – Responsable de service (Airparif) – Spécialités : surveillance et réglementation de la qualité de l'air.

■ CES « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » (2020-2023)

Présidente

Mme Rachel NADIF – Responsable d'équipe, chargée de recherche, (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale, CESP U1018) – Spécialités : épidémiologie, santé respiratoire.

Vice-président

M. Hervé LABORDE-CASTEROT - Praticien hospitalier (Centre antipoison de Paris, AP-HP Nord Université de Paris) – Spécialités : pathologies professionnelles, toxicologie clinique, épidémiologie, allergologie.

Membres

Mme Sophie ACHARD – Maître de conférences (Faculté de Santé - Université de Paris) – Spécialité : toxicologie environnementale.

M. Fabrice ALLIOT – Ingénieur d'études (Ecole Pratique des Hautes Etudes) – Spécialités : métrologie et méthode d'analyse des polluants de l'air, perturbateurs endocriniens.

M. Michel ANDRÉ – Directeur de recherche (Université Gustave Eiffel) – Spécialités : transports et pollution de l'air, métrologie et modélisation des émissions des véhicules et du trafic, méthodologies d'évaluation.

Mme Nathalie BONVALLOT – Enseignant chercheur (Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique – Institut de recherche sur la santé, l'environnement et le travail, UMR Inserm 1085) – Spécialités : toxicologie, évaluation des risques sanitaires, identification des mélanges et modèles de risques associés, perturbateurs endocriniens.

M. Patrick BROCHARD – Professeur émérite (Université de Bordeaux) – Spécialités : pneumologie, pathologies professionnelles et environnementales, impact sanitaire des particules inhalées (amiante, silice...).

Mme Fleur DELVA – Praticien hospitalier, médecin de santé publique (Centre Hospitalier Universitaire de Bordeaux) – Spécialités : médecine, prévention, reproduction, épidémiologie.

M. Jean-Dominique DEWITTE - Professeur des universités, praticien hospitalier (Centre Hospitalier Régional Universitaire de Brest) – Spécialités : pathologies professionnelles, pneumologie, allergologie.

M. Marc DURIF – Coordinateur de la thématique Risques, Sites industriels et Territoire – Direction de la Stratégie - Spécialités : métrologie et méthode d'analyse des polluants de l'air, émissions industrielles et anthropiques, caractérisation des expositions, construction de stratégies de surveillances dans l'air dans différents contextes.

Mme Émilie FREALLE – Praticien hospitalier (Centre Hospitalier Régional Universitaire de Lille, Institut Pasteur de Lille) – Spécialités : écologie microbienne de l'air, microbiologie analytique, évaluation et prévention du risque microbiologique, surveillance de l'environnement intérieur.

M. François GAIE-LEVREL – Ingénieur chercheur (Laboratoire national de métrologie et d'essais) – Spécialités : métrologie, pollution atmosphérique, aérosols, nanoparticules.

M. Philippe GLORENNEC – Enseignant chercheur (École des Hautes Études en Santé Publique – Institut de recherche sur la santé, l'environnement et le travail, UMR Inserm 1085) – Spécialité : évaluation des expositions et des risques sanitaires d'origine chimique.

Mme Marianne GUILLEMOT – Responsable d'études (Institut National de Recherche et de Sécurité) – Spécialités : métrologie, surveillance atmosphérique et des environnements professionnels.

Mme Marion HULIN - Chargée de projet et d'expertise scientifique (Santé Publique France) – Spécialités : épidémiologie, qualité de l'air intérieur, santé environnement, évaluation des expositions.

Mme Bénédicte JACQUEMIN – Chargée de recherche (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale) – Spécialités : épidémiologie environnementale, pollution atmosphérique.

M. Olivier JOUBERT – Maître de conférences (Université de Lorraine) – Spécialités : toxicologie, sécurité sanitaire, particules.

Mme Juliette LARBRE - Directrice du Laboratoire Polluants Chimiques (Service Parisien de Santé Environnementale) – Spécialités : qualité de l'air intérieur et extérieur, métrologie, santé environnement.

Mme Barbara LE BOT – Professeur des Universités, Directrice adjointe du Laboratoire d'étude et recherche en environnement et santé (Ecole des hautes études en santé publique) – Spécialités : évaluation des expositions, santé publique, métrologie et méthode d'analyse des polluants de l'air et poussières.

Mme Johanna LEPEULE – Chargée de recherche (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale) – Spécialités : pollution de l'air, épidémiologie environnementale, santé périnatale, grossesse, épigénétique, modélisation des expositions.

Mme Danièle LUCE – Directrice de recherche (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale) – Spécialités : épidémiologie, santé travail, expositions professionnelle et environnementale.

Mme Corinne MANDIN – Chef de division (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur) – Spécialités : évaluation des expositions et des risques sanitaires, environnements intérieurs.

Mme Anne OPPLIGER – Responsable de recherche (Unisanté : Centre universitaire de médecine générale et santé publique de Lausanne) – Spécialités : santé travail, risques biologiques, bioaérosols, agents zoonotiques.

M. Pierre PERNOT – Directeur Opérationnel (Airparif) – Spécialités : métrologie, surveillance et réglementation de la qualité de l'air.

M. Nhan PHAM-THI – Enseignant chercheur, médecin (Institut de Recherche Biomédicale des Armées, Ecole Polytechnique) – Spécialités : allergologie, pneumologie.

M. Jean-Marc THIBAUDIER – Médecin du travail (Retraité - Mutualité Sociale Agricole des Alpes du Nord) – Spécialités : santé travail, médecine, agriculture, produits phytosanitaires, poussières agricoles.

PARTICIPATION ANSES

Coordination et contribution scientifique

Mme Emmanuelle DURAND – Coordinatrice d'expertise, Unité d'Évaluation des Risques liés à l'Air (UERA) – Anses

Mme Amandine PAILLAT – Adjointe à la cheffe d'unité, Unité d'Évaluation des Risques liés à l'Air (UERA) – Anses

Contribution scientifique

Mme Camille BOUBAL – Chargée de projets en sciences sociales – Mission Sciences Sociales Expertises et Société - Anses

Secrétariat administratif

Mme Sophia SADDOKI – Anses

Mme Isabelle PIERI - Anses

AUDITION DE PERSONNALITÉS EXTÉRIEURES

Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) – 20 mars 2020

M. Jean-François BOTTOLLIER-DEPOIS – Adjoint Direction de la Santé – Pôle Santé Environnement

Association pour la Prévention de la Pollution Atmosphérique (APPA) – 27 novembre 2020

M. Denis CHARPIN – Président, Médecin Pneumologue

M. Rémy COLLOMP – Membre du conseil scientifique – Pharmacien (CHU Nice)

Association Respire – 27 novembre 2020

M. Olivier BLOND – Président de l'association

France Nature Environnement (FNE) – 27 novembre 2020

Mme Anne LASSMAN-TRAPPIER – Présidente

Fabricants de systèmes capteurs :**Société ELICHENS – 19 janvier 2021**

M. Rémy JOURNET - Responsable du développement des activités

Société IQAIR – 1^{er} février 2021

M. Yann BOQUILLOD - Directeur de la mesure de la qualité de l'air

Société NETATMO – 08 février 2021

Mme Nathalie LAMY – Directrice recherche et développement

M. Marcin MEZYNSKI – Chef de produit qualité de l'air

M. Fred POTTER – Fondateur

Société COZYAIR – 08 février 2021

M. Charles CORNILLE – Fondateur, expert qualité de l'air

M. Thomas FAGNIEZ – Ingénieur qualité de l'air

Mme Lamia MIALET – Fondatrice, experte qualité de l'air

Groupe TERA – 26 février 2021

M. Antoine DUMAS – Directeur technique

Mme Émilie BIALIC – Responsable recherche et développement

Experts juristes :

M. Mathieu CAMUS - Fondateur et dirigeant de la société Privacy Impact (11 mars 2021)

M. Jean-Michel LIVOWSKY - Directeur général DPO Experts (11 mars 2021)

M. Régis CHATELIER - Chargé d'études prospectives à la CNIL (11 mars 2021)

Mme Mélanie CLEMENT-FONTAINE - Professeure de droit, Faculté de droit et de science politique de Versailles St Quentin en Yvelines (29 mars 2021)

CONTRIBUTIONS EXTÉRIEURES À L'AGENCE

LCSQA. Extraction de la base de données des micro-capteurs, version 1.4 [En ligne] <https://captair-lcsqa.fr/> (septembre 2021).

SOMMAIRE

Présentation des intervenants	3
Sigles et abréviations.....	13
Liste des tableaux	16
Liste des figures.....	17
1 Contexte, objet et modalités de réalisation de l'expertise	18
1.1 Contexte	18
1.2 Objet de la saisine.....	21
1.2.1 Questions posées	21
1.2.2 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation	23
1.3 Prévention des risques de conflits d'intérêts.....	23
2 Méthode de travail.....	24
3 Définitions et connaissances pré-requises.....	26
3.1 Définition des systèmes capteurs.....	26
3.1.1 Définitions identifiées dans la littérature	26
3.1.2 Définitions retenues par le groupe de travail et éléments d'accompagnement .	28
3.2 Technologies disponibles (éléments sensibles et capteurs)	31
3.3 Chaîne d'utilisation des systèmes capteurs et terminologie associée	37
3.3.1 Principe et étapes de la chaîne d'utilisation.....	37
3.3.2 Réseaux de systèmes capteurs	40
3.3.3 Place du <i>smartphone</i> (téléphones intelligents)	41
3.3.4 Discussion sur les indicateurs proposés par les fabricants de systèmes capteurs	42
3.4 Acteurs entrant en jeu dans la mise en oeuvre des systèmes capteurs.....	46
4 Panorama des projets mettant en œuvre des systèmes capteurs	48
4.1 Préambule.....	48
4.2 Certification, normalisation et évaluation des systèmes capteurs	48
4.2.1 Certification, normalisation des systèmes capteurs	48
4.2.2 Évaluation des systèmes capteurs et identification de systèmes capteurs en fonction du domaine d'application.....	50
4.3 Expérimentations impliquant le citoyen	59
4.3.1 Utilisation de systèmes capteurs pour l'information et la sensibilisation à la pollution de l'air	60
4.3.2 Plateformes de visualisation et de partage de données issues de systèmes capteurs	62
5 Cas particulier des systèmes capteurs de CO₂ pour des usages préventifs	66

6	Projets portant sur l'utilisation de systèmes capteurs pour évaluer l'exposition	68
6.1	Rappel des méthodes d'évaluation de l'exposition à la pollution de l'air, apports et limites des systèmes capteurs.....	68
6.1.1	Rappel des méthodes d'évaluation de l'exposition à la pollution de l'air	68
6.1.2	Evaluation de la dose inhalée.....	70
6.1.3	Apports et limites des systèmes capteurs pour l'évaluation de l'exposition.....	71
6.2	Projets et études identifiés	78
6.2.1	Préambule.....	78
6.2.2	Projets identifiés <i>via</i> la base de données Capt'air	78
6.2.3	Projets identifiés <i>via</i> la consultation internationale et la conduite d'auditions ou connus <i>a priori</i> du groupe de travail.....	79
6.2.4	Projets identifiés dans la littérature.....	87
6.2.5	Cas particulier des projets visant à utiliser des données de systèmes capteurs pour améliorer les cartographies et les modèles.....	100
7	Liste de points clés à prendre en compte pour qu'une donnée générée par un système capteur dans une étude puisse contribuer à l'évaluation de l'exposition individuelle	103
7.1	Méthode de travail.....	103
7.2	Résultats.....	104
8	Utilisation des données générées par les systèmes capteurs à des fins d'interprétation sanitaire	111
8.1.1	Apports et limites de l'utilisation des systèmes capteurs en épidémiologie.....	111
8.1.2	Utilisations des données générées par les systèmes capteurs en EQRS* et en EQIS*	114
8.1.3	Autres données utiles pour interpréter une donnée générée par un système capteur sur le plan sanitaire.....	116
9	Cas particulier des utilisateurs de systèmes capteurs à titre privé	117
10	Statut juridique des données générées par les systèmes capteurs.....	119
10.1	Règlement Général de Protection des Données (RGPD).....	119
10.2	Régime des données ouvertes.....	122
11	Discussion et conclusion	124
12	Recommandations du groupe de travail	128
13	Bibliographie	132
13.1	Publications.....	132
13.2	Normes	142
13.3	Législation et réglementation.....	142
13.4	Sites internet.....	143

ANNEXE 1 : Lettre de saisine	146
ANNEXE 2 : Suivi des actualisation du rapport	149
ANNEXE 3 : Liste des organismes et projets sollicités dans le cadre de la consultation internationale.....	150
ANNEXE 4 : Questionnaire transmis pour la consultation internationale	153
ANNEXE 5 : Glossaire	157
ANNEXE 6 : Principes physiques des éléments sensibles	165
ANNEXE 7 : Critères de performance et niveaux d'exigence attendus pour la catégorie « évaluation de l'exposition individuelle – Travaux du groupe de travail national « micro-capteurs » du LCSQA (LCSQA, 2021)	170
ANNEXE 8 : Protocole d'évaluation des systèmes capteurs proposé par le JRC dans son rapport de 2013.	173
ANNEXE 9 : Synthèse des informations concernant les projets portant sur l'évaluation de l'exposition individuelle identifiés <i>via</i> la consultation internationale	174
ANNEXE 10 : Liste et objectifs des études portant sur l'évaluation de l'exposition individuelle à l'aide de systèmes capteurs identifiées dans la littérature	176

Sigles et abréviations

AASQA : Association agréée de surveillance de la qualité de l'air

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

AFNOR : Agence française de normalisation

ANR : Agence Nationale de la Recherche

ANSES : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

APPA : Association pour la prévention de la pollution atmosphérique

AQI : Indice de Qualité de l'Air (*Air Quality Index* de l'US EPA)

BETA : Budget espace temps activités

BQA : Bureau de la Qualité de l'Air, Direction Générale de l'Énergie et du climat, Ministère de la Transition Écologique

CASPA : Capteurs et sciences participatives

CEN : Comité européen de normalisation

CES : Comité d'Experts Spécialisés

CIE : Certification Instrumentation pour l'Environnement

CNIL : Commission nationale informatique et liberté

CNL2 : Campagne Nationale Logement 2

COV : Composés organiques volatils

CPP : Comité de Protection des Personnes

CRÉDOC : Centre de recherche pour l'étude et l'observation des conditions de vie

CSP : Code de la Santé Publique

CVF : Capacité Vitale Forcée

DEP : Débit Exploratoire de Pointe

DGEC : Direction Générale de l'Énergie et du climat, Ministère de la Transition Écologique

DGPR : Direction Générale de la Prévention des Risques, Ministère de la Transition Écologique

DGS : Direction Générale de la Santé, Ministère des Solidarités et de la Santé

DIQACC : Données individuelles de la qualité de l'air et changements de comportements

DOHaD : Concept de l'origine développementale de la santé et des maladies (*Developmental Origins of Health and Disease*)

DREAL : Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement

DRIEE : Direction Régionale et Interdépartementale de l'environnement, de l'aménagement et des transports

eBC : équivalent Black-Carbon

EC : Carbon Élémentaire

EFR : Exploration Fonctionnelle Respiratoire

FNE : France Nature Environnement

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

HCSP : Haut Conseil de Santé Publique

INERIS : Institut national de l'environnement industriel et des risques

INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

INSERM : Institut national de la santé et de la recherche médicale

IRSN : Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire

ISSEP : Institut Scientifique de Service Public

JRC : Centre commun de recherche de la Commission Européenne (*Joint Research Centre*)

LCSQA : Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air

LD : Limite de Détection

LED : Diode électroluminescente

LNE : Laboratoire Nationale de métrologie et d'Essais

LQ : Limite de Quantification

MES : Matière En Suspension

MESRI : Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation

NDIR : Rayonnement Infrarouge Non Dispensif

OMM : Organisation Météorologique Mondiale

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

ONG : Organisation Non Gouvernementale

OQAI : Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur

OQD : Objectif de Qualité des Données

OR : *Odds-Ratio*

PID : Détecteur de Photo-Ionisation

QA : Qualité de l'Air

QAI : Qualité de l'Air Intérieur

OQD : Objectif de Qualité des Données

OSU : Observatoire des Sciences de l'Univers

PM : Matière particulaire (*particulate matter*)

PUF : Particules ultrafines

REX : Retour d'expérience

RGPD : Règlement Général sur la Protection des Données

RR : Risque Relatif (*relative risk*)

SPF : Santé Publique France

US EPA : Agence américaine de protection de l'environnement (*US Environmental Protection Agency*)

VEM : Volume Expiratoire Maximal

VGAI : Valeur Guide de qualité de l'Air Intérieur

VTR : Valeur Toxicologique de Référence

Liste des tableaux

Tableau 1 : Méthode mise en œuvre par le groupe de travail pour répondre aux questions de l'expertise	25
Tableau 2 : Performances métrologiques et coût des principaux capteurs de particules, de carbone suie et de gaz	34
Tableau 3 : Comparaison des indicateurs proposés pour le niveau le plus bas sur 5 substances, pour des systèmes capteurs vendus en France ou en Europe par 16 fabricants (exercice réalisé en novembre 2021).....	44
Tableau 4 : Comparaison des indicateurs proposés pour le niveau le plus haut sur 5 substances, pour des systèmes capteurs vendus en France ou en Europe par 16 fabricants (exercice réalisé en novembre 2021).....	45
Tableau 5 : Objectifs de Qualité de Données définis par le WG42 du CEN	49
Tableau 6 : Types d'usage identifiés pour les systèmes capteurs « qualité de l'air » et domaines d'utilisation associés (LCSQA, 2021a)	53
Tableau 7 : Synthèse des 3 éditions du Challenge AIRLAB	55
Tableau 8 : Intérêts des systèmes capteurs	72
Tableau 9 : Limites des systèmes capteurs pour l'évaluation de l'exposition	75
Tableau 10 : Points clés à considérer – Qualité de la mesure	105
Tableau 11 : Points clés à considérer – Contextualisation / Mise en œuvre du système capteur	106
Tableau 12 : Points clés à considérer – Stockage et accessibilité des données + Pré-Traitement des données.....	108
Tableau 13 : Points clés à considérer – Traitement des données.....	109
Tableau 14 : Point Clé clés à considérer – Interprétation.....	110
Tableau 15 : Description des types d'études épidémiologiques* pour l'évaluation des effets sanitaires à court terme et à long terme de la pollution de l'air	112

Liste des figures

Figure 1 : Schématisation du système capteur (figure proposée par le groupe de travail) ...	28
Figure 2 : Principe de la photométrie	31
Figure 3 : Principe de la néphélométrie	32
Figure 4 : Ecart entre particule réelle et diamètre aérodynamique	32
Figure 5 : Schéma-type d'utilisation d'un système capteur (cas idéal)	38
Figure 6 : Schéma type d'utilisation d'un réseau de systèmes capteurs	41
Figure 8 : Exposition à la pollution de l'air : schéma conceptuel	69
Figure 9 : Évolution du nombre de publications identifiées dans la littérature à l'aide des mots clés portant sur les systèmes capteurs et l'exposition individuelle	88
Figure 10 : Diagramme de sélection des articles scientifiques inclus dans l'expertise	89
Figure 11 : Type et nombre de participants inclus dans les études identifiées dans la littérature	92
Figure 12 : Illustration des méthodes de préservation de la confidentialité des données de géolocalisation.....	122

1 Contexte, objet et modalités de réalisation de l'expertise

1.1 Contexte

Les micro-capteurs ou capteurs bas coûts, appelés ainsi en raison de leur taille et de leur coût d'achat initial réduit, comparativement aux instruments de mesure utilisés dans les méthodes de référence, connaissent une expansion rapide ces dernières années.

Historiquement, les premiers détecteurs de gaz ont été mis en œuvre au 19^{ème} siècle dans l'industrie minière, avec des oiseaux canari utilisés pour la détection de monoxyde de carbone (CO) et de méthane (CH₄) en vue de la prévention du risque d'explosion. Parmi les principes physiques de détection, les plus anciens sont basés sur des matériaux de type oxydes métalliques dont le plus connu est le dioxyde d'étain (SnO₂) et dont le fonctionnement repose sur la conduction électrique modulée par l'absorption de gaz. Ce principe a été mis en évidence pour la première fois en 1953 par Brattain et Bardeen puis Heiland en 1954 (Brattain et Bardeen, 1953 ; Heiland, 1954). Le premier dispositif de détection utilisant un oxyde métallique fut conçu en 1962 par Seiyama (Seiyama, 1962). Le premier brevet fut déposé par le Japonais Taguchi de la société FIGARO. Cette société commença la commercialisation de ces capteurs en 1970 et reste aujourd'hui un des leaders du marché. Depuis de nombreux travaux ont été consacrés à l'amélioration des éléments sensibles, notamment en ce qui concerne les procédés de fabrication et de mise en forme du matériau, l'utilisation de dopants, de traitements physico-chimiques afin d'améliorer la sensibilité et la sélectivité de l'élément sensible. La miniaturisation de l'électronique associée a également été un des axes de recherche majeurs.

Le marché global des micro-capteurs connaît une forte expansion depuis 2010. Selon le cabinet d'étude de marché « Market Research Future », le marché mondial devrait peser 8,5 milliards de dollars (USD) en 2027, avec un taux de croissance annuel de 10,5% de 2021 à 2027¹.

En France, les premières entreprises ont éclos dans les années 2000 avec CAIRPOL (créée en 2006) ou Ecologicsense du groupe TERA (créée en 2011) avec des programmes de recherche destinés à développer les éléments sensibles, ou Ethéra (créée en 2010) dans le domaine de l'air intérieur. Après une première phase en laboratoire, les premières expérimentations publiques ont lieu dans les années 2010 (e.g. dans le cadre de Futur en Seine 2009 la FING² a développé une montre verte avec un semi-conducteur de chez MICS, ou encore l'association de sciences citoyennes Labo Citoyens créée en 2012 qui a organisé entre 2013 et 2015 plusieurs campagnes de mesures citoyennes de qualité de l'air en partenariat avec l'association Respire ou la Ville de Paris).

Aujourd'hui le marché est florissant avec près de 60 000 références sur les plateformes de vente en ligne, mais plusieurs limites des micro-capteurs actuellement commercialisés sont cependant évoquées : leur consommation énergétique et leur prix de revient plus élevé que ce qui était attendu, mais aussi la complexité de leur électronique associée, leur manque de sélectivité ou leur justesse limitée. Par ailleurs, l'émergence des micro/nanosystèmes permet

¹ [Air Quality Sensor Market Size, Share Forecast 2027 | MRFR \(marketresearchfuture.com\)](https://www.marketresearchfuture.com/)

² Think an do tank sur les transformations numériques. <https://fing.org/>

le développement de dispositifs miniatures, portables, « intelligents », intégrant l'élément sensible, l'alimentation, l'électronique de traitement du signal, l'électronique numérique d'analyse, les modules de conversion et de communication, qui présentent eux-mêmes parfois certaines limitations (pertes de connexion/ d'information, autonomie limitée, flou autour de la sécurisation des données personnelles, etc.).

Les principales voies de recherche explorées aujourd'hui concernent :

- La technologie du détecteur (nanomatériaux) ;
- Le traitement du signal et de la donnée (science des données) ;
- La communication (transmission des données).

Plusieurs facteurs peuvent expliquer l'essor des micro-capteurs :

- Le coût d'achat initial relativement faible de ces technologies par rapport aux instruments de mesure utilisés dans les méthodes de référence ;
- Leur facilité d'usage et leur adaptabilité, qui offrent des champs d'application variés et une utilisation par un public large ;
- La sensibilisation croissante de la population à la pollution de l'air et à ses impacts sur la santé ;
- Le développement des sciences participatives « crowdsourcing » et un intérêt croissant de la population à produire des données et à les partager ;
- Une demande et un intérêt croissant d'une partie de la population pour les objets connectés (internet des objets) ;
- Un besoin d'amélioration des connaissances sur la répartition spatio-temporelle à grande échelle de la pollution de l'air, et la couverture de différents microenvironnements ;
- Des progrès en ingénierie électronique et en informatique permettant la gestion des grandes quantités de données générées.

De plus, une certaine méfiance vis-à-vis des mesures effectuées par des organismes agréés par l'État et la volonté de connaître sa propre exposition à la pollution de l'air peut expliquer l'essor des micro-capteurs.

Ces technologies, du fait de leurs caractéristiques, offrent de multiples champs d'application, tels que (US EPA, 2014 ; OMM, 2018) :

- **La recherche** : conduite d'études scientifiques visant à acquérir des informations sur la pollution de l'air. Par exemple l'étude de la variation des concentrations en polluant à l'échelle d'une ville par un réseau dense de micro-capteurs ;
- **La connaissance de l'exposition individuelle** : mesure de la pollution de l'air à laquelle un individu est exposé lors de ses activités quotidiennes. Par exemple, un micro-capteur peut aider un individu à identifier des lieux ou des périodes engendrant une exposition à des polluants susceptibles d'avoir un impact sur sa santé ;
- **L'acquisition de données de surveillance complémentaires** : amélioration de la couverture spatiale notamment en disposant des micro-capteurs entre des stations de surveillance ;
- **L'identification ou le suivi de sources d'émission** : par exemple un ou plusieurs micro-capteurs sont placés sous le vent d'une installation industrielle pour surveiller les variations des concentrations de polluants au cours du temps ;
- **L'éducation** : utilisation de micro-capteurs dans des contextes éducatifs dans le cadre de l'enseignement des sciences, de la technologie, de l'ingénierie, de l'environnement et des mathématiques ;
- **L'information et la sensibilisation** aux problématiques de qualité de l'air : utilisation des données indicatives des micro-capteurs pour sensibiliser la population à la pollution de l'air.

Du fait de ce champ d'application varié, les micro-capteurs sont utilisés par un public de plus en plus large : acteurs institutionnels impliqués dans la surveillance de la qualité de l'air, organismes de recherche, collectivités, citoyens ou associations de citoyens.

Le déploiement des micro-capteurs signe pour certains auteurs un changement de paradigme dans la surveillance de la qualité de l'air (Snyder *et al.* 2013). Des années 1970 jusqu'au début des années 2000, celle-ci est souvent restée cantonnée à la question de l'air ambiant/air extérieur³ avec une instrumentation complexe et un réseau de surveillance principalement géré par des instances gouvernementales, et une gestion sécurisée des données collectées. L'émergence des micro-capteurs, combinée à la prise de conscience du citoyen de l'impact majeur de la pollution de l'air sur sa santé, à laquelle s'ajoute l'expansion forte de l'usage d'objets connectés, ont initié depuis une dizaine d'années environ une vague de démocratisation de ce domaine réservé auparavant aux experts.

Mais l'utilisation des micro-capteurs pose plusieurs questions, dont celles de leur fiabilité météorologique mais également de la gestion, de l'exploitation et de l'interprétation des données, et *in fine* de leur pertinence pour répondre à des problématiques de qualité de l'air. En 2018, l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) a publié un rapport sur l'utilisation possible des « capteurs à bas coût » (OMM, 2018). Il ressort de la littérature scientifique disponible fin 2017 que ce type de dispositifs présente à la fois des avantages et des inconvénients par rapport aux instruments de mesures mis en œuvre dans les méthodes de référence : bien qu'une plus grande densité du réseau d'observation puisse être obtenu avec les micro-

³ Air ambiant / air extérieur : en référence à la réglementation relative à la surveillance de la qualité de l'air (code de l'environnement – Articles R221-1 à R221-3), le terme « air ambiant » est employé pour désigner l'air extérieur en distinction avec l'air intérieur. **Dans le document, la désignation « air extérieur » correspondra à « air ambiant ».**

capteurs, ces dispositifs sont souvent moins sensibles, moins précis et moins adaptés aux caractéristiques chimiques des polluants considérés.

De nombreux travaux mettant en œuvre des micro-capteurs ont été réalisés ou sont en cours en France et à l'étranger pour répondre à ces questions. Parmi les différentes applications des micro-capteurs, celle de l'évaluation de l'exposition individuelle est actuellement la moins étudiée. Pourtant, l'évaluation de l'exposition est l'un des grands défis pour mieux comprendre les effets de la pollution de l'air sur la santé. A l'échelle individuelle, les micro-capteurs peuvent susciter un intérêt chez des personnes souhaitant connaître leur exposition à la pollution de l'air et/ou minimiser leur exposition. Il peut s'agir de personnes de la population générale sensibilisées au problème de la pollution de l'air et/ou de personnes présentant des profils spécifiques, comme des sportifs ou des personnes atteintes de maladies respiratoires.

Dans ce contexte, la Direction Générale de la Santé (DGS), la Direction Générale de l'Energie et du Climat (DGEC) et la Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR) ont saisi l'Anses le 21 décembre 2018 afin de réaliser un « état des connaissances sur l'utilisation de micro-capteurs par des citoyens pour le suivi de la qualité de l'air intérieur et extérieur » (Annexe 1). Les travaux d'expertise doivent permettre de disposer d'éléments d'information concernant notamment la pertinence, la validité et l'utilisation des données générées par les micro-capteurs utilisés dans des environnements intérieurs et extérieurs, en vue de caractériser l'exposition des populations, en particulier lorsque ces outils sont utilisés par un public non expérimenté.

1.2 Objet de la saisine

1.2.1 Questions posées

Ainsi, il est demandé à l'Anses :

- De dresser un état des lieux :
 - Des travaux mettant en œuvre des micro-capteurs au niveau national, européen et international afin de recenser les objectifs alloués à ces études et le cadre d'application de ces technologies. Cette analyse contribuera également à lister les technologies disponibles, leur validité métrologique lorsque celle-ci aura été évaluée, le contexte dans lequel elles sont mises en œuvre (objectifs suivis, polluants visés, design de l'étude, etc.), ainsi que les opportunités et limites de leur utilisation ;
 - Des profils d'utilisateurs des micro-capteurs afin de préciser le cadre d'utilisation des micro-capteurs par les citoyens, et l'accompagnement qui peut être fait dans la lecture et l'interprétation des données.
- D'évaluer l'intérêt et les limites, voire la complémentarité par rapport à la mesure classique, des données de concentrations issues de micro-capteurs utilisés par les citoyens dans un objectif de caractérisation de l'exposition à des fins d'interprétation sanitaire. Il s'agit notamment dans cette étape de lister les paramètres clés pour considérer qu'une donnée d'exposition est recevable à des fins d'interprétation sanitaires, et d'étudier l'aptitude des micro-capteurs à répondre à ces objectifs ;
- De discuter du statut juridique des données générées par les micro-capteurs.

Dans la suite du document, le terme système capteur est utilisé au lieu du terme micro-capteur en lien avec les définitions proposées par l'Agence française de normalisation (Afnor) (cf. chapitre 3.1).

En réponse à ces attentes, le groupe de travail a structuré ses travaux comme suit dans le présent rapport (Volume 1) :

Etapas	Chapitre du rapport d'expertise
Proposition de définitions et de connaissances pré-requises concernant les systèmes capteurs, les données générées et les acteurs entrant en jeux dans leur mise en œuvre.	Chapitre 3
Panorama des projets ⁴ portant sur l'évaluation des systèmes capteurs et des projets impliquant le citoyen, en s'appuyant sur des revues de la littérature et des rapports de référence sur le sujet.	Chapitre 4
Focus sur le cas particulier des systèmes capteurs de dioxyde de carbone (CO ₂), en raison des préconisations de mesures de CO ₂ dans les espaces intérieurs publics comme moyen de lutte contre la propagation de la Covid-19 et de la diversité du matériel disponible.	Chapitre 5
Etat des lieux des études portant spécifiquement sur l'utilisation de systèmes capteurs à des fins d'évaluation de l'exposition individuelle, avec une discussion sur les apports et limites potentiels des systèmes capteurs dans le cadre d'études.	Chapitre 6
Identification de points clés à prendre en compte pour qu'une donnée générée par un système capteur puisse contribuer à l'évaluation de l'exposition individuelle.	Chapitre 7
Discussion sur l'utilisation des systèmes capteurs à des fins d'évaluation des effets sanitaires de la pollution de l'air.	Chapitre 8
Discussion sur le cas particulier des utilisateurs de systèmes capteurs à titre privé ⁵ .	Chapitre 9
Discussion sur le statut juridique des données générées par les systèmes capteurs	Chapitre 10

Ces travaux d'expertise ont également fait l'objet d'un état des lieux des profils et motivations des utilisateurs de systèmes capteurs, étude spécifique présentée dans un rapport d'expertise complémentaire (Volume 2).

⁴ Les termes études et projets sont utilisés indifféremment dans ce rapport. L'utilisation de systèmes capteurs par des individus dans le cadre d'études/projets se distingue d'une utilisation à titre privé.

1.2.2 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation

L'Anses a confié au groupe de travail « Micro-capteurs », rattaché au comité d'experts spécialisés (CES) « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » l'instruction de cette saisine.

L'Anses a nommé Mme Laurence Allard, membre du groupe de travail, en tant que rapporteur pour la réalisation de l'état des lieux des profils et motivations des utilisateurs de systèmes capteurs (Volume 2).

Les travaux d'expertise du groupe de travail ont été soumis régulièrement au CES (tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques). Le rapport produit par le groupe de travail et le rapport produit par le rapporteur tiennent compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

Ces travaux sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires.

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – prescriptions générales de compétence pour une expertise (mai 2003) ».

1.3 Prévention des risques de conflits d'intérêts

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont publiées sur le site internet <https://dpi.sante.gouv.fr/>.

2 Méthode de travail

Les travaux du groupe de travail se sont appuyés sur une collecte d'informations auprès de différents acteurs par l'intermédiaire :

- D'une consultation internationale d'instituts dans le domaine de la qualité de l'air ;
- D'auditions d'Organisations Non Gouvernementales (ONG) spécialisées sur la thématique de la pollution atmosphérique : Association pour la Prévention de la Pollution Atmosphérique (APPA), France Nature Environnement (FNE), Association nationale pour l'amélioration et la préservation de la qualité de l'air (Respire) ;
- D'une audition de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), afin de bénéficier d'un retour d'expérience sur un projet de sciences participatives dans le domaine de la mesure de radiation à l'aide de systèmes capteurs (dosimètres) ;
- De la conduite d'entretiens avec des fabricants et distributeurs de systèmes capteurs ;
- De la conduite d'entretiens avec des coordinateurs de projets mettant en œuvre des systèmes capteurs ;
- De la conduite d'entretiens avec des experts juristes.

En complément, une revue de la littérature a été effectuée pour identifier des éléments permettant de répondre aux questions de l'expertise. Enfin, une extraction de la base de données du Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA) « Capt'air » a été réalisée. Cette base recense les projets mettant en œuvre des systèmes capteurs et répertorie les caractéristiques techniques des systèmes capteurs commercialisés ou ayant été disponibles sur le marché.

La méthode mise en œuvre pour répondre aux questions de l'expertise est synthétisée dans le tableau 1.

Tableau 1 : Méthode mise en œuvre par le groupe de travail pour répondre aux questions de l'expertise

Intitulé	Méthode	Chapitre
Définitions et connaissances pré-requises	Bibliographie, travaux de normalisation en cours, retours d'expérience (REX) du groupe de travail	3
Panorama des projets mettant en œuvre des systèmes capteurs	Bibliographie, REX du groupe de travail	4
Cas particulier des systèmes capteurs de CO ₂	Bibliographie, REX du groupe de travail	5
État des lieux des projets portant spécifiquement sur l'évaluation de l'exposition individuelle	Bibliographie, REX du groupe de travail, auditions (IRSN, ONG, fabricants/distributeurs de systèmes capteurs), consultation internationale, extraction de la base de données Capt'air du LCSQA	6
Études encadrées : liste de points clés à prendre en compte pour qu'une donnée générée par un système capteur puisse contribuer à l'évaluation de l'exposition individuelle	Bibliographie, REX du groupe de travail, consultation internationale	7
Utilisation des données générées par les systèmes capteurs à des fins d'interprétation sanitaire	Bibliographie, REX du groupe de travail, consultation internationale	8
Cas particulier des utilisateurs de systèmes capteurs à titre privé	Bibliographie, REX du groupe de travail	9
Statut juridique des données générées par les systèmes capteurs	Consultation internationale, auditions (fabricants/distributeurs de systèmes capteurs, experts juristes)	10

3 Définitions et connaissances pré-requises

Ce chapitre a pour objectif de définir certains termes de l'expertise et de décrire les technologies disponibles et les chaînes de mesures et d'acquisition de données.

D'autres définitions utiles à l'expertises sont disponibles dans le glossaire en annexe 5. Les termes définis dans le glossaire sont désignés dans le rapport par un astérisque (*).

3.1 Définition des systèmes capteurs

Les définitions associées aux systèmes capteurs ont évoluées ces dernières années. Initialement, ces systèmes capteurs étaient (et peuvent encore être) dénommés « micro-capteurs » ou « capteur à bas coût »⁶, du fait de leur taille et de leur coût initial réduit par rapport aux instruments de mesure mis en œuvre dans les méthodes de référence* de surveillance de la qualité de l'air.

Des appellations de type « micro-capteurs d'air » ou « capteurs de la qualité de l'air » peuvent également être employées par certains fabricants de systèmes capteurs ce qui peut porter à confusion. En effet, l'assimilation de la mesure d'un ou quelques polluants de l'air à la « qualité de l'air » masque la complexité de la question de la pollution de l'air, que ce soit en air intérieur ou en air extérieur (e.g. dénomination de système capteur de la qualité de l'air ne mesurant que le CO₂ en air intérieur ou uniquement les particules en air extérieur).

Dans ce chapitre, le groupe de travail a recensé les définitions identifiées dans la littérature et indiqué les définitions qui seront retenues dans le cadre de cette expertise. Le groupe de travail a également proposé des éléments d'accompagnement relatifs au coût et à l'encombrement des systèmes capteurs.

A noter que des définitions ont également été proposées par les organismes ayant répondu à la consultation internationale. Cependant, elles correspondent, de façon moins détaillée, à celles identifiées dans la littérature. Elles ne sont donc pas retranscrites dans ce chapitre.

3.1.1 Définitions identifiées dans la littérature

Définition de l'US EPA (Agence américaine de protection de l'environnement) (US EPA, 2014) :

Dans son document guide destiné à assister les individus souhaitant acquérir et réaliser des mesures de qualité de l'air à l'aide de « capteurs bas-coût », l'US EPA a proposé la définition suivante : technologie disponible dans le commerce, moins coûteuse (coût type < 2500 USD) et capable d'estimer les concentrations de polluants atmosphériques de manière continue (de l'ordre de quelques secondes à quelques minutes). Les utilisateurs potentiels comprennent des individus tels que des développeurs de capteurs, des scientifiques, des citoyens, des enseignants et des étudiants, des organisations communautaires telles que des groupes de justice environnementale, ainsi que des agences de qualité de l'air fédérales, tribales, étatiques et locales.

⁶ Cette dernière appellation peut mener à confusion car elle englobe des instruments de mesure qui ne correspondent pas à la définition d'un système capteur (par exemple les tubes à diffusion passifs).

Une mise à jour de ce document est annoncée sur le site de l'US EPA mais non disponible en janvier 2022.

Définition de l'OMM et de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) (WMO, 2018) :

L'OMM propose une définition de l'élément sensible et une définition du système capteur :

- Élément sensible (*sensor*) : sous-composant basique réalisant la mesure analytique d'un gaz à effet de serre ou d'un polluant atmosphérique ;
- Système capteur (*sensor system*) : dispositif intégré qui comprend un ou plusieurs éléments sensibles et d'autres composants supports nécessaires pour créer un système de détection entièrement fonctionnel et autonome.

Dans ce document, le terme « bas coût » fait référence au coût d'achat initial du système-capteur par rapport au coût d'achat initial de l'instrument de mesure mis en œuvre dans la méthode de référence permettant de mesurer le même paramètre ou un paramètre similaire. Ce « bas coût » n'est intentionnellement pas défini de manière prescriptive par l'OMM. Il correspond à une réduction du coût d'investissement initial d'au moins un ordre de grandeur par rapport aux instruments de mesure mis en œuvre dans les méthodes de référence. Le terme « bas coût » ne fait pas référence aux coûts d'installation d'un système capteur, aux coûts d'exploitation d'un système de capteurs ou d'un réseau plus vaste de capteurs multiples, car ceux-ci varieront considérablement en fonction de la qualité et de la couverture des données souhaitées.

Définitions proposées par le LCSQA (LCSQA 2016, 2017, 2021a) :

Les définitions proposées par le LCSQA ont évolué ces dernières années. En 2016, une première définition de « micro-capteur de gaz *low cost* » a été proposée (LCSQA, 2016). Cette définition intégrait des éléments relatifs au coût des micro-capteur et à leurs poids et dimensions. Dès 2018, les définitions proposées par le LCSQA ont distingué trois éléments : l'élément sensible, qualifié de « *sensor* », le « micro-capteur » (mono polluant) et le « système micro-capteur » (multi polluant) (LCSQA, 2018a). En 2021, le groupe de travail « micro-capteurs » du LCSQA, dans sa note de cadrage pour les systèmes capteurs, adopte les définitions proposées par l'Afnor (éléments sensibles, capteurs, systèmes capteurs) (LCSQA, 2021a, cf. Chapitre 3.1.2)).

Autres définitions identifiées dans la littérature : Dans sa revue de la littérature, Morawska *et al.* 2018 propose également une définition des « éléments sensibles à bas coût » (*low cost sensors*) et des « capteurs à bas coût » (*low cost monitor*). L'élément sensible (*sensor*) est défini comme le composant réalisant la mesure et le capteur comme le système de mesurage complet regroupant un ou plusieurs éléments sensibles, le boîtier, le système d'affichage des données (optionnel), la connexion à une batterie ou à une autre source d'alimentation et les composants pour le stockage, la transmission et la récupération des données. Pour une utilisation individuelle ou communautaire ou pour l'évaluation de l'exposition individuelle, le coût de l'élément sensible ne doit pas dépasser 100 USD et celui du capteur 1000 USD.

3.1.2 Définitions retenues par le groupe de travail et éléments d'accompagnement

3.1.2.1 Définitions de l'Afnor

Au regard de l'ensemble des éléments présentés ci-dessus et notamment des travaux d'homogénéisation menés à l'échelle nationale et européenne, les définitions de l'élément sensible, du capteur et du système capteur retenues par le groupe de travail sont celles proposées par l'Afnor dans son fascicule de documentation relatif aux capteurs pour la qualité de l'air (FD X43-121, 2021).

En résumé, un système capteur peut-être représenté par le schéma suivant (cf. figure 1), les étape d'autodiagnostic ou de validation externe n'étant pas systématiquement présentes.

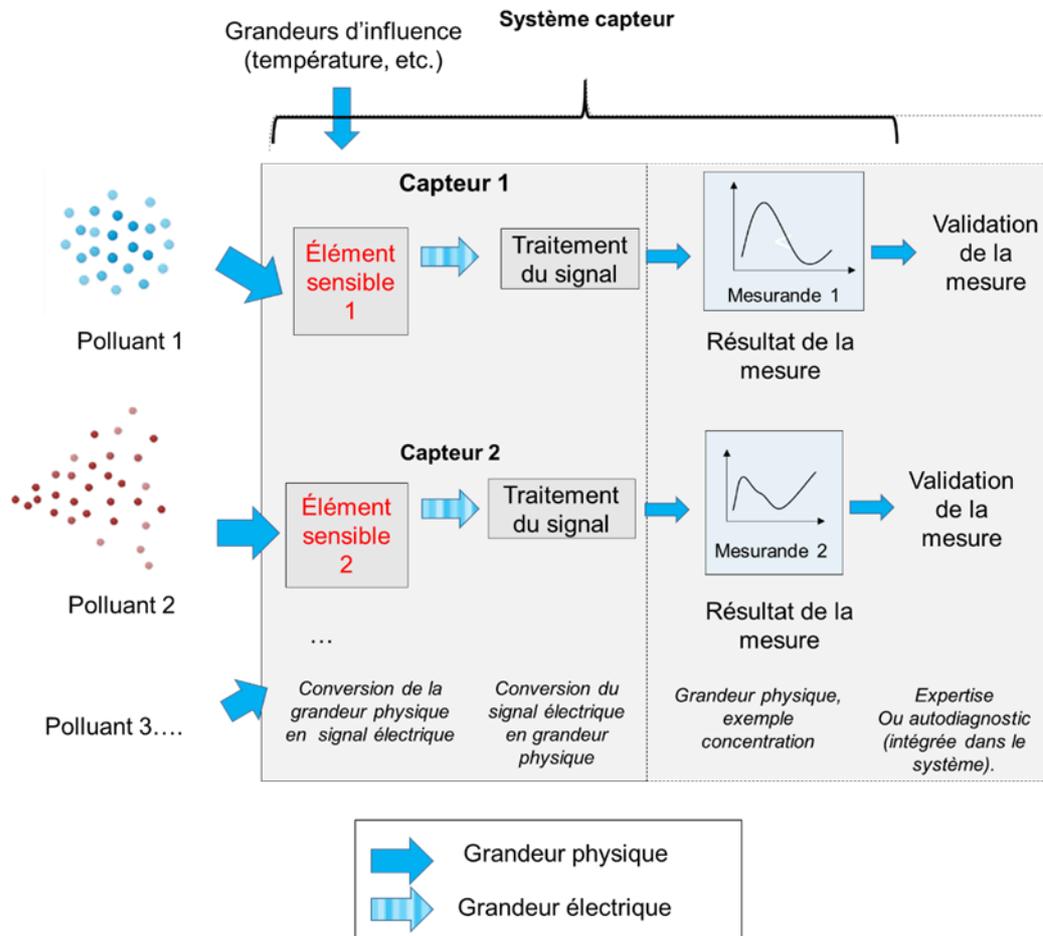


Figure 1 : Schématisation du système capteur (figure proposée par le groupe de travail)

Les définitions proposées par l'Afnor sont les suivantes (les illustrations proposées par l'Afnor ne sont pas reprises dans ce document) :

Élément sensible : Dispositif transformant une grandeur physique observée en une grandeur utilisable de type signal électrique dont l'amplitude est relative notamment à la concentration d'un polluant recherché dans l'air.

- Note 1 : le terme « sensor » est généralement utilisé pour désigner l'élément sensible ;
- Note 2 : le terme « élément sensible » peut parfois être abusivement remplacé par le terme « capteur » ;

- Note 3 : Dans le cas des particules, l'élément sensible consiste généralement en un assemblage plus élaboré (optique, électronique, prélèvement...).

Capteur : Dispositif équipé d'au moins un élément sensible servant à la prise d'informations relatives à la grandeur à mesurer ainsi que d'un système électronique pour l'acquisition et le traitement de données.

- Note 1 : la partie « transmission et visualisation de données » relève généralement du système capteur ;
- Note 2 : la notion d'acquisition n'intègre pas la fonction d'enregistrement de données.

Système capteur : Matériel intégrant au moins un capteur ou un élément sensible et un logiciel pour détecter une quantité et/ou mesurer une concentration de composés (gaz, aérosol) sur un pas de temps prédéfini.

- Note 1 : un système capteur comporte les éléments (ou fonctions constitutives) de base suivants, à adapter selon l'usage : le dispositif de prélèvement, la partie nécessaire à l'alimentation, le traitement des données, le stockage des données, la transmission et/ou la visualisation des données, le boîtier.
- Note 2 : un système capteur peut être disponible sur le plan commercial et prêt à l'usage ou à monter soi-même (produit « prêt à monter » (*do it yourself*)).
- Note 2 : les informations métrologiques (ex : caractéristiques de performance) peuvent indépendamment porter sur le système capteur, sur les capteurs constitutifs ou sur les éléments sensibles pris séparément.
- Note 3 : les termes suivants sont également utilisés pour désigner un système capteur : « système mono/multi-capteur(s) », « mini station », « pod », « sensor node », « module ».

L'élément sensible du système capteur permet à partir d'une grandeur physique d'entrée comme la concentration d'un polluant, de fournir une réponse sous la forme d'un signal électrique, qui est ensuite converti par un logiciel de traitement de signal en mesurande* c'est-à-dire en résultat de la mesure de la concentration du polluant.

Un contrôle du bon fonctionnement du capteur peut être intégré au système capteur. Il s'agit d'un autodiagnostic qui permet *via* un algorithme intégré de vérifier un certain nombre de points comme par exemple des erreurs d'acquisition.

Cette étape peut également être effectuée par une expertise externe qui va également contrôler un certain nombre de paramètres comme les erreurs d'acquisition, le taux de fonctionnement, la dérive*... Cette étape peut aller jusqu'à la vérification des valeurs très aberrantes, l'identification de points fixes sur les concentrations.

Sont distingués :

- Les systèmes capteurs portatifs⁷, lorsque le dispositif est porté par l'individu ;
- Les systèmes capteurs fixes, lorsque le dispositif est déposé dans un microenvironnement (intérieur ou extérieur).

Nb : le terme de système capteur mobile est utilisé dans le domaine du transport en général. Il intègre l'utilisation de systèmes capteurs embarqués sur des véhicules par défaut et également le déplacement des personnes équipées de systèmes capteurs portatifs.

⁷ Les termes « système capteur personnel » et « système capteur individuel » sont parfois employés dans la littérature.

3.1.2.2 Éléments relatifs au coût et à l'encombrement des systèmes capteurs

Bien que dans l'absolu, les définitions proposées par l'Afnor et retenues par le groupe de travail, qui s'appuient uniquement sur des considérations techniques, pourraient s'appliquer aux instruments de mesure mis en œuvre dans les méthodes de référence*, ce n'est en pratique pas le cas (les normes de référence emploie les termes de préleveurs et analyseurs).

De plus, le coût et l'encombrement des instruments de mesures sont des éléments importants à prendre en compte dans cette distinction. En effet, les systèmes capteurs sont des instruments destinés à être transportés ou déplacés facilement, dont le coût d'achat initial est réduit par rapport aux instruments de mesure de référence. C'est dans cette optique que des éléments d'accompagnement relatifs au coût et à l'encombrement des systèmes capteurs ont été proposés par le groupe de travail. Malgré cela, la frontière entre le système capteur et l'instrument de mesure de référence reste floue pour certains dispositifs.

Concernant le coût de ces technologies, les résultats des challenges AIRLAB⁸ (cf. chapitre 4.2.4) ont montré que contrairement aux attentes, les systèmes capteurs ne sont pas toujours des produits « bas coût » avec un coût global (achat et fonctionnement) sur trois ans variant de près de 200 euros à plus de 17 000 euros. Pour les systèmes capteurs renseignés dans la base de données Capt'air du LCSQA, la fourchette de prix d'achat est très large avec une gamme de prix allant de 100 à 14 000 euros, pour un prix moyen de 3 000 euros (LCSQA, 2021b). D'autre part, ce rapport mentionne que pour certains systèmes capteurs évalués, le coût de fonctionnement engendré peut atteindre 4 000 euros par an.

L'appréciation du coût d'un système capteur ne doit donc pas s'appuyer sur le coût d'achat initial mais sur le coût global de mise en œuvre, et doit être considérée en fonction de l'usage envisagé.

De plus, afin d'améliorer la qualité métrologique des systèmes capteurs, certains fabricants mettent en place des développements de types *hardware*⁹ et *software*¹⁰. Ces améliorations permettent un meilleur contrôle et maîtrise de la qualité de la mesure. Toutefois ces développements ont un coût qui rend certaines solutions inaccessibles au grand public. Par exemple, une cellule électrochimique de dioxyde d'azote (NO₂) de qualité vaut, de base, environ une centaine d'euros, mais si on lui associe une électronique de qualité et un système d'acquisition, le prix peut atteindre le millier d'euros. Egalement, si le système capteur mesure plusieurs paramètres simultanément, le coût peut atteindre plusieurs milliers d'euros, et cela sans compter le coût d'entretien annuel, lui-même pouvant aller jusqu'à plusieurs centaines d'euros.

Plusieurs publications scientifiques identifiées dans le cadre de cette expertise mettent en avant des matériels d'un encombrement et d'un poids ne permettant pas la portabilité et/ou la mobilité, tels que la néphélogéométrie pour la mesure des particules (cf. chapitre 6.2). En termes de portabilité, il n'existe pas de critères sur le poids maximal d'un système capteur. Le poids maximal d'équipement dépend du nombre de systèmes capteurs qu'un individu va porter et de la population (adulte/enfant). Un poids maximal de 2kg (pour un adulte, tout équipement pris en compte) est souvent cité par des coordinateurs d'études comme limite à ne pas dépasser pour ne pas engendrer de changement de comportement des individus. Le poids et l'ergonomie d'usage sont des critères d'acceptabilité à prendre en compte dans les études

⁸ <http://www.airlab.solutions/fr>

⁹ Décrit la partie physique des équipements.

¹⁰ Généralement, il s'agit d'une intelligence qui peut être embarquée et/ou déportée, et qui déploie notamment des algorithmes de correction des interférents, ou des grandeurs d'influence.

déployant des systèmes capteurs auprès de la population. La limite du poids et de l'ergonomie évolue cependant, en même temps que les objets technologiques deviennent plus discrets et moins encombrants.

En conclusion, les systèmes capteurs considérés dans cette expertise ne sont pas forcément des dispositifs accessibles au grand public en termes de coût. Le groupe de travail souligne que certains dispositifs sont à la frontière de la définition des systèmes capteurs, tels que le DUSTRACK de chez TSI pour la mesure des concentrations massiques en particules (PM_{10} ou $PM_{2,5}$) ou l'Aethalometer AE51 de chez MAGGY pour le carbone suie. Ces dispositifs, dont l'utilisation est réservée au domaine de la recherche et de la surveillance de la qualité de l'air ont tout de même été considérés comme des systèmes capteurs dans cette expertise.

3.2 Technologies disponibles (éléments sensibles et capteurs)

Actuellement les principes de mesure des capteurs sont de quatre types : les semi-conducteurs et la photo-ionisation (gaz uniquement), les cellules électrochimiques et la détection optique (gaz et particules). Les techniques disponibles sont présentées dans cette section et leurs principes physiques sont détaillés en annexe 6.

3.2.1.1 Capteurs de particules

On distingue deux catégories de cellules optiques exploitant l'interaction entre les particules et la lumière : la photométrie et la néphélométrie.

- La photométrie utilise un laser comme source lumineuse. Lorsqu'une particule traverse la chambre de mesure qui ne permet le passage que d'une particule à la fois, la lumière laser est dispersée par la particule. Une cellule photosensible détecte la lumière de diffusion (Loi de Mie). L'analyse de l'intensité de la lumière diffusée ou diffractée permet de déterminer la taille de la particule. Le nombre de particules peut être déduit en comptant le nombre d'évènements détectés sur la cellule photosensible (cf. Figure 2). L'avantage de cette approche est qu'un matériel unique peut détecter des particules avec différents diamètres ($PM_{2,5}$, PM_{10}) ;

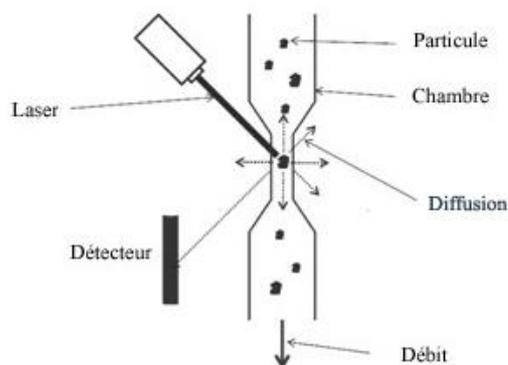


Figure 2 : Principe de la photométrie

- La néphélométrie utilise une diode électroluminescente (LED) à infrarouge proche comme source de lumière et une cellule photosensible (silicium) pour mesurer la lumière totale diffusée (cf. Figure 3). En analysant les intensités de la lumière diffusée et la forme du diagramme de diffusion, la distribution de taille particulaire et la concentration en nombre peuvent être déterminées.

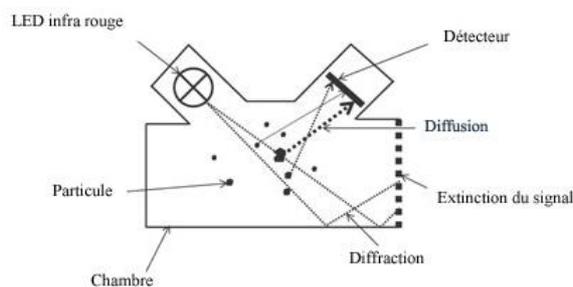


Figure 3 : Principe de la néphélométrie

Concernant le prélèvement, l'aérosol est aspiré par un ventilateur, une micro pompe ou circule par convection dans une chambre de détection. Connaissant le débit d'air, on peut ainsi remonter à une concentration en nombre, selon les gammes de taille. Le nombre de particules doit être ensuite converti en concentration massique par calcul en intégrant la densité des particules. Comme cette densité dépend du nombre, du type, de la forme et du diamètre des particules, ce calcul peut entraîner des erreurs qui affecteront fortement la précision de ces capteurs. Sur cet exemple (cf. Figure 4) le biais sur le volume et donc sur la masse est d'un facteur 2 entre la taille réelle de la particule et le diamètre aérodynamique* :

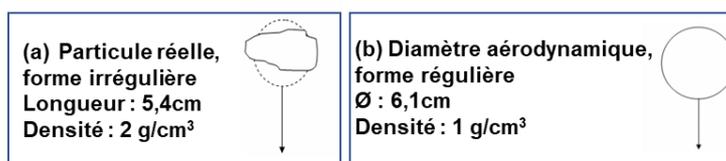


Figure 4 : Ecart entre particule réelle et diamètre aérodynamique

Les principaux constructeurs du marché de la détection optique bas coût sont les suivants : Alphasense (UK), Shinyei et Sharp (Japon) ; Plantower, Wuhan Cubic Optoelectronics, Winsen Electronic Technology et Nova Fitness (Chine), Honeywell et Dylos (USA), Groupe TERA (France).

Cas particulier de la mesure du carbone suie (ou *black carbon (BC)* en anglais) :

L'équivalent black-carbon (eBC) est mesuré par des aethalomètres. Le principe de mesure est la transmittance : l'air échantillonné est amené sur un filtre en quartz qui collecte les particules présentes, dont les particules de carbone suie. Une lumière émise par une diode électroluminescente est envoyée en deux points sur le filtre en quartz, l'un où s'accumulent les particules dont le carbone suie, et l'autre qui reste vierge. La quantification des particules est effectuée *via* l'atténuation de l'intensité lumineuse entre les deux points de collecte (loi de Beer-Lambert), l'aire de la tâche, et le débit d'échantillonnage (Hansen *et al.* 1984)

Attention, l'eBC correspond à une mesure du carbone suie par transmittance, contrairement au principe de mesure thermo-optique dont le mesurande est le carbone élémentaire (Elemental carbon (EC) en anglais). Il n'existe pas de systèmes capteurs exploitant cette dernière technique.

Les principales performances métrologiques des capteurs de particules et de carbone suie sont recensées dans le Tableau 2.

3.2.1.2 Capteurs de gaz

Actuellement, de nombreuses technologies pour la détection des gaz sont disponibles, chacune présentant des avantages et inconvénients. À ce jour, cinq types de capteurs sont les plus appropriés et largement utilisés :

- Capteurs électrochimiques ;
- Capteurs catalytiques ;
- Capteurs semi-conducteurs, aussi appelés capteurs MOX pour oxydes métalliques ;
- Capteurs à absorption de rayonnement infrarouge non dispersif (NDIR) ;
- Capteurs à détecteur de photo-ionisation (PID).

Les principes physiques de chacun de ces capteurs sont décrits en annexe 6, à l'exception des capteurs catalytiques. En effet, ces capteurs sont destinés à des applications industrielles pour la détection de gaz combustibles et sont donc peu utilisés dans l'air ambiant ou l'air intérieur, en raison de l'empoisonnement du catalyseur par des oxydants comme le dioxyde de soufre (SO₂), le NO₂ ou l'ozone (O₃).

En tenant compte des paramètres métrologiques les plus utiles à la mesure (limite de détection/quantification*, modélisation linéaire ou non, sélectivité, consommation d'énergie, maintenance, temps de réponse* et durée de vie), les principaux gaz mesurés en air ambiant ou en air intérieur par ces différentes technologies sont :

- Le monoxyde de carbone (CO) : Capteurs semi-conducteurs et électrochimiques ;
- Le dioxyde de carbone (CO₂) : Capteurs NDIR ;
- Le NO₂ : Capteurs semi-conducteurs et électrochimiques ;
- L'O₃ : Capteurs semi-conducteurs et électrochimiques ;
- Le SO₂ : Capteurs semi-conducteurs et électrochimiques ;
- Les Composés Organiques Volatils (COV) (polluant ou famille de polluants, empreinte d'une matrice complexe ou paramètre COV totaux) : Capteurs semi-conducteurs et PID.

Tous ces capteurs sont légers (moins de cent grammes). Leur durée de vie varie de quelques mois à quelques années selon la technologie, et surtout l'usage qui en est fait.

Les principaux constructeurs du marché de la détection de gaz bas coût sont les suivants : Alphasense et City Technology (UK) ; Membrapor (Suisse) ; SGX Sensortech (MICS, e2v, SGX) du groupe Amphenol (Sino-suisse); Figaro (Japon et filiales USA).

Les principales performances métrologiques des principaux capteurs de gaz sont recensées dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Performances métrologiques et coût des principaux capteurs de particules, de carbone suie et de gaz

Technologies	Composés mesurés	Avantages	Inconvénients	Coût d'achat
Semi-conducteur	NO ₂ , O ₃ , CO, COV, COVT	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne sensibilité* ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ au mg/m^3). - Temps de réponse* court (de quelques secondes à quelques minutes). 	<ul style="list-style-type: none"> - Généralement non sélectif. - Interférence* avec le CO₂ pour la mesure des COVT et inversement - Instabilité à long terme. - Consommation électrique liée à l'élément chauffant 	€
Cellule électrochimique	NO, NO ₂ , SO ₂ , O ₃ , CO	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne sensibilité* ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ au mg/m^3). - Consommation électrique faible. 	<ul style="list-style-type: none"> - Forte interférence* des conditions ambiantes comme l'humidité et/ou la température. - Sensible* aux interférents chimiques dans une même famille d'oxydants (e.g. interférence de l'O₃ sur la mesure du NO₂). - Temps de réponse* plutôt long (de plusieurs minutes à plusieurs dizaines de minutes). - Durée de vie directement liée à la concentration d'exposition 	€€
PID (détecteur à photo-ionisation)	<ul style="list-style-type: none"> - Composés inorganiques (ammoniac, chlore) - Composés organiques volatils (liste variable en fonction de la 	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne sensibilité* (jusqu'au mg/m^3 voire la dizaine de $\mu\text{g}/\text{m}^3$). - Temps de réponse* court (quelques secondes). 	<ul style="list-style-type: none"> - Non sélectif* : détection simultanée des composés organiques dont l'énergie d'ionisation est inférieure à l'énergie de la lampe UV. - Sensibilité* aux fortes humidités (HR>70%). 	€€€

Technologies	Composés mesurés	Avantages	Inconvénients	Coût d'achat
	lampe UV utilisé, couramment une lampe à 10,6 eV)		- Dérive* rapide de la réponse dans le temps.	
Mesure optique (spectroscopie d'absorption IR)	CO, CO ₂	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne sensibilité* (quelques centaines à quelques milliers de ppm). - Temps de réponse* court (de 20 à 120 s). - Faible dérive* dans le temps 	- Sensible* aux conditions ambiantes (température, humidité et pression).	€€
Comptage optique (photométrie, néphélogétrie)	Particules	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne sensibilité* (quelques µg/m³). - Temps de réponse* court (quelques secondes sous réserve d'une fluidique adaptée) 	<ul style="list-style-type: none"> - Incertitude* induite lors du calcul en concentration massique à partir du comptage en nombre par la prise en compte d'un diamètre aérodynamique idéal ne tenant pas compte de la nature de la particule - Encrassement de la cellule photo sensible - diamètre minimal détecté = 300nm 	€
Mesure optique (transmittance)	Carbone suie	<ul style="list-style-type: none"> - Excellente sensibilité* (quelques centaines de ng/m³). - Temps de réponse* court (minute) 	<ul style="list-style-type: none"> - Incertitude* élevée vis à vis de la mesure de référence thermo-optique - Utilisation de consommable pour le prélèvement (coût élevé) 	€€€

Technologies	Composés mesurés	Avantages	Inconvénients	Coût d'achat
€ : de quelques euros à quelques dizaines d'euros ; €€ : de quelques dizaines d'euros à quelques centaines d'euros ; €€€ : de quelques centaines d'euros à quelques milliers d'euros.				

Les capteurs à semi-conducteurs (MOX pour oxydes métalliques), parmi les moins chers du marché, sont appréciés pour la grande diversité des gaz qu'ils peuvent détecter - notamment certains composés organiques volatils (COV), avec un temps de réponse court, une sensibilité et une limite de détection adaptées aux niveaux ciblés pour la surveillance de l'air ambiant et des environnements intérieurs. Leur consommation énergétique et autonomie limitée sont un frein pour des applications embarquées. Des interférences croisées fortes (entre les conditions de mesure, certains co-polluants et le polluant cible) sont également signalées. Ce dernier point peut être corrigé par l'apprentissage supervisé.

La cellule électrochimique est recherchée pour son caractère sélectif notamment aux gaz inorganiques. Plus coûteuse, cette solution présente deux inconvénients majeurs : une durée de vie limitée dans le temps, et un temps de réponse long, problématique notamment pour des dynamiques rapides de pollution, par exemple lors des phases de mobilité.

Le détecteur à photo-ionisation (PID) est plébiscité comme indicateur des COV totaux, et ce avec un temps de réponse très court, mais son prix limite souvent son usage à des systèmes capteurs moins accessibles au grand public.

Pour le CO₂, les capteurs infra-rouge NDIR (nondispersive infrared sensor) présentent d'excellentes performances métrologiques et sont à préférer à toute autre technologie.

Enfin en ce qui concerne les particules, les technologies optiques basées sur la diffraction infra-rouge, sont largement présentes sur le marché. La concentration massique est déduite d'un comptage en nombre des particules indépendamment de leur nature. Le coût de l'élément sensible est modeste et c'est ensuite la fluidique¹¹, le traitement des données associées et les précautions de mise en œuvre qui garantissent la qualité des données obtenues du système capteur complet.

¹¹ Par « fluidique », on entend un compartiment dans lequel est placé l'élément sensible, le capteur ou le système capteur, dont la géométrie est spécifiquement pensée pour optimiser l'écoulement de l'air, soit de manière passive, soit de manière active (par exemple avec une pompe) et ainsi maximiser la réponse globale du système capteur aux polluants ciblés.

3.3 Chaîne d'utilisation des systèmes capteurs et terminologie associée

3.3.1 Principe et étapes de la chaîne d'utilisation

Un système capteur peut être utilisé par le grand public à titre privé ou bien être mis en œuvre dans le cadre de d'études ou de projets ayant des objectifs variés comme par exemple : l'étude d'une source ponctuelle de pollution dans l'air (ambient, intérieur...), la mise en œuvre de la surveillance d'une zone/d'un territoire limitée dans le temps, la mesure de l'exposition des personnes, la recherche d'une nouvelle implantation pour une station fixe de surveillance de la qualité de l'air, la réalisation de cartographies de polluants avec un maillage plus fin que ce qui est effectué actuellement avec les données des stations fixes de mesure, etc.

L'individu peut avoir accès au résultat chiffré de la mesure effectuée par le système capteur ou bien à d'autres informations qui peuvent être de nature différente :

- Comparaison des valeurs mesurées à des indicateurs préétablis ;
- Variations de couleur d'une ou plusieurs LED selon le positionnement des valeurs mesurées au regard des seuils préétablis (par exemple à l'aide d'un feu tricolore) ;
- Catégorisation sémantique du niveau de pollution ou d'un risque potentiel pour la santé (par exemple qualité de l'air excellente ou air fortement pollué ou encore dangereux) ;
- Indice de qualité de l'air qui résume différentes informations (plusieurs polluants) et se décline en différentes catégories ou qualificatifs.

Il s'agit de données interprétées, selon les modalités intégrées au système capteur par le fabricant. Une discussion sur les indicateurs proposés par les fabricants de systèmes capteurs est développée au chapitre 3.3.4.

Dans le cadre de projets, outre l'étape de mesure générant des grandeurs physiques, l'utilisation d'un système capteur implique le plus souvent une suite de traitements spécifiques des données permettant de pallier leur imperfection, de les enrichir par des données additionnelles ou de les transformer en vue de l'usage visé. Ces traitements sont nécessaires pour interpréter les mesures en fonction de leur qualité et du contexte ou lieu d'acquisition, d'autant plus que ces mesures peuvent s'effectuer en mobilité et donc changer de contexte. Cette chaîne d'utilisation des données n'est pas spécifique de l'utilisation d'un système capteur et peut s'appliquer plus généralement à tout dispositif de mesure.

L'utilisation type d'un système capteur peut donc se décomposer en plusieurs étapes, schématisées sur la Figure 5 d'un système capteur. Toutes ces étapes ne sont pas nécessairement indispensables selon l'objectif visé. Les points clés à prendre en considération pour juger de la validité de la mesure pour effectuer de l'exposition individuelle sont développés au chapitre 7.

Les différentes étapes sont détaillées ci-après. A noter qu'un processus de validation peut intervenir lors de chacune des étapes pour s'assurer que les différentes opérations ont été effectuées de manière conformes et adaptées à l'objectif des mesures réalisées.

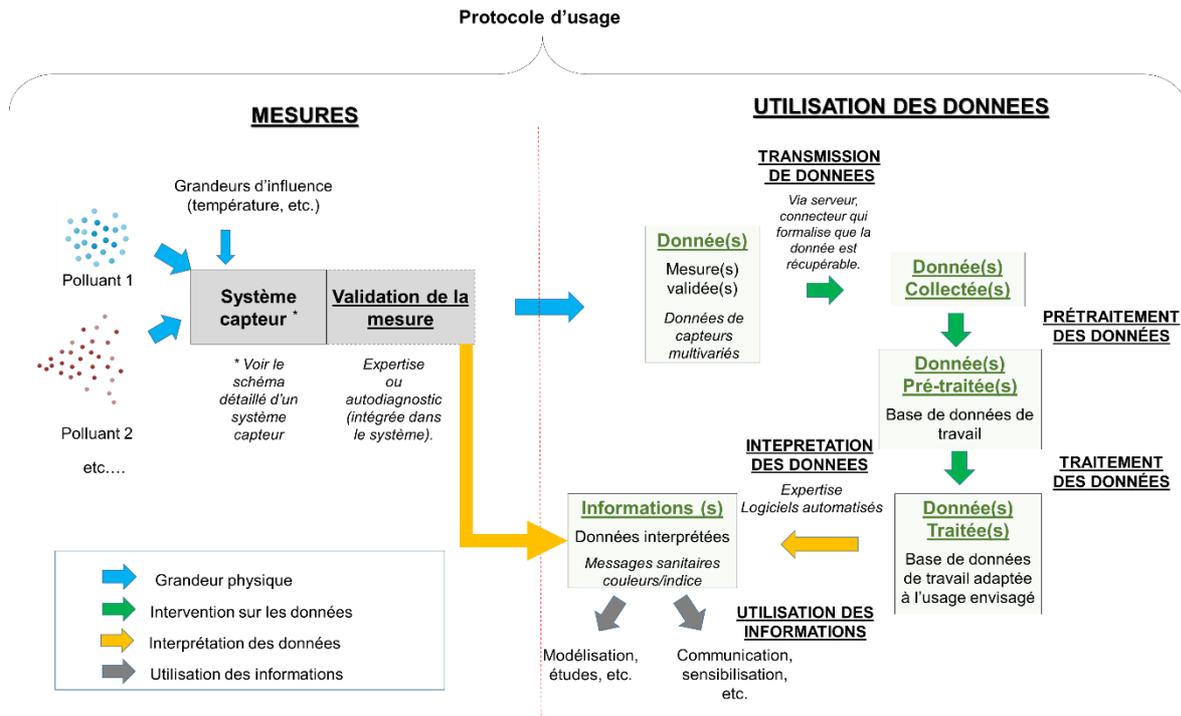


Figure 5 : Schéma-type d'utilisation d'un système capteur (cas idéal)

MESURES (1^{ère} étape)

Le premier maillon de la chaîne est le système capteur. Avant toute mesure, il convient de choisir le ou les systèmes capteurs adaptés à l'objectif recherché et à vérifier que leurs performances seront appropriées. Une liste des points clés à prendre en compte pour une utilisation en vue d'évaluer l'exposition est présentée au chapitre 7.2.

Comme décrit au chapitre 3.1.2, le système capteur réagit aux variations de la grandeur physique associée à un composé à étudier (concentration d'un polluant, température, humidité, etc.) et délivre un signal électrique. Ce signal électrique est ensuite transformé en grandeur physique correspondant au résultat de la mesure (mesurande*).

Une étape de validation de la mesure correspondant à un contrôle du bon fonctionnement qui peut être soit intégrée au système capteur (autodiagnostic) soit réalisée par le biais d'une expertise externe.

Les résultats de mesures issues de cette première étape de validation sont appelés dans le cadre de cette expertise « **Données** ».

En plus du mesurande, des métadonnées et des attributs de contexte peuvent également être enregistrés par le système capteur. Il s'agit de données qui servent à décrire le cadre et l'environnement de la mesure.

Ces attributs de contexte peuvent être de plusieurs types :

- Descriptifs avec deux niveaux :
 - De façon globale, ils renseignent sur la façon dont la donnée a été enregistrée (par quels instruments, par qui, quand et à quel endroit) ;
 - De façon spécifique, ils sont associés à des moments particuliers de la mesure (remontées d'événements spécifiques horodatés).
- Mesures complémentaires : elles peuvent correspondre à des mesures de grandeurs physiques complémentaires (température, humidité, bruit, luminosité, etc.) aux mesurandes* d'intérêt.
- Structurelles : il s'agit d'information sur la façon dont les données sont organisées (unités utilisées, organisation des colonnes dans le cas d'un fichier tableur, découpage des données en fichiers périodiques, etc.).
- Qualité : elles renseignent l'utilisateur sur le crédit qui doit être porté aux valeurs enregistrées. Il peut s'agir d'un indicateur statistique par exemple, permettant de valider le résultat brut d'une mesure. Elles peuvent relater des caractéristiques du système capteur comme la limite de détection*.

UTILISATION DES DONNEES

▪ **2^{ème} étape : Transmission et stockage de données**

Les données peuvent être transmises sur un serveur distant, un ordinateur personnel (par exemple, par lecture d'une carte mémoire) ou même un appareil mobile (par exemple, en Bluetooth), puis stockées durablement en vue de leur exploitation.

La transmission des données va dépendre du mode de communication utilisé par les systèmes capteurs (Wi-Fi, GPRS, connexion bas débit type LoRa ou Sigfox par exemple). La couverture du réseau de communication utilisé et la qualité de la connexion au moment de la mesure peuvent conditionner la bonne remontée des données vers un serveur cloud.

- **3ème étape : Pré-traitement des données**

Les données brutes, appelés « **Donnée(s) collectée(s)** » dans le cadre de cette expertise, sont souvent entachées d'erreurs et comportent des valeurs manquantes ou aberrantes. Le but du pré-traitement est de pallier ces insuffisances afin de constituer une base de travail cohérente. La préparation des données comprend ainsi le nettoyage, dont l'identification et la suppression des artefacts et du bruit de fond, l'imputation des valeurs manquantes (pouvant résulter de problèmes de captation ou de transmission).

- **4ème étape : Traitement des données**

Une fois les données préparées pour le traitement, appelés « **Donnée(s) pré-traitée(s)** » dans le cadre de cette expertise, elles sont transformées en vue d'exploitations et d'analyses spécifiques. Cela comprend la création de variables, l'agrégation spatiale, temporelle, ou selon d'autres variables, etc. Le traitement comprend également l'enrichissement par des données externes telles que les mesures aux stations, les sorties de modèles de qualité de l'air, des données météorologiques, des points d'intérêt, des données sur le trafic routier, ou toute autre donnée géographique permettant de décrire le contexte de la mesure. En outre, des méthodes d'analyse de données, statistiques ou autres, voire de fouille de données, peuvent être appliquées pour estimer l'exposition à la pollution de l'air.

- **5ème étape : Interprétation des données**

L'interprétation de ces données traitées en message sanitaire, indice de pollution, recommandations, etc. nécessite une expertise et peut être réalisée à l'aide de logiciels intégrés au système capteur.

Le terme « informations » désigne le résultat de cette étape d'interprétation. Les informations correspondent donc à des données interprétées.

- **6ème étape : Utilisation des informations**

Ces informations sont ensuite utilisées pour communiquer, sensibiliser la population ou bien intégrées dans des systèmes de modélisation, utilisés dans des études.

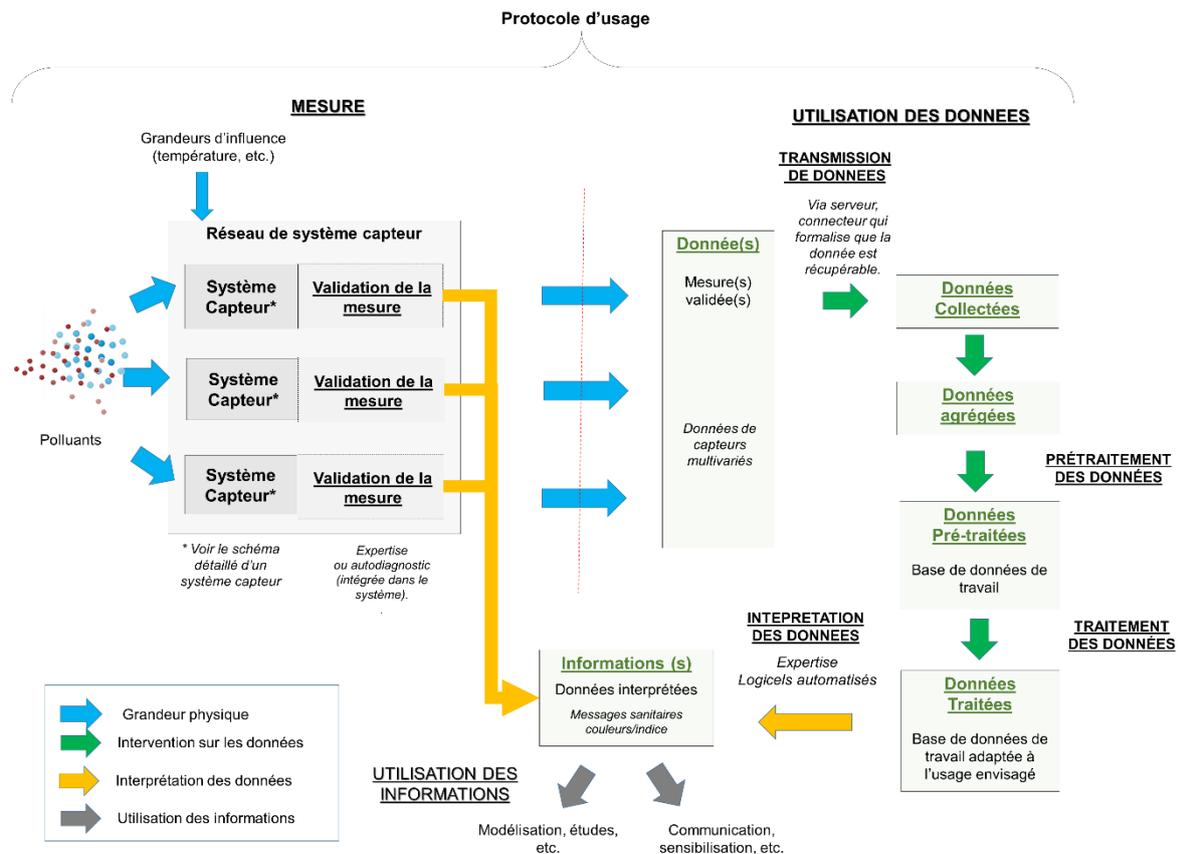
Parfois le système capteur intègre les différentes étapes, et fournit directement en sortie des informations (données interprétées).

3.3.2 Réseaux de systèmes capteurs

Un réseau de plusieurs systèmes capteurs est représenté par chaque élément physique (système capteur, serveur, autre périphérique, etc.) qui constitue un nœud du réseau. Comme pour la mesure avec un seul système capteur, un réseau repose sur chaque système capteur qui enregistre un ou plusieurs signaux, et restitue une mesure qui fait l'objet d'un autodiagnostic ou d'un contrôle externe. Un serveur permet de collecter les données, qui sont ensuite intégrées. Cette intégration consiste à harmoniser les mesures asynchrones et de les agréger pour changer leur granularité temporelle lorsque la fréquence de mesure varie au sein du réseau. Une étape préalable de validation du fonctionnement en réseau est alors effectuée pour adapter ce processus d'intégration.

Ces données sont ensuite pré-traitées, traitées et interprétées, puis les informations peuvent être utilisées selon l'objectif initial de la mesure, par exemple pour évaluer des expositions, communiquer, modéliser, etc.

Le schéma idéal d'utilisation d'un réseau de systèmes capteurs est représenté sur la Figure 6. Selon l'objectif visé l'ensemble des étapes n'est pas indispensable.



3.3.3 Place du *smartphone* (téléphones intelligents)

Initialement considérés comme des instruments de mesure isolés, les systèmes capteurs sont de plus en plus souvent couplés avec des *smartphones* dans les études scientifiques et les initiatives participatives. La présence du *smartphone* permet de déporter des fonctions auxiliaires mais parfois indispensables à la campagne de mesure. Ces fonctionnalités comprennent :

- La localisation des mesures grâce au GPS du *smartphone* (quand le système capteur n'est pas équipé d'un système de localisation) ;
- L'horodatage (*timestamping*) ;
- Le stockage des données ;
- La transmission des données vers un serveur, en temps réel ou en différé ;
- L'énergie contenue dans la batterie qui permet de faire fonctionner un système capteur et transmettre les données ;
- Un écran permettant la visualisation des données *via* des applications dédiées.

De plus, le *smartphone* offre la possibilité, *via* des applications dédiées, de visualiser en temps réel les mesures prises par le système capteur, de visualiser des cartes à partir des données

du serveur. Certaines applications permettent également à l'utilisateur d'entrer des annotations ou des renseignements de contextualisation.

Ce couplage système capteur/*smartphone* présente des avantages pour la consommation énergétique du système capteur lui-même, donc pour son autonomie, mais au détriment de la consommation énergétique du *smartphone*. Ce couplage, notamment pour la visualisation et l'annotation, permet d'ajouter un caractère participatif, voire ludique, à la mesure, qui prend tout son sens dans des études interventionnelles ou comportementales. Inversement, le couplage avec un *smartphone* induit des questionnements sur le respect de la vie privée.

En plus du caractère polyfonctionnel du *smartphone* favorisant des appariements avec des systèmes capteurs, c'est la large diffusion de ce terminal numérique au sein de la population qui confère au *smartphone* une place cruciale dans les expérimentations recensées dans ce rapport. Les derniers chiffres du Baromètre de la Société Numérique 2021 auprès des plus de 12 ans mettent en avant un équipement à plus de 84% en *smartphone* et 58% en tablette dans la population française. Le *smartphone* apparaît donc comme le premier et principal objet connecté avec des systèmes capteurs (CRÉDOC, 2021).

Si le *smartphone* vient ainsi en complément du système capteur, l'inverse est possible. Par exemple, un fabricant de téléphone a intégré un capteur de particules dans un téléphone, mais cette expérience n'a pas été probante. Dans certaines études, ce ne sont pas des *smartphones* mais des tablettes connectées qui sont utilisées (e.g. projet Polluscope).

3.3.4 Discussion sur les indicateurs proposés par les fabricants de systèmes capteurs

La plupart des fabricants de systèmes capteurs (cf. chapitre 3.4 sur la définition des acteurs entrant en jeu dans la mise en œuvre des systèmes capteurs), en particulier ceux destinés au grand public, ne donnent pas seulement une valeur chiffrée des polluants mesurés, mais proposent souvent différentes manières d'interpréter ces valeurs (cf. chapitre 3.3.1).

Des valeurs guides existent déjà pour la quasi-totalité des polluants mesurés dans l'air extérieur (à l'exception des COV totaux¹²). Elles sont établies sur des critères sanitaires par l'Anses ou l'OMS, ou sur des critères de gestion par la réglementation ou le Haut conseil en santé publique (HCSP).

Les systèmes capteurs permettent d'acquérir des données en temps quasi-réel. Or les valeurs guides telles que celles de l'OMS sont en général associées à des durées d'exposition horaires voire journalières ou annuelles nettement supérieures au pas de temps de mesure des systèmes capteurs. De ce fait, ces valeurs guides ne sont pas utilisables pour interpréter des concentrations ponctuelles mesurées par les systèmes capteurs. En effet, le dépassement d'une valeur guide sur une courte période n'indique en rien si cette même valeur guide sera dépassée sur la journée ou l'année (cf. chapitre 8). De plus ces valeurs guides établies sont établies au niveau populationnel et ne peuvent pas être comparées à une donnée d'exposition individuelle.

L'interprétation quasiment en temps réel des données des systèmes capteurs, et l'immédiateté de la perception du risque encouru représente un moyen de sensibilisation du grand public et permet de mettre en lumière la problématique de la pollution atmosphérique (Anses, 2016). Il

¹² Le paramètre COV totaux est utilisé comme indicateur global de la teneur en COV. Ce paramètre n'a pas de valeur sanitaire en soi. A noter l'existence d'une valeur allemande de 300 µg/m³ proposée par Bernd Seifert en toluène équivalent, basée plus sur l'expérience de terrain et non sur des effets sanitaires.

faut cependant rappeler que l'impact sanitaire à court terme de la pollution atmosphérique est quantitativement bien inférieur à celui liés à une exposition chronique, c'est-à-dire au jour le jour, à cette pollution qui est considéré dans les valeurs guides définies par l'OMS. Il y a donc un décalage très net entre ce que peut fournir un système capteur en temps réel et l'interprétation sanitaire qui peut en découler (cf. chapitre 8).

En général, ces valeurs guides ne sont pas reprises telles quelles comme indicateurs de comparaison. Chaque fabricant propose ses propres indicateurs pour chacun des polluants mesurés. Ces indicateurs sont parfois établis sur la base de valeurs guides existantes, mais ce n'est pas toujours le cas ni explicitement signalé par les fabricants. Les références associées et le mode de construction de ces indicateurs ne sont généralement pas documentés.

Les indicateurs proposés permettent de catégoriser la concentration mesurée pour chaque polluant en 3 à 7 catégories (selon les fabricants) du niveau le plus bas au niveau le plus haut. Les tableaux 3 et 4 présentent à titre d'exemple les valeurs des indicateurs établies par 16 fabricants de systèmes capteurs sur la mesure des concentrations de 5 polluants ou paramètre (formaldéhyde, PM_{2,5}, COV totaux, CO₂ et NO₂) respectivement pour le niveau le plus bas et pour le niveau le plus haut. L'indicateur est établi par polluant mais le changement d'un indicateur lumineux/sonore peut faire intervenir une combinaison de différents paramètres (concentration d'un ou plusieurs polluants, température, humidité, etc.) ou un seul paramètre. Les valeurs des indicateurs ne varient pas selon le pas de temps d'utilisation ou de visualisation de la mesure. Il s'agit pour la quasi-totalité de systèmes capteurs d'air intérieur (hormis Azimuth Fireflies qui est un système capteur d'air extérieur et Flow qui est un système capteur portable).

Chaque niveau est généralement associé à un qualificatif exprimant l'interprétation du fabricant et sa propre perception de la qualité de l'air (voire du risque sanitaire). Pour le niveau le plus bas, la qualité de l'air est associée aux termes « excellent », « bon », « super » parfois « sain ». Le niveau le plus élevé se voit associer des termes plus alarmants comme « fortement pollué », « médiocre », « pollution grave », « mauvais », « très malsain », « dangereux » ou même « airpocalypse ».

De même, une case colorée signifie que le système capteur affiche un voyant lumineux de cette même couleur associée au niveau de concentration en question. Le polluant dont le niveau est le plus élevé est en général pris en compte. L'absence de couleur indique que le système capteur ne dispose pas de voyant lumineux qui change de couleur selon le niveau de concentration. Ces indicateurs peuvent être représentés par un code couleur dans l'interface graphique, celle-ci pouvant être accessible directement sur le système capteur ou *via* une application web. Par exemple, le système Blueair Aware affiche un voyant lumineux orange correspondant à un air dit « fortement pollué » dès lors que la concentration en PM_{2,5} dépasse 150 µg/m³, et/ou que la concentration en COV totaux est supérieure à 550 ppb et/ou que la concentration en CO₂ dépasse 2000 ppm. A l'inverse, le voyant est bleu (qualité d'air excellente) si la concentration en PM_{2,5} est inférieure à 10 µg/m³, et que la concentration en COV totaux ne dépasse pas 221 ppb et que la concentration en CO₂ reste en deçà de 800 ppm.

Les indicateurs utilisés pour définir le niveau le plus bas ou le niveau le plus haut sont très variables d'un fabricant à l'autre. Ils peuvent varier d'un facteur 2 à 50 selon les polluants et les niveaux. Ils peuvent parfois même se recouper entre les niveaux selon les fabricants. L'indicateur le plus haut proposé par un fabricant pour les particules PM_{2,5} est inférieur à l'indicateur le plus bas proposé par un autre fabricant sur ce même paramètre.

Cette diversité des indicateurs illustre la différence de perception entre les fabricants qui vient se refléter dans la communication fournie aux utilisateurs des systèmes capteurs, et entretenir ainsi le flou entre ce qui peut être considéré comme une « bonne » ou une « mauvaise » qualité de l'air.

Tableau 3 : Comparaison des indicateurs proposés pour le niveau le plus bas sur 5 substances, pour des systèmes capteurs vendus en France ou en Europe par 16 fabricants (exercice réalisé en novembre 2021).

Système capteur	Niveau le plus bas	Formaldéhyde	PM _{2,5}	COV totaux	CO ₂	NO ₂
		µg/m ³	µg/m ³	ppb (µg/m ³)*	ppm	ppb
Temtop M10i	Bon	< 100	<75	<160 (600)	-	-
Blueair Aware	Excellent	-	<10	<222	<800	-
Airvisual Node	Bon	-	<12	-	<700	-
Cozy Air	Optimal	-	<32	<160	<1000	<160
Eve Room	Excellent	-	-	-	<700	-
Foobot	Super	-	<12	<150	<625	-
Aware Omni	Sain	-	<15	<333	<600	-
Nexelec Carbon	-	-	-	-	<1000	-
Kaiterra Egg	Bon	-	<12	<220	<1000	-
Azimuth Fireflies	Excellent	-	-	<186 (700)	<1000	-
Ethera Nemo	-	<10	-	<240	<800	-
Mica_INBIOT	-	<70	-	-	<800	-
Nanosense E4000	Bas	-	-	<240 (900)	<700	-
Flow 1	Faible	-	<10	< 250	-	<20
uRAD Monitor A3/Smoggie	-	<123	<10	-	<500	-
Langder Tech Sensor	Excellent	<100	<35	<160 (600)	<1000	-
Bilan sur 16 capteurs		[10 - 123]	[10 - 75]	[150 - 333]	[500 - 1000]	[20 - 160]
Pas de changement de couleur apparent au niveau du système capteur						
 Couleur apparaissant sur le système capteur sur l'ensemble des niveaux						

*La conversion ppb - µg/m³ a été établie en prenant le toluène comme COV de référence (Le système capteur donne l'information en µg/m³)

- polluant non mesuré

Tableau 4 : Comparaison des indicateurs proposés pour le niveau le plus haut sur 5 substances, pour des systèmes capteurs vendus en France ou en Europe par 16 fabricants (exercice réalisé en novembre 2021)

Système capteur	Niveau le plus haut	Formaldéhyde	PM _{2,5}	COV Totaux	CO ₂	NO ₂
		µg/m ³	µg/m ³	ppb (µg/m ³)	ppm	ppb
Temtop M10i	Dangereux	>300	>200	>425 (1600)	-	-
Blueair Aware	Fortement pollué	-	>150	>550	>2000	-
Airvisual Node	Dangereux	-	>250	-	>5000	-
Cozy Air	Alerte	-	>80	>280	>2000	>280
Eve Room	Mauvais	-	-	-	>2000	-
Foobot	Mauvais (Poor)	-	>37	>450	>1925	-
Aware Omni	Très malsain (unhealthy)	-	>75	>8332	>2500	-
Nexelec Carbon	-	-	-	-	>1700	-
Kaiterra Egg	Très élevé	-	>250	>3300	>5000	-
Azimuth Fireflies	Médiocre	-	-	>797 (3000)	>1500	-
Ethera Nemo	-	>100	-	>2440	>1700	-
Mica_INBIOT	-	>150	-	-	>1500	-
Nanosense E4000	Elevé	-	-	>797 (3000)	>2000	-
Flow 1	Airpocalypse	-	>125	>6350	-	>300
uRAD Monitor A3/Smoggie	-	>367	>40	-	>2000	-
Langder Tech Sensor	Pollution grave (serious)	>300	>250	>160 (600)	>3000	-
Bilan sur 16 capteurs		[100 - 367]	[37 - 250]	[160 - 8332]	[1500 - 5000]	[280 - 300]
Pas de changement de couleur apparent au niveau du système capteur						
 Couleur apparaissant sur le système capteur sur l'ensemble des niveaux						

Pour agréger l'information sur plusieurs polluants, certains fabricants proposent des indices de qualité de l'air qui correspondent à un score calculé à partir de la concentration normalisée du polluant le plus élevé, ou d'une combinaison des polluants. Les indices sont souvent proches de ceux proposés par d'autres organismes comme l'indice AQI de l'US EPA pour l'air ambiant (avec des données intégrées sur 1, 8 ou 24 h) et adaptés à d'autres paramètres comme les COV totaux ou le formaldéhyde. D'autres fabricants développent leur propre indice de qualité de l'air avec des modes de calculs pas toujours documentés.

Comme pour les indicateurs de concentration, il n'y a pas de consensus dans les indices de qualité de l'air utilisés par les fabricants. Même si, au regard des polluants réglementaires de l'air ambiant, les fabricants ont tendance à utiliser l'indice AQI de l'US EPA, mais sans toujours utiliser les données intégrées sur l'heure ou la journée comme elles devraient l'être. Ces tableaux soulignent la diversité des indicateurs utilisés par les fabricants de systèmes capteurs. Le groupe de travail ne s'est pas prononcé sur les valeurs de ces indicateurs. A noter que pour certains systèmes capteurs, l'opérateur peut modifier lui-même les indicateurs (e.g. Airbeam, Nanosense).

3.4 Acteurs entrant en jeu dans la mise en oeuvre des systèmes capteurs

Ce chapitre a pour objectif de décrire les différents rôles des acteurs entrant en jeu dans la mise en œuvre des systèmes capteurs. A noter qu'une même personne morale ou physique peut incarner un ou plusieurs rôles.

- **Fournisseur d'un capteur ou d'un système capteur** : désigne le ou les fabricant(s) d'éléments sensibles, de capteurs et assembleur(s) de capteurs et systèmes capteurs. Le fournisseur peut être une ou des personne(s) morale(s) ou physique(s) et concerne tout autant et à la fois des entreprises, laboratoires de recherches ou des associations mais également des collectifs ou des individus fabriquant ou assemblant leurs systèmes capteurs. Les différentes briques composant un système capteur depuis les éléments sensibles jusqu'à la connectivité en passant par les logiciels d'acquisition et de traitement de données supposent de prendre en considération une diversité d'acteurs rendant possible matériellement parlant la production d'un système capteur.
- **Porteur de l'initiative/du projet** : le porteur de l'initiative ou du projet de mesure de qualité de l'air à l'aide d'un système capteur peut désigner une ou des personnes morales ou physiques initiateurs et/ou coordinateurs du projet. Une institution publique ou locale telle qu'une mairie peut ainsi programmer une campagne de mesure citoyenne à l'aide de systèmes capteurs. Après avoir fait appel à un fournisseur, elle aura à coordonner différents acteurs tels que les opérateurs, des utilisateurs, diffuseurs des données et responsable juridique du traitement des données. Un laboratoire de recherche œuvrant au développement des sciences participatives peut également initier et coordonner un projet basé sur un système capteur. Ce sont également des associations d'habitants qui peuvent s'emparer de ces dispositifs à des fins de mesures citoyennes de pollution. Des collectifs plus intéressés par la fabrication personnelle de systèmes capteurs peuvent également déployer des projets de fabrication et d'utilisation de systèmes capteurs.
- **Opérateur** : ce rôle concerne la ou les personne(s) en charge de la mise en œuvre du système capteur. Ce rôle suppose diverses opérations garantissant techniquement et scientifiquement la qualité de la mesure. Par la médiation du savoir « mesurer » auprès des différentes parties-prenantes d'un projet, par le travail d'étalonnage et de maintenance, l'opérateur est un acteur important de la chaîne d'utilisation du système capteur. Il peut être membre d'un laboratoire de recherche, des directions techniques et scientifiques d'une institution locale ou encore un connaisseur associatif et soucieux de la garantie matérielle des bonnes mesures.

- **Utilisateur** : cet acteur peut être une association, un collectif ou un ou des particulier(s) et désigne le(s) récepteur(s) ou destinataire(s) des données générées par les systèmes capteurs. Les motifs de participation des utilisateurs dans les projets basés sur des systèmes capteurs s'avèrent divers allant de la préoccupation pour la santé à la curiosité technique en passant par l'engagement écologique. Les usages des données issues des systèmes capteurs se déploient suivant un registre large allant de l'acquisition d'une information personnelle à la constitution d'une factualité opposable à diverses autorités d'une mauvaise qualité de l'air, en passant par des appropriations mobilisatrices des données se manifestant par exemple par des changements d'habitudes dans ses modes de transports, de consommation, d'habitation, etc.
- **Diffuseur des données** : ce terme qualifie une personne morale ou physique mettant à disposition des données ainsi que procédant à la communication de celles-ci (hors problématique de responsabilité réglementaire). Ce rôle peut être assumé par différents acteurs décrits précédemment comme par exemple l'opérateur ou encore le fournisseur de systèmes capteurs qui proposerait une suite technique complète de la collecte à la mise à disposition des données au travers d'une interface de visualisation ou en passant par une solution de stockage ou centralisée (cloud) ou distribuée (local).
- **Responsable juridique du traitement des données** : il s'agit du responsable qui met en œuvre des mesures techniques et organisationnelles appropriées pour s'assurer et être en mesure de démontrer que le traitement est effectué conformément au Règlement Général de Protection des Données Personnelles (RGPD). En effet, une donnée générée par un système capteur peut, dans certains cas, entrer dans le champ des données personnelles si la mesure du système capteur est associée à des informations permettant l'identification directe ou indirecte d'un individu. La géolocalisation de la mesure peut dans certains cas permettre cette identification (cf. chapitre 7). Ce rôle est défini par la Commission Nationale Informatique et Liberté (CNIL)¹³ et peut concerner un acteur extérieur au réseau d'acteurs précédemment décrits ou l'un d'entre eux (en particulier le porteur de l'initiative/projet) qui se charge de cette tâche réglementaire, permettant notamment aux utilisateurs de données générées par des systèmes capteurs d'exercer les droits inscrits dans le RGPD.

¹³ <https://www.cnil.fr/fr/responsable-de-traitement-et-sous-traitant-6-bonnes-pratiques-pour-respecter-les-donnees>

4 Panorama des projets mettant en œuvre des systèmes capteurs

4.1 Préambule

Le domaine des systèmes capteurs connaît une forte évolution ces dernières années. Ces technologies ont fait et font encore l'objet d'une multitude d'études dans différents domaines d'application potentiels, de la surveillance réglementaire de la qualité de l'air à la sensibilisation de la population aux problématiques de la qualité de l'air¹⁴.

Des travaux de recensement des projets sur les systèmes capteurs ont été initiés récemment, tels que la base de données Capt'air du LCSQA (cf. Chapitre 4.2) et la plateforme Capteurs et sciences participatives (CASPA) (cf. Chapitre 4.3)

Ce chapitre présente une synthèse des **principaux travaux** conduits sur l'utilisation des systèmes capteurs par type d'usages, notamment en France. La liste des travaux présentés dans ce chapitre n'est pas exhaustive de l'ensemble des projets conduits ou en cours dans le domaine des systèmes capteurs.

A noter que l'utilisation des systèmes capteurs à des fins de surveillance réglementaire de la qualité de l'air fait l'objet de nombreuses études visant à comparer d'un point de vue métrologique ces technologies aux instruments mis en œuvre dans les méthodes de référence* mais aucune étude ou projet déployant des systèmes capteurs à large échelle n'a encore été identifié dans la littérature publiée.

4.2 Certification, normalisation et évaluation des systèmes capteurs

4.2.1 Certification, normalisation des systèmes capteurs

En Europe, le comité européen de normalisation (CEN) a créé en 2015 un groupe de travail (TC 264/WG 42 « Capteurs pour la qualité de l'air ») pour l'élaboration d'une spécification technique visant à fournir des lignes directrices pour l'évaluation des performances des systèmes capteurs utilisés pour la mesure indicative de polluants gazeux et particulaires de l'air ambiant. La publication de la première partie de cette norme relative aux polluants gazeux est prévue en avril 2022. On y retrouve notamment une proposition de classification des systèmes capteurs en 2 niveaux (mesure indicative¹⁵, estimation objective¹⁶) selon les Objectifs de Qualité de Données (OQD) atteints lors des évaluations métrologiques (cf. Tableau 5).

¹⁴ Une taxonomie des projets mettant en œuvre des systèmes capteurs est également évoquée dans le chapitre 2.2.1 du rapport volume 2.

¹⁵ Mesures qui respectent des objectifs de qualité des données moins stricts que ceux qui sont requis pour les mesures fixes (Directive 2008/50/CE).

¹⁶ Toute méthode permettant d'estimer l'ordre de grandeur des niveaux en polluants selon des objectifs de qualité des données définis à l'annexe 5 de l'arrêté du 16 avril 2021 relatif au dispositif national de surveillance de la qualité de l'air ambiant, en un point ou sur une aire géographique, sans nécessairement recourir à des outils mathématiques complexes ou aux équations de la physique

Tableau 5 : Objectifs de Qualité de Données définis par le WG42 du CEN

Polluant	Méthode de mesure			
	<i>Fixe (référence)</i>	Indicative	<i>Modélisation</i>	Estimation objective
SO ₂ , NO ₂ /NO _x , CO	+/- 15%	+/-25%	+/-50%	+/-75%
Benzène	+/- 25%	+/- 30%	+/- 50%	+/- 100%
O ₃	+/- 15%	+/- 30%	+/- 50%	+/- 100%
À utiliser quand les concentrations en polluant sont				
	> SES	SEI ≤ [] ≤ SES	< SEI	< SEI
SES : Seuil d'évaluation supérieur SEI : Seuil d'évaluation inférieur Définitions dans l'arrêté du 16 avril 2021 relatif au dispositif national de surveillance de la qualité de l'air ambiant				

L'Afnor a également publié un fascicule de documentation sur les « concepts relatifs à l'utilisation de dispositifs de type « capteur » / « système capteur » en décembre 2021 (Afnor, 2021). Ce document vise à apporter une aide à toute personne concernée par l'utilisation de dispositifs de type « capteur » ou « système capteur » destinés à la qualification de la qualité de l'air (extérieur et/ou intérieur, en fixe et/ou en mobile) à l'exclusion des émissions des locaux à pollution spécifique (atmosphères de travail). Il fournit des compléments aux textes normatifs publiés et à venir (notamment ceux issus du CEN TC 264 WG 42 « Capteurs pour la qualité de l'air »).

En parallèle, le Laboratoire National de métrologie et d'Essais (LNE) et l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris) ont créé dès 2020 l'association « Certification Instrumentation pour l'Environnement » (CIE) en vue d'établir une certification volontaire « AIR Quality Sensor » s'adressant aux fabricants et aux distributeurs de systèmes capteurs pour la pollution de l'air qui s'appuie sur les travaux normatifs du CEN TC 264/WG42, auquel l'Ineris et le LNE participent activement. Cette certification volontaire vise à valider le niveau de performance métrologique de systèmes capteurs. Elle permet aux fabricants et aux distributeurs de garantir la performance métrologique de leurs produits au moyen d'une évaluation réalisée par des organismes compétents et indépendants. Cette évaluation porte sur les systèmes capteurs pour une utilisation en point fixe dans le cadre de la surveillance de la qualité de l'air ambiant, et permet la différenciation des systèmes capteurs en trois divisions de performance reliées à leur usage :

- Division A : Catégorie d'objectifs de qualité de données définie dans le protocole d'évaluation MO-1347 et conforme aux objectifs de qualité des données (incertitude, saisie minimale de données) de la Mesure Indicative tels que décrit dans la Directive 2008/50/CE ;
- Division B : Catégorie d'objectifs de qualité de données définie dans le protocole d'évaluation MO-1347 et conforme aux objectifs de qualité des données (incertitude, saisie minimale de données) de l'Estimation Objective tels que décrit dans la Directive 2008/50/CE ;

- Division C : Catégorie d'objectifs de qualité de données définie dans le protocole d'évaluation MO-1347 mais n'entrant pas dans le champ d'application de la Directive 2008/50/CE. Pour cette division, le niveau d'exigence en matière d'incertitude est uniquement suffisant pour des études de sciences participatives, des actions pédagogiques, etc., définies comme « Études de Sensibilisation ».

A noter que les deux premières divisions sont compatibles avec les exigences pour la mesure qui sont spécifiées dans la Directive 2008/50/EC concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe la cohérence avec l'approche adoptée par le groupe normatif CEN/TC264/WG42.

4.2.2 Évaluation des systèmes capteurs et identification de systèmes capteurs en fonction du domaine d'application

En parallèle des projets de certification et de normalisation, des programmes d'évaluation des performances ont été entrepris par de nombreuses organisations en France et à l'étranger pour évaluer, en termes quantitatifs la réponse des systèmes capteurs par rapport aux mesures de référence dans des conditions de laboratoire et de prélèvement d'air ambiant. Les évaluations en laboratoire permettent aux chercheurs de contrôler les conditions et d'examiner la réponse des systèmes capteurs en fonction de la température, du taux d'humidité relative, de gamme de concentrations de gaz ou de particules, et à d'autres facteurs d'interférence* potentiels. L'évaluation dans des conditions extérieures fournit un test plus « réel » des systèmes capteurs, mais peut être limitée à leur durée de vie, à la gamme de conditions atmosphériques rencontrées à un endroit particulier et certaines variables interférentes peuvent ne pas être visibles ou mesurées pendant la phase de test.

En général, les évaluations recensées ont porté sur la comparaison d'un petit nombre de systèmes capteurs provenant de différents fabricants. Il apparaît par ailleurs de plus en plus nécessaire de conduire également des études visant à tester la variabilité entre des lots de systèmes capteurs identiques.

En France, deux initiatives majeures visant à évaluer les systèmes capteurs ont été conduites par le LCSQA et le réseau AIRLAB¹⁷ et sont disponibles *via* la base de données Capt'air du LCSQA. En Europe, c'est le JRC (Centre commun de recherche de la Commission européenne – *Joint Research Centre*) qui a mené les principaux travaux d'évaluation de systèmes capteurs, essentiellement pour les polluants réglementés et a publié plusieurs rapports sur le sujet. Enfin, à l'international, un travail de fond est mené depuis plusieurs années par l'US EPA pour regrouper sur leur site internet « Air sensor tool box »¹⁸ différentes informations relatives aux performances, au fonctionnement et à l'utilisation des systèmes capteurs. Ces différents travaux sont synthétisés dans les paragraphes suivants.

4.2.2.1 Travaux du groupe de travail national « micro-capteurs » du LCSQA

En 2016, le LCSQA crée le groupe de travail « micro-capteurs pour l'évaluation de la qualité de l'air » avec quatre principaux objectifs :

- Définir les utilisations potentielles des systèmes capteurs dans le cadre de la surveillance réglementaire de la qualité de l'air ;

¹⁷ Rassemblement de partenaires placé sous l'autorité du Conseil d'Administration d'Airparif (<http://airlab.solutions/fr>)

¹⁸ <https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/evaluation-emerging-air-sensor-performance>

- Organiser un partage d'expérience et d'informations efficace et dynamique au sein du dispositif national de surveillance de la qualité de l'air ;
- Informer les utilisateurs (ici il s'agit des Association agréée de surveillance de la qualité de l'air (AASQA), collectivités locales, Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL), Direction Régionale et Interdépartementale de l'environnement, de l'aménagement et des transports (DRIEE), etc.) sur les capacités des systèmes capteurs (potentialités et limites) et définir des modalités pour leur accompagnement ;
- Identifier des applications émergentes associées à ces nouvelles technologies pertinentes pour la surveillance de la qualité de l'air :
 - Autres polluants (ex : NH₃, H₂S) ;
 - Autres modalités d'utilisation (ex : mesures embarquées, systèmes capteurs distribués, etc.) pour objectifs divers (information personnalisée, sensibilisation, **exposition individuelle**, etc.).

De ces travaux naîtront :

- La base de données Capt'air (cf. chapitre 4.2.2.1.1) ;
- La « note de cadrage pour l'utilisation des systèmes capteurs pour la mesure des polluants gazeux et particulaires » dans laquelle sont identifiés et catégorisés les différents usages et domaines d'utilisation associés aux systèmes capteurs (cf. chapitre 4.2.2.1.2 et Tableau 6) ;
- Plusieurs protocoles d'évaluation métrologique de systèmes capteurs de gaz et particules, en laboratoire ou sur le terrain, en point fixe ou mobile dont les rapports sont disponibles sur le site en ligne du LCSQA ;
- Un essai national d'aptitude des systèmes capteurs pour la surveillance de la qualité de l'air (hiver et été), dont les principales conclusions sont reprises ci-après (cf. chapitre 4.2.2.2).

4.2.2.1.1 Base de données Capt'air

La base de données Capt'air¹⁹ gérée par le LCSQA a pour objectifs 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 les systèmes capteurs adaptés à un usage prédéfini (LCSQA, 2021b). Cette base de données a été initiée en 2017. La première interface web ergonomique (Capt'air v1) date de 2019 et a été mise à jour en 2020 (Capt'air v2).

Elle répertorie, pour des dispositifs commercialisés ou issus d'un assemblage par un utilisateur à partir de plusieurs éléments commerciaux (élément sensible, carte électronique, etc.), les caractéristiques techniques issues des spécifications constructeurs (références fabricant, type d'élément sensible, variables mesurées, taille, poids, mode de transmission des données, etc.), mais aussi les performances techniques obtenues par des expérimentateurs pour un polluant donné et dans un contexte d'utilisation spécifique (qualifications sur site et campagnes de terrain, cartographies à partir de moyens mobiles, etc.).

A ces systèmes capteurs peuvent être associées une ou plusieurs expérimentations qui portent sur un polluant donné avec un système capteur particulier pour répondre à l'un ou aux deux objectifs suivants :

- Évaluation métrologique consistant en la comparaison entre le système capteur et une méthode prise en référence (en laboratoire ou *in situ* en air extérieur) ;

¹⁹ <https://captair-lcsqa.fr/>

- Utilisation terrain permettant d'évaluer l'adéquation d'un système capteur pour un usage donné dans des conditions définies.

Jusqu'à présent, la liste des contributeurs et utilisateurs de Capt'air était limitée aux membres du dispositif national de surveillance de la qualité de l'air (AASQA, DREAL/DRIEE/DEAL, bureau de la qualité de l'air (BQA) du Ministère en charge de l'Environnement et LCSQA), qui renseignent cette base de façon volontaire. Ainsi, cette base est évolutive et de ce fait non exhaustive. Une réflexion est en cours pour ouvrir l'accès à d'autres organismes.

Un premier bilan des données remontées en 2019, 2020 et 2021 montre que (LCSQA, 2021b ; LCSQA, 2021c) :

- Fin 2019, les données de Capt'Air concernaient 18 capteurs / systèmes capteurs différents provenant de 14 fabricants différents pour un total de 44 expérimentations. Chaque dispositif fait l'objet de 1 à 9 expérimentations différentes. Par ailleurs sur la trentaine de polluants gazeux ou particulaires identifiés par défaut dans Capt'Air, les 44 expérimentations ne portent que sur 5 d'entre eux : l'ozone, le NO₂, les PM₁₀, PM_{2,5} et PM₁. La totalité des données présentes dans Capt'Air en 2019 provient d'expérimentations qui ont été menées directement par les contributeurs de la base (AASQA, LCSQA) ;
- En mars 2021, 139 capteurs / systèmes capteurs et 244 expérimentations étaient renseignées dans Capt'air. Là encore, la majorité des expérimentations se focalisent sur 3 polluants : les PM_{2,5} (31 %), les PM₁₀ (26%) et le NO₂ (17%).

La très grande majorité des expérimentations renseignées sont des évaluations métrologiques (91%), de courte durée (< 6 mois) et menées en air extérieur (> 70%). Les expérimentations associées à des « utilisations terrains » (9%) sont menées afin d'améliorer la couverture spatiale du territoire (57%) et d'évaluer la dynamique temporelle d'un polluant (~ 25%). L'évaluation de l'exposition individuelle représente 14% des évaluations terrains.

4.2.2.1.2 Note de cadrage (LCSQA) pour l'utilisation des systèmes capteurs pour la mesure des polluants gazeux et particulaires

A partir des expérimentations recensées, le LCSQA a défini une liste de critères de performance (qualitatifs ou quantitatifs) pour lesquels un poids d'importance a été donné en fonction des objectifs d'usage d'un système capteur et de son domaine d'utilisation principal. Ainsi, 10 usages et 4 domaines d'utilisation (cf. Tableau 6) ont été documentés pour plus de 20 critères de performance différents. Le Tableau 6 recense notamment la catégorie « évaluation de l'exposition individuelle », à laquelle sont associés des critères de performances avec quatre niveaux d'exigence attendus selon leur importance au regard de cet usage. Ces critères et leurs niveaux d'exigence associés sont présentés en Annexe 7 et ont été intégrés dans la réflexion du groupe de travail sur les « Points clés à prendre en compte pour considérer qu'une donnée générée dans une étude encadrée par un système capteur est valide pour évaluer l'exposition individuelle ».

Tableau 6 : Types d'usage identifiés pour les systèmes capteurs « qualité de l'air » et domaines d'utilisation associés (LCSQA, 2021a)

Types d'usages	Domaines d'utilisation associés			
<i>Surveillance réglementaire (arrêté du 19 avril 2017, etc.) et évaluation préliminaire</i>	<i>Mesure de référence (mesure fixe)</i>	<i>Mesure indicative / évaluation préliminaire</i>	<i>Estimation objective</i>	
Cartographie	Air ambiant statique	Mobilité embarquée ^a	Air intérieur*	Multi-environnements ^{*b}
Recherche de sources	Air ambiant statique	Mobilité embarquée ^a	Air intérieur	
Amélioration de la couverture temporelle	Air ambiant statique	Mobilité embarquée ^a	Air intérieur	
Amélioration de la résolution temporelle	Air ambiant statique	Mobilité embarquée ^a	Air intérieur	
Amélioration de la couverture spatiale	Air ambiant statique	Mobilité embarquée ^a	Air intérieur	Multi-environnements
Recherche et étude d'implantation de sites de mesure	Air ambiant statique	Mobilité embarquée ^a		
Evaluation de sortie de modèles	Air ambiant statique	Mobilité embarquée ^a		
Evaluation de l'exposition individuelle				Multi-environnements
Autre surveillance ((Hors Directives 2004/107/CE, 2008/50/CE et 2015/1480)	Air ambiant statique	Mobilité embarquée ^a	Air intérieur*	Multi-environnements*
Gestion de procédés (ex. : régulation ventilation tunnel, aération bâtiment, etc.)	Air intérieur			Multi-environnements*
Sensibilisation / Vecteur de communication (*)				Multi-environnements*

Les champs grisés suivis du symbole (*) indiquent que des usages précis ont été répertoriés pour ce champ mais sans que le recul nécessaire pour définir l'importance des critères de performances à y associer soit suffisant à ce jour. Les champs en italique indiquent que des critères de performance associés font référence à des exigences réglementaires (LCSQA, 2021a).

^a Le terme « mobilité embarquée » est à associer à une mesure effectuée par un système capteur en mouvement et destiné à évaluer un environnement spécifique (air ambiant, air intérieur). Ce terme n'est pas à confondre avec l'usage « évaluation de l'exposition individuelle », qui a pour but de documenter l'ensemble des environnements dans lesquels évolue une personne (LCSQA, 2021a).

^b Le terme « multi-environnements » est à associer à des mesures qui sont réalisées par un système soit dans des environnements intérieurs ou en air ambiant avec des passages rapides et/ou fréquents de l'un à l'autre des compartiments (LCSQA, 2021a).

4.2.2.2 Essai national d'aptitude des systèmes capteurs

En 2018, le LCSQA a mené le premier essai national d'aptitude des systèmes capteurs pour la surveillance de la qualité de l'air ambiant en hiver et en été (LCSQA, 2018).

Cet essai, avait pour objectif de placer en conditions réelles sur un site de typologie urbaine, un grand nombre de systèmes capteurs différents afin d'évaluer leur aptitude à suivre les

principaux polluants d'intérêt pour l'air ambiant : le NO₂, l'O₃ et les PM_{2,5} et PM₁₀. Cet essai a regroupé 20 participants, 23 systèmes capteurs de conception et d'origines différentes (France, Pays-Bas, Royaume-Uni, Espagne, Italie, Pologne, États-Unis), soit près de 50 dispositifs au total, en comptant les répliques. Outre les performances météorologiques, établies par comparaison aux mesures d'instruments mis en œuvre dans les méthodes de référence*, une attention particulière a été portée à d'autres paramètres tels que la simplicité de mise en œuvre, l'autonomie, la portabilité, la fiabilité de communication (GSM, Wifi, Bluetooth, filaire, ...), la convivialité des applications de récupération des données en tenant compte de l'objectif recherché. Chaque système capteur fait l'objet d'une notation de 0 à 5 pour 4 critères qualitatifs (énergie, fiabilité, versatilité²⁰, mise en œuvre). et quantitatifs (variabilité, MAPE²¹, R² et pente)

En termes d'évaluation qualitative, aucun système capteur ne cumule des notes supérieures à 4 sur l'ensemble des 4 critères qualitatifs La fiabilité est le critère présentant les meilleures notes tandis que le critère de versatilité semble le moins abouti avec des notes toutes inférieures à 3,5.

En termes d'évaluation quantitative²² (NO₂ et PM_{2,5}) :

- Un seul système sur les 5 évalués obtient de bons résultats pour le NO₂ (R² > 0,75 et variabilité de 3 %) et un système est jugé d'intérêt (R² compris entre 0,5 et 0,75 et variabilité de 9%) ;
- Quatre systèmes sont jugés bons pour les PM_{2,5} (R² > 0,75) mais seuls deux présentent un intérêt, les autres présentant une variabilité trop importante.

En conclusion, même si aucun des systèmes capteurs évalués ne respecte les OQD des Directives Européennes 2008/50/CE et 2015/14/80 pour les mesures fixes en NO₂, O₃ et PM_{2,5} (OQD respectifs de 15%, 15% et 25%), certains peuvent prétendre satisfaire aux critères des méthodes indicatives proposées par le groupe de travail CEN/TC 264/WG42 travaillant sur une spécification technique portant sur « l'Évaluation des performances des systèmes de capteurs de la qualité de l'air », notamment pour PM_{2,5} (OQD de 50%) (cf. tableau 5).

4.2.2.3 Challenges AIRLAB

Depuis 2018, AIRLAB a organisé 3 « challenges micro-capteurs » visant à évaluer les performances de systèmes capteurs selon différents usages et l'évolution de ces performances au cours du temps. L'objectif est de valoriser les innovations, tout en apportant des critères d'information et de choix pour les utilisateurs en fonction de leurs besoins par rapport à ces nouvelles technologies. Le nombre de systèmes capteurs testés est présenté dans le Tableau 7.

²⁰ Ce critère rend compte de l'adaptabilité du système à toute sorte de contraintes extérieures autres que celles liées directement à la mesure du polluant ciblé.

²¹ Les systèmes présentant un critère MAPE > 100% n'ont pas été évalués. En effet, le MAPE caractérisant le pourcentage d'erreur restant après avoir appliqué le modèle linéaire obtenu, cela signifie que le modèle de régression n'est pas suffisant. De ce fait, il est inutile de considérer les valeurs de R² et de pente des droites de régression.

Tableau 7 : Synthèse des 3 éditions du Challenge AIRLAB

Challenge	Nombre de sociétés participantes	Nombre de référence systèmes capteurs	Nombre de critères d'évaluation	Nombre de polluants traités
2018	21	30	41	11
2019	25	34	44	15
2021	35	59	42	16

Chaque système capteur peut concourir pour un ou plusieurs usages répartis en 8 catégories.

- Sensibiliser à la qualité de l'air en extérieur ;
- Sensibiliser à la qualité de l'air à l'intérieur ;
- Sensibiliser à la qualité de l'air en mobilité (véhicule) ;
- Sensibiliser à la qualité de l'air rencontré au cours de vos activités journalières ;
- Documenter l'exposition individuelle à la pollution à des fins d'interprétations sanitaires ;
- Piloter et gérer l'air dans un bâtiment ;
- Surveiller la qualité de l'air extérieur ;
- Surveiller la qualité de l'air intérieur.

Les systèmes capteurs sont évalués selon 5 critères : l'exactitude de la mesure, l'ergonomie, la pertinence des polluants mesurés par rapport à l'usage, le coût et la pertinence de la solution dans la catégorie concourue (encombrement, interopérabilité, prise en main, gestion des données). Les résultats sont présentés sous forme d'un nombre d'étoiles allant de 1 (niveau le plus faible) à 5 (performance la plus élevée).

Les résultats des différentes éditions²³ montrent une amélioration globale des solutions. Les solutions les plus performantes sont les systèmes capteurs fixes et en air intérieur. Pour les technologies destinées à la mesure de polluants à des fins de surveillance réglementaire, d'évaluation de l'exposition individuelle ou en mobilité, leurs performances restent à améliorer notamment sur la qualité des mesures et le nombre de polluants suivis.

Pour la dernière édition du Challenge, 59 solutions ont été proposées par 35 entreprises. Pendant 3 mois, Airparif, en collaboration avec Atmo Hauts-de-France, a examiné ces solutions sur 42 points d'évaluation. Chaque système capteur a mesuré un ou plusieurs polluants différents. En général, la mesure du NO₂ a montré un haut niveau de performance (corrélation supérieur à 0,9 avec les mesures de référence). La mesure des particules fines PM_{2,5} était toujours plus précise que celle des PM₁₀. La mesure des COV, polluants spécifiques de l'air intérieur, a été globalement décevante. La mesure du CO₂, dans l'air intérieur, permettant d'évaluer la ventilation des locaux (et donc de faciliter la mise en place de mesures de ventilation et la lutte contre la propagation du SARS-CoV-2) a montré un haut niveau de précision.

²³ <https://www.airparif.asso.fr/actualite/2021/resultats-du-challenge-airlab-microcapteurs-2021>

En ce qui concerne spécifiquement la catégorie « Documenter l'exposition individuelle à la pollution à des fins d'interprétations sanitaires » : peu de fabricants ont présenté des systèmes capteurs (1 à 3 en fonction de l'édition).

4.2.2.4 Projets européens

Au niveau européen, le JRC évalue des éléments sensibles mis en œuvre dans des systèmes capteurs depuis la fin des années 2000. Il dispose pour cela d'un laboratoire dédié et a réalisé de nombreuses évaluations en laboratoire et sur le terrain, toujours par comparaison avec des dispositifs mis en œuvre dans des méthodes de référence*. En 2015 et 2017, le JRC a notamment publié deux articles présentant les résultats d'évaluation des performances d'une dizaine d'éléments sensibles d'O₃, de NO₂, de CO, de CO₂ et de NO en conditions contrôlées (Spinelle *et al.* 2015 et 2017). Les tests ont été menés en s'appuyant sur le protocole d'évaluation et de calibration développé par le JRC (Spinelle, 2013) dans le cadre du projet MACPoll (Metrology for Chemical Pollutants in Air), conjoint au programme européen de recherche en métrologie de l'association européenne EURAMET qui, entre autres activités, traite des systèmes capteurs de gaz à faible coût pour la surveillance de la qualité de l'air (cf. Annexe 8). Ce protocole, est le premier en 2013 en Europe à poser les bases de la mise en place d'une procédure de qualification établissant le lien entre les OQD attendus habituellement sur des dispositifs mis en œuvre dans des méthodes de référence* (Directive Européenne), et une classification en « méthode indicative » des systèmes capteurs validant certains paramètres métrologiques clefs (cf. chapitre 4.2.1).

Les qualifications sont centrées sur des éléments sensibles disponibles dans le commerce et assemblés dans un système d'acquisition unique développé spécifiquement par le JRC pour s'affranchir de l'impact de chaînes de mesure disparates chez les assembleurs utilisant ces éléments. Les paramètres évalués sont le modèle de régression (linéaire, multi linéaire ou réseau de neurones), la pente de régression, l'offset, le coefficient de régression (R²). Pour le NO₂, aucun des capteurs testés n'a donné un R² satisfaisant pour la modélisation linéaire à l'exception d'un CairClip. Avec des régressions multilinéaires, le R² peut monter à 0,75 pour les dispositifs MOX ou électrochimiques et les réseaux de neurone n'améliore les résultats que si l'on associe les données de 7 capteurs (2 MOX NO₂, 2 EC NO, 1 EC O₃, 1 EC CO + capteur HR et T). Le JRC nuance ses propos en rappelant que les conditions d'essais (site semi-rural avec des niveaux faibles) expliquent sûrement ces résultats médiocres. Les capteurs d'O₃ ont montré quant à eux une forte interférence (> 75%) avec le NO₂. Le filtre à O₃ du NO2-B43F semble être efficace au piégeage de l'O₃. La sensibilité des capteurs de CO et de NO était suffisante pour pouvoir détecter les niveaux de concentration gazeuses ambiantes attendues. Toutefois, l'interférence du NO avec le CO/MF-200 s'est avérée importante à des valeurs élevées de NO et faibles de CO. La sensibilité croisée (CO et NO sur les systèmes capteurs O₃ et NO₂ et vice-versa) a été jugée faible ou non significative pour chaque type de système capteur.

La température ne semble pas avoir d'impact sur la réponse des systèmes capteurs, quels que soit leur type.

Enfin, la bonne reproductibilité entre les systèmes capteurs d'un même type pour la majorité des effets, y compris la sensibilité à la concentration de gaz et aux variables météorologiques, avec des écarts types relatifs inférieurs à 10%, suggère qu'un étalonnage* satisfaisant des capteurs pourrait être réalisé sans qu'il soit nécessaire de procéder à une caractérisation complète de chaque système capteur. En utilisant des coefficients d'étalonnage égaux aux

moyennes des effets donnés dans ce rapport, une fonction d'étalonnage* raisonnable a pu être établie.

Le JRC continue de travailler sur des protocoles pour l'évaluation des systèmes capteurs.

Par ailleurs, un exercice conjoint d'intercomparaison **EuNetAir**²⁴ sur la qualité de l'air organisé au Portugal s'est concentré sur l'évaluation et l'appréciation de systèmes capteurs environnementaux pour les gaz, les particules et la météorologie, par rapport aux dispositifs mis en œuvre dans les méthodes de référence* de la qualité de l'air, dans le cadre d'une campagne expérimentale de surveillance de la qualité de l'air en milieu urbain.

Un laboratoire mobile a été placé sur un lieu de trafic urbain dans le centre de la ville de Aveiro pour effectuer des mesures en continu avec des dispositifs mis en œuvre dans des méthodes de référence* standard pour le CO, les NO_x, O₃, SO₂, PM₁₀, PM_{2,5}, température, humidité, vitesse et direction du vent, rayonnement solaire et précipitation. Environ 200 systèmes capteurs étaient co-localisés sur cette plateforme. Dans l'ensemble, des différences significatives ont été observées entre les différents systèmes capteurs testés. Certains étaient en bon accord avec les dispositifs mis en œuvre dans les méthodes de référence*, mais d'autres étaient en désaccord substantiel. A titre d'exemple, la gamme des corrélations (R^2) entre les différents types de systèmes capteurs et le dispositif mis en œuvre dans la méthode de référence* était de 0,12 à 0,77 pour l'O₃, de 0,53 à 0,87 pour le CO, et de 0,02 à 0,89 pour le NO₂. Pour les particules (R^2 : 0,07 - 0,36) et le SO₂ (R^2 : 0,09 - 0,20), les résultats ont montré une performance médiocre avec de faibles coefficients de corrélation entre les mesures de référence et celles du système capteur (Borrego *et al.* 2016 d'après OMM 2018). Ces résultats montrent que des systèmes capteurs mesurant le même paramètre peuvent présenter des niveaux de performance très différents par rapport à un dispositifs mis en œuvre dans une méthode de référence*, en fonction du dispositif/fabricant (OMM, 2018).

4.2.2.5 Projets Nord-américains

L'**US-EPA** a commencé à travailler sur l'évaluation de systèmes capteurs en 2013. Le site internet « Air sensor tool box »²⁵ regroupe différentes informations relatives aux performances, au fonctionnement et à l'utilisation des systèmes capteurs à destination des développeurs de technologies, des gestionnaires de la qualité de l'air, des scientifiques et du grand public, ainsi que les informations relatives aux évaluations réalisées par l'EPA. Les systèmes capteurs ont été testés en laboratoire ou *in situ* par comparaison avec des instruments de mesure mis en œuvre dans des méthodes de référence*, notamment dans le cadre du projet Cairsense (Community Air Sensor Network) visant à évaluer la performance des systèmes capteurs dans un environnement sub-urbain aux USA. L'ensemble des résultats des tests sont disponibles dans les rapports complets. Actuellement, le site répertorie les évaluations de 13 systèmes capteurs de particules et 13 systèmes capteurs de gaz (NO₂, O₃ et benzène).

L'US EPA continue de tester les systèmes capteurs dans diverses études de terrain ou de laboratoire, et les nouveaux résultats seront ajoutés à ces tableaux au fil du temps.

²⁴ Réseau européen sur les nouvelles techniques de détection pour la lutte contre la pollution atmosphérique et pour le développement durable

²⁵ <https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/evaluation-emerging-air-sensor-performance>

Aux États-Unis également, le South Coast Air Quality Management District a lancé le centre d'évaluation des performances des systèmes capteurs de la qualité de l'air en 2014 (**AQ-SPEC**)²⁶.

Le programme AQ-SPEC a pour but d'effectuer une caractérisation approfondie des systèmes capteurs à « bas coût » actuellement disponibles dans des conditions ambiantes (*in situ*) et contrôlées (en laboratoire). L'objectif est d'informer les utilisateurs sur les performances réelles des systèmes capteurs de qualité de l'air « bas coût » disponibles dans le commerce et de fournir des conseils et des précisions sur la technologie des systèmes capteurs en constante évolution et sur l'interprétation des données. Une trentaine de rapports présentant des résultats de tests sur le terrain de différents systèmes capteurs sont disponibles sur le site internet de l'AQ-SPEC. Bien que les évaluations de terrain indiquent généralement que les performances des capteurs de CO, NO et O₃ sont les plus encourageantes, les résultats de plusieurs systèmes capteurs restent imprécis du fait des interférences. Par ailleurs, les résultats concernant SO₂, H₂S et les COV n'étaient pas en accord avec ceux des instruments de mesure mis en œuvre dans les méthodes de référence*. Concernant les particules, les capteurs de PM_{2,5} présentaient en général une bonne corrélation avec les instruments de mesure mis en œuvre dans les méthodes de référence*. En revanche, pour les PM₁₀, les résultats étaient plus divergents, nécessitant un étalonnage continu des systèmes capteurs. Enfin, la conversion de la masse en nombre de particules reste problématique (d'après OMM, 2018).

4.2.2.6 Conclusions

Au-delà des projets mentionnés ci-dessus, une multitude d'évaluations indépendantes ont été conduites sur des systèmes capteurs dans des laboratoires de recherche. Une revue de la littérature publiée en 2019 par Karagulian *et al.* a estimé que 110 systèmes capteurs (ou éléments sensibles) avaient fait l'objet d'évaluations indépendantes, plus d'un millier de fois *in situ*, et un peu plus d'une centaine de fois en conditions de laboratoire (Karagulian *et al.* 2019). Les composés ciblés sont des particules (PM_{2,5}, PM₁₀) dans les deux tiers des cas, suivis par les polluants réglementés que sont le NO₂ et l'O₃ pour respectivement 15 et 10% des évaluations, et enfin dans une moindre mesure le CO et le NO. Aucune évaluation dédiée aux systèmes capteurs de COV n'est recensée. La qualité de la donnée est majoritairement évaluée sur la base de la valeur du R² par étalonnage ou comparaison à un appareil de mesure mis en œuvre dans les méthodes de référence*, sur la base de différents modèles de calibrage, les modélisations linéaires ou multilinéaires étant les plus représentées (plus de 90% dans les articles), tandis que les méthodes statistiques avancées (ANN, SVM, RF) sont en plein essor (10% d'utilisation recensée), grâce notamment à leur capacité à réduire l'effet de sensibilités croisées des systèmes capteurs de polluants gazeux. L'article propose un classement des meilleurs systèmes commerciaux, par espèce cible et au regard de leurs performances en R², pente, offset, et prix. Sur la quinzaine de systèmes capteurs retenus, seuls deux sont en *open source*²⁷, tous les autres sont des systèmes « boîtes noires ». Enfin, il semble exister une légère corrélation entre la qualité de la donnée (R² uniquement) et le coût de l'instrument.

²⁶ <http://www.aqmd.gov/aq-spec/evaluations>

²⁷ Le terme « open source » pour les systèmes capteurs englobe ici à la fois l'accès aux informations sur le matériel (conceptions mécanique et électronique, open source hardware) et sur les codes sources (open source code).

En conclusion, ce tour d'horizon des travaux d'évaluation des systèmes capteurs démontre que cette question est encore aujourd'hui en pleine évolution, au cœur des discussions des experts. Les protocoles et les critères diffèrent au sein d'un même pays, d'un pays à l'autre, d'un polluant à l'autre, et aucune solution faisant consensus n'est encore arrêtée. Même dans le cas particulier de l'évaluation des systèmes capteurs dédiés aux polluants réglementés en air extérieur, domaine qui récolte le plus d'expérimentations, le plus de recul et un référentiel sur lequel s'appuyer, il arrive fréquemment qu'un même système capteur obtienne des classements totalement différents alors même que les méthodes d'évaluation semblent converger. L'exemple du système capteur Cairpol dédié au NO₂ est caractéristique de ces écarts : plutôt moyen dans les tests du LCSQA en 2018 (7^{ème}/9 dans sa catégorie), classé entre moyen et bon selon les différentes évaluations recensées par l'US EPA ($0,42 < R^2 < 0,76$), il obtient la meilleure note pour sa précision de mesure dans la 3^{ème} édition du challenge AIRLAB en 2021.

L'universalité même d'un protocole d'évaluation est de toute façon difficile à envisager, car le niveau des performances attendues repose dans l'équilibre entre le système capteur lui-même et l'usage auquel on le destine. Des premiers protocoles génériques publiés il y a une dizaine d'années, on tend maintenant vers des protocoles différenciés selon de grandes catégories d'usage comme la qualité de l'air intérieur, l'usage en mobilité à des fins de cartographies urbaines, ou encore l'exposition individuelle, avec des critères spécifiques à chacun de ces domaines et des microenvironnements de déploiement.

Par ailleurs, chaque élément de la chaîne de mesure (élément sensible, choix de l'électronique de mise en forme du signal, filtrage, algorithme de traitement, dispositif de prélèvement de l'air) contribue à la performance globale d'un système capteur. Deux systèmes capteurs partageant le même élément de chaîne ne présenteront pas les mêmes performances. Par exemple, deux systèmes capteurs partageant le même élément sensible peuvent se retrouver aux deux extrêmes d'une évaluation en termes de performances finales.

Enfin, les résultats d'une évaluation ne garantissent pas à vie les performances d'un système capteur, il s'agit là d'un instantané de son état, à un moment particulier de son historique de fonctionnement.

4.3 Expérimentations impliquant le citoyen

Cette partie recense différentes expérimentations où les citoyens sont au cœur du dispositif de mesure avec des systèmes capteurs et dont les objectifs relèvent souvent de la sensibilisation à la pollution de l'air, voire des sciences participatives/citoyennes (Houllier, 2016). Elle s'appuie principalement sur les auditions réalisées dans le cadre de cette expertise et sur deux recensements déjà existants.

En 2017, l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (**Ademe**) a publié un rapport visant à approfondir la connaissance sur la donnée individuelle au service de l'action en faveur de la qualité de l'air extérieur et intérieur (réduction des émissions ou de l'exposition aux polluants de l'air). Ce rapport présente un recensement et une analyse des résultats d'expérimentations impliquant les citoyens dans la mesure de la qualité de l'air. Au total, 82 initiatives ont été identifiées. Toutes les initiatives permettent *a minima* d'avoir accès aux concentrations de polluants (mesurées par l'individu ou par d'autres). Un grand nombre d'entre

elles permettent de plus de visualiser les niveaux de pollution grâce à des couleurs et/ou des indices.

Par ailleurs, un certain nombre de projets francophones autour de systèmes capteurs sont également référencés sur la plateforme CASPA. Cette plateforme a été créée suite au colloque du même nom organisé en avril 2019 par l'Observatoire des Sciences de l'Univers (OSU) Ecce Terra et Sorbonne Université, dont l'objectif était de dresser un état des lieux des sciences participatives utilisant des capteurs environnementaux, à partir d'une vingtaine de projets menés au sein de la communauté francophone, sur des problématiques de qualité de l'air, de climat, de biodiversité, de bruit, de géosciences ou encore de radiation. En 2021, 25 projets étaient renseignés sur la plateforme, la plupart portant sur des problématiques liées à la qualité de l'air.

Après l'exposé de plusieurs des projets mentionnés dans ces deux ressources, qui portent principalement sur la sensibilisation, quelques plateformes de remontée et de partage de données issues de systèmes capteurs, essentielles pour la visualisation, souvent cartographique, des données par les citoyens seront présentées.

4.3.1 Utilisation de systèmes capteurs pour l'information et la sensibilisation à la pollution de l'air

Les conclusions du rapport de l'Ademe (2017) soulignent que la mesure individuelle participative a sans doute un fort potentiel pour se rendre compte des pratiques polluantes (identification des sources de pollution, alertes en cas d'émission de polluants) et peut être un des moyens clés de sensibilisation puisqu'elle va permettre à la fois une montée en compétence et *in fine* une meilleure compréhension des enjeux de la qualité de l'air. De plus, couplé aux outils de visualisation et/ou de partage tel que le smartphone et une plateforme en ligne, le système capteur devient un élément important de communication de citoyen à citoyen et un moteur pour la mise en œuvre d'actions collectives. Des champs restent cependant à explorer dont l'évaluation précise de l'évolution de comportement des individus, pour se prononcer sur l'efficacité de ces systèmes capteurs et étudier l'impact (sur le long terme) des initiatives cherchant à influencer les comportements de manière pérenne (Ademe, 2017).

En 2018, l'Ademe a souhaité poursuivre l'acquisition de connaissances dans ce domaine *via* l'appel à projet de recherche DIQACC (Données individuelles de la qualité de l'air et changement de comportements). Cinq projets ont été sélectionnés et sont en cours :

- **AccPPreca** - Apport des micro-capteurs dans les changements de comportement écoresponsables des publics précaires ;
- **CAPCI** – De la captation à la sensibilisation citoyenne : usages des micro-capteurs de particules fines et effets sur les trajectoires d'action des citoyens ;
- **Qalipso** – Analyse psycho-sociologique du comportement vis-à-vis de la qualité de l'air intérieur des occupants de logements individuels ;
- **ALLO** – Accompagner les habitants pour l'intégration de la qualité de l'air dans leur logement ;
- **AIRACTIVE** – Application et formation à la qualité de l'air : leviers pour le changement de comportement ?

A l'occasion de la consultation internationale et des auditions conduites dans la présente expertise, plusieurs projets récents de sensibilisation à la pollution de l'air ont été identifiés (certains de ces projets ont été analysés dans le rapport Ademe pré-cité).

Des projets impliquant Airparif :

- Le projet « **C'est notre air** » mené à l'initiative d'Airparif, de la DRIEE, de l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE), des académies de Versailles, Paris et Créteil et l'association Monde Pluriel en partenariat avec l'organisation des Nations Unies ONU-Environnement. Il est proposé, aux enseignants d'Ile de France et de tous les pays francophones, un outil pédagogique opérationnel et complet pour travailler sur la qualité de l'air avec des jeunes. Une action de ce projet vise en particulier à « étudier, fabriquer et programmer un capteur avec les élèves » et à « effectuer des mesures de qualité de l'air sur son territoire » (partie 2 de l'outil « enquêter sur son territoire »). Cette initiative fait suite au projet « Lycéens, collégiens, prenons notre air en main » dans lequel 800 jeunes de 23 établissements ont pu réaliser des mesures de qualité de l'air grâce à 50 systèmes capteurs prêtés par Airparif (2017-2018) ;
- Le projet « **Respirons mieux dans le 20^{ème}** » porté par la Mairie de Paris, la mairie du 20^{ème} arrondissement de Paris, Airparif et le collectif AirCitizen. Il a pour objectif de renforcer la participation citoyenne, à travers l'accès à une information personnalisée et ciblée sur la qualité de l'air. Ce projet vise à sensibiliser les participants volontaires aux solutions pour limiter leur exposition à la pollution et améliorer la qualité de l'air. A l'issue du projet, Airparif souhaite pouvoir évaluer l'effet de la diffusion de ces informations sur les comportements des citoyens.

Des projets impliquant Atmo Grand Est :

- Le projet **Casp'Air** financé par l'Ademe, mené par le Grand Nancy en partenariat avec Atmo Grand Est, l'Agence Locale de l'énergie et du climat Nancy Grands Territoire et l'Université de Lorraine. Il avait pour objectifs de sensibiliser les citoyens à la qualité de l'air et aux bonnes pratiques et de déterminer dans quelle mesure les systèmes capteurs peuvent influencer les comportements en ce qui concerne la qualité de l'air ;
- Le projet **Vision'air** avait pour objectif de sensibiliser les citoyens aux enjeux de la qualité de l'air en rendant « visible » la pollution atmosphérique mais aussi de rendre les citoyens attentifs à l'interprétation des données obtenues avec un système capteur selon le contexte et l'appareil. L'Eurométropole de Strasbourg et la ville de Kehl (Allemagne) étaient engagés dans le choix des volontaires et la communication du projet Vision'air, intégré dans le large programme européen Atmo-Vision impliquant de nombreux partenaires.

D'autres projets impliquant les citoyens dans la surveillance de la qualité de l'air sont en cours auprès d'Atmo Grand Est.

Des projets impliquant Atmo Aura :

- Le projet **Mobicit'air**, 2016-2018, est un des premiers projets en France menés par une AASQA sur l'utilisation des systèmes capteurs par des citoyens. Il visait à expérimenter ce dispositif à Grenoble et à en évaluer l'impact sur le changement de comportement ;
- Dans la suite de Mobicit'air, la **Captothèque**²⁸ est un service de mesure citoyenne de la qualité de l'air géré par Atmo Aura. Il permet aux citoyens d'explorer la qualité de l'air *via* le prêt gratuit de systèmes capteurs (portables et fixes) et le partage des données sur une plateforme de visualisation des données et d'échanges entre

²⁸ <https://captotheque.fr>

participants. À titre informatif, en septembre 2021, 2626 personnes avaient contribué à la Captothèque® ;

- Le projet **CHECKBOX**, s'inscrivant dans la Captothèque®, vise à étudier comment les systèmes capteurs connectés peuvent faciliter la compréhension de l'environnement et les changements d'usages au quotidien, en axant sur la thématique du chauffage au bois et sur les territoires de Grenoble-Alpes Métropole et de la Communauté d'Agglomération Annonay Rhône-Agglomération ;
- Le projet européen **BB Clean** qui vise à mieux comprendre les conséquences du chauffage au bois sur la pollution de l'air, cette fois-ci dans les vallées alpines. En France, la communauté de communes Pays du Mont-Blanc (CCPMB) était le territoire pilote des mesures participatives du projet. Au cours de l'hiver 2019, des systèmes capteurs de particules fines ont été confiés aux citoyens de la vallée de l'Arve, avec un accompagnement technique et sociologique des participants. Chacun pouvait ainsi explorer librement son environnement atmosphérique, développer sa connaissance et partager ses découvertes.

Ambassad'air est une initiative portée par la Ville de Rennes et la Maison de la consommation et de l'environnement (en lien avec d'autres acteurs associatifs et citoyens), qui propose depuis 2016 à des habitants de s'informer sur la qualité de l'air *via* la mise à disposition de systèmes capteurs (particules fines en air extérieur ; CO₂ et radon en air intérieur), des animations autour des mesures et la rencontre avec des experts. La démarche ouverte est très documentée sur un site web et wiki²⁹.

Par ailleurs, des ateliers de sensibilisation des citoyens aux mesures de qualité de l'air sont également organisés par le collectif **AirCitizen**³⁰. Les ateliers consacrés à la fabrication de dispositifs de mesure permettent d'aborder avec les citoyens des notions relatives à la pollution de l'air (émissions, dispersion des polluants, enjeux sanitaires, perception de la pollution) et à sa mesure (systèmes capteurs). D'autres ateliers s'intéressent aux représentations sensibles de l'espace urbain (balade sensible) et à la question de la réception de l'information de qualité de l'air par le participant, à sa ré-appropriation *via* des ateliers de data tangibles. D'autres projets proches d'AirCitizen sont conduits en Europe (CitizenSense, SmartCitizen...).

L'association **Respire** et la FNE ont également indiqué lors de leur audition par le groupe de travail utiliser principalement les systèmes capteurs à des fins de sensibilisation de la population à la pollution de l'air, à l'occasion par exemple de « balades citoyennes ». L'**APPA** mène également un projet sur l'usage des systèmes capteurs comme outil de sensibilisation pour une population vulnérable sur le plan socio-économique.

4.3.2 Plateformes de visualisation et de partage de données issues de systèmes capteurs

Dans la plupart des projets, le citoyen peut visualiser ses propres données sous forme de carte géographique et/ou de graphiques temporels. Des plateformes ouvertes, souvent associées à un système capteur « open hardware / open source », offrent des visualisations à tous, voire un téléchargement des données. Des distributeurs/fabricants de systèmes capteurs proposent également leurs propres plateformes de visualisation de données de qualité de l'air, souvent d'accès restreint aux acheteurs des systèmes capteurs. De nombreuses plateformes *open*

²⁹ [Ambassad'Air — WikiRennes \(wiki-rennes.fr\)](https://wiki-rennes.fr)

³⁰ <http://aircitizen.org/>

source de visualisation de données environnementales issues de systèmes capteurs existent. Dans le cadre de cette expertise, une audition de l'IRSN a été conduite pour collecter des informations et avoir un retour d'expérience sur le projet « OpenRadiation » qui vise à centraliser des mesures de la radioactivité dans l'environnement réalisées par des citoyens à l'aide de systèmes capteurs (dosimètres), tant en France que dans le monde entier pour les rendre visibles à tous au travers d'une cartographie dynamique.

4.3.2.1.1 Open radiation

Le projet OpenRadiation³¹ est un projet de science participative né en 2013 après avoir observé un développement très rapide d'applications « grand public » pour réaliser des mesures géolocalisées de la radioactivité sur le terrain au Japon après l'accident de Fukushima (mars 2011), dont la plus connue est « Safecast³² ». Openradiation, mis en service en 2017, est pensé pour être utile en situation normale et en situation de crise.

En situation normale, OpenRadiation a pour intérêts de : permettre au public de s'approprier la mesure de radioactivité, intégrer ce système dans une démarche pédagogique et éducative (lycée), compléter les données existantes (bruit de fond radiologique, rayonnement cosmique), contribuer au rôle de « vigie » pour la détection de situations anormales.

En situation de crise, OpenRadiation a pour intérêts de : recueillir des mesures effectuées par le public sur le terrain en « temps réel », anticiper la remontée de données en masse et leur utilisation (permet de caler des données de modélisation), offrir la possibilité au public de contribuer à fournir des données utiles à la gestion d'une situation radiologique.

OpenRadiation fonctionne à l'aide d'un dosimètre et d'un site web. Le dosimètre est un système capteur connecté, couplé à une application smartphone pour réaliser/transmettre les mesures. Le capteur fait la mesure et l'intelligence se fait dans le smartphone (géolocalisation, la conversion en microsievert est faite dans l'application). A l'heure actuelle, 6 modèles de systèmes capteurs sont connectables à l'application, dont celui développé par les partenaires du projet sous forme de kit (Do it Yourself). Le site web permet de centraliser/visualiser les données venant de différents dosimètres, une cartographie représentant les données brutes ou filtrées, des espaces d'échange autour des mesures et des projets. La base de données est en open-data.

En 2020, 130 000 mesures avaient été réalisées par environ 90 contributeurs.

4.3.2.1.2 Sensor.Community

Sensor.Community³³ (ex Luftdaten) est un projet initié en 2016 par le OK Lab de Stuttgart, qui s'appuie sur un réseau global de systèmes capteurs mis en œuvre par des contributeurs bénévoles pour créer des données environnementales (PM₁₀, PM_{2,5}, température, humidité, bruit). Il s'agit d'un projet en *open hardware*, *open source* et en *open data* visant à sensibiliser

³¹ <https://www.openradiation.org/>

³² Le projet Safecast a été initié après l'accident nucléaire de Fukushima au Japon en 2011 afin de développer des capteurs de mesure du taux de radiation nucléaire et de permettre aux citoyens d'effectuer eux-mêmes les mesures et de les partager. Le projet s'est étendu à la qualité de l'air, via le développement de capteurs dédiés, afin de continuer à permettre aux citoyens la mesure de leur environnement. De plus, l'un des principaux buts du projet est d'augmenter le maillage de surveillance de la qualité de l'air en effectuant des mesures (à partir de capteurs fixes performants) à l'échelle de la rue (Ademe, 2017).

³³ <https://sensor.community/fr/>

et promouvoir l'intérêt du grand public aux problématiques environnementales, notamment de qualité de l'air.

Le système capteur utilisé pour la mesure des particules, en position fixe et à l'extérieur, est proposé en kit, avec un guide d'accompagnement pour son montage et son installation. Un deuxième capteur permettant la mesure de la température et de l'humidité, optionnel, y est généralement associé pour la validation des mesures. Depuis peu, Sensor.Community propose également un élément du système capteur pour la mesure du bruit, également en kit.

Une interface permet aux usagers de remonter, partager et visualiser les données sous forme de cartes et de graphiques temporels illustrant les variations des concentrations mesurées sur 24h.

À titre informatif, en août 2021, la plateforme recensait 13 500 systèmes capteurs en activité dans 69 pays, principalement en Europe et particulièrement en Allemagne. Le système capteur et la plateforme de Sensor.Community sont utilisés dans plusieurs projets/associations cités (Ambassad'air, AirCitizen, Respire...).

4.3.2.1.3 AirCasting

La plateforme AirCasting a été lancée en 2011 par l'ONG Nord-américaine HabitatMap³⁴. Le but du projet est de donner aux individus ou groupes d'individus la possibilité de collecter, montrer et partager des données de qualité de l'air, grâce à un système capteur mobile, une application smartphone et un site web (d'après Ademe, 2017). Historiquement, HabitatMap proposait un système capteur sous forme de kit à monter soi-même pour la mesure des particules, du NO₂ et du CO. Depuis, 2015, HabitatMap fabrique et commercialise le système capteur Airbeam (Airbeam 1 en 2015, Airbeam 2 en 2018 et Airbeam 3 en 2021) qui permet de mesurer les particules (PM₁, PM_{2,5} et PM₁₀). Les informations sur le contenu du système capteur sont explicitées. Les mesures sont partagées avec les autres utilisateurs sur une carte interactive en ligne, et sur l'application smartphone ou web. HabitatMap permet aux individus et organisations de créer leurs propres initiatives à partir des systèmes capteurs Airbeam et de la plateforme AirCasting. De nombreux projets cités précédemment ont utilisé le système capteur Airbeam et la plateforme de AirCasting : Ambassad'air, Mobicit'air et la Captothèque, Casp'air, Respirons mieux dans le 20^{ème}, etc. Avec des milliers de systèmes capteurs Airbeam utilisés à travers le monde, AirCasting se revendique être l'une des plus importantes plateformes en *open source* de données de qualité de l'air générées par des citoyens.

4.3.2.1.4 Autres projets

Deux autres projets permettent également aux citoyens de remonter et partager leurs données de mesures à l'aide de systèmes capteurs « *do it yourself* » ou « *open source* » sur des plateformes interactives :

- Le projet sensBox permettant de remonter/partager des données sur la plateforme opensensemap³⁵. A noter que cette plateforme reprend, en plus de ses propres données, les données de Sensor.Community ;
- Le projet Smartcitizen³⁶, initié par le Fablab de Barcelone, commercialise un système capteur fixe pour la mesure de polluants de l'air (PM₁, PM_{2,5}, PM₁₀, CO₂, COV totaux)

³⁴ <https://www.habitatmap.org>

³⁵ <https://opensensemap.org/>

³⁶ <https://smartcitizen.me/kits/>

et de paramètres environnementaux (humidité, température, pression atmosphérique, luminosité, bruit). La plateforme de visualisation répertorie l'ensemble des systèmes capteurs, même ceux qui ne sont plus en activité depuis longtemps.

Enfin, notons que l'ouverture des données de ces projets offre à d'autres plateformes la possibilité de récupérer et d'afficher des données provenant de plusieurs sources : opensensemap avec les données de Sensor.Community ou encore le site du World Air Quality Index project³⁷ qui agrège les données des stations de référence et de Sensor.Community.

4.3.2.2 Plateformes de visualisation des données opérées par des fabricants/distributeurs de systèmes capteurs

Au-delà de ces projets en open source, des fabricants/distributeurs de systèmes capteurs proposent également des applications permettant aux utilisateurs de remonter et visualiser leurs données. Certaines applications sont réservées à l'utilisateur, qui peut visualiser ses propres données mais pas les partager (e.g. Application Rubix). Dans d'autres cas, l'utilisateur peut accepter de partager ses données sur des plateformes accessibles pour un large public. Ces plateformes indiquent collecter et agréger à la fois des données de systèmes capteurs, des données issues de stations de surveillance de la qualité de l'air et des données de modélisation. Cependant, les plateformes ne permettent pas de faire la part entre les données générées par les stations de mesures de référence ou de modélisation des données issues des systèmes capteurs.

Parmi les plateformes les plus connues citons Airvisual d'IQAir³⁸ ou Flowfleets de Plumelabs³⁹.

³⁷ <http://aqicn.org/map>

³⁸ <https://www.iqair.com/fr/france>

³⁹ <https://air.plumelabs.com/fr/>

5 Cas particulier des systèmes capteurs de CO₂ pour des usages préventifs

En raison des préconisations de mesures de CO₂ dans les espaces intérieurs publics comme moyen de lutte contre la propagation de la Covid-19, et de la diversité des matériels disponibles dans le commerce, le groupe de travail a estimé nécessaire de faire un focus particulier sur les systèmes capteurs destinés à cet usage.

L'usage de CO₂ comme indicateur de pollution de l'air intérieur remonte à la deuxième partie du 18^{ème} siècle (Sundell, 2004). Suite aux travaux notamment de Lavoisier sur le métabolisme humain, la consommation d'oxygène et la production de CO₂ lors de la respiration, la concentration de CO₂ fut alors considérée comme une mesure de l'air vicié. Pettenkofer au milieu du 19^{ème} siècle, montra que le ressenti d'un air vicié n'était pas dû à la température, à l'humidité, au taux de CO₂ ou à celui de l'oxygène, mais à la présence de composés organiques émis à l'état de traces et perçus par la peau et la respiration. Pettenkofer proposa les valeurs de 1000 ppm de CO₂ comme limite indicatrice d'une bonne ventilation d'une pièce, et de 700 ppm pour une chambre à coucher (d'après Beck, 2007). Yaglou en 1936 montra de plus que CO₂ était également un indicateur des odeurs corporelles, et proposa des valeurs pour l'apport d'air frais pour maintenir une qualité de l'air intérieur acceptable (Yaglou, 1936). Il convient néanmoins de préciser que ces travaux ne considèrent que les émissions biogéniques dans la pièce considérée, et non celles liées à d'autres sources liées par exemple à la structure ou l'aménagement du bâtiment, à la combustion ou à autres activités générant du CO₂. Par ailleurs, ces valeurs ne tiennent pas compte des variations potentielles (et réelles) de la concentration de CO₂ à l'extérieur. Il a été montré que le CO₂ est corrélé avec certains polluants de l'air, dans les habitations et les écoles, mais pas avec tous, et que limiter les teneurs en CO₂ en air intérieur n'est pas suffisant pour assurer une bonne qualité de l'air (Ramalho *et al.* 2015).

Les mesures réalisées sur le terrain depuis les années 1980 ont mis en évidence que ces valeurs étaient souvent largement dépassées, notamment dans les habitations et les écoles, avec des concentrations de CO₂ atteignant parfois 4000 ou 5000 ppm.

Des pays et organismes internationaux ont émis au fil des années des recommandations, et proposé des valeurs-guides et/ou des valeurs contraignantes pour différents environnements (bâtiments scolaires, bureaux, habitat...). Ces concentrations sont relatives ou bien absolues, avec des valeurs variant de 500 ppm (Belgique, région flamande, 2004) à 1500 ppm (Royaume-Uni sur une journée, Allemagne, Autriche), ou bien considèrent l'écart entre la concentration mesurée à l'intérieur et la concentration à l'extérieur d'un bâtiment (norme EN 16798-1, 2020, premier seuil à $\Delta\text{CO}_2 = 550$ ppm).

En France, l'Anses a recommandé de ne pas établir de Valeur Guide de la qualité de l'Air Intérieur (VGAI) pour le CO₂, que ce soit pour ses effets propres ou pour les effets du confinement sur la santé (Anses, 2013). Mais l'Anses avait souligné l'intérêt d'utiliser le CO₂ en tant qu'indicateur de confinement. Par ailleurs, un indice de confinement, ICONÉ, a été développé, qui est calculé à partir de la distribution en fréquence des concentrations de CO₂ dans une pièce pendant une semaine. Cet indice permet de qualifier le niveau de confinement d'un environnement intérieur, et varie de 0 (confinement nul) à 5 (confinement extrême)

(Canha *et al.* 2016). Le HCSP⁴⁰ a formulé plusieurs recommandations relatives à l'aération et la ventilation des établissements recevant du public (ERP) dans le contexte de la pandémie de la Covid-19. La mesure de la concentration en CO₂ est préconisée pour approcher le taux de renouvellement d'air avec un seuil de 800 ppm

Avec l'existence de ces normes et recommandations, et la sensibilisation montante des personnes à la qualité de l'air intérieur, on a vu apparaître sur le marché des produits, à base de systèmes capteurs, avec des campagnes de publicité vers le grand public mettant en avant le lien entre CO₂, qualité de l'air, et santé ou performances intellectuelles par exemple.

La crise sanitaire liée à la Covid-19 a vu se renforcer la prise de conscience de l'importance de la qualité de l'air intérieur, et par suite de la ventilation, par les professionnels de santé, les autorités publiques, et le grand public. En France, ceci a abouti par exemple à des circulaires ministérielles préconisant ou imposant la mesure de CO₂ dans l'air intérieur des espaces publics. Par exemple, le Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation (MESRI) a publié une circulaire⁴¹ incitant à mesurer le CO₂ dans les locaux : « Une mesure de CO₂ supérieure à un seuil de 800 ppm doit conduire à agir en termes d'aération/renouvellement d'air et/ou de réduction du nombre de personnes admises dans la pièce. Au-delà de 1000 ppm, l'évacuation du local doit être proposée le temps d'une aération suffisante pour retrouver des niveaux de CO₂ inférieurs à 800 ppm. La mesure du CO₂ dans l'air doit être effectuée à des endroits significatifs de la fréquentation et à des périodes de réelle fréquentation chargée. ». Nombre d'établissements d'enseignement ou de gestionnaires de structure se sont donc équipés en systèmes capteurs pour mettre en application cette circulaire. Ceci a donc renforcé l'offre de systèmes pour la mesure du CO₂, chiffrée ou indicative (affichage vert/jaune/rouge), systèmes qui ne présentent pas toujours les caractéristiques souhaitables d'un point de vue métrologique, à commencer par la justesse de la mesure, son principe physique, les seuils utilisés pour l'affichage du niveau de qualité de l'air, ni d'un point de vue pratique, comme une autonomie limitée ou une ergonomie discutable, notamment avec l'absence de connectivité permettant de récupérer les données.

En résumé, le CO₂ est un bon indicateur du confinement de l'air mais n'est pas un indicateur de la qualité de l'air intérieur. La mesure du CO₂ pour assurer une relative bonne qualité de l'air peut être effectuée grâce à des systèmes capteurs actuellement commercialisés, mais la sélection d'un tel instrument doit être faite avec précaution. De manière générale, comme cela a été souligné dans les différents travaux d'évaluation des systèmes capteurs présentés dans le chapitre 4.2, la sélection et l'évaluation des systèmes capteurs est à faire avec précaution au regard des technologies utilisées pour fournir une information fiable sur la concentration de CO₂ dans l'air.

⁴⁰ Haut Conseil de la santé publique. Avis du 28 avril 2021 relatif à l'adaptation des mesures d'aération, de ventilation et de mesure du dioxyde de carbone (CO₂) dans les établissements recevant du public (ERP) pour maîtriser la transmission du SARS-CoV-2. <https://www.hcsp.fr/Explore.cgi/avisrapportsdomaine?clefr=1009>

⁴¹ <https://services.dgesip.fr/fichiers/CirculaireAssouplissementsEnseignements18mai21.pdf>

6 Projets portant sur l'utilisation de systèmes capteurs pour évaluer l'exposition

6.1 Rappel des méthodes d'évaluation de l'exposition à la pollution de l'air, apports et limites des systèmes capteurs

6.1.1 Rappel des méthodes d'évaluation de l'exposition à la pollution de l'air

L'exposition est définie par l'OMS comme le contact entre un agent chimique, physique, ou biologique et une cible, qui peut être un organe, un individu ou une population. L'exposition met ainsi en jeu une quantité ou une concentration en contaminant, une surface d'exposition qui peut être externe ou interne, et une durée d'exposition. L'exposition peut être continue ou discontinue, auquel cas il convient de considérer également la fréquence d'exposition. Selon la durée et l'intensité d'exposition, on peut distinguer des expositions dites aiguës, sub-chroniques et chroniques. De façon consensuelle, ces termes sont respectivement employés pour qualifier des expositions inférieures à plusieurs jours, de quelques semaines à plusieurs mois, et de plusieurs mois à plusieurs années.

Les concentrations en polluant peuvent être décrites en termes de niveaux moyens (le plus fréquent), de niveaux maximums et de variations de niveaux ; des pics d'exposition peuvent être aussi qualifiés et quantifiés.

La variabilité spatio-temporelle de la pollution de l'air est forte, à la fois en termes de nature des polluants et de concentrations rencontrées. L'exposition des individus (ou exposition individuelle) est dépendante des sources d'émission et de leur intensité, ainsi que des durées passées et activités effectuées dans les environnements fréquentés (i.e. microenvironnements). L'évaluation de l'exposition individuelle à la pollution de l'air suppose donc « l'intégration spatio-temporelle » des niveaux de concentration en polluants dans les différents microenvironnements (= lieux) fréquentés, et la connaissance des durées passées dans chacun de ces microenvironnements, en distinguant notamment la pollution de l'air en extérieur et celle en intérieur (logements, lieux de travail, établissements recevant du public, transports, etc.) (cf. figure 8).

Pour un polluant p , l'exposition individuelle est déterminée à partir de la formule suivante :

$$E_p = \sum C_k \times T_k$$

avec E_p , le niveau d'exposition à un polluant p (en unité de concentration - $\mu\text{g}/\text{m}^3$), C_k , la concentration en polluant dans le microenvironnement k (en unité de concentration - $\mu\text{g}/\text{m}^3$), et T_k , la fraction de temps passé dans le microenvironnement k (sans unité).

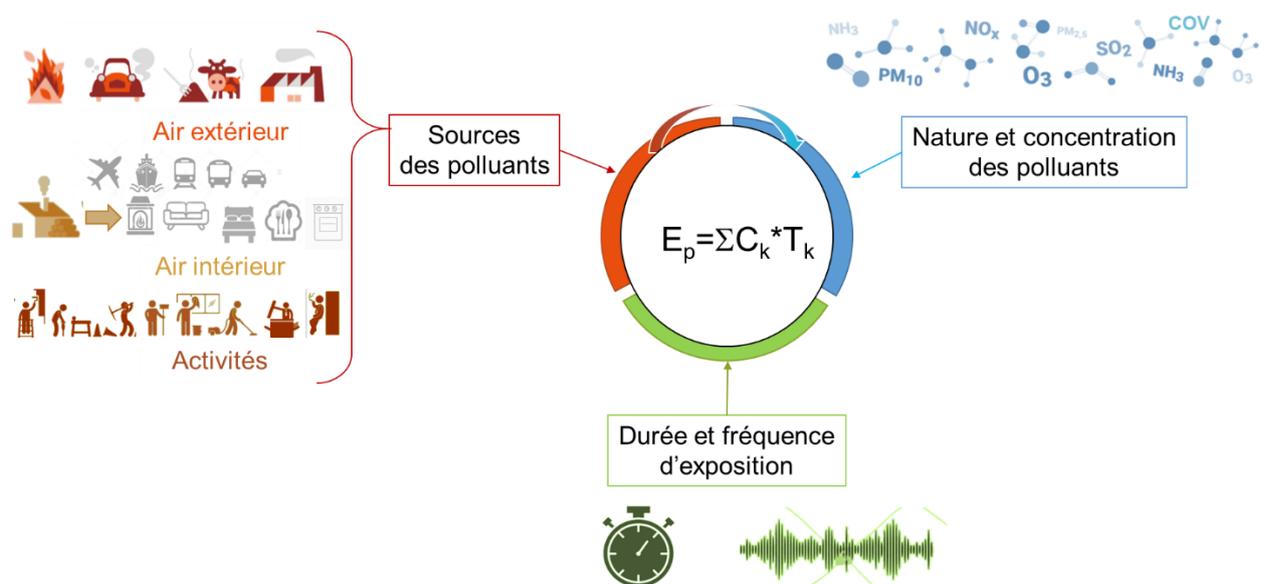


Figure 7 : Exposition à la pollution de l'air : schéma conceptuel

Deux méthodes⁴² permettent d'estimer les concentrations en polluants dans l'air, à partir desquelles sera estimée l'exposition :

- La mesure, qui peut se décliner **en deux approches décrites ci-dessous** s'appuyant sur des dispositifs de mesures fixes ou portatifs ;
- La modélisation « prédictive », avec différents types de modèles de pollution de l'air non détaillés dans ce rapport (Lepeule *et al.* 2010 ; Yarza *et al.* 2020).

Ces méthodes et approches peuvent être utilisées de façon indépendante ou combinée.

En théorie, l'exposition individuelle s'évalue préférentiellement avec des dispositifs de mesure portatifs, qui permettent d'intégrer directement les différents microenvironnements fréquentés par un individu. L'exposition individuelle peut également être évaluée sur la base de données de concentrations générées par des dispositifs de mesure fixes ou de modélisation, et en les combinant avec des informations sur le temps passé par les individus dans les microenvironnements étudiés. Jusqu'à présent, l'évaluation de l'exposition à la pollution de l'air s'appuie principalement sur cette deuxième approche.

Dans la première approche utilisant des dispositifs de mesure portatifs, la mesure de l'exposition individuelle correspond à la mesure de la concentration en polluant pendant la durée du port de l'appareil. La caractérisation de l'exposition individuelle est généralement complétée de données issues de GPS, d'accéléromètres et de questionnaires. Le recours à un GPS, permettant la géolocalisation spatio-temporelle de l'individu, et à un accéléromètre, permettant d'estimer le niveau d'activité physique, facilitent l'identification et la caractérisation des microenvironnements fréquentés et des activités qui y sont pratiquées. Les questionnaires peuvent viser à décrire les cadres de vie des individus ou à caractériser leurs budgets espace-temps-activité (BETA). Un questionnaire « cadre de vie » est utile à l'identification des sources d'émission contribuant à l'exposition au(x) polluant(s) d'intérêt à partir d'informations telles que la localisation et les caractéristiques des lieux de vie, de travail, d'études et d'activités ainsi que les moyens de transport utilisés. Un questionnaire BETA permet au sujet, tel un journal de bord, d'y renseigner sa mobilité spatio-temporelle et de décrire les microenvironnements

⁴² La biométrie est une autre méthode d'évaluation de l'exposition. Cette méthode n'est pas développée dans ce rapport car elle ne fait pas intervenir de systèmes capteurs.

occupés et les activités réalisées. La fastidiosité de la réponse à ce questionnaire peut engendrer des informations partielles ou imprécises, qui demeurent néanmoins primordiales pour certaines interprétations des résultats des mesures (e.g., comparaison des niveaux d'exposition entre des microenvironnements, des activités ou des modes de transport différents), car ces résultats sont souvent intégrés sur plusieurs heures durant lesquelles les individus ont changé de lieu et/ou d'activité (Ambroise, 2005). Par ailleurs, la contrainte liée au port du dispositif de mesures peut induire des changements de comportement faussant l'estimation de l'exposition. Malgré cela, l'utilisation de dispositifs de mesure portatifs est considérée comme la méthode la plus précise d'évaluation de l'exposition individuelle puisqu'elle permet de disposer de données dans l'environnement proche de l'individu, et intègre les conditions d'exposition propres à chaque individu et les différents microenvironnements traversés. Cependant, cette approche nécessite une bonne observance de la part des individus et il apparaît difficile de faire porter à des individus des dispositifs de mesure sur le long terme.

La deuxième approche de mesure s'appuyant sur des dispositifs fixes nécessite de disposer d'informations sur les microenvironnements et durées de fréquentation par l'individu. L'utilisation de dispositifs de mesure fixes présente également des intérêts (elle permet par exemple de mieux caractériser un microenvironnement) mais suppose de nombreuses hypothèses et approximations pour évaluer l'exposition individuelle. En effet, une évaluation précise de l'exposition individuelle par cette approche est difficile car elle nécessite que tous les lieux fréquentés par un individu pendant la fenêtre de temps étudiée soient renseignés de façon exhaustive et précise en termes de concentrations en polluants et de temps passé. De façon pratique, il apparaît impossible de prendre en compte l'ensemble des lieux traversés par un individu, et ceux-ci sont généralement regroupés et analysés par types de microenvironnement (e.g., ambiances extérieures, pièces de l'habitat, modes de transport, lieux spécifiques d'activité). De plus, cette approche suppose que les concentrations mesurées en des lieux fixes soient homogènes dans le microenvironnement considéré. Enfin, en ne tenant pas compte des expositions propres à chaque individu, cette approche tendrait à sous-estimer l'exposition individuelle puisqu'elle tend à lisser la dynamique de la variabilité des concentrations et expositions et augmente les incertitudes liées à leur estimation.

6.1.2 Evaluation de la dose inhalée

Les approches décrites précédemment permettent d'évaluer l'exposition « externe » de l'individu à la pollution de l'air. Une fois que le polluant pénètre à l'intérieur de l'organisme, on parle de dose inhalée qui est définie comme la quantité de polluant ayant atteint le système respiratoire de l'individu. Elle est dépendante du volume d'air pénétrant dans les poumons pendant le temps d'exposition, c'est-à-dire de la fréquence respiratoire. La dose biologiquement efficace désigne quant à elle la dose susceptible de provoquer un effet sanitaire. Cette mise en relation entre un polluant et un risque potentiel pour la santé suppose que le contaminant peut atteindre et traverser la barrière d'échange entre l'environnement et le corps humain. L'évaluation de la dose inhalée nécessite de prendre en compte également la fréquence respiratoire. Dans ce cas, les dispositifs portatifs de mesure de polluant peuvent être combinés à des dispositifs permettant un suivi de la fréquence respiratoire (approchée par un suivi de la fréquence cardiaque) et ce, simultanément à l'exposition, afin d'estimer plus précisément la dose inhalée. Néanmoins, cette méthode implique le port d'un appareil supplémentaire, peu ergonomique (particulièrement la ceinture thoracique) et des dispositions éthiques liées au recueil de données de santé (déclarations auprès du Comité de Protection

des Personnes (CPP et autorisation de la CNIL)) ; ces contraintes peuvent ainsi limiter son applicabilité. Il convient de noter cependant que les études se limitent généralement à l'évaluation de l'exposition « externe » sans aller jusqu'au calcul de la dose inhalée ou de la dose biologiquement efficace.

6.1.3 Apports et limites des systèmes capteurs pour l'évaluation de l'exposition

Les systèmes capteurs offrent de nombreuses opportunités dans le domaine de l'évaluation de l'exposition, qu'il s'agisse de systèmes capteurs fixes ou portatifs. Par ailleurs, les données générées par les systèmes capteurs peuvent également permettre d'améliorer les cartographies et les modèles utilisés sur de larges échelles. Ces cartographies et modèles peuvent être utilisés pour évaluer l'exposition.

Ces opportunités sont principalement liées à la miniaturisation des dispositifs, à leurs coûts réduits permettant ou offrant notamment :

- L'augmentation substantielle du nombre de mesures et l'amélioration de la couverture spatio-temporelle : augmentation du nombre de participants équipés de systèmes capteurs portatifs, du nombre de points de mesure dans un microenvironnement et/ou du nombre de microenvironnements instrumentés, notamment dans des lieux peu ou pas étudiés. Cette multiplication du nombre de systèmes capteurs portés par un individu ou déposés dans un microenvironnement permet de mesurer différents polluants ;
- Pour les systèmes capteurs portatifs : une meilleure observance du port des systèmes capteurs, plus légers et plus ergonomiques. Ces dernières années, les améliorations des systèmes capteurs ont porté sur leur autonomie, leur design et leur ergonomie, avec une utilisation facilitée et confortable (confort acoustique par exemple) et donc potentiellement mieux acceptée ;
- Une plus haute résolution temporelle permettant, par exemple, une étude fine des différents microenvironnements contribuant à l'exposition totale d'un individu.

Le tableau 7 liste les intérêts des systèmes capteurs en termes d'opportunités offertes : pour un individu, la population générale, les politiques publiques, les organismes de recherche et les associations/collectifs.

Les avantages listés sont liés :

- Aux propriétés des systèmes capteurs (mise en œuvre, coût, acquisition) (P) ;
- A la possibilité de multiplier les systèmes capteurs (M) ;
- A des analyses spécifiques (A) ;
- Autres (O).

Tableau 8 : Intérêts des systèmes capteurs

Avantages	Exemple	Opportunités offertes		
		Individu / Population générale	Politiques publiques / Associations / Collectifs	Organismes de recherche
P- Facilité de mise en œuvre	Encombrement, autonomie, portabilité, immédiateté	X		X
M- Déploiement d'un réseau	Cartographie, identification de sources			X
P- Faible coût du matériel		X		X
P- Facilité d'acquisition du matériel	Vente en ligne	X		X
O- Accessibilité pour des pays/zones qui n'ont pas de réseaux de stations de référence		X		X
M- Possibilité d'attribuer les mesures à différents microenvironnements (Géolocalisation)	Changement de microenvironnements en mobilité	X		X
M- Possibilité d'investigation d'environnements multiples	Comparaison d'environnement, Impact d'un mode de transport ou modalités de transports (fenêtre ouverte ou pas, etc.), d'un aménagement Identification des sources	X		X
M- Prise en compte variabilité spatio-temporelle	Appréciation plus précise du BET. saisonnalité	X		X

Avantages	Exemple	Opportunités offertes		
		Individu / Population générale	Politiques publiques / Associations / Collectifs	Organismes de recherche
O- Possibilité d'asservissement	gestion bâtiment : aération	X		
A- Traitement de la donnée dynamique	Étude de la variation fine (dynamique spatiale ou temporelle) d'un phénomène			X
M- Possibilité de participer aux études citoyennes		X	X	
A- Opportunité de mener des études ciblées : population particulière, environnement particulier, période particulière, etc.	Études épidémiologiques		X	
M- Facilitation de déploiement de capteurs dans les études scientifiques du fait de l'essor du marché des systèmes capteurs et intérêt croissant de la population générale sur problématique qualité de l'air			X	
O- Possibilité de lutter contre des idées reçues sur les expositions, meilleure compréhension/sensibilisation des phénomènes de pollution		X	X	

Les principales limites des systèmes capteurs sont liées à la qualité et à la fiabilité de la mesure. En 2018, l'OMM estimait que les systèmes capteurs avaient une capacité limitée à mesurer précisément l'exposition individuelle et à fournir des données sur les microenvironnements fréquentés, considérant que les systèmes capteurs n'étaient pas suffisamment précis pour fournir de telles mesures et que leur utilisation pouvait conduire à des sur- ou sous-estimations des concentrations. Cependant, ces systèmes capteurs peuvent servir à identifier des « hot spots » (lieux présentant des concentrations élevées) nécessitant des investigations complémentaires à l'aide d'instruments de mesure mis en œuvre dans les méthodes de référence* (OMM, 2018). Bien que de nettes améliorations aient été constatées, les performances des systèmes capteurs demeurent inférieures à celles des instruments de mesure mis en œuvre dans les méthodes de référence* (cf. chapitre 4.2)⁴³.

De plus, alors que l'amélioration des batteries permet des mesures sur des durées plus longues qu'auparavant, l'utilisation des systèmes capteurs sur de longues périodes présente des limites liées à l'acceptabilité du port (systèmes capteurs portatifs), ainsi qu'à la dérive potentiellement importante de certains dispositifs. De façon identique aux instruments de mesure mis en œuvre dans les méthodes de référence*, les systèmes capteurs nécessitent des opérations de maintenance formalisées ou suivies de manière rigoureuse, ce qui n'est pas encore le cas. Enfin, l'évaluation de l'exposition à l'aide de systèmes capteurs nécessite qu'ils soient utilisés et portés convenablement, c'est-à-dire le plus proche possible de la zone respiratoire de l'individu. Si par exemple l'appareil est rangé dans un sac, ou oublié à la maison, les mesures d'exposition sont erronées. Ainsi, bien former et informer le volontaire sur les modalités de port du système capteur et en réduire les contraintes techniques (e.g. alimentation en énergie) et ergonomiques (e.g. encombrement, poids, bruit) apparaît essentiel pour améliorer l'observance des participants et donc limiter les mauvaises classifications d'exposition et les données manquantes. À ces limites s'ajoutent, pour certains systèmes capteurs, des contraintes liées au manque de connectivité pour les personnes résidant en zone non couvertes par les réseaux téléphoniques (« zone blanche »).

Le tableau 9 liste les principales limites des systèmes capteurs lorsqu'ils sont utilisés pour évaluer l'exposition individuelle.

Ces limites peuvent être liées :

- A la mesure en elle-même (M) et à sa représentativité (R) ;
- Aux besoins de protocoles (P) ;
- Aux données générées : pré-traitement, traitement, interprétation ou utilisation des données générées (D)
- Aux coûts induits par les systèmes capteurs (C)
- A l'utilisation des systèmes capteurs (U)

⁴³ Certains dispositifs inclus dans l'expertise sont à la limite de la définition des systèmes capteurs (e.g. AE51, MicroPEM), avec une fiabilité métrologique éprouvée. Ces dispositifs réservés au domaine de la recherche, sont à distinguer des systèmes capteurs « commerciaux » accessibles au grand public.

Tableau 9 : Limites des systèmes capteurs pour l'évaluation de l'exposition

Limites	Commentaires	Biais potentiel
M - Qualité métrologique de la mesure limitée	Exemple : LD*, LQ*, sensibilité*, justesse*, fidélité, dérive, effet mémoire ?	Erreur de mesure de concentration
M - Manque de sélectivité du système capteur ou interférences		Surestimation ou sous-estimation des concentrations mesurées
M – Dérive dans le temps		Erreur de mesure de concentration
M – Besoin de maintenance	Les opérations de maintenance des systèmes capteurs ne sont pas encore réalisées de façon systématique et formalisée	Erreur de mesure de concentration
M – Nombre actuellement limité de polluants mesurés par les systèmes capteurs	Les systèmes capteurs ne permettent pas d'étudier l'exposition à une large gamme de polluants de l'air intérieur et/ou extérieur	Evaluation de l'exposition restreinte à quelques polluants
M- Nécessité de multiplier les systèmes capteurs pour pallier leur faible qualité métrologique → Nécessité de mixer la typologie des systèmes capteurs	Ne fonctionne pas si systèmes capteurs présentent des défauts identiques (dispersion de l'erreur)	Augmentation des coûts de mise en œuvre Attention à la puissance statistique nécessaire en termes de nombre de systèmes capteurs nécessaire pour pallier cette qualité
R – Autonomie du système capteur par rapport à la couverture temporelle attendue	L'autonomie du système capteur doit être compatible avec la durée des mesures prévue dans l'étude pour que les données générées soient représentatives de l'exposition	Mesures incomplètes

Limites	Commentaires	Biais potentiel
P - Manque de standard et hétérogénéité des protocoles		Hétérogénéité des pratiques et non reproductibilité des résultats de mesure
P - Nécessité de compétences pour élaborer protocole de mesure		Mauvaise mise en œuvre / déploiement / risque de résultats ne répondant pas à l'objectif visé ou mésinterprétation
D - Nécessité de compétences pour la gestion de données massives et l'interprétation des résultats	Besoin de data scientists spécialistes des systèmes capteurs	Mauvaise prise en compte des données et attributs, mésinterprétation
I - Incertitudes de la localisation de la mesure, de sa représentativité et de son adéquation à l'objectif recherché		Mésinterprétation des résultats
D – Étape de pré-traitement et traitement des données conséquentes du fait du nombre plus important et de la qualité limitée de données et de la richesse des métadonnées	L'utilisation de système capteur génère un flux de données brutes massives, qui nécessitent d'être traitées. Avec le développement de techniques d'analyse de données massives, cette durée est amenée à être réduite dans le futur	Augmentation des coûts et délais d'études.
D - Contraintes liées à la prise en compte de la protection des données à caractère personnel		Divulgaration de données à caractère personnel
D - Possibilité de mésusage, mésinterprétation		Biais d'interprétation
C - Coûts non négligeables liés à la logistique, l'étalonnage, etc., à la multiplication nécessaire des capteurs selon l'objectif de l'utilisation des systèmes capteurs. Coût environnemental élevé.	Même si le coût unitaire d'un système capteur est attractif, leur déploiement peut être onéreux. Compromis nécessaire entre économie de coût et qualité de la mesure attendue et /ou de la couverture spatiale	Budgétisation erronée du coût global d'utilisation des systèmes capteurs. Restreindre le champs d'étude envisagé pour des

Limites	Commentaires	Biais potentiel
	Faible Les système capteur ont une faible durée de vie ce qui induit des coûts en matière de recyclage (plastique, batteries) .	raisons de coûts mal appréhendés.

6.2 Projets et études identifiés

6.2.1 Préambule

Différentes pistes de travail ont été explorées par le groupe de travail afin d'identifier les projets mettant en œuvre des systèmes capteurs à des fins de caractérisation de l'exposition individuelle :

- Une consultation de la base de données Capt'air du LCSQA ;
- Une consultation auprès d'organismes français, européens et internationaux ;
- La conduite d'auditions ;
- Une recherche bibliographique sur les bases de données Pubmed et Scopus ;

Enfin, certains projets étaient déjà connus du groupe de travail.

Le nombre de projets mettant en œuvre des systèmes capteurs est en forte augmentation depuis quelques années.

Le travail d'identification des projets portant spécifiquement sur l'exposition individuelle, telle que définie dans le chapitre 6.1, est difficile car certains projets ayant une finalité autre (par exemple la sensibilisation de la population aux problématiques de qualité de l'air) peuvent comporter des éléments répondants partiellement à la question de l'évaluation de l'exposition individuelle. En effet, si la plupart des études fournissent des données quantitatives d'exposition à des polluants de l'air, la majorité de ces études n'a pas été conçue pour répondre à la question de l'évaluation de l'exposition individuelle. Ces études peuvent fournir des informations sur l'exposition des participants mais ni la sélection des systèmes capteurs, ni le traitement des données réalisé n'ont été conçus avec l'objectif de caractériser finement l'exposition individuelle. Ces projets, bien que très informatifs, n'ont donc pas été détaillés dans ce chapitre qui se focalise sur les projets évaluant explicitement l'exposition individuelle.

Par ailleurs, les projets portant sur l'utilisation des données de systèmes capteurs à des fins d'amélioration de la modélisation ou des cartographies (qui peuvent être utilisées pour évaluer l'exposition individuelle) sont présentés dans le chapitre 6.2.5.

Les projets présentés dans ce chapitre ne sont pas exhaustifs de l'ensemble des projets réalisés ou en cours en France et à l'étranger.

6.2.2 Projets identifiés *via* la base de données Capt'air

En septembre 2021, 11 expérimentations se focalisant sur l'exposition individuelle étaient renseignées dans la base Capt'air (extraction réalisée par le LCSQA pour les besoins de l'expertise) :

- 2 expérimentations de terrain menées par Atmo Aura avec le même système capteur de PM_{2,5} et PM₁₀ (Airbeam 3 d'Habitat Map). Ces expérimentations avaient été identifiées via la consultation auprès d'organismes français (cf. chapitre 4.3.1) ;
- 9 expérimentations ayant pour objectif de réaliser une évaluation métrologique de systèmes capteurs. Ces 9 expérimentations concernent 4 systèmes capteurs pour la mesure de PM₁, PM_{2,5} et PM₁₀ (Airbeam 2 d'Habitat Map et Ecogisense picture v0.1), de PM_{2,5} et COV totaux (Kaiterra laser eggplus chemical 1.5.0) et de COV totaux (Decentlab GMBH indoor ambiance monitor 1.5.0).

6.2.3 Projets identifiés *via* la consultation internationale et la conduite d'auditions ou connus *a priori* du groupe de travail

6.2.3.1 Présentation des projets et de leurs objectifs

Ce chapitre présente les projets identifiés *via* la consultation internationale, la conduite d'auditions ou connus *a priori* du groupe de travail et leurs objectifs. Les informations présentées sont issues des questionnaires transmis par les répondants (les réponses à certaines questions peuvent être partielles). Le détail des projets cités dans ce chapitre sont présentées en Annexe 9. À noter que l'ensemble des projets présentés dans ce chapitre sont tous des projets en cours.

6.2.3.1.1 *Projet Polluscope (2016-2022)*

Le projet ANR (Agence Nationale de la Recherche) Polluscope⁴⁴ vise une étude et une expérimentation terrain de l'opportunité offerte par l'usage de systèmes capteurs, ainsi que leurs limitations, vis-à-vis de la mise en place d'un observatoire participatif pour la surveillance de l'exposition individuelle à la pollution de l'air et de ses effets sanitaires. Après une étude des systèmes capteurs existants, les systèmes capteurs choisis sont prêtés à des volontaires qui les portent continuellement au cours de leurs activités et déplacements habituels. Les données collectées sont exploitées à des fins de validation de deux scénarios : l'un correspondrait à une étude épidémiologique tandis que le second scénario serait de type sciences participatives.

Le projet s'étale sur la période de septembre 2016 à décembre 2022 et réunit huit partenaires dont des spécialistes en sciences environnementales, en santé, en géosciences et en informatique, couvrant les différents aspects de ce projet pluridisciplinaire. Il est porté par le laboratoire d'informatique DAVID de l'Université Versailles Saint-Quentin en Yvelines (UVSQ). La première année était consacrée à l'étude et l'évaluation métrologique de systèmes capteurs. Les tests en laboratoire, en situation réelle et en mobilité ont amené au choix de trois capteurs : l'AE51 (distribué par la société Addair) pour le carbone suie, le Canarin (prototype de Sorbonne Université) pour les particules (PM₁₀, PM_{2.5} et PM₁) et le Cairsen® (distribué par Envea) pour le NO₂. Une tablette complète le dispositif grâce à laquelle les mesures sont géolocalisées et communiquées *via* le réseau Internet. Elle permet en outre aux participants de renseigner les métadonnées sur les lieux visités et les événements susceptibles d'impacter la qualité de l'air. Après une phase de préparation, 88 participants ont été recrutés, dont 25 dans la cohorte RECORD⁴⁵ servant à l'étude épidémiologique et 63 sur le territoire de Versailles Grand Parc visant à valider l'approche sciences participatives. Les participants ont porté les systèmes capteurs en continu durant une semaine sur des périodes de saisons différentes de l'année 2019 et 2020 (cette dernière était limitée en raison des restrictions liées à la crise sanitaire). Les participants RECORD ont reçu en plus des capteurs de santé : un

⁴⁴ <http://polluscope.uvsq.fr>

⁴⁵ RECORD est une cohorte épidémiologique de 7300 participants sur l'Île-de-France visant à décrire les disparités sociales et spatiales de santé et comprendre les effets des environnements géographiques de vie sur la santé. Elle est portée par l'UMR-S 707 - cf. www.record-study.org.

spiromètre⁴⁶ (Spirobank Smart) et un oxymètre, distribués par LAMIRAU Technologies, représentant officiel de la société MIR « *Medical International Research* » en France. Les participants complètent un questionnaire détaillé sur leurs habitudes, et pour la cohorte RECORD sur leur santé (avec un dépôt préalable à la CNIL). Une campagne est prévue à l'hiver 2021 – 2022. Les systèmes capteurs sont vérifiés et requalifiés par co-localisation et comparaisons avec des instruments de mesure mis en œuvre dans les méthodes de référence avant chaque période de la campagne. Les données collectées sont centralisées grâce à une plateforme conçue et développée à cet effet. Celle-ci intègre une chaîne de traitements, d'enrichissement et d'analyse, mettant en œuvre l'apprentissage automatique (*machine learning*). Les participants ont eu un accès sécurisé à leurs données *via* la plateforme. Des rapports individuels leur ont été restitués et les résultats intermédiaires ont été présentés lors d'un webinaire. Le projet n'étant pas fini, les résultats définitifs sont attendus au dernier trimestre 2022. Il reste également à analyser les mesures de santé collectées, à la lumière des données d'exposition et des informations déclaratives dans les questionnaires.

6.2.3.1.2 *Projet Mobilisense (2016 - en cours)*

Le projet Mobilisense est coordonné par l'équipe NEMESIS de l'Institut Pierre Louis d'Epidémiologie et de Santé Publique (iPLesp). Ce projet, entièrement financé par le Conseil Européen de la Recherche, vise à étudier les effets sur la santé respiratoire et cardiovasculaire de la co-exposition à la pollution de l'air et au bruit liée aux habitudes personnelles de transport. Ce projet a pour objectifs spécifiques de :

- Quantifier la contribution des habitudes personnelles de transport à l'exposition des individus à la pollution de l'air et au bruit ;
- Comparer les expositions aux polluants atmosphériques et au bruit entre les différents modes de transport ;
- Examiner si les expositions à des polluants de l'air et au bruit liées au transport sont associées à des changements sanitaires à court terme et sur deux ans ;
- Examiner si les comportements de mobilité et les expositions liées au transport contribuent aux disparités socio-économiques de santé ;

Cette étude englobe 300 individus, âgés entre 30 et 64 ans, d'un échantillon représentatif de la population de Paris et sa petite couronne.

Les systèmes capteurs utilisés dans ce projet sont des dispositifs utilisables en mobilité. Ils ont été sélectionnés sur la base des polluants visés, de leur coût, de leur validation, de leurs dimensions et poids et de l'autonomie de leur batterie. Deux systèmes capteurs sont déployés : l'AE51 pour la mesure du carbone suie et le PAQM 520 pour la mesure des concentrations massiques des particules sur 16 segments de taille de 0,4 à 10 µm. Ce dernier

⁴⁶ Spirométrie : examen faisant partie des explorations fonctionnelles respiratoires (EFR) ; c'est l'examen le plus couramment pratiqué parmi les EFR ; une spirométrie peut être couplée à la prise d'un bronchodilatateur ; les principales mesures d'intérêt sont :

- la Capacité Vitale Forcée (CVF, exprimée en litres), correspondant à l'amplitude respiratoire maximale (inspiration et expiration maximales) ;
- le Volume Expiratoire Maximal en une seconde (VEMs, exprimé en litres), qui désigne le volume maximal qu'une personne peut expirer en une seconde après une profonde inspiration ;
- le coefficient de Tiffeneau (exprimé en %), qui est égal au rapport VEMs/CVF ;
- le Débit Expiratoire de Pointe (DEP, exprimé en litres par seconde), indiquant le débit maximal atteint en expiration forcée.

système capteur a fait l'objet de modifications de paramétrages pour les besoins de l'étude. Les systèmes capteurs ont été validés par le Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE) par comparaison à des instruments de référence. Les conditions de validation des systèmes capteurs n'ont pas été détaillées dans le questionnaire transmis. Pour évaluer l'exposition individuelle, les systèmes capteurs sont déployés sur des périodes de 6 jours consécutifs à l'inclusion (prêt des systèmes capteurs entre les participants de l'étude). Les données GPS et une enquête de mobilité détaillée permettent de reconstruire de façon fine l'exposition individuelle.

Parallèlement aux mesures de polluants, une série de paramètres respiratoires et cardiovasculaires sont étudiés au niveau individuel : recensement des symptômes respiratoires grâce à une application smartphone, fonction pulmonaire avec spirométrie, pression sanguine au repos, pression sanguine brachiale / centrale ambulatoire, rigidité artérielle et variabilité de la fréquence cardiaque. Cette étude à court terme sera prolongée par un suivi des participants à 1 ou 2 ans.

6.2.3.1.3 *Projet Outdoor and Indoor Exposure (OIE) (finalisation initialement prévue en 2020)*

Le projet Outdoor and Indoor Exposure (OIE) coordonné par l'Institut Scientifique de Service Public (ISSeP) en Belgique a pour objectif d'améliorer la connaissance de l'exposition individuelle à la pollution atmosphérique *via* la comparaison de différentes méthodes d'évaluation de l'exposition individuelle et la réalisation de mesures d'exposition multi-environnements à l'aide de systèmes capteurs portatifs.

Le système capteur utilisé a été développé spécifiquement pour l'étude, il permet de mesurer les polluants de l'air suivants : NO, NO₂, O₃, PM_{2.5}. Le coût de fabrication du prototype a été évalué à moins de 500 euros (Lenartz *et al.* 2021).

À partir des données de mesures générées par le système capteur, l'exposition individuelle est évaluée grâce aux données de géolocalisation, à un journal de bord reprenant les activités du sujet, ses modes de déplacements et l'environnement dans lequel il se trouve. Les données générées seront remontées sur une base de données. Des résultats préliminaires sur un échantillon de 72 participants ont été publiés en septembre 2021 (Lenartz *et al.* 2021). Ces résultats préliminaires montrent que le système capteur développé présente un réel potentiel pour évaluer l'exposition individuelle. Il est cependant nécessaire de poursuivre l'étude sur les performances du système capteur, en prenant en compte notamment une plus grande variabilité de conditions météorologiques. Ces premières données ne permettent pas de tirer de conclusion ferme sur l'exposition individuelle des participants (par exemple sur l'impact de leur mode de transport sur leur exposition).

6.2.3.1.4 *Projet PAMELA (2021-2024)*

Le projet de recherche PAMELA (Particules Atmosphériques : Mesure de l'Exposition individuelle à Lille et aux Alentours), financé par l'I-SITE Université Lille Nord Europe, est réalisé par le laboratoire PC2A (Physicochimie des Processus de Combustion et de l'Atmosphère – PC2A, UMR 8522 CNRS/ULille), l'équipe « Santé publique et épidémiologie moléculaire des maladies liées au vieillissement » du laboratoire RIDAGE (INSERM U1167 / ULille / CHU Lille / Institut Pasteur de Lille), le laboratoire d'Optique Atmosphérique (LOA, UMR 8518 CNRS/ULille), en collaboration avec l'APPA. Il s'inscrit dans les actions de

recherche du consortium APOLLINE⁴⁷ (Air Pollution and Individual Exposure) de l'Université de Lille, qui regroupe des laboratoires de disciplines différentes autour des thématiques liées aux objets connectés et à la qualité de l'air.

Les objectifs du projet PAMELA sont de mesurer l'exposition individuelle aux particules dans la métropole européenne de Lille, grâce à des systèmes capteurs portables, munis d'un dispositif GPS pour la géolocalisation et l'horodatage, confiés à plusieurs centaines de volontaires pendant une semaine. Ces systèmes capteurs, développés par le consortium APOLLINE, mesurent les concentrations (en nombre) de particules dans six classes de taille de 0,3 à 10 µm, les concentrations massiques PM₁, PM_{2,5} et PM₁₀, la température, et l'humidité relative. Les données sont enregistrées chaque seconde sur une carte SD. L'autonomie des systèmes capteurs est d'environ dix heures.

Ces mesures permettront d'étudier les niveaux d'exposition individuelle, résolue suivant les différents microenvironnements fréquentés par les volontaires, en air extérieur et en air intérieur, d'obtenir des distributions de particules dans l'espace et le temps en air extérieur, et d'identifier les déterminants de cette exposition liés à l'environnement et au comportement des personnes. Le but final est d'améliorer de futures études épidémiologiques et/ou interventionnelles, en se basant sur l'exposition mesurée, et non plus sur l'exposition estimée à l'adresse des volontaires, comme c'est le cas très souvent.

Les mesures doivent commencer à l'automne 2021, pour une durée de trois ans, ce qui devrait générer une base de données très conséquente.

6.2.3.1.5 *Projet MUSE (différentes études à différentes échéances)*

Le projet MUSE (Monitoring Urbain Santé Environnement) a été élaboré par le CHU de Nice et se développe actuellement en partenariat avec l'APPA, BILOG, TERA (capteurs) et le soutien de la Faculté de Pharmacie de Lille sur 2 territoires : les Régions Provence-Alpes-Côte d'Azur (SUD) et Hauts de France.

L'objectif général du projet est de mettre en place un système d'observation et de "monitoring multimodal" (monitoring simultané de différents paramètres (environnementaux, de santé...) de la qualité de l'air (smart monitoring) auprès de différentes populations vulnérables (quartier, personnes âgées, femmes enceintes, patients).

Les échanges d'informations se feront notamment, mais pas exclusivement, *via* une application smartphone dont le volet santé a été élaboré spécifiquement lors du Projet MUSE (initialement l'application BREATHE Up, et désormais l'application EMuse en cours d'élaboration). Sur cette application seront remontées des données de qualité de l'air issues des réseaux de surveillance des AASQA et des capteurs individuels, ainsi que des signes cliniques déclarés (description de symptômes génériques « qualité de l'air » avec leur intensité). Ces données seront enregistrées sous forme de tableau de bord individuel à destination des professionnels de santé comme aide à la décision médicale. Initialement, les données seront analysées au niveau individuel mais pourront, dans le futur, alimenter une base de données unique permettant des analyses statistiques et études épidémiologiques. Dans le cadre de ces actions, le CHU de Nice déploiera en 2021 des systèmes capteurs portatifs de particules (PM₁₀, PM_{2,5} et PM₁, du groupe TERA) auprès de 300 femmes enceintes et de 100 patients asthmatiques.

⁴⁷ www.apolline.science

6.2.3.1.6 Étude dans le cadre de la cohorte SEPAGES (2015 – en cours)

La cohorte SEPAGES (Suivi de l'Exposition à la Pollution Atmosphérique durant la Grossesse et Effet sur la Santé), coordonnée par l'INSERM et l'Université Grenoble-Alpes, vise à caractériser l'exposition des femmes enceintes et des enfants aux contaminants de l'environnement, dont des polluants atmosphériques, et à étudier leurs effets sur la santé de la femme enceinte, du fœtus et de l'enfant. Plus précisément, les objectifs sont de :

- Caractériser de façon très précise l'exposition aux facteurs environnementaux pendant la grossesse et les premières années de vie (concept DOHaD pour *Developmental Origins of Health and Disease*, ou concept des 1000 jours, selon lequel la période de la conception au 3^e anniversaire de l'enfant de vie constitue une fenêtre unique de sensibilité de notre organisme). Pour ce premier objectif, des systèmes capteurs portatifs de particules et de carbone suie ont été utilisés (MicroPEM⁴⁸ et AE51). Cette étude inclut également des mesures de NO₂, benzène, toluène, éthylbenzène et xylène à l'aide de tubes passifs, ainsi que des mesures biologiques (phénols, phtalates, métabolites de pesticides...) et une évaluation de l'exposition au bruit ;
- Évaluer l'effet de ces polluants sur la santé respiratoire, la croissance, le neurodéveloppement et la santé cardiaque ;
- Comprendre les mécanismes biologiques sous-jacents (par exemple les mécanismes épigénétiques).

Au total, 484 familles de l'agglomération grenobloise ont été intégrées dans cette étude.

En ce qui concerne les systèmes capteurs, deux dispositifs sont déployés auprès de sous-échantillons de la population d'étude :

- Le MicroPEM pour la mesure des concentrations massiques de particules fines (PM_{2,5} ; le microPEM recueille également des données d'accélérométrie ;
- L'AE51 pour la mesure du carbone suie.

Il s'agit de systèmes capteurs portatifs (sac à dos) qui mesurent les concentrations auxquelles est exposé le participant (mère et enfant) dans les différents microenvironnements fréquentés. Les mesures ont été réalisées sur des périodes de 7 jours (y compris la nuit) répétées 3 à 4 fois pendant la grossesse et jusqu'aux 3 ans de l'enfant. Les données de géolocalisation sont fournies par un GPS porté par le participant, qui renseigne également un BET. L'exposition est évaluée sur la période de mesure. Pour le MicroPEM, le filtre intégré est pesé avant et après exposition pour calculer l'exposition individuelle du sujet pendant la campagne de mesure. Le MicroPEM, en enregistrant les données en temps réel permettent également de découper l'exposition de l'individu par « activité » en le couplant aux données GPS et au BET et ainsi définir des expositions pour chaque lieu/activité (par exemple, l'exposition à son domicile, dans les transports, sur son lieu de travail, à l'école, à la crèche etc.).

Outre ces mesures individuelles, l'évaluation de l'exposition des participants s'appuie également sur des modèles de dispersion (estimations à l'adresse des participants), de façon couplée ou non aux données GPS et de BET.

⁴⁸ A noter que le MicroPEM ne permet pas une lecture directe des concentrations. Ce système capteur, en permettant également un prélèvement des particules sur filtre rend possible une analyse physico-chimique des particules dans un 2nd temps (e.g. potentiel oxydant, composition chimique...).

À ce jour, les mesures de polluants atmosphériques ont été réalisées jusqu'aux 3 ans de l'enfant mais elles pourraient être poursuivies jusqu'à ses 7 ans.

6.2.3.1.7 *Projet InterMob (2021- en cours)*

Le projet InterMob s'inscrit dans le cadre du projet Mobil'air⁴⁹ porté par l'Université Grenoble-Alpes. Le projet InterMob concerne les changements de mobilité et cible particulièrement les automobilistes. Elle a pour objectifs principaux :

- D'identifier les leviers et les freins au changement de mobilité au profit de moyens de transports actifs, doux et/ou collectifs (marche à pied, vélo, transports en commun, covoiturage, etc.) pour les personnes utilisant fréquemment la voiture ;
- De produire des connaissances pour une aide à la décision en matière de politiques publiques (transports publics actifs et doux, aménagement du territoire, santé, environnement), au niveau local et national. Les résultats de l'étude devraient en particulier aider à mettre en place des politiques publiques incitant les individus à adopter des comportements de mobilité bénéfiques pour leur santé et l'environnement.

Une première étude pilote portant sur une dizaine de participants a été conduite en 2021. Le recrutement des participants pour l'étude finale a démarré en novembre 2021 et s'étalera sur 4 ans. L'objectif est de recruter 400 participants. Cette étude s'appuiera sur des systèmes capteurs de PM_{2,5} (MicroPEM) et sur des appareils de géolocalisation (GPS) et des accéléromètres pour mesurer l'activité physique et la mobilité. Au total, 8 sessions de mesures de 9 jours sur une durée de 2 ans seront programmées pour chacun des participants.

6.2.3.1.8 *Projet ATHLETE (en cours)*

Défini comme la mesure de toutes les expositions d'une personne au cours de sa vie et la manière dont elles affectent la santé, l'exposome⁵⁰ peut permettre de découvrir les principales expositions à l'origine des maladies chroniques. Pour contribuer à cette découverte, le projet ATHLETE, financé par l'UE et coordonné par ISGlobal, entend mettre au point une boîte à outils avancés de nouvelle génération pour étudier l'exposome et une cohorte prospective sur l'exposome. Ces éléments seront utilisés pour quantifier de manière systématique les effets d'un vaste éventail de facteurs de risque environnemental sur la santé respiratoire, cardiométabolique et psychique, et les voies biologiques connexes, pendant les 20 premières années de vie. Elles pourront également éclairer les recommandations politiques et les stratégies de prévention.

⁴⁹ Le projet Mobil'air est un projet interdisciplinaire visant à 1/mieux caractériser l'exposition de la population à la pollution en utilisant, non pas la masse des particules fines, mais le potentiel oxydant qui prend en compte la composition chimique spécifique des particules dans l'évaluation de l'impact sanitaire des différentes sources d'émissions, 2/identifier les leviers économiques et psychologiques permettant de changer les comportements individuels de façon pérenne et 3/développer un outil multidimensionnel et interdisciplinaire d'évaluation de mesures en termes de réduction de la pollution et des concentrations en particules, d'impact sur la santé, le trafic et les mobilités individuelles, ainsi que sur les inégalités d'exposition à la pollution et les ménages défavorisés (<https://mobilair.univ-grenoble-alpes.fr/objectifs/>).

⁵⁰L'Anses propose la définition de l'exposome suivante : « l'exposome correspond à la totalité des expositions néfastes comme bénéfiques à des agents chimiques, biologiques, et physiques, en interaction avec le milieu de vie et le contexte psycho-social, que connaît un organisme vivant de sa conception à sa fin de vie, complétant l'effet du génome afin d'expliquer son état de santé ».

Le projet ATHLETE s'intéresse à un large éventail de facteurs de risques environnementaux, tels que les polluants chimiques, le mode de vie et des facteurs de risques sociaux.

Concernant les polluants atmosphériques, le projet ATHLETE se focalise principalement sur le NO₂, qui sera mesuré à l'aide de tubes passifs (qui ne sont pas des systèmes capteurs).

Dans le cadre d'une étude « d'intervention urbaine », des systèmes capteurs Atmotube pro seront déployés auprès d'enfants de 9 à 11 ans de la ville de Barcelone afin de caractériser leur exposition et de proposer des interventions visant à réduire cette exposition. Ce système capteur portatif permet la mesure en temps réel des particules (PM₁, PM_{2,5}, PM₁₀) et de COV.

6.2.3.1.9 Campagne nationale logements 2 de l'Observatoire de Qualité de l'Air Intérieur

Un des objectifs de la campagne nationale logements 2 (CNL2)⁵¹ de l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI) est de mieux documenter la dynamique de variation de la qualité de l'air intérieur. A ce titre, le déploiement de systèmes capteurs bas coût dans les 600 logements visés par la campagne au niveau de la France métropolitaine continentale a été étudié. Un groupe de travail comprenant de nombreux partenaires s'est penché sur la méthodologie à mettre en place en identifiant les avantages et limites des différentes approches (Ramalho *et al.* 2018). La méthodologie initiale prévoyait une mise à disposition d'un système capteur sur une durée de 6 mois dans le séjour principal du logement avec une mise en place réalisée par l'occupant. Les contraintes d'accompagnement des utilisateurs à cette échelle et sur cette durée étaient toutefois trop importantes et la méthodologie a été ramenée à un schéma plus classique de mise en place par des enquêteurs sur une semaine, en même temps que les mesures mises en œuvre pour les autres paramètres.

Le nombre restreint de paramètres mesurés par les systèmes capteurs ne permettait pas de reposer la CNL2 sur ces seuls systèmes. En effet, les objectifs principaux de la CNL2 sont d'une part de déterminer l'évolution de la qualité de l'air intérieur depuis la première campagne nationale menée entre 2003 et 2005 (Kirchner *et al.* 2007) et d'autre part de documenter la distribution des concentrations de substances émergentes d'intérêt sanitaire⁵² dans le parc de résidences principales. Ces deux objectifs obligent à mettre en place des systèmes de prélèvements classiques par diffusion ou pompage avec des techniques d'analyses permettant la détection de ces substances à des niveaux traces.

Le choix du système capteur déployé dans la CNL2 repose sur les résultats du challenge AIRLAB (édition 2018) renforcé par des tests réalisés lors d'une campagne pilote dans 10 logements. Ces tests ont conduit à baser le choix du système capteur sur les seules mesures

⁵¹ La campagne nationale logements 2 vise à établir un état de la qualité de l'air en France métropolitaine continentale sur la période 2020-2022. Elle repose sur la mesure de plus de 170 polluants (particules fines, composés organiques volatils, pesticides, etc.) et l'administration de questionnaires. Elle est menée sur un échantillon représentatif de 600 logements français tirés au sort parmi les foyers ayant participé à l'enquête européenne de santé EHIS 2019. Cette campagne est financée par les ministères chargés de la santé, du logement et de l'écologie et l'Agence de la transition écologique (ADEME), en partenariat avec Santé publique France, l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses), l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN) et l'Institut Pasteur de Lille. (<https://www.oqai.fr/fr/campagnes/campagne-nationale-logements-2>).

⁵² La liste des substances émergentes d'intérêt sanitaire a été établie au travers d'une hiérarchisation sanitaire basée sur les critères de dangers et d'utilisation de ces substances dans l'environnement domestique (Achille *et al.* 2019). Les pesticides ont fait l'objet d'une hiérarchisation spécifique établie par le comité de phytopharmacovigilance de l'Anses.

du CO₂ et des particules (concentrations massiques) (fraction massique PM_{2,5}). Sur les trois systèmes jugés équivalents sur ces critères : Air visual Node (IQ Air), Nemo (Ethera) et Cozy air, c'est finalement ce dernier qui a été retenu de par le plus grand nombre de paramètres mesurés par ailleurs (CO₂, PM_{2,5}/PM₁₀/(PM₁), T, HR, COV totaux, CO, NO₂). Le système capteur Cozy air est donc déployé dans 600 logements au niveau du séjour principal sur une durée d'une semaine. Par ailleurs, une mesure du CO₂ dans la chambre de la personne de référence du ménage est conduite sur la même durée à l'aide du système capteur Class'Air.

Une intercomparaison des 20 systèmes capteurs utilisés avec des instruments mis en œuvre dans des méthodes de référence* est menée avant, pendant et après la campagne pour corriger les écarts, et une mesure gravimétrique de la fraction PM_{2,5} est réalisée systématiquement en parallèle dans les 600 logements.

Les mesures sont réalisées en aveugle pour l'occupant, c'est-à-dire sans indications de valeurs ou de voyants lumineux, de façon à ne pas modifier son comportement, ce qui viendrait à l'encontre de l'objectif de la campagne d'établir un état de la qualité de l'air intérieur. Les occupants disposeront toutefois en fin de campagne des résultats individuels des paramètres mesurés avec leur positionnement par rapport à l'ensemble des logements enquêtés.

Les résultats de cette campagne sont prévus pour l'année 2023. Les données des systèmes capteurs viendront alimenter la base de données des autres paramètres mesurés, et permettront d'identifier des situations à risque sur la base des caractéristiques des logements, du ménage et de leurs activités, ainsi que pour rechercher de possibles associations avec les troubles allergiques et respiratoires (en partenariat avec Santé Publique France - SPF).

6.2.3.2 Discussion

• **Systèmes capteurs utilisés et critères de choix**

Dans la quasi-totalité des projets identifiés, les technologies utilisées sont réservées au domaine de la recherche de par leurs coûts, leur difficulté de mise en œuvre ou du fait qu'il s'agit de systèmes capteurs développés spécifiquement pour les besoins de l'étude.

Le choix du système capteur repose généralement sur des considérations liées aux coûts d'achat initial du dispositif (à relativiser par rapport au nombre de participants, les systèmes capteurs peuvent être prêtés) et à la pertinence des polluants mesurés en fonction des objectifs de l'étude (effets sanitaires et environnements ciblés). La justesse et l'ergonomie de l'appareil sont d'autres critères avancés par les coordinateurs des projets.

A noter que certains systèmes capteurs utilisés dans ces études (MicoPEM) permettent un prélèvement des particules sur filtre rend possible une analyse physico-chimique des particules dans un 2nd temps (e.g. potentiel oxydant, composition chimique...).

• **Evaluations métrologiques des systèmes capteurs et de la qualité des données générées.**

Dans l'ensemble des projets identifiés, les systèmes capteurs utilisés ont fait l'objet de qualifications préalables en laboratoire et/ou sur le terrain par comparaison à des instruments de mesure mis en œuvre dans les méthodes de référence*. Dans certains projets, des étalonnages des systèmes capteurs sont également réalisés avant chaque semaine de mesures.

La qualité des données générées fait également l'objet d'évaluation, *via* l'emploi de routines automatisées pour la recherche de valeurs aberrantes et comparaison avec des mesures de station de référence pour la même période par exemple.

Les conditions de réalisation de ces qualifications ne sont pas systématiquement décrites dans les questionnaires transmis, pour ces projets qui sont en cours.

▪ Méthodes d'évaluation de l'exposition

Dans les études identifiées, les systèmes capteurs sont utilisés sur des périodes courtes, généralement d'une semaine, plus ou moins répétées selon la durée de l'étude. La reconstruction de l'exposition des participants s'appuie systématiquement sur l'utilisation de données GPS, généralement associées à une caractérisation des BETA *via* l'emploi de questionnaires ou d'enquêtes de mobilité fines. Dans les études visant à évaluer les effets à long terme de la pollution de l'air (e.g. Sepages), les données de mesures de systèmes capteurs sont couplées à d'autres sources de données (e.g., modélisation) pour évaluer l'exposition individuelle. A noter également que dans ces études incluant plusieurs centaines de participants, les systèmes capteurs sont déployés auprès de sous-échantillons d'individus.

6.2.4 Projets identifiés dans la littérature

6.2.4.1 Méthode d'identification et d'analyse des études

Les articles ont été recherchés **en novembre 2020** dans les bases de données PubMed (tous les champs) et Scopus (titre, résumé et mots clés) à l'aide de trois équations de recherche :

- Requête 1 : ("low cost sensor" OR "sensor" OR "micro sensor" OR "wearable sensor" OR "monitor") AND ("personal exposure" OR "personal measurement" OR "personal monitor*" OR "mobile monitoring")
- Requête 2 : « noms commerciaux de capteurs / systèmes capteurs »⁵³
- Requête 3 : crowdsensing AND air

Compte tenu du développement rapide des capteurs, seuls les articles publiés depuis 2010 ont été recherchés et analysés. Avant les années 2010, les études s'intéressant à la question de l'exposition individuelle *via* l'air concernaient l'utilisation de préleveurs/diffuseurs passifs pour la plupart, ou de dispositifs ne répondant pas à la définition des systèmes capteurs (cf. chapitre 4.1. Depuis les années 2010, le nombre de publications portant sur l'exposition individuelle et les systèmes capteurs est en augmentation (cf. Figure 8).

⁵³ Une liste de 80 références a été établie avec les experts du groupe de travail.

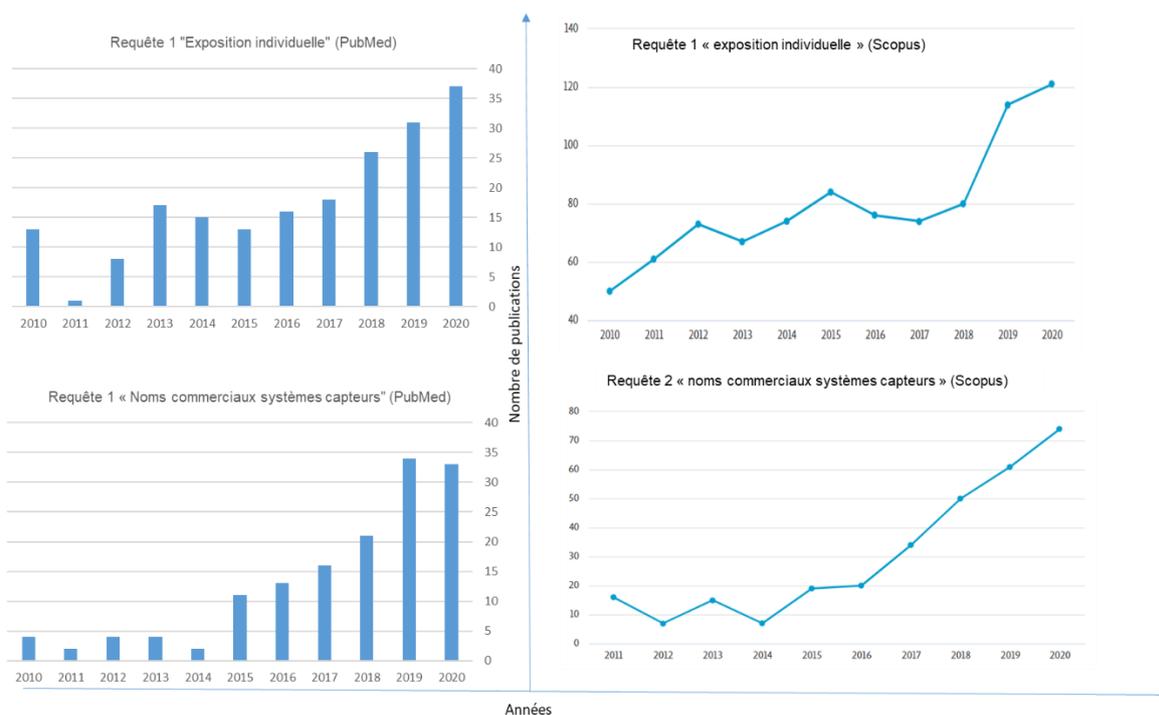


Figure 8 : Évolution du nombre de publications identifiées dans la littérature à l'aide des mots clés portant sur les systèmes capteurs et l'exposition individuelle

La Figure 9 présente les résultats des recherches bibliographiques et la sélection des études entrant dans le champ de l'expertise, plus précisément sur les études portant spécifiquement sur l'utilisation de systèmes capteurs à des fins d'évaluation de l'exposition individuelle.

Les articles ont dans un premier temps été présélectionnés sur lecture du titre et du résumé et évalués pour l'éligibilité à partir du texte intégral. Les 60 articles inclus ont été analysés par les membres du groupe de travail en complétant une grille d'analyse présentée en Annexe 9 du rapport.

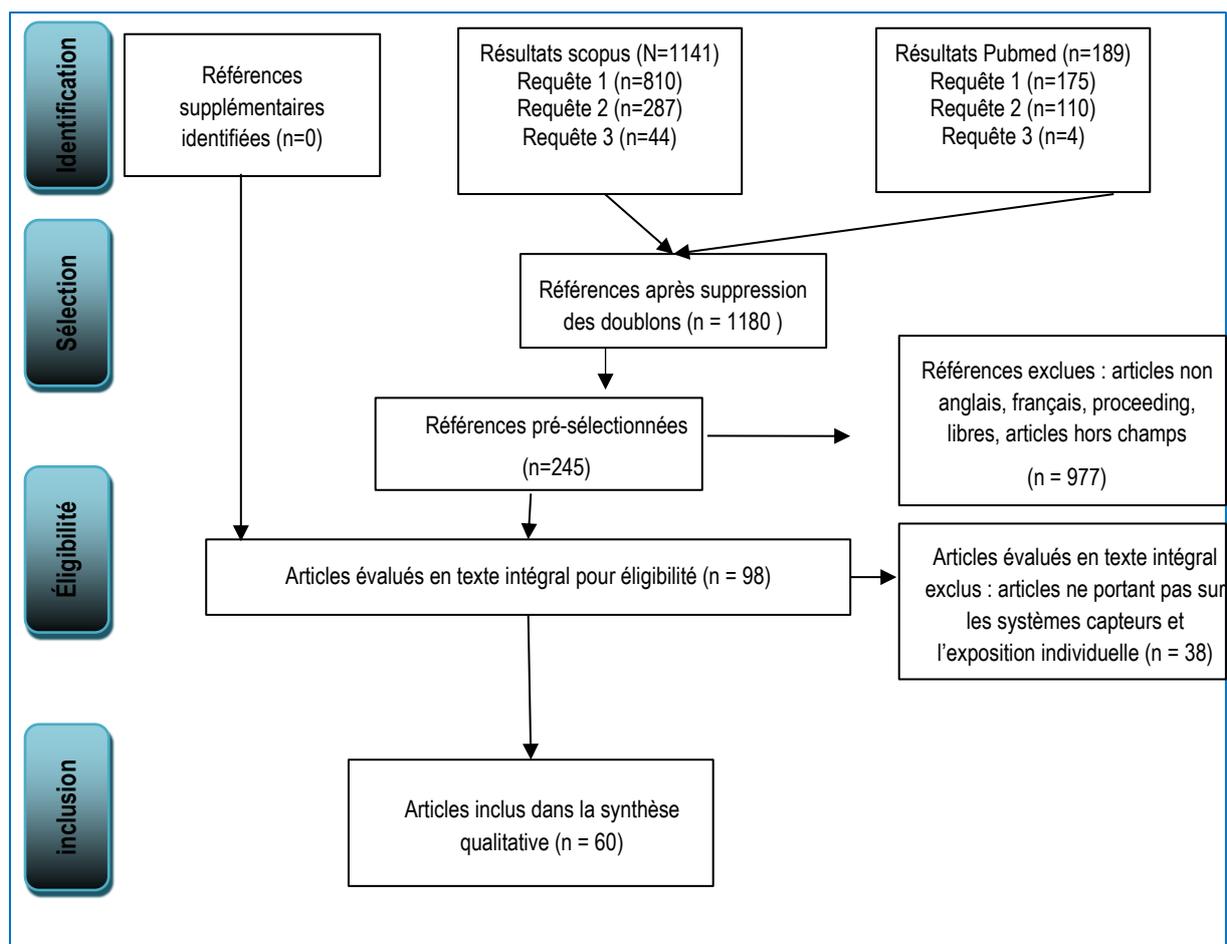


Figure 9 : Diagramme de sélection des articles scientifiques inclus dans l'expertise

6.2.4.2 Présentation des projets et de leurs objectifs

Peu de projets portant spécifiquement sur l'utilisation de systèmes capteurs pour l'évaluation de l'exposition ont été identifiés dans la littérature, et encore moins de projets visant à évaluer des effets sanitaires à partir de données générées par les systèmes capteurs⁵⁴.

Les études identifiées dans la littérature sont hétérogènes en termes d'objectifs et de design. Certaines publications concernent des projets de grande ampleur déployés sur de nombreuses années alors que d'autres publications portent sur des études pilotes ou des projets de moindre ampleur, avec un faible nombre d'individus. Les objectifs des principales études sont présentés dans ce chapitre. La liste des références sélectionnées avec les finalités des études selon un classement élaboré par le groupe de travail est disponible en Annexe 10.

- **Projet PASTA (Physical Activity through Sustainable Transport Approaches)**

Le projet PASTA est un projet européen visant à connecter les transports et la santé par la promotion des mobilités actives dans les villes (marche et vélo, y compris en combinaison avec l'utilisation des transports publics) en tant que moyen innovant d'intégrer l'activité physique dans la vie quotidienne.

⁵⁴ Certaines des études identifiées étaient connues a priori du groupe de travail ou ont été identifiées via la consultation internationale.

Les études analysées par le groupe de travail visent spécifiquement à analyser le lien entre activités sportives, exposition individuelle au carbone suie et impact à long terme sur la fonction pulmonaire. La mesure de carbone suie est effectuée par des systèmes capteurs AE51, pendant la pratique des activités sportives. L'évaluation des fonctions respiratoires est réalisée par spirométrie.

▪ **Projet CHO City Health Outlook**

L'objectif à long terme du projet City Health Outlook (CHO) est d'établir un réseau de surveillance de l'environnement urbain et de la santé à plusieurs échelles et en temps réel, pour évaluer l'exposition individuelle et les risques auxquels les populations sont confrontées. Cette exposition individuelle est estimée à partir de systèmes capteurs portables dans la mégapole de Pékin.

▪ **Projet PRAISE-HK**

L'objectif de ce projet, coordonné par l'Institut pour l'environnement de Hong-Kong (HKUST), est de développer un système complet pour mesurer en temps réel les concentrations de polluants pour évaluer l'exposition des personnes et leur fournir des informations personnalisées sur la qualité de l'air, ainsi que sur les risques sanitaires induits. Dans ce projet, les systèmes capteurs viennent en complément des mesures réglementaires et des données de modélisation pour l'évaluation de l'exposition individuelle. Peu d'information sont disponibles sur les systèmes capteurs employés, leur utilisation et la façon dont les données générées sont utilisées pour évaluer l'exposition individuelle.

▪ **Projet AIRLESS (*Effects of AIR pollution on cardiopuLmonary disEaSe in urban and peri-urban reSidents in Beijing*)**

Le projet AIRLESS s'intéresse aux expositions à de multiples polluants sur les capacités cardio-pulmonaires de la population urbaine et périurbaine de Pékin. Réunissant un consortium de chercheurs britanniques et chinois, il cherche à montrer les possibilités offertes par les systèmes capteurs pour la mesure de l'exposition individuelle aux polluants à des fins sanitaires. Les participants (N~250) se sont vus confier des systèmes capteurs (N~60) lors de campagnes de mesures de polluants atmosphériques et ont été suivis cliniquement (hypertension) en parallèle.

▪ **Projet ExpoApp**

Le projet ExpoApp vise à développer de nouvelles méthodes et de nouveaux outils pour l'évaluation de l'exposition individuelle. Le système d'évaluation proposé intègre des informations issues : des mesures de géolocalisation et d'accélérométrie provenant d'un smartphone fixé à la taille, un système capteur de particules ultrafines (PUF – PM₁), de systèmes d'information géographique, et de l'individu (BET). ExpoApp calcule le temps passé dans les microenvironnements, le niveau d'activité physique, la fréquence respiratoire, ainsi que les niveaux d'exposition et les doses inhalées. ExpoApp a été déployé dans le cadre d'une étude de panel auprès de 158 individus de 5 villes (Amsterdam et Utrecht - Pays-Bas, Bâle - Suisse, Norwich - Royaume-Uni, et Turin - Italie).

6.2.4.3 Analyse des études

6.2.4.3.1 *Informations relatives aux populations d'études, zones géographiques*

Les terrains d'études des articles sont principalement en Asie (37% des articles), en particulier en Chine avec une étude sur cinq sur l'ensemble du corpus, puis en Europe (34%) et en Amérique du Nord (22%). L'Afrique et l'Amérique du Sud sont très peu représentées dans ce corpus d'articles, avec seulement 3 études (Accra au Ghana, Addis Abeba en Éthiopie et Santiago au Chili) ; l'Océanie est absente. Cette géographie des travaux s'explique en grande partie par la géographie de la science à l'échelle mondiale. Les zones géographiques sont le plus souvent des zones urbaines, avec parfois un objectif de comparaison entre des villes (près d'un tiers des études sur l'Europe) ou entre les zones périurbaines et rurales voisines. Seuls 5 articles ont un positionnement sur les zones rurales et s'intéressent alors surtout à la pollution de l'air intérieur et aux modes de cuisson.

Les environnements investigués dans le corpus des articles retenus sont dans leur très grande majorité à l'intérieur ET à l'extérieur (plus des trois quarts), et de manière très marginale uniquement soit à l'intérieur (8 articles, dont 2 concerne l'habitacle de la voiture), soit à l'extérieur, en position fixe (2 articles). Cette surreprésentation des études déployant des systèmes capteurs concernant la pollution de l'air intérieur et extérieur peut s'expliquer par l'objectif des auteurs d'approcher l'exposition individuelle, quels que soient les espaces fréquentés, en intégrant sur 24h ou quelques jours, et/ou par la portabilité des systèmes capteurs qui sont à proximité des individus sur la durée des mesures. S'il s'avère que 12% des articles ne cherchent pas à différencier les microenvironnements, les autres en distinguent très souvent plusieurs, renseignés directement (journal d'activités) et/ou indirectement (via le traitement de données de localisation et autres). Les typologies les plus simples se résument à 2-3 microenvironnements (voiture ou pas ; domicile/travail/transit) ; d'autres présentent une granularité forte, avec plusieurs microenvironnements couplés à des activités, même si la typologie finale est parfois simplifiée pour donner un poids statistique à chacun des microenvironnements/activités. Pour l'air intérieur, 7 articles détaillent particulièrement les sources de pollution, à travers un journal d'activités et/ou un questionnaire, détaillant le tabagisme, la cuisine, le nettoyage, la ventilation, le chauffage ou encore le brûlage des déchets. Par ailleurs, l'analyse du corpus des articles retenus montre un intérêt particulier pour le trajet domicile-travail/école, en le distinguant comme un microenvironnement/activité (22% des articles) ou en différenciant les différents modes possibles (près d'un tiers des articles). La comparaison des modes de transport est même parfois la finalité de l'étude.

Les typologies de microenvironnements/activités reposent principalement sur la complétion d'un journal des activités par les participants (52% des articles), dont un tiers s'appuie également sur des données de localisation *via* un smartphone ou un GPS (notamment pour vérifier les données saisies). La résolution temporelle est au minimum de 5 min, - ce qui implique un fort engagement des participants -, et jusqu'à une saisie quotidienne *a posteriori* des événements culinaires, de l'utilisation des lampes, etc. D'autres fois, elle est variable et se définit à partir des changements d'activités/environnements. La localisation GPS des mesures est assez fréquente (plus d'un tiers des articles). Elle est parfois utilisée, comme d'autres données d'environnement (lumière, son, mouvement...), pour proposer ou envisager une classification spatiotemporelle automatique, reposant sur des méthodes d'apprentissage automatique ou *machine learning* (10% des articles).

Les systèmes capteurs sont le plus souvent confiés aux populations visées par l'étude (par exemple, des femmes enceintes, des adultes malades, etc.), même si parfois la population

cible est beaucoup plus large que les participants de l'étude, comme souvent dans des articles où les mesures sont réalisées par un chercheur ou l'équipe scientifique aidée d'étudiants (15% des études). La figure 11 représente la proportion des articles du corpus selon des catégories de participants et selon leur nombre. Plus d'un quart des articles sont relatifs aux enfants et s'appuient souvent sur une journée-type d'un écolier. Dans les populations adultes, les auteurs des études indiquent que les femmes sont parfois recrutées en lien avec leur(s) enfant(s) ou futur enfant, ou encore pour le temps passé dans les cuisines avec des modes de cuisson traditionnels (par ex. des foyers en terre, sans cheminée, alimentés par du bois). Enfin, près d'une étude sur cinq (19%) ne précise pas une population cible particulière ou repose sur des mesures réalisées indépendamment d'une population (par exemple, dans un parking, le long d'une route...). Le nombre de participants est variable d'une étude à l'autre, d'un participant unique (par exemple, un chercheur dans Wallace et Ott, 2011) à plus de 500 femmes enceintes (air intérieur, Wu *et al.*, 2000), même si près de la moitié des articles ont moins de 50 participants.

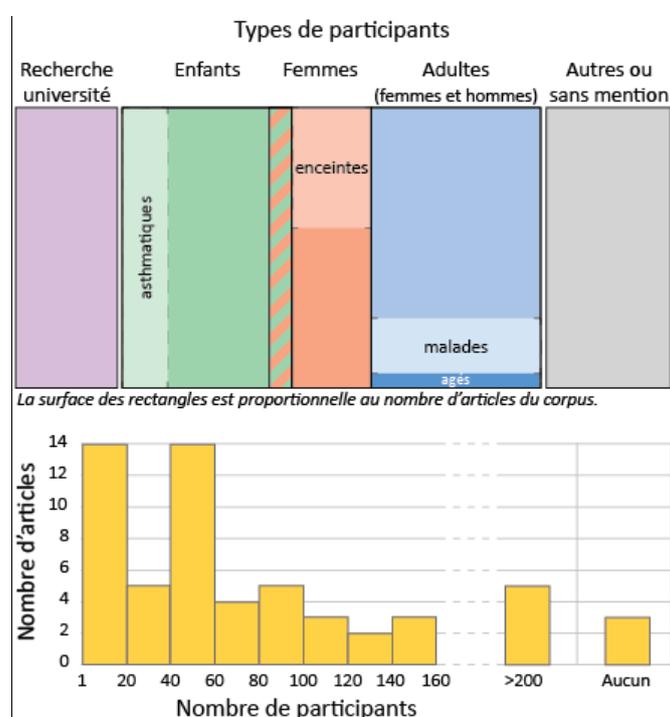


Figure 10 : Type et nombre de participants inclus dans les études identifiées dans la littérature

6.2.4.3.2 Informations relatives aux polluants mesurés et aux systèmes capteurs utilisés

La majorité des études s'intéresse à la mesure d'un polluant unique (58% des études).

La grande majorité des études analysées portent sur les particules (plus de 80% des études), dans la plupart des cas avec une expression de la concentration en masse, et principalement sur les $PM_{2,5}$, même si certaines études présentent des résultats pour des fractions granulométriques spécifiques (e.g., PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_2 , $PM_{1,5}$, PM_1) et quelques-unes se focalisent sur l'analyse des particules ultrafines (PUF). Le deuxième polluant le plus fréquemment ciblé est le carbone suie (27%). Quelques études ont également inclus des mesures d'autres polluants de façon conjointe à la mesure des particules (NO_2 , CO, CO_2 ou les COV totaux).

Parmi les 60 études retenues dans cette analyse, une dizaine seulement a déployé des systèmes capteurs « accessibles » au grand public, c'est-à-dire à des prix d'achat inférieurs à 500 euros. Les systèmes capteurs déployés dans les autres études sont soit des dispositifs dont le coût d'achat dépasse le millier d'euros, soit des dispositifs développés pour les besoins de l'étude (pour rappel, le groupe de travail souligne que ces dispositifs sont à la frontière de la définition des systèmes capteurs (cf. chapitre 3.1.2). Ces dispositifs ont été considérés comme des systèmes capteurs dans cette expertise).

Au-delà de l'estimation de l'exposition individuelle aux polluants de l'air à l'aide de systèmes capteurs, quelques études parmi ces 60 ont de plus estimé la dose inhalée par les participants. Cet objectif spécifique nécessite au préalable d'estimer la fréquence respiratoire des participants. Parmi les 5 études identifiées, 2 équipes ont défini une fréquence respiratoire théorique constante (Chowdhury *et al.* 2012 ; Woo *et al.* 2020) tandis que 2 autres ont approché la fréquence respiratoire à partir des données consignées dans le questionnaire BETA en association (Chatzidiakou *et al.* 2020) ou non (Buonanno *et al.* 2014) avec des données d'accélérométrie. Dans la cinquième étude, l'estimation de la dose inhalée était basée sur une mesure en continu de la fréquence cardiaque (= proxy de la fréquence respiratoire) (Borghi *et al.* 2020).

6.2.4.3.3 Informations relatives aux données métrologiques

▪ Qualifications métrologiques des systèmes capteurs

L'analyse des articles montre que près de la moitié des études (47%) ne fait référence à aucune qualification métrologique des systèmes capteurs. Cela signifie que, par défaut, les acteurs de ces études font confiance à la qualité des mesures fournies par ces outils. Ce point est en soi problématique, car il démontre que les utilisateurs n'ont peut-être pas conscience des limitations et imperfections des systèmes capteurs utilisés, et les conclusions scientifiques issues de ces études pourraient s'en trouver fragilisées. Il est possible cependant que les auteurs n'aient pas souhaité y faire référence pour ne pas alourdir les articles. En l'absence d'informations liées à la qualité métrologique de l'instrumentation, et pour une éventuelle réanalyse des données en vue d'une interprétation sanitaire, il est conseillé de contacter les auteurs de l'étude pour s'assurer qu'ils ont bien pris en compte les éléments métrologiques associés au système utilisé.

A l'inverse, près de 43% des articles incluent directement des tests métrologiques réalisés durant l'étude présentée. De plus, pour la moitié d'entre eux, les résultats sont corroborés ou enrichis par des références à des qualifications menées antérieurement ou par ailleurs, selon trois cas possibles :

- (a) Les paramètres métrologiques évoqués sont issus d'expériences précédentes, menées par la même équipe scientifique, et dont les résultats ont fait l'objet de publications⁵⁵ citées dans l'article ; ces résultats scientifiques antérieurs, ont parfois été spécifiquement et volontairement construits dans un but de validation métrologique préalable à l'étude en question (60% des cas) ;

⁵⁵ La qualité scientifique et métrologique du contenu des articles, études, tests métrologiques cités dans les articles analysés par le groupe de travail, n'ont pas été eux-mêmes évalués par le groupe de travail.

- (b) Les paramètres métrologiques reportés sont issus de tests menés par d'autres équipes scientifiques (JRC, EPA, etc.), dont la référence est donnée dans la bibliographie de l'article (17% des cas) ;
- (c) Les tests et résultats présentés sont tirés des documentations techniques fournies par les constructeurs (22% des cas).

Enfin, dans 10% des articles, les qualifications métrologiques sont issues de tests antérieurs à l'étude, selon les trois mêmes situations que celles précédemment décrites.

▪ **Conditions des qualifications métrologiques**

Une qualification métrologique de systèmes capteurs demande des moyens lourds, d'un niveau de technicité élevé, et souvent coûteux. Beaucoup d'organismes experts du domaine, et disposant des outils analytiques *ad hoc*, se chargent de faire ces qualifications. Certains porteurs de projet s'adjoignent donc directement l'aide de tels organismes, à travers des partenariats de recherche ou contractuels (sous-traitance), lorsqu'ils n'ont ni les ressources matérielles et humaines ni le temps nécessaire à consacrer à cette étape.

Les organismes procédant à de telles évaluations métrologiques de systèmes capteurs veillent quant à eux i/ à multiplier les conditions de qualification, pour couvrir un maximum de situations d'usage (conditions contrôlées en laboratoire mono ou multi-polluants, conditions réelles de terrain, usages en mode fixe ou mobile, etc.), ii/ à mener ces qualifications de manière récurrente, afin de tenir compte de l'évolution technologique des versions de capteurs, iii/ à rendre publique les résultats pour que chaque utilisateur, en particulier du porteur de projet au citoyen, puisse se référer aux performances potentielles de l'objet au regard de l'usage envisagé (cf. chapitre 5.2).

Pour les études faisant référence à une qualification métrologique des systèmes capteurs, effectuée pendant l'étude ou par ailleurs, les conditions de tests sont évoquées dans près de 90% des cas. Ceci démontre que dès lors qu'ils s'intéressent à la qualité métrologique des systèmes capteurs, les auteurs sont sensibles aux limites des mesures et aux paramètres pouvant influencer leur qualité, et souhaitent assurer la confiance dans les résultats. Les paramètres d'intérêt cités dans ces études, dépendent de la méthode de qualification métrologique choisie et du niveau d'exploitation des données, comme cela est expliqué ci-après.

Lieu des qualifications :

- 41% des tests ont été menés en laboratoire, dont la moitié décrit la génération contrôlée de l'espèce ciblée (gaz ou particule modèle comme l'Arizona Dust par exemple) ;
- 47% des tests ont été menés sur le terrain. Dans 10% des cas, l'équipe s'est assurée et/ou garanti la représentativité des conditions par rapport à l'usage de l'étude (environnements communs à l'évaluation de l'exposition individuelle).

Une seule étude s'intéresse à la validité métrologique des systèmes capteurs utilisés en mobilité, bien que cet usage soit largement déployé durant l'évaluation de l'exposition individuelle (utilisation de systèmes capteurs portatifs).

Calendrier des qualifications :

Seule la moitié des études évoquant la question métrologique précise le moment de cette qualification.

Pour celles qui citent le calendrier de qualifications, la majorité a eu lieu exclusivement en amont de l'étude (65%). 18% ont également (re)fait une qualification en aval de l'étude, souvent pour déterminer les éventuelles dérives*, ou identifier des systèmes capteurs défaillants. Enfin, dans 18% des études, le contrôle qualité des systèmes capteurs a été fait régulièrement tout au long de l'étude, ce qui démontre souvent l'attachement de l'équipe scientifique à garantir la rigueur métrologique de leur expérimentation, mais ceci demande des moyens matériels et humains plus conséquents.

▪ **Construction de la qualification métrologique**

Pour les études évoquant une qualification métrologique des systèmes capteurs (dans le cadre des travaux ou par ailleurs), la méthode est citée dans près de 95% des cas. Ceci témoigne à nouveau que, dès lors qu'une équipe évoque la question métrologique, elle en décrit les étapes de manière aussi exhaustive que possible.

Dans 67% des études, la qualification est effectuée par colocalisation avec l'instrument de mesure mis en œuvre dans la méthode de référence* préconisé pour l'espèce testée. L'analyseur et la méthode utilisés sont alors cités et/ou décrits tout ou partie.

Pour 18% des études, la qualification est effectuée par colocalisation avec une instrumentation connue pour être de qualité métrologique supérieure à celle du système capteur utilisé. Le cas échéant, il est précisé souvent si l'instrument en question a été étalonné par une méthode de référence*.

Enfin, dans 15% des cas, la qualification métrologique consiste simplement à évaluer la variabilité inter-systèmes capteurs, généralement du même modèle, ou plus rarement (une seule étude) avec un modèle différent, toujours par colocalisation.

▪ **Utilisation des données issues de la qualification métrologique**

Quand une équipe s'engage dans une qualification métrologique, il est rare qu'elle n'en exploite pas les données. Seuls 10% des études se contentent de citer celle-ci comme un constat de confiance, souvent, lorsque l'étude se limite aux cas du « b » et « c » mentionnés ci-dessus.

Pour les autres situations, 40% des données sont utilisées, pour tout ou partie :

- Pour déterminer la courbe de corrélation, entre le système capteur et la référence, et ainsi appliquer un algorithme de correction des données ; Dans la majorité des cas, la courbe est modélisée par une régression linéaire, qui permet alors de calculer la sensibilité (pente) à l'espèce ciblée, l'offset à l'origine et l'erreur au modèle (R^2).
- Pour évaluer l'incertitude de mesure, liée par exemple à la reproductibilité du pool de systèmes capteurs, au bruit de mesure, à la LD ;
- Pour évaluer l'impact d'interférents, et ainsi soit invalider une donnée (pluie sur système capteur de particules par exemple) ou appliquer un algorithme de correction *ad hoc* (température, vitesse de vent, humidité relative) ;
- Pour estimer la dérive* des systèmes capteurs (ceci implique une qualification amont/aval de l'étude).

6.2.4.3.4 Analyses et interprétations relatives aux effets sanitaires

Parmi les 60 études identifiées dans la littérature et pour lesquelles des systèmes capteurs de polluants de l'air ont été utilisés, seules onze ont utilisé les données produites par ces systèmes capteurs pour quantifier des risques sanitaires. Les autres études, bien que s'inscrivant pour la plupart dans une telle démarche, n'ont pas rapporté d'estimations de risque sanitaire.

Les polluants de l'air considérés dans ces études étaient le carbone suie (N = 3), les particules fines (PM_{2,5} : N = 5 ; PM_{1,5} : N = 1) et ultrafines (N = 2) et les polluants oxydants (NO₂ et O₃ étudiés de façon conjointe N = 1).

▪ Etudes relatives au carbone suie

Trois études s'intéressant aux effets de l'exposition au carbone suie ont été répertoriées. Celles-ci traitaient des effets à long terme sur la fonction respiratoire et des effets à court et long termes sur la fonction cardiovasculaire.

Dans une première étude, Laeremans *et al.* (2018) se sont ainsi intéressés aux effets à long terme de l'activité physique, des niveaux d'exposition au carbone suie et de leur potentielle interaction sur les performances respiratoires. Cette étude a été menée dans trois villes européennes (Anvers, Barcelone, Londres), chez 115 adultes (44% d'hommes, 37 ± 10 ans en moyenne), sains, non-fumeurs, issus de la cohorte PASTA, portant un capteur brachial de l'activité physique et un système capteur du carbone suie pendant sept jours, et au cours de trois saisons différentes (printemps ou automne, été, hiver). Une spirométrie était réalisée chaque semaine de suivi. Les concentrations mesurées pendant les trois saisons ont ensuite été moyennées tel un proxy de l'exposition sur une année. Les performances respiratoires n'étaient pas associées à l'exposition moyenne au carbone suie dans les modèles multivariés les plus complets. Les auteurs ont néanmoins montré que le bénéfice de l'activité physique sur les performances respiratoires diminuait lorsque les concentrations en carbone suie augmentaient.

La deuxième étude, menée par Avila-Palencia *et al.* (2019), s'intéressait aux effets à court et long termes sur la fonction cardiovasculaire. Cette étude, également menée au sein de la cohorte PASTA, incluait 122 adultes (45% d'hommes, 35 ± 10 ans en moyenne), sains, non-fumeurs, portant un capteur brachial de l'activité physique et un système capteur du carbone suie pendant sept jours, pendant trois saisons différentes (printemps ou automne, été, hiver). Les tensions systolique et diastolique étaient mesurées par un tensiomètre brachial à plusieurs reprises au cours du suivi. Pour l'étude des effets à court terme, l'exposition moyenne au carbone suie était estimée sur différentes périodes de temps précédant chaque mesure de la tension artérielle (de 1h à 7j) ; pour l'étude des effets à long terme, c'est la moyenne de l'ensemble des concentrations mesurées pendant les trois saisons qui a été considérée comme proxy de l'exposition annuelle. Nonobstant quelques associations isolées et non-conclusives, la tension artérielle n'était globalement pas associée à l'exposition à court terme au carbone suie dans les modèles multivariés les plus complets. Concernant l'exposition à long terme, les concentrations en carbone suie étaient négativement et non significativement associées à la tension diastolique ; aucune association n'a été observée avec la tension systolique. Les effets bénéfiques de l'activité physique sur la tension artérielle n'étaient pas modifiés par l'exposition à court et long termes au carbone suie.

La troisième étude, menée par Norris *et al.* (2016) et se focalisant sur les effets à court terme, incluait 45 femmes (41 ± 11 ans en moyenne), en population générale, en Inde, non-fumeuses, non-enceintes, suivies pendant les opérations de cuisine, 24h en été et 24h en hiver. L'exposition au carbone suie était mesurée par système capteur porté en continu tandis que la tension artérielle était mesurée toutes les dix minutes par un tensiomètre porté au bras. Un membre de l'équipe de recherche, présent sur place pendant les campagnes de mesures, s'assurait de la bonne conduite des mesures et consignait les activités des volontaires dans un questionnaire BETA. L'exposition moyenne au carbone suie était estimée sur différentes périodes de temps précédant chaque mesure de la tension artérielle (de 2 à 20 min, par incrément de 1). En analyse multivariée, une augmentation des concentrations en carbone suie était associée à une augmentation de la tension systolique, avec un effet moins marqué lorsque la période de temps considérée pour estimer l'exposition était inférieure à dix minutes, et à une faible diminution de la tension diastolique, quelle que soit cette période de temps. Des résultats similaires ont été rapportés lorsque l'exposition moyenne au carbone suie était estimée sur la période entière du suivi.

▪ Etudes relatives aux particules fines et ultrafines

Parmi les études recensées, sept études ont exploré les effets sanitaires en lien avec l'exposition aux particules fines et ultrafines. Ces effets concernaient la fonction cardiovasculaire, la fonction respiratoire, l'inflammation bronchique, le contrôle de l'asthme, la surcharge pondérale et la mortalité.

Huang *et al.* (2014) ont ainsi constitué une cohorte de 50 femmes au foyer (38 ± 11 ans en moyenne), en population générale, à Taiwan, afin d'investiguer les effets à court terme des $PM_{2.5}$ et du bruit sur la variabilité de la fréquence cardiaque. L'exposition aux $PM_{2.5}$ était mesurée par un système capteur porté pendant 24h à quatre reprises pendant un an (une fois par saison). La fréquence cardiaque des volontaires était mesurée en continu sur ces mêmes 24h par un Holter ECG. Les données cardiaques ont été segmentées par périodes de 5 min ; des moyennes d'exposition aux $PM_{2.5}$ et au bruit ont ensuite été calculées pour des périodes de temps correspondant aux 1, 2, 3 et 4h précédentes. Par analyse multivariée, une association négative entre les niveaux d'exposition aux $PM_{2.5}$ et la variabilité de la fréquence cardiaque a été observée, et plus la période de temps considérée pour le calcul de l'exposition était longue, plus cette diminution était forte. Aucune relation n'a été mise en évidence avec le bruit.

Olsen *et al.* (2014) se sont quant à eux intéressés aux effets à court terme de l'exposition aux $PM_{2.5}$ et aux PUF sur les fonctions respiratoire et cardiovasculaire chez l'adulte. A cette fin, ils ont constitué une cohorte de 81 adultes (51% d'hommes, 51 ± 12 ans en moyenne), sains, non-fumeurs, inclus dans la cohorte danoise en population générale Health2006. L'exposition aux polluants de l'air a été suivie pendant deux jours à l'aide : d'un système capteur de PUF positionné dans la pièce principale du domicile (81/81) ; d'un système capteur de PUF porté par les volontaires (57/81) ; et d'un système capteur de $PM_{2.5}$ positionné dans la pièce principale du domicile (72/81). Au terme de ces deux jours de mesure, la fonction respiratoire des volontaires a été explorée par spirométrie. La fonction endothéliale et la tension artérielle ont aussi été mesurées tandis qu'une prise de sang a été pratiquée afin de réaliser un hémogramme et un dosage de la protéine C réactive (CRP). Cette étude a ainsi relié une augmentation de l'exposition aux PUF à une diminution de la tonicité vasculaire et à une augmentation des marqueurs sanguins d'inflammation, et ces effets seraient moindres pour les PUF provenant de sources au domicile. Les résultats concernant les $PM_{2.5}$ de cette étude étaient non-conclusifs.

Smargiassi *et al.* (2014) ont étudié les effets à court terme des PM_{2,5} sur les fonctions cardiovasculaire et respiratoire dans une cohorte de 72 enfants (70% de garçons, 10 ans en moyenne), asthmatiques, vivant à Montréal à proximité d'une zone industrielle, suivis pendant 10 jours. L'exposition individuelle aux SO₂, NO₂, HAP, benzène et COV a par ailleurs été suivie par capteurs passifs. Une spirométrie était pratiquée chaque jour, de même qu'une mesure de la tension artérielle, de la fréquence cardiaque et de la saturation en oxygène. Les effets sanitaires de l'exposition moyenne aux PM_{2,5} du jour et du jour précédent des mesures de santé ont été étudiés. Aucune association n'a été observée entre l'exposition aux PM_{2,5} et les fonctions cardiovasculaire et respiratoire dans cette étude.

Paunescu *et al.* (2019) se sont penchés sur les effets à court terme des PUF sur l'inflammation bronchique chez 71 enfants (58% de garçons, 9 ans en moyenne) inclus dans la cohorte de naissance francilienne et en population générale PARIS. L'exposition aux PUF a été mesurée pendant 24h par un système capteur porté par l'enfant ; l'inflammation bronchique a été évaluée en mesurant la fraction expirée de monoxyde d'azote (FeNO) au terme de ces 24h. Une relation positive entre l'exposition aux PUF et l'inflammation bronchique a été observée. De plus, cet effet était plus marqué chez les enfants présentant des symptômes respiratoires persistants, un asthme ou une rhinite allergique.

Rabinovitch *et al.* (2016) ont suivi pendant cinq mois une cohorte de 30 enfants (10 ans en moyenne), asthmatiques et scolarisés à l'école primaire à Denver (Colorado, USA) afin d'étudier les effets à court terme de l'exposition aux PM_{1,5} sur l'inflammation bronchique et le contrôle de l'asthme. Un système capteur porté par les enfants a permis d'estimer leur exposition aux PM_{1,5} pendant 96h (de lundi midi à vendredi midi), à deux reprises au cours du suivi. L'inflammation bronchique a été évaluée par dosage urinaire quotidien de la leucotriène E4 tandis que le niveau de contrôle de l'asthme était estimé par le nombre de prises de bronchodilatateur par 24h. Le budget espace-temps des enfants a été reconstruit par données GPS. Les concentrations moyennes et maximales par microenvironnement (maison, transport, école) ont ensuite été calculées, de même que les variations de concentrations en PM_{1,5} (i.e. la différence entre les valeurs maximale et minimale mesurées par microenvironnement) et le nombre de variations (augmentation d'au moins +5 µg/m³). Pour chaque mesure de santé, les effets des expositions du même jour, du jour précédent ou de ces deux jours ont été testés. Les variables d'exposition basées sur les variations de concentration étaient plus spécifiques des microenvironnements fréquentés, d'où une meilleure caractérisation de l'exposition par microenvironnement. En analyse multivariée, les concentrations en PM_{1,5} étaient associées positivement à l'inflammation bronchique et négativement au contrôle de l'asthme, quelle que soit la variable d'exposition considérée. Les associations avec l'inflammation bronchique étaient plus fortes avec l'exposition du jour, en comparaison au jour précédent ou aux deux jours confondus.

Ong *et al.* (2019) ont constitué, dans le cadre d'une étude pilote, une cohorte de 52 jeunes enfants (50% de garçons, 5 ans en moyenne), sains et scolarisés à Kunming (Chine) afin d'étudier les effets à long terme de l'exposition aux PM_{2,5} sur le statut pondéral. L'exposition aux PM_{2,5} a été évaluée à l'aide d'un système capteur disposé au domicile des enfants (dans la pièce où l'enfant passe le plus de temps) pendant sept jours ; l'exposition moyenne sur la période de mesure a ensuite été calculée. Chaque enfant a été mesuré et pesé une fois, et l'indice de masse corporelle (IMC) a été calculé. Cette étude n'a pas mis en évidence de lien entre l'exposition aux PM_{2,5} et l'IMC.

Enfin, Dong *et al.* (2020) se sont intéressés aux effets à court terme de l'exposition aux PM_{2,5} sur la mortalité au travers d'une série temporelle (= étude écologique) sur la période 2013-

2017. Les niveaux de concentration en $PM_{2,5}$ en air intérieur ont été mesurés à l'aide des systèmes capteurs des individus disposés au sein de plus de 18 000 logements distribués dans 36 villes chinoises ; les concentrations moyennes journalières ont ensuite été calculées. Les concentrations massiques moyennes journalières en $PM_{2,5}$ en air extérieur ont été obtenues auprès du réseau de surveillance de la qualité de l'air chinois pour l'ensemble de la Chine. Sur la base des données de mesures en air intérieur, des concentrations en air extérieur et de données météorologiques et sociodémographiques, les auteurs ont ensuite créé un modèle prédictif de l'exposition aux $PM_{2,5}$ en air intérieur couvrant plus de 300 villes réparties sur le territoire chinois. Les moyennes journalières d'exposition aux $PM_{2,5}$ pondérées sur le temps moyen passé en intérieur et en extérieur ont enfin été calculées. Les données journalières de mortalité toute cause non-accidentelle ont été obtenues auprès du système de surveillance sanitaire chinois. Ces données de mortalité ont ensuite été croisées avec les niveaux de $PM_{2,5}$ estimés pour le jour même et les deux jours précédents. Cette étude a ainsi permis de montrer que les effets de l'exposition aux $PM_{2,5}$ sur la mortalité toute cause non-accidentelle, sur la mortalité cardiovasculaire et la mortalité respiratoire pourraient être doublés en comparaison aux effets sanitaires déjà décrits dans la littérature qui considéraient uniquement l'exposition aux $PM_{2,5}$ en air extérieur. Les effets estimés dans cette étude étaient plus forts lorsque les niveaux d'exposition du jour de mortalité étaient considérés.

6.2.4.3.4.1 Autres études

Parmi les études recensées, Chambers *et al.* (2016) sont les seuls à avoir étudié les effets à court terme de l'exposition combinée à deux polluants oxydants de l'air, le NO_2 et l'ozone, sur la fonction respiratoire, la survenue de symptômes d'asthme et le contrôle de l'asthme chez l'adulte asthmatique. Ils ont pour cela équipé d'un système capteur de ces deux polluants de l'air une cohorte de 32 adultes (52% d'hommes, 55 ± 13 ans en moyenne), avec un diagnostic d'asthme, vivant à Leicester (UK), non-fumeurs, pendant trois mois. Chaque jour, la FeNO et le débit expiratoire de pointe (DEP) étaient mesurés, et la survenue et la sévérité des symptômes d'asthme étaient déclarées par le biais d'un questionnaire standardisé. De plus, toutes les deux semaines, une spirométrie était pratiquée et deux questionnaires standardisés sur la qualité de vie de l'asthmatique et le contrôle de l'asthme étaient administrés. Les effets de l'exposition moyenne quotidienne au NO_2 et à l'ozone sur les mesures quotidiennes de santé ont été investigués en considérant les mesures de polluants et de santé du même jour et à jusqu'à plus ou moins sept jours. Pour les données de santé recueillies bimensuellement, c'est l'exposition moyenne sur les deux dernières semaines qui a été considérée. Cette étude n'a pas rapporté de relations entre les différentes fenêtres d'exposition et les différentes variables de santé considérées. Néanmoins, les symptômes d'asthme sont apparus plus fréquents, chez les femmes uniquement, lorsque l'exposition moyenne aux polluants oxydants de l'air du même jour augmentait.

6.2.4.3.4.2 Conclusion

Au regard des travaux identifiées dans la littérature, les études ayant investigué les effets sanitaires de l'exposition aux polluants de l'air sur la base de données de mesures produites par des systèmes capteurs considérés dans le cadre de cette saisine se sont principalement intéressées aux particules fines et ultrafines, et plus particulièrement aux $PM_{2,5}$. Les campagnes de mesures étaient menées sur des périodes de 24 heures à sept jours ; une seule étude a réalisé des mesures sur une période plus longue (trois mois). Dans la majeure partie des études inventoriées (9 sur 11), les systèmes capteurs étaient directement portés par les volontaires.

Les effets sanitaires étudiés concernaient majoritairement les fonctions cardiovasculaires et respiratoires. De plus, les effets sanitaires à court terme étaient les plus fréquemment étudiés. En effet, au travers des onze études présentées dans cette section, seules trois études ont investigué des effets à long terme. Le port des systèmes capteurs étant limité dans le temps pour des raisons techniques, logistiques, économiques et d'ergonomie, les auteurs ont parfois mené plusieurs campagnes de mesures pendant le suivi des volontaires, et de préférence au cours de saisons différentes afin d'approcher l'exposition chronique.

Les études identifiées dans la littérature étaient principalement des études de cohortes analysant des données individuelles, à l'exception d'une étude écologique de type série temporelle à l'échelle populationnelle. Ces études incluaient soit des adultes (N = 7) soit des enfants (N = 4). De plus, certaines études incluaient exclusivement des patients asthmatiques : une étude chez l'adulte et deux chez l'enfant. De façon générale, ces études incluaient un nombre restreint de volontaires, entre 32 et 122 participants chez l'adulte et entre 30 et 72 participants chez l'enfant. Ces effectifs pourraient expliquer, par manque de puissance statistique, l'absence de relation rapportée dans plusieurs études (5/11).

En conclusion, les systèmes capteurs apparaissent intéressants pour étudier les effets sanitaires de l'exposition aux polluants de l'air en fonction des microenvironnements fréquentés et des activités. De plus, les effets modificateurs de l'exposition aux polluants de l'air sur la relation entre l'activité physique et la santé ont pu être investigués grâce au suivi continu et en simultané des différentes dimensions. Les contraintes liées à l'emploi de systèmes capteurs les destinent préférentiellement à l'étude des effets sanitaires à court terme. Néanmoins, des auteurs ont opté pour une répétition des campagnes de mesures afin d'améliorer la caractérisation des expositions chroniques. De façon plus globale, les résultats déjà disponibles sont tirés d'études menées sur des effectifs relativement faibles, ce qui pourrait expliquer leur non-significativité par manque de puissance statistique suffisante. Quoi qu'il en soit, pour les études ayant rapportés des résultats concluants, les effets à court ou long terme observés allaient dans le sens de ce qui est connu par ailleurs.

6.2.5 Cas particulier des projets visant à utiliser des données de systèmes capteurs pour améliorer les cartographies et les modèles

Du fait du potentiel d'augmentation de la couverture spatio-temporelle offert par les systèmes capteurs (qui peuvent être installés en grand nombre sur du mobilier urbain, embarqués à bord de véhicules, ou portés par des volontaires), leur utilisation à des fins d'amélioration des cartographies de la qualité de l'air extérieur fait l'objet de plusieurs projets décrits ci-après.

Dans le cadre du projet DIAMS (Digital Alliance for Aix-Marseille Sustainability), plusieurs expérimentations visant à mobiliser les citoyens autour de la qualité de l'air seront conduites à l'initiative d'associations. Deux milles systèmes capteurs de particules (PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁) du groupe TERA devaient être déployés auprès de citoyens de la métropole Aix-Marseille Provence en 2021 mais la finalisation du projet DIAMS a été décalée à l'été 2022 du fait de la crise sanitaire. Les données recueillies permettront de disposer de données qui seront utilisées pour affiner la modélisation de la pollution de l'air en complément des mesures de stations fixes.

Airparif a également conduit ou participe à différentes expérimentations sur ce sujet :

- Expérimentation pour une meilleure connaissance de la qualité de l'air dans les écoles parisiennes 2019-2020, en partenariat avec la ville de Paris et Bloomberg Philanthropies : ce projet a pour objectif, entre autres, d'étudier l'intégration de données de systèmes capteurs à la cartographie par l'assimilation de données afin de renforcer les outils de simulation à très fine échelle, tant pour améliorer la représentation des niveaux de pollution dans des zones complexes, comme certains carrefours routiers, que pour renforcer la documentation et la représentation des variations entre des cours d'école et les rues avoisinantes.
- Projet Mesures et Perceptions : ce projet a pour objectif d'améliorer les connaissances sur les niveaux de pollution au cœur du trafic en testant un nouveau réseau de mesure et en appréhendant la perception des franciliens vis-à-vis de la qualité de l'air. Cette étude a été lancée en juin 2020 en collaboration avec Geoptis, une filiale du groupe La Poste et Atmotrack. Au total, 500 capteurs de particules Atmotrack sont embarqués sur des véhicules du groupe La Poste (voitures, camionnettes, vélos et remorques) et 100 capteurs sur des bâtiments, plateformes de distribution ou bureaux de poste. 72% des communes d'Île-de-France sont directement concernées par le déploiement de ces systèmes capteurs. Les données produites seront traitées et analysées en vue de tester leur pertinence et la valeur ajoutée de leur intégration aux cartographies d'Airparif.
- Le « projet » Pollutrack⁵⁶, en partenariat avec la SAS Pollutrack (développeur des systèmes capteurs), la mairie de Paris, la Fondation du souffle, Enedis, Marcel Cab et DPD pour le support des systèmes capteurs mobiles (Dixsaut et Renard, 2020) : ce projet a pour objectif d'identifier des sources locales de pollution à Paris à l'aide de systèmes capteurs mobiles de particules (de 0,3 à 10 µm) disposés sur les toits de véhicules électriques (approximativement 500 véhicules Enedis, 100 Zoé électriques VTC Marcel et 100 véhicules de livraison de colis DPD Chronopost). Chaque véhicule en circulation transmet une mesure toutes les 10 secondes, la valeur utilisée pour les calculs de concentration correspond à la moyenne horaire de l'ensemble des mesures réalisées par les différents systèmes capteurs en circulation. Les systèmes capteurs sont réétalonnés chaque jour au démarrage du véhicule par rapport à un appareil de référence et un contrôle qualité par interaction en boucle entre les systèmes capteurs mobiles et les stations de référence (pas d'information supplémentaire).

Les projets suivants ont également été transmis par Atmo AuRA à l'occasion de la consultation internationale :

- Le projet 3M Air (Mesures citoyennes Mobiles et Modélisation), financé par le Labex IMU (Intelligence des Mondes urbains) en partenariat avec les laboratoires CITI (INSA-Lyon/INRIA), EVS (UMR 5600), LMFA (UMR 5509), la Métropole de Lyon, la Ville de Lyon, Atmo AuRA, Météo France et Lyon Météo, vise à équiper des observateurs en systèmes capteurs d'air et à assurer ensuite une remontée efficace et en temps réel des données mesurées afin de générer des cartographies fines de température et de pollution de l'air ;
- Le projet Mobicit'air dans lequel un volet (volet 3) a pour objectif d'évaluer la plus-value apportée par un réseau fixe de systèmes capteurs (sélectionnés en se basant sur le volet 1 du projet visant à évaluer la fiabilité métrologique des capteurs disponibles sur le marché) pour la réalisation de cartographie de qualité de l'air à fine échelle.

⁵⁶ Des dispositifs similaires sont déployés dans d'autres villes ou régions, comme la Métropole de Lille ou le département de la Haute-Savoie (cf. projet Sillon'Air) par exemple.

- Le projet Sillon'Air qui vise à compléter l'information diffusée quotidiennement par Atmo AuRA en équipant 70 véhicules d'Enedis de systèmes capteurs de PM_{2,5} de Pollutrack (projet multi-partenarial entre Enedis, Pollutrack et Atmo AuRA).

Enfin, en 2021, l'Ineris, dans le cadre de ses travaux pour le LCSQA, a mis au point l'outil SESAM (*data fusion with SEnSors for Air quality Mapping*) permettant de fusionner les observations de systèmes capteurs fixes et mobiles avec les estimations d'un modèle urbain, en considérant les limites intrinsèques des systèmes capteurs. L'outil SESAM a été mis en oeuvre à Nantes, avec la fusion des données des systèmes capteurs de la société AtmoTrack et des sorties du modèle de dispersion ADMS-Urban, fournies par Air Pays de la Loire, et un guide d'utilisation a été publié (LCSQA, 2021).

7 Liste de points clés à prendre en compte pour qu'une donnée générée par un système capteur dans une étude puisse contribuer à l'évaluation de l'exposition individuelle

7.1 Méthode de travail

Afin d'identifier les points clés pour qu'une donnée générée par un système capteur soit valide pour contribuer à l'évaluation de l'exposition individuelle, le groupe de travail s'est appuyé sur l'analyse des projets portant sur l'utilisation des systèmes capteurs pour l'évaluation de l'exposition (Cf. partie 6.2), ainsi que sur le travail réalisé par le groupe de travail du LCSQA sur l'utilisation des systèmes capteurs selon différentes finalités (LCSQA, 2021).

Ainsi les différents objectifs d'utilisation des systèmes capteurs en lien avec une évaluation de l'exposition relevés sont les suivants :

- (a) Quantification de l'exposition
 - (a') Mesure des concentrations sans information (durée et population)
- (b) Étude de microenvironnements
 - (b') variabilité temporelle (saisonnalités -été/hiver, saisons sèche/pluvieuse-, jour/nuit...)
 - (b'') analyse d'activité
- (c) Quantification de la dose inhalée
- (d) Recherche d'un lien/association avec un ou plusieurs paramètres de santé
- (e) Enrichissement des données de modélisation / prévision
- (f) Autre (e.g. interaction avec différents types d'activités (sport, modes actifs, etc.)

Le groupe de travail a considéré l'ensemble de la chaîne d'utilisation des systèmes capteurs, et a défini une liste de points clés pour chaque maillon – Qualité de la mesure, Contextualisation / Mise en œuvre du capteur, Stockage et accessibilité des données, Pré-Traitement des données, Traitement des données, Interprétation. Ces points clés peuvent être intégrés intrinsèquement au système capteur ou bien nécessiter des analyses plus ou moins complexes des données des systèmes capteurs.

La criticité de chaque points-clés a été cotée en regard des objectifs recherchés de la façon suivante :

- **Indispensable** : Si l'information relative au point clé n'est pas disponible, la mesure ne peut pas être retenue pour évaluer l'exposition individuelle ;
- **Utile** : La connaissance de ce point clé améliore la qualité de l'interprétation ou la confiance dans le résultat ;
- **Optionnel** : La connaissance de ce point clé permet d'affiner l'interprétation.

Ces points-clés sont par ailleurs analysés selon les différentes possibilités de mise en œuvre des systèmes capteurs, à savoir lorsque le système capteur est positionné à un endroit fixe (en extérieur ou en intérieur), en prélèvement individuel (système portable), en mobilité (porté

par un individu se déplaçant entre différents microenvironnements, ou bien positionné sur un véhicule se déplaçant).

Dans certains cas, des exigences particulières ont été spécifiées par le groupe de travail.

7.2 Résultats

Parmi l'ensemble des points clés identifiés par le groupe de travail, 43% concernent la qualité de la mesure (Cf. tableau 10), 32% se rapportent à la contextualisation et la mise en œuvre du/des systèmes capteurs (Cf. tableau 11), et environ 25% se rapportent au stockage, prétraitement, traitement et interprétation des données (Cf. tableaux 12, 13 et 14).

Parmi les points les plus critiques, il convient de s'assurer que :

- Le système capteur permet d'identifier le polluant à mesurer de manière spécifique ;
- Le système capteur a fait l'objet d'une pré-qualification métrologique (connaissance préalable des performances dédiées à la détermination d'un mesurande* de type concentration afin de vérifier que ses spécifications sont compatibles avec l'objectif souhaité) ;
- La fiabilité de la donnée (qualité de la donnée, robustesse de la transmission des données, couverture temporelle) est renseignée ;
- L'utilisation du système capteur (hauteur en fixe, localisation (voies respiratoires)) est correcte et documentée et la couverture spatio-temporelle est suffisante et permet la représentativité des mesures effectuées ;
- L'ensemble des microenvironnements fréquentés, les activités prévues et événements imprévus sont décrits.

Tableau 10 : Points clés à considérer – Qualité de la mesure

Points clés	Exigences	Criticité		Objectifs	Intrinsèque au système capteur ou disponible dans l'étude
		Fixe	Portatif / Mobilité		
Identification du polluant à mesurer dans l'environnement cible	Identification spécifique indispensable	Indispensable		Tout objectif	Intrinsèque
Suivi des niveaux du polluant dans l'environnement cible	Echelle ordinale	Indispensable		Tout objectif	Intrinsèque
Évaluations initiales avant manipulations / Préqualification métrologique, Etalonnage si nécessaire	Cohérence avec le contexte de l'étude : tests constructeurs ou tests utilisateurs. dans des conditions d'usage similaires	Indispensable		Tout objectif	Etude
Reproductibilité (variabilité entre systèmes capteurs dans les mêmes conditions d'usage)	Compatible avec l'objectif de l'étude	Utile		Tout objectif	Etude
Exactitude (<i>combinaison de justesse* et fidélité</i>)	Compatible avec l'objectif de l'étude	Indispensable		Mesure de concentrations	Etude
		Utile		Autres objectifs	
Valeur de LD* et / ou LQ*	Les plus basses possibles et compatibles avec l'objectif de l'étude	Indispensable		Quantification exposition, lien effet sanitaire Mesure de concentrations	Intrinsèque
		Utile		Autres objectifs	
Plage de concentration (min - max)	Compatible avec l'environnement investigué	Indispensable		Tout objectif	Intrinsèque
Résolution de la mesure	Compatible avec l'usage	Indispensable		Tout objectif	Intrinsèque
Connaissance des autres paramètres : Dérive*, linéarité, influence T°, humidité, interférence* avec d'autres espèces chimiques	-	Utile		Tout objectif	Intrinsèque
Temps de réponse* du système capteur	Doit permettre de détecter les changements rapides dans l'environnement	Utile	Indispensable	Tout objectif	Intrinsèque
Fréquence d'échantillonnage sur le pas de temps d'acquisition	Compatible avec l'objectif de l'étude Connaître le rapport cyclique : durée de l'état actif par rapport à un phénomène périodique	Utile		Intrinsèque	Intrinsèque

Points clés	Exigences	Criticité		Objectifs	Intrinsèque au système capteur ou disponible dans l'étude
		Fixe	Portatif / Mobilité		
Horodatage / synchronisation	-	Indispensable		Tout objectif	Intrinsèque

Tableau 11 : Points clés à considérer – Contextualisation / Mise en œuvre du système capteur

Points clés	Exigences	Criticité		Objectifs	Intrinsèque au système capteur ou disponible dans l'étude
		Fixe	Portatif / Mobilité		
Connaissance des moyens et délais de récupération et/ou transmission des données	Doit être adapté à l'usage. Savoir si les données sont accessibles depuis le système capteur ou via un réseau.	Utile		Tout objectif	Intrinsèque
Connaissance des modalités de stockage des données	En adéquation avec l'objectif de l'étude - Connaître le type, la capacité et la durée de stockage possibles (local ou distant)	Utile		Tout objectif	Intrinsèque
Alimentation	Préciser la source d'alimentation, et l'impact sur la mesure. Si batterie : précision de l'autonomie vérifiée	Utile		Tout objectif	Intrinsèque
Position du système capteur : hauteur en fixe, localisation (voies respiratoires)	Doit être adapté à l'objectif et représentatif (par exemple un système capteur de COV positionné près d'une fenêtre ne sera pas représentatif de la pièce)	Utile	Indispensable	Tout objectif	Etude
Couverture spatiale	Compatible avec l'objectif de l'étude Permet de juger de la robustesse de l'étude : Distribution des systèmes capteurs de manière représentative d'une zone géographique ; Taille de la flotte pour représenter en mobilité un lieu (ville, territoire, chambre, etc.).	Indispensable		Tout objectif	Etude
Couverture temporelle	Compatible avec l'objectif de l'étude Vérifier que la durée est adaptée (horaire,	Indispensable		Tout objectif	Etude

Points clés	Exigences	Criticité		Objectifs	Intrinsèque au système capteur ou disponible dans l'étude
		Fixe	Portatif / Mobilité		
	journalière, mensuelle, saison, campagne de mesure).				
Modifications des conditions d'utilisation (par rapport aux conditions préconisées)	Savoir s'il y a des modifications, les raisons et l'évaluation de leur impact (détérioration du prélèvement ou de l'aérosol par exemple)	Indispensable		Tout objectif	Etude
(Géo) localisation (GPS ou autre définition de localisation)	Doit permettre l'interprétation	Indispensable sous réserve du respect du RGPD		Tout objectif	Intrinsèque ou étude
Description des environnements fréquentés : ensemble des attributs de contexte (directement par le remplissage d'un journal de bord ou indirectement via la recherche de signature ^{a)})	Compatible avec l'objectif de l'étude Connaître la méthode pour sa mise en œuvre	Utile		Mesure d'exposition intégrée	Etude
	Connaître : - les conditions de ventilation des environnements intérieurs (a minima type de ventilation et état général d'ouvertures de fenêtres) ; - le type de pièces pour les environnements intérieurs - les conditions météorologiques	Indispensable		Comparaison d'environnement	
	Compatible avec l'objectif de l'étude Connaître la méthode pour sa mise en œuvre	Indispensable		Autre objectif	
Description des activités prévues (tâches réalisées, données circulation) et événements imprévus (chantier, incidents, épisodes de pollution, etc.) (BET + journal de bord)	Pas de temps du BET compatible avec l'objectif de l'étude - Connaître la méthode pour déterminer le BET pour sa mise en œuvre	Utile		Tout objectif	Etude
Description de l'activité physique (marche, course, etc.) Ou autres activités (BET + journal de bord, données volontaire ou indirecte par déduction d'autres informations)	Compatible avec l'objectif de l'étude Connaître la méthode pour déterminer le BET pour sa mise en œuvre (données volontaire ou indirecte par déduction d'autres informations)	Optionnel		Tout objectif	Etude

Points clés	Exigences	Criticité		Objectifs	Intrinsèque au système capteur ou disponible dans l'étude
		Fixe	Portatif / Mobilité		
<i>^a recherche de signature^a c'est-à-dire qu'il peut être possible d'associer des événements passés au cours de la mesure à des signaux enregistrés : par exemple brutale chute de concentration associée à une ouverture de fenêtre, augmentation soudaine de la concentration lors d'un changement de microenvironnement)</i>					

Tableau 12 : Points clés à considérer – Stockage et accessibilité des données + Pré-Traitement des données

Points clés	Exigences	Criticité		Objectifs	Intrinsèque au système capteur ou disponible dans l'étude
		Fixe	Portatif / Mobilité		
Accessibilité à l'utilisateur, coordinateur étude, grand public	Description suffisante	Utile		Tout objectif, modulo respect réglementation RGPD en vigueur	Etude
Disposer d'une base de données unique de travail - 1 ^{er} niveau de traitement	Description des actions de traitement réalisées Nettoyage : <i>Erreur de codage, de transmission</i>	Indispensable		Tout objectif	Etude
Corrections apportées par l'utilisateur	Description des actions de traitement réalisées (Algorithme fourni et argumenté) Préparation de la base de données : définir la stratégie de traitement des valeurs manquantes, catégorisation des valeurs : aberrantes, suspectes, etc.)	Indispensable		Tout objectif	Etude
Présence/absence de pré-traitement des métadonnées (<i>position GPS, pertes de données GPS, BET, carnet bord, tags...</i>)	Connaître la qualité de ces métadonnées et si elles ont subi un pré-traitement	Indispensable		Tout objectif	Etude
<i>NB : Le pré-traitement des données correspond à la validation des sorties brutes du système capteur et à la préparation de la base de données</i>					

Tableau 13 : Points clés à considérer – Traitement des données

Points clés	Exigences	Criticité		Objectifs	Intrinsèque au système capteur ou disponible dans l'étude
		Fixe	Portatif / Mobilité		
Transformation des données (<i>création de variables, agrégation spatiale, temporelle, sur des variables, etc.</i>)	Description des transformations réalisées Savoir s'il y a eu des transformations et leur type	Indispensable		Tout objectif	Etude
Traitement des données censurées (< limite basse et > limite haute)	Connaitre les modalités de traitement	Indispensable		Tout objectif	Etude
Enrichissement par des données externes (<i>ex. mesures aux stations, sorties de modèles de qualité de l'air, météo, POI, trafic, données géographiques, etc.</i>)	Description de l'enrichissement réalisé Source des données externes	Utile		Tout objectif	Etude
Méthodes statistiques ou d'analyse de données de concentration, fouille de données, etc.	Description de la méthode	Indispensable si traitement réalisé		Tout objectif	Etude
Capacité à traiter un volume important de données et en un temps adapté à l'usage	-	Utile mais indispensable si contexte large échelle		Tout objectif	Etude
Méthode d'évaluation de l'exposition (durée, lieu, concentration)	Pertinence de la méthode	Indispensable si objet de l'étude		Quantification exposition	Etude
Méthode d'analyse du lien exposition (durée, lieu, concentration) et effets sanitaires, dose inhalée (en fonction de l'activité et de l'âge, etc.) et réponse de l'individu.	Pertinence de la méthode	Indispensable si objet de l'étude		Lien effet sanitaire	Etude

Tableau 14 : Point Clé clés à considérer – Interprétation

Points clés	Exigences	Criticité		Objectifs	Intrinsèque au système capteur ou disponible dans l'étude
		Fixe	Portatif / Mobilité		
Discussion/conclusion des auteurs heuristique et réflexive sur les éléments donnés de l'étude	Compréhensible	Utile		Tout objectif	Etude

8 Utilisation des données générées par les systèmes capteurs à des fins d'interprétation sanitaire

Les données produites lors de l'évaluation de l'exposition peuvent constituer une finalité en soi (e.g. pour identifier les lieux et conditions d'exposition, agir sur des sources d'exposition). Elles peuvent également être utilisées à des fins d'interprétation sanitaire dans le cadre d'une étude épidémiologique* (observationnelle ou interventionnelle) ou dans le cadre d'évaluation quantitative des risques sanitaires* (EQRS) ou d'évaluation quantitative des impacts sanitaires* (EQIS), ou comparées à d'autres indicateurs sanitaires comme des valeurs guides de qualité de l'air par exemple.

Les éléments présentés dans ce chapitre supposent que les données générées par les systèmes capteurs pour évaluer l'exposition soient valides, c'est-à-dire qu'elles respectent les points clés listés dans le chapitre 7.

8.1.1 Apports et limites de l'utilisation des systèmes capteurs en épidémiologie

8.1.1.1 Rappel des types d'études et des méthodes d'évaluation de l'exposition employées

Les études épidémiologiques* étiologiques, qui visent à étudier les relations entre un facteur (par exemple une exposition à un polluant) et la santé, peuvent être basées sur des données recueillies à l'échelle individuelle (e.g. études de cohorte*, études cas-témoin*, études transversales*) ou à l'échelle populationnelle (e.g. études de série temporelle ou études écologiques*). Les études de série temporelle sont considérées moins probantes que les études épidémiologiques* basées sur des données de santé recueillies à l'échelle de l'individu. Les liens entre un polluant et un effet sur la santé estimés par les études épidémiologiques sont exprimés sous forme de relations concentration-risque ou risque relatif (RR, OR) pour des expositions à court terme ou à long terme.

Les effets sanitaires à court terme liés à la pollution de l'air sont investigués principalement par des études de séries temporelles écologiques* qui peuvent couvrir de larges territoires. Les effets étudiés portent sur la mortalité et les recours aux soins, comme des taux d'admission en services hospitaliers et/ou des taux de passage aux services d'urgence. La concentration d'exposition est souvent estimée en moyenne journalière à partir de la concentration mesurée sur les stations de fond urbain situées sur l'ensemble du territoire étudié, par extrapolation ou interpolation des concentrations mesurées. Elle peut également être estimée à partir de modèles plus sophistiqués (ex : LUR ou CTM⁵⁷). Ces études écologiques évaluent par nature les risques à l'échelle d'une population et non les risques à

⁵⁷ Land Use Regression, Chemical Transport Model.

l'échelle d'un individu. Il peut aussi s'agir d'études de cohorte⁵⁸, et plus rarement d'études cas-témoins ou transversales*, avec des évaluations rapprochées de l'exposition et des événements de santé.

Les effets sanitaires à long terme (ou chroniques) **liés à la pollution de l'air** sont investigués principalement par des études de cohorte* qui peuvent porter sur de larges échantillons de la population générale, ainsi que des études cas-témoins et transversales. Ces études permettent de prendre en compte des facteurs de confusion individuels. Les effets étudiés portent sur la survenue de décès et/ou de pathologies. La concentration d'exposition est généralement estimée en moyenne annuelle à l'adresse de résidence⁵⁹, parfois complétée par le lieu de travail pour les actifs, l'école et/ou le lieu de garde pour les enfants, les lieux d'activités, etc. Ces concentrations sont issues de stations de mesures de référence représentatives d'une zone géographique assez large, et/ou de modélisation prédictive. L'utilisation de dispositifs de mesure portatifs dans ce type d'étude est encore limitée. Plus rarement, des études de séries temporelles peuvent également être mises en place.

Tableau 15 : Description des types d'études épidémiologiques* pour l'évaluation des effets sanitaires à court terme et à long terme de la pollution de l'air

	Types d'études épidémiologiques*	Échelle de l'évaluation de l'effet sanitaire	Sources de données utilisées pour l'évaluation de l'exposition à la pollution de l'air
Effets à long terme	- Cohorte* - Cas-témoins* - Transversale*	Individu	- Modélisation prédictive - Dispositifs de mesure fixes - Dispositifs de mesure portatifs
	- Études de série temporelle écologiques *	Population	- Modélisation prédictive - Dispositifs de mesure fixes
Effets à court terme	- Études de série temporelle écologiques*	Population	- Modélisation prédictive des variations de concentration (souvent journalière) - Dispositif de mesure fixes

⁵⁸ Le terme d'étude de « panel » est également employé par certains auteurs. Les études de panel portent sur un temps de suivi court, généralement de l'ordre de quelques semaines à quelques mois. Ces études suivent régulièrement le plus souvent un sous-groupe sensible de la population comme des enfants, des personnes souffrant d'asthme ou des personnes âgées. L'exposition et l'état de santé des individus sont évalués à intervalles réguliers, jours ou semaines le plus souvent, et de façon concomitante. Dans une étude de panel, les variations temporelles des niveaux d'exposition et l'incidence des effets à court terme potentiellement associés à ces expositions sont étudiées. Les données concernant la survenue des symptômes et l'état de santé sont recueillies au niveau individuel dans un « journal de bord » (Anses, 2016).

⁵⁹ A l'exception des études épidémiologiques portant spécifiquement sur la pollution de l'air intérieur.

	Types d'études épidémiologiques*	Échelle de l'évaluation de l'effet sanitaire	Sources de données utilisées pour l'évaluation de l'exposition à la pollution de l'air
	- Cohortes* - Cas-témoins* - Transversale*	Individu	- Modélisation prédictive - Dispositifs de mesure fixes - Dispositifs de mesure portatifs

Ces deux types d'effets sanitaires (i.e., à long et à court terme) font aussi l'objet d'études de synthèses qualitatives (revues systématiques) et quantitatives (méta-analyses⁶⁰).

Dans les études évaluant les effets sanitaires au niveau individuel (études de cohorte*, cas témoins et transversales*), le risque de mauvaise classification de l'exposition constitue la majeure source d'incertitudes dans l'évaluation de l'exposition à la pollution de l'air. Le plus souvent, ces études s'appuient sur des données de mesures ou de modélisation de la concentration ambiante en polluant à l'adresse du domicile. Ces interpolations considèrent principalement la concentration atmosphérique extérieure au lieu de vie alors que près de 90% du temps et passé en intérieur, et pas uniquement au domicile. Cette mauvaise classification de l'exposition peut se traduire par une diminution de la capacité à détecter les potentielles relations entre les polluants de l'air et les effets sanitaires ou par une sous-estimation des effets sanitaires. Ce phénomène est d'autant plus problématique pour les polluants de l'air présentant une grande variabilité spatiale, comme ceux en lien avec le trafic automobile. La prise en compte de lieux d'intérêt supplémentaires (e.g. lieux de travail, d'études, d'activités) et l'inclusion de mesures en air intérieur permettent néanmoins de limiter ce risque de mauvaise classification, bien qu'il demeure difficile en pratique de considérer l'ensemble des microenvironnements fréquentés par l'individu. L'hypothèse d'homogénéité des concentrations (au sein d'un microenvironnement) inhérente à cette approche peut être une source supplémentaire de mauvaise classification de l'exposition estimée à partir de dispositifs de mesure fixes.

En comparaison, le risque de mauvaise classification est potentiellement moindre dans le cadre d'une évaluation de l'exposition par un dispositif de mesure porté en continu par l'individu (ou déposé à sa proximité). Cependant, la précision de l'évaluation de l'exposition individuelle à la pollution de l'air par cette approche demeure dépendante de l'observance de l'individu (e.g. port, recharge et respect du système capteur et des autres dispositifs de mesures (GPS, accéléromètre, thermomètre, etc.), complétion des questionnaires). Le risque de mauvaise classification de l'exposition ne peut donc être totalement écarté malgré le recours à un dispositif portatif.

⁶⁰ Analyses consistant à rassembler les données issues d'études comparables et de les ré-analyser au moyen d'outils statistiques adéquats, très utiles pour répondre à une question précise de manière critique et quantitative et arriver ainsi à des conclusions plus solides que ne le permettent les études isolées. Elles permettent d'améliorer la puissance des résultats obtenus.

8.1.1.2 Usages potentiels des systèmes capteurs dans les études épidémiologiques

L'utilisation de systèmes capteurs dans des études épidémiologiques présente *a priori* de nombreux intérêts pour caractériser plus finement les expositions (cf. chapitre 6.1.3). En particulier, l'amélioration de la couverture spatio-temporelle, la prise en compte de lieux d'intérêts supplémentaires et l'augmentation du nombre de participants, associée à une meilleure observance⁶¹ du port des systèmes capteurs peuvent contribuer à diminuer le nombre de données manquantes, et donc à augmenter la validité de l'évaluation de l'exposition.

Cependant, l'utilisation de systèmes capteurs pour évaluer les effets à long terme de la pollution de l'air présente des limites liées au fait :

- Que le port d'un tel appareil n'est pas envisageable pendant de longues périodes (plusieurs mois à plusieurs années) pour des raisons ergonomiques, logistiques, financières et socio comportementales dans le cadre d'un protocole de recherche ;
- Que certains systèmes capteurs présentent des dérives importantes dans le temps et un manque de justesse associé à des LD* et LQ* parfois non adaptées ;
- Que les opérations de maintenance nécessaires ne font pas encore l'objet de suivis harmonisés et réguliers.

Par conséquent, les systèmes capteurs apparaissent ici particulièrement pertinents pour l'évaluation des expositions à court terme (de quelques heures à plusieurs jours). Pour l'évaluation des expositions à long terme, les données issues des systèmes capteurs pourront être combinées à des données de surveillance de la qualité de l'air ou de modélisation (cf. chapitre 6.2) en tenant compte du profil temps-activité de l'individu pendant la période de mesure (supposée représentative du quotidien du sujet) en comparaison à la période totale d'exposition considérée. En complément, des périodes de mesure répétées, à l'idéal pendant des saisons différentes de l'année afin de capturer les variations annuelles saisonnières dans les niveaux d'exposition du sujet, sont aussi envisageables si le suivi longitudinal des sujets le permet.

Par ailleurs, si les systèmes capteurs sont particulièrement d'intérêt pour l'étude des effets de la pollution de l'air au niveau de l'individu, ils peuvent également permettre une amélioration des cartographies et des modèles utilisés sur des échelles plus larges pour évaluer les effets de la pollution de l'air à l'échelle d'une population.

8.1.2 **Utilisations des données générées par les systèmes capteurs en EQRS* et en EQIS***

8.1.2.1 Rappels de la démarche d'EQRS*

L'EQRS* est une démarche méthodique de synthèse des connaissances scientifiques disponibles en vue d'évaluer les effets sur la santé résultant d'une exposition d'une population ou d'individus à une substance, un agent ou une situation dangereuse. En synthèse, ce processus se décline en 4 étapes :

⁶¹ Du fait de la réduction des contraintes techniques telles que l'alimentation en énergie et ergonomiques telles que l'encombrement, le poids et le bruit.

- Identification du danger ;
- Évaluation de la réponse (en fonction de la dose), établissement ou choix d'une valeur toxicologique de référence – VTR*)
- Évaluation de l'exposition ;
- Caractérisation du risque (comparaison de l'exposition à la VTR*).

L'évaluation de l'exposition pour l'EQRS* s'appuie le plus souvent sur des concentrations mesurées à l'aide de dispositifs de mesures fixes (généralement des campagnes de mesures spécifiques) ou de modélisation. Il est plus rare que des dispositifs de mesure portatifs/mobiles soient utilisés car jusqu'à présent, les campagnes de mesures utilisant ce type de dispositifs portent sur un nombre restreint d'individus et ne permettent pas, du fait de l'absence des métadonnées nécessaires, d'évaluer facilement les contributions des microenvironnements dans l'exposition globale.

La disponibilité de VTR* qui permet d'établir une relation quantitative entre l'exposition au polluant et ses effets sanitaires est nécessaire pour conduire une EQRS*. Les VTR* sont spécifiques d'un polluant (dans la quasi-totalité des cas ; beaucoup plus rarement, des valeurs peuvent être proposées pour des mélanges de substances, par exemple pour les HAP ou les dioxines) et d'une durée d'exposition court terme, intermédiaire ou long terme. Elles sont applicables à la population générale, incluant les populations sensibles (enfants, asthmatiques etc.).

8.1.2.2 Rappel de la démarche d'EQIS*

Les données présentées dans ce chapitre sont issues du « Guide pour la réalisation d'une évaluation quantitative des impacts sur la santé – EQIS* avec exposition mesurée » de Santé Publique France (SPF, 2019).

Les EQIS* de la pollution atmosphérique permettent de quantifier les impacts sur la santé d'une amélioration ou d'une dégradation de la qualité de l'air au sein d'une population. Elles s'appuient sur une démarche quantitative qui suppose une relation causale entre l'exposition à un polluant et la survenue d'un effet sur la santé, établie par les études épidémiologiques. Les EQIS* utilisent ainsi les relations concentration-risque ou risques relatifs (RR) issus des études épidémiologiques et les appliquent aux données de santé et environnementales propres à la zone étudiée.

Les RR associés aux effets à court terme de la pollution de l'air sont classiquement issus d'études de séries temporelles, tandis que les RR associés aux effets à long terme sont généralement issus d'études de cohortes. En EQIS*, l'exposition est évaluée au niveau de la population étudiée, en suivant l'hypothèse que la concentration sur la zone est représentative de la moyenne des expositions de la population de la zone d'étude. Les données de concentrations utilisées sont issues des stations fixes de référence de fond.

8.1.2.3 Utilisations de données générées par des systèmes capteurs en EQRS* et EQIS*

Pour la conduite EQRS* ou d'EQIS*, l'adéquation des données générées par les systèmes capteurs et des valeurs sanitaires (VTR* ou relation dose-réponse) doit être discutée au regard :

- De la temporalité : les données générées par les systèmes capteurs doivent être exprimées sur un pas de temps comparable à celui pour lequel la VTR* ou la relation dose-réponse a été établie (EQRS*) ou cohérent avec la période d'étude choisie (EQIS*) ;
- De la grandeur mesurée par les relations doses-réponses ;
- De la population d'étude : les systèmes capteurs doivent être déployés en nombre suffisant pour être représentatifs de la population d'étude, étant donné qu'une interprétation ne peut se faire, à ce niveau, qu'à une échelle populationnelle.

8.1.3 Autres données utiles pour interpréter une donnée générée par un système capteur sur le plan sanitaire

D'autres types d'indicateurs peuvent être utilisés pour interpréter sur le plan sanitaire une donnée générée par un système capteur :

- Des Valeurs guides de qualité de l'air intérieur* (VGAI) ou extérieur, telles que celles proposées par l'OMS (valeurs guides de qualité de l'air extérieur et intérieur) ou par l'Anses (VGAI) ;
- Des seuils intégrés aux systèmes capteurs (cf. chapitre 3.3.4).

La question de la comparabilité des données générées par les systèmes capteurs à ces indicateurs repose sur les mêmes critères que ceux exposés dans le chapitre 7.3.2 : temporalité, grandeur mesurée par la relation dose-réponse et population d'étude.

Enfin, le groupe de travail rappelle que les indicateurs « réglementaires » (de type seuil d'information ou d'alerte par exemple), dont l'élaboration intègre d'autres considérations que les effets sanitaires des polluants ne doivent pas être utilisés pour ce type de comparaison.

9 Cas particulier des utilisateurs de systèmes capteurs à titre privé

L'utilisation croissante de systèmes capteurs par des individus à titre privé soulève plusieurs questions :

- Comment les informations fournies par un système capteur sont-elles comprises par un individu ?
- Dans le cas d'utilisation massive de systèmes capteurs par des individus à titre privé, est-ce qu'il serait pertinent et réalisable de compiler les données générées et quelle utilisation de ces données pourrait être envisagée ?
 - **Interprétation des informations fournies par un système capteur utilisé par un individu à titre privé**

L'utilisation d'un système capteur par un individu nécessite de prendre en compte plusieurs considérations afin de pouvoir interpréter correctement les données générées.

Certains systèmes capteurs présentent des limites métrologiques importantes, et/ou nécessiteraient des opérations de maintenance régulières. Des données issues de tels systèmes capteurs peuvent induire l'individu en erreur sur ce qu'il pense « mesurer » avec son système capteur.

Selon l'objectif recherché, les informations fournies par un système capteur peuvent être de nature différente :

- Comparaison sous différentes formes des valeurs mesurées à des indicateurs préétablis ou à des indices de qualité de l'air (cf. chapitre 3.3.4).

La comparaison à des indicateurs préétablis ou à des indices de qualité de l'air, compte tenu de l'opacité et/ou de la non pertinence de cette comparaison (nombre restreint de paramètres mesurés, méconnaissance des modalités de calcul, intégration temporelle inadaptée, etc.), ne permet pas à l'individu de connaître son exposition à la pollution de l'air ou à un polluant spécifique.

- Valeur chiffrée du paramètre mesuré (concentration en polluant d'intérêt).

Un système capteur peut également fournir comme indication une valeur chiffrée de la concentration d'un polluant spécifique dans l'air. Cette concentration est parfois perçue par un individu comme représentative de son exposition individuelle. Or, l'évaluation de l'exposition individuelle à un polluant donné nécessite, en premier lieu de vérifier la validité du système capteur employé (système capteur conçu pour cet usage et validité métrologique) et de prendre en compte de nombreux paramètres clés pour la mise en œuvre de ce système capteur et de collecter de nombreuses informations auxiliaires pour établir le BET (cf. chapitre 7). En dehors d'une utilisation encadrée par un protocole, ce type d'information n'est généralement pas pris en compte par l'individu. Ainsi, l'indication seule de cette valeur de concentration n'est pas le reflet de l'exposition de l'individu.

Cette information chiffrée de la concentration n'est pas non plus directement comparable aux VTR et valeurs guides existantes en raison des données d'exposition sur lesquelles s'appuie les relations dose-réponse (temporalité et population d'étude différentes) (cf. chapitre 8).

Néanmoins, l'information chiffrée de la concentration permet à l'individu de comparer, de manière relative et qualitative, les niveaux de concentration auxquels il est exposé dans les différents microenvironnements qu'il côtoie, sous réserve d'une bonne utilisation d'un système capteur métrologiquement valide. Cette information lui permet également d'identifier d'éventuelles sources de pollution et d'agir en conséquence.

- **Pertinence et faisabilité de compiler et utiliser des données générées à titre privé ?**

De nombreuses plateformes *open source* de visualisation des données issues de systèmes capteurs existent comme Sensor.Community ou AirCasting (cf. chapitre 4.3.2), et permettent de mettre à disposition et/ou visualiser des données dans le cadre de projets encadrés ou non. Certains fabricants/distributeurs de systèmes capteurs ont également développé de telles plateformes comme par exemple Airvisual d'IQAir, sans qu'il soit possible de distinguer les différentes sources de données.

L'utilisation de systèmes capteurs à titre privé est source de nombreuses disparités, en premier lieu au niveau du système capteur utilisé : pour un même polluant, il existe plusieurs références avec des données métrologiques différentes (fiabilité, répétabilité, justesse, etc.). Les informations fournies varient également selon le modèle de système capteur : valeur chiffrée (temps réel, intégration sur des pas de temps différents, etc.), code couleur, indice de pollution, etc. L'accessibilité à ces données et aux éventuelles données complémentaires (localisation, durée d'utilisation, pas de temps d'intégration, etc.) n'est pas toujours possible. Sans protocole d'utilisation, les modalités de mises en œuvre peuvent différer d'un individu à un autre (durée d'utilisation, système capteur portatif ou positionné dans une pièce, système capteur portatif ou placé dans un sac à dos par exemple).

Ces disparités peuvent constituer un frein à la compilation des données générées à titre privé. Certains auteurs avancent le fait que la disponibilité d'une masse importante (numéraire) de données, même imparfaites, peut permettre de lisser les imperfections de ces données (Giroud *et al.* 2016). Cette question, dans le cadre d'une utilisation de systèmes capteurs par des individus à titre privé, reste ouverte et suscite de nombreuses réflexions complémentaires : comment recenser et collecter ces données ? Comment disposer d'informations sur le contexte de mesure ? Comment stocker ces données ? Étant donné la multiplicité des paramètres, métadonnées et attributs de contexte associées, l'architecture de la base de données pourrait être complexe.

Dans l'hypothèse où de telles données seraient disponibles, les mêmes limites d'utilisation dans le cadre d'une EQRS* ou d'une EQIS* que celles soulignées précédemment s'imposent (comparabilité des données d'expositions avec les indicateurs sanitaires). Toutefois, la massification des données pourrait permettre d'approcher l'exposition d'une population d'étude donnée, et d'enrichir les cartographies et la modélisation de la pollution de l'air.

10 Statut juridique des données générées par les systèmes capteurs

Les éléments présentés dans ce chapitre sont issus du site de la CNIL et des auditions d'experts juristes réalisées dans le cadre de cette expertise. Ce chapitre vise à discuter du statut juridique des données générées par les systèmes capteurs dans un contexte d'expansion rapide de ces technologies auprès de la population générale et des bases de données en *open source* permettant la remontée, le partage et la réutilisation de ces données. Ce chapitre n'est pas un guide destiné aux porteurs de projets qui doivent se référer aux administrations compétentes pour s'assurer de la conformité de projet au regard de la réglementation applicable en termes de protection des données (CNIL).

Les données environnementales peuvent être soumises à différents régimes à articuler, notamment quand il s'agit de données à caractère personnel. Par exemple, des données issues de systèmes capteurs peuvent être à la fois des données publiques, car collectées ou produites par l'administration, et des données privées car elles comportent un élément d'identification des personnes physiques.

10.1 Règlement Général de Protection des Données (RGPD)

En Europe, le RGPD⁶² relatif à la protection des personnes physiques à l'égard du traitement des données à caractère personnel et à la libre circulation de ces données a pour vocation d'encadrer tout ce qui relève de la collecte et du traitement des données à caractère personnel. Le RGPD s'applique à toute organisation publique ou privée qui traite des données personnelles pour son compte ou non dès lors qu'elle est établie **sur le territoire de l'UE ou que son activité cible directement des résidents européens**. Ce règlement s'applique également aux **sous-traitants** qui traitent des données personnelles pour le compte d'autres organismes.

Une **donnée personnelle**⁶³ est toute information se rapportant à une personne physique identifiée ou identifiable. Une personne physique peut être identifiée directement (par exemple à partir de son nom et prénom) ou indirectement (par croisement, inférence ou déduction, par exemple à partir d'un numéro de sécurité sociale), à partir d'une seule donnée ou d'un croisement de données. Parmi les données personnelles on distingue les **données sensibles**, qui révèlent la prétendue origine raciale ou ethnique, les opinions politiques, les convictions religieuses ou philosophiques ou l'appartenance syndicale, ainsi que le traitement des données génétiques, des données biométriques aux fins d'identifier une personne physique de manière unique, des données concernant la santé ou des données concernant la vie sexuelle ou l'orientation sexuelle d'une personne physique. Elles sont encadrées de façon stricte. La collecte et l'utilisation de ces données sensibles ne sont possibles que dans des

⁶² Règlement UE 2016/679 du Parlement européen et du Conseil du 27 avril 2016 relatif à la protection des personnes physiques à l'égard du traitement des données à caractère personnel et à la libre circulation de ces données.

⁶³ <https://www.cnil.fr/fr/definition/donnee-personnelle>

cadres très précis. Sont concernés ici particulièrement certains projets mettant en œuvre des systèmes capteurs à des fins d'étude des effets sanitaires de la pollution de l'air.

Des données environnementales de mesures de concentration de polluants dans l'air ne sont pas des données personnelles en tant que telles mais le déploiement de systèmes capteurs auprès d'individus amène à considérer la question de la protection des données personnelles lors de la collecte, de l'usage et du partage de ces données dès lors qu'elles sont associées à des données permettant l'identification directe ou indirecte des personnes physiques ayant fourni ces données. En plus des données directement identifiantes (nom-prénom et adresse par exemple), la plupart du temps, une donnée de mesure dans l'air sera une donnée personnelle par rapport à sa géolocalisation, d'autant plus s'il s'agit de systèmes capteurs portatifs. Ces données de géolocalisation sont problématiques à double titre : d'une part, elles peuvent servir à ré-identifier des contributeurs à une collecte en dérivant par exemple les lieux du domicile et du travail ; et d'autre part, leur collecte peut être très intrusive car elle trace les habitudes personnelles et les relations sociales du porteur. A ce titre, les données de géolocalisation peuvent devenir des données sensibles puisqu'elles peuvent révéler des informations concernant par exemple les convictions religieuses ou la santé *via* l'étude des lieux fréquentés par les individus.

Le RGPD doit donc être appliqué lors de la mise en place de projets mettant en œuvre des systèmes capteurs par des individus dès lors que des données personnelles sont collectées. Il est donc nécessaire de disposer d'une base légale pour effectuer la collecte et le traitement des données personnelles. Celle-ci requiert généralement le consentement des participants, qui se fait sur la base d'informations qui concernent :

- La finalité du traitement des données, c'est-à-dire l'objectif poursuivi dans le traitement ;
- La durée de conservation des données ;
- Le rappel et la garantie des droits reconnus⁶⁴ aux personnes concernées : droit d'accès, droit de rectification, d'opposition, de retrait, sur toute la durée de conservation des données personnelles.

C'est le **responsable du traitement des données à caractère personnel** qui doit contrôler le respect RGPD. Le responsable de traitement est la personne morale (entreprise, commune, etc.) ou physique qui détermine les finalités et les moyens d'un traitement, c'est-à-dire l'objectif et la façon de le réaliser (cf. chapitre 3.4).

Une des clés pour pouvoir traiter des données personnelles est leur **anonymisation** (le fait de rendre impossible toute identification de la personne), idéalement le plus tôt possible dès la collecte des données pour réduire les risques d'atteintes à ces données. **Une donnée anonymisée ne relève plus du RGPD**. Un individu ou un organisme souhaitant utiliser les données anonymisées n'est plus redevable des obligations qui incombent aux données

⁶⁴ La notion de « propriété des données » est un abus de langage en droit. Cette notion n'a pas de sens du point de vue juridique puisque même si le coordinateur de l'étude a la maîtrise de la base de données, chaque individu conserve des droits sur ses données, y compris celui de décider de ne plus participer à la collecte et de retirer ses données.

personnelles et peut exploiter ou utiliser les données comme il le souhaite (les publier en données ouvertes/pendata par exemple). Il n'y a plus de notion de finalité des données.

Si l'anonymisation n'est pas garantie, une donnée ne peut pas être publiée, exploitée ou utilisée. En effet, l'anonymisation totale d'une donnée de géolocalisation est un processus difficile.

Il existe de nombreuses approches de préservation des données personnelles de géolocalisation. La plupart se base sur les principes généraux de la confidentialité : la k-anonymité qui vise à rendre indissociables un individu dans un groupe de k individus ; la l-diversité qui est une extension de la précédente et qui veille en plus à la diversité des données sensibles dans le groupe ; la confidentialité différentielle qui vise les garanties pour les analyses statistiques (Dwork, 2006). L'objectif des algorithmes d'anonymisation de données géolocalisées est de garantir un de ces principes, tout en maintenant un certain niveau d'utilité des données anonymisées (Brickell et Shmatikov, 2008) (pour des analyses statistiques par exemple). De nombreuses méthodes ont été proposées, dont le camouflage par généralisation (Mokbel *et al.* 2006) ou par zones de mixage (Beresford et Staiano, 2003), la généralisation ou la perturbation en ajoutant du bruit (Abul *et al.* 2008). Ces techniques ne suffisent pas face aux attaques utilisant des connaissances préalables sur les localisations des personnes.

Les méthodes les plus récentes tentent d'enrayer ce risque par des algorithmes génératifs dont le principe est de produire des données de synthèse ayant les propriétés statistiques de distribution spatiotemporelle des données initiales (Pelekis *et al.* 2016 ; Gursoy *et al.* 2018 ; Ouyang *et al.* 2018 ; Rao *et al.* 2020 ; Choi *et al.* 2021). Ainsi, ils brisent le lien avec les données individuelles de départ et permettent néanmoins d'exploiter les données. Mais son application reste limitée. Enfin, une autre alternative pour analyser la mobilité sur les données réelles sans partager ces données émerge, qui consiste à déporter l'analyse ou une partie côté utilisateur, en exploitant les capacités grandissantes des smartphones de calcul et de communication. Ainsi, PAMPAS (Sandu Popa *et al.* 2019) met en œuvre une architecture centrée sur l'utilisateur qui agrège les observations lors d'une collecte participative, en préconisant l'usage de composants sécurisés. D'autres travaux plus récents se sont focalisés sur la fouille de données de mobilité en suivant le paradigme de l'apprentissage fédéré (Wang *et al.* 2020 ; Chelly Dagdia *et al.* 2021). Ce dernier consiste à distribuer l'algorithme d'apprentissage le plus près de la source et de partager les modèles appris plutôt que les données. En réalité, l'ajustement du modèle se fait de manière itérative avant de converger vers un modèle global. En dépit des avancées dans ce domaine (Pratesi *et al.* 2018 ; Pappalardo *et al.* 2019), les travaux continuent sur cette problématique liée à la mobilité humaine (Barbosa *et al.* 2018 ; Jin *et al.* 2021).

La figure 12 présente une illustration des méthodes de préservation de la confidentialité des données de géolocalisation.

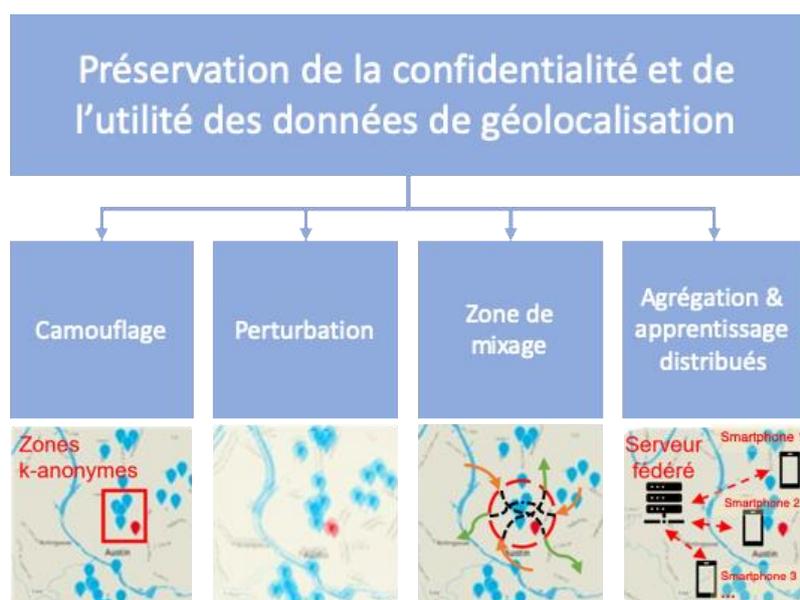


Figure 11 : Illustration des méthodes de préservation de la confidentialité des données de géolocalisation

10.2 Régime des données ouvertes

L'accès du public à l'information en matière d'environnement est un des volets de la convention d'Aarhus (1998), qui vise aussi à la participation du public au processus décisionnel et à l'accès à la justice en matière d'environnement. En Europe, ce cadre juridique a été renforcé par la Directive 2003/4/CE, puis par la directive INSPIRE (Directive 2007/2/CE) qui se traduit par une obligation de diffusion de l'information géographique, dont celle sur l'environnement. La diffusion des données s'inscrit dorénavant dans un cadre plus large que l'information environnementale et l'information géographique, celui des données ouvertes.

Le régime des données ouvertes concerne les données générées par les administrations publiques qui ont l'obligation de mettre ces données à disposition du grand public, gratuitement, dans des formats ouverts, permettant la réutilisation des données, et sans qu'il y ait d'exclusivité d'usage (c'est-à-dire que les administrations ne peuvent pas accorder une exclusivité à un partenaire plutôt qu'à un autre). La notion de données ouvertes (qui concerne les données générées par les administrations publiques) doit être distinguée de la notion de mise à disposition à titre gratuit ou payant, lorsqu'il s'agit de données générées par des acteurs privés. Dans tous les cas, ces données mises à disposition en données ouvertes, doivent respecter le RGPD à savoir, qu'aucune donnée permettant d'identifier directement ou indirectement une personne physique ne peut être mise en données ouvertes. Le régime des données ouvertes suit les principes de mise à disposition, avec quelques exceptions : la limite de cette obligation de diffusion est toujours la protection des données à caractère personnel. Si, dans le cadre d'un projet de recherche par exemple, il n'est pas possible d'anonymiser des données, et que la mise à disposition pourrait contrevenir à la protection des données à

caractère personnel alors l'organisme de recherche n'a plus d'obligation de mise à disposition de ces données, même si elles sont générées sur des fonds publics.

Pour pouvoir utiliser des données en données ouvertes ou mises à disposition de façon gratuite ou payante, il faut s'assurer que les données respectent bien le RGPD, et qu'il y a une garantie de la part des sociétés que les données peuvent être utilisées sans risque d'atteinte à la protection des données à caractère personnel. Si le destinataire s'aperçoit que des données à caractère personnel sont présentes et que le travail d'anonymisation complète n'a pas été réalisé en amont, il ne peut pas se décharger complètement de sa responsabilité. Une tierce personne pourra toujours objecter qu'il était visible et manifeste que certaines données étaient à caractère personnel, et dans ce cas-là l'utilisateur des données ne peut pas ignorer le régime de protection des données à caractère personnel.

11 Discussion et conclusion

Le domaine des systèmes capteurs connaît une forte évolution depuis quelques années s'illustrant par une multiplication des technologies disponibles sur le marché et un nombre croissant d'études et de projets sur le sujet.

▪ **Etat des lieux des projets portant sur les systèmes capteurs**

Jusqu'à présent, les études des systèmes capteurs portaient principalement sur l'évaluation de leurs performances métrologiques, en l'absence de cadre normatif permettant de comparer ces dispositifs aux instruments de mesure mis en œuvre dans les méthodes de référence. En ont découlé plusieurs projets visant à informer les utilisateurs sur les capacités des systèmes capteurs et à les guider sur le choix du dispositif selon l'usage. L'exactitude et la fiabilité des mesures des systèmes capteurs, bien que très variables selon les technologies et les polluants, restent inférieures à celles attendues dans les méthodes de référence. Toutefois des améliorations sont en cours. Au-delà de la qualité métrologique, d'autres paramètres sont à prendre en compte lors du choix d'un système capteur tels que ses dimensions, son autonomie, sa portabilité et son prix. Au-delà de l'impact environnemental que peut engendrer le déploiement de systèmes capteurs, ce paramètre peut être un critère de choix des systèmes capteurs compte tenu de leur durée de vie, de leur lieu de fabrication et des modalités de stockage et de transmission des données. Depuis 2010, de très nombreux projets impliquant le citoyen ont été conduits pour sensibiliser les individus à la pollution de l'air. Des plateformes de visualisation, voire de partage des données générées, ont émergé dans un premier temps à destination des participants des études, puis ouvertes plus largement. Certains fabricants proposent également leurs propres outils de cartographie, sans qu'il soit toujours évident de distinguer les données issues de systèmes capteurs d'autres données issues de stations de mesure de référence ou de modélisation.

Cet accès plus large aux données de la qualité de l'air qu'offrent les systèmes capteurs s'ajoute aux données produites par les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) et peut ainsi conduire les citoyens à s'interroger sur les différences observées entre les données de systèmes capteurs et les données officielles. Plusieurs paramètres expliquent ces différences, notamment la moindre qualité métrologique des systèmes capteurs par rapport aux méthodes de référence pour les données officielles, et les différences de résolution spatio-temporelle (zone et période d'intégration de la donnée). Ces nouvelles sources de données conduisent également les institutions à faire évoluer leurs pratiques et réfléchir aux modalités d'utilisation de ces dispositifs et des données produites pour divers objectifs (sensibilisation, changement de comportement, surveillance...).

▪ **Utilisation des systèmes capteurs pour évaluer l'exposition individuelle à la pollution de l'air**

Les systèmes capteurs offrent de nombreuses perspectives dans le domaine de l'évaluation de l'exposition individuelle. Les systèmes capteurs portatifs, du fait de la miniaturisation, sont facilement portés par les individus pendant leurs activités quotidiennes, ce qui permet d'intégrer les différents microenvironnements fréquentés et les conditions d'exposition propres à chaque individu, avec les mesures en temps quasi réel. A plus large échelle, le coût d'achat initial et l'encombrement réduit des systèmes capteurs permettent également la multiplication

des points de mesure et l'instrumentation de microenvironnements jusque-là encore peu ou pas étudiés. Mais la qualité métrologique des mesures de concentration de polluant demeure la principale limite des systèmes.

L'utilisation de systèmes capteurs pour l'évaluation de l'exposition individuelle à la pollution de l'air est récente. Les projets dans ce domaine sont très hétérogènes en termes de moyens et d'objectifs associés allant de l'étude de faisabilité sur très peu de participants, au projet se déroulant sur plusieurs années auprès de larges populations. Dans la quasi-totalité des études, les systèmes capteurs sont des dispositifs réservés au domaine de la recherche (coûts plus élevés, complexité de mise en œuvre) ou développés spécifiquement pour les besoins de l'étude. La moitié des publications ne fait pas explicitement référence à une qualification métrologique des systèmes capteurs, même si on peut penser que les équipes se sont assurées de la validité du système utilisé, limitant de ce fait la confiance accordée aux résultats. Aucune étude ne fait référence à une qualification des systèmes capteurs en mobilité. Ceci peut être lié au caractère émergent des applications en mobilité et de leurs protocoles d'évaluation.

Bien que ces dispositifs soient faciles à porter, l'acceptabilité de leur port sur de longues périodes peut être problématique et leur autonomie est encore limitée, ce qui les destine préférentiellement à l'étude des expositions à court terme. Dans les études identifiées, les systèmes capteurs sont utilisés sur des périodes courtes (1 semaine à 10 jours), parfois répétées. L'évaluation de l'exposition s'appuie sur des données de Budget-Espace-Temps-Activités (BETA) et parfois sur des enquêtes de mobilité. Les données des systèmes capteurs sont régulièrement complétées par celles issues de stations de mesure de référence et/ou de modélisation.

Les systèmes capteurs apparaissent donc comme des dispositifs complémentaires aux sources de données ou méthodes d'évaluation de l'exposition déjà utilisées dans le cadre d'études d'expologie. Par ailleurs, les systèmes capteurs pourraient permettre d'optimiser les cartographies (à l'échelle spatiale et temporelle) et les modèles à large échelle contribuant ainsi à une amélioration de l'estimation de l'exposition à la pollution de l'air.

- **Points clés à prendre en compte pour qu'une donnée générée par un système capteur puisse contribuer à l'évaluation de l'exposition individuelle**

L'analyse montre qu'au-delà de l'exactitude métrologique du système capteur, qui reste encore la principale condition pour évaluer l'exposition individuelle, de nombreux autres points doivent être satisfaits. Parmi ces points clés, ceux en lien avec la contextualisation et la mise en œuvre du/des systèmes capteurs (représentativité et couverture spatio-temporelle, description des microenvironnements fréquentés, des activités prévues et événements imprévus) sont primordiaux.

- **Interprétation sanitaire des données générées par les systèmes capteurs dans le cadre d'étude ou par comparaison avec des référentiels sanitaires**

Sur le plan sanitaire, l'utilisation des données d'exposition générées par les systèmes capteurs (considérées comme valides) en vue d'EQRS ou d'EQIS nécessite de s'interroger sur l'adéquation de ces données avec les relations dose-réponse établies pour une exposition horaire, journalière ou annuelle qui serviront à quantifier le risque sanitaire. Une utilisation adéquate nécessite en conséquence que les mesures de systèmes capteurs soient intégrées sur le même pas de temps que celui utilisé pour établir la relation dose-réponse. De plus ces

mesures doivent être répétées sur l'année pour être représentatives de l'exposition étudiée sur le moyen ou long terme. De surcroît, une donnée générée par un système capteur portatif, intégrant les différentes sources auxquelles est exposé un individu, ne peut être considérée comme représentative de l'exposition d'une population. Il convient donc de s'assurer que les systèmes capteurs sont déployés en nombre suffisant pour être représentatif de la population d'étude.

Par ailleurs, si les systèmes capteurs sont particulièrement d'intérêt pour l'étude des effets de la pollution de l'air à court terme au niveau de l'individu, ils peuvent également contribuer à l'évaluation des effets de la pollution de l'air sur des échelles plus larges (systèmes capteurs fixes et/ou via l'amélioration des cartographies et des modèles).

▪ **Cas particulier des utilisateurs de systèmes capteurs à titre privé**

À titre privé, l'utilisation de systèmes capteurs est intéressante pour identifier des sources ou lieux d'exposition ou des variations spatio-temporelles, sous réserve de qualification métrologique du dispositif et de conditions appropriées d'utilisation. La compréhension des données de mesures nécessite un certain degré d'expertise, et notamment une bonne connaissance des capacités et limites des systèmes capteurs. Dans la majorité des cas, les systèmes capteurs délivrent une information visuelle du niveau de pollution ou des messages sur le risque encouru pour la santé (code couleur, alertes). De telles informations doivent être considérées avec prudence car leur élaboration n'est généralement pas explicitée ni adaptée à des mesures quasi-instantanées. Une compréhension correcte des informations nécessiterait également de bien connaître les différentes valeurs sanitaires et leurs modes de construction. Un accompagnement pour comprendre correctement ces informations est donc indispensable. Enfin, l'assimilation de la mesure d'un ou quelques polluants de l'air à la « qualité de l'air », masque la complexité de cette notion, qui ne se réduit pas à un ou quelques polluants, que ce soit en air extérieur ou en air intérieur ; pour exemple des systèmes capteurs dits « de qualité de l'air » ne mesurent que le CO₂ en air intérieur ou les particules en air extérieur).

L'utilisation de données de systèmes capteurs générées massivement par des individus, en dehors de tout cadre d'étude se heurte aux limites métrologiques. Il est avancé que la massification des mesures pourrait pallier cette faible qualité métrologique, qui nécessiterait cependant l'utilisation de systèmes capteurs de technologies et/ou d'algorithmes de calculs différents.

Par ailleurs, une utilisation massive de systèmes capteurs par des individus pose des difficultés pour la compilation des données générées. Ces difficultés peuvent par exemple être liées à la qualité métrologique, aux modalités de mise en œuvre, à l'accessibilité aux données générées, ou aux informations fournies par différents systèmes capteurs. Ce champ d'étude encore peu développé nécessiterait d'investiguer des modes de collecte, de traitement et de diffusion des données.

▪ **Etat des lieux des profils et motivations des utilisateurs de systèmes capteurs**

L'état des lieux des profils et motivations des utilisateurs de systèmes capteurs (volume 2) montre que les systèmes capteurs peuvent constituer un support de médiation scientifique et de participation citoyenne à la condition que les collectifs de « citoyens capteurs » soient accompagnés lors de campagnes de mesures. Dès lors, engageant des publics aux profils diversifiés dont la motivation première est leur santé et celle de leurs proches, ces campagnes

conduisent les participants à mettre en pratique de nouvelles habitudes dans les modes d'habitat et de déplacement. La fabrication de tout ou partie des systèmes capteurs constitue un motif d'intérêt pour certains utilisateurs technophiles. Une amélioration des connaissances scientifiques et une montée en compétences techniques sur tous les aspects de la qualité de l'air (physico-chimie de la pollution, effets sur la santé, disparités socio-géographiques) est rapportée par la plupart des personnes interrogées.

- **Statut juridique des données collectées par les systèmes capteurs**

Enfin, une vigilance importante doit être portée sur l'utilisation de données générées par les systèmes capteurs en matière de protection des données personnelles dès lors que leur utilisation permet, de façon directe ou indirecte l'identification de la personne réalisant les mesures. En Europe, l'utilisation de données personnelles est encadrée par le RGPD qui donne un principe général sur la collecte et le traitement des données personnelles. Le responsable du traitement des données est un acteur central qui doit veiller au respect des données personnelles.

- **Perspectives**

L'essor des systèmes capteurs, leurs développements technologiques et leur accès facilité contribuent à un marché qui se développe en dehors d'un cadre normatif. L'usage de systèmes capteurs par un nombre croissant d'utilisateurs et d'experts conduit à une multiplication des données, et les avancées technologiques de la chaîne de mesure stimulent le niveau d'exigence de qualité des données attendue par tous.

Il existe un fort potentiel de progrès au niveau des principes de détection. Bien que le marché des éléments sensibles ait peu évolué ces dernières années, des solutions issues de la recherche, comme l'usage de nouveaux nano-composites sensibles fonctionnalisés, la mesure à base d'ondes acoustiques ou de microbalances à quartz ou encore la miniaturisation de méthodes optiques ou photo acoustiques, pourraient aboutir à court ou moyen termes à de nouveaux sauts technologiques.

Par ailleurs, une amélioration notable des performances est envisagée par la mise en œuvre de ces éléments sensibles dans des boîtiers où la fluidique est pensée et optimisée pour maximiser leur réponse ; l'intégration de filtres fonctionnalisés et la compartimentation physique entre l'espace de mesure et l'électronique d'acquisition permettront également de limiter les interférences croisées, et l'influence de paramètres comme l'humidité, la température, les ondes électromagnétiques.

Enfin, les avancées récentes en matière de traitement de données et d'intelligence artificielle, doivent également accroître la qualité de l'information délivrée par les systèmes capteurs.

12 Recommandations du groupe de travail

Le groupe de travail émet les recommandations suivantes à destination des fabricants et distributeurs de systèmes capteurs, des utilisateurs de systèmes capteurs à titre privé, des acteurs de la recherche, et des administrations publiques.

Le groupe de travail alerte ces différents acteurs sur le fait que des données de systèmes capteurs, du fait de leur géolocalisation, peuvent constituer des données personnelles incluant potentiellement des informations sur les habitudes de vie des utilisateurs. **Le groupe de travail recommande donc à l'ensemble des acteurs de veiller au respect de la réglementation relative à la protection des données personnelles (RGPD), en s'appuyant sur les recommandations de la CNIL.**

A. Recommandations aux fabricants et distributeurs de systèmes capteurs

Le groupe de travail recommande aux développeurs, fabricants, et entreprises commercialisant les systèmes capteurs :

1. De poursuivre les efforts pour améliorer la qualité métrologique des systèmes capteurs ;
2. De documenter et rendre accessibles à tous les utilisateurs les informations relatives aux performances métrologiques, aux conditions d'utilisation et à l'interprétation des données générées. Sur ce point, le groupe de travail encourage les fabricants de systèmes capteurs à participer aux différents dispositifs d'évaluation des systèmes capteurs allant de l'intercomparaison à une méthode de référence (challenges AIRLAB, LCSQA – essais d'aptitudes) jusqu'à la certification volontaire de leurs performances au regard de la directive de surveillance de la qualité de l'air⁶⁵ (LNE/INERIS – Air'Quality Sensor) ;
3. De mener ou soutenir des recherches sur les principes physiques de détection tant pour les composés gazeux que particulaires ;
4. De développer des systèmes capteurs de polluants d'intérêts sur le plan sanitaire notamment ceux identifiés par l'OMS⁶⁶ et d'autres agences officielles⁶⁷ et des systèmes capteurs multipolluants.

Le groupe de travail rappelle que les données issues des systèmes capteurs peuvent être comparées aux valeurs guides de qualité de l'air si ces données générées en temps quasi-réel sont intégrées sur un pas de temps adéquat. De plus, le groupe de travail rappelle que ces valeurs guides, définies au niveau populationnel, ne sont pas adaptées pour interpréter un risque au niveau individuel. En conséquence le groupe de travail suggère, de développer des indicateurs d'exposition relatifs permettant de situer une mesure individuelle par rapport à des mesures comparables. Cela permettra d'informer l'utilisateur sur son exposition par rapport à celle des autres utilisateurs ou par rapport à sa propre exposition sur une période et dans des microenvironnements donnés.

B. Recommandations aux utilisateurs de systèmes capteurs à titre privé

⁶⁵ DIRECTIVE 2008/50/CE concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe

⁶⁶ https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0013/301720/Evidence-future-update-AQGs-mtg-report-Bonn-sept-oct-15.pdf

⁶⁷ Anses, LCSQA, OQAI, US-EPA.

Le marché des systèmes capteurs est en évolution, avec un nombre important de dispositifs dont les performances sont variables. La pertinence d'un système capteur dépendant de l'objectif visé, le groupe de travail recommande aux personnes ou collectifs souhaitant s'équiper et mettre en œuvre un ou des systèmes capteurs :

- De prendre connaissance des éléments d'évaluations métrologiques publics, en lien avec les challenges AIRLAB (Airparif), les essais d'aptitudes (LCSQA) ou la certification volontaire Air'Quality sensor (LNE/Ineris), ou de travaux internationaux pour choisir un système capteur adapté à l'usage envisagé ;
- De prendre connaissance de la documentation existante (notices d'utilisation fournies par les fabricants et distributeurs de systèmes capteurs, rapports, plateformes) pour :
 - La mise en œuvre du système capteur : fonctionnement, bon usage (port, emplacement), limites techniques (interférences, potentielle dérive dans le temps) ;
 - La compréhension des informations fournies par les systèmes capteurs et les recommandations en découlant :
 - Nature des polluants mesurés au regard des enjeux sanitaires de la pollution de l'air ;
 - Connaissance des indicateurs actuellement utilisés par les fabricants de systèmes capteurs au regard des valeurs limites réglementaires ou valeurs guides pour la qualité de l'air ;
 - Recommandations de bonnes pratiques permettant de limiter l'exposition à la pollution de l'air (modes de transport, aération...).

C. Recommandations aux acteurs de la recherche

Le groupe de travail rappelle que les systèmes capteurs offrent des opportunités pour évaluer l'exposition individuelle à la pollution de l'air intérieur et/ou extérieur.

- *Recommandations pour la conduite d'études utilisant des systèmes capteurs pour évaluer l'exposition individuelle à la pollution de l'air intérieur et/ou extérieur.*

Pour mener à bien de telles études, le groupe de travail recommande d'abord aux porteurs de projets souhaitant utiliser des systèmes capteurs, tout comme pour les utilisateurs, de prendre connaissance des éléments d'évaluations métrologiques publics. Le choix du système capteur, fixe ou portatif, devra tenir compte de la finalité de l'étude. Pour les systèmes capteurs portatifs, l'appareil doit être ergonomique pour ne pas modifier le comportement des porteurs et refléter au mieux leurs expositions réelles.

Le groupe de travail recommande également :

- De s'appuyer sur l'ensemble des points clés définis dans cette expertise pour s'assurer qu'une donnée générée par un système capteur puisse contribuer à l'évaluation de l'exposition individuelle (cf. annexe 2) ;
- De veiller à la maintenance des systèmes capteurs⁶⁸ ;
- D'accompagner les participants pour le bon usage des dispositifs et pour la compréhension des données générées et de leur utilisation.

⁶⁸ Etalonnage avant déploiement, vérification de la dérive, vérification du niveau de batterie/état de charge et son éventuelle influence sur le signal, intercomparaison des capteurs / test de reproductibilité, vérification de la durée de vie des éléments sensibles.

Par ailleurs, le groupe de travail recommande :

- De poursuivre le développement de bases de données publiques recensant les travaux mettant en œuvre des systèmes capteurs pour évaluer l'exposition individuelle.

Enfin, le groupe de travail encourage :

- Un partage large et opérationnel des retours d'expérience des projets mettant en œuvre des systèmes capteurs pour évaluer l'exposition individuelle ;
- Le déploiement de projets pluridisciplinaires regroupant des compétences en métrologie, sciences des données, expologie, épidémiologie et sciences humaines et sociales, compte-tenu de la multitude des disciplines entrant en jeu dans ce type de projets.
 - *Recommandations pour améliorer les connaissances sur les risques sanitaires liés à la pollution de l'air*

Le groupe de travail recommande de considérer les opportunités offertes par les systèmes capteurs pour :

- Améliorer les estimations de l'exposition individuelle ;
- Acquérir des données d'exposition dans des lieux habituellement peu ou pas documentés ;
- Etudier la contribution des différents microenvironnements dans l'exposition globale des individus ;
- Etudier les déterminants des expositions ;
- Etudier les liens entre exposition et santé.

Le groupe de travail souligne que les systèmes capteurs peuvent être couplés à des appareils de mesures de la fréquence cardiaque ou de la fréquence respiratoire permettant d'étudier plus finement des indicateurs d'exposition complémentaires tels que la dose inhalée.

Enfin, le groupe de travail identifie des perspectives de recherche :

- Sur le développement de modes de collecte et de traitement de données massives pour les coupler à d'autres données sur des déterminants des expositions et/ou de leurs effets ;
- Sur l'utilisation de systèmes capteurs dans l'accompagnement et l'éducation thérapeutique des patients.
 - *Recommandations pour la recherche relative au développement de systèmes capteurs :*

Le groupe de travail recommande de développer des travaux sur :

- L'intégration de sources de données massives et hétérogènes, de l'étape de leur collecte à leur traitement ;
- Les réseaux de systèmes capteurs, en particulier, les techniques avancées de gestion et d'étalonnage, l'optimisation de leur déploiement ;
- La qualification des données ;
- Le développement de méthodes d'automatisation, de prétraitement des données ;

- La mise en œuvre de systèmes capteurs mobiles et l'évaluation de l'impact de la mobilité sur la qualité de la mesure.

Par ailleurs, le groupe de travail recommande de développer des travaux de recherche alliant modélisation atmosphérique et réseaux denses et/ou mobiles de systèmes capteurs.

D. Recommandations aux acteurs publics (agence, administration, etc.)

Le groupe de travail recommande aux administrations publiques :

- De mettre en place une évaluation ou une certification des systèmes capteurs en fonction des usages auxquels ils sont destinés ;
- D'encourager le développement et le financement de projets de recherche pluridisciplinaires, notamment à des fins d'évaluation de l'exposition et d'interprétation sanitaire ;
- De réaliser un retour d'expérience des projets en cours sur l'utilisation des systèmes capteurs à des fins d'évaluation de l'exposition individuelle ;
- De favoriser la mise à disposition auprès des utilisateurs des informations issues des évaluations des systèmes capteurs ;
- De sensibiliser les utilisateurs au bon usage des systèmes capteurs et à la compréhension et l'interprétation des informations générées.

Plus particulièrement, aux institutions en charge de la surveillance de la qualité de l'air, le groupe de travail recommande :

- De poursuivre les réflexions sur l'intégration des données de systèmes capteurs aux données produites par les réseaux de surveillance existants en concertation avec l'ensemble des acteurs impliqués.

Date de validation du rapport d'expertise collective par le groupe de travail : 10 mars 2022

13 Bibliographie

13.1 Publications

ABUL O., BONCHI F., NANNI M. (2008). Never walk alone: Uncertainty for anonymity in moving objects databases. In 2008 IEEE 24th international conference on data engineering, p. 376-385.

ACHILLE J., RAMALHO O., BOULANGER G., PEROUEL G., GARNIER R., MANDIN C. (2019). Hazard assessment of chemical substances in indoor environments: what are the high-priority compounds? ISES-ISIAQ 2019, Joint Annual Meeting, Kaunas (Lithuania), August 18 - 22, 2019, short communication.

ADEME/ OPINIONWAY. (2019). Les français et l'environnement–Vague 6. 49 p.

ADEME, SAÏDI A., PLANCHON M., DELOITTE DEVELOPPEMENT DURABLE, ALLARD L. (2017). Liens entre données individuelles, changement de comportement et mise en œuvre de pratiques favorables à la qualité de l'air. ADEME, 102 p.

AMBROISE D., CHIRON M., DECHENAUX J., DERBEZ M., GRIMALDI F., MOSQUERON L. (2005). L'évaluation de l'exposition personnelle : comment faire et pour quoi faire. Pollution Atmosphérique, vol. 186: p. 182-188.

ANSES. (2013). Concentrations de CO₂ dans l'air intérieur et effets sur la santé. Rapport d'expertise collective, Maisons-Alfort, Anses, 294 p.

ANSES. (2016). Moisissures dans le bâti. Rapport d'expertise collective, Maisons-Alfort, Anses, 374 p.

AVILA-PALENCIA I. LAEREMANS M., HOFFMANN B., ANAYA-BOIG E., CARRASCO-TURIGAS G., COLE-HUNTER T., DE NAZELLE A., DONS E., GOTSCHI T., INT PANIS L., ORJUELA J. P., STANDAERT A., NIEUWENHUIJSEN M. J. (2019). Effects of physical activity and air pollution on blood pressure. Environmental Research, vol. 173: p. 387-396.

BARBOSA H., BARTHELEMY M., GHOSHAL G., JAMES C. R., LENORMAND M., LOUAIL T., MENEZES R., RAMASCO J. J., SIMINI F., TOMASINI M. (2018). Human mobility: Models and applications. Physics Reports, vol. 734: p. 1-74.

BARKJOHN K. K., NORRIS C., CUI X., FANG L., HE L., SCHAUER J. J., ZHANG Y., BLACK M., ZHANG J., BERGIN M. H. (2020). Children's microenvironmental exposure to PM_{2.5} and ozone and the impact of indoor air filtration. Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology, vol. 30: P. 971-980.

BECK E-G. (2007). 180 years of atmospheric CO₂ gas analysis by chemical methods. Energy and Environment, vol. 18(2): p. 259-282.

BEKÖ G., KJELDSEN B. U., SCHIPPERIJN J., WIERZBICKA A., KAROTTKI D. G., TOFTUM J., LOFT S., CLAUSEN G. (2015). Contribution of various microenvironments to the daily personal exposure to ultrafine particles: personal monitoring coupled with GPS tracking. *Atmospheric Environment*, vol. 110: p. 122-129.

BERESFORD A. R., STAJANO F. (2003) Location privacy in pervasive computing. *IEEE Pervasive Computing*, vol. 2(1): p. 46–55.

BORGHİ F., CATTANEO A., SPINAZZE A. MANNO A., ROVELLI S., CAMPAGNOLO D., VICENZI M., MARIANI J., BOLLATI V., CAVALLO D. M. (2019). Evaluation of the inhaled dose across different microenvironments. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 296 012007.

BORGHİ F., SINAZZE A., FANTI A., CAMPAGNOLO D., ROVELLI S., KELLER M., CATTANEO A., CAVALLO D. M. (2020). Commuter's personal exposure assessment and evaluation of inhaled dose to different atmospheric pollutant. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 17: p. 2-12.

BORREGO C., COSTA A. M., GINJA J., AMORIM M., COUTINHO M., KARATZAS K., SIOUMIS T., KATSIFARAKIS N., KONSTANTINIDIS K., DE VITO S., ESPOSITO E., SMITH P., ANDRE N., GERARD P., FRANCIS L. A., CASTELL N., SCHNEIDER P., VIANA M., MINGUILLON M. C., REIMRINGER W., OTJES R. P., VON SICARD O., POHLE R., ELEN B., SURIANO D., PFISTER V., PRATO M., DIPINTO S., PENZA M. (2016). Assessment of air quality microsensors versus reference methods: The EuNetAir joint exercise. *Atmospheric Environment*, vol. 147: p. 246-263.

BRATTAIN W. H., BARDEEN J. (1953). Surface properties of germanium. *The Bell System Technical Journal*, vol. 32(1): p. 1-41.

BRICKELL J., SHMATIKOV V. (2008) "The cost of privacy: destruction of data-mining utility in anonymized data publishing." *Proceedings of the 14th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining*. ACM, 2008.

BUONANNO G. STABILE L., MORAWSKA L. (2014). Personal exposure to ultrafine particles: the influence of time-activity patterns. *Science of the Total Environment*, vol. 468-469 : p. 903-907.

CANDIA A., REPRESA S. N., GIULIANI D., LUENGO M. Á., PORTA A. A., MARRONE L. A. (2018). Solutions for smartcities: proposal of a monitoring system of air quality based on a lorawan network with low-cost sensors. *Congreso Argentino de Ciencias de la Informática y Desarrollos de Investigación (CACIDI)*, p. 1-6.

CANHA N., MANDIN C., RAMALHO O., WYART G., RIBERON J., DASSONVILLE C., HANNINEN O., ALMEIDA S. M., DERBEZ M. (2016). Assessment of ventilation and indoor air pollutants in nursery and elementary schools in France. *Indoor Air*, vol. 26(3) : p. 350-365.

CHAMBERS L. FINCH J. EDWARDS K., JEANJEAN A., LEIGH R., GONEM S. (2018). Allergy, effects of personal air pollution exposure on asthma symptoms, lung function and airway inflammation. *Clin. Exp Allergy*, vol. 48 : p. 798-805.

CHANEY R. A., SLOAN C. D., COOPER V. C., ROBINSON D. R., HENDRICKSON N. R., MCCORD T. A., JOHNSTON J. D. (2017) Personal exposure to fine particulate air pollution while commuting: an examination of six transport modes on an urban arterial roadway. *PLoS ONE* 12(11): e0188053.

CHATZIDIAKOU L., KRAUSE A., HAN Y., CHEN W., YAN L., POPOOLA O. A. M., KELLAWAY M., WU Y., LIU J., HU M., BARRATT B., KELLY F. J., ZHU T., JONES R. L. (2020). Using low-cost sensor technologies and advanced computational methods to improve dose estimations in health panel studies: results of the AIRLESS project. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, vol. 30: p. 981-989.

CHELLY DAGDIA Z., RENSO C., ZEITOUNI K., AGOULMINE Z. (2021). Towards a Federated Learning Approach for Privacy-aware Analysis of Semantically Enriched Mobility Data. Workshop on Flexible Resource and Application Management on the Edge (FRAME '21). ACM, pp17–20.

CHEN L. W. A., OLAWPEO J. O., BONANNO F., GEBRESELASSIE A., ZHANG M. (2020). Schoolchildren's exposure to PM_{2.5}: a student club-based air quality monitoring campaign using low-cost sensors. *Air Quality, Atmosphere and Health*, vol. 13: p. 543-551.

CHOWDHURY Z., LE L. T., AL MASUD A., CHANG K. C., ALAUDDIN M., HOSSAIN M., ZAKARIA A. B. M., HOPKE P. K. (2012). Quantification of indoor air pollution from using cookstoves and estimation of its health effects on adult women in northwest Bangladesh. *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 12: p. 463–475.

CHOI S., KIM J., YEO H. (2021). TrajGAIL: Generating urban vehicle trajectories using generative adversarial imitation learning. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 128: p. 1-22.

DELGADO-SABORIT J. M. (2012). Use of real-time sensors to characterise human exposures to combustion related pollutants. *J. Environ. Monit.*, vol. 14: p. 1824-1837.

DONAIRE-GONZALEZ D., CURTO A., VALENTIN A., ANDRUSAITYTE S., BASAGANA X., CASAS M., CHATZI L., DE BONT J., DE CASTRO M., DEDELE A., GRANUM B., GRAZULEVICIENE R., KAMPOURI M., LYON-CAEN S., MANZANO-SLAGADO C. B., AASVANG G. M., MCEACHAN R., MEINHARD-KJELLSTAD C. H., MICHALAKI E., PANELLA P., PETRAVICIENE I., SCHWARZE P.E., SLAMA R., ROBINSON O., TAMAYO-URIA I., VAFEIADI M., WAIBLINGER D., WRIGHT J., VRIJHEID M., NIEUWENHUIJSEN M. J. (2019a). Personal assessment of the external exposure during pregnancy and childhood in Europe. *Environmental Research*, vol. 174: p. 95-104.

DONAIRE-GONZALEZ D., VALENTIN A., VAN NUNEN E., CURTO A., RODRIGUEZ A., FERNANDEZ-NIETO M., NACCARATI A., TARALLO S., TSAI M-Y., PROBST-HENSCH N., VERMEULEN R., HOEK G., VINEIS P., GULLIVER J., NIEUWENHUIJSEN M. J. (2019b). Expoapp: an integrated system to assess multiple personal environmental exposures. *Environment International*, vol. 126: p. 494-503.

DONG Z., WANG H., YIN P., WANG L., CHEN R., FAN W., XY Y., ZHOU M. (2020). Time-weighted average of fine particulate matter exposure and cause-specific mortality in china: a nationwide analysis. *Lancet Planet Health*, vol. 4: p. 343-351.

DONS E., LAEREMANS M., ORJUELA J. P., AVILA-PALENCIA I., DE NAZELLE A., NIEUWENHUIJSEN M. J., VAN POPPEL M., CARRASCO-TURIGAS G., STANDAERT A., DE BOEVER P., NAWROT T., INT PARIS L. (2019). Transport most likely to cause air pollution peak exposures in everyday life: evidence from over 2000 days of personal monitoring. *Atmospheric Environment*, vol. 213: p. 424-432.

CRÉDOC. (2021). Baromètre du numérique. Enquête sur la diffusion des technologies de l'information et de la communication dans la société française. CRÉDOC, 348 p.

DWORK C. (2006). Differential privacy. *International Colloquium on Automata, Languages, and Programming*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006.

EMBIALE A., ZEWGE F., CHANDRAVANSI B. S., SAHLE-DEMESSIE E. (2018). Commuter exposure to particulate matters and total volatile organic compounds at roadsides in Addis Ababa, Ethiopia. *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 16: p. 4761-4774.

GALL E. T., CHEUNG T., LUHUNG I., SCHIAVON S., NAZAROFF W. W. (2016). Real-time monitoring of personal exposures to carbon dioxide. *Building and Environment*, vol. 104: p. 59-67.

GASKINS A. J., HART J. E. (2020). The use of personal and indoor air pollution monitors in reproductive epidemiology studies. *Paediatr. Perinat. Epidemiol.*, vol. 34: p. 513–521.

GEORGE S. CHUA M. L., ZHEWEI D. Z., DAS R., BIJIN V. A., CONNOLLY J. E., LEE K. P., YUNG C. F., TEOH O. H., THOMAS B. (2020). Personal level exposure and hazard potential of particulate matter during haze and non-haze periods in Singapore. *Chemosphere*, vol. 243, 125401.

GOOD N., MOLETER A., ACKERSON A., BACHAND A., CARPENTER T., CLARK M. L., FEDAK K. M., KAYNE A., KOEHLER K., MOORE B., L'ORANGE C., QUINN X., UGAVE V., STUART A., PEEL J. L., VOLCKENS J. (2016). The Fort Collins commuter study: impact of route type and transport mode on personal exposure to multiple air pollutants. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, vol. 26: p. 397–404

GURSOY M. E., LIU L., TRUEX S., YU L., WEI W. (2018). Utility-aware synthesis of differentially private and attack-resilient location traces. In *Proceedings of the 2018 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security*, p. 196-211.

HAN Y., CHEN W., CHATZIDIAKOU L., YAN L., ZHANG H., CHAN Q., BARRATT B., JONES R., LIU J., WU Y., ZHAO M., ZHANG J., KELLY F. J., ZHU T. (2020). Effects of air pollution on cardiopulmonary disease in urban and peri-urban residents in Beijing: protocol for the AIRLESS study. *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 20: p. 15775–15792

HANSEN A., ROSEN H., NOVAKOV T. (1984). The Aethalometer — An Instrument for the Real-Time Measurement of Optical Absorption by Aerosol Particles. *The Science of the Total Environment*, vol. 36: p. 191-196

HEILAND G. (1954). Zum Einfluß von adsorbiertem Sauerstoff auf die elektrische Leitfähigkeit von Zinkoxydkristallen. *Zeitschrift für Physik*, vol. 138: p. 459–464

HOULLIER F. MERILHOU-GOUDARD J-B. (2016). Les sciences participatives en France. État des lieux, bonnes pratiques et recommandations. [Autre], 63 p.

HU R., WANG S., AUNAN K., ZHAO M., CHEN L., LIU Z., HANSEN M. (2019). Personal exposure to PM_{2.5} in chinese rural households in the Yangtze River Delta. *Indoor Air*, vol. 29: p. 403–412.

HUANG Y-L., CHEN H-W., HAN B-C., LIU C-W., CHUANG H-C., LIN L-Y., CHUANG K-J. (2014). Personal exposure to household particulate matter, household activities and heart rate variability among housewives. *PLoS ONE*, vol. 9(3): 1-5.

JIN F., HUA W., FRANZIA M., CHAO P., ORLOWSKA M., ZHOU X. (2021). A Survey and Experimental Study on Privacy-Preserving Trajectory Data Publishing. *TechRxiv*. Preprint.

KARAGULIAN F., BARBIERE M., KOTSEV A., SPINELLE L., GERBOLES M., LAGLER F., REDON N., CRUNAIRE S., BOROWIAK A. (2019). Review of the Performance of Low-Cost Sensors for Air Quality Monitoring. *Atmosphere*, vol. 10: p. 1-41.

KAUR A., SINGLA S., BANSAL D. (2017). Quantifying personal exposure to spatio-temporally distributed air pollutants using mobile sensors. *CrowdSenSys '17: Proceedings of the First ACM Workshop on Mobile Crowdsensing Systems and Applications*, p. 1-6.

KIRCHNER S., ARENES J.F., COCHET C., DERBEZ M., DUBOUDIN C., ELIAS P., GREGOIRE A., JEDOR B., LUCAS J.P., PASQUIER N., PIGNERET M., RAMALHO O. (2007). Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur – Campagne Nationale Logements : Etat de la Qualité de l'Air dans les Logements Français, Rapport DDD/SB 2006-57, Novembre 2006, mis à jour mai 2007. OQAI, 123 p.

KOEHLER K., GOOD N., WILSON A., MOLTER A., MOORE B., CARPENTER T., PEEL J. L., VOLCKENS J. (2018). The Fort Collins commuter study: variability in personal exposure to air pollutants by microenvironment. *Indoor Air*, vol. 29: p. 231-241.

KRALL J. R., ADIBAH N., BABIN L. M., LEE Y-C., MOTTI V. G., MCCOMBS M., MCWILLIAMS A., THORNBURG J., POLLACK A. Z. (2020). Estimating exposure to traffic-related PM_{2.5} for women commuters using vehicle and personal monitoring. *Environmental Research*, vol. 187: 109644.

LAEREMANS M., DONS E., AVILA-PALENCIA I., CARRASCO-TURIGAS G., ORJUELA-MENDOZA J. P., ANAYA-BOIG E., COLE-HUNTER T., DE NAZELLE A., NIEUWENHUIJSEN M. J., STANDAERT A., VAN POPPEL M., DE BOEVER P., INT PARIS L. (2018a). Black

carbon reduces the beneficial effect of physical activity on lung function. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, Publish Ahead of Print.

LAEREMAND M., DONS E., AVILA-PALENCIA I., CARRASCO-TURIGAS G., ORJUELA J. P., ANAYA E., COLE-HUNTER T., DE NAZELLE A., NIEUWENHUIJSEN M., STANDAERT A., VAN POPPEL M., DE BROEVER P., INT PANIS L. (2018b). Short-term effects of physical activity, air pollution and their interaction on the cardiovascular and respiratory system. *Environ. Int.* vol. 11 : p. 82-90.

LCSQA. (2016). Validation du protocole de détermination des caractéristiques de performance métrologique des micro-capteurs pour la mesure indicative des polluants gazeux réglementaires - Etude comparative des performances en laboratoire de micro-capteurs NO₂. LCSQA, 59 p.

LCSQA. (2018a). Veille technologique sur les systèmes micro-capteurs pour les mesures de polluants dans l'air ambiant. LCSQA, 59 p.

LCSQA. (2018b). 1er Essai national d'Aptitude des micro-Capteurs (EAμC) pour la surveillance de la qualité de l'air : Synthèse des résultats. LCSQA, 38 p.

LCSQA. (2021c). Capt'air : La base de données nationale pour le recensement des expérimentations de capteurs / systèmes capteurs. LCSQA, 14 p.

LCSQA. (2021d). Cartographie de la qualité de l'air à l'échelle urbaine à partir des données de micro-capteurs. Guide d'utilisation du modèle de géostatistique SESAM. LCSQA, 15 p.

LCSQA (2021b) Exploitation des données de la base nationale Capt'air pour le recensement des expérimentations de capteurs pour la qualité de l'air. LCSQA, 62 p.

LCSQA. (2021a). Note de cadrage pour l'utilisation des capteurs et systèmes capteur pour la mesure des polluants gazeux et particulaires. LCSQA, 34 p.

LENARTZ F., DURY M., BERGMANS B., HUTSEMEKERS V., BROUN V., BROSE C., GUICHAUX S. (2021). Antilope, a portable low-cost sensor system for the assessment of indoor and outdoor air pollution exposure. *Front. Sens.* 2 :679908. Doi : 10.3389/fsens.2021.679908.

LEPEULE J., CAINI F., BOTTAGISI S., GALINEAU J., HULIN A., MARQUIS N., BOHET A., SIROUX V., KAMINSKI M., CHARLES M-A., SLAMA R. (2010). Maternal exposure to nitrogen dioxide during pregnancy and offspring birth weight : Comparison of two exposure models. *Environmental Health Perspectives*, vol. 118(10): p. 1483-1489.

LIANG L., GONG P., CONG N., LI Z., ZHAO Y., CHEN Y. (2019). Assessment of personal exposure to particulate air pollution: the first result of City Health Outlook (CHO) project. *BMC Public Health*, vol. 19: p. 1-12.

LIN C., HU D., JIA X., CHEN J., DENG F., GUO X., HEAL M. R., COWIE H., WILKINSON P., MILLER M. R., LOH M. (2020). The relationship between personal exposure and ambient PM_{2.5} and black carbon in Beijing. *Science of the Total Environment*, vol. 737: p. 1-14.

LYON-CAEN S., SIROUX V., LEPEULE J., LORIMIER P., HAINAUT P., MOSSUZ P., QUENTIN J., SUPERNANT K., MEARY D., CHAPEROT L., BAYAT S., CASSEE F., VALENTINO S., COUTURIER-TARRADE A., ROUSSEAU-RALLIARD D., CHAVATTE-PALMER P., PHILIPPAT A., PIN I., SLAMA R. (2019). Deciphering the impact of early-life exposures to highly variable environmental factors on foetal and child health: design of SEPAGES couple- child cohort. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 16: p. 1-29.

MA J., TAO Y., KWAN M-P., CHAI Y. (2020). Assessing mobility-based real-time air pollution exposure in space and time using smart sensors and GPS trajectories in Beijing. *Annals of the American Association of Geographers*, vol. 110(2): p. 434–448.

MALLIRES K. R., WANG D., TIPPARAJU V. V., TAO N. (2019). Developing a low-cost wearable personal exposure monitor for studying respiratory diseases using metal–oxide sensors. *EEE Sensors Journal*, vol. 19(18): p. 8252-8261.

MARTINEZ P. A., CABA F. M., ALVARADO S.A., CACERES D. D. (2012). Indoor and personal carbon monoxide exposure risk assessment in sample of apartment buildings in Santiago, Chile. *Indoor Built Environ.*, vol. 21(3): 474-480.

MAZAHERI M., LIN W., CLIFFORD S., YUE D., ZHAI Y., XU M., RIZZA V., MORAWSKA L. (2019). Characteristics of school children's personal exposure to ultrafine particles in Heshan, Pearl River delta, China. A pilot study. *Environ. Int.*, vol. 132: 105134.

MOKBEL M. F., CHOW C. Y., AREF W. G. (2006). The new casper: Query processing for location services without compromising privacy. In *Proceedings of the 32nd international conference on Very large data bases (VLDB)*, p. 763-774.

MOORE E., CHATZIDIAKOU L., JONES R. L., SMEETH L., BEEVERS S., KELLY F. J., QUINT J. K., BARRATT B. (2016). Linking e-health records, patient- reported symptoms and environmental exposure data to characterise and model COPD exacerbations: protocol for the COPE study. *BMJ Open*, vol. 6:e011330. doi:10.1136/bmjopen-2016- 011330.

MORAWSKA L., THAI P. K., LIU X., ASUMADU-SAKYI A., AYOKO G., BARTONOVA A., BEDINI A., CHAI F., CHRISTENSEN B., DUNBABIN M., GAO J., HAGLER G. S. W., JAYARATNE R., KUMAR P., LAU A. K. H., LOUIE P. K. K., MAZAHERI M., NING Z., MOTTA N., MULLINS B., RAHMAN M., RISTOVSKI Z., SHAFIEI M., TJONDRONEGORO D., WESTERDAHL D., WILLIAMNS R. (2018). Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring exposure assessment: How far have they gone?. *Environ. Int.*, vol. 116: p. 286-299.

NIEUWENHUIJSEN M. J., DONAIRE-GONZALEZ D., FORASTER M., MARTINEZ D., CISNEROS A. (2014). Using personal sensors to assess the exposome and acute health effects. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 11: p. 7805-7819.

NIEUWENHUIJSEN M. J., DONAIRE-GONZALEZ D., RIVAS I., DE CASTRO M., CIRACH M., HOEK G., SETO E., JERRET M., SUNYER J. (2015). Variability in and Agreement between Modeled and Personal Continuously Measured Black Carbon Levels Using Novel Smartphone and Sensor Technologies. *Environ.Sci. Technol.*, vol. 49(5): p. 2977-2982.

NORRIS C., GOLDBERG M. S., MARSHALL J. D., VALOIS M-F., PRADEEP T., NARAYANSWAMY M., JAIN G., SETHURAMAN K., BAUMGARTNER J. (2016). A panel study of the acute effects of personal exposure to household air pollution on ambulatory blood pressure in rural indian women. *Environmental Research*, vol. 147: p. 331-342.

NYARKU M., BUONANNO G., OFOSU F., JAYARATNE R., MAZAHERI M., MORAWSKA L. (2019). Schoolchildren's personal exposure to ultrafine particles in and near Accra, Ghana. *Environ. Int.*, vol. 133: 105223.

OH H-J., KIM J. (2020). Monitoring air quality and estimation of personal exposure to particulate matter using an indoor model and artificial neural network. *Sustainability*, vol. 12: p. 1-20.

OLSEN Y., KAROTTKI D. G., JENSEN D. M., BEKO G., KJELDSEN B. U., CLAUSEN G., HERSOUG L-G., HOLST G. J., WIERZBICKA A., SIGSGAARD T., LINNEBERG A., MOLLER P., LOFT S. (2014). Vascular and lung function related to ultrafine and fine particles exposure assessed by personal and indoor monitoring: a cross-sectional study. *Environmental Health*, vol. 13: p. 1-10.

ONG H., HOLSTIUS D., LI Y., SETO E., WANG M. (2019). Air pollution and child obesity: assessing the feasibility of measuring personal pm2.5 exposures and behaviours related to BMI in preschool-aged children in China. *Obesity Medecine*, vol. 16: 100149.

OUYANG K., SHOKRI R., ROSENBLUM D.S., YANG W. (2018). A Non-Parametric Generative Model for Human Trajectories. *Proceedings of the Twenty-Seventh International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-18)*, p. 3812-3817.

PAPPALARDO L., SIMINI F., BARLACCHI G., PELLUNGRINI R. (2019). Scikit-mobility: A Python library for the analysis, generation and risk assessment of mobility data. *arXiv preprint arXiv:1907.07062*.

PAUNESCU A-C., ATTOUI M., BOUALLALA S., SUNYER J., MOMAS I. (2017). Personal measurement of exposure to black carbon and ultrafine particles in schoolchildren from PARIS cohort (Paris, France). *Indoor Air*, vol. 27: p. 766–779.

PAUNESCU A-C., GABET S., BOUGAS N., BEYDON N., AMAT F., LEZMI G., MOMAS I. (2019). Short-term exposure to ultrafine particles is associated with bronchial inflammation in schoolchildren. *Pediatr. Allergy Immunol.*, vol. 30(6): p. 657-661.

PELEKIS N., SIDERIDIS S., TAMPAKIS P., THEODORIDIS Y. (2016). Simulating our LifeSteps by example. *ACM Transactions on Spatial Algorithms and Systems*, 38 p.

PRATESI F., MONREALE A., TRASARTI R., GIANNOTTI F., PEDRESCHI D., YANAGIHARA T., (2018). PRUDENCE: a System for Assessing Privacy Risk vs Utility in Data Sharing Ecosystems. *Transactions on Data Privacy*, vol. 11(2): p. 139-167.

RABINOVITCH N., ADAMS C. D., STRAND M., KOEHLER K., VOLCKENS J. (2016). Within-microenvironment exposure to particulate matter and health effects in children with asthma: a pilot study utilizing real-time personal monitoring with GPS interface. *Environmental Health*, vol. 15(96): p. 1-10.

RAMALHO O., WYART G. MANDIN C., BLONDEAU P., CABANES P-A., LECLERC N., MULLOT J-U., BOULANGER G., REDAELLI M. (2015). Association of carbon dioxide with indoor air pollutants and exceedance of health guideline values. *Building and Environment*, Vol. 93(1): p. 115-124.

RAMALHO O., BERTHINEAU B., COCHET V., DUPUIS V., GAIE-LEVREL F., GINESTET A., HANOUNE B., HONORE C., PERNOT P., QUERON J., REDON N., ROBERT L., ROUSSEL G., ROUSSELLE D., SCHNEIDER I., ZEITOUNI K. (2018). Déploiement de micro-capteurs de qualité de l'air dans les logements pour une campagne nationale – Contraintes et opportunités, International symposium individual air pollution sensors, Lille, 29th-30th November 2018, 3 p.

RAO J., GAO S., KANG Y., HUANG Q. (2020). LSTM-TrajGAN: A Deep Learning Approach to Trajectory Privacy Protection. In the Proceedings of the 11th International Conference on Geographic Information Science, p. 1-16.

SANDU POPA I., TON THAT D.H., ZEITOUNI K., BORCEA C. (2019). Mobile Participatory Sensing with Strong Privacy Guarantees Using Secure Probes. *Geoinformatica*, vol. 24: p. 533-580.

SEIYAMA T., KATO A., FUJIISHI K., NAGATANI M. (1962). A new detector for gaseous components using semiconductive thin films. *Anal. Chem.*, vol. 34(11): p. 1502-1503.

SINAGA D., SETYAWATI W., CHENG F. Y., LUNG S-C. C. (2020). Investigation on daily exposure to PM_{2.5} in Bandung city, Indonesia using low-cost sensor. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, vol. 30: p. 1001–1012.

SLOAN C. D., PHILIPP T. J., BRADSHAW R. K., CHRONISTER S., BARBER W. B., JOHNSTON J. D. (2016). Applications of GPS-tracked personal and fixed-location PM_{2.5} continuous exposure monitoring, *Journal of the Air and Waste Management Association*, vol. 66(1): p. 53-65.

SMARGIASSI A., GOLDBERG M. S., WHEELER A. J., PLANTE C., VALOIS M-F., MALLACH G., KAURI L. M., SHUTT R., BARTLETT S., RAPHOZ M., LIU L. (2014). Associations between personal exposure to air pollutants and lung function tests and cardiovascular indices among children with asthma living near an industrial complex and petroleum refineries. *Environmental Research*, vol. 132: p. 38-45.

SNYDER E., WATKINS T. H., SOLOMON P. A., THOMA E. D., WILLIAMNS R. W., HAGGLER G. S., SHELOW D., HINDIN D. A., KILARU V. J., PREUSS P. W. (2013). The changing paradigm of air pollution monitoring. *Environ. Sci. Technol.*, vol. 47: p. 11369-11377.

SPINELLE L., GERBOLES M., VILLANI M. G., ALEIXANDRE M., BONAVITACOLA F. (2017). 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*, vol. 238: p. 706-715.

STEINLE S., REIS S., SABEL C. E., SEMPLE S., TWIGG M. M., BRABAN C. F., LEESON S. R., HEAL M. R., HARRISON D., LIN C., WU H. (2015). Personal exposure monitoring of PM_{2.5} in indoor and outdoor microenvironments. *Science of the Total Environment*, vol. 508: p. 383–394.

SUNDELL J. (2004). On the history of indoor air quality and health. *Indoor Air*, vol. 14 (57): p. 51-58.

US EPA. (2014). Air sensor guidebook. EPA/600/R-14/159. US EPA, 73 p.

VAN NUNEN E., VERMEULEN R., TSAI M-Y., PROBST-HENSCH N., INEICHEN A., IMBODEN M., NACCARATI A., TARALLO S., RAFFAELE D., RANZI A., NIEUWENHUIJSEN M. J., JARVIS D., AMARAL A. F. S., VLAANDEREN J., MELIEFSTE K., BRUNEKREEF B., VINEIS P., GULLIVER J., HOEK G. (2020). Associations between modeled residential outdoor and measured personal exposure to ultrafine particles in four European study areas. *Atmospheric Environment*, vol. 226: 117353.

VAN RYSWYK K., EVANS G. J., KULKA R., SUN L., SABALIAUSKAS K., ROULEAU M., ANASTASOPOLOS A. T., WALLACE L., WEICHENTHAL S. (2020). Personal exposures to traffic-related air pollution in three Canadian bus transit systems: the urban transportation exposure study. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, vol. 31: p. 628-640.

WALLACE L., OTT W. (2011). Personal exposure to ultrafine particles. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, vol. 21: p. 20–30.

WANG L., ZHANG D., YANG D., LIM B. Y., HAN X., MA X. (2020). Sparse mobile crowdsensing with differential and distortion location privacy. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 15: p. 2735-2749.

WANGCHUCK T., MAZAHERI M., CLIFFORD S., DUDZINSKA M. R. HE C., BUONANNO G., MORAWSKA L. (2015). Children's personal exposure to air pollution in rural villages in Bhutan. *Environmental Research*, vol. 140: p. 691-698.

WMO. (2018). Low-cost sensors for the measurement of atmospheric composition: overview of topic and future applications. Geneva: WMO, 68 p.

WOO J., RUDASINGWA G., KIM S. (2020). Assessment of daily personal pm_{2.5} exposure level according to four major activities among children. *Appl. Sci.*, vol. 10: p. 1-11.

WU J., XIAO X., LI Y., YANG F., YANG S., SUN L., MA R., WANG M. C. (2020). Personal exposure to fine particulate matter (PM_{2.5}) of pregnant women during three trimesters in rural Yunnan of China. *Environmental Pollution*, vol. 256: 113055.

YAGLOU C. P., RILEY E. C., COGGINS D. I. (1936) Ventilation requirements. *ASHVE Trans.*, vol. 42: p. 133- 162.

YANG F., LAU C. F., TONG V. W. T., ZHANG K. K., WESTERDAHL D., NG S., NING Z. (2019). Assessment of personal integrated exposure to fine particulate matter of urban residents in Hong Kong. *J Air Waste Manag Assoc.*, vol. 69(1): p. 47-57.

YARZA S., HASSAN L., SHTEIN A., LESSER D., NOVACK L., KATRA I., KLOOG I., NOVACK V. (2020). Novel approaches to air pollution exposure and clinical outcomes assessment in environmental health studies. *Atmosphere*, vol. 11(2): p. 1-18.

ZHUANG Y., LIN F., YOO E-H., XU W. (2015). AirSense: a portable context-sensing device for personal air quality monitoring. *MobileHealth '15: Proceedings of the 2015 Workshop on Pervasive Wireless Healthcare* June, p. 17–2.

13.2 Normes

AFNOR. 2003. NF X 50-110 Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise. AFNOR (indice de classement X 50-110).

AFNOR. 2019. NF EN 16798-1 Performance énergétique des bâtiments - Ventilation des bâtiments - Partie 1 : données d'entrées d'ambiance intérieure pour la conception et l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieur, l'ambiance thermique, l'éclairage et l'acoustique (Module M1-6).

AFNOR. 2021. FD X 43-121 Atmosphères ambiantes - Capteurs pour la qualité de l'air - Concepts relatifs à l'utilisation de dispositifs de type "capteur" / "système capteur" (indice de classement X 43-121).

13.3 Législation et réglementation

Arrêté du 16 avril 2021 relatif au dispositif national de surveillance de la qualité de l'air ambiant. JORF du 18 avril 2021.

Directive 2004/107/CE du Parlement Européen et du Conseil du 15 décembre 2004 concernant l'arsenic, le cadmium, le mercure, le nickel et les hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'air ambiant. JOUE du 26 janvier 2005 (L 23/3).

Directive 2008/50/CE du Parlement Européen et du Conseil du 21 mai 2008 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe. JOUE du 11 juin 2008 (L 152/1).

Directive (UE) 2015/1480 de la Commission modifiant plusieurs annexes des **directives** du Parlement européen et du Conseil 2004/107/CE et 2008/50/CE établissant les règles

concernant les méthodes de référence, la validation des données et l'emplacement des points de prélèvement pour l'évaluation de la qualité de l'air ambiant. JOUE du 29 août 2015 (L 226).

Règlement UE 2016/679 du Parlement européen et du Conseil du 27 avril 2016 relatif à la protection des personnes physiques à l'égard du traitement des données à caractère personnel et à la libre circulation de ces données.

13.4 Sites internet

Base de données Capt'air gérée par le LCSQA sur le partage d'informations sur les systèmes capteurs et leurs usages en France et à l'international, afin de permettre aux utilisateurs de sélectionner les systèmes capteurs adaptés à un usage prédéfini : <https://captair-lcsqa.fr/>

Site internet « Air sensor tool box » sur les informations relatives aux performances, au fonctionnement et à l'utilisation des capteurs à destination des développeurs de technologies, des gestionnaires de la qualité de l'air, des scientifiques et du grand public, ainsi que les informations relatives aux évaluations réalisées par l'EPA : <https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/evaluation-emerging-air-sensor-performance>

Site internet de l'AQ-SPEC, centre d'évaluation des performances des systèmes capteurs de la qualité de l'air lancé par le South Coast Air Quality Management District : <http://www.aqmd.gov/aq-spec/evaluations>

Base de données en open-data Openradiation, projet de science participative, permettant de visualiser les données mesure de radioactivité sur une cartographie représentant les données brutes ou filtrées, des espaces d'échange autour des mesures et des projets : <https://www.openradiation.org/>

Projet Sensor.Community de OK Lab de Stuttgart en open hardware, open source et en open data visant à sensibiliser et promouvoir l'intérêt du grand public aux problématiques environnementales, notamment de qualité de l'air : <https://sensor.community/fr/>

Plateforme AirCasting *open source* de données de qualité de l'air générées par des citoyens de l'ONG Nord-américaine HabitatMap : <https://www.habitatmap.org>

Plateforme Opensensemap du projet sensBox partageant ses propres données et les données de Sensor.Community : <https://opensensemap.org/>

Plateforme du projet Smartcitizen permettant la visualisation l'ensemble des systèmes capteurs qui ont été commercialisé par Fablab de Barcelone : <https://smartcitizen.me/kits/>

Site World Air Quality Index project qui agrège les données des stations de référence et de Sensor.Community : <http://aqicn.org/map>

Plateformes de visualisation des données opérées par des fabricants/distributeurs de systèmes capteurs :

- Airvisual d'IQAir: <https://www.iqair.com/fr/france>
- Flowfleets de Plumelabs : <https://air.plumelabs.com/fr/>

ANNEXES

ANNEXE 1 : Lettre de saisine

2018 -SA- 0 2 7 1



COURRIER ARRIVE

21 DEC. 2018

DIRECTION GENERALE

MINISTÈRE DES SOLIDARITÉS
ET DE LA SANTÉ

Direction générale de la santé

MINISTÈRE DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE

Direction générale de l'énergie et du climat

Direction générale de la prévention des risques

Paris, le 18 DEC. 2018

Le Directeur général de la santé

Le Directeur général de l'énergie et du climat

Le Directeur général de la prévention des risques

à

**Monsieur le Directeur général
de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de
l'alimentation, de l'environnement et du
travail (Anses)**14 rue Pierre et Marie Curie
94701 Maisons-Alfort cedex~~N° 119~~**Objet:** Etat des connaissances sur l'utilisation de micro-capteurs par des citoyens pour le suivi de la qualité de l'air extérieur et de l'air intérieur.

Le développement de micro-capteurs pour le suivi de la qualité de l'air extérieur et intérieur connaît une expansion rapide ces dernières années. Il s'agit de dispositifs à coût réduit, portatifs ou facilement transportables et connectés, qui offrent de multiples champs d'application : connaissance de l'exposition individuelle, recherche, multiplication des points de mesurage, information rapide du public, sensibilisation et éducation à la problématique de la qualité de l'air, etc. Ils sont utilisés par un public de plus en plus large : des acteurs institutionnels impliqués dans la surveillance de la qualité de l'air (Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air AASQA, Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air LCSQA, etc.), des organismes de recherche, des collectivités, des citoyens ou des associations de citoyens.

L'utilisation de ces micro-capteurs pose plusieurs questions, dont celles de leur fiabilité métrologique, de la gestion, de l'exploitation et de l'interprétation des données, et *in fine* de leur pertinence pour répondre à des problématiques de qualité de l'air. En France et à l'international, de nombreux projets scientifiques et initiatives citoyennes ont été engagés récemment sur le sujet impliquant par exemples des universités et laboratoires de recherche, des agglomérations ou communauté d'agglomérations ou encore des collectifs de citoyens. Ces études ont des objectifs variés : amélioration de la connaissance de la qualité de l'air, étude des changements de comportements induits par la connaissance de l'exposition individuelle, développement de la contribution du citoyen à la surveillance de la qualité de l'air, utilisation des données individuelles à des fins d'évaluation de risques sanitaires.

Des travaux de recensement des technologies existantes et des opportunités offertes ont été conduits ou sont en cours tant au niveau national, qu'europpéen ou international. Par exemple, la Commission Européenne a diffusé une plaquette d'information sur les différents types de micro-capteurs et les informations qu'ils peuvent fournir, le programme GAW (Global Atmospheric Watch porté par le WMO) va très prochainement publier une note pour guider les choix des utilisateurs de micro-capteurs en fonction du type de mesures qu'ils souhaitent mettre en œuvre. En parallèle, des travaux d'évaluation métrologique de ces micro-capteurs sont également menés par des organismes en charge de la surveillance de la qualité de l'air tels que l'Agence de protection de l'environnement des Etats-Unis (US EPA) ou au niveau européen par le Joint Research Centre (JRC). De même, un cahier des charges pour l'évaluation de ce type d'outils est en cours d'élaboration dans le cadre du Comité Européen de Normalisation (CEN). En France, le LCSQA a lancé début 2018 le premier essai national d'aptitude sur le terrain de micro-capteurs de gaz et de particules pour la mesure de la qualité de l'air ambiant, compte tenu de l'absence de cadre normatif national ou européen permettant de comparer les performances de ces différents appareils commercialisés aux appareils de mesures de référence. Pour finir, l'ADEME a lancé une étude sur l'utilisation des micro-capteurs en lien avec le changement de comportement et le CSTB engage en partenariat avec l'INERIS un travail d'élaboration d'un protocole d'évaluation des capteurs innovants à bas coûts destinés au grand public.

Compte tenu du développement rapide de ces outils et de la génération massive de données à grande échelle, nous souhaiterions pouvoir disposer d'éléments d'informations concernant notamment la pertinence, la validité et l'utilisation des données générées par des micro-capteurs utilisés dans des environnements extérieur et intérieur, en vue de caractériser l'exposition de populations, en particulier lorsque ces outils sont utilisés par un public non expérimenté pour la mesure de la qualité de l'air.

Dans ce contexte, un état des lieux des travaux mettant en œuvre des micro-capteurs au niveau national, européen et international afin de recenser les objectifs alloués à ces études et le cadre d'application de ces technologies doit être mené en faisant appel en tant que de besoin aux autres établissements publics disposant de données, notamment sur la métrologie des capteurs. L'analyse contribuera également à lister les technologies disponibles, leur validité métrologique lorsque celle-ci aura été évaluée, le contexte dans lequel elles sont mises en œuvre (objectifs suivis, polluants visés, design d'étude, etc.), ainsi que les opportunités et les limites de leur utilisation.

Il vous est ensuite demandé une évaluation de la validité des données générées par des micro-capteurs dans le cadre d'utilisations citoyennes à des fins de caractérisation de l'exposition. L'objectif de cette deuxième étape sera de dresser une liste de points clefs ou de préconisations à associer à la réalisation de mesures et la constitution de données par les micro-capteurs dans un objectif d'évaluation des expositions. Elle englobera la question de l'appareil de mesure et des outils informatiques associés pour la gestion des données massives. Cette étude pourra intégrer par exemple des paramètres liés à l'instrumentation (robustesse des données, performance du micro-capteur, connectivité, gestion des données massives, etc.), aux comportements de l'utilisateur (conditions d'utilisation des micro-capteurs, gestion et usages des données générées, etc.) et aux besoins de couplage pour l'interprétation des données (budget espace-temps, géolocalisation, conditions climatiques etc.). Enfin, vous fournirez à la puissance publique des éléments permettant de mettre en perspective les données générées par les micro-capteurs dans le cadre d'utilisations citoyennes avec les données obtenues par des capteurs classiques (par exemple par des industriels ou autres acteurs dans un objectif de surveillance de la qualité de l'air).

Vous associerez notamment à vos travaux le LCSQA, les AASQA, l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris), l'ADEME, le CSTB et l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI).

Nous vous remercions de bien vouloir nous indiquer, dans les meilleurs délais, les modalités de réponse à cette saisine dont le délai de traitement attendu est de 1 an.



Le Directeur général
de la santé



Le Directeur général de
l'énergie et du climat



Le Directeur général de la
prévention des risques

Copie : LSCQA, AASQA, Ineris, ADEME, CSTB, OQAI

ANNEXE 2 : Suivi des actualisation du rapport

Date	Page		Description de la modification

ANNEXE 3 : Liste des organismes et projets sollicités dans le cadre de la consultation internationale

Pays	Organismes/ONG/Collectifs/projets	Réponses
France	ADEME	Oui
France	ATMO France	Oui (AirParis, Atmo Aura, Atmo Grand Est, Atmo Hauts-de-France)
France	Association des maires de France	Non
France	LISA (Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques)	(Oui)
France	LATMOS (Laboratoire atmosphères, milieux, observations spatiales) / CASPA	Oui
France	Projet Mobilisense - Inserm, Sorbone, IPLESP/UPMC	Oui
France	Projet Sepages - Inserm / Université de Grenoble	Oui
France	Projet Mobil'air/Intermob - Université de Grenoble	Oui
France	Projet Remedia - Inserm	Non
Belgique	ISSeP	Oui
Belgique	VITO	Oui
Belgique	Influencair	(Oui)
Belgique	BRAL (mouvement urbain qui se bat pour un Bruxelles durable)	Non
Suisse	Office fédéral de l'environnement/santé publique	Non
Suisse	OpenSense	Non
Allemagne	Bureau Fédéral de l'environnement (UBA)	(Oui)
Allemagne	Leibniz Institute for Tropospheric Research (TROPOS)	Non

Pays	Organismes/ONG/Collectifs/projets	Réponses
Royaume Uni	University of Surrey	Non
Royaume Uni	King's College	Non
Royaume Uni	National Centre for Atmospheric Science	Non
Pays-Bas	RiVM	Non
Pays-Bas	TNO	Non
Espagne	Spanish national research council (CSIC)	Non
Espagne	Smart citizen	Non
Italie	ENEA (Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic)	Non
Suède	SEPA (Swedish environmental protection agency)	(Oui)
Norvège	NILU (Norwegian Institute for Air Research)	Non
Kosovo	Environmental Protection Agency	(Oui)
Europe	Agence Européenne de l'Environnement (AEE)	(Oui)
Europe	Joint Research Centre (JRC) / Centre commun de recherché de la Commission européenne	Oui
Europe	Projet Athlete / ISGlobal	Oui
Europe	Projet Expanse / Université d'Utrecht (Pays-Bas)	Non
Europe	Projet Longitools / Université de Oulu (Finlande)	Non
USA	US EPA	(Oui)
USA	Cal EPA (Air Resources Board (ARB))	Non
USA	NIEHS (National Institute of Environmental Health Sciences)	Non

Pays	Organismes/ONG/Collectifs/projets	Réponses
USA	AQ-SPEC (Air Quality Sensor Performance Evaluation center)	(Oui)
USA	LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory)	Non
USA	Air Keepers	Non
Canada	INSPQ (Institut National de Santé Publique du Québec)	(Oui)
Australie	Queensland university of technologies	(Oui)
Chine (Hong-Kong)	HKUST (Hong Kong University of Science and Technology)	Non

En gras : Organismes/ONG/Collectifs/projets ayant fourni des informations concernant des projets mettant en œuvre des systèmes capteurs pour l'évaluation de l'exposition individuelle.

(Oui) : réponse mais pas d'éléments transmis.

ANNEXE 4 : Questionnaire transmis pour la consultation internationale

International consultation on air quality micro-sensors⁶⁹

The French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety (ANSES) is a public organisation of an administrative nature accountable to the French Ministries of Health, Agriculture, the Environment, Labour and Consumer Affairs. ANSES undertakes monitoring, expert appraisal, research and reference missions in a broad field of competence that encompasses human health, animal health and welfare, and plant health.

The development of micro-sensors for monitoring indoor and outdoor air quality has grown rapidly in recent years. These devices offer a variety of applications: public information / citizen science, air quality compliance/regulation, research in atmospheric sciences, exposure assessment.... They are used by an increasingly large audience: institutional actors involved in air quality monitoring, research organisations, communities, individuals or citizens' associations. The use of these micro-sensors raises several questions, including their metrological reliability, data management, use and interpretation, and ultimately their relevance to air quality issues.

Numerous projects on micro-sensors have been carried out or are underway in France. They mainly concern the metrological evaluation of these sensors and their use as a tool for raising the awareness of the general population.

The expertise currently conducted at ANSES focuses on the use of micro-sensors to collect personal exposure data, particularly when these tools are used by the general population for the measurement of air quality, and on the prospective use of these data for assessing the health impact of air pollutant exposure.

In this context ANSES is undertaking an international consultation to gather information on national programmes and practices on air quality micro-sensors, focusing on exposure assessment. Below is a list of specific questions.

The results of the international consultation will be incorporated into the final report to be published around summer 2021. The resulting report, including the international consultation, will be made public on our website.

This consultation covers Europe, North America (USA and Canada), Asia and Australia. If you are interested, we could share with you the results collected during this consultation. We realise that you, or your institution, may not be able to answer all of these questions and would welcome any suggestions for contact persons on this subject in your country.

A response as soon as possible and, if possible, by mid december would be greatly appreciated. Please send your answers to Ms. Emmanuelle Durand, emmanuelle.durand@anses.fr. Please do not hesitate to contact us with any questions for further clarification.

⁶⁹ Also called « Low cost sensors », sensor system, miniaturised sensors

Questions

⇒ Definition of sensors

- How do you define a micro-sensor for air quality monitoring applications?
- Are there any certification / standardisation projects for sensors in your country?

⇒ Use of micro-sensors to characterise personal exposure:

- What are the opportunities offered by micro-sensors to characterise personal exposure?
- What are their limitations?
- Have you conducted studies on the use of micro-sensors to characterise personal exposure?
- If yes, which studies? (please provide available references to published material, articles or reports)
- Are you aware of such studies conducted by other organisations?

The following questions relate to the project(s) conducted or underway in your organisation:

⇒ Questions regarding the context and objectives of the project(s):

- Why have you developed a project on the use of micro-sensors for personal exposure characterisation?
- What are the objectives of this project? In particular, does this project aim to assess the health impact of air pollutants exposure?
- What are the exposure and outcomes of interest?
- In which environments are the micro-sensors deployed (indoor environments: housing, offices, classrooms, hospitals ...; outdoor; multi-environments)?
- And for which specific population?

⇒ Questions regarding the actors involved in the project:

- Who are the project partners and what are their respective roles?
- What are the interactions between the different actors?
- What is the profile of the participants (individuals carrying out the measures)? How many are they? What are their motivations? How are they informed of such a study and how are they recruited?
- Are there inclusion criteria? If so, what are these inclusion/exclusion criteria?
- What instructions are given to the participants (i.e. individuals carrying out the measures)? What support is provided in the appropriation of the material and the implementation of the measures?

- What feedback is given to the project participants? In what form and with what level of technicality?

⇒ **Questions regarding the technologies used in these studies:**

- Which micro-sensors are used? (commercial micro-sensors, laboratory micro-sensors developed specifically for the project, etc.)
- On which criteria were they selected?
- What metrological evaluation has been carried out? In particular, have comparisons to reference devices been carried out?
- What are the key parameters to be evaluated when using a micro-sensor for exposure characterisation?
- Which air pollutants are measured?
- What other parameters are measured (e.g. temperature, humidity, noise, light)?
- Are date and time of the measure recorded?
- Are geographic coordinates of the measure recorded?
- Does the sensor allow direct reading of the information or is it coupled with a smartphone application or both?
- What are the advantages/disadvantages?
- Is it in real time or with data recording before sending?
- What is the micro-sensor lifetime?
- What maintenance is carried out on the micro-sensors and how often?

⇒ **Questions about exposure data**

- What kind of data are generated by the micro-sensors? (e.g. raw data, processed data, health message).
- Do the users have access to the data?
- How is individual exposure characterised from the data generated? What metadata are required? (e.g. space-time budget)
- How are the generated data collected (locally on SD card, by transmission to an online database ...)?
- In case of using a database, is the service included in the sensor system or did it require its own development?
- What is the mode of data transmission (local, wired/wireless and in the latter case by wifi, bluetooth, gsm, zigbee, lora)?
- On which time step and timespan are the data generated and recorded?

- How do you ensure the quality of the data?
- Have you defined validation rules?
- Have you observed deviations in the use of micro-sensors which can lead to “fake or biased data” (e.g. use of sensors in the immediate vicinity of a source of emission)? How are these specific data managed?
- Who legally owns the data?

⇒ **Feedback and prospective**

- What recommendations would you make to manufacturers of commercial micro-sensors and to users who want to use these technologies to assess their personal exposure and the associated health risks?
- What would be the relevant air pollutants (indoor and outdoor air pollutants) and parameters to be measured by micro-sensors for health interpretation purposes?
- What is the approximate cost of such a project?

ANNEXE 5 : Glossaire

Diamètre aérodynamique

Le diamètre aérodynamique est utilisé comme référence pour la définition des seuils de coupure associés aux fractions massiques PM_{2,5} et PM₁₀. Le diamètre aérodynamique est le diamètre d'une sphère de masse volumique égale à 1 g/cm³ ayant la même vitesse de sédimentation que la particule réelle.

Étude épidémiologique (d'après Anses, 2017)

Les études épidémiologiques permettent de caractériser la fréquence et la répartition dans le temps et dans l'espace des événements de santé au sein d'une population, ainsi que les déterminants de ces événements de santé.

Les études épidémiologiques peuvent être classées en deux catégories : les études interventionnelles où le chercheur détermine le facteur à étudier pour ensuite observer l'effet dans des conditions proches de l'expérience de laboratoire et les études d'observation où le chercheur ne fait qu'analyser une réalité qu'il n'a pas choisie. Les études d'exposition en chambre à atmosphère contrôlée relèvent entre autres du premier groupe ; les études cas-témoins, les études de cohorte et les études transversales relèvent entre autres du second.

Étude cas-témoins (d'après Anses, 2017)

Étude épidémiologique observationnelle constituée de deux groupes d'études : un groupe de sujets atteints d'une maladie ou d'un symptôme d'intérêt (appelés les cas) et un second groupe de sujets exempts de cette maladie (appelés témoins). Les témoins doivent être similaires aux cas afin de limiter le risque de biais. Le lien potentiel entre la maladie et le facteur de risque suspecté (exposition à un produit chimique, par exemple) est examiné en comparant la fréquence du facteur de risque chez les cas et chez les témoins ou le niveau d'exposition chez les cas et chez les témoins si celle-ci est estimée quantitativement. Cette comparaison se traduit par le calcul d'un *Odds-ratio* (OR), ou rapport des cotes d'exposition chez les cas et les témoins. L'objectif est étiologique : il s'agit de mettre en évidence un ou plusieurs facteurs de risque qui pourraient jouer un rôle délétère (OR>1) ou protecteur (OR<1) au regard de la présence de la maladie.

Étude écologique (d'après Anses, 2017)

Étude dont l'unité d'observation et d'analyse est une population ou un groupe d'individus et non pas des sujets individuels. Les données sont ici généralement agrégées au niveau géographique de l'unité d'étude. Un exemple d'étude écologique est l'étude de la relation entre la distribution des revenus et la mortalité selon les régions. Les conclusions des études écologiques ne s'appliquent pas forcément aux individus, c'est pourquoi leur interprétation nécessite des précautions, notamment au regard des risques de biais inhérents à ce type d'étude. Les études écologiques sont pertinentes lors de l'implémentation ou de l'évaluation d'une politique ou d'une action sanitaire, lorsque celles-ci affectent des groupes ou des régions mais offrent un niveau de preuve scientifique limité pour évaluer les effets sanitaires d'une exposition à une substance.

Étude transversale (d'après Anses, 2017)

Étude où l'investigateur mesure simultanément la maladie et ses facteurs de risque potentiels (dont l'exposition) dans un échantillon représentatif d'une population d'intérêt. Le but premier de ce type d'étude est de surveiller l'importance de la maladie et de l'exposition dans la population (calculs de prévalences). Ces études permettent aussi d'explorer les liens entre

exposition et maladie (estimation d'un risque relatif, RR, ou d'un OR), mais elles apportent un niveau de preuve plus faible que les études de cohortes et cas-témoins.

Étude de cohorte (d'après Anses, 2017)

Le principe des études de cohorte est de comparer l'incidence (nombre de nouveaux cas par unité de temps) d'une pathologie dans un groupe de personnes exposées, à l'incidence dans un groupe de personnes non-exposées. Les sujets sont suivis au cours du temps pour recueillir des informations sur cette exposition et sur l'apparition éventuelle de la maladie. Les études de cohorte peuvent être rétrospectives (= "cohortes historiques"), allant de l'apparition de la maladie vers la reconstitution de l'exposition qui la précède, ou prospectives, lorsque les individus composant la cohorte sont suivis en amont de l'apparition des événements de santé d'intérêt. L'objectif est double : descriptif (les cohortes sont les seules études permettant d'estimer l'incidence) et étiologique (estimation d'un RR ou d'un OR). Ce type d'étude est celui apportant le niveau de preuve le plus élevé parmi les études observationnelles (mises à part les méta-analyses).

Évaluation quantitative du risque sanitaire (EQRS) (d'Anses, 2017)

L'EQRS est un outil d'aide à la décision qui vise dans une situation d'incertitudes à organiser les connaissances disponibles afin de statuer sur le niveau de risque collectif pour la santé qu'induit une exposition d'individus à des substances ou à des situations dangereuses. Les principes de l'évaluation des risques sanitaires sont les suivants :

- Le principe de prudence scientifique : il consiste à adopter, en cas d'absence de données reconnues, des hypothèses raisonnablement majorantes définies pour chaque cas à prendre en compte ;
- Le principe de proportionnalité : il veille à ce qu'il y ait cohérence entre le degré d'approfondissement de l'étude et l'importance des incidences prévisibles de la situation supposée à risque. Ce principe peut conduire à définir une démarche par approches successives dans l'évaluation ;
- Le principe de spécificité : il assure la pertinence de l'étude par rapport à l'usage et aux caractéristiques d'une situation particulière. L'EQRS doit prendre en compte le mieux possible les caractéristiques propres de la source de pollution, des populations potentiellement exposées et de leur(s) lieu(x) de vie ;
- Le principe de transparence : les hypothèses et outils utilisés font l'objet de choix cohérents et expliqués par l'évaluateur, afin que la logique du raisonnement puisse être suivie et discutée par les différentes parties intéressées.

Le processus passe par quatre étapes : (i) L'identification du danger ; (ii) L'évaluation de la réponse (en fonction de la dose) ; (iii) L'évaluation de l'exposition ; (iv) La caractérisation du risque.

L'identification du danger ou des agents concernés se décompose en deux parties : le recensement des agents physiques, chimiques ou biologiques présents dans le contexte donné et susceptibles d'être en contact avec les populations ; puis le recensement des effets indésirables que ces agents peuvent provoquer chez les individus.

L'estimation de la relation dose-effet ou dose-réponse vise à quantifier la relation entre la dose d'exposition et la réponse de l'organisme ou sa probabilité de réponse. Cette étape a pour but de définir une relation quantitative entre une dose d'exposition et un niveau d'effet ou entre une dose d'exposition et une probabilité de survenue d'un effet. Les co-expositions (exposition à d'autres agents) ne sont pas, dans la très grande majorité des cas, prises en compte dans l'estimation de cette relation. Une valeur toxicologique de référence (VTR) est extraite de cette

relation dose-effet ou dose-réponse. Elle dépend de la nature des effets étudiés : déterministes (VTR à seuil) ou stochastiques (VTR sans seuil).

L'évaluation des expositions permet d'identifier les populations qui ont été, sont, ou seront en contact avec l'agent, ainsi que les voies, niveaux et durées d'exposition correspondants. L'estimation des expositions s'appuie sur une succession d'étapes dont l'objectif final est de décrire et de quantifier aussi précisément que possible les expositions à un agent, correspondant à un milieu, une voie d'exposition, une durée et un groupe donné d'individus.

La caractérisation du risque constitue l'étape de synthèse de la démarche, de présentation et de discussion des résultats ; cette étape est la synthèse des précédentes. Elle présente une estimation de la probabilité de survenue et de la gravité des effets indésirables susceptibles de se produire dans une population humaine en raison de l'exposition à l'ensemble des agents présents dans la situation étudiée. Le nombre de personnes pour lesquelles un effet est susceptible d'apparaître (ou la proportion de la population concernée) peut également être calculé. L'identification des groupes les plus à risque peut également faire partie des résultats. La présentation des résultats diffère suivant que l'effet considéré est déterministe ou stochastique. Dans le premier cas, un quotient de danger est calculé comme étant le rapport de la dose d'exposition par la dose sans effet estimée. Si ce quotient dépasse la valeur de 1, cela signifie que la dose d'exposition est supérieure à la dose sans effet pour toute ou partie de la population étudiée, et que le risque ne peut donc être écarté. Dans le second cas est présenté l'excès de risque individuel de maladie auquel les personnes peuvent être soumises. Les calculs de risque sont réalisés pour chaque agent et chaque voie d'exposition (ingestion, inhalation, contact cutané) pris individuellement. Même si certaines possibilités d'effets synergiques ou antagonistes sont décrites, une règle générale de quantification des effets combinés n'existe pas en l'état actuel des connaissances (idem pour les EQIS).

Évaluation Quantitative des Impacts sur la Santé (EQIS) (SPF, 2019)

L'EQIS est un outil d'aide à la décision permettant de quantifier les impacts sur la santé d'une exposition (ou un comportement) ou d'une amélioration ou d'une dégradation des niveaux de cette exposition au sein d'une population. Les EQIS s'appuient sur une démarche quantitative qui suppose une relation causale entre un facteur de risque et un effet sur la santé, établie notamment à partir des résultats des études épidémiologiques et toxicologiques. Les EQIS utilisent ainsi les relations dose-réponse issues des études épidémiologiques et les appliquent aux données de santé et environnementales propres à la zone étudiée. Les résultats permettent par exemple d'objectiver l'impact de la pollution, les bénéfices attendus pour la santé pour différents scénarios contrefactuels et/ou les impacts potentiels d'actions visant à réduire les niveaux de pollution, afin d'aider les parties prenantes à planifier et à mettre en œuvre des mesures permettant de protéger la santé de la population. La mise en œuvre d'une EQIS est donc (en théorie) restreinte aux facteurs pour lesquels la causalité a été établie et pour lesquels il existe des relations doses-réponses suffisamment robustes (issues de méta-analyses par exemple).

Exposition

Contact entre un agent chimique, physique, ou biologique et une cible, qui peut être un organe, un individu ou une population, pendant une période de temps. Ce contact peut avoir lieu par ingestion, inhalation ou encore par absorption cutanée en suivant différents vecteurs d'exposition comme l'alimentation, l'eau de boisson et l'air.

Impact sanitaire

Estimation quantifiée, exprimée généralement en termes de nombre de décès ou nombre de cas d'une pathologie donnée, et basée sur la combinaison d'une relation dose-réponse, d'une exposition et de la prévalence de l'évènement de santé étudié dans la population.

Méthode de référence pour la mesure de la qualité de l'air (FD X43-121, 2021)

Méthode de mesure considérée comme une référence par convention ou par choix technique et donnant la valeur de référence acceptée du mesurande.

Note 1 : Une méthode de référence est décrite dans sa totalité.

Note 2 : Une méthode de référence peut être une méthode manuelle ou automatique.

Note 3 : Une méthode de référence peut être imposée par une législation européenne ou nationale.

Note 4 : Une méthode de substitution peut être utilisée si l'équivalence avec la méthode de référence a été démontrée

Termes utilisés dans le domaine de la métrologie (FD X43-121, 2021)

Les termes repris dans ce glossaire sont issus du fascicule de documentation FD X43-121 de l'Afnor (FD X43-121, 2021) qui s'appuient pour certains sur les définitions du « Vocabulaire International de la Métrologie » (VIM).

- Dérive (Source : JCGM 200:2012 (VIM))

Variation continue ou incrémentale dans le temps d'une indication, due à des variations des propriétés métrologiques du capteur ou système capteur.

Note 1: les conditions et l'échelle de temps associée pour lesquelles la dérive est déterminée peut varier (ex : laboratoire ou terrain, court terme sur 24h, long terme sur le mois), ce qui peut induire plusieurs types de dérive.

Note 2 : Le terme « stabilité » est parfois utilisé abusivement pour caractériser la dérive du signal du capteur ou système capteur dans le temps.

- Étalonnage (Source : JCGM 200:2012 (VIM))

Opération qui, dans des conditions spécifiées, au cours d'une première étape, établit une relation entre les valeurs et les incertitudes de mesure associées qui sont fournies par les étalons de mesure et les indications correspondantes avec les incertitudes de mesure associées et, dans une seconde étape, utilise ces informations pour établir une relation permettant d'obtenir un résultat de mesure à partir d'une indication

Note 1 : Un étalonnage peut être exprimé sous la forme d'un énoncé, d'une fonction d'étalonnage, d'un diagramme d'étalonnage, d'une courbe d'étalonnage ou d'une table d'étalonnage. Dans certains cas, il peut consister en une correction additive ou multiplicative de l'indication avec une incertitude de mesure associée.

Note 2 : Il convient de ne pas confondre l'étalonnage avec l'ajustage⁷⁰ d'un capteur ou système capteur, souvent appelé à tort « autoétalonnage », ni avec la vérification de l'étalonnage.

⁷⁰ Ensemble d'opérations réalisées sur un capteur ou système capteur pour qu'il fournisse des indications prescrites correspondant à des valeurs données des grandeurs à mesurer.

Note 1 : Divers types d'ajustage d'un capteur ou système capteur peuvent être proposés : le réglage de zéro, le réglage en point d'échelle, le réglage d'étendue (appelé aussi réglage de gain) etc....

Note 3 : La première étape seule dans la définition ci-dessus est souvent interprétée comme étant l'étalonnage.

Note 4 : Dans le contexte du présent document, l'étalonnage constitue généralement en une comparaison pendant une période déterminée de la réponse du capteur ou système capteur avec la valeur (avec une incertitude connue) issue d'une méthode prise comme référence, les informations issues de cette comparaison étant utilisées pour l'ajustage consécutif (si nécessaire) du capteur ou système capteur.

Note 5 : les conditions environnementales et les caractéristiques micro-locales sur le lieu d'implantation (situation de fond ou de proximité) lors de l'étalonnage sont des points de vigilance importants.

- Fiabilité

Aptitude d'un capteur ou système capteur à fournir des informations (valides ou non) en réponse à un besoin donné.

Note 1: Cette aptitude peut se quantifier via des indicateurs tels que

- Le taux de recouvrement « p » des données issues d'un capteur ou système capteur lors d'une période d'essai donnée p (en %) = (nombre de données acquises par le capteur ou système capteur / nombre total de données possibles durant la campagne) x 100 ;
- Le taux de saisie de données.

Note 2 : Dans certains cas, la fiabilité vise à traduire la capacité d'un capteur ou système capteur à fournir des informations en continu, permettant par conséquent d'évaluer la qualité du système d'envoi et de partage des données (absence de déconnection ou de perte de données).

- Incertitude (de mesure)

Paramètre associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande.

- Interférent

Composant de l'air prélevé, à l'exclusion du constituant mesuré, qui affecte le signal de sortie du capteur ou système capteur.

Note 1 : à distinguer du paramètre d'influence (ex : la température ambiante).

Note 2 : un indicateur usuel de la sensibilité à un interférent est la pente de la droite de régression en présence dudit interférent.

Note 2 : Il convient de ne pas confondre l'ajustage d'un capteur ou système capteur avec son étalonnage, qui est un préalable à l'ajustage.

Note 3 Le design d'un capteur ou système capteur ne permet pas systématiquement son ajustage par l'utilisateur

Note 4 : l'ajustage n'est pas forcément réalisé par l'utilisateur lui-même et peut être effectué de manière autonome par le capteur ou système capteur lui-même ou dans le cadre du Cloud Computing.

Note 5 : Dans le cas de réseau de capteurs ou systèmes capteurs, une comparaison des dispositifs déployés (soit entre eux, soit vis-à-vis d'une mesure prise comme référence) peut servir à ajuster les mesures ou à minima de vérifier leur cohérence. Cette opération est généralement désignée par les termes « ajustage "Rendez Vous" (RDV) » dans le cas de systèmes mobiles ou « colocalisation » de manière plus générale.

Note 6 : les conditions environnementales et les caractéristiques micro-locales de la localisation (situation de fond ou de proximité) lors de l'ajustage sont des points de vigilance importants.

- Justesse (de mesure)

Etroitesse de l'accord entre la moyenne d'un nombre suffisant de valeurs mesurées répétées et une valeur de référence.

- Limite de détection (LD)

La plus petite valeur de mesurande qui peut être détectée de manière fiable par un capteur ou système capteur donné.

Note 1 : La valeur de la limite de détection d'un capteur ou système capteur donné est généralement affichée par le fabricant dans les spécifications techniques

Note 2 : Cette caractéristique métrologique dépendant de l'utilisation (cf. § 6), des informations sur la méthode de détermination seront données dans la partie du Fascicule de Documentation dédiée à cette utilisation

- Limite de quantification (LQ)

La plus faible quantité de mesurande quantifiable au moyen du capteur ou système capteur donné.

Note 1 : La limite de quantification est déterminée à partir de la limite de détection.

Note 2 : Cette caractéristique métrologique dépendant de l'utilisation.

- Linéarité

Capacité d'un capteur ou système capteur à produire un signal suivant une courbe linéaire de type signal = f(concentration).

Note 1: la méthode de linéarisation généralement utilisée est la régression par les moindres carrés.

Note 2 : les indicateurs de performance en termes de linéarité sont les valeurs du coefficient de détermination (R^2), la pente de la droite de régression et l'ordonnée à l'origine.

- Mesurande

Grandeur que l'on veut mesurer.

Note 1: Le mode d'expression de la grandeur est l'unité de mesure (ex : $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).

Note 2: dans le cas d'un capteur ou système capteur, le mesurande peut être exprimé sous une forme effective (ex : concentration), sous une forme dérivée (expression en équivalent d'une espèce, ex : équivalent NO_2) ou sous une forme relative, voire sans unité (ex : pourcentage, indice de qualité d'air, etc...).

- Pas de temps de mesure

Intervalle de temps utilisé par le capteur ou système capteur pour produire des résultats de mesure de routine dans les conditions d'exploitation usuelles

Note 1: également désigné par les termes « temps d'acquisition » ou « temps de moyennage »

Note 2 : A ne pas confondre avec le temps entre 2 mesures (période de prélèvement).

- Sélectivité

Capacité d'un capteur ou système capteur envers un composé chimique ou physique à pouvoir le détecter lui et lui seul en présence d'interférent(s).

- Sensibilité

Capacité d'un capteur ou système capteur à transformer la présence d'un composé chimique ou physique en un signal mesurable.

Note : Quelle que soit la méthode utilisée par un fabricant pour déterminer la sensibilité, plus la valeur du paramètre associé est grande, mieux le capteur réagit au composé ciblé ou à l'interférent présent.

- Taux de saisie (de données)

Pour une période d'essai donnée, ratio (en %) entre le nombre de données validées et le nombre total de données possibles issues du capteur ou système capteur.

Note : Dans le domaine de la qualité de l'air ambiant, le taux de saisie peut être également désigné par les termes « saisie de données » ou « couverture temporelle ».

- Temps de réponse

Intervalle de temps entre l'instant où l'on applique un changement de niveau de la concentration d'exposition au capteur ou système capteur et l'instant où le signal de sortie atteint un niveau correspondant à un niveau prédéfini.

- Variabilité

Ecart-type de reproductibilité entre différents réplicats d'un même capteur ou système capteur.

Valeurs guides de qualité d'air intérieur (VGAI) (d'après Anses, 2016)

Concentrations dans l'air d'une substance chimique en dessous desquelles aucun effet sanitaire ou aucune nuisance ayant un retentissement sur la santé n'est attendu pour la population générale en l'état des connaissances actuelles. Cette définition est directement applicable aux valeurs guides construites pour protéger d'effets à seuil de dose. Dans le cas d'effets sans seuil de dose identifiés, les VGAI sont exprimées sous la forme de concentrations correspondant à des probabilités de survenue d'un effet morbide ou d'une pathologie. Une VGAI vise à définir et à proposer un cadre de référence destiné à protéger la population des effets sanitaires liés à une exposition à la pollution de l'air par inhalation. Il s'agit de contribuer à l'élaboration de recommandations visant *in fine* à éliminer, ou à réduire à un niveau acceptable du point de vue sanitaire, les contaminants ayant un effet néfaste sur la santé humaine et le bien-être, que cet effet soit connu ou supposé. L'élaboration des VGAI Anses repose sur les mêmes principes que celle des VTR. Elles sont fondées uniquement sur des critères sanitaires et sont de nature indicative. Les VGAI proposées par l'Anses sont par ailleurs accompagnées d'une évaluation des méthodes de mesure des polluants dans l'air au regard de ces mêmes valeurs.

Les VGAI proposées par l'Anses constituent le socle initial du procédé institutionnel visant à fixer des valeurs réglementaires de surveillance de la qualité de l'air intérieur. Le Haut Conseil de Santé Publique (HCSP) propose, à partir des VGAI Anses des valeurs repères d'aide à la gestion de la qualité de l'air intérieur, ainsi qu'un calendrier pour leur déploiement. Des VGAI réglementaires peuvent enfin être établies par le ministère chargé de l'écologie, inscrites dans le code de l'environnement et sont associées à des mesures de gestion opposables (à ce jour, des valeurs guides pour l'air intérieur sont définies réglementairement pour le formaldéhyde et le benzène).

A l'échelle internationale, des valeurs de recommandations sont proposées dans certains pays et par quelques organismes reconnus, parmi lesquelles les valeurs guides pour la qualité de l'air intérieur publiées par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) en décembre 2010.

Valeurs toxicologiques de référence (VTR) (Anses, 2017)

Une VTR est une appellation générique regroupant tous les types d'indices toxicologiques permettant d'établir une relation entre une dose et un effet (toxique à seuil d'effet⁷¹) ou entre une dose et une probabilité d'effet (toxique sans seuil d'effet⁷²). Les VTR sont établies par des instances internationales (OMS, etc.), européennes (EFSA) ou des structures nationales (US EPA, RIVM, Santé Canada, Anses, etc.). Leur construction nécessite de :

- Recenser et analyser les données de toxicité disponibles ;
- Identifier le ou les organes cibles et l'effet critique⁷³ ;
- Identifier l'hypothèse de construction, à seuil ou sans seuil de dose ;
- Choisir une (ou plusieurs) étude(s) clé(s) de bonne qualité et la(les) plus pertinente(s) (épidémiologique ou toxicologique) ;
- Définir une dose critique ou point de départ (POD) chez l'Homme ou l'animal à partir de cette étude ;
- Réaliser des ajustements temporels (exposition continue sur la durée considérée) et allométriques⁷⁴ ;
- Pour une VTR à seuil, appliquer des facteurs d'incertitude à cette dose de manière à dériver une VTR applicable à l'ensemble de la population visée ; pour une VTR sans seuil (également appelée excès de risque unitaire – ERU), réaliser une extrapolation linéaire à l'origine afin de déterminer un excès de risque.

⁷¹ Les VTR « à seuil de dose » sont construites dans le cas de substances provoquant, au-delà d'une certaine dose, des dommages dont la sévérité augmente avec la dose absorbée. Sont classés dans cette catégorie principalement les effets non cancérogènes et cancérogènes non génotoxiques directs.

⁷² Les VTR « sans seuil de dose » sont construites dans le cas de substances pour lesquelles l'effet peut apparaître quelle que soit la dose reçue et où la probabilité de survenue augmente avec la dose. Il s'agit, pour l'essentiel et historiquement, des effets cancérogènes génotoxiques directs. Elles se définissent comme une augmentation de la probabilité, par rapport à un sujet non exposé, qu'un individu exposé lors de sa vie entière à une unité de dose de la substance développe une pathologie. Elles s'expriment sous la forme d'un excès de risque unitaire (ERU).

⁷³ L'effet critique correspond à un effet néfaste spécifique de la substance survenant aux doses ou concentrations les plus faibles.

⁷⁴ L'ajustement allométrique est une approche empirique pour l'extrapolation espèce à espèce des doses. Partant du postulat que les différentes espèces auraient la même sensibilité à une dose donnée par unité de surface corporelle (proportionnelle à son poids moyen porté à la puissance un quart), ce calcul permet d'ajuster la dose d'exposition critique retrouvée chez l'animal pour déterminer une dose équivalente humaine.

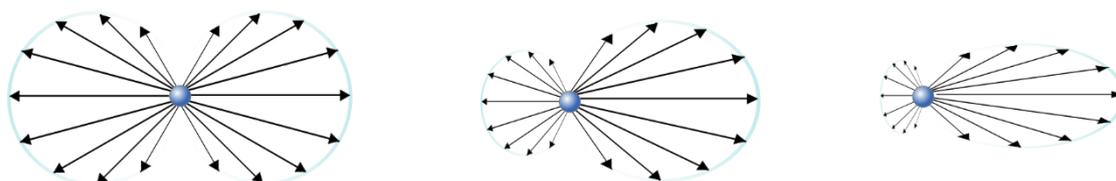
ANNEXE 6 : Principes physiques des éléments sensibles

Cette annexe présente les principes physiques des techniques disponibles pour la mesure de particules et de carbone suie (A) et de gaz (B).

A. Capteurs de particules et carbone suie

Loi de Mie

La diffusion par des très petites particules, telles que des molécules, de dimensions inférieures au dixième de la longueur d'onde de la lumière considérée, est un cas limite appelé diffusion Rayleigh. Pour les particules plus grosses que la longueur d'onde, on doit prendre en compte la diffusion de Mie dans son intégralité : elle explique dans quelles directions la diffusion est la plus intense, on obtient ainsi un « patron de réémission » qui ressemble à celui des lobes d'émission d'une antenne, avec, dans le cas de grosses particules, un lobe plus intense dans la direction opposée à celle d'où provient l'onde incidente.



De gauche à droite : intensité de la diffusion Rayleigh, de la diffusion Mie pour de petites particules et de la diffusion Mie pour de grosses particules, en fonction de la direction. L'onde incidente arrive par la gauche.

En fonction de la nature et de l'angle de polarisation qui est dans la grande majorité des cas de 90°, l'intensité mesurée peut différer d'un facteur 10 (par exemple entre une suie et un minéral).

Exemples de particules de natures différentes entraînant des écarts de mesure sur les capteurs lors de la transformation du nombre de particules en concentration massique.

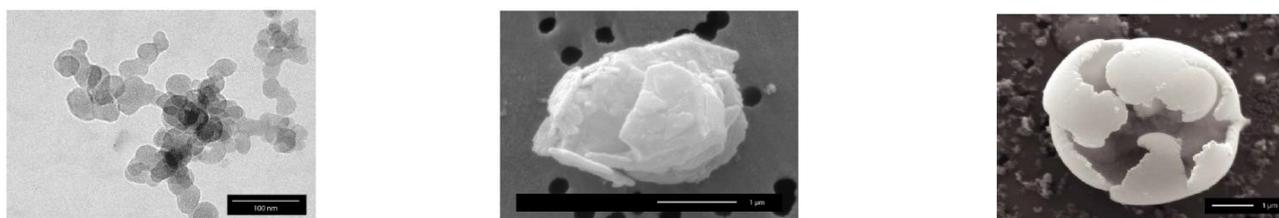


Figure 7 : Une suie (gauche), un minéral (centre), un métal (frein) (droite)

Calcul d'une concentration en carbone suie :

L'atténuation entre les 2 taches « ATN » d'un aethelomètre est définie comme ci-dessous sur la base de la loi de Beer-Lambert :

$$ATN = 100 \ln \left(\frac{I_0}{I} \right)$$

I_0 est l'intensité de la lumière transmise à travers une tache blanche de référence, et I est celle à travers la tâche d'aérosol déposée sur le filtre.

La mesure de I_0 et I au temps t produit ATN au temps t , qui est noté ATN_t . La mesure au pas de temps suivant ($t + \Delta t$) produit $ATN_{t+\Delta t}$. Ensuite, les changements d' ATN pendant l'intervalle de temps (Δt) sont calculés comme indiqué ci-dessous.

$$\Delta ATN = ATN_{t+\Delta t} - ATN_t$$

Selon Hansen et al. (1984), l' ATN est utilisée pour estimer la concentration de BC en utilisant l'équation suivante.

$$BC = \frac{1}{\sigma_{ATN}} \left(\frac{A * \Delta ATN}{100 * Q * \Delta t} \right)$$

Avec :

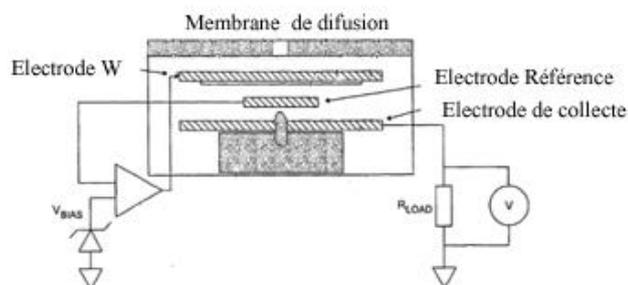
- σ_{ATN} : la section efficace d'atténuation massique,
- A : la zone de tache sur le filtre
- Q : le débit d'échantillonnage.

La section efficace d'atténuation massique utilisée de 12,5 m²/g.

B. Capteurs de gaz

Capteurs électrochimiques

Ces dispositifs mettent en jeu des électrodes insérées entre deux membranes. L'espèce gazeuse à analyser s'échange directement avec les ions mobiles de la membrane exposée à l'atmosphère extérieure. L'évolution de la concentration du polluant mesuré provoque un courant électrique entre les électrodes. La différence d'intensité ou de potentiel mesuré est alors proportionnelle aux concentrations du composé ciblé.



Principe d'une cellule électrochimique

Ce capteur basé sur une réaction d'oxydo-réduction a une durée de vie de plusieurs mois à quelques années en fonction de la taille des électrodes et du volume de l'électrolyte. Cette réaction électrochimique est très dépendante de l'humidité ambiante.

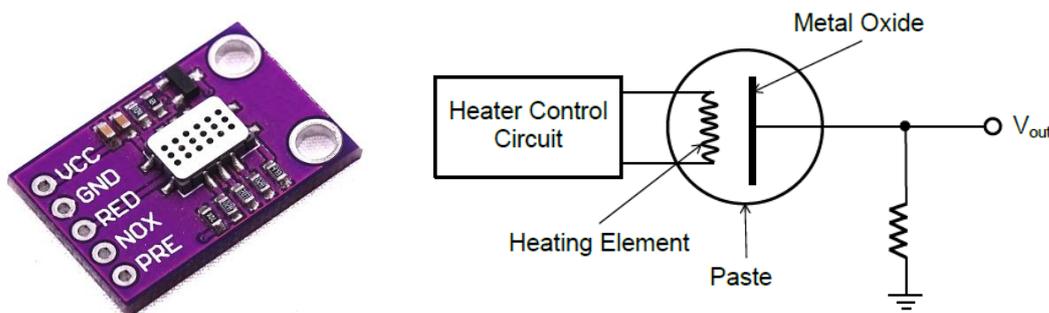
Capteurs semi-conducteurs ou à oxydes métalliques

Ces capteurs sont constitués d'une couche sensible semi-conductrice dont la conductivité dépend de la composition de l'atmosphère qui l'entoure. Le signal obtenu correspond donc à une résistance variable en fonction de l'évolution de la conductivité. Des défauts dans le réseau cristallin sont associés aux propriétés électriques des oxydes métalliques. En effet, ces composés métalliques sont souvent isolants à l'état de cristal parfait. Il existe deux types de semi-conducteurs :

- Type n : il possède des atomes de métal en excès qui peuvent s'ioniser facilement et libérer des électrons permettant le transport du courant ;
- Type p : certains nœuds du métal restent vacants, c'est pourquoi des ions perdent un électron de manière à conserver l'électro neutralité du composé. La conductivité électrique est permise par les trous ainsi formés.

La plupart des capteurs utilisés sont à base d'oxyde d'étain (SnO_2) à cause de sa grande réactivité avec un grand nombre de gaz. Le principe d'opération est le suivant : quand un gaz oxydant est présent, les molécules du gaz réagissent avec l'oxyde d'étain capturent les électrons de surface et conduisant à une hausse de la résistance de la couche SnO_2 . La réaction est réversible.

En règle générale, la sensibilité du capteur pour un gaz donné est dépendante de la température de chauffe : la sensibilité maximum est observée pour une température dite optimale. C'est pourquoi, en pratique, on essaie de travailler à cette température de manière à augmenter la sélectivité vis-à-vis de ce gaz et diminuer le temps de réponse. Pour maintenir cette température, un élément de chauffage est intégré dans les capteurs semi-conducteurs. Cela conduit à une consommation d'énergie plus élevée par rapport aux capteurs électrochimiques.



Principe d'un semi-conducteur

Les capteurs semi-conducteurs se prêtent particulièrement bien à l'emploi des technologies de fabrication de la microélectronique actuelle, permettant une réduction significative des prix (par exemple, les micro-capteurs à base de SnO_2 développés par la société MiCS – Figure 10).

Capteurs à détecteur à photo-ionisation (PID)

La mesure par photo-ionisation, basée sur un effet photoélectrique, consiste à éclairer les molécules d'un composé organique volatil par un rayonnement ultraviolet (UV) de haute énergie. L'absorption de photons par une molécule permet d'arracher un électron à cette dernière afin de l'ioniser. Ces ions chargés sont ensuite attirés par un champ électrique externe, généré par deux électrodes (cathode et anode), et créent un courant électrique (Figure II - 5). Ce signal est alors amplifié et est proportionnel au nombre d'ions formés et donc à la concentration en molécules ionisées. Les capteurs PID permettent de détecter des COV (mais pas exclusivement) ayant des potentiels d'ionisation inférieurs à l'énergie générée par la lampe UV, c'est-à-dire que ces molécules peuvent être fragmentées par des énergies inférieures à ce potentiel. Cette énergie dépend de la nature de lampe utilisée : Xénon=9,6 eV, Deuterium=10,2 eV, Krypton=10,6 eV et Argon=11,7 eV. Le gaz ionisé permet

l'établissement d'un courant électrique qui est amplifié puis traduit en concentration équivalente du gaz de référence utilisé pour la calibration (usuellement l'isobutylène, le toluène ou l'éthanol). Le capteur fournit ainsi une concentration équivalente unique à un mélange de substances. Une lampe au gaz krypton (énergie de 10,6 eV) permet de détecter la plupart des COV (sauf les plus légers comme le méthane, le formaldéhyde, le méthanol, etc.). A noter également que des gaz inorganiques peuvent également donner une réponse du PID comme le NO ou le NO₂ (IE de 9,26 et 9,75 eV respectivement), mais pas le CO₂ (IE de 13,77 eV), ni l'ozone (IE de 12,43 eV), la vapeur d'eau (IE de 12,65 eV) ou l'oxygène (IE de 12 eV). Une lampe au gaz argon (énergie de 11,7 eV) permet d'étendre la détection à certains COV comme le formaldéhyde ou le chloroforme. Elle présente par contre une durée de vie de quelques mois ce qui la cantonne à des usages bien particuliers.

La liste des composés organiques volatils pouvant être détectés par ces différentes lampes est présentée dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Liste des COV détectables selon la source utilisée dans les capteurs PID (Alphasense, 2010)

Type de lampe	COV détectés
Xénon (9,6 eV)	La majorité des aromatiques et des hydrocarbures insaturés contenant au moins 6 atomes de carbone, sélectivité accrue pour les BTEX
Krypton (10,6 eV)	La majorité des COVs composés de plus de 2 atomes de carbone, excepté les composés chlore, fluore ou brome : <ul style="list-style-type: none"> - Tous les hydrocarbures (alcanes, alcènes, alcynes), sauf éthane, propane et acétylène - Tous les alcools excepté le méthanol - Tous les aldéhydes, excepté le formaldéhyde - Toutes les cétones - Esters - Amines
Argon (11,7 eV)	Tous les COVs détectés par la lampe au Krypton plus l'acétylène, le méthanol, le formaldéhyde et jusqu'à 80 % des COVs fluorés, chlorés et bromés

Le temps de réponse de ces capteurs PID est très court de l'ordre de quelques secondes. Ces capteurs sont en général associés à un système de prélèvement de l'air par pompage pour alimenter en continu la cellule de détection. Compte tenu des lampes UV utilisées, ces capteurs restent particulièrement onéreux.

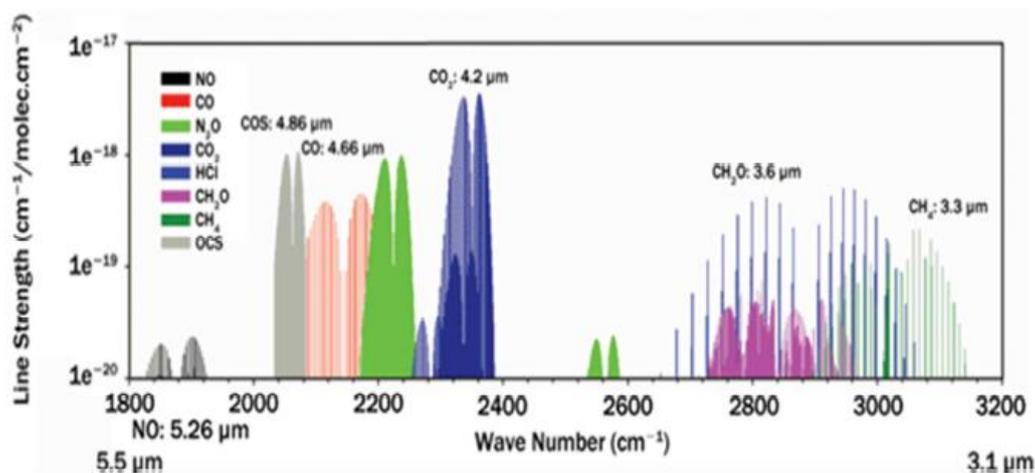
La réponse d'un PID avec une lampe de 10,6 eV est associée à une concentration en COV totaux. A noter que le mélange de COV totaux pris en compte peut différer de la définition normative des COV totaux (norme NF ISO 16000-6, 2011). Il n'est pas possible de remonter aux concentrations spécifiques à chaque constituant du mélange, sauf dans le cas de mélanges binaires ou ternaires relativement simples.

Capteurs à mesure optique (NDIR)

Le principe de détection des capteurs optiques de type infrarouge est basé sur le spectre d'absorption IR du gaz à caractériser. Dans ces capteurs, une source infrarouge (lampe IR) illumine le gaz à mesurer dans une chambre d'échantillonnage et les molécules présentes absorbent une partie du rayonnement infrarouge. Celles-ci absorbent de l'énergie à une longueur d'onde caractéristique, qui dépend de leur énergie de vibration. L'atténuation d'intensité du rayonnement infrarouge est mesurée par un détecteur, qui est généralement une photodiode, qui exploite l'effet photoélectrique, ou une thermopile basée sur l'effet thermoélectrique. Cette atténuation du rayonnement dépend de la quantité de gaz présent sur son trajet selon la loi de Beer-Lambert :

$$A = \log_{10} \frac{I_0}{I} = \varepsilon \cdot l \cdot c$$

Le rayonnement lumineux cible une longueur d'onde précise pour laquelle la molécule à analyser présente un maximum d'absorption. La sélection de la longueur d'onde de la source lumineuse est obtenue en utilisant soit directement une source avec un spectre d'émission très étroit (laser), soit des filtres qui sélectionnent une certaine gamme de longueurs d'onde. Les capteurs de type NDIR peuvent théoriquement être utilisés pour la mesure de tous les composés gazeux organiques et inorganiques qui absorbent dans l'IR, mais sont essentiellement utilisés i/ pour la détection des alcanes, qui partagent cependant une bande d'absorption similaire provenant de la liaison C-H ($\sigma \approx 3000 \text{ cm}^{-1}$) provoquant des problèmes de sélectivité, ii/ pour la détection du monoxyde de carbone ($\sigma = 2174 \text{ cm}^{-1}$), iii/ pour la mesure du dioxyde de carbone, avec une bande d'absorption ($\sigma = 2349 \text{ cm}^{-1}$) bien caractéristique de ce composé, ce qui permet d'avoir des capteurs très sélectifs (Chen et al., 2002; Pandey and Kim, 2007).



Spectre d'absorption IR des principales molécules détectées (Tittel et al., 2014).

Selon les capteurs, une seconde source IR peut être utilisée occasionnellement pour établir un signal de référence. Ce qui permet de corriger la dérive de la source principale de mesure (auto-étalonnage).

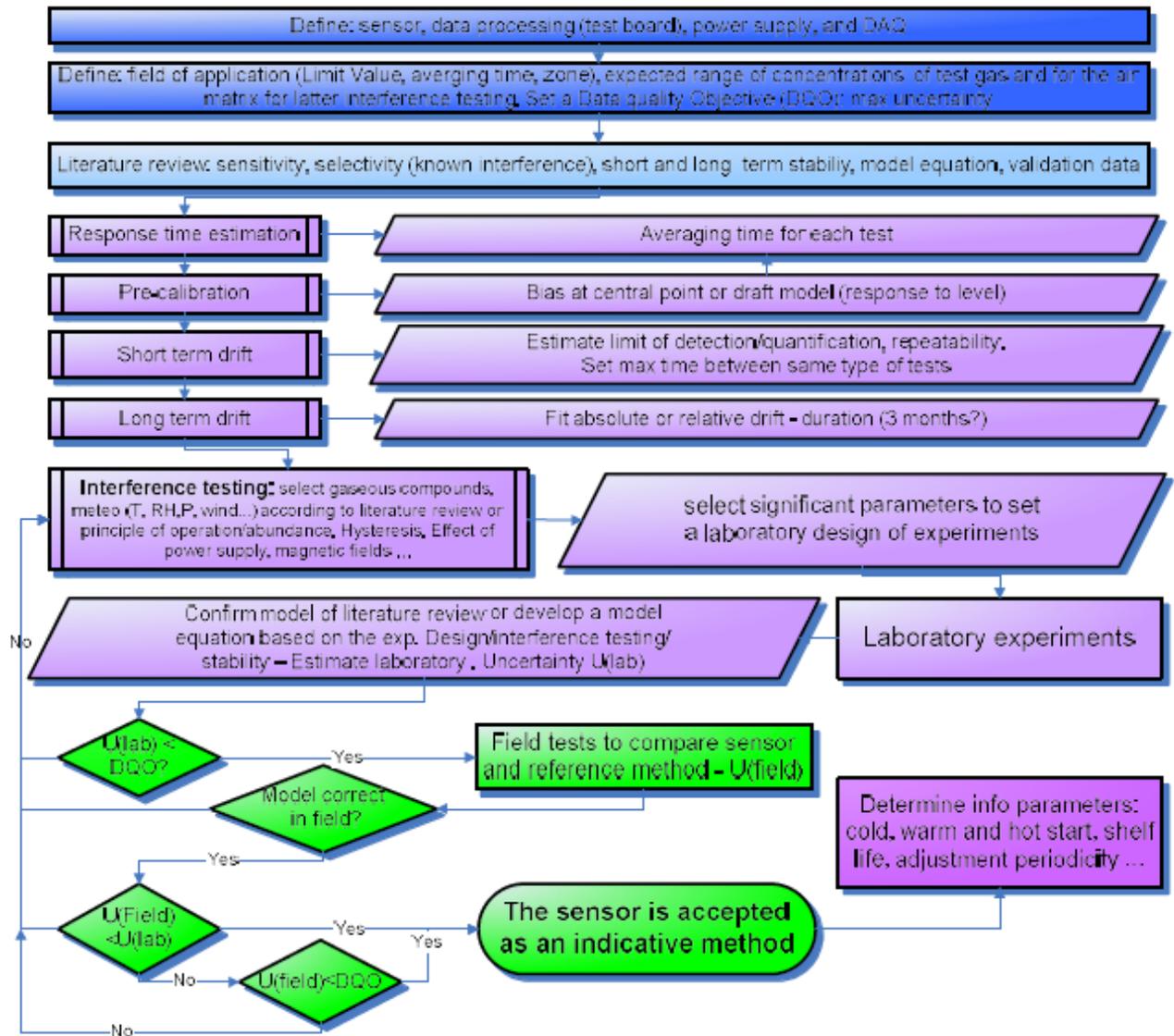
ANNEXE 7 : Critères de performance et niveaux d'exigence attendus pour la catégorie « évaluation de l'exposition individuelle – Travaux du groupe de travail national « micro-capteurs » du LCSQA (LCSQA, 2021)

Critère de performance	Multi-environnements	
Énergie	***	Il faut que le capteur fonctionne sur batterie, laquelle doit être d'un poids raisonnable et ait une autonomie d'au moins 12 heures
Fiabilité	***	Période minimale : il faut pouvoir faire des mesures sur une journée au moins. La répartition temporelle est importante, elle doit être homogène sur la période surveillée
Taux de saisie	**	Il faut pouvoir disposer de suffisamment de mesures valides à exploiter tout au long de la période d'exposition (au moins 50% par type d'environnement de mesure rencontré)
Données GPS	**	Peut être utile mais possibilité d'utiliser d'autres informations telles que l'emploi du temps et les trajets des individus pour évaluer l'environnement. Problématique des données personnelles à prendre en compte
Données météo	**	Assez important pour déterminer les variations d'environnement : intérieur / extérieur, heures de la journée, ... Mesures de température, pression et humidité
Autres polluants	**	C'est selon les besoins de l'étude, mais en multi-environnements, cela semble pertinent car les sources de pollution peuvent varier
Autres mesures	***	Niveau acoustique, luminosité et autre peuvent être pertinents selon les cas
Accès au statut des données	**	C'est intéressant de savoir si des traitements/corrections sont appliqués aux mesures en multi-environnements : est-ce que les données sont corrigées de la même façon en air intérieur / extérieur ?
Présence d'un système de visualisation de la donnée	***	Selon le but de l'étude il faut se préoccuper de savoir si l'individu peut ou pas visualiser les infos relatives à la pollution de son environnement car selon ce qu'il voit, il peut modifier son comportement

Critère de performance	Multi-environnements	
Mise en œuvre	**	Le capteur ne doit pas être trop complexe à mettre en œuvre s'il est confié au public. Cependant, l'individu suivi n'a pas forcément besoin d'accéder aux données et de manipuler le capteur
Accessibilité de la donnée	***	Il faut pouvoir étudier les résultats
Transmission de la donnée	**	Si les données ne sont pas transmises à distance, il faut les récupérer sur l'appareil : soit l'individu peut réaliser l'envoi, soit un opérateur doit venir les récupérer
Accès aux données en temps réel	-	Ce n'est pas un critère important dans ce contexte
Ajustage RDV	*	Il faut savoir si cette fonctionnalité est disponible sur les appareils mis en œuvre
Variabilité	**/**	Selon les conditions de l'étude : - Si c'est toujours le même capteur qui équipe un individu sur plusieurs jours, les données restent exploitables même avec une forte variabilité - S'il faut comparer les résultats entre plusieurs individus un même jour, la variabilité devient un critère à prendre en compte
Pente	**	
R ²	**	
Incertitude	*	A dimensionner en fonction de l'étude. Modalités de calcul ou d'estimation à renseigner
Dérive (laboratoire)	**	Il ne faut pas que la dérive soit trop importante sur la journée
Temps de réponse	***	Doit permettre de détecter les changements rapides dans l'environnement de l'individu lors de ses déplacements
Sensibilité aux interférents	*	A minima à connaître pour évaluer l'impact sur les mesures
Coût	*	Dans l'absolu ce n'est pas le critère le plus important comparativement au poids, à l'encombrement et à la qualité des données mesurées en multi-environnements

Critère de performance	Multi-environnements	
Période d'échantillonnage / pas de temps	***	Inférieure si possible à la minute pour détecter les changements rapides dans l'environnement de l'individu lors de ses déplacements
Comparabilité avec le poste central ou équivalent	-	Pas à réaliser dans ce contexte

ANNEXE 8 : Protocole d'évaluation des systèmes capteurs proposé par le JRC dans son rapport de 2013.



ANNEXE 9 : Synthèse des informations concernant les projets portant sur l'évaluation de l'exposition individuelle identifiés via la consultation internationale

Projet / Partenaires	Participants	Zone géographique	Environnements	Systèmes Capteurs	Accessible en vente au grand public ?	Polluants de l'air mesurés	Autres paramètres mesurés	Portabilité du système capteur	Evaluation métrologique préalable	Durée de vie des capteurs	Maintenance	Méthode évaluation BET	Lien santé étudié
Outdoor and Indoor Exposure (OIE) / ISSeP	Citoyens (volontariat)	Belgique	Multienvironnements (intérieur et extérieur)	Développé spécifiquement pour le projet	Non	NO, NO ₂ , O ₃ , PM _{2,5}	T°, HR, Patm, Géolocalisation	Oui	Oui (en laboratoire et sur le terrain)	18 mois approximativement	Pas de procédure établie	BET et données GPS	Non
SEPAGES / Inserm, Université de Grenoble	Femmes enceintes et jeunes enfants (recrutement) (484 familles)	Agglomération grenobloise	Multienvironnements (intérieur et extérieur)	MicroPEM	Non	PM _{2,5} , PM ₁₀	Accélérométrie (microPEM), bruit (Noisetube), géolocalisation (GPS)	Oui	Oui (ATMO Aura)	Non évaluée	Simple et internalisable	BET et données GPS, utilisation complémentaire de données de modélisation d'ATMO Aura pour l'évaluation des expositions en air extérieur	Santé respiratoire, cardiaque, neurodéveloppement, croissance
				AE51	Non	BC				Non évaluée	Externalisée		
				Autre: tubes passifs	NC	NO ₂ , benzène, toluène, éthylbenzène, xylènes				NC	NC		
Mobilisense / iPLEsp	Résidents du Grand Paris (recrutement après échantillonnage) (300 personnes) (30-64 ans)	Grand Paris	Multienvironnements (intérieur et extérieur, avec focus sur les transports)	AE51	Non	BC	Bruit, GPS, HR, T°	Oui	Oui (en laboratoire LSCE)	NR	Fréquente	BET issu du GPS, enquête de mobilité. Tabulation de l'exposition en fonction des lieux et modes de transport	Santé respiratoire et cardiovasculaire
				PAQM 520	Non	Particules sur 16 segments de taille de 0,4 à 10 µm, CO, O ₃ , NO ₂ , NO		Oui		NR	Fréquente		
Athlete (Urban intervention study)	Ecoliers de 9 à 11 ans (Recrutement) (N = 40)	Espagne (Barcelone), Angleterre (Bradford)		Atmotube Pro	Oui	PM ₁ , PM _{2,5} , PM ₁₀ , COV	T°, HR, Patm	Oui	Oui (externe) (terrain AQ SPEC)	NR	Non	NR	Santé respiratoire, cardiométabolique et mentale
				Autres : tubes passifs	NC	NO ₂	NC	NC	NC	NC	NC	NC	
MUSE/ CHU de Nice, APPA, BILOG, TERA, Faculté de pharmacie de Lille	Femmes enceintes (N = 300)	France (régions Sud et Hauts de France)	Multienvironnement	TERA	Non	PM ₁ , PM _{2,5} , PM ₁₀	NR	NR	NR	NR	NR	NR	Santé respiratoire (symptômes génériques)
Polluscope / Laboratoire DAVID, AirParif, CEREMA, EIVP, iPLESP, Irenav, LSCE	Citoyens (volontariat)	Agglomération Versailles Grand Parc et	Multienvironnements (intérieur et extérieur)	AE51, Carisen (NO ₂), Canarin (Prototype PM)	Oui pour AE51 et Cairsens	PM ₁ , PM _{2,5} , PM ₁₀ , NO ₂	GPS, HR, T°	Oui	Oui (en laboratoire LSCE et Airparif et en mobilité incluant le	2 ans pour le Capteur NO ₂ , NA aux autres capteurs	Remplacement de filtres pour l'AE51	GPS, BET renseigné (mais partiellement) par les participants, complété par un algorithme d'affectation par	Santé respiratoire (relevé par spiromètre)

Projet / Partenaires	Participants	Zone géographique	Environnements	Systèmes Capteurs	Accessible en vente au grand public ?	Polluants de l'air mesurés	Autres paramètres mesurés	Portabilité du système capteur	Evaluation métrologique préalable	Durée de vie des capteurs	Maintenance	Méthode évaluation BET	Lien santé étudié
		Grand Paris							passage près de stations Airparif)			apprentissage automatique	
PAMELA / laboratoires Université de Lille : PC2A, LOA, CRISTAL, IRCICA, ICARE, RIDAGE	Volontaires (adultes, métropole européenne Lille)	Métropole Européenne Lille	Multienvironnements (intérieur et extérieur)	capteurs mobiles développés spécifiquement par APOLLINE PM sur capteurs mobiles : HK-A5	Non	systèmes mobiles : PM (6 classes de taille 0,3-10 µm, PM ₁ , PM _{2,5} , PM ₁₀)	Mobiles : T, RH, GPS	Oui	Oui, en laboratoire (intérieur et extérieur). "semi-évaluation" métrologique sur le terrain.	Autour d'un an d'après les constructeurs des capteurs	Faite en interne. Changement des composants et capteurs quand nécessaire. Recalibration nécessaire à ce moment.	Questionnaire, GPS	Non
Campagne Nationale Logement 2 (CNL2) / OQAI	N = 600 logements	France	Air intérieur (Logements)	Cozy Air	Oui	CO ₂ , PM _{2,5} /PM ₁₀ /PM ₁ , COV totaux, CO, NO ₂	T, HR,	Non	Oui, intercomparaison avec instruments mis en œuvre dans méthodes de référence	NR	NR	NR	Non

NR : Non renseigné ; NC : Non concerné

ANNEXE 10 : Liste et objectifs des études portant sur l'évaluation de l'exposition individuelle à l'aide de systèmes capteurs identifiées dans la littérature

Les différents objectifs associés avec une utilisation potentielle de systèmes capteurs de mesure de concentrations des études identifiées ont été classés en 6 catégories :

- A : Quantification de l'exposition ;
 - A' : Mesure des concentrations sans information (durée et population) ;
- B : Étude de microenvironnements ;
 - B' : Variabilité temporelle (saisonnalités été/hiver, saisons sèche/pluvieuse, jour/nuit...) ;
 - B'' : Analyse d'activités ;
- C : Quantification de la dose inhalée ;
- D : Recherche d'un lien/association avec un ou plusieurs paramètres de santé ;
- E : Enrichissement des données de modélisation / prévision ;
- F : Autre (e.g. interaction avec l'activité physique).

Références	Objectifs de l'étude
Wallace <i>et al.</i> 2011	A, B (extérieur/intérieur)
Chowdhury <i>et al.</i> 2012	A, C
Delgado-Saborit, 2012	A, B, B''
Martinez <i>et al.</i> 2012	A
Buonanno <i>et al.</i> 2014	A, B, B' (comparaison de l'effet de saisonnalité), B'', C
Huang <i>et al.</i> 2014	A,B,C,D
Nieywenhuijsen <i>et al.</i> 2014	A, B (extérieur/intérieur/lieux d'activité)
Olsen <i>et al.</i> 2014	A,C,D
Smargiassi <i>et al.</i> 2014	A, D
Bekö <i>et al.</i> 2015	A, B (extérieur/mobilité/intérieur)
Nieuwenhuijsen <i>et al.</i> 2015	A, B
Steinle <i>et al.</i> 2015	A, B
Wangchuck <i>et al.</i> 2015	A, B (extérieur/intérieur/mobilité/lieux d'activité)
Zhuang <i>et al.</i> 2015	A, B (extérieur/intérieur/mobilité/lieux d'activité)
Gall <i>et al.</i> 2016	A, B (extérieur/intérieur/mobilité/lieux d'activité)
Good <i>et al.</i> 2016	A, B
Moore <i>et al.</i> 2016	A, B (extérieur/intérieur/lieux d'activité)
Norris <i>et al.</i> 2016	A, D
Rabinovitch <i>et al.</i> 2016	A,B,C,D
Sloan <i>et al.</i> 2015	A, B (extérieur/intérieur/lieux d'activité)
Chaney <i>et al.</i> 2017	A, B
Kaur <i>et al.</i> 2017	A, B et surtout B'', C
Paunescu <i>et al.</i> 2017	A, B (extérieur/intérieur/mobilité/lieux d'activité), F (LDSA: lung deposition surface aera en $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, qui peut s'apparenter à une dose inhalée)
Candia <i>et al.</i> 2018	A'

Références	Objectifs de l'étude
Chambers <i>et al.</i> 2018	A, D
Embiale <i>et al.</i> 2018	B
Koehler <i>et al.</i> 2018	A, B
Laeremans <i>et al.</i> 2018a	A, D, F (interaction avec l'activité physique)
Laeremans <i>et al.</i> 2018b	A, B, C, D
Avila-Palencia <i>et al.</i> 2019	A, D
Borghi <i>et al.</i> 2019	A, B, C
Donaire-Gonzalez <i>et al.</i> 2019a	A, C
Donaire-Gonzalez <i>et al.</i> 2019b	A, B, C
Dons <i>et al.</i> 2019	A (comptage de dépassement de seuils) ?, B
Hu <i>et al.</i> 2019	A, B, B'
Liang <i>et al.</i> 2019	A, B (extérieur/intérieur/mobilité)
Lyon-Caen <i>et al.</i> 2019	A, B (extérieur/intérieur/lieux d'activité), D
Mallires <i>et al.</i> 2019	A, B (focus sur la transition d'un microenvironnement à un autre)
Mazaheri <i>et al.</i> 2019	A, B, B''
Nyarku <i>et al.</i> 2019	A, B et B'', C
Ong <i>et al.</i> 2019	A, C, D
Paunescu <i>et al.</i> 2019	A, D, F (LDSA: lung deposition surface aera en $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, qui peut s'apparenter à une dose inhalée)
Yang <i>et al.</i> 2019	A,B,C
Barkjohn <i>et al.</i> 2020	A, B (extérieur/intérieur/mobilité/lieux d'activité)
Borghi <i>et al.</i> 2020	A, B, B', C
Chatzidiakou <i>et al.</i> 2020	A, B (extérieur/intérieur/lieux d'activité), C
Chen <i>et al.</i> 2020	A, B (extérieur/intérieur)
Dong <i>et al.</i> 2020	A (échelle population), D, E
Gaskins <i>et al.</i> 2020	A, B, D en perspective, F (optimisation/construction de protocoles de quantification de l'exposition individuelle)
George <i>et al.</i> 2020	A, B, D avec toxicologie
Han <i>et al.</i> 2020	A, B, B', B'' (présentation méthode)
Krall <i>et al.</i> 2020	A, B (voiture ou pas)
Lin <i>et al.</i> 2020	A' (avec info du temps passé dans ME sur 24h), B, B'
Ma <i>et al.</i> 2020	A,B,C
Oh <i>et al.</i> 2020	A, B, B', C
Sinaga <i>et al.</i> 2020	A' (sur 24h), B et surtout B'', B'
Van Nunen <i>et al.</i> 2020	A, B, C
Van Ryswyk <i>et al.</i> 2020	A,B (B' dans SI)
Woo <i>et al.</i> 2020	A, B (extérieur/intérieur/mobilité/lieux d'activité), C
Wu <i>et al.</i> 2020	A, B' (comparaison de l'effet de saisonnalité <u>sans géolocalisation</u>), C, D

Notes

**Micro-capteurs pour le suivi de la qualité de l'air
intérieur et extérieur**

**Volume 2 « Mesures citoyennes de qualité de l'air. Figures, Savoirs,
Actions »**

Saisine « n° 2018-SA-0271 »

**RAPPORT
d'expertise collective**

« CES Évaluation des risques liés aux milieux aériens »

«GT Micro-capteurs»

Mars 2022

Citation suggérée

Anses. (2022). Micro-capteurs pour le suivi de la qualité de l'air intérieur et extérieur. Volume 2. Mesures citoyennes de qualité de l'air. Figures, Savoirs, Actions (saisine 2018-SA-00271). Maisons-Alfort : Anses, 106 p.

Mots clés

Micro-capteurs, Systèmes capteurs, air intérieur, air extérieur, pollution atmosphérique, effets sanitaires, sciences participatives, profils, motifs d'engagement

Sensors, indoor air, outdoor air, air pollution, health effect, participatory science, profiles, motivations

Présentation des intervenants

PRÉAMBULE : Les experts membres de comités d'experts spécialisés, de groupes de travail ou désignés rapporteurs sont tous nommés à titre personnel, *intuitu personae*, et ne représentent pas leur organisme d'appartenance.

GROUPE DE TRAVAIL

Présidente

Mme Nathalie REDON – Enseignante-Chercheuse, IMT Nord Europe, CERI Energie Environnement - Spécialités : électronique, instrumentation, capteurs, qualité de l'air.

Membres

Mme Laurence ALLARD – Maîtresse de conférences, Université de Lille-Ircav-Sorbonne Nouvelle – Spécialités : sociologie des usages numériques

M. Christophe DEBERT – Responsable du service Métrologie et Innovation (Airparif) - Spécialités : métrologie, qualité de l'air.

M. Stephan GABET – Attaché temporaire d'enseignement et de recherche (ATER), Département "Toxicologie et Santé Publique", ULR 4483-IMPacts de l'Environnement Chimique sur la Santé (IMPECS), Faculté de Pharmacie, Faculté de Médecine, Université de Lille - Spécialités : santé publique, épidémiologie, effets et impacts sanitaires des polluants de l'air.

M. Benjamin HANOUNE – Chargé de recherches CNRS, Directeur du laboratoire Physicochimie des Processus de Combustion et de l'Atmosphère (PC2A), UMR 8522 CNRS/Université de Lille – Spécialités : chimie atmosphérique, qualité de l'air, métrologie.

Mme Tatiana MACE – Responsable du Département Métrologie des gaz (LNE) - Spécialités : métrologie, qualité de l'air.

Mme Malika MADELIN – Enseignante-chercheuse en géographie, Université de Paris (Paris Diderot), UMR 8586 PRODIG – Spécialités : géographie, climatologie urbaine, qualité de l'air, sciences participatives.

M. Olivier RAMALHO – Chef de projet multi-expositions au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) et responsable de la métrologie à l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI) – Spécialités : qualité de l'air intérieur, métrologie, odeurs, chimie analytique - santé environnement.

Mme Karine ZEITOUNI – Professeure des Universités, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ), membre associé de l'Université Paris-Saclay, Responsable de l'équipe ADAM du laboratoire Données et Algorithmes pour une Ville Intelligente et Durable (DAVID), UR 7431 - Spécialités : Informatique, Sciences de données et Intelligence artificielle pour des données spatiales et temporelles, Analyse de données de capteurs, Application aux domaines de l'environnement et de la santé.

RAPPORTEURS

Mme Laurence ALLARD – Maîtresse de conférences, Université de Lille-Ircav-Sorbonne Nouvelle – Spécialités : sociologie des usages numériques.

COMITÉ D'EXPERTS SPÉCIALISÉ

Les travaux, objets du présent rapport ont été suivis et adoptés par le CES « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » qui a été renouvelé au cours de l'instruction de cette expertise. Les compositions du CES ayant suivi ces travaux étaient les suivantes :

- CES « Évaluation des risques liés aux milieux aériens (2019-2020)

Présidente

Mme Rachel NADIF – Chargée de recherche (Institut national de la santé et de la recherche médicale – Responsable Équipe, CESP U1018) – Spécialité : épidémiologie, santé respiratoire.

Vice-président

M. Christophe PARIS – Professeur des universités, praticien hospitalier (Université de Rennes 1 - Institut de recherche en santé, environnement et travail Inserm 1085 – Centre hospitalier universitaire de Rennes). Spécialités : épidémiologie des risques professionnels, pathologies professionnelles, santé au travail.

Membres

Mme Sophie ACHARD – Enseignant chercheur, maître de conférence (Université Paris Descartes) – Spécialité : toxicologie environnementale.

Mme Christina ASCHAN-LEYGONIE – Enseignant-chercheur (Université Lumière Lyon 2 - UMR 5600 Environnement Ville Société (EVS)) - Spécialités : géographie, milieux urbains, inégalités de santé.

M. Denis BÉMER – Responsable d'études (Institut national de recherche et de sécurité) – Spécialités : physique et métrologie des aérosols - filtration de l'air. (Démission le 3 juillet 2020)

Mme Valérie BEX – Responsable de la cellule santé habitat (Service parisien de santé environnementale) – Spécialités : métrologie des polluants biologiques, qualité de l'air intérieur.

Mme Nathalie BONVALLOT – Enseignant chercheur (Ecole des hautes études en santé publique) – Spécialités : toxicologie, évaluation des risques sanitaires.

M. Denis CAILLAUD – Professeur des universités, praticien hospitalier (Centre hospitalier universitaire de Clermont-Ferrand) – Spécialités : pneumologie, allergologie, épidémiologie-environnement (pollens, moisissures).

M. Jean-Dominique DEWITTE - Professeur des universités, praticien hospitalier (Université de Brest) – Spécialités : santé travail, pneumologie.

M. Marc DURIF – Responsable de Pôle (Institut national de l'environnement industriel et des risques) – Spécialités : métrologie et méthode d'analyse des polluants de l'air, caractérisation des expositions.

Mme Émilie FREALLE – Praticien Hospitalier (Centre Hospitalier Régional Universitaire de Lille, Institut Pasteur de Lille) – Spécialités : écologie microbienne de l'air, microbiologie analytique, évaluation et prévention du risque microbiologique, surveillance de l'environnement intérieur.

M. Philippe GLORENNEC – Enseignant chercheur (Ecole des hautes études en santé publique – Institut de recherche sur la santé, l'environnement et le travail, UMR Inserm 1085) – Spécialités : évaluation des expositions et des risques sanitaires d'origine chimique.

Mme Ghislaine GOUPIL – Chef de département, adjoint au chef du pôle environnement (Laboratoire Central de la Préfecture de Police) – Spécialités : métrologie des polluants (air intérieur, air ambiant et air des lieux de travail), techniques d'analyses, réglementation air.

Mme Marianne GUILLEMOT – Responsable d'études (Institut national de recherche et de sécurité) – Docteur en Chimie – Spécialités : métrologie, surveillance atmosphérique et des environnements professionnels.

Mme Bénédicte JACQUEMIN – Chargée de recherche (Institut national de la santé et de la recherche médicale, Institut de recherche en santé, environnement et travail) – Spécialités : épidémiologie environnementale, pollution atmosphérique.

M. Olivier JOUBERT – Maître de conférences (Université de Lorraine) – Spécialités : toxicologie, sécurité sanitaire.

Mme Danièle LUCE – Directrice de recherche (Institut national de la santé et de la recherche médicale, Institut de recherche en santé, environnement et travail) – Spécialités : Epidémiologie, santé travail.

Mme Corinne MANDIN – Chef de division (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) – Spécialités : évaluation des expositions et des risques sanitaires, environnements intérieurs.

M. Fabien MERCIER – Ingénieur de recherche, Responsable R&D (Ecole des hautes études en santé publique / Laboratoire d'étude et de recherche en environnement et santé) – Spécialités : métrologie des polluants, méthodes d'analyse, air intérieur.

Mme Christelle MONTEIL – Enseignant-chercheur (Université de Rouen Normandie) – Spécialité : toxicologie.

Mme Anne OPPLIGER – Privat-Doctent & Maître d'Enseignement et de Recherche (Institut universitaire romand de Santé au Travail, Lausanne) – Spécialités : Santé travail, risques biologiques, bioaérosols, agents zoonotiques.

M. Pierre PERNOT – Responsable de service (Airparif) – Spécialités : surveillance et réglementation de la qualité de l'air.

■ CES « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » (2020-2023)

Présidente

Mme Rachel NADIF – Responsable d'équipe, chargée de recherche, (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale, CESP U1018) – Spécialités : épidémiologie, santé respiratoire.

Vice-président

M. Hervé LABORDE-CASTEROT - Praticien hospitalier (Centre antipoison de Paris, AP-HP Nord Université de Paris) – Spécialités : pathologies professionnelles, toxicologie clinique, épidémiologie, allergologie.

Membres

Mme Sophie ACHARD – Maître de conférences (Faculté de Santé - Université de Paris) – Spécialité : toxicologie environnementale.

M. Fabrice ALLIOT – Ingénieur d'études (Ecole Pratique des Hautes Etudes) – Spécialités : métrologie et méthode d'analyse des polluants de l'air, perturbateurs endocriniens.

M. Michel ANDRÉ – Directeur de recherche (Université Gustave Eiffel) – Spécialités : transports et pollution de l'air, métrologie et modélisation des émissions des véhicules et du trafic, méthodologies d'évaluation.

Mme Nathalie BONVALLOT – Enseignant chercheur (Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique – Institut de recherche sur la santé, l'environnement et le travail, UMR Inserm 1085) – Spécialités : toxicologie, évaluation des risques sanitaires, identification des mélanges et modèles de risques associés, perturbateurs endocriniens.

M. Patrick BROCHARD – Professeur émérite (Université de Bordeaux) – Spécialités : pneumologie, pathologies professionnelles et environnementales, impact sanitaire des particules inhalées (amiante, silice...).

Mme Fleur DELVA – Praticien hospitalier, médecin de santé publique (Centre Hospitalier Universitaire de Bordeaux) – Spécialités : médecine, prévention, reproduction, épidémiologie.

M. Jean-Dominique DEWITTE - Professeur des universités, praticien hospitalier (Centre Hospitalier Régional Universitaire de Brest) – Spécialités : pathologies professionnelles, pneumologie, allergologie.

M. Marc DURIF – Coordinateur de la thématique Risques, Sites industriels et Territoire – Direction de la Stratégie - Spécialités : métrologie et méthode d'analyse des polluants de l'air, émissions industrielles et anthropiques, caractérisation des expositions, construction de stratégies de surveillances dans l'air dans différents contextes.

Mme Émilie FREALLE – Praticien hospitalier (Centre Hospitalier Régional Universitaire de Lille, Institut Pasteur de Lille) – Spécialités : écologie microbienne de l'air, microbiologie analytique, évaluation et prévention du risque microbiologique, surveillance de l'environnement intérieur.

M. François GAIE-LEVREL – Ingénieur chercheur (Laboratoire national de métrologie et d'essais) – Spécialités : métrologie, pollution atmosphérique, aérosols, nanoparticules.

M. Philippe GLORENNEC – Enseignant chercheur (École des Hautes Études en Santé Publique – Institut de recherche sur la santé, l'environnement et le travail, UMR Inserm 1085) – Spécialité : évaluation des expositions et des risques sanitaires d'origine chimique.

Mme Marianne GUILLEMOT – Responsable d'études (Institut National de Recherche et de Sécurité) – Spécialités : métrologie, surveillance atmosphérique et des environnements professionnels.

Mme Marion HULIN - Chargée de projet et d'expertise scientifique (Santé Publique France) – Spécialités : épidémiologie, qualité de l'air intérieur, santé environnement, évaluation des expositions.

Mme Bénédicte JACQUEMIN – Chargée de recherche (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale) – Spécialités : épidémiologie environnementale, pollution atmosphérique.

M. Olivier JOUBERT – Maître de conférences (Université de Lorraine) – Spécialités : toxicologie, sécurité sanitaire, particules.

Mme Juliette LARBRE - Directrice du Laboratoire Polluants Chimiques (Service Parisien de Santé Environnementale) – Spécialités : qualité de l'air intérieur et extérieur, métrologie, santé environnement.

Mme Barbara LE BOT – Professeur des Universités, Directrice adjointe du Laboratoire d'étude et recherche en environnement et santé (Ecole des hautes études en santé publique) –

Spécialités : évaluation des expositions, santé publique, métrologie et méthode d'analyse des polluants de l'air et poussières.

Mme Johanna LEPEULE – Chargée de recherche (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale) – Spécialités : pollution de l'air, épidémiologie environnementale, santé périnatale, grossesse, épigénétique, modélisation des expositions.

Mme Danièle LUCE – Directrice de recherche (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale) – Spécialités : épidémiologie, santé travail, expositions professionnelle et environnementale.

Mme Corinne MANDIN – Chef de division (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur) – Spécialités : évaluation des expositions et des risques sanitaires, environnements intérieurs.

Mme Anne OPPLIGER – Responsable de recherche (Unisanté : Centre universitaire de médecine générale et santé publique de Lausanne) – Spécialités : santé travail, risques biologiques, bioaérosols, agents zoonotiques.

M. Pierre PERNOT – Directeur Opérationnel (Airparif) – Spécialités : métrologie, surveillance et réglementation de la qualité de l'air.

M. Nhan PHAM-THI – Enseignant chercheur, médecin (Institut de Recherche Biomédicale des Armées, Ecole Polytechnique) – Spécialités : allergologie, pneumologie.

M. Jean-Marc THIBAUDIER – Médecin du travail (Retraité - Mutualité Sociale Agricole des Alpes du Nord) – Spécialités : santé travail, médecine, agriculture, produits phytosanitaires, poussières agricoles.

PARTICIPATION ANSES

Coordination et contribution scientifique

Mme Emmanuelle DURAND – Coordinatrice d'expertise, Unité d'Évaluation des Risques liés à l'Air (UERA) – Anses

Mme Amandine PAILLAT – Adjointe à la cheffe d'unité, Unité d'Évaluation des Risques liés à l'Air (UERA) – Anses

Contribution scientifique

Mme Camille BOUBAL – Chargée de projets en sciences sociales – Mission Sciences Sociales Expertises et Société - Anses

Secrétariat administratif

Mme Sophia SADDOKI – Anses

Mme Isabelle PIERI - Anses

SOMMAIRE

Présentation des intervenants	3
Sigles et abréviations	10
Liste des figures	11
1 Contexte, objet et modalités de réalisation de l'expertise	12
1.1 Contexte	12
1.2 Objet de la saisine	13
1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation.....	14
1.4 Prévention des risques de conflits d'intérêts	14
2 Introduction	15
2.1 Point méthodologique	15
2.1.1 Entretiens.....	15
2.1.2 Questionnaires aux participants	16
2.2 Mesures citoyennes de qualité de l'air et sciences participatives : éléments de contextualisation.....	17
2.2.1 Définitions et enjeux des sciences participatives	17
2.2.2 Profils et pratiques des utilisateurs de systèmes capteurs de qualité de l'air : une enquête qui concerne le public.....	19
2.3 Profils des campagnes de mesures citoyennes basées sur les systèmes capteurs ...	20
2.4 Profils des engagements et expertises dans les campagnes citoyennes de mesure de qualité de l'air	21
3 Partie 1 : Profils des campagnes de mesures citoyennes basées sur les systèmes capteurs	23
3.1 Polluants : « paysages » de la qualité de l'air	23
3.2 Systèmes capteurs : choix et justification des dispositifs.....	23
3.3 Acteurs : politique des campagnes de mesures citoyennes	25
3.4 Profils idéal types des utilisateurs : techniques et politiques de recrutement.....	28
3.5 Mesures accompagnées : formations, protocoles et temporalités d'animation	31
3.6 Valorisation : accès et pratiques des données, retours sur les usages (habitudes, connaissances, sensibilités).....	35
4 Partie 2 : profils des engagements et expertises dans les campagnes citoyennes de mesure de pollution	40
4.1 Profils d'engagement : des données sociodémographiques aux motifs participatifs...41	
4.1.1 Des profils sociodémographiques qualifiés.....	41
4.1.2 Habiter, se déplacer : deux voies de motivations ?.....	45
4.1.3 La qualité de l'air comme problème collectif	48
4.1.4 Le motif de la santé (soi, les siens)	51
4.1.5 Le motif de la technophilie.....	52

4.2	Valorisations mutuelles : accessibilité du dispositif, pratiques des données et retours sur les usages (habitudes, connaissances, sensibilités).....	57
4.2.1	Adoptions du dispositif	57
4.2.2	Accès, valorisation et publication des données	59
4.3	Sensibiliser, mobiliser, persister : une co-évaluation sans fin par les participants	64
4.3.1	Savoirs et savoir-faire de la qualité de l'air : de la sensibilisation à l'action.....	65
4.3.2	Persistances	68
5	Conclusions	71
6	Bibliographie	73
	Annexe 1 : Lettre de saisine	77
	Annexe 2 : Suivi des actualisations du rapport	80
	Annexe 3 : Questionnaire A : profils et motivations des utilisateurs collectifs de systèmes capteurs	81
	Annexe 4 : Questionnaire B : profils et motivations des utilisateurs individuels de systèmes capteurs	92

Sigles et abréviations

AASQA : Association agréée pour la surveillance de la qualité de l'air

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

AIC : Agence d'Innovation Comportementale

Anses : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

CEPREMAP : Centre Pour la Recherche Économique et les APplications

CES : Comité d'experts spécialisés

CO : Monoxyde de carbone

CO₂ : Dioxyde de carbone

COV : Composés Organiques Volatils

DGEC : Direction Générale de l'Énergie et du climat, Ministère de la Transition Écologique

DGPR : Direction Générale de la Prévention des Risques, Ministère de la Transition Écologique

DGS : Direction Générale de la Santé, Ministère des Solidarités et de la Santé

EHESP : École des Hautes Études en Santé Publique

MISSES : Mission sciences sociales expertise et société

PM : Particules en suspension (*particulate matter*)

SHS : Sciences Humaines et Sociales

Liste des figures

Figure 1 : Répartition par tranche d'âge des répondants (utilisateurs collectifs – questionnaire A).....	42
Figure 2 : Répartition par genre déclarée par les répondants (utilisateurs collectifs - questionnaire A).....	43
Figure 3 : Situation professionnelle déclarée par les répondants (utilisateurs collectifs - questionnaire A).....	43
Figure 4 : Niveau de diplôme déclaré par les répondants (utilisateurs collectifs – questionnaire A).....	44
Figure 5 : Niveaux de revenus du foyer déclarés par les répondants (utilisateurs collectifs – questionnaire A).....	45
Figure 6 : Type d'habitat déclaré par les répondants (utilisateurs collectifs – questionnaire A).....	46
Figure 7 : Situation de l'habitat déclaré par les répondants (utilisateurs collectifs – questionnaire A).....	46
Figure 8 : Mode de chauffage déclaré par les répondants (utilisateurs collectifs – questionnaire A).....	47
Figure 9 : Modes de transport principaux déclarés par les répondants (utilisateurs collectifs – questionnaire A).....	48
Figure 10 : Modes de transport secondaires déclarés par les répondants (utilisateurs collectifs – questionnaire A).....	48
Figure 11 : Age des utilisateurs individuels de systèmes capteurs (utilisateurs individuels - questionnaire B).....	53
Figure 12 : Présence de liens professionnels ou personnes dans le domaine de la qualité de l'air déclarée par les répondants (utilisateurs individuels – questionnaire B).....	54
Figure 13 : Réponses à la question « les données vous paraissent elles compréhensibles » par les utilisateurs individuels-questionnaire A (à gauche) et collectifs (à droite) (utilisateurs individuels – questionnaire B).....	55

1 Contexte, objet et modalités de réalisation de l'expertise

1.1 Contexte

Les micro-capteurs ou capteurs bas coûts, appelés ainsi en raison de leur taille et de leur coût d'achat initial réduit, comparativement aux instruments de mesure utilisés dans les méthodes de référence connaissent une expansion rapide ces dernières années.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer l'essor des micro-capteurs :

- Le coût d'achat initial relativement faible de ces technologies par rapport aux instruments de mesure utilisés dans les méthodes de référence ;
- Leur facilité d'usage et leur adaptabilité, qui offrent des champs d'application variés et une utilisation par un public large ;
- La sensibilisation croissante de la population à la pollution de l'air et à ses impacts sur la santé ;
- Le développement des sciences participatives « crowdsourcing » et un intérêt croissant de la population à produire des données et à les partager ;
- Une demande et un intérêt croissant d'une partie de la population pour les objets connectés (internet des objets) ;
- Un besoin d'amélioration des connaissances sur la répartition spatio-temporelle à grande échelle de la pollution de l'air, et la couverture de différents microenvironnements ;
- Des progrès en ingénierie électronique et en informatique permettant la gestion des grandes quantités de données générées.

De plus, une certaine méfiance vis-à-vis des mesures effectuées par des organismes agréés par l'État et la volonté de connaître sa propre exposition à la pollution de l'air peut expliquer l'essor des micro-capteurs.

Ces technologies, du fait de leurs caractéristiques, offrent de multiples champs d'application et sont utilisées par un public de plus en plus large : acteurs institutionnels impliqués dans la surveillance de la qualité de l'air, organismes de recherche, collectivités, citoyens ou associations de citoyens.

Dans le contexte du développement des usages citoyens des micro-capteurs, que cela soit dans le cadre de campagnes collectives ou de pratiques individuelles, il est intéressant de contribuer à la connaissance du profil des utilisateurs non pas seulement au plan sociodémographique mais également au plan des motifs de participation et des apports en termes de savoirs et savoirs-faire. Cette étude permet de compléter de façon plus systématique les suivis sociologiques qui accompagnent parfois des expérimentations menées par des Associations agréées pour la surveillance de la qualité de l'air (AASQA) ou des

villes¹. Elle s'attache également aux utilisateurs individuels qui ont fabriqué ou acheté un système capteur en leur proposant un questionnaire spécifique. Les résultats présentés dans ce rapport peuvent également documenter empiriquement les réflexions sur l'essor des sciences participatives notamment en ce qui concerne la sociologie des publics de celles et ceux qui contribuent à mesurer la qualité de l'air qui les environne.

1.2 Objet de la saisine

L'Anses a été saisine le 21 décembre 2018 par la Direction Générale de la Santé (DGS), la Direction Générale de l'Énergie et du Climat (DGEC) et la Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR) ont saisi l'Anses afin de réaliser un « état des connaissances sur l'utilisation de micro-capteurs par des citoyens pour le suivi de la qualité de l'air intérieur et extérieur » (Annexe 1). Les travaux d'expertise doivent permettre de disposer d'éléments d'information concernant notamment la pertinence, la validité et l'utilisation des données générées par les micro-capteurs utilisés dans des environnements intérieurs et extérieurs, en vue de caractériser l'exposition des populations, en particulier lorsque ces outils sont utilisés par un public non expérimenté.

Ainsi, il est demandé à l'Anses :

- De dresser un état des lieux :
 - Des travaux mettant en œuvre des micro-capteurs au niveau national, européen et international afin de recenser les objectifs alloués à ces études et le cadre d'application de ces technologies. Cette analyse contribuera également à lister les technologies disponibles, leur validité métrologique lorsque celle-ci aura été évaluée, le contexte dans lequel elles sont mises en œuvre (objectifs suivis, polluants visés, design de l'étude, etc.), ainsi que les opportunités et limites de leur utilisation ;
 - **Des profils d'utilisateurs des micro-capteurs afin de préciser le cadre d'utilisation des micro-capteurs par les citoyens, et l'accompagnement qui peut être fait dans la lecture et l'interprétation des données.**
- D'évaluer l'intérêt et les limites, voire la complémentarité par rapport à la mesure classique, des données de concentrations issues de micro-capteurs utilisés par les citoyens dans un objectif de caractérisation de l'exposition à des fins d'interprétation sanitaire. Il s'agit notamment dans cette étape de lister les paramètres clés pour considérer qu'une donnée d'exposition est recevable à des fins d'interprétation sanitaires, et d'étudier l'aptitude des micro-capteurs à répondre à ces objectifs ;
- De discuter du statut juridique des données générées par les micro-capteurs.

L'état des lieux des profils et motivations des utilisateurs de micro-capteurs, qui a fait l'objet d'une étude spécifique, fait l'objet du présent rapport. Les autres questions de l'expertise font l'objet d'un rapport d'expertise spécifique (Volume 1).

Dans la suite du document, le terme système capteur est utilisé au lieu du terme micro-capteur en lien avec les définitions proposées par l'Agence française de normalisation (Afnor) (cf. Volume 1).

¹ Cf la bibliographie présentée en fin de volume 2 qui mentionne les rapports de suivi et d'évaluation de campagnes de mesures collectives.

1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation

L'Anses a confié au groupe de travail « Micro-capteurs », rattaché au comité d'experts spécialisé « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » l'instruction de cette saisine.

L'Anses a nommé Mme Laurence Allard, membre du groupe de travail, en tant que rapporteur pour la réalisation de l'état des lieux des profils et motivations des utilisateurs de systèmes capteurs. Ce travail fait l'objet de ce présent rapport intégralement rédigé par Mme Laurence Allard, relu et validé par le groupe de travail « micro-capteurs ».

Les travaux d'expertise du groupe de travail ont été soumis régulièrement au CES (tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques). Le rapport produit par le groupe de travail et le rapport produit par le rapporteur tiennent compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

Ces travaux sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires.

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – prescriptions générales de compétence pour une expertise (mai 2003) »

1.4 Prévention des risques de conflits d'intérêts

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont publiées sur le site internet <https://dpi.sante.gouv.fr/>.

2 Introduction

« Cette pratique "ouvre les yeux" ou "matérialise" ce que nos sens ne peuvent percevoir. » (X, captologue citoyenne)

L'enquête sur les usages des systèmes capteurs des utilisateurs s'inscrit dans le cadre de l'expertise menée relative à l'utilisation de systèmes capteurs par des citoyens pour le suivi de la qualité de l'air. L'Anses a mis en place un groupe de travail afin de réaliser un « état des connaissances sur l'utilisation de systèmes capteurs par des citoyens pour le suivi de la qualité de l'air intérieur et extérieur », dans un objectif de santé publique. Parmi les questions adressées à l'Anses (cf. chapitre 1.2) par les ministères en charge de la santé et de l'environnement figure une question spécifique sur les profils et motivations des utilisateurs de systèmes capteurs, objet de ce rapport.

2.1 Point méthodologique

Les développements présentés dans ce rapport sont basés à la fois sur un travail bibliographique de synthèse et de réflexions analytiques sur la problématique des mesures citoyennes de qualité de l'air ainsi que sur les résultats d'une double enquête à la fois quantitative et qualitative auprès de porteurs de projets (entretiens) et d'utilisateurs de systèmes capteurs (*via* des questionnaires en ligne). Cette enquête a été conduite par Laurence Allard, membre du groupe de travail et nommée rapporteur pour la réalisation de ces travaux, avec l'appui de la Mission sciences sociales, expertise et société (MISSSES) de l'Anses.

La liste des projets à interroger a été établie avec le groupe de travail « micro-capteur », sur la base notamment des retours de la consultation (cf. Rapport d'expertise collective volume 1).

2.1.1 Entretiens

La première étape du travail a consisté en une dizaine d'entretiens qui se sont tenus de décembre 2020 à janvier 2021 avec des initiateurs ou experts de campagnes de mesures citoyennes de pollution de l'air mentionnés ici par ordre alphabétique² :

- Tim Cassiers, chercheur indépendant en Sciences Humaines et Sociales (SHS) pour le collectif BRAL-Citizens Action Brussels ;
- Florian Charvolin, sociologue, spécialiste de la socio-histoire de la pollution, Centre Max Weber, CNRS, interrogé à propos de CheckBox-Annonay ;
- Julie Cozic - cheffe de projet innovation à AtmoAura, à propos de l'expérimentation de prêt de systèmes capteurs, la Captothèque et des projets Mobicit'Air, CheckBox (Grenoble et Annonay, Vallée de l'Arve) ;

² Les entretiens ont été anonymisés dans cette version. Nous remercions grandement les personnes interrogées à cette occasion.

- Audrey Deblay-Davoise, ingénieure climat-air-énergie au sein d'ATMO Grand Est interrogée à propos des projets Casp'Air et Vision'Air en région Grand Est ;
- Sarah Duché, maître de conférences en géographe, Université Grenoble, interrogée au sujet du projet Mobicit'air à Grenoble ;
- Séverine Frère, maître de conférences habilitée à diriger des recherches (HDR) en aménagement du territoire, Dunkerque, interrogée à propos du projet Vel'Air dans les Hauts de France ;
- Jean-Pierre Guéno, coordinateur France du collectif Sensor.Community ;
- Marion Guiet du Pôle innovation au Secrétariat Général de la ville de Paris, qui a piloté le projet « Respirons mieux dans le 20e » en synergie avec la mairie du 20e, Airparif, AirCitizen et les citoyens participants ;
- Stéphane Labranche, sociologue du climat et de l'énergie, à propos des projets Mobicit'Air et CheckBox qu'il a accompagnés à Grenoble ;
- Johanna Leconte, sociologue, EcoCO₂, interrogée à propos de l'évaluation psychosociologique de « Respirons mieux dans le 20e » ;
- Jacques Le Letty, chargé de mission santé Environnement depuis 2016 à la Maison de la Consommation et de l'Environnement, chargé de la coordination et animation d'Ambassad'Air, avec le service santé-environnement de la ville de Rennes ;
- Fabian Lenartz, ingénieur civil en physique, attaché de la cellule Qualité de l'air" à l'Institut Scientifique de Service Public – ISSeP, Liège ;
- Matthieu Perona, directeur exécutif de l'Observatoire du bien-être du CEPREMAP (CEntre Pour la Recherche EconoMique et ses APplications), Expérimentation Ile de France « Chauffage au bois et pollution » ;
- Marie Verrielle, enseignante-chercheuse à IMT Nord Europe, coordinatrice scientifique sur Projet Qalipso.

2.1.2 Questionnaires aux participants

Deux questionnaires ont été adressés, d'une part à des participants de campagnes de mesures citoyennes (« utilisateurs collectifs » ou « utilisations encadrées ») *via* les porteurs de projet et d'autre part à des particuliers qui ont acheté ou fabriqué des systèmes capteurs de qualité de l'air (« utilisateurs individuels »). Il s'agit des campagnes Polluscope, Captothèque, BBclean, Ambassad'air, Captothèque et Qalipso. Les questionnaires en ligne ont été élaborés à l'aide de l'outil SPHINX. Le questionnaire destiné aux participants de campagnes de mesures (questionnaire A) contient 61 questions à la fois fermées et ouvertes. La liste des questions est présentée en annexes 3 et 4. Le questionnaire destiné aux utilisateurs individuels (questionnaire B) a suscité une petite dizaine de réponses (8 pour être précis). Ces questionnaires ont été mis en ligne de décembre 2020 à mai 2021. Ils ont donné lieu à 159 réponses et autant de verbatims pour les utilisateurs collectifs et individuels cumulés. **Les réponses les plus importantes ont été le fait des participants à différentes campagnes initiées par plusieurs organismes et institutions que nous détaillerons plus (questionnaire A). Cette prépondérance dans le taux de réponse signifiant probablement un engagement plus durable que ces campagnes vont produire sur ces thématiques. Ce qui est en soi un résultat quant à la portée de la médiation des sciences**

et des techniques en société. Ce tournant participatif de la culture scientifique et technique sera développé plus avant dans le deuxième paragraphe de cette introduction.

2.2 Mesures citoyennes de qualité de l'air et sciences participatives : éléments de contextualisation

Le contexte de cette enquête s'inscrit plus largement dans le cadre de questionnement des sciences participatives qui interroge in fine les interactions entre sciences et sociétés. A travers un rapide état des travaux en la matière, deux points seront présentés pour mieux situer le travail effectué au sujet des profils et motivations des utilisateurs collectifs ou individuels de systèmes capteurs.

2.2.1 Définitions et enjeux des sciences participatives

L'intérêt des politiques publiques pour les expérimentations associant à divers titres et sous différentes formes, scientifiques et citoyens suivant des objectifs de recherche et de médiation a donné lieu à un rapport élaboré à la demande des ministres en charge de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, sous la direction de François Houllier (Houllier, 2016). Les problèmes liés à l'environnement et la santé sont particulièrement cités dans ce rapport pour justifier l'intérêt général pour les sciences participatives et les formes d'engagement public. **Le rapport Houllier est centré sur « le phénomène des 'sciences participatives', à savoir des formes de production de connaissances scientifiques auxquelles des acteurs non-scientifiques-professionnels — qu'il s'agisse d'individus ou de groupes — participent de façon active et délibérée »**. Les auteurs pointent la diversité des projets et initiatives mais avec un défi commun de « favoriser les interactions entre sciences et société. » **Ce vœu d'une politique de dialogue entre sciences et sociétés s'est concrétisé ces dernières années sous différentes voies que la chercheuse Maïté Juan distingue entre « sciences avec les citoyens » et « sciences par les citoyens »** (Juan, 2021) :

« Si, dès les années 1990, la « science citoyenne » d'Alan Irwin (1995) répondait à un double enjeu de « compréhension publique de la science » et de « compréhension scientifique du public », les sciences citoyennes se sont aujourd'hui diversifiées, oscillant entre une participation citoyenne fonctionnelle et instrumentale à des activités de surveillance et de préservation des écosystèmes conçues et pilotées par les scientifiques de métier, et des projets ascendants incluant la confrontation pluraliste des rationalités comme partie intégrante des dispositifs de recherche. »

D'autres typologies ont été recensées par Dias da Silva *et al.* (2017), qui classent les projets en fonction des rôles joués par les non-scientifiques ou des tâches qu'ils accomplissent (Buytaert *et al.* 2014 ; Bœuf *et al.* 2012) ou selon le niveau d'implication et de contrôle exercé par les participants (Bonney *et al.* 2009). **Aux projets dits « contributifs » (conçus uniquement par les scientifiques), « collaboratifs » (les participants jouent un rôle dans les étapes de conception, l'analyse et la diffusion) ou « co-crés » (avec une implication forte et continue des participants), il faut également citer le modèle « cumulatif » d'Haklay (Haklay, 2015) qui répertorie des projets de type « crowdsourcing »³, où les**

³ Le *crowdsourcing* consiste à externaliser une tâche auprès de contributeurs amateurs.

citoyens sont assimilés à des « capteurs » ; des projets de type « intelligence distribuée », où les citoyens mettent à disposition leurs capacités cognitives ; des projets de « science participative », où les citoyens participent à la définition du problème et à la collecte des données ; et enfin les projets de « science citoyenne extrême » exigeant un niveau d'engagement important, où le rôle des citoyens se rapproche de celui des scientifiques.

L'analyse des différentes configurations de recherche participative dont on comprend qu'elles sont porteuses de représentations sociales et visions du monde, suppose également de soulever les problématiques d'épistémologies des savoirs participatifs et citoyens. **Suivant la proposition de Patrick Brun, trois épistémologies se dégagent entre nature des savoirs, processus relationnel entre participants et validation des actions de recherche participative** (Brun, 2017) :

« Une première problématique s'attache à questionner « de quelle nature sont les savoirs produits de manière croisée et en particulier quel est le statut des savoirs issus de l'expérience ? » La deuxième problématique concerne « les conditions du processus relationnel mis en œuvre pour produire ce croisement des savoirs » tandis que la troisième problématique renvoie à « la finalité et la validation d'une recherche-action participative en croisement des savoirs. Les bénéfices attendus des recherches en croisement des savoirs sont relatifs à chacun des types d'acteurs : une meilleure connaissance des réalités concernées pour les chercheurs ? Une transformation des conditions de vie et des relations sociales et sociétales pour les acteurs ? Une amélioration des pratiques pour les professionnels ? Comment ces finalités peuvent-elles être simultanément assumées, appropriées par les différents acteurs et validées par les uns et les autres ? »

Dans leur état de l'art sur le corpus des études sur les sciences participatives, Dias da Silva et al. (2017) mettent également en avant **les innovations technologiques récentes (outils numériques, bases de données, plateformes) outillant une « science citoyenne 2.0 », ce qui suppose à la fois un changement d'échelle dans le recrutement, une mise en commun des données et, une automatisation de processus alliés à une individualisation des pratiques.**

« Les dispositifs numériques présentent des particularités qui font leur force en termes de production scientifique. Premièrement, la capacité d'agrégation de données (et de génération de métadonnées sur le processus de production) constitue l'atout principal des plateformes qui mobilisent un large bassin de participants. Deuxièmement, dès lors qu'ils sont assortis d'outils facilitant et automatisant la mise en commun et la coordination des contributions (tels que des méthodes semi-automatisées pour la validation et le contrôle de qualité, le classement automatique ou la répartition des tâches en fonction des niveaux d'expertise), les dispositifs numériques mis en œuvre par les projets de science citoyenne jouent un rôle primordial pour structurer la production et la circulation des connaissances. »

2.2.2 Profils et pratiques des utilisateurs de systèmes capteurs de qualité de l'air : une enquête qui concerne le public

La science citoyenne 2.0, dont certaines initiatives et utilisateurs de systèmes capteurs relèvent, reste donc à interroger dans cette tension promue par les technologies numériques entre, d'une part, la mise au point de procédures, de standards et d'automatisations et d'autre part l'émergence de pratiques individualisées, d'appropriations singulières et d'hybridations des dispositifs. Les verbatims recueillis ainsi que les entretiens avec les porteurs de projets mettent en avant des trajectoires de projets oscillant entre protocolisation ferme et « bricolage créatif » comme nous le verrons. Un autre point à développer concerne les profils et motivations des participants à la mesure citoyenne de qualité de l'air.

A ce titre, le rapport Houllier signalait qu'il n'existe pas « de profil unique de participants. Leurs motivations sont différentes selon qu'ils s'engagent en tant que collectifs ou en tant qu'individus, en tant que malades, chercheurs en sciences numériques, naturalistes, passionnés d'astrophysique ou militants. » (Houllier, 2016).

Cependant, la diversité des participants à des actions collaboratives de recherche n'empêche pas de contribuer à enquêter plus avant sur leurs profils et motivations comme y incite également le sociologue Florian Charvolin dans son ouvrage faisant état que « les promoteurs des sciences participatives ont une très faible connaissance sociale des inégalités et des profils divers des contributeurs » (Charvolin, 2019).

C'est notamment à cet objectif de mieux connaître le profil des utilisateurs de système capteurs que cette enquête souhaite répondre. Avant de présenter la méthode et les résultats de l'enquête menée sur les profils des utilisateurs de systèmes capteurs et leurs usages motivés et pour conclure cette introduction théorique du rapport, il importe de recontextualiser l'intérêt public pour les sciences participatives dans le cadre non seulement d'une science plus citoyenne, mais également d'une démocratie plus participative. Dans le rapport « Houllier », l'essor des sciences participatives se trouve, d'ailleurs, articulé « à la montée parallèle de la démocratie participative, à la remise en cause des formes traditionnelles d'autorité et à l'influence croissante des nouvelles technologies » (Houllier 2016).

Les utilisateurs de systèmes capteurs peuvent être définis d'abord comme un public d'individualités qui se trouvent rassemblées autour d'un problème, la pollution de l'air en l'occurrence, qui par ses actions et avec ses techniques, va mener une enquête collective suivant la définition qu'en a livré le philosophe père du courant pragmatiste des sciences humaines et sociales, John Dewey (Dewey, 1927) :

« La condition principale pour qu'émerge un public démocratiquement organisé est un type de connaissance et de perspicacité qui n'existe pas encore. Il serait absurde d'essayer d'indiquer ce à quoi le public ressemblerait si cette condition était remplie. Mais certaines conditions nécessaires peuvent être indiquées. Ces conditions quant à elles peuvent être dérivées de l'esprit et de la méthode de la science, même dans l'ignorance des outillages scientifiques spécialisés. Parmi ces conditions, l'exigence de la liberté, de l'enquête sociale et de la distribution de ses conclusions est évidente ».

L'enquête menée dans ce rapport a, en partie, consisté à recueillir des paroles d'utilisateurs à travers lesquelles le problème de la pollution de l'air et de ses effets en particulier sur la santé, constitue le principal motif de participation comme nous le verrons. Dans cette perspective théorique d'une démocratie avec les sciences et les techniques que promettent les initiatives de mesures citoyennes de qualité de l'air, les résultats de cette enquête documentent non pas des changements de comportement en retour de la mesure individuelle de pollution mais, suivant les reformations de Cemerter *et al.* (2016), une expérience de « contrainte adaptative » :

« La contrainte adaptative peut, en ce sens, se concevoir comme un trouble « persistant et durable » (selon la définition de Dewey) dans la relation à l'environnement, qui génère de l'inquiétude et qui menace des biens et des capacités que cette dynamique relationnelle permet habituellement de maintenir. Il s'agit alors de s'interroger sur les cheminements de ce trouble, sur les modes de le qualifier et de le mettre en forme, de le partager et de le communiquer à d'autres, de le garder pour soi, de « faire avec » ou de le problématiser à travers une enquête, d'en faire éventuellement un enjeu et un objet de discussion dans l'espace public. »

2.3 Profils des campagnes de mesures citoyennes basées sur les systèmes capteurs

Les enseignements issus des entretiens sont développés en six points afin de rendre compte des différentes composantes des usages des systèmes capteurs, tant du côté des campagnes de mesures citoyennes que des initiatives personnelles.

1. Polluants : paysages de la qualité de l'air

Il s'agit ici de décrire les polluants détectés. Ce point permet de décrire précisément les paysages de la qualité de l'air qui s'esquissent dans les usages des systèmes capteurs (air intérieur/air extérieur, milieu urbain, milieu rural ou milieu péri-urbain).

2. Système capteurs : choix et justifications des dispositifs

Ce point relève d'une dimension technique qu'il est intéressant de mentionner afin de documenter les choix effectués dans l'adoption d'un système capteur (fixes, mobiles, hybrides, multi-capteurs associés, traitement des données). Il s'agit ici d'en comprendre les justifications (métrologiques, économiques, ergonomiques) données par les différents acteurs des campagnes.

3. Acteurs : politique des campagnes de mesures citoyennes

Quels sont les acteurs engagés dans la captation citoyenne ? Quelles sont les modalités d'interactions et cadres institutionnels des acteurs ? Les initiatives de mesures citoyennes de qualité de l'air s'effectuent suivant des logiques de collaboration entre différents acteurs associant scientifiques, politiques et associations ou collectifs (comme les fablabs) mais avec, à la marge, frictions et pressions.

4. Profils idéal typiques des utilisateurs : techniques et politiques de recrutement

Sans redonder sur les résultats de l'enquête par questionnaire portant spécifiquement sur le profil des utilisateurs des systèmes capteurs dans le cadre de projets citoyens, nous allons nous intéresser ici, grâce aux entretiens réalisés avec les porteurs de projets, aux pratiques

et techniques à la fois dans l'accompagnement des utilisateurs (formations, protocoles) que dans leur « recrutement » (diversité sociodémographique, questionnaire de connaissance).

5. Mesures accompagnées : formations, protocoles et temporalités d'animation

La description du déroulé des expérimentations par les porteurs ou parties prenantes des projets s'avère d'un grand intérêt afin de saisir les modalités de transmission de savoirs dans les domaines de la qualité de l'air et de la métrologie citoyenne. Les connaissances liées à la dimension « accompagnement » sont intéressantes à prendre en compte au regard notamment du maintien des bonnes pratiques en matière d'exposition individuelle ou collective à la pollution, et des acquis liés à la participation.

6. Valorisation : accès et pratiques des données, retours sur usages (habitudes, connaissances, sensibilités)

La génération de données de qualité de l'air par des participants dans le cadre de campagnes institutionnelles demande à être interrogée au plan de leur accès, de leur valorisation et publicisation. Les résultats en termes de valorisation des données seront problématisés afin de permettre l'évaluation des dispositifs et des données à l'aune de leur effectivité en tant que supports de sensibilisation, de montée en connaissances et/ou changements d'habitudes face à la pollution.

2.4 Profils des engagements et expertises dans les campagnes citoyennes de mesure de qualité de l'air

L'analyse du questionnaire livre à la fois des enseignements quant aux profils sociodémographiques des participants aux campagnes de mesures citoyennes outillés par des systèmes capteurs mais également leurs motifs d'engagement. **Dans le cadre de la saisine, nous avons voulu saisir plus précisément des intentionnalités soucieuses vis-à-vis des effets de la pollution l'air (extérieur et intérieur) sur le plan de la santé physique. Nous avons également documenté les motifs pluriels qui favorisent la participation à ces campagnes. Sont également décrites les appropriations sociales des expertises métrologiques et écologiques ainsi que la persistance des savoirs et des conduites expérimentées.**

Trois points sont donc développés :

1. Profils d'engagement : des données sociodémographiques aux motifs participatifs

L'analyse du questionnaire livre à la fois des enseignements quant aux profils sociodémographiques des participants aux campagnes de mesures citoyennes outillés par des systèmes capteurs, mais également sur leurs motifs d'engagement.

2. Ce que change la mesure citoyenne de pollution : appropriations sociales des savoirs métrologiques et écologiques

En plus de dégager des figures de participation aux motifs pluriels et des instrumentations hybrides en matière de qualité de l'air (de l'information à la « mesure située »), il est nécessaire de déplier la problématique de l'expertise et d'observer comment des savoirs métrologiques et écologiques circulent dans le cadre d'initiatives de mesures citoyennes. Il importe de comprendre comment les utilisateurs de systèmes capteurs s'approprient les dispositifs et les données, dans quels cadres et pour quelles encapacitations dans une perspective de science citoyenne.

3. Sensibiliser, mobiliser, persister : une co-évaluation sans fin par les participants

Dans ce troisième temps, les résultats concernant les apports de la participation à des campagnes de mesures, ainsi que les perspectives de poursuite des activités et de suivi des recommandations, viennent contribuer à délimiter plus fermement non plus seulement le registre des motifs d'engagement, mais aussi le travail de signification qu'opère la contribution à la science citoyenne en proposant de nouveaux cadres d'interprétation de l'expérience vécue de la pollution (Cefaï, 2007). De nouveaux cadres d'intelligibilité se matérialisent et s'incarnent dans des conduites réflexives ou modifiées ainsi que par des équipements renouvelés.

3 Partie 1 : Profils des campagnes de mesures citoyennes basées sur les systèmes capteurs

Dans cette première partie, ce sont les profils des campagnes citoyennes de mesure qui sont décrites afin d'identifier les principales orientations en matière de polluants recherchés et de systèmes capteurs utilisés, répondant à des choix publics mettant en jeu des acteurs pluriels dont les interactions sont également importantes à cerner. Les données présentées dans cette partie ont été recueillies lors d'entretiens semi-directifs avec les différents porteurs de projets ou parties-prenantes des campagnes de mesure qui mettent en jeu un « pluralisme des valeurs d'attachement à la qualité de l'air » (Centemeri *et al.* 2016). Elles permettent de penser sous un mode réflexif et ancré dans les terrains locaux, le paradigme de l'adaptabilité (Pestre, 2014). Dominique Pestre et Laura Centemeri, historiens et sociologues des sciences et des techniques, ont pointé dans leurs travaux une « aporie de l'adaptabilité » présente dans certains discours et rapports où il semble entendu que ce sont les individus qui doivent changer, « s'adapter face à la pollution » (Pestre, 2014 ; Centemeri *et al.* 2016). Si l'on s'en tient à une approche de sociologie pragmatiste, l'idée est que, plutôt que de s'en tenir à objectiver ou déterminer un « environnement » auquel un organisme devrait s'adapter, il s'agit de saisir une « relation d'enchevêtrement » entre un sujet (individuel ou collectif) et son environnement » (Centemeri *et al.* 2016).

En vertu de cette approche pragmatiste attentive aux interactions entre acteurs et actants techniques, de leurs justifications et motifs autour de valeurs données aux mesures produites lors de ces campagnes, nous allons nous attacher à dégager les polluants recherchés et leurs sites de mesure, les dispositifs et les protocoles, les jeux d'acteurs et leurs différents rôles.

3.1 Polluants : « paysages » de la qualité de l'air

Dans la plupart des campagnes, les polluants ciblés sont les particules (PM₁₀, PM_{2.5} et PM₁) - mais parfois aussi le carbone suie - en air intérieur et extérieur en milieu urbain (Paris, Rennes, Grenoble, Annonay, Lyon, Clermont Ferrand, Nancy, Strasbourg, Douai, Bruxelles), ou dans des zones géographiques spécifiques telles que la Vallée d'Arve en Haute-Savoie.

3.2 Systèmes capteurs : choix et justification des dispositifs

Ce point relève d'une dimension technique qu'il est intéressant de mentionner afin de documenter les choix effectués dans l'adoption d'un système capteur (fixes, portatifs, mobiles, hybrides, systèmes capteurs associés). Il s'agit ici d'en comprendre les justifications (météorologiques, économiques, ergonomiques) données par les différents acteurs des campagnes.

Comme le synthétise le sociologue Florian Charvolin en effectuant un retour sur ses travaux socio-historiques sur les mesures de la pollution dans l'entretien qu'il nous a accordé, avec les systèmes capteurs « *on est dans la 3^e phase : il y a eu la pollution à l'émission, ce qui sortait des usines, chauffage, automobiles dans les années 50, puis la pollution de fond avec des mesures dans des points névralgiques de la ville, liée aussi au trafic routier et aujourd'hui la*

mesure concerne l'exposition à la pollution en air intérieur/extérieur par les populations elles-mêmes avec le développement des systèmes capteurs et des smartphones. »

La plupart des projets étudiés utilisent un système capteur de particules développé par des collectifs en open hardware et open source⁴ tels que AirBeam mais également Sensor Community (ex. Luftdaten) ou alors s'appuient sur des outils développés avec un fabricant, un laboratoire de recherche ou encore dans un fablab (Air Citizen).

La justification du choix du système capteur renvoie d'une part, aux extensions applicatives des systèmes capteurs (applications mobiles, plateformes interactives avec comptes, tags, géolocalisations) et d'autre part, aux contraintes du projet (polluants, ergonomie, pédagogie).

L'ajout des mesures de CO₂ dans le panel des polluants est ainsi formulé dans un projet :

« On a prêté des capteurs de CO₂, ce qui avait le plus intéressé les participants, les avait fait changer de comportements. Comme on voit les effets tout de suite, c'est concret, efficace. Les particules fines, ils ne comprennent pas pourquoi ça monte et/ou descend, les gestes ne servent à rien, c'est frustrant. Le geste du CO₂ c'est ouvrir la fenêtre. » (Chargé de la coordination et animation du projet)

Cet intérêt pour la qualité de l'air intérieur est également mentionné dans le choix du système capteur :

« On a acheté 40 pour la qualité de l'air extérieur et 30 pour la qualité de l'air intérieur sachant qu'Airbeam n'est compatible qu'avec Android. Et beaucoup de gens s'intéressent à pollution chez eux, intérieure. » (Chargé de mission pôle innovation, responsable du projet)

L'ampleur du cocktail de polluants mesurables est également invoqué dans le choix d'un système multi-capteur par les équipes projets ainsi que son adoptabilité et utilisabilité dans le cadre de vie des participants :

« La station est un dispositif commercial de Rubix (15cm sur 15cm), le « Rubix pod ». Le plus cher des 5 capteurs initialement envisagés (2000 euros) mais il cochant la plupart des cases. Il s'agit d'une station car c'est multi-capteurs. C'est une boîte un peu jolie, c'est important, qui s'illumine avec différentes couleurs, qui donne un paramètre de niveau de pollution. Après, on a 15 paramètres mesurés (confort, bruit, luminosité...), polluants (ozone, CO₂, CO..) et un capteur COV totaux et 4 autres. La station, qui ne bouge pas, est placée dans la pièce de vie principale, le salon. Pourquoi ? Pour qu'elle ne soit pas proche de sources spécifiques (cuisine), pas la chambre pour la lumière. Et on voulait que ce soit l'objet du foyer. » (Enseignant-chercheur, coordinateur scientifique du projet)

D'autres intérêts sont évoqués vis-à-vis du système capteur notamment l'attachement à un objet nouveau, le côté ludique, mais également la promesse d'un contrôle par ce biais de la qualité de l'air pour les participants.

« Les gens ressortent tous avec un attachement à l'objet, le côté petit fantôme ; les gens veulent en parler, le mettent sur les réseaux sociaux. On a créé un groupe Facebook d'échanges » (Chef de projet innovation AASQA)

⁴ Le terme « open source » pour les systèmes capteurs englobe ici à la fois l'accès aux informations sur le matériel (conceptions mécanique et électronique, open source hardware) et sur les codes sources (open source code).

« Dans le projet, les gens parlaient autour d'eux de leur petit gadget qu'ils portaient à leur sac, au supermarché, dans le tram ou le bus, à des gens qu'ils ne connaissaient pas. Une participante (qui n'avait pas de téléphone) se promenait et arrêtait même d'autres personnes sur les pistes de ski de fond. On lui a décerné le prix de la communication. Au bas mot, elle a parlé à 100 personnes en face à face ! Et donc un engouement chez elle. » (Sociologue, accompagnant scientifique du projet)

« Certains ont cherché à comprendre, faire des tests, d'autres non (ne regardaient que l'indicateur coloré). Des personnes se sont appropriées la station, lui ont donné un petit nom. Au bout de 2 - 3 semaines, le côté ludique du capteur diminue. On avait des personnes qui avaient 160 sessions et d'autres 4 ou 5 mais avaient la même satisfaction. La personne qui fait 4 ou 5 mesures était contente quand elle avait fait sa mesure. » (Ingénieur AASQA, chef de projet)

« Les gens sont intéressés à disposer du micro-capteur chez eux car ils sont préoccupés par la pollution. Ils ont l'impression de pouvoir beaucoup plus contrôler la qualité de l'air intérieur. A l'extérieur, ça leur échappe. Et du coup, ça les empêche même d'imaginer qu'en tant qu'habitants, ils puissent la modifier par leur comportement de mobilité et changer la qualité de l'air extérieur. » (Enseignant-chercheur, accompagnement scientifique du projet)

Pour les porteurs de projets, le système capteur représente tout autant un support de médiation qu'une source de sensibilisation et de données, et permet avant tout « de renouer le dialogue et d'atténuer la défiance vis-à-vis des institutions publiques et des données officielles. »

Fort de ses observations sur le terrain, Florian Charvolin fait également le constat, lors de l'entretien mené, « qu'au cours du 20^e siècle, et surtout dans les années 1940-50, avec la formation de corps d'experts sur la pollution de l'air, s'est produite une subtilisation de la mesure de la part de personnes victimes de la pollution. Les victimes n'ont plus été les mesureurs, mais les experts (AASQA, structures de Paris). L'arrivée de la mesure de l'exposition individuelle permet de réassocier les victimes et les mesureurs. »

L'introduction de la mesure de l'exposition individuelle dans le champ des analyses de la pollution ne relève donc pas d'un fait naturel mais d'une œuvre de politiques publiques qui suppose d'être plus avant décryptée au plan des jeux d'acteurs engagés dans les projets.

3.3 Acteurs : politique des campagnes de mesures citoyennes

Quels sont les acteurs engagés dans la mesure citoyenne de la qualité de l'air ? Quelles sont les modalités d'interactions et cadres institutionnels des acteurs ? Nous allons constater que les initiatives de mesures citoyennes de qualité de l'air s'effectuent suivant des logiques de collaboration entre différents acteurs associant scientifiques, politiques et associations ou collectifs (comme les fablabs) mais avec, à la marge, frictions et pressions.

Le schéma le plus couramment rencontré dans nos entretiens relève de la collaboration entre une AASQA, une ville, une métropole, une région, un laboratoire de recherche (université, écoles d'ingénieurs) et des citoyens individuels mais parfois regroupés en conseils de quartiers, collectifs d'habitants, réseaux de makers ou associations militantes. Des établissements publics tels que l'Ademe (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) avec des appels à projets réguliers (Primequal) ou l'Europe avec le programme

européen de l'Interreg de coopération entre les régions de l'Union Européenne (UE) mais encore les villes via différentes voies (budget participatif, services internes, subventions), demeurent les principales sources de financement de ces projets. Les AASQA interviennent également en apports internes à la fois en termes matériels et d'expertise.

Ce montage organisationnel entre villes, associatifs, AASQA et chercheurs se trouve illustré dans le projet Ambasad'Air financé par un appel à projet Ademe, délégué à une association, accompagné par l'EHESP (Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique) et en interaction de plus en plus rapprochée avec l'AASQA régionale.

Les modes de financements peuvent avoir des effets sur les modalités de la participation, comme l'exemple de ce projet co-élaboré par les citoyens avec un temps consacré à des réunions collectives et des outils de communication dédiés avant même la prise en main des systèmes capteurs :

« On a voulu associer les porteurs de projets pour façonner la mise en œuvre. Les citoyens, les plus investis et volontaires participaient à l'élaboration du projet. Quand a été voté ce projet, il était très light, pas très développé et donc on a fait avec eux ces choix-là. » (Chargé de la coordination et animation du projet).

Des projets scientifiques comme Mobil'Air avec des financements universitaires et européens ou de sciences citoyennes de l'association BRAL, Mouvement Urbain pour Bruxelles s'inscrivent dans un horizon de recherche publique tant dans l'accès aux résultats que dans la formulation des questions de recherche :

« Entre 2015-2017, c'était un premier projet avec l'administration et l'on est entré dans leurs protocoles (chercher des volontaires pour documenter la qualité de l'air dans les rues, entreprendre de rassembler des tas de données). Pour nous, c'était un moyen de construire une science citoyenne, de ne pas seulement donner les capteurs aux volontaires mais de commencer des ateliers, de réaliser un travail de groupe autour de leurs expériences, questionnements et connaissances qu'ils avaient autour de la qualité de l'air et leurs envies ou volontés d'apprendre d'autres choses. Ensuite entre 2017 et 2019, on a acheté avec le Cosmopolis des AirBeam et entrepris une action de science citoyenne qui commençait dès le début, sur la formulation des questions de recherche et la force émancipatoire de mesurer. » (Chercheur indépendant, chef de projet)

« En tant que chercheuse, je suis sur un partage des données scientifiques plus ouvert dans ce type de projet. » (Enseignant-chercheur, membre du projet).

Les tensions entre sciences participatives et sciences citoyennes, entre crowdsourcing de données institutionnalisées et sciences des et par les citoyens se révèlent dans les montages organisationnels et les relations entre acteurs. Une tension est ainsi verbalisée dans ces deux extraits d'entretiens :

« J'ai essayé de contacter les AASQA et je n'ai pas eu beaucoup de réponses. » (Coordinateur du projet open source).

Même si du côté des AASQA est exprimée *« la volonté est de faire lien avec tous, associations ou fablabs. »* (Chef de projet innovation AASQA).

Du point de vue de la politique de l'ouverture des projets par exemple au monde des fablabs ou des associations, on peut noter le fort usage, dans de nombreux projets, du système capteur AirBeam et de son application AirCasting. Ce dispositif est à l'origine un dispositif open source mis au point par une ONG (Organisation Non Gouvernementale) étatsunienne,

HabitatMap⁵. Il est également mobilisé dans des projets indépendants de mesures citoyennes de pollution et a inspiré d'autres collectifs à la fois de développement et d'utilisateurs.

C'est le cas de Sensor Community qui a été initié dans le sillage de l'Open Knowledge Foundation⁶, dans le cadre d'un Open Knowledge Lab à Stuttgart afin de mesurer la pollution notamment liée à la présence de l'autoroute. Un collectif informel a lancé un financement participatif pour développer à partir de 2016 plusieurs centaines de systèmes capteurs de particules. Ce système capteur Ludfdaten a été ensuite enrichi d'une plateforme de données des systèmes capteurs en fonction dans le monde, soit plus de 10 000 dont 350 actifs en France dont 200 individuels non liés à des associations, le tout générant 10 000 milliards de données. Parmi les utilisateurs des dispositifs Sensor Community (systèmes capteurs DIY, firmware, carte géolocalisée), on compte certains projets comme Ambasad'Air ou des associations comme Enairgie Commune, UFC Que Choisir de Nord Isère⁷. La mesure de l'exposition individuelle par les systèmes capteurs relève d'initiatives collectives dans lesquelles collaborations et négociations peuvent donner lieu à des questionnements organisationnels ou institutionnels.

Pour les coordinateurs de projets, il s'agit d'aménager les relations entre tous les partenaires sur des points parfois de détails pratiques mais qui ont pourtant leur importance symbolique dans l'expérimentation :

« Nous avons discuté avec la mairie, notamment sur le choix du lieu d'installation des mini-stations pour les alimenter en électricité : au début, on a pensé aux lampadaires, mais avec les plus modernes ce n'était pas possible donc on a essayé de trouver de vieux lampadaires mais dont l'implantation n'était pas si intéressante pour les mesures...donc c'était compliqué. Et puis la mairie voulait une station par quartier mais d'un point de vue métrologique ce n'était idéal. On voulait mixer différentes exigences dont celles de prudence et de précision qui caractérisent les mesures de l'AASQA locale. » (Chargé de mission pôle innovation, responsable du projet).

Les relations avec les AASQA constituent un agenda important de la mesure citoyenne de qualité de l'air notamment dans des régions où la pollution est une source de préoccupation majeure.

Les AASQA peuvent alors jouer un rôle de médiateur local et de garant scientifique entre villes et habitants, rôle validé par les nombreuses sollicitations dont ils sont le siège et les façons d'y répondre (conventions, initiations de projets) :

« On est sollicités par plein d'associations (Enairgie Commune, UFC, etc.) pour s'associer. Parfois l'on noue des conventions d'expertise pour garantir les mesures. Le but, c'est d'inclure le maximum, sans obligation. Un service civique qui nous accompagne là-dessus à ATMO. » (Chef de projet innovation AASQA).

« Au sujet du projet de St Julien les Metz, c'est une association, Air Vigilance avec LNE Lorraine Nature Environnement, qui nous a contacté pour monter un projet de micro-

⁵ "HabitatMap is an environmental technology non-profit building open-source, free, and low-cost environmental monitoring and data visualization solutions. Our tools empower organizations and citizen scientists to measure pollution and advocate for equitable solutions to environmental health issues. We focus on low-income communities and communities of color living with disproportionate environmental burdens." <https://www.habitatmap.org>

⁶ L'Open Knowledge Foundation est une association à but non lucratif de droit britannique promouvant la culture libre, en particulier les contenus libres et l'open data. Elle a été créée le 24 mai 2004 à Cambridge au Royaume-Uni.

⁷ Informations recueillis lors d'un avec Pierre-Jean Guéno, coordinateur France du collectif Sensor Community.

capteurs pour les citoyens après la mise en place d'un incinérateur. ATMO Grand Est se positionne comme référent technique mais comme on est les seuls à avoir une expérience sur les micro-capteurs, on joue le rôle de chef de projet avec une formation des participants, une exploitation des résultats et la rédaction du rapport. Lorraine Nature Environnement s'occupe de la communication sur le sujet. » (Ingénieur AASQA, chef de projet).

L'analyse des récits organisationnels de ces projets semble donner aux AASQA des fonctions nouvelles, allant du référent technique au porteur de projet comme le décrit Florian Charvolin dans l'entretien mené pour cette enquête :

« Un changement de posture de ces organismes officiels de mesure de la qualité de l'air, lié à la nécessité de mesurer des seuils de pollution légaux pour éviter les procès par l'Europe. Se développe aujourd'hui une vraie volonté de refaire du citoyen le prescripteur de politiques publiques, c'est très net. C'est un travail de longue haleine pour faire comprendre ce qu'est une représentation sociale et s'intéresser aux ressentis et coupler cela au choix des mesures, des stratégies, etc. On commence à bien le faire. »

3.4 Profils idéal typiques des utilisateurs : techniques et politiques de recrutement

Sans redonder sur les résultats de l'enquête par questionnaire portant spécifiquement sur le profil des utilisateurs des systèmes capteurs dans le cadre de projets citoyens, nous allons nous intéresser ici, du côté des porteurs de projets, aux pratiques et techniques à la fois dans l'accompagnement des utilisateurs (formations, protocoles) ainsi que dans leur « recrutement » (diversité socio-démographique, questionnaire de connaissance).

Les expérimentations documentées dans ce rapport, qu'elles soient déclinées sur plusieurs saisons ou plus ponctuelles, se regroupent en deux grandes catégories. Il y a d'une part des campagnes avec des panels importants d'utilisateurs (300 par exemple pour l'expérimentation chauffage au bois de l'Agence d'Innovation Comportementale (AIC) ou 180 pour Ambasad'Air sur 5 saisons) ou basées sur des cohortes (Mobil'Air et la cohorte Sépages de l'Inserm), et d'autre part des campagnes correspondant à des premières vagues de test incluant une dizaine de participants (Vel'Air).

Dans la majorité des cas, la participation se fait évidemment sur la base du volontariat, qui devient dès lors le premier critère de recrutement. Viennent ensuite deux critères non exclusifs d'une sensibilisation ou connaissance préalable de la pollution ainsi que de la quête d'une relative diversité socio-démographique.

« La participation se fait sur base volontaire (appel à volontaires en 2017 via les réseaux sociaux). La motivation principale des sujets est d'avoir une idée de la qualité de l'air dans leur environnement. On n'a pas fait les choses de façon scientifique car pas une population représentative (appel aux voisins, etc.). 250 candidatures avec des profils différents mais qui se sentent concernées par la problématique de la qualité de l'air. On a dû faire un choix car nous n'avons pas la possibilité de prêter suffisamment de matériel. On s'est basé sur un questionnaire : habitudes en termes de trajet pour travail/courses. On a regardé les trajets, la durée et moyens de transport. » (Ingénieur, attaché qualité de l'air, Institut de recherche).

La communication sur les expérimentations passe par différents biais comme la presse locale, l'information municipale, les affiches chez les commerçants ou dans les locaux des services publics, les flyers dans les boîtes aux lettres, les sites web des organisations parties-prenantes ainsi que les réseaux sociaux de plus en plus pris en compte. Elle s'avère, on va le voir, déterminante.

Au fil des entretiens, il est apparu qu'il existe un public par défaut volontaire et bien représenté mais également des « non-publics » qui ne se portent jamais volontaires qu'il s'agit de convaincre quand ils sont concernés par leurs modes de vie ou de déplacement :

« L'objectif du projet est de rencontrer le public non intéressé à la question de la pollution, la population fragilisée. Et l'outil micro-capteur peut être une manière de faciliter la découverte du sujet. Je n'étais pas partie, quand on a des échanges sur les acteurs institutionnels, sur le changement de comportement. Je ne suis pas du tout convaincue de la facilité de changer les comportements. Avant de l'envisager, il faut que les gens se sentent concernés par le sujet. » (Enseignant-chercheur, accompagnement scientifique du projet).

Cette entrée dans le « concernement », suivant les termes de Séverine Frère (Frère, 2020), de par l'outil constitue l'une des techniques de recrutement mais qui prend le risque des limites de la technophilie qu'il s'agit alors de corriger :

« En revanche, le capteur, son côté ludique, a attiré beaucoup de monde. Mettre ces capteurs en avant fait qu'ils ont eu envie de participer, voir l'air qu'ils respiraient. » (Ingénieur AASQA, chef de projet).

Il existe donc au plan des représentations des porteurs de projets, le « public qui fait défaut » mais également le « public par défaut » tels que :

« Les accro, maniaques de la qualité de l'air connus : certains qui ont des problèmes respiratoires, se pensent mieux formés. Des gens abonnés à la newsletter de l'AASQA et qui reçoivent les informations de pré-pic. » (Sociologue, accompagnant scientifique du projet).

Parmi les techniques de recrutement, le questionnaire est particulièrement cité afin de réaliser une première phase de recrutement de profils suivant la méthode élaborée par le sociologue Stéphane Labranche dans le projet de Mobicit'Air (Atmo Aura, 2017).

« Donc je ne voulais pas que ça soit des gens sur les listes d'ATMO. Même si que 30 participants, je voulais un peu la population de Grenoble. Je n'ai pas pris en compte la catégorie socio-professionnelle (CSP) dans le recrutement. J'avais un questionnaire de recrutement sur les représentations sociales. 65 personnes en 2 semaines, étaient embauchables. On retient 30 candidatures selon plusieurs critères : Voiture/multi-mobilité ; Compréhension/connaissance ; Gêne/risques sanitaires (à la fois des gens qui n'en n'avaient rien à faire et gens hyper angoissés). Le tout pour avoir une diversité de gens et interactions avec la QA. Le niveau de scolarité et revenu n'ont pas d'impact. Mobicit'Air est le seul projet, si on lit le rapport de l'Ademe, à utiliser cette procédure de recrutement pour représentativité de la diversité. C'était expérimental en sociologie. Cela a donné trois grands profils type « santé », « technophile », « sportif ».

La quête d'un public populaire reste donc primordiale avec différentes techniques de recrutement mises en place notamment l'implantation de l'expérimentation dans des quartiers populaires des villes ainsi que l'usage de canaux de diffusion de l'information

(conseils de quartiers, associatifs, assistantes sociales, sites web et réseaux de contacts mails) :

« Le recrutement a évolué. Lors de la 1^e saison, la crainte était de ne pas avoir assez de matériel. A l'échelle de la ville, 20 capteurs, ça ne va pas faire lourd. La ville a choisi de cibler les quartiers prioritaires, ce qui réduisait à deux quartiers. On a organisé des réunions de quartier mais sans trop de publicité pour ne pas avoir à dire non. Le canal de diffusion fait beaucoup. Sur un quartier, une direction de quartier a fait passer l'information auprès de gens impliqués dans les conseils de quartiers. Et puis nous avons aussi envoyé par mail aux réseaux d'associations environnementaux qui s'adressaient à des profils plus jeunes, moins impliqués dans la vie de quartier, des cyclistes par exemple. On a eu des gens déjà engagés, sur l'air, le bruit, etc. Ils seraient venus de toute façon, c'était leur quartier. On a eu aussi des gens ingénieurs, tantôt du numérique, « geek », de maker, open data : trouver une application dans leur quartier. Il n'y avait aucun critère de sélection : vous êtes rennais, du bon quartier donc ce n'est pas représentatif d'un échantillon. Ensuite, la deuxième session de mesures avec un quartier prioritaire près de la rocade et enfin à partir de la troisième session, on a recruté dans toute la ville. On a tissé des liens avec des maisons de quartier, les associatifs. Il y a des animateurs multimédias, des tiers lieux, des fablabs qui ont de l'appétence. On a gagné en diversité de population. » (Chargé de la coordination et animation du projet).

« On a choisi d'enquêter sur un quartier dont on a regardé préalablement les cartes sur les indices de défaveur locale. Quand on a étudié les cartes d'imprégnation des sols de pollution d'Atmo, le quartier s'avère un quartier très contaminé en rapport aux nœuds d'infrastructure. Et donc à la conjonction de facteurs défavorables. On a cherché des publics modestes, par le revenu, des classes populaires. Comme ce sont des publics difficiles à toucher, si on passe par les canaux classiques, cela ne va pas fonctionner. On est allé faire du porte-à-porte dans le quartier et par le centre d'action sociale, les associations Emmaüs, caritatives et des conseillers de quartier. On a présenté le projet aussi aux assistantes sociales. » (Enseignant-chercheur, accompagnement scientifique du projet).

Allier la diversité à la représentativité reste important pour les expérimentations dont la visée est également scientifique et pas uniquement liée à des politiques publiques locales. En ce cas, les compromis entre scientificité, apport financier du projet et diversité restent à établir :

« Les participants sont au nombre de 40 foyers avec une répartition représentative du type de foyer (étudiants, retraités, famille, personnes seules). On a ciblé, au départ, des populations défavorisées. C'était mis en avant dans l'appel à projet de l'Ademe qui donnait comme objectif une mise à disposition de ces objets technologiques pour ces populations. Mais on pressent que ces populations ne sont pas forcément technophiles et qu'il y a des biais dans la compréhension de la pollution et de la capacité à lire un graphique issu d'une station. Il y a ceux qui savent lire un graphique (plusieurs courbes, avec seuils couleurs), d'autres qui se contentent des couleurs affichées sur la station. Il y avait aussi un enjeu de représentativité sur le foyer et le territoire (pour répondre aux attentes de la communauté d'agglomération, intéressée par le projet). Le recrutement s'est effectué par annonces, par sites internet, pôle emploi, les commerces. Mais plus de la moitié du recrutement s'est effectué via le journal local. Dans les deux jours d'information, on a eu l'ensemble des participants, même le double de candidats. On en a retenu 40 (sur 153 candidatures) : c'est un compromis entre coût et

représentativité des données. » (Enseignant-chercheur, coordinateur scientifique du projet).

Le profil des utilisateurs de systèmes capteurs s'avère ainsi dépendant des contraintes matérielles et budgétaires (nombre de systèmes capteurs financés), des impératifs d'inclusivité, des canaux de diffusion de l'information. Les logiques et techniques de recrutement connaissent à la fois des succès et des ratés notamment lorsqu'il s'agit encore une fois d'aller vers le non public, ce « public qui fait défaut » mais qui reste difficile à saisir lorsque les représentations sociales ne concordent pas exactement aux conditions objectives d'existence des classes populaires :

« Initialement, le projet portait sur un accompagnement aux personnes précaires afin d'observer dans quelle mesure changer le comportement des utilisateurs des vieilles voitures chez les personnes avec des revenus plutôt modestes. Mais quand on regarde la définition des « précaires », ce n'est même pas quelqu'un qui a un revenu modeste, c'est quelqu'un qui a un logement mais pas forcément d'emploi, potentiellement migrant donc ne parlant pas français. On devait recruter 160 personnes, 4 groupes, dans 2 zones ciblées de la métropole, car il fallait que ces personnes prennent la voiture au quotidien. Ça a été extrêmement compliqué de recruter ces personnes. On est notamment passé par un chantier d'insertion. Au final, parmi la petite vingtaine inscrite, peu étaient intéressés par le sujet hormis deux trois curieuses des formations. Le projet s'est trompé dans la définition de « précaire ». Les personnes qui ont une voiture, mais qui ne bouclent pas leur fin de mois, ont d'autres préoccupations que la qualité de l'air. » (Ingénieur AASQA, chef de projet).

Le recrutement des participants s'avère une étape déterminante des expérimentations ; déterminante et délicate ; ponctuée d'impératifs et de contraintes parfois contradictoires, parsemées de représentations sociales et de figures publiques.

Le choix du public de ces campagnes relève *in fine* de la politique publique assumée et justifiée d'un point de vue sociologique :

« Pour le recrutement et le profil des participants, il a été établi un long questionnaire d'inscription et l'on en renvoyait un en fin de session pour comparer les réponses : niveau de connaissances, perception, niveau d'inquiétudes et envie militante entre guillemets avec une partie sur la volonté de s'engager et que les pouvoirs publics s'investissent également. Sur le profil, ce qui m'embête, c'est que comme cela vient du projet participatif porté par les conseils de quartier, on a utilisé la base de données des gens qui ont voté pour ce projet. De fait, c'était des gens sensibles à la qualité de l'air. C'est un biais mais bien aussi ; le rapport sociologique a montré que le projet a appris des choses aux participants déjà mobilisés. Ce n'est pas parce que les gens sont sensibilisés qu'il ne faut pas s'en occuper. » (Chargé de mission pôle innovation, responsable du projet).

3.5 Mesures accompagnées : formations, protocoles et temporalités d'animation

La description du déroulé des expérimentations par les porteurs ou parties prenantes des projets s'avère d'un grand intérêt afin de saisir les modalités de transmission de savoirs dans les domaines de la qualité de l'air et de la mesure citoyenne. Les connaissances liées à la

dimension « accompagnement » sont éclairantes au regard notamment de la persistance des conduites en matière d'exposition à la pollution, des acquis liés à la participation.

Avant de détailler ce qui est désigné par « accompagnements » en distinguant les phases de formations, de mises au point de protocoles, de mesures, **il importe de souligner que l'animation de ces projets constitue une qualité remarquable comme leurs évaluations sociologiques le constatent quasi unanimement :**

« Ce qui a plu aux participants, c'est très clairement l'animation. D'être accompagné dans l'usage et la compréhension des données. Si on les laisse seuls, généralement, les individus sont frustrés. Là, ils avaient la liste, les balades, des réunions (par exemple, les restitutions de capteurs qui étaient toujours suivies d'un speech). Même si les capteurs ne sont pas simples, la majorité a réussi à les allumer, les brancher. Ils s'en sont servis donc je pense que c'était instructif pour eux. » (Psycho-sociologue, accompagnant scientifique du projet).

L'une des premières séquences clés dans l'animation des expérimentations et qui fait partie dans certains cas des phases de recrutement est constituée par le temps des formations des participants. Former les participants consiste à ouvrir la boîte noire de la pollution, de rendre plus transparent à la fois les systèmes capteurs mais également les données et par ce biais de transmettre ou d'approfondir les connaissances en matière de pollution intérieure ou extérieure :

« J'avais prévenu mes collègues : ne vous attendez pas à ce que les gens sachent lire les données ! Je m'attendais à ce que les gens ne comprennent pas, et très vite arrêtent. On a eu des différences selon les profils. On avait un questionnaire d'inclusion (socio, profession, âge), de recensement des caractéristiques du logement et une formation où on montrait comment fonctionnait l'appareil, les polluants mesurés, la température. On montrait le site, l'application. » (Enseignant-chercheur, accompagnement scientifique du projet).

D'un point de vue organisationnel, les modalités de formation peuvent être en présentiel, occasions de convivialités apprenantes et de transferts de connaissances entre participants :

« La formation était un peu permanente : à l'outil lors de la distribution du micro-capteur avec des binômes dans lesquels des anciens formaient les nouveaux participants ; au carnet de suivi individuel ; à la qualité de l'air avec les balades avec AirCitizen. » (Chargé de mission pôle innovation, responsable du projet).

Dans d'autres expérimentations, la formation est en ligne avec une temporalité orchestrée afin de diffuser les connaissances acquises au-delà du cercle des participants :

- *« La formation a eu lieu en ligne car mobiliser sur place 80 personnes sur 2, 3 dates, c'est compliqué. On a proposé un petit parcours de plusieurs vidéos de 20 minutes étalées sur une semaine. Ensuite, les personnes ont disposé du capteur pendant 6 bonnes semaines et l'ont rendu après les fêtes. Ainsi ils pouvaient servir d'ambassadeurs auprès de la famille et des amis. »* (Ingénieur AASQA, chef de projet).

La formation peut faire œuvre de médiation scientifique sur le problème de pollution mais constitue également un moment de consolidation de la participation pour certaines expérimentations :

« Les deux premières années, les participants étaient recrutés en octobre, formés en novembre. Ce qui permettait de voir s'ils étaient actifs car on avait peur du côté consommateur : cela l'intéresse, on ne le voit pas pendant un mois, il revient mais il n'y a pas d'échanges. On a imaginé ce filtre-là de formation et on a fait signer un papier

d'engagement (« si ne participe pas à la réunion, pas de matériel »). La formation avait lieu une première soirée avec l'AASQA locale sur la pollution et ensuite une formation sur la technique des capteurs. C'est là où se posaient les questions : « c'est quoi le protocole », etc. » (Chargé de la coordination et animation du projet).

La question du protocole de mesure représente un important sujet de débat dans ce type d'expérimentations. Dans son essai consacré aux sciences participatives, Florian Charvolin insiste sur l'existence et les usages des protocoles devant garantir la génération de données fiables notamment par le recours à des contextualisations rédigées suivant des « guides de signalement » communes aux chercheurs et participants. Ce qui conduit parfois à une « orthodoxie du protocole » qui a son efficace comme injonction mais ne décrit pas le tout des opérations et la place à donner au plaisir et à la reconnaissance (Charvolin, 2019).

De fait, dans les entretiens recueillis, cette « orthodoxie du protocole » connaît certaines failles et réinventions. Deux groupes se distinguent dans les choix effectués : les mesures libres ou les mesures protocolisées.

Dans le premier groupe, ce sont des visées scientifiques qui justifient un protocole notamment pour des études longues qui se déploient sur quatre ans et avec un prêt de dispositif qui dure six mois pour les utilisateurs soutenus par une aide motivationnelle via SMS :

« Il y a un protocole fixe : ils portent un sac à dos avec le tube. Ils portent aussi un GPS. Car le capteur ne géolocalise pas. Dans les SMS, on demande par exemple : « avez-vous prévu de prendre votre vélo et combien de fois ? ». Rien que le fait que la personne y pense et se fixe des objectifs la motive. » (Enseignant-chercheur, accompagnement scientifique du projet).

Dans le second groupe, plus abondant, c'est un choix de non recours à un protocole, justifié au nom de la dimension citoyenne des mesures :

« Les mesures sont libres, c'est un choix de confiance envers les citoyens » (Chef de projet innovation AASQA).

« Après la formation, on a lâché les participants avec deux consignes : ne pas se mettre en danger et ne pas utiliser le micro-capteur sous la pluie. Ils se sont amusés avec des trucs de toute sorte (par exemple, le poulet qui brule dans le four). » (Sociologue, accompagnant scientifique du projet).

Le choix d'un protocole est parfois discuté et parfois se trouve réaménagé d'une saison de mesures à l'autre, d'un projet au suivant. Les projets de mesures citoyennes de qualité de l'air sont en eux-mêmes exploratoires et, au fil des années, ils ont acquis leurs propres protocoles de fonctionnement notamment dans la prise de mesures :

« Au début, je pensais faire des protocoles mais on a laissé les gens décider par eux-mêmes. On a prêté des outils mais pas de protocoles ; juste un petit carnet pour noter les mesures avec des dessins, des tags, pour annoter les mesures à la main. Des symboles pour le vent, les fumeurs etc. Ce qui permettait aux gens de contextualiser les mesures. Entre les différentes parties prenantes du projet, il y a eu des différences de vision. Les uns auraient aimé plus de protocoles, de propositions, d'autres non. » (Chargé de mission pôle innovation, responsable du projet).

« Pour la deuxième vague du projet, il y a une approche différente, on commençait à maîtriser le sujet de la mesure individuelle. On a tenté des réunions de groupe, nous

avons construit un projet de mesure en collectif. Avec des gens qui sont très méthodiques dans la manière de mesurer, de comparer leurs données. Les chercheurs CNRS n'auraient pas fait mieux en termes de rigueur de mesure. Je me souviens d'un boulanger qui était hyper rigoureux avec toutes ses comparaisons dans toutes ses mesures. » (Sociologue, accompagnant scientifique du projet).

La mise en place d'un protocole de mesures peut également émaner des participants eux-mêmes qui désirent cadrer et donner un sens à leur contribution :

« On a ajouté la deuxième année, des « petits protocoles » : de 18h à 23h, on proposait de mettre les capteurs sur le balcon pour avoir des mesures fixes et massifier les données. Est venu un besoin de diriger la mesure car parfois des participants étaient déçus et se demandaient : « mesurer à quoi ça sert ? ». Donc on a créé des protocoles rendus plus ludiques lors des sessions de mesures. » (Chargé de la coordination et animation du projet).

Protocoliser la mesure semble également favoriser la constitution d'un collectif avec par défaut des « mesures individuelles et libres *« sauf quand le groupe décidait de son protocole, de trajets à tester ou mesurer dans toutes les écoles. »* comme le confie un porteur de projet interrogé. » (Chargé de mission pôle innovation, responsable du projet).

Expérimentales par leurs outils et objets, les campagnes de mesures citoyennes de pollution semblent également chercher leurs formes, leurs modes de fonctionnement à travers des protocoles en tout genre qui ne concernent pas uniquement les procédures de mesure.

Ces procédures s'avèrent d'une grande diversité en ce qui concerne les temporalités de session ou les façons de former les groupes de participants. Certains projets portés par des scientifiques vont générer un protocole organisationnel au plan de la formation des groupes comme ici par exemple :

« On a fait 4 groupes de 10 foyers (avec une répartition homogène dans chacun des groupes en matière de zone géographique, type d'habitat, revenu et situation familiale) : 1 groupe à qui on a juste expliqué le fonctionnement technique de la station ; 1 groupe avec accès à un réseau social de partage d'idées (« slack » -sorte de chat- Mais ça n'a pas marché), on n'est pas là pour animer, c'était une volonté de départ ; 1 groupe qui a eu des informations générales sur la pollution de l'air (fiches, dépliants) ; 1 groupe a eu un diagnostic personnalisé dans leur logement : ça a été très apprécié. » (Enseignant-chercheur, coordinateur scientifique du projet).

Ou encore :

« Et quand on a fait les formations, on a distingué un groupe témoin, un groupe avec une formation, un groupe avec une formation et un capteur pas cher (50 euros), un groupe avec Airbeam. Soit 4 groupes de 40 personnes. » (Ingénieur AASQA, chef de projet).

Le séquençage des expérimentations donne lieu à des protocoles du temps de captation également intéressant à repérer du point de vue de leurs finalités plurielles. Découper un projet en alternant formation-captation-rendu peut permettre de multiplier le nombre de participants pour un nombre fini de systèmes capteurs mais peut également à terme constituer un outil d'animation didactique pour les protagonistes :

« Le service de prêt est entre 15 jours et 3 semaines : pour tourner (toucher le plus de gens) mais aussi parce que c'est aussi la durée estimée où les gens se lassent. Notre application permet de faire une mission pédagogique, des mesures qui sont classées (habitat et chauffage, transport, temporalité, attitudes), sur lesquelles on amène les

utilisateurs à s'interroger. On les pousse à des challenges : « demain, allez tous mesurer dans votre quartier à 18h » pour comparer les mesures et les amener à se questionner. Les données sont renvoyées sur la plateforme dans le but de regrouper des données et des échanges sur la plateforme, pour mieux comprendre les choses et interagir. On y donne des infos sur la qualité de l'air. Il y a 3 groupes et les études. Et on peut créer aussi des campagnes publiques ou privées. » (Chef de projet innovation AASQA).

« Il y avait 40 personnes par groupes avec 4 sessions par saison. Il fallait prendre le temps de la distribution et la récupération des capteurs et des données, l'étalonnage et la redistribution. Donc on avait besoin de temps. 3 mois, on pensait que c'était bien pour des questions de logistique. Même si in fine, ces campagnes trimestrielles sont apparues trop longues suivant les retours des utilisateurs dans le rapport sociologique » (Chargé de mission pôle innovation, responsable du projet).

« Le premier jour avec le capteur a été très ludique pour les participants, ils regardaient si ça changeait quelque chose dans telle ou telle pièce. Et après, on le pose et on l'oublie. Rapidement, ils s'en sont désintéressés si bien qu'il fallait rappeler pour qu'ils n'oublient pas l'appareil ! On s'est dit que 15 jours, c'était bien suffisant car ensuite il y a des oublis. » (Enseignant-chercheur, accompagnement scientifique du projet).

La formation s'applique à un outil, à ce qu'il mesure mais aussi à la nécessité de sa maintenance (étalonnage). Ceci suppose des temps différenciés à prendre comme autant d'occasions d'en performer la validité scientifique qui reste toujours questionnée.

« Il y a le prêt, mais c'est l'accompagnement qui est important, ce que nous avait montré le projet. On rappelle que c'est un micro-capteur, que c'est indicatif, ce n'est pas une valeur réglementaire, qu'il y a des incertitudes. On replace toujours le contexte, Il faut toujours accompagner. » (Chef de projet innovation AASQA).

« J'en retiens que l'accompagnement est indispensable pour ce genre d'expérimentation. 'Débrouillez-vous' c'est non si l'on souhaite que les gens en ressortent avec une vision éclairée. » (Ingénieur AASQA, chef de projet).

3.6 Valorisation : accès et pratiques des données, retours sur les usages (habitudes, connaissances, sensibilités)

La génération de données de qualité de l'air par des participants dans le cadre de campagnes institutionnelles demande à être interrogée au plan de leur accès, de leur valorisation et publicisation. Les résultats en termes de valorisation des données sont dans ce paragraphe problématisés afin de permettre l'évaluation des dispositifs de mesure en termes de sensibilisation, connaissances et/ou changements d'habitudes.

La politique d'accès et d'accessibilité aux données renvoie à des configurations de projets diverses. L'accompagnement peut être prolongé par le retraitement des données et par un rendu verbal et convivial comme c'est le cas dans ce projet participatif :

« Pour la qualité de l'air extérieur, le micro-capteur était relié à l'application pour smartphone, les participants avaient accès aux données brutes. De même pour la qualité de l'air intérieur, le capteur fournit un feedback visuel. On a demandé à ce que les utilisateurs envoient les données au collectif de chercheurs Aircitizen pour qu'il puisse créer des rapports explicatifs sur la qualité de l'air et le compte rendu des

balades, qu'ils ont présentés lors des fins de sessions de mesures. » (Psycho-sociologue, accompagnant scientifique du projet).

Il est admis que la culture des données (*data literacy*)⁸ comme toute littéracie n'est pas que d'ordre matériel mais d'abord une question d'intelligibilité des données, d'apprentissage de leur appréhension, compréhension et interprétation.

« Les données ont été rapatriées sur un site propre pour exploitation graphique et traitement. On a le nombre de mesures par jour, par participants, etc. Les gens y avaient accès mais pas sûr qu'ils y soient allés. » (Ingénieur AASQA, chef de projet).

Certains projets génèrent un grand nombre de données et nécessitent d'associer le travail de « data scientist » **dont la formation à la qualité de l'air est également un chantier de ce courant de la science participative :**

« Le dispositif capte en continu : 1 donnée toutes les dix secondes, la station reste illuminée et change de couleur. On ne dispose pas du nombre de connexions mais le fabricant peut nous fournir ces données. On a recruté quelqu'un pour traiter les données, un Data scientist à sensibiliser aux questions de pollution de l'air. » (Enseignant-chercheur, coordinateur scientifique du projet).

La politique d'accès aux données n'est pas seulement une question matérielle ou sociologique mais revêt une dimension institutionnelle pour certains des acteurs de ces projets dont la légitimité se trouve en quelque sorte renforcée par la génération de données accessibles :

« Ces expérimentations apaisent les défiances. Cela redonne une confiance, tout le monde peut avoir accès aux données, les gens peuvent se créer un compte, on ne cache rien. Les gens ont été surpris de voir des équipes qui étaient ouvertes : on leur dit, vous mesurez ce que vous voulez. « Ah bon ? ». Cela redonne de la crédibilité dans la science. Notre mission n'est pas de mettre en place des actions (c'est le rôle des collectivités) mais de donner des informations scientifiques. L'API⁹ a été développée pour une ouverture des données à des usages scientifiques ou académiques dans une problématique de données personnelles. » (Chef de projet innovation AASQA).

L'accès aux données assorti d'un rendu intelligible constituent les dernières séquences de ces expérimentations qui, suivant la grammaire de participation décrite par Joëlle Zaks (Zaks, 2012), suppose à la fois de « prendre part », de « contribuer » mais également de « recevoir une part ». Cette logique d'une recherche non seulement participative mais contributive de part en part peut être décrite suivant diverses modalités.

La première renvoie à un apport de connaissance réciproque. On peut apprendre des données générées par le système capteur :

« Avec les micro-capteurs, il y a un accès supérieur aux informations, on comprend mieux tel ou tel polluant, comme les particules fines et impact sur la santé. Il y a une meilleure compréhension de la qualité de l'air au niveau de la santé. En termes d'exposition à la qualité de l'air, les gens se considéraient comme plus exposés après qu'avant. » (Psycho-sociologue, accompagnant scientifique du projet).

⁸ La littératie des données (du terme anglais *data literacy*) ou culture des données est la capacité d'identifier, de collecter, de traiter, d'analyser et d'interpréter des données afin de comprendre les phénomènes, les processus, les comportements qui les ont générées en sachant faire preuve d'esprit critique.(sources : Wikipédia)

⁹ Interface de programmation d'application (*Application Programming Interface*)

Mais il est également possible de contribuer aux données, en tant qu'utilisateur, notamment par le biais de métadonnées que le dispositif AirCasting aménage tout particulièrement avec des tags qui peuvent faire l'objet d'ateliers collectifs :

« On a eu des moments collectifs avec des tags établis à l'occasion d'atelier pour reconnaître les données. Certains tags n'étaient pas prévus comme le tag « tunnel » ou le tag « enfant » (pour distinguer du trajet que l'ont fait avec les enfants). Il n'y a pas eu de tag « santé » mais des témoignages. » (Chercheur indépendant, chef de projet).

Cette forme d'évaluation profane par des « tags expressifs » (Allard, 2015) autour des données issues de la mesure citoyenne complète les évaluations des expérimentations réalisées par les parties prenantes par l'intermédiaire d'enquêtes par questionnaire et entretiens.

Ces « retours d'expériences » concernent à la fois la partie matérielle des expérimentations comme par exemple l'ergonomie du dispositif de mesure, mais également les usages des mesures s'inscrivant dans les habitudes de vie :

« Il y a beaucoup de commentaires sur l'ergonomie de l'appareillage « ça paraît fragile etc. ». Et le paradoxe, c'est que le micro-capteur provoque vite un désintérêt. On observe aussi qu'il y a, pour les gens qui ne connaissaient rien au sujet, une réelle prise de conscience des sources de pollution. Une fumeuse, qui ne connaissait rien au sujet, a vécu une prise de conscience vis-à-vis du tabagisme. Et même chez des gens qui avaient un petit intérêt au départ, cela leur a permis une montée en compétence sur des sources méconnues comme le fait que le chauffage au gaz puisse être polluant. Pour tout le monde, il y a une montée en compétences. Le problème de la pollution, c'est qu'une partie est imperceptible. Donc l'expérimentation permet de voir si l'on est exposé à des pollutions et qu'au contraire, à des endroits que l'on pensait pollués, se rendre compte que les courbes ne sont pas si alarmantes. Ça rend visible ce phénomène et donne une preuve tangible. Mais pour que l'outil soit intelligible, il faut prendre le temps d'expliquer pendant la formation. » (Enseignant-chercheur, accompagnement scientifique du projet).

« A l'issue de la campagne de mesures, on n'observe pas de grand changement en mobilité : le cycliste reste cycliste, idem pour l'automobiliste, quel que soit le niveau d'inquiétude. Mais il y a eu des impacts moyens sur les pratiques sportives : les sportifs ne montaient pas sur site qui est un « rite de passage » pour les habitants de la ville quand il y avait de la pollution. Et quand il y a une différence entre la mesure en directe et les mesures officielles, c'était le compteur de l'application qui a raison : de le voir, c'est important. La légitimité est plus grande. Cela fait partie des grands apports. » (Sociologue, accompagnant scientifique du projet).

« Sur l'expérimentation chauffage au bois, Il y a 2-3 personnes qui ont été très surprises. Sur le poêle au bois, il y a un imaginaire social positif. Là, ça perturbe. » (Sociologue, accompagnant scientifique du projet).

« Les grandes motivations au départ étaient « on veut savoir comment on est pollué par les autres ». Le 1^{er} apprentissage : ils sont eux-mêmes autant sources de pollution que ce qui vient de l'extérieur. Le ménage, la cuisine, fumer une cigarette. Ils ont également pu constater qu'en ouvrant une fenêtre, la situation s'améliore. » (Enseignant-chercheur, coordinateur scientifique du projet).

Les méthodes employées pour obtenir des réponses quant aux vécus et savoirs issus de ces projets peuvent également être un élément de la recherche participative :

« Je viens du côté technique, le côté changement de comportement, c'est passionnant. Même pour nous, hyper enrichissant, on ne fait que mettre le doigt sur des petites choses très intéressantes et que nous n'aurions pas exploitées. On a établi une échelle de comportement à différents temps de l'expérimentation et on s'est rendu compte que des questions ont amené à des scores très élevés dès le 1^{er} questionnaire. Comme fumer dans le logement : c'est devenu une norme sociale de ne pas fumer chez soi. Quand bien même ils le font, les participants ne le disent pas. C'est une mauvaise question et le score n'évolue pas. Sur l'aération, on avait de bons scores mais en fait, beaucoup de personnes n'aèrent pas correctement (ouvrir les fenêtres en grand...). Les entretiens ont été intéressants pour cette raison. Dans les principaux résultats, pour des actions immédiates (aération logement, brûler moins de bougies/encens), une formation suffit avec des rappels. A priori, le micro-capteur permettrait des changements de comportement, des pratiques, plus coûteux en argent, soit en investissement. Par exemple, quelqu'un pensait que la pollution de sa maison venait de la rue et a observé qu'elle venait de sa cheminée, il a changé l'insert de sa cheminée. On a supposé que sans mesures concrètes, il ne l'aurait pas fait. Il était médecin, déjà sensibilisé. Les participants étaient un minimum sensibilisés, mais ont quand même appris des choses grâce au capteur. L'un a mis une haie dans son jardin pour faire obstacle à la pollution. Certains ont fait des tests sur les modes de transport et essayé de passer de 2 à 1 voiture par foyer. Une personne a entamé une réflexion pour reprendre le vélo pour aller au travail (mais qui avait eu un accident). On a eu des petits résultats. Le capteur a aidé à la prise de conscience de faits bien précis et de changements de comportement ciblés. » (Ingénieur AASQA, chef de projet).

Ces évaluations sur les retours d'expérience des participants peuvent constituer un terrain d'expérimentation méthodologique mais également *in fine* des leçons sur ces projets mêmes...d'une politique à l'autre...

« Mes regrets sur le projet renvoient aux propos du rapport sociologique qui m'a turlupiné : 'les gens mesurent mais il faudrait leur proposer des solutions'. Les gens ont plus aéré, passent par des chemins moins pollués, sont plus en colère et souhaitent qu'il y ait moins de pollution. Mais cela aurait été mieux de proposer de vraies solutions. Tous les participants ne prennent pas la voiture, beaucoup ne sont pas fumeurs. Ce n'est pas évident de faire changer leur exposition à la qualité de l'air. Le rapport signalait également que les gens ont l'impression d'être les seuls à se préoccuper de la pollution de l'air. Donc il est important de valoriser les actions citoyennes comme celles-là, pour montrer que d'autres l'ont fait et ne sont pas les seuls à s'intéresser au sujet. On se perçoit pas mal vis-à-vis du regard des autres. Valoriser ces projets, cela permettrait de faire des petits plus facilement. » (Chargé de mission pôle innovation, responsable du projet).

En conclusion, cette première partie nourrie des entretiens avec des porteurs de projets s'est intéressée aux interactions entre acteurs et actants techniques, de leurs justifications et motifs autour de valeurs données aux mesures produites lors de ces campagnes en en dégageant les polluants et leurs sites, les dispositifs et les protocoles, les jeux d'acteurs et leurs différents rôles. Elle suggère de recontextualiser les campagnes de mesures citoyennes dans le cadre du tournant participatif des sciences et des techniques qui interroge plus radicalement le paradigme de l'adaptabilité comportementale à la pollution en valorisant le rôle d'un citoyen acteur des dispositifs de formation des savoirs et des connaissances.

Les enseignements de cette première partie peuvent être synthétisés en 5 points :

- Le système capteur comme dispositif dialogique : il représente autant un support de médiation et de sensibilisation qu'une source de données. En cela, c'est un objet-frontière¹⁰ outillant le dialogue entre citoyens et institutions publiques afin d'amoindrir la défiance vis-à-vis des données officielles.
- Le nouveau rôle des AASQA : en interagissant avec des associations, des collectifs et des citoyens, les AASQA renouvellent leurs fonctions, allant du référent technique à la médiation scientifique. Ils deviennent non plus seulement les cibles mais désormais des relais dans des mobilisations pour une meilleure qualité de l'air.
- Le public « par défaut » et celui « qui fait défaut » : la participation s'effectue sur le premier critère du volontariat, assortie d'une connaissance préalable de la pollution. La recherche d'une relative diversité socio-démographique dirigée vers les publics populaires demeure une quête à tenir entre exigence de scientificité (par la représentativité) et apports financiers des projets (par la flotte de systèmes capteurs à disposition). Cette quête est elle-même parsemée de représentations sociales parfois contradictoires (corrélations entre pauvreté et mobilité par exemple).
- Protocole ou absence de protocole : l'«orthodoxie du protocole » qui fait débat au sein des sciences participatives connaît dans les projets présentés de nombreuses réinventions entre mesures libres et mesures protocolisées. La demande d'un protocole scientifique dans la prise de mesures peut venir parfois des participants eux-mêmes désirant donner un sens à leur contribution.
- Animer un collectif, clé de l'engagement : l'animation des projets en constitue leur valeur sociale. Elle suppose des séquençages, allant de la formation à l'interprétation collective des données, autant de moments-clés de la consolidation de la participation d'un public mobilisé pour la réduction de l'exposition individuelle et éclairé par des mesures dont il est le co-producteur.

¹⁰Les objets-frontière sont un arrangement qui permet à différents groupes de travailler ensemble sans consensus préalable suivant la définition de Susan Leigh et James Griesemer en 1989 dans leur article, « Institutional ecology, 'Translations', and Boundary objects: amateurs and professionals on Berkeley's museum of vertebrate zoologie, *Social Studies of Science*, 19(3): 387-420.

4 Partie 2 : profils des engagements et expertises dans les campagnes citoyennes de mesure de pollution

L'enquête par questionnaire a été diffusée auprès de participants à des campagnes citoyennes de mesure de qualité de l'air (utilisateurs collectifs – questionnaire A) et d'utilisateurs de systèmes capteurs (utilisateurs individuels – questionnaire B). **Sauf mention explicite, ce sont les réponses et les verbatim au questionnaire A des utilisateurs collectifs qui sont présentées dans ce rapport**¹¹. L'objectif de ce questionnaire est de connaître les citoyens qui participent à des projets de mesure de la qualité de l'air au plan des profils socio-démographiques et socio-économiques, mais également de connaître leurs motifs d'engagement, leurs retours d'expérience et leurs souhaits et propositions pour d'éventuelles améliorations des projets et outils de mesure de la qualité de l'air.

Les résultats de cette enquête s'inscrivent dans le corpus des études sur la participation citoyenne, dont la conceptualisation se déploie principalement autour de la notion d'engagement. D'un point de vue sociologique, la notion d'engagement a été théorisée notamment par Howard Becker qui définit l'engagement comme un processus constitué d'actions et d'expériences contribuant à donner du sens et à construire une identité à un individu « engagé » qui va se déployer dans le temps à travers des « carrières d'engagement » (Becker, 1960). Cependant comme le remarque Florence Millerand étudiant diverses configurations de projets de sciences participatives et attentive aux questions des dispositifs de médiation des savoirs en jeu dans ces situations, il est opportun de s'attacher à la production de « figures » associées à des formes d'engagement citoyen en rendant compte de leur singularité autant que de leur pluralité et pouvant cohabiter chez un même individu « engagé » (Millerand, 2021) :

« Ces figures croisent par ailleurs plusieurs régimes d'engagement ; un citoyen mu par une conscience politique (engagement pour la cause) pourra aussi s'investir profondément dans une activité pour elle-même (engagement pour l'activité ou la tâche). Ainsi les formes d'engagement apparaissent-elles non seulement plurielles mais sujettes à de multiples combinaisons. La diversité des formes et figures d'engagement implique qu'on ne peut tenir pour acquis que les citoyens visés par les initiatives de science participative s'engageront naturellement dans la posture prédéfinie, typiquement le bénévole, le militant ou l'amateur de science. Par ailleurs, ces figures multiples mettent en lumière des différences importantes dans les formes d'expertise et la manière dont elles sont distribuées entre les acteurs. En l'occurrence, ces figures traduisent des relations particulières à la connaissance où s'expriment différentes visions des rapports entre science et société. »

Dans le cas spécifique de la mesure citoyenne, c'est également la question du « pourquoi et comment mesurer » la qualité de l'air qu'il s'agit de documenter. D'un point de vue théorique, nous nous baserons sur la notion du « motif » pour appréhender les raisons ou les causes de la participation qui ne relèvent pas d'une logique subjectiviste mais sont publiquement disponibles et saisissables dans les interactions sociales (comme par exemple répondre à un questionnaire sociologique) par un sujet

¹¹ En effet, très peu de réponses au questionnaire B ont été obtenues.

engagé comme le propose le sociologue Charles Wright Mills (Wright Mills, 1940 d'après Trom, 2017) :

« Cette conception sociologique de motifs en tant que phases langagières relativement stables de situations délimitées est tout à fait compatible avec le programme de Mead visant à aborder la conduite socialement et de l'extérieur. Elle garde clairement à l'esprit que « les motifs comme les actions trouvent très souvent leur origine non pas à l'intérieur des individus mais dans la situation dans laquelle ils se trouvent... » Elle traduit la question du « pourquoi » en un « comment », auquel on peut répondre selon la situation et son vocabulaire typique des motifs, à savoir ceux qui accompagnent traditionnellement cette situation type et fonctionnent en tant que signaux et en tant que justifications pour les actions normatives qui s'y produisent. »

En prenant en compte les éléments de cet état de l'art au sujet des initiatives relevant des sciences participatives comme les campagnes de mesures citoyennes, **les résultats de l'enquête par questionnaire seront présentés suivant trois points :**

- 1. Les profils d'engagement entre socio-démographie et motifs participatifs ;**
- 2. Les rapports aux savoirs en matière de qualité de l'air et aux dispositifs de mesure ;**
- 3. Les formes de valorisation des données et des connaissances dans les pratiques des participants.**

4.1 Profils d'engagement : des données sociodémographiques aux motifs participatifs

L'analyse du questionnaire A livre à la fois des enseignements quant aux profils sociodémographiques des participants aux campagnes de mesures citoyennes mais également leurs motifs d'engagement. Dans le cadre de ces travaux, la volonté était de saisir plus précisément des intentionnalités soucieuses vis-à-vis des effets de la pollution de l'air au plan de la santé physique, en plus de documenter les motifs pluriels qui favorisent la participation à ces campagnes.

4.1.1 Des profils sociodémographiques diplômés

Parmi les analystes des campagnes de mesures citoyennes et des sciences participatives, Florian Charvolin fait remarquer dans son ouvrage, qu'il existe encore trop peu de connaissances systématisées au sujet des profils sociodémographiques des participants aux campagnes citoyennes de mesure (Charvolin, 2019) et que le plus souvent le niveau de qualification semble plus élevé dans les sciences participatives que dans l'ensemble de la société comme le confirme également Patricia Silveira et Bruno Strasser (Silveira et Strasser, 2017).

Nos résultats semblent confirmer les constats de ces chercheurs malgré, comme il a été noté dans les entretiens avec les porteurs de projets, la mise en place de techniques de recrutement des participants cherchant à amoindrir les inégalités sociodémographiques.

La caractérisation socio-démo-économique des 151 répondants au questionnaire A suppose d'articuler les trois critères de l'âge, du genre et de la situation professionnelle. A cet égard, la moitié d'entre eux sont âgés de 40 à 57 ans. Les tranches d'âge de 22 à 39 ans et de 58 à 75

ans représentent à elle deux l'autre grande moitié de la distribution par âge des répondants (cf. figure 1).

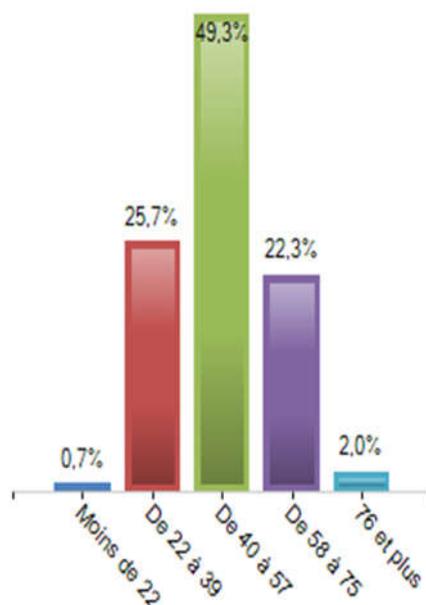


Figure 1 : Répartition par tranche d'âge des répondants (utilisateurs collectifs – questionnaire A)

La moyenne d'âge s'avère donc relativement haute validant la figure idéal typique des sciences participatives d'un homme d'âge mûr ou à la retraite ayant du temps à consacrer à un loisir scientifique (Millerand, 2021 ; Charvolin, 2007). Ce que confirment, au plan du genre, les résultats obtenus qui montrent une représentation plus masculine (60% d'hommes contre 40% de femmes, cf. figure 2). Cette caractéristique masculine des participants à des campagnes basées sur des dispositifs électroniques et numériques est également notée dans les évaluations de certaines campagnes qui se sont attachées aux traits sociodémographiques (Agence d'innovation Comportementale, 2019 ; Michelin, 2019). Les travaux d'Isabelle Collet sur les inégalités de genre dans les métiers de l'ingénierie et de l'informatique peuvent éclairer cette prédominance du genre masculin parmi les participants. La sociologue démontre ainsi dans son dernier ouvrage, que malgré la numérisation croissante de la société, les cursus informatiques, en France ne sont suivis encore qu'à hauteur de 12% par des femmes (Collet, 2019). Cette caractéristique est renforcée plus encore dans le questionnaire B adressé aux utilisateurs individuels qui met en avant 100% d'utilisateurs masculins.

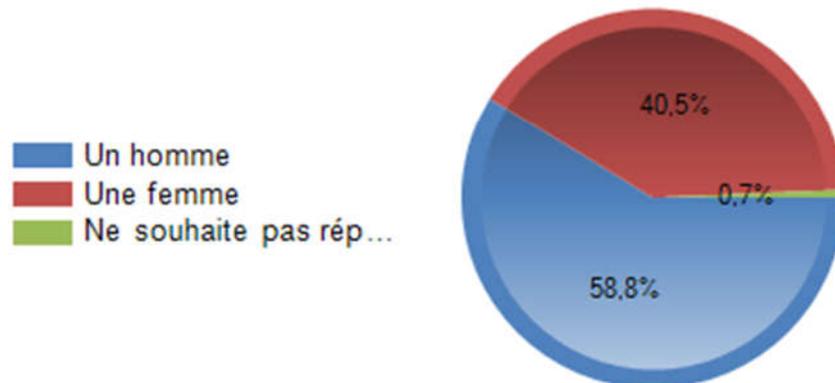


Figure 2 : Répartition par genre déclarée par les répondants (utilisateurs collectifs - questionnaire A)

Les situations professionnelles confirment la part des actifs majoritairement et à la marge des retraités ou de pré-retraités (classés dans « autre ») (cf. figure 3).

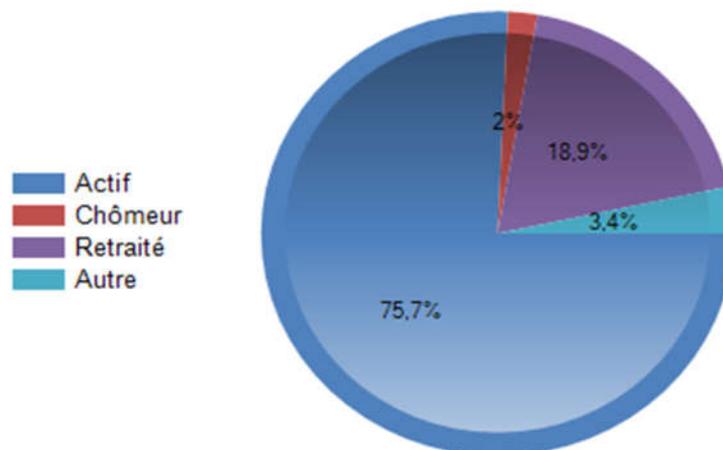


Figure 3 : Situation professionnelle déclarée par les répondants (utilisateurs collectifs - questionnaire A)

La description des professions par les intéressés peut se répartir en six groupes, avec une prédominance des métiers liés à l'ingénierie et à l'informatique qui s'éclaire aisément par le type d'outillage socio-technique matérialisé par les systèmes capteurs (42 réponses). Les métiers liés à l'enseignement viennent en seconde position (24 réponses). Cette prégnance de la voie éducative renvoie clairement aux ambitions pédagogiques des sciences participatives et de démocratisation des savoirs. Les métiers liés au soin sont également représentés en rapport avec les problèmes de santé apportés par la pollution

de l'air (10 réponses). Une part est également représentée par les métiers liés à la culture (11 réponses) avec des intentions parfois liées à leurs activités (architecture) mais également à la dimension scientifique des campagnes de mesures, dans la lignée d'une éducation populaire à laquelle le monde de la culture est également apparenté. **La problématique environnementale, que nous développerons dans l'analyse des motifs de participation, est également présente dans la répartition des métiers donnant une part intéressante (au nombre de 11 réponses) aux activités liées à la « transition écologique ».** Une proportion importante (25 réponses) revient enfin au secteur des services (finances, distribution, droit). Les ouvriers et techniciens notamment dans le domaine de la logistique ou de la métallurgie se trouvent représentés par 10 personnes.

La trajectoire métiers-diplôme nous livre un portrait hautement qualifié des participants avec près de la moitié des répondants ayant obtenu un niveau bac+5 de diplôme confirmant d'autres études au sujet des caractéristiques socio-économiques (Michelin, 2019) (cf. figure 4).

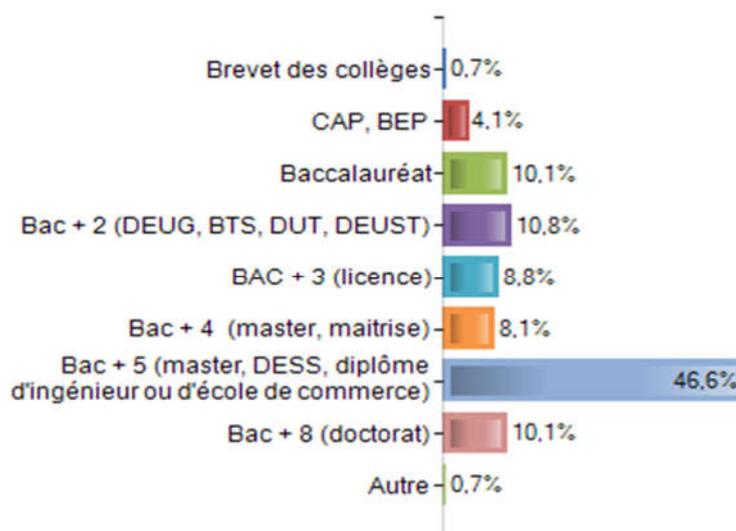


Figure 4 : Niveau de diplôme déclaré par les répondants (utilisateurs collectifs – questionnaire A)

Le niveau de rémunération confirme la sur-représentation des classes supérieures dans le public des participants à ces expérimentations (cf. figure 5). De façon typique, il est intéressant de noter au sein des répondants des disjonctions entre diplôme emploi et salaire notamment du côté des métiers liés à la transition écologique avec des niveaux de forte qualification scolaire qui peuvent éclairer cette appétence pour des expérimentations de sciences participatives.

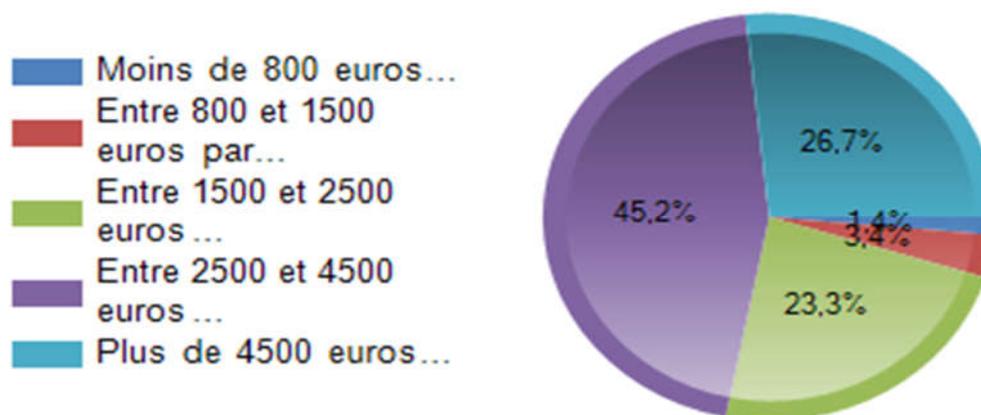


Figure 5 : Niveaux de revenus du foyer déclarés par les répondants (utilisateurs collectifs – questionnaire A)

Ce profil archétypique masculin diplômé aux revenus supérieurs au salaire médian par foyer questionne quant à la problématique de l'engagement des classes populaires. Comme l'analyse Jean Baptiste Comby « le monde ouvrier n'est que faiblement représenté dans les projets citoyens et associatifs, il l'est encore moins lorsque la thématique est liée à l'environnement. Leur faible participation ne démontre absolument pas un désintérêt mais une posture de distanciation et critique envers une problématique qu'ils considèrent appartenir à une classe sociale dominante, leur imposant une morale et leur enjoignant des bonnes pratiques » (Comby, 2015).

On remarquera ainsi que parmi les répondants, les profils ouvriers et techniciens s'engagent dans ces campagnes notamment par rapport à une participation à des associations de cyclistes s'interrogeant sur la qualité de l'air inhalé pendant leur temps de transport ou de loisirs ou en relation avec leur préoccupation pour la santé comme ce cariste adhérent d'une association de cyclistes en ville. Des reclassements à l'épreuve des métiers de la transition sont également observés tel ce diplômé bac+8 en SHS qui exerce comme vélociste vendant et réparant des vélos et s'intéressant aux campagnes de mesures citoyennes par « simple curiosité liée à mon environnement de vie ».

Au-delà des caractéristiques sociodémographiques et de leurs limites en termes de pluralisme sociologique, le questionnaire a également permis de faire émerger plus qualitativement ce que Florence Millerand appelle les « figures d'engagements » et leurs entrelacements inter-individuels (Millerand, 2021).

4.1.2 Habiter, se déplacer : deux voies de motivations ?

Les campagnes de mesures citoyennes de qualité de l'air ont pu porter plus spécifiquement sur les polluants particules fines liées au chauffage au bois ou au trafic urbain. Les modes d'habiter et de déplacements renseignent à la fois sur les habitudes de vie mais également sur les leviers de changements ou de la redirection des actions en matière d'émission et d'exposition individuelle. En ce sens, l'attention portée à certaines informations livrées par le questionnaire peut permettre de débusquer également des facteurs de motivation de participation...du levier au mouvement en quelque sorte.

Les répondants habitent pour moitié en maison ou en appartement et dans la plupart des cas dans des logements donnant sur rue, exposant ainsi plus avant aux émissions polluantes issues du trafic urbain (cf. figures 6 et 7).

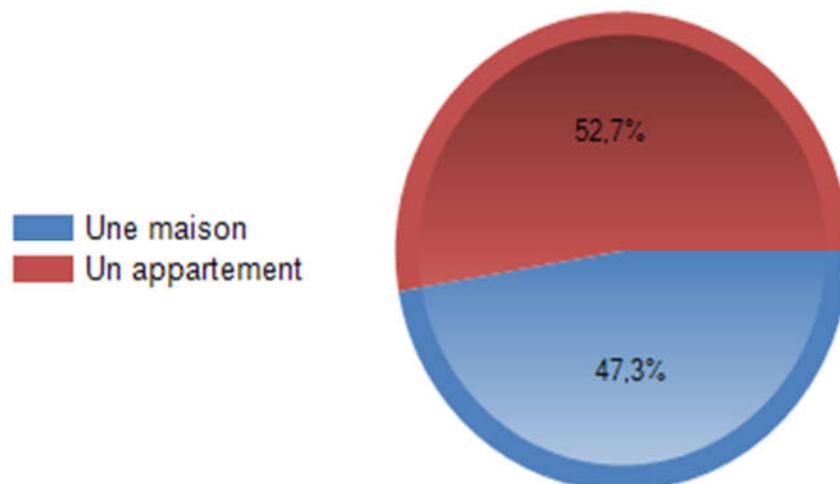


Figure 6 : Type d'habitat déclaré par les répondants (utilisateurs collectifs – questionnaire A)



Figure 7 : Situation de l'habitat déclaré par les répondants (utilisateurs collectifs – questionnaire A)

Il a été proposé dans le questionnaire A d'indiquer le mode de chauffage en regard de plusieurs expériences étudiant la pollution aux particules en lien avec la pratique du chauffage au bois, qui peut contribuer significativement à la pollution de l'air intérieur et extérieur. Parmi les répondants du questionnaire, le chauffage au gaz puis les divers types de chauffage à bois (poêle, granulés) en appoint ou pas viennent avant le chauffage électrique (cf. figure 8). Plusieurs campagnes de mesures ayant porté ou portant sur le chauffage au bois (BBClean, CheckBox, Captothèque notamment)¹², cette présence importante peut être reliée à ce

¹² Cf. les rapports d'évaluation de ces expériences (Agence d'Innovation Comportementale, 2019 ; Michelin, 2019 ; 2020).

contexte spécifique de questionnement et d'intérêt pour mesurer l'impact des particules fines issues de ce type de combustion¹³

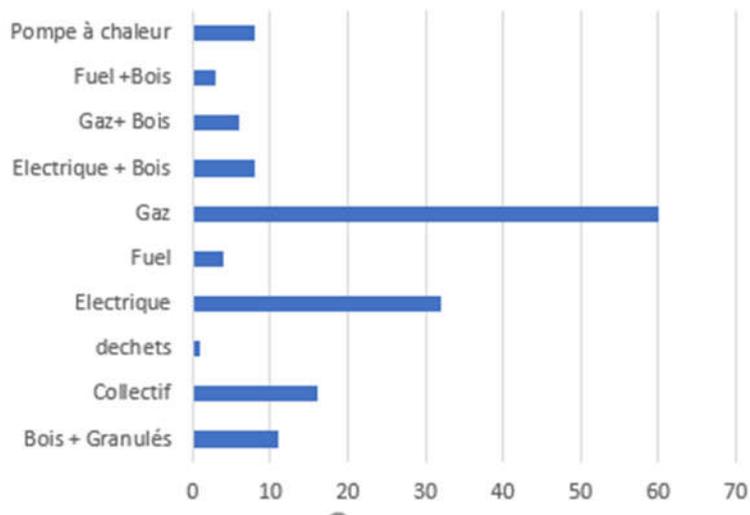


Figure 8 : Mode de chauffage déclaré par les répondants (utilisateurs collectifs – questionnaire A)

Le mode de déplacement constitue un double facteur d'émission et d'exposition à la pollution atmosphérique ainsi que de motivation pour la participation à des campagnes de mesures. Le cas de la militance de la cyclo-mobilité est un cas d'usage que nous avons cité plus haut et que les porteurs de projets mentionnent souvent. C'est le cas de la première campagne d'Ambassad'Air en 2017 avec un certain nombre de contributeurs déclarant effectuer régulièrement leurs déplacements à vélo. Le cycliste figure un profil d'engagement souvent cité par nos interlocuteurs lors des entretiens avec les professionnels intervenant dans ces campagnes¹⁴ avec de nouvelles conversions rencontrées parfois à l'issue des expérimentations¹⁵. D'autre fois, ce sont des campagnes qui sont consacrées aux problématiques de mobilités telles que Mobil'Air qui vise le changement de mobilité et qui propose d'autres types de transports à ceux qui utilisent la voiture avec des prêts de vélo par exemple¹⁶.

¹³Ainsi, dans une expérimentation commandée par la Direction interministérielle à la transformation publique a porté, en 2019 sur la part significative des émissions de particules liée en Ile de France à une utilisation d'appoint ou d'agrément dans des équipements peu performants de chauffage au bois, usage favorisé par une image positive du feu de bois (Agence d'Innovation Comportementale, 2019).

¹⁴ Comme l'explique Tim Cassiers d'ExpAir : « Les cyclo cherchaient une argumentation pour améliorer leur discours mobilité pro-vélo. » (entretien réalisé le 17 décembre 2020 par Laurence Allard et Camille Boubal).

¹⁵ A la suite de l'expérimentation du projet CaspAir, sa cheffe de projet, raconte ainsi, « qu'une personne a entamé une réflexion pour reprendre le vélo pour aller au travail (mais qui avait eu un accident). On a eu des petits résultats comme ça. Le capteur a aidé à la prise de conscience de faits bien précis et de changement de comportement » (Entretien réalisé le 5 janvier 2021 par Laurence Allard et Camille Boubal).

¹⁶ Cf Entretien avec Sarah Duché réalisé le 17 décembre 2020 par Laurence Allard et Camille Boubal.

Parmi les répondants, nous retrouvons cette bipartition manifeste entre d'un côté les automobilistes, suivis de près par les cyclistes, toujours « dans la course » à la fois au plan du mode de déplacement mais également de la motivation si l'on entend les retours d'usages cités plus haut des initiateurs des projets. Et cette bipartition se retrouve tout autant au plan du transport secondaire que principal.

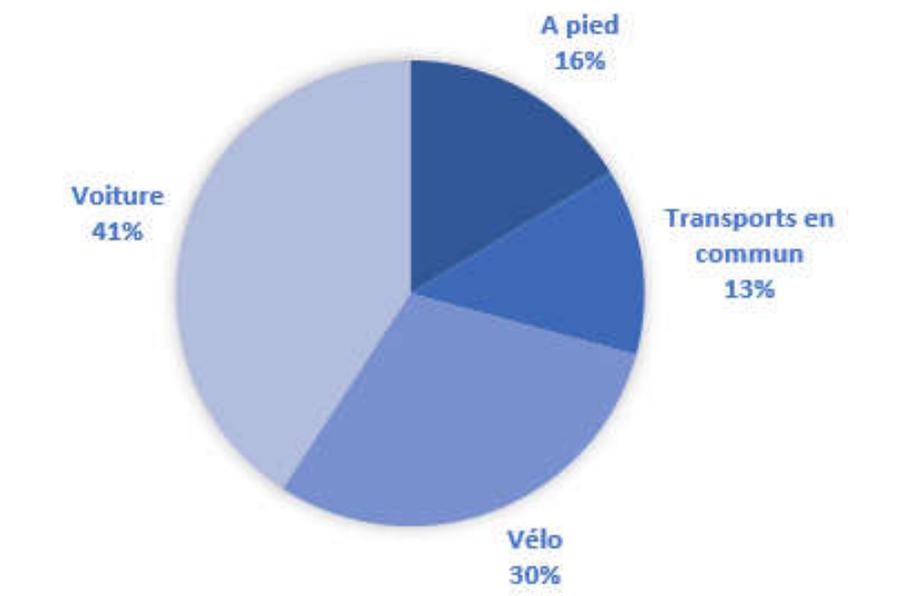


Figure 9 : Modes de transport principaux déclarés par les répondants (utilisateurs collectifs – questionnaire A)



Figure 10 : Modes de transport secondaires déclarés par les répondants (utilisateurs collectifs – questionnaire A)

4.1.3 La qualité de l'air comme problème collectif

Les politiques et techniques de recrutement mentionnées par les porteurs de projets visent à élargir le cercle des participants au-delà des militances écologiques ou technophiles. Au vu des réponses au questionnaire, les participants aux campagnes citoyennes de mesure n'ont en majorité - pour 81% d'entre eux - pas de liens professionnels ou personnels (associatifs) avec la qualité de l'air ou la santé, ni contribué à d'autres initiatives de recherche-action.

Parmi les 19% de personnes ayant répondu « oui » à cette question, 26 indiquent des activités le plus souvent associatives ou militantes et ensuite professionnelles

(fonctions publiques ou entrepreneurs) ainsi que plus rarement des activités de médiation en ligne (blogs, encyclopédie).

Par ailleurs, les répondants ont majoritairement (73%) déclaré ne pas avoir contribué à d'autres projets citoyens et ou de recherche participative.

Parmi les personnes ayant répondu « oui » à cette question, les répondants ont librement désignés des associations autour de l'observation naturaliste (Lichens Go, Sauvages de ma rue, Orchisauvage, Faune France, Bird Lab, Phenoclim), de l'énergie (énergie partagée, enercoop), d'actions écologiques (Clean walk, disco soupe) mais également de projets technophiles liés au monde du logiciel libre (openfoodfacts, wifi en réseau mesh) ou de la science p2p¹⁷ (PlantNet, BirdNet).

Pour ce public non-professionnel dans les domaines de la santé ou de l'environnement, la préoccupation pour la pollution de l'air est massive et constitue une prise pour motiver la participation à ce type de campagnes de mesures par systèmes capteurs.

Cette préoccupation généralisée au problème de la pollution de l'air auprès des répondants avec 97% de réponses affirmatives s'observe également dans le grand nombre de réponses (tous les répondants à l'exception de sept d'entre eux) à la question concernant la recherche d'information sur la pollution.

Dans le cadre de l'état de l'art au sujet des premières études des campagnes de mesures citoyennes de qualité de l'air publié par l'Ademe en 2017 (Ademe, 2017), il a été établi que les premiers signes d'engagement pour agir en faveur d'une meilleure qualité de l'air étaient de commencer à s'informer et chercher à savoir en quoi consiste la pollution atmosphérique ou la pollution de l'air intérieur. Il est avéré, en effet, que le sentiment d'impuissance et de frustration des individus ne parvenant pas à localiser la source de pollution pouvait mener à un désengagement vis-à-vis de l'amélioration de la qualité de l'air (Kim et Paulos, 2010). A tel point que dans le champ libre du questionnaire, l'un des répondants a livré une vingtaine de références bibliographiques sur la thématique de la pollution, assorties de cette interpellation :

« Pour info la littérature est abondante sur le sujet et on continue à subventionner des combustions solides qui utilisent du ramonage chimique. Ci dessous qq documents... »

Les autres réponses à la question « Comment vous informez-vous sur la pollution ? » réfèrent aux différents AASQA et plus rarement mention est faite des réseaux sociaux, forums de collectif (Respirons mieux dans le 20ème), médias en ligne (Reporterre) ou « l'opendata » et enfin parfois les informations météo ou la télévision nationale et presse quotidienne régionale. Le mobilier urbain et les annonces d'alertes et de pics sont également cités comme information minimale. Certaines applications de systèmes capteurs du commerce font également, pour des très rares cas, office de sources de données sur la qualité de l'air (Plume, AirVisual).

En l'absence d'information, c'est le corps sensible qui fait office de capteur :

« Je ne me renseigne pas trop... je le sens à l'odeur que je respire en allant au travail à vélo (c'est très approximatif;) »

La sensibilisation à l'information est soulignée par certains participants comme dit ici :

« Je ne m'informe pas je fais juste attention et un peu plus depuis l'étude Qalipso »

Mais comme le rapporte un participant, le lien entre information et connaissance reste à établir.

¹⁷ La science dite "peer to peer" renvoie aux initiatives de mutualisation de capacités de calcul, de traitement et d'analyse par le biais du réseau Internet

« *Entendre quel est le niveau d'exposition n'apporte guère d'information s'il n'y a pas de pédagogie. L'expérimentation in situ m'a ouvert les yeux... »*

Ce verbatim laisse à penser que **la participation aux campagnes de mesures citoyennes ouvre à un savoir qui suscite par ailleurs de l'appétence comme les réponses à la question sur l'intérêt du projet le confirment.**

Parmi les réponses libres, c'est le trajet de l'information reçue au savoir produit qui est particulièrement mis en avant. L'intérêt de la grammaire des motifs plaidée par Wright Mills (Wright Mills, 1940) ou Dany Trom (Trom, 2001) pour accéder à la compréhension des engagements participatifs permet de documenter un champ lexical associant :

- L'action de « mesurer » (47 occurrences) :
« *Le fait de pouvoir effectuer soi-même les mesures. »*
- L'objectif de « connaître » (18 occurrences) :
« *Je tire des feux d'artifices et je voulais connaître l'impact que cela génère. »*
- Le goût de la participation (14 occurrences) :
« *De participer à un projet collectif sur ce sujet, de pouvoir constater en temps réel la qualité de l'air et de pouvoir expérimenter différents paramètres.»*
- La « curiosité » (6 occurrences) :
« *J'ai été curieuse de savoir la qualité de l'air qu'on pouvait respirer. »*
- La « vérification » (4 occurrences) :
« *La vérité des données, participative et démocratique dans le sens d'une vérification par le citoyen, similaire au dépouillement d'un vote électoral, en réel. »*
- L'activité de tester (7 occurrences) :
« *Tester en réel la qualité de l'air. »*

Une analyse des réponses amène à concevoir une dialectique louable entre l'individuel et le collectif lorsqu'il s'agit d'être acteur de la connaissance de la qualité de l'air, à la fois pour soi mais aussi pour les autres. **Se situer au centre de la mesure en tant qu'individu et citoyen, mesurer pour soi au plan de son exposition individuelle et pour les autres par des actions collectives telles que les balades ou la mise en commun des données comme le proposent les initiatives questionnées introduit à mettre en place, au côté des indices de la qualité de l'air, la notion de « mesure située ».** L'introduction d'un « nouvel espace de calcul » a été problématisée dans la pragmatique des transformations des sociologues Francis Chateauraynaud et Josquin Debaz (Chateauraynaud et Debaz, 2017) à propos des controverses environnementales récentes et vient rendre compte d'un « métrologie toujours sociale » tant dans ses unités de mesure, dispositifs, acteurs, institutions, normes, seuils etc. L'ouverture d'un nouvel espace de calcul tel que la « mesure située » dans les actions citoyennes en faveur de la qualité de l'air démontre qu'il est vain dans les humanités environnementales d'« opposer des attachements particuliers, vulnérables, à des mécanismes globaux, inéluctables et qu'il importe d'identifier comment les prises de l'expérience au cœur des milieux ouvrent aux acteurs de nouveaux espaces de possibles. » (Chateauraynaud et Debaz, 2017). L'exposition individuelle renvoie pour les professionnels des AASQA à une mesure de proximité mais du point de vue de l'expérience des individus, **il s'agit bien plutôt d'une « mesure située » qui s'identifie au lieu où l'on vit et où l'on respire, une mesure qui peut être aussi annotée et commentée, une mesure « subjectivée » (Allard, 2015).** Ainsi mesurer la qualité de l'air inhalé via des systèmes de micro-capteurs par les individus en intérieur et en extérieur, ou des habitants d'une zone d'habitation dans le

cadre de campagne citoyenne peut contribuer à procurer une « prise » collective sur un problème de santé publique et environnementale dont les issues supposent des engagements multi-acteurs.

4.1.4 Le motif de la santé (soi, les siens)

La motivation pour la participation à ces initiatives relève d'abord du sensible comme le documente l'état de l'art réalisé par l'Ademe au sujet des mesures individuelles d'exposition, citant par exemple Kelly *et al.* (2015) (d'après Ademe, 2017) :

« Dans le cas où la donnée de qualité de l'air extérieur n'est pas mesurée par l'individu, ce dernier aura tendance à se fier en priorité à sa perception de la qualité de l'air plutôt qu'à une donnée objective pour prendre la décision d'agir. »

De fait, la première rencontre avec la pollution relève de la perception de son environnement et engage donc l'individu au plan de ses sens. Cette entrée dans la prise de conscience de la pollution par les sens, par sa propre perception est aussi rapportée par le sociologue Stéphane Labranche en juillet 2017 lors d'un entretien individuel au sujet de son suivi de l'expérimentation Mobicit'Air :

« Pour certains participants, les capteurs c'étaient eux, notamment les personnes souffrant de la pollution (asthme...) »

Le périmètre de l'information de la qualité de l'air semble devoir se situer à l'échelle sensorielle des individus et le système capteur est parfois identifié à la prolongation des organes des sens. Cette perception individuelle de la pollution est d'autant plus vitale qu'elle est corrélée à des préoccupations de santé. Et c'est ce qui explique pourquoi dans la gamme des changements individuels proactifs repérés par l'état de l'art (Ademe, 2017), la préservation et l'amélioration de la santé sont les principales sources de motivation et se matérialisent concrètement par des reports d'activités de loisirs comme en témoigne un utilisateur d'Ambasad'Air" (Ademe, 2017) qui associe sa pratique de footing aux conditions du climat et de la pollution en ville :

« Je pense que je ferai moins de footing quand il fait hyper chaud en ville. »

Parmi les motifs de la participation aux campagnes à saisir dans les formulations mêmes des participants, la santé est placée au centre de la préoccupation des répondants lorsque leur a été posée la question « Diriez-vous que la pollution de l'air a un impact sur votre santé ou celle de vos proches ? » avec 79% de réponses affirmatives.

Les exemples cités par les répondants à cette question de l'impact concernent la santé, notamment celles des enfants (20 occurrences) et des proches, avec des impacts suspectés (« cancer ») ou subis (allergie et asthme) :

« La santé de mes proches, mon fils est asthmatique, ma fille allergique. »

« Odeur, charge psychologique, menaces de cancer, etc. »

Au-delà de soi et des siens, c'est aussi l'avenir et le climat qui sont au cœur des préoccupations :

« Réchauffement de la planète, ce que nous allons laisser à nos enfants. »

« L'avenir de notre planète. »

Le souci pour les enfants et leur avenir sur une planète endommagée notamment par la pollution est liée également au fort taux de familles présentes parmi les répondants avec 99% d'entre eux qui ont un ou plusieurs enfants (cf. figure 11).

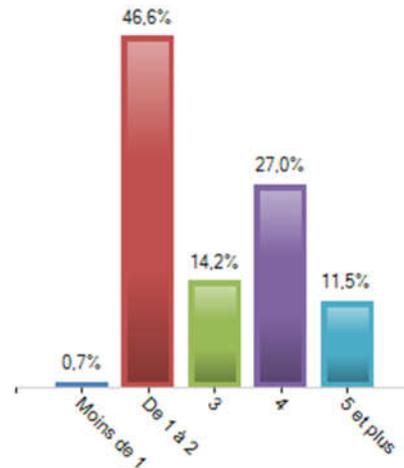


Figure11 : Nombre d'enfants déclarés par les répondants (utilisateurs collectifs – questionnaire A)

De façon plus précise encore, les réponses dans la question 32 bis « Diriez-vous que la pollution de l'air a un impact sur votre santé ou celle de vos proches? » détaillent les impacts sur la santé occasionnés, selon les participants, par la mauvaise qualité de l'air. Cent dix participants ont **témoigné personnellement des impacts directs et concrets de la pollution sur leur santé ou celle de leur proche, le plus souvent leurs enfants. Outre les allergies (20), les problèmes respiratoires en général (36) dont l'asthme (22), les bronchiolites, les rhinites en particulier (6 occurrences) et maux de gorge (4), et maux de tête (5) et conjonctivites (1) achèvent de dresser le tableau clinique de répondants et de leurs familles directement impactés par la pollution de l'air.** Tous les organes semblent affectés jusqu'aux cheveux et l'inquiétude ne cesse de grandir face à des causes invisibles

« C'est un impact insidieux, invisible et à long terme qu'il sera peut-être difficile de relier à la pollution de l'air si un jour nous avons des problèmes. »

« On en est littéralement malades, malades !! »

4.1.5 Le motif de la technophilie

Parmi les profils esquissés à grand trait lors des recrutements de certaines campagnes, la technophilie est souvent citée dans les rapports ou les entretiens menés aux côtés des sportifs/cyclistes (Atmo Aura, 2017) :

« Les technophiles : c'est la donnée, le fait de la produire, de la mettre à disposition qui les intéresse. Pour eux, la donnée est un objet réel, quasi vivant qu'il faut partager. La pollution apparaît comme secondaire et ils auraient pu participer à d'autres expérimentations avec un haut apport de technologies. Les sportifs/cyclistes : ils sont les plus aptes à tenter de changer de comportements. C'est la santé et dans le cas des sportifs de bon niveau, la performance qui les intéresse. »

« Sur Ambasad'Air, la première saison, on a recruté des gens déjà engagés, sur l'air, le bruit, etc. Ils seraient venus, c'est leur quartier. Il y a aussi les environnementalistes. Des cyclistes car c'est un choix de déplacement. On a eu des gens ingénieurs, tantôt du numérique, « geek », de maker, open data : trouver une application dans leur quartier. »¹⁸

Ce profil « technophile » semble plus remarquable parmi les répondants au questionnaire proposé aux personnes ayant acheté ou fabriqué leur système capteur (utilisateurs individuels – questionnaire B), dont les caractéristiques sociodémographiques se démarquent quelque peu avec une totalité d'hommes, plus jeunes pour un tiers (37% entre 29 et 43 ans) que les participants aux campagnes de mesures citoyennes (utilisateurs collectifs – questionnaire A).

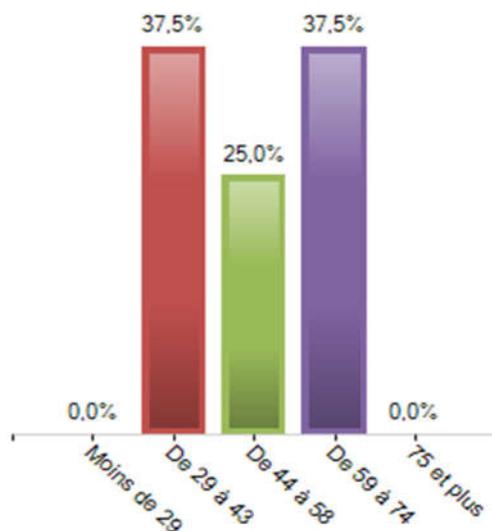


Figure 11 : Age des utilisateurs individuels de systèmes capteurs (utilisateurs individuels - questionnaire B)

En termes de niveau de diplôme et niveau de revenus, exerçant d'abord dans le monde de l'ingénierie, du management ou de l'éducation, les utilisateurs individuels répondent plus encore aux caractéristiques de catégories socio-professionnelles supérieures (CSP+) que le public des campagnes de mesure citoyenne (utilisateurs collectifs). A l'inverse de ce dernier, ils constituent un groupe semi-professionnel en ce qui concerne les sujets de la qualité de l'air et/ou des systèmes capteurs avec ce docteur ingénieur en micro-électronique qui déclare utiliser des systèmes capteurs d'air (cf. figure 12) :

« Depuis 20 ans dans mon domaine professionnel, mais comme utilisateur uniquement depuis 2 mois. »

Ou cet enseignant en biologie animateur de la communauté francophone de Sensor Community :

« Je m'intéresse depuis longtemps à la visualisation de données et aux données libres. J'avais réalisé quelques visualisations pour des médias. En outre, je m'intéresse à la programmation des microcontrôleurs ».

¹⁸ Entretien avec Jacques Le Letty, op.cité.

Certains ingénieurs professionnels déploient sur leurs temps de loisirs des activités liées à la captation citoyenne de la pollution dans un cadre de recherche participative associant savoirs de métiers et engagement citoyen :

« Intéressé très tôt par les sciences participatives, adolescent, j'ai fabriqué différents objets électroniques dont des capteurs. En 2010, j'ai cofondé le réseau LabFab et des ateliers de montages de capteurs sont réalisés depuis 2015 et servent de prétexte pour diffuser et partager des connaissances sur le numérique et ses nombreuses applications. »

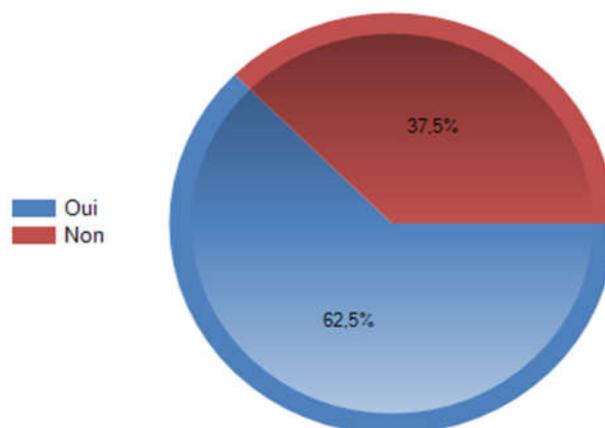


Figure 12 : Présence de liens professionnels ou personnes dans le domaine de la qualité de l'air déclarée par les répondants (utilisateurs individuels – questionnaire B)
De façon attendue, étant donné le profil technophile et ingénieur, les utilisateurs individuels fabriquent leurs systèmes capteurs dans la majorité des cas (75%), objectif d'entrée dans cette activité à la fois d'engagement et connectée à leurs savoir-faire d'ingénieur.

Ce profil « technophile » se démarque également par la maîtrise de l'outil assurant à 100% n'avoir peu ou pas de difficultés dans l'utilisation du système capteur ou la compréhension des données¹⁹, à la différence, sur ce dernier point avec les 88,5 % des participants accompagnés dans la captation lors de campagnes de mesure qui déclarent n'avoir eu aucun problème.

¹⁹ 3 répondants sur 9 déclarent des difficultés ou des doutes concernant le système capteur et 9 répondants sur 9 déclarent aucune mauvaise compréhension concernant les données au sein du groupe des utilisateurs individuels.

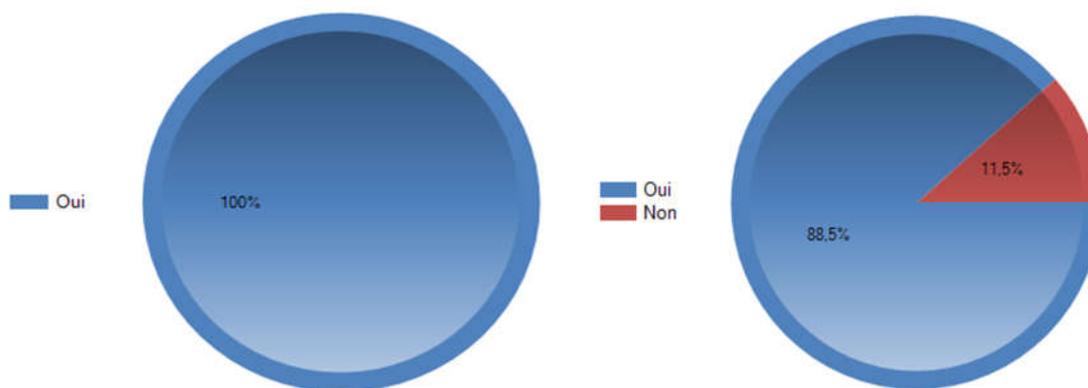


Figure 13 : Réponses à la question « les données vous paraissent elles compréhensibles » par les utilisateurs individuels-questionnaire A (à gauche) et collectifs (à droite) (utilisateurs individuels – questionnaire B)

Les problèmes d'intelligibilité des données peuvent être corrélés comme ci-dessous à « l'absence de vulgarisation » ou la technicité du dispositif pour le public des participants des campagnes de mesure :

« C'est un peu technique, il n'y a pas de référence ou de seuil mises à part les couleurs des points de collecte. »

La spécificité du motif d'engagement « technophile » se distingue également chez les utilisateurs individuels quant au caractère surprenant ou non des données. Non pas qu'il n'existe pas de « surprises » quant aux données dans les groupes questionnés mais les explications données s'avèrent contrastées, plus techniques dans le groupe des utilisateurs individuels, plus personnelles dans le groupe des participants aux campagnes (utilisateurs collectifs). Les premiers ne vont pas, par exemple, décrire leur « surprise » quant à la variabilité typique du système capteur face aux mesures mais chercher à l'expliquer :

« La variabilité des mesures sur les capteurs de particules (PMS7003 et SDS011): variation entre 2 mesures de 50 %, même par conditions identiques. Clairement ça peut venir d'un trop petit nombre d'échantillons dans un volume de mesure très réduit, à l'incertitude de la méthode de mesure par laser, et/ou une trop grande sensibilité aux conditions environnantes (flux d'air ultra-local). »

Les participants des campagnes en tant qu'utilisateurs collectifs vont rapporter cette surprise à leur découverte du phénomène de la pollution notamment de l'air intérieur qui est notifiée une vingtaine de fois parmi les réponses :

« Les sources de pollutions ne sont pas nécessairement celles que j'imaginai (notamment en intérieur). »

« Faire fonctionner la cocotte-minute génère beaucoup de particules » ;

« Les niveaux de pollution n'étaient pas toujours ceux auxquels j'aurai pensé. La pollution due au trafic routier n'était pas aussi importante que celle générée par le chauffage au bois car on pouvait réellement voir les pics de pollution dus au chauffage quand tout le monde rentre chez soi le soir ou au petit matin. Finalement, la pollution du trafic routier ne changeait pas beaucoup, à moins que ces particules là n'étaient pas prises en compte par le capteur ! »

« Lors de la cuisson des aliments le capteur devenait rouge, ainsi que lorsque je mettais du parfum. »

« Je pensais notre appartement épargné car face à une forêt. »

Parmi le public des participants des campagnes (utilisateurs collectifs), certains profils se révèlent également technophiles sous un mode non pas forcément techniciste mais plutôt militant en revendiquant, comme dans ces verbatims sur les recommandations à apporter sur les systèmes capteurs, l'importance d'un dispositif open source et de données brutes...une façon de tenir la promesse des « capteurs citoyens » :

« Une standardisation OPEN-SOURCE et des modèles OPEN-SOURCE de capteurs précis à monter soi-même pour réduire drastiquement les coûts et se former à les perfectionner. »

« Pour une utilisation citoyenne, il faut des données brutes, et ouvertes aux statisticiens et scientifiques du monde civil, puis des données résumées pour des dossiers de presse. En transformant les données pour les simplifier avant de les ouvrir aux pro du civil et du citoyens, vous détruisez la rhétorique, la critique et tout l'intérêt sur l'honnêteté de ce mouvement citoyen. »

Cette comparaison entre les réponses de groupes d'utilisateurs individuels et collectifs semble montrer combien les formes d'engagement saisies dans les verbatims apparaissent non seulement plurielles mais sujettes à de multiples recombinaisons et hybridations notamment en prenant en compte les nouveaux dispositifs de métrologie situés. Comme l'ont remarqué Francis Chateauraynaud et Josquin Debaz (Chateauraynaud et Debaz, 2021), **l'apport des systèmes capteurs est parfois appréhendé comme le prolongement des sens ou comme l'instrumentation d'une nouvelle écologie du sensible, conférant au motif « technophile » une polysémie entre solutionnisme technique et perception augmentée :**

« La multiplication depuis les années 1990 des alternatives métrologiques a donné corps à de nouvelles critiques des technosciences, enfonçant en plusieurs points la ligne de démarcation entre savants et profanes. Sur le terrain, la réflexivité des acteurs les porte à renouer avec une phénoménologie des techniques, dans une sorte de « moment simondonien » mettant en valeur les prises perceptuelles et les mises en variation des mesures par et pour le sensible. On retrouve l'art de la prise, de l'improvisation et du détournement, lié au bricolage comme à l'entretien des instruments. Un continuum se déploie entre les acteurs qui soutiennent une interaction continue avec les dispositifs métrologiques officiels et ceux qui visent une alternative radicale, dans le but de rendre tangibles des phénomènes invisibilisés par les technologies dominantes.»

Ces interactions entre les technologies de la connaissance, entre savoirs experts et profanes, étant au cœur de la démarche de la science participative, nous allons à présent plus avant documenter d'une part, les descriptions des difficultés quant à l'objet technique « système capteur » rencontrées par les participants et d'autre part, les apports en termes de connaissances et d'actions suite aux mesures et données produites de leur fait.

4.2 Valorisations mutuelles : accessibilité du dispositif, pratiques des données et retours sur les usages (habitudes, connaissances, sensibilités)

En plus de dégager des figures de participation aux motifs pluriels et des instrumentations hybrides en matière de qualité de l'air (de l'information à la mesure située), il est nécessaire de compléter l'axe de l'engagement par l'axe de l'expertise allant d'un participant fournisseur de données à un citoyen co-acteur de savoirs transformatifs suivant la synthèse de Florence Millerand (Millerand, 2021) :

« Nous proposons d'interpréter ces figures sur un continuum allant d'une conception des relations entre citoyens et scientifiques basée sur le modèle dit du déficit jusqu'au modèle dit de co-construction des connaissances (Schiele, 2008 ; Stocklmayer, 2013 ; Einsiedel, 2014), schématisé par ces deux axes : l'axe de l'engagement et l'axe de l'expertise et des savoirs. Le premier axe renvoie ici à une définition de l'engagement au sens de mise en capacité et en responsabilité (...) L'axe de l'expertise et des savoirs renvoie quant à lui à la distribution des connaissances entre les acteurs. À une extrémité, on postule l'absence d'expertise scientifique et de savoirs autonomes ou valables chez les citoyens. À l'autre extrémité, on reconnaît certaines formes d'expertises et l'existence de savoirs propres, aptes à contribuer à la réalisation du projet scientifique. Cet axe implique également une hiérarchisation des savoirs en fonction de leur nature. Ainsi l'absence d'expertise chez les citoyens vient avec l'idée que seuls les savoirs formels ou « savants » importent et que ceux-ci restent l'apanage de scientifiques certifiés, tandis que la reconnaissance de savoirs propres et valables des citoyens implique la reconnaissance d'autres registres de connaissance, incluant les savoirs expérientiels ou de terrain. »

Ce cadre d'analyse permet de bâtir le plan de la description des retours d'usage sur les campagnes ou des initiatives individuelles et s'avère d'un grand intérêt afin de saisir les modalités de transmission de savoirs dans les domaines de la qualité de l'air et de la métrologie citoyenne et *in fine* de la *scientific literacy* ainsi développée. Il aide également à documenter la persistance des conduites en matière d'exposition individuelle ou collective à la pollution, qui demeure l'un des points d'interrogation soulevé notamment par Florian Charvolin (Charvolin, 2017) quant à la délicate fidélisation connue dans les sciences participatives que certains porteurs de projets ont pris en compte notamment comme on l'a vu plus haut avec l'initiative Ambassad'Air.

Les résultats nous informent par le menu des principales difficultés rencontrées lors de ces expérimentations et plus généralement des retours sur les usages en termes d'appropriations sociales et coopératives du dispositif tout à la fois du système capteur que des données et leurs interfaçages.

4.2.1 Adoptions du dispositif

En suivant les apports de la sociologie des usages croisée avec une approche sociale des techniques, il apparaît qu'une adoption complète, c'est-à-dire une appropriation achevée d'un dispositif suppose : a) un apprentissage permettant d'acquérir un minimum de maîtrise technique et cognitive (compétence dans l'utilisation) ; b) l'intégration de la technologie à des routines et habitudes de vie (insertion de l'objet dans le quotidien, banalisation) ; c) des usages créatifs (innovation par rapport au mode d'emploi). Ces critères peuvent être envisagés

comme les conditions de réalisation d'un idéaltype dans la trajectoire d'appropriation (Latzko-Thot et Proulx, 2006).

Les réponses concernant les difficultés nous enseignent ainsi sur les freins à l'adoption achevée du système-capteur mais narrent également le bon déroulé de l'expérimentation. Nous détaillerons dans une partie suivante les apports de ces expérimentations et campagnes de mesure mais il importe de souligner que tous les répondants n'ont pas suggéré systématiquement de difficultés comme c'est le cas d'une cinquantaine d'entre eux avec des formules du type « aucune » ou « R.a.s ».

Les difficultés mentionnées peuvent être regroupées en quatre grands groupes :

- **Difficultés matérielles techniques ;**
- **Difficultés de compréhension ;**
- **Difficultés d'emploi du temps ;**
- **Difficultés liées aux circonstances.**

Enfin un groupe plus normatif que descriptif énonce des « difficultés civiques » au sens où il s'agit souvent de déclarations adressées aux politiques publiques de qualité de l'air en général.

Les difficultés matérielles et techniques sont décrites dans une cinquantaine de réponses. Ce sont principalement les problèmes ergonomiques, de stabilité de la transmission, de la compatibilité des smartphones, d'accessibilité pratique aux données :

« Je n'ai pas pris de capteur extérieur car nécessitait android + d'être connecté en permanence (mon téléphone est en mode avion quand je ne l'utilise pas). »

« Quelques problèmes de synchronisation, pas de possibilité de rectifier les commentaires après synchronisation. »

« Mes difficultés ont surtout porté sur le plan technique de connexion du capteur en Bluetooth avec mon téléphone. Temps de mesure limité à 3-5 minutes maximum avant déconnexion. »

« Le dispositif de saisie des données était un peu fastidieux (il fallait sortir une tablette pour indiquer à chaque fois qu'on changeait d'endroit, le faire sur le mobile aurait été bien plus simple. »

Viennent ensuite les difficultés en termes de compétences et de compréhension demandées de la part des participants qui sont moins fréquentes que les dysfonctionnements matériels et techniques. Un autre type de difficulté mentionné concerne le délicat passage à l'action et à la décision individuelle face aux données conduisant non pas à une incompréhension mais à une impuissance :

« Difficulté à tirer des conclusions car en répétant plusieurs fois les mêmes mesures (dans des conditions qui paraissent similaires) on obtient des résultats très différents (mesures d'aération de la chambre...) »

« Le fait de ne pas avoir un retour immédiat (voulu pour ne pas entraîner de changement de comportement). »

« Prendre des décisions suite à cette expérience : je n'ai pas changé ma manière de vivre. »

« Si la pollution de l'air est extérieure, sentiment d'impuissance, inquiétude. »

La thématique de l'indisponibilité et du manque de temps est souvent invoquée dans la mention des difficultés en se trouvant adressée avec regret et envers soi :

« Ce n'est pas toujours facile de prendre le temps pour allumer l'appareil, de l'utiliser tout le temps, de bien suivre les résultats. »

Les contraintes situationnelles sont également notées, en petit nombre, comme les aléas de la météo et de la pandémie de la Covid-19 qui pour certains participants occasionnent des perturbations dans la prise de mesure mais également dans leur mode de vie.

« Le confinement qui a restreint drastiquement mes occasions de mesures. »

« Confinement dû au Covid-19 et donc habitudes de vie modifiées. »

Enfin, un certain nombre de verbatims, que l'on dénombre à une dizaine, peuvent être qualifiés de normatifs au sens où ils présentent des formulations basées sur la grammaire interpellative ou injonctive. Dans ces cas, les participants invoquent non pas des difficultés matérielles ou situationnelles mais bien plutôt organisationnelles ou décisionnelles, mettant en cause plus ou moins explicitement les politiques publiques à l'œuvre dans ces campagnes de mesure citoyennes :

« Aucune difficulté plutôt des frustrations, mesurer les particules fines n'est pas suffisant dans notre territoire, j'aurais aimé mesurer d'autres polluants. »

« Ensuite les industriels sont réticents, car ils ont peur d'être désigné comme responsables de la pollution, et d'avoir de nouvelles normes qui viendraient les contraindre dans leur métier. »

4.2.2 Accès, valorisation et publication des données

La génération de données de qualité de l'air par des habitants dans le cadre de campagnes institutionnelles demande à être interrogée au plan de leur accès, de leur valorisation et **publicisation**.

En ce qui concerne l'accès aux données, elle est proposée à la majorité des participants (93%), lors de la production des données (80%) et/ou *a posteriori* (20%). Différents problèmes techniques rapportés par les participants, mais également une difficulté cognitive signalée dans certains cas pouvant donner lieu à un constat d'impuissance.

Les verbatims cités suggèrent d'établir un focus au sujet des usages des données du point de vue d'une appropriation sociale des mesures générées dans le cadre de ces campagnes participatives. Inspirée notamment par Serge Proulx (Proulx, 2012), la sociologie des usages des technologies de communication a centré son intérêt de recherche sur les usages sociaux des objets techniques en complémentarité avec l'approche sociale des objets techniques de la théorie de la traduction de Akrich *et al.* (2006). Les travaux de Serge Proulx s'attachent notamment aux "braconnages" mis en avant par le philosophe Michel de Certeau (De Certeau, 1980) pour redonner une place à la réappropriation créative des usagers dans la réception des informations.

Cette dimension attentive au travail de la production de sens qui est accomplie par les usagers d'objets techniques ou médiatiques au cœur de ces approches sociologiques d'usages et de discours sur les objets techniques, constitue un univers de références qui ont en commun de s'attacher plus à l'appropriabilité sociale suivant une logique d'usager actif plutôt qu'à l'acceptabilité individuelle d'un individu instrumenté. Ce sont donc les formes d'appropriabilités sociales de la mesure de pollution captée sur leur terrain de vie quotidienne par des habitants-citoyens qu'il est intéressant de rapporter.

4.2.2.1 La comparaison ou la donnée parlée : montée en généralité des expériences et connaissances situées

L'une des formes d'appropriation sociale possible peut être la comparaison. Comparer des expériences, des situations, des habitudes de vie à partir de la mesure de qualité de l'air rend possible de déployer une approche conversationnelle de la donnée, de « parler » avec et sur les données dans le cadre d'un dialogue citoyen (Allard, 2015). Cette forme d'appropriation dialogique semble permettre à la fois la confiance dans l'outil, la consolidation d'un savoir situé et la montée en civilité des participants. La mesure individuelle comparée au travers d'échanges conviviaux éclaire un collectif tout entier et sensibilise à des situations non partagées.

A la question, « avez-vous comparé vos données avec celles d'autres participants ? », les réponses font état d'un partage de pratiques sur la mise en commun des données et sur le non usage de cette possibilité, qui est pourtant favorisé par certaines campagnes (cf. figure 12). En effet, lorsque l'on interroge à quelles occasions, la mise en comparaison des données entre utilisateurs a été effectuée, la moitié des répondants renvoient aux réunions publiques des projets, avant les échanges avec les proches puis les réseaux sociaux (cf. figure 13).

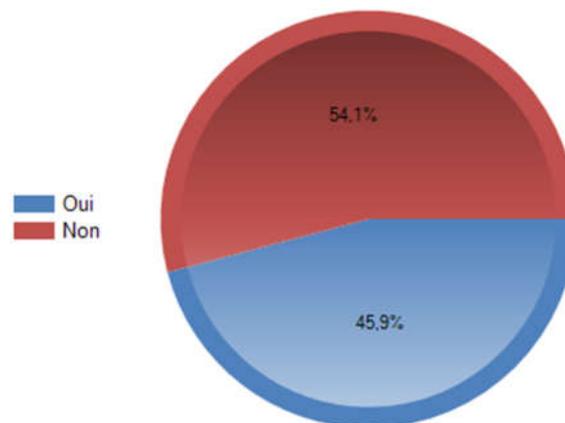


Figure12 : Réponses à la question « avez-vous comparé vos données avec celles d'autres participants ? » (utilisateurs collectifs – questionnaire A)



Figure 13 : Réponses à la question "à quelles occasions avez-vous comparé vos données ?" (Utilisateurs collectifs - questionnaire A)

Les enseignements d'un usage dialogique des mesures des systèmes capteurs peuvent être répartis en différents types. Le premier enseignement s'attache au système capteur, il s'agit de s'assurer et de se rassurer sur la concordance des résultats et in fine de la fiabilité de son propre outillage :

« Que les mini-capteurs indiquaient tous les mêmes variations bien qu'ils puissent varier un peu en termes de niveau et que l'écart type me semble convenir à un usage fiable et acceptable sans atteindre le niveau des mesures scientifiques requises par les cahiers de charges adressés à AirParif »

« Les conclusions ont été à peu près les mêmes pour tout le monde, même dans des endroits variés »

« Nos résultats étaient concordants, nos capteurs individuels étaient bien paramétrés »

« Que mes mesures étaient comparables aux autres. Et aussi j'ai pu éviter d'en faire certaines car d'autres s'en étaient chargés ! »

Le deuxième renvoie les utilisateurs à leur propre confirmation ou infirmation de préconception quant à « leur » qualité de l'air » du fait de la montée en connaissance sur l'échelon individuel et sur l'échelon collectif et redéfinit le capteur comme dispositif empathique, de prise de conscience de certaines inégalités environnementales :

« On a pris connaissance du niveau de pollution de notre rue. »

« Je n'étais pas la seule à découvrir les points qui me surprenaient. »

« Au niveau de PM, nous sommes assez égaux n'importe où nous habitons et où nos enfants vont à l'école. »

« Beaucoup de données très intéressantes sur les mesures des autres participants, en particulier l'emplacement des mesures (centre de Lyon, campagne, déplacement,...) »

« Les habitants proches des grands axes routiers sont très impactés par la pollution. »

« Je n'avais pas de capteurs intérieurs et j'ai pris conscience de la formation de poche de CO₂ intérieur au cours des réunions de restitution avec les autres participants. »

4.2.2.2 Appropriation scientifique délicate : la non-comparaison avec les données des AASQA et ses enseignements

La très grande majorité des répondants (89%) a indiqué ne pas avoir comparé ses données de mesures avec celles des AASQA.

L'analyse du petit nombre de réponses au sujet de la comparaison entre mesures des systèmes-capteurs et données des AASQA peut informer quant au transfert ou non de connaissances et de montée en compétence. **A l'examen, les verbatims mettent en avant pour la plupart, la possibilité de comparabilité et de convergence dans les tendances :**

« Comparables avec évidemment la possibilité de mesures plus fines en termes d'espace avec les micro capteurs »)

Ou encore certains verbatims se focalisent sur la complémentarité des mesures et des données :

« Certaines sources, comme le chauffage au bois, peuvent avoir des effets locaux non négligeables, invisibles sur les données de Atmo-AuRA qui ne proviennent que de peu de points de mesure. »

Et parfois mettent en doute leur bien-fondé :

« Que les micro-capteurs sont relativement fiables. Ils ne peuvent pas être la source unique d'information de la population, mais ils sont extrêmement utiles pour alerter des changements drastiques des conditions de pollution de l'air. »

A noter que les profils sociodémographiques cités sont majoritairement ceux de scientifiques (ingénieurs, enseignants) à l'exception de trois d'entre eux, ce qui reste un résultat en soi.

4.2.2.3 L'appropriation par la co-élaboration

Une autre modalité d'appropriation dialogique rencontrée dans nos résultats, en plus des comparaisons entre mesures de systèmes-capteurs lors de rencontres publiques, consiste à favoriser la co-élaboration du dispositif, tant au plan du système capteur que de l'interface de visualisation de données.

En ce qui concerne le capteur, plusieurs éléments sont commentés dans une voie mélioriste par des utilisateurs coopératifs, certains d'entre eux s'avérant soit satisfaits, soit non compétents pour proposer des améliorations :

« Pour ma part j'ai trouvé que cet objet de mesure était déjà perfectionné et abordable pour monsieur tout le monde, pas de suggestion. »

« Je n'ai pas de compétences dans ce domaine pour formuler une opinion. »

Il semble, premièrement, que le principe même de « micro » soit mis en question au plan de son utilisabilité avec des retours prospectifs éclairants énoncés par les utilisateurs :

« Peut-être qu'il soit plus petit, léger et relativement peu cher afin que les citoyens participent de leur côté à mesurer la qualité de l'air et alerter les autorités compétentes comme Airparif par exemple »

« Ce serait bien qu'il se charge plus rapidement et que l'on sache clairement quand il est déchargé et ne peut pas être utilisé (témoin de charge). »

- « Les LEDs²⁰ empêchent l'utilisation dans la chambre la nuit. »
- « Plus compacte pour une utilisation sportive. »
- « S'il est possible de réduire le "bruit" de la ventilation, ça serait un plus. »
- « Intégration dans le quotidien, voiture, ceinture, vélo, sac à main... »

En deuxième point, ce sont les polluants mesurés qui sont appelés à être diversifiés :

- « On rêve toujours d'avoir davantage de mesures (ozone par exemple). »
- « En distinguant mieux les polluants. »
- « Il aurait été intéressant d'avoir des données sur les COV (composés organiques volatiles) pour tout ce qui est pollution intérieure. »
- « Des micro-capteurs pour NO₂, ce serait top ! »

Le troisième point évoqué concerne la connectivité du capteur et la transmission de données avec des solutions proposées volontiers par certains profils technophiles :

- « Au niveau du démarrage et de la connexion avec l'application. Il faut aussi avoir un téléphone avec Android ce qui est limitatif. »
- « Les données pourraient être transportées automatiquement via un réseau de type IOT/LPWAN (sigfox, Lora ou autres) et directement transcrites sur une carte afin d'être accessible sans délai via un site Internet »
- « Associer le capteur à une montre avec GPS afin de ne pas avoir recours à un téléphone portable et à un forfait. »

Quatrième point, la fiabilité du système-capteur est parfois mise en cause :

- « Il lui manque la nature du composant. Des particules de vapeur d'eau sont vu comme des particules, sauf qu'elles ne sont pas nocives. Donc une mauvaise interprétation peut rapidement être constatée. »
- « La mesure de l'hygrométrie n'est pas fiable. »
- « On n'a aucune information sur la qualité des mesures, par exemple, les mesures de PM_{2,5} ou PM₁ sont-elles sûres ? »

Enfin, c'est sa politique utilisateur même qui est mise en avant dans ce verbatim militant :

- « Il DOIT ETRE 100% CONCEPTION CITOYENNE, 100% MONTAGE CITOYEN, 100% OPEN-SOURCE dans les pilotes et l'OS, Linux. Il doit être sur une base arduino/alternative, et tout process être open-source sur le traitement a posteriori par des équipes pro'. Prendre le citoyen pour un débile est le premier choix vers une obsolescence partisane. Un capteur coute moins de 10euro à produire en usine, il doit couter 30euros maximum pour la même qualité à produire en citoyen ! »

Quant à l'interface, ce sont les problématiques d'intelligibilité, de documentation et de stabilité qui sont interrogées par les participants.

D'une part, c'est le caractère d'accessibilité de l'interface qui est pointé en termes de compréhension des données mais également de fonctionnalités manquantes qui rendaient plus intelligibles la visualisation des données :

- « Par une interface plus pédagogique. »
- « Possibilité de corriger les commentaires après intégration ; la saisie des détails en cours de test n'est pas très intuitive. »

²⁰ Diodes électroluminescentes

« Couplage avec des applications sportives (me déplaçant en vélo) pour mise en commun des données. »

« Zoom plus facile sur les graphiques de données. »

« Faciliter des comparaisons entre mesures aux mêmes heures, mêmes conditions. »

« Bip d'alarmes si dépassement et possibilités de mettre un mot expliquant la raison du dépassement (par exemple : feu de cheminée visible, trafic saturé, réalisation du ménage, du repas...) »

« Suggestion automatique pour comparer nos mesures avec d'autres personnes (coordonnées GPS, titre, tag etc.). »

« On devrait pouvoir mettre intérieur et extérieur simultanément pour une mesure donnée (ça m'est souvent arrivé de faire des mesures qui étaient à l'intérieur et à l'extérieur...). »

Enfin, les qualités de stabilité de l'interface, c'est-à-dire avec peu ou sans latence dans la transmission et la persistance des données, sont ainsi mentionnées :

« OUI ! Trop d'instabilité logicielle lors des mesures, plantage de l'application qui ne mesure plus rien et se stoppe. Obligation de redémarrer l'association entre le capteur et le téléphone. »

« Le site doit être accessible à tout moment, et on doit pouvoir choisir entre voir juste nos données ou voir nos données + celles des autres (qui ont partagé) + celle de la mairie, des scientifiques, etc. »

« Elle a tendance à planter lorsque l'on enchaîne les mesures et une fois sorti de l'application, la géolocalisation n'est pas désactivée, si on a dû l'activer pour faire les mesures. »

« Pouvoir accélérer la liaison entre le micro-capteur et son téléphone en bluetooth et surtout la capacité centre d'enregistrement des données qui pouvait saturer si trop de données envoyées en fin de journée par les participants. »

En dernier recours, des demandes sont formulées à l'égard de la documentation et de la langue même dans laquelle des supports et des informations complémentaires peuvent être mis à disposition :

« Un bon FAQ et les échanges sur les forums (ah si en fait j'ai lu des choses sur ces forums) peuvent faire l'affaire. »

« Un lien vers des articles, des études scientifiques ou sur la santé. »

« La langue à utiliser, le français. »

4.3 Sensibiliser, mobiliser, persister : une co-évaluation sans fin par les participants

Au terme de cette étude, les résultats concernant les apports de la participation à des campagnes de mesures de pollution ainsi que les perspectives de continuation et recommandation viennent contribuer à délimiter plus fermement non plus seulement le registre des motifs d'engagement, mais le travail de signification qu'opère la contribution à la science citoyenne en proposant de nouveaux cadres d'interprétation de l'expérience vécue de la

pollution (Cefai, 2007). De nouveaux cadres d'intelligibilité qui se matérialisent et s'incarnent dans des conduites réflexives ou modifiés ainsi que par des équipements renouvelés.

4.3.1 Savoirs et savoir-faire de la qualité de l'air : de la sensibilisation à l'action

L'apport du projet est majoritairement exprimé en termes de connaissances acquises ou confortées, de sensibilisation aux sources de pollution et aux artefacts techniques de mesure. Pour certains répondants, une forme d'action d'intérêt général et de source de connaissance consiste à participer à une recherche scientifique. Vient ensuite le passage à l'action permettant de coupler expérimentation, sensibilisation et connaissance. Enfin, il y a l'affirmation sceptique minoritaire déniait tout intérêt en termes de savoirs et d'actions à ces expérimentations.

L'horizon de sensibilisation est souvent mis en avant par les porteurs de projets de campagnes de mesures citoyennes, comme par exemple dans le rapport au sujet de « BBClean » (Atmo-Aura, 2019) :

« Le projet BBClean mené sur le territoire de la CCPMB²¹ dans le cadre d'un contexte européen, a pour principaux objectifs l'harmonisation des politiques à faible émission de carbone et la sensibilisation des citoyens à une utilisation durable de la biomasse pour la production du chauffage domestique. »

Les participants vont également user de ce terme pour désigner leur apport (4 occurrences) :

« Une curiosité sur l'air en général et surtout un projet famille et une sensibilisation. »

« Une véritable sensibilisation à la pollution aux particules fines provenant de sources extérieures. »

Mais l'occurrence la plus présente dans le corpus des verbatims à la question de l'apport du projet auquel les répondants ont participé est le terme « connaissance » (42) portant d'abord sur le fait « pollution » (42 occurrences) et ensuite sur les « micro-capteurs » (6) :

« Connaissances nouvelles sur le phénomène de la qualité de l'air, des niveaux et de la variation de l'exposition. »

« Connaissance des capteurs, et des tailles de particules polluantes »

« Une meilleure connaissance des sources de pollutions intérieures et une meilleure sensibilité aux problèmes de brulage des végétaux en "campagne" »

L'apport de connaissances en tout genre sur la qualité de l'air et de sa mesure outille une série de processus cognitifs décrits en termes de compréhension, évaluation et objectivation.

« Une meilleure compréhension des capteurs et de ce qu'ils pouvaient capter, une confirmation de la pollution liée aux voitures, aux feux et barbecues, et de large diffusion de la pollution avec les masses d'airs. Par exemple que certains croient mieux respirer en montagne, ce qui est plus compliqué que ça. »

« Il m'a permis d'objectiver un ressenti. J'ai toutefois été surprise des faibles valeurs mesurées »

Du point de vue de l'objectivation concrétisée par les mesures produites, pour certains c'est un rapport à la vérité du fait « pollution » qui se joue :

²¹ Communauté de communes Pays du Mont-Blanc

« Des vérités. Suivant la météo, les coteaux sont souvent aussi pollués que le fond de vallée. Le vent diminue cette présence de particules. L'intérieur est très pollué et le temps pour revenir à la normal est très long, même en aérant. »

« Me rendre compte par moi-même de la réalité du phénomène en fonction des lieux, du temps... »

« Des données et informations "brutes" => pas des "on dit" => je peux en faire mon propre avis. »

Ce rapport à la vérité est surligné par les déclarations relevant de l'intérêt général pour le projet se démarquant d'un simple apport individuel de connaissance. L'apport de connaissance s'effectue donc à un plan de contribution plus collectif voire abstrait avec les figures de la citoyenneté et de la science qui se trouvent mobilisées :

« Connaissances sur les avancées scientifiques et technologiques, ainsi que des limitations actuelles. »

« Opportunité de contribuer à faire avancer l'état de l'art sur ces questions. »

« La satisfaction d'avoir participé à une démarche citoyenne dans un but scientifique. »

« Découvrir ce concept de micro climat de pollution. »

La sensibilisation à la qualité de l'air avant de conduire à une forme de connaissance acquise dans le cadre de ces expérimentations peut être associée à un premier état d'agir qualifiée de « prise de conscience » (17 occurrences) dans les réponses au questionnaire :

« J'ai beaucoup plus conscience de cette pollution. »

« Prise de conscience que l'air des appartements n'est pas forcément très sain. il faut aérer régulièrement. »

« Plus de connaissances, une prise de conscience, des contacts, un changement de certaines habitudes. »

Le passage à l'action suite à cet apport de connaissances, permettant de prendre conscience, comprendre et analyser la qualité de l'air respiré peut prendre des formes plurielles au plan des modes de déplacements et des modes d'habiter. Ces passages à l'action visent d'abord la réduction des expositions mais aussi également les émissions de polluants dans l'air intérieur ou extérieur :

« Meilleure connaissance de la pollution intérieure, et observations intéressantes sur la dispersion des polluants, qui me permettent d'avoir quelques éléments de réponse aux questions du genre 'en cas de pollution, vaut-il mieux que je passe par une rue plus calme'. »

« Une validation des bons gestes et les situations à éviter. »

« Mise en alerte pour éviter certains parcours. »

Une dernière catégorie de verbatims peut être regroupée sous l'appellation « d'apports critiques », soit qu'ils formulent des ratés dans l'expérimentation ou en pointent les limites comme politiques publiques. Ils sont plus rares mais intéressants à faire ressortir en tant que contre-évaluation par les utilisateurs :

« La joie de voir que notre environnement est pollué et qu'aérer multiplie par deux au moins les PM. »

« Pas grand-chose pour être honnête. C'était intéressant de manipuler l'appareil mais il n'en est pas ressorti grand-chose. »

Lorsqu'est explicitement posée la question d'un changement dans la manière d'appréhender la pollution à l'issue de l'expérimentation, les réponses sont affirmatives dans la majorité des cas (62%).

Au plan qualitatif, l'évolution de l'appréhension du problème de la mauvaise qualité de l'air, ce ne sont plus seulement des apports en termes de connaissances qui sont décrits mais également des exemples de changement dans les déplacements et les habitations, comment habiter mais également où habiter.

Les pratiques d'aération sont citées le plus souvent (12 occurrences), conséquence de la sensibilisation, prise de conscience et accroissement des connaissances sur ce terrain de la pollution de l'air intérieur. Cette forme de pollution se révèle être une découverte ou une confirmation pour de nombreux participants.

Des gestes ou des habitudes se trouvent réinventés en matière de cuisson, de chauffage, de sommeil, de ménage etc. :

« Sur le fait d'aérer ou non mon logement notamment lorsque mon asthme est instable »

« Meilleure aération de mon logement (séjour quand nous sommes plusieurs) et meilleure aération de la cuisine surtout quand on frit à la poêle »

« Choisir par exemple les petites rues à Paris où il y a moins de densité de circulation, quand je descends à pied une rue, je choisis le trottoir du sens de descente des véhicules parce qu'on a observé que dans l'autre sens les voitures polluent plus, puisqu'ils font une accélération pour arpenter la pente, d'éviter de trop m'attarder sur un feu de stop s'il y a trop de circulation. »

« J'ai commencé à m'équiper en micro-capteurs. »

Le changement est parfois plus radical avec des déménagements envisagés ou des renoncements à certains véhicules ou habitudes parfois avec regrets.

« J'ai changé de véhicule, et je suis passé du diesel à l'essence pour limiter l'émission des particules. Je limite l'utilisation de la cheminée, et je démarre le feu en l'allumant par le haut, solution que je ne connaissais pas. »

« Je dors la porte de ma chambre à coucher ouverte... :-/ »

« Plus d'encens à la maison, haha. »

« Ce qui me gêne c'est qu'après avoir fait ce genre de mesures on a tendance à dire qu'il ne faut plus faire de feux de bois dans des cheminées. Pourtant c'est bien plaisant... »

Les actions ne s'enchaînent pas nécessairement et se conjuguent souvent au futur tels des projets qui succèdent aux expérimentations manifestant d'une prise de conscience performative, qui fait agir sur son milieu de vie mais également sur soi :

« Maintenant j'informe chiffres à l'appui et fort de l'expérience aussi auprès de ceux qui continuent de brûler des végétaux malgré les interdictions. »

« J'aère plus, je suis plus conscient de ce que je respire, j'essaie de ne plus prendre le métro. J'envisage sérieusement de quitter Paris. »

« Ouiiiiii ! J'évite de descendre dans la vallée faire mes courses à certains moments plus pollués, je choisis des randonnées plus au-dessus de la mer de nuages... Je vais faire installer un nouveau poêle à bois chez moi. »

« En plus, cela a déterminé mon choix par rapport à la hauteur à laquelle on voudrait habiter pour échapper le plus que possible au nuage de pollution. »

Et parfois la principale action consistera à s'informer et agir en fonction des mesures de qualité de l'air ainsi qu'à dé-routiniser des habitudes par une attention décrite comme nouvelle. Des occurrences liées au soin à porter à son environnement quotidien et gestes de tous les jours sont également repérables autour de la locution « faire ou prêter attention à » :

« Plus serein. »

« On fait attention à plusieurs choses, on regarde sur la 3 le soir (journal télévisé) les résultats des analyses de l'air. »

« Je suis plus attentive à chacun de mes gestes pour éviter de générer de la pollution (cuisine, utilisation du véhicule ou utilisation épisodique d'un poêle à bois). »

« Plus sensibilisé et essaye de sensibiliser les autres (comme leur dire de couper le moteur de la voiture quand ils attendent les enfants à la sortie de l'école. »

A l'inverse, lorsqu'il s'agit de rendre compte d'un constat de non-changement, c'est le plus majoritairement par connaissance du fait « pollution » (l'adjectif « déjà » marque cet état d'informations, de préoccupations ou d'agissements préexistants avec 14 occurrences) :

« J'avais déjà lu et réfléchi à ce sujet. »

« Je suis déjà familier avec les cartes de pollution. »

« Parce que j'essaie déjà de faire attention à mes émissions (moins de voiture, privilégier le train...). »

On peut encore lire un « mode critique » qui renvoie le problème à la politique publique en vertu d'un sentiment d'impuissance individuelle :

« On vit dans un milieu de plus en plus pollué, dans un trafic automobile de plus en plus dense... on n'a pas d'autre choix. »

« Parce que je sais que moi seule je ne peux rien faire. Bien que j'utilise les transports en commun et le vélo. »

« On fait trop de psychologie pas assez de protections des populations. »

« Lorsque votre enfant est hospitalisé à 2 ans et qu'il se retrouve avec d'autres camarades de son quartier et qu'on vous dit c'est les particules fines, la pollution...Mais on ne peut rien faire, on ne peut rien dire... »

Au terme de ce paragraphe, il peut être utile de rappeler comment, du registre motivationnel lié au souci de sa santé, la sienne et celle de ses proches, l'apport expérientiel de ces campagnes consiste en la transformation en terrain sensible personnel ou collectif, des individus malades ou des citoyens inquiets, en un terrain sensibilisé et un public informé qui peut se déclarer attentionné à l'égard de son terrain de vie. Une « écologie de l'attention » se trouve étayée par les dispositifs de métrologie citoyenne qui tangibilisent et visibilisent particules et polluants, objectivent et mesurent des ressentis subjectifs autour de données à comparer et à partager, étalonnent de bonnes pratiques de vie à populariser auprès de soi.

4.3.2 Persistances

S'il existe cependant des propositions se déclinant sur plusieurs années telles qu'*Ambassadair*, *BBClean*, *CheckBox*, *Mesurons la pollution*, les observateurs des sciences

participatives ont pointé la non persistance des publics et des projets comme l'un des écueils de ces expérimentations (Charvolin, 2019). Pour conclure l'analyse des résultats de l'enquête par questionnaire sur le profil des « citoyens capteurs » deux questions abordant la problématique de l'avenir de ces projets ont été posées en termes de continuation des mesures de qualité de l'air à l'aide de système capteur et leur recommandation.

Une grande majorité de répondants souhaitent poursuivre les mesures avec 83% de réponses positives.

Les réponses positives à la poursuite des mesures se trouvent distribuées suivant cinq principes de justification dont le premier est la participation à un projet de recherche scientifique à étendre dans le temps, la variété, le volume des mesures :

« Participer à un réseau international de remontée de l'état de l'air. »
« Cela fait partie de l'éducation citoyenne et du développement de la science participative. On peut prendre la température, mesurer la pluviométrie et avoir un baromètre mais dès qu'il s'agit de l'air on est limité à un indice qualitatif issu d'un algorithme et d'un modèle ce qui ne reflète absolument pas ce qui est vécu personnellement. »

« Ces données pourraient alimenter une base de données de type big data. »

Affiner dans le temps et l'espace sa propre connaissance de la pollution constitue le deuxième type de justification notamment en raison soit des problèmes techniques, d'indisponibilités qui ont rendu la participation au projet plus complexe ou pour cibler des mesures sur telle ou telle pratique :

« Pour continuer à connaître mon exposition. »

« La mesure des feux d'artifices m'intéresse toujours mais pour l'instant pas possible. »

« J'aimerais pouvoir mesurer les COV dans ma maison qui est en travaux (utilisation de peinture, colle etc.) »

« Le capteur de sensor community donne aussi la température, la pression et l'humidité, et c'est intéressant de tout comparer. »

« Pouvoir trouver de l'info quand j'en ai besoin. »

« Pour constater une amélioration. »

Les mesures restent donc à poursuivre pour la recherche et la science, pour soi par curiosité ou nécessité, mais également pour agir au plan de la collectivité :

« Il faut s'approprier ces mesures, les rendre publiques pour sensibiliser le plus grand nombre. » « Permettre d'identifier géographiquement les zones sources pour établir la cause... puis agir. »

« Je soutien ce genre d'initiatives ou on fait participer la population sur les enjeux de santé lié à d'industrie. »

La non-poursuite des mesures est quant à elle moins développée (36 sur 151) et, le cas échéant, rapportée à des manques de disponibilités personnelles, un manque de compétences, ou faisant suite à une mauvaise expérience technique ou matérielle du dispositif et du protocole, ou, comme déjà mentionné, en argumentant de l'impuissance des citoyens dont le pouvoir d'agir instrumenté par une technique puissante, ne peut rien contre l'immobilisme politique ou l'irréversible changement climatique :

« Car je ne vois pas concrètement comment ces mesures peuvent avoir une incidence sur les décisions politiques locales en faveur de la qualité de l'air. »

« J'ai peur d'en avoir fait le tour au niveau personnel, mais si une stratégie plus générale était mise en place et que l'on ait besoin d'expérimentateurs, je serai intéressé. »

« L'intérêt principal du projet résidait pour moi plutôt dans sa dimension communautaire/participative. Les mesures en elles-mêmes ne représentaient que peu d'intérêt à mon sens, car incomplètes (un seul indice) et sans protocole précis. »

L'analyse quantitative et qualitative des possibles recommandations d'utilisation des systèmes capteurs à des proches permet de redoubler ces perspectives à la fois individuelles et collectives. Une majorité de répondants, 83% souhaitent recommander à des proches ces dispositifs de captation.

Dans le geste de recommandation à autrui est compris un partage de la connaissance et une puissance d'agir. Et c'est à autrui, famille, voisin, habitant, scientifique, politique que les répondants adressent la pertinence du dispositif micro-capteur :

« Pour qu'ils puissent se rendre compte de la qualité de l'air dans leur entourage et qu'ils abandonnent par exemple les moteurs diesel en ville (inutile, polluant et cher à l'entretien) qu'ils changent leur système de chauffage aussi. »

« S'ils ressentent quelques problèmes de santé tels des sinusites, de l'asthme, etc., je leur recommanderais de mesurer l'air dans lequel ils passent le plus clair de leur temps. »

« Très bonne façon de participer à l'amélioration des conditions de vie et de préserver sa santé et la nature. »

« Pour avoir une vision la plus complète possible ! »

5 Conclusions

Au terme de ce rapport, il convient de rappeler que très peu d'informations concernant les profils et motivations des utilisateurs individuels de systèmes capteurs ont été collectées dans le cadre de cette étude. Les principaux enseignements issus à la fois de la synthèse des entretiens et des questionnaires sont synthétisés ci-dessous.

1. La santé comme motif premier de participation

Parmi les motifs de la participation aux campagnes à saisir dans les formulations mêmes des participants, la santé est placée au centre de la préoccupation des répondants lorsque leur a été posée la question « La pollution de l'air est-elle une source de préoccupation pour vous ? » avec 79% de réponses affirmatives.

Leurs préoccupations concernent la santé, notamment celles des enfants et des proches avec des impacts supposés (« cancer ») ou vécus (allergie et asthme), mais également plus largement la bonne santé de la planète.

A noter que le public des participants à des mesures citoyennes de pollution est majoritairement constitué de non-professionnels dans les domaines de la santé ou de l'environnement.

2. La mesure accompagnée, gage de réussite des projets

Il apparaît, parmi les projets étudiés, tant pour les participants que pour les porteurs de projets, que l'accompagnement - qui ne se résume pas à un protocole - dans la formation, la maintenance, la prise des mesures et l'intelligibilité des mesures générées par les systèmes capteurs est primordial. Le caractère collectif des campagnes citoyennes notamment les réunions publiques de mise en commun des expériences constitue un apport précieux signalé dans les questionnaires et entretiens.

Les participants à des campagnes citoyennes rendent compte de difficultés tant liées au matériel (système capteur), qu'à la compréhension des mesures ainsi à des « difficultés civiques » au sens où il s'agit souvent de déclarations adressées aux politiques publiques de qualité de l'air en général ou un sentiment d'impuissance face au problème de la pollution qui ne relève pas seulement de l'exposition ou de l'émission individuelle. Industriels et lobbys sont alors cités comme un frein majeur dans la quête d'un air non vicié.

3. Des profils sociodémographiques attendus et inattendus

La trajectoire « métier-diplôme » nous livre un portrait hautement qualifié des participants avec près de la moitié des répondants de niveau bac+5 de diplôme et travaillant dans les domaines de l'ingénierie.

Le profil « technophile » est encore plus remarquable parmi les utilisateurs individuels ayant fabriqué leur système-capteur.

Cependant, la présence de profils ouvriers et techniciens s'engageant dans les campagnes est notable. Ces profils renvoient par ailleurs à des engagements dans des associations de cyclistes s'interrogeant sur la qualité de l'air ou en relation avec leur préoccupation pour la santé.

Il faut enfin mentionner l'existence de reclassements autour des métiers dits de la transition, tels un diplômé bac+8 en SHS qui exerce comme vélociste et s'intéresse à la qualité de son environnement de vie.

4. Un apport décisif en termes de connaissances sur la pollution et les bonnes pratiques

A la question d'un changement dans la manière d'appréhender la pollution, les réponses sont majoritairement affirmatives avec 62,3% de « oui », avec pour beaucoup la « découverte » de la mauvaise qualité de l'air intérieur et l'impact du chauffage au bois, dont l'imaginaire social est positif mais les effets néfastes sur la qualité de l'air.

L'apport du projet s'exprime majoritairement en termes de connaissances acquises ou consolidées en matière de composition de la pollution et des techniques de mesure. Un apport qui est également collectif et d'intérêt général par la forme de recherche participative proposée par la campagne. Apprendre pour soi, des autres et pour toutes et tous semble résumer les bénéfices d'une campagne de mesures citoyennes.

Les campagnes de mesures citoyennes ou les fabrications individuelles de systèmes-capteurs rendent possible la transformation d'un terrain sensibilisé constitué de personnes malades ou de citoyens inquiets en un public informé et plus encore attentionné à l'égard de son milieu de vie. Une « écologie de l'attention » se trouve configurée par les dispositifs de métrologie citoyenne qui objectivent des ressentis subjectifs autour de mesures communes et peut développer l'empathie envers les inégalités environnementales.

5. Une volonté de poursuivre les mesures et les actions

Une grande majorité de répondants souhaitent poursuivre les mesures avec 83,1% de réponses positives à la fois à des fins de recherche scientifique, pour approfondir ses connaissances ou entretenir une curiosité mais également pour développer autour de soi de bonnes pratiques au plan de la santé personnelle et publique.

Les passages à l'action enclenchés par l'apport de connaissances des mesures de systèmes-capteurs, permettant de prendre conscience et de comprendre le phénomène de la qualité de l'air (intérieur et extérieur), vont concerner en priorité les modes de déplacements et les façons d'habiter. Des bonnes pratiques sont expérimentées lors des campagnes de mesure en termes de réduction des expositions et les émissions de polluants qui peuvent donner lieu à des modifications d'équipements ou d'habitudes mais également des changements de lieux de vie ou des renoncements en toute connaissance de cause. De la bonne pratique d'aération au déménagement loin d'une ville ou d'une vallée polluée en passant par la reprise du vélo ou l'abandon à regret du feu de cheminée,

Les actions se conjuguent parfois également au futur...d'un projet participatif à un projet de vie en somme...

Date de validation du rapport d'expertise collective par le groupe de travail : 10 mars 2022.

6 Bibliographie

- Agence d'Innovation Comportementale. (2019). Chauffage au bois et pollution aux particules en Île-de-France. Rapport de diagnostic. 43 p.
- ADEME. (2017). Etude des liens entre données individuelles de la qualité de l'air, changements de comportement et mises en œuvre de pratiques favorables à l'air. 102p.
- AKRICH M., CALLON M., LATOUR M. (2006). Sociologie de la traduction, Paris, Presses des Mines, 401 p. DOI : 10.4000/books.pressesmines.1181
- ALLARD L. (2015). L'engagement du chercheur à l'heure de la fabrication numérique personnelle. Hermès, La Revue 2015/3 (n° 73).
- ALLARD L., MONNIN A., NOVA N. (2022). Ecologies du smartphone, Lormont, Ed. Le Bord de l'Eau. 216 p.
- ATMO-AURA. (2017). Mobicit'Air.Lot 2 : Expérimentation d'une démarche de participation citoyenne 2015 – 2017. 50 p.
- ATMO-AURA. (2019). Bilan de l'expérimentation citoyenne de mesure de qualité de l'air à l'aide de micro-capteurs lors de l'hiver 2019 sur le territoire de la CCPMB. 72 p.
- BECKER H. S. (1960). Notes on the Concept of Commitment ». American Journal of Sociology, n°66, pp.32-40 (traduit en français « Sur le concept d'engagement », SociologieS, Découvertes / Redécouvertes, mis en ligne le 22 octobre 2006).
- BŒUF G., ALLAIN Y-M., BOUVIER M. (2012). L'apport des sciences participatives à la connaissance de la biodiversité en France. La Lettre de l'OCIM n°144.
- PROULX S., BRETON P. (2012). L'explosion de la communication : Introduction aux théories et aux pratiques de la communication, Paris, La Découverte. 384 p.
- BRISBOIS X., RAVEAU D., RUBENS L., LE CONTE J. (2020). Rapport d'étude. Suivi de l'expérimentation "Respirons mieux dans le 20eme". 96 p.
- BRUN P. (2017). Le croisement des savoirs dans les recherches participatives. Questions épistémologiques. Vie sociale, 2017/4 (n° 20).
- BUYTAERT W., ZULKAFLI Z., GRAINGER S., ACOSTA L., TILASHWORK C. A., BASTIAENSEN J., DE BIEVRE B., BHUSAL J., CLARK J., DEWULF A., FOGGIN M., HANNAH D. M., HERGARTEN C., ISAEVA A., KARPOUZOGLOU T., PANDEYA B., PAUDEL D., SHARMA K., STEENHUIS T., TILAHUN S., VAN HECKEN G., ZHUMANOVA M. (2014). Citizen science in hydrology and water resources: opportunities for knowledge generation, ecosystem service management, and sustainable development », Frontiers in Earth Science, 2, 26.
- CEFAÏ D. (2007). Pourquoi se mobilise-t-on ? Les théories de l'action collective. Paris, La Découverte. 727 p.
- TROM D., CEFAÏ D. 2001. Grammaire de la mobilisation et vocabulaires de motifs. Raisons pratiques 12. Les formes de l'action collective. EHESS. 328 p.
- CHATEAURAYNAUD F., DEBAZ J. (2022). Alternatives météorologiques. La critique des solutions numériques et la fabrique de prises collectives. Dans ALLARD L., MONNIN A., NOVA N. (2022). Ecologies du smartphone, Lormont, Ed. Le Bord de l'Eau.
- CHARVOLIN F., MICOUD A., NYHART L. (2007). Des sciences citoyennes ? La question de l'amateur dans les sciences naturalistes, La Tour d'Aigues, Éditions de l'Aube. Dans Revue d'anthropologie des connaissances 2009/3, Vol. 3 (3) : 550-553.

- CHARVOLIN F., FRIOUX S., KAMOUN L., MELARD F., ROUSSEL I. (2015). Un air familial ? socio-histoire de la pollution atmosphérique, Paris, Presses de l'École des Mines. 238 p. DOI : 10.4000/books.pressamines.1871.
- CHARVOLIN F. (2019). Les sciences participatives au secours de la biodiversité. Une approche sociologique, Paris, Rue d'Ulm, coll. « Sciences durables ». 76 p.
- COLLET I. (2019). Les oubliées du numérique, Paris, Le Passeur éditeur. 224 p.
- COMBY J-B. (2015). À propos de la dépossession écologique des classes populaires. *Savoir/Agir*, n°33 : 23-30.
- CENTEMERI L., BORJA J-S., GAUDIN A. (2016). Politiques d'adaptation au changement climatique et injustices environnementales. Le pluralisme des relations à l'environnement dans la mise en forme de la contrainte adaptative. HAL-01388939, 23 p.
- DEWEY J. (1927). *Le public et ses problèmes*, Paris, Gallimard, 2010.
- DIAS DA SILVA P., HEATON L., MILLERAND F. (2017). Une revue de littérature sur la science citoyenne : la production de connaissances naturalistes à l'ère numérique. *Natures Sciences Sociétés*, Vol. 25 : 370-380.
- EINSIEDEL E. (2014). Publics and their Participation in Science and Technology: Changing Roles, Blurring Boundaries. In Massimiano Bucchi, Brian Trench (dir.), *Routledge Handbook of Public Communication of Science and Technology*, Londres-New York, Routledge. 15 p.
- HAKLAY M. (2015). Citizen science and policy: A European perspective, The Woodrow Wilson Center/Commons Lab. 76 p.
- HOULLIER F., MERILHOU-GOUDARD J-B. (2016). Les sciences participatives en France. État des lieux, bonnes pratiques et recommandations, Ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. 124 p.
- JUAN M. (2021). Les recherches participatives à l'épreuve du politique. *Sociologie travail*, Vol. 63 -n° 1.
- IRWIN A. (1995). *Citizen Science: A Study of People, Expertise and Sustainable Development*, London-New York, Routledge. 212 p.
- LABRANCHE S., CHARLES L. 2012. Étude d'acceptabilité sociale de la ZAPA de l'agglomération grenobloise : synthèse des principaux résultats. *Pollution Atmosphérique*, no. Spécial : 227-231.
- LABRANCHE S. 2016. Étude sociologique sur la pollution due au chauffage au bois dans l'agglomération grenobloise : synthèse des principaux résultats. *Pollution atmosphérique*, n°228 : 1-12.
- LABRANCHE S. (2017). Étude sociologique sur la pollution due au chauffage au bois dans l'agglomération grenobloise : synthèse des principaux résultats. *Pollution atmosphérique* n°228.
- LATZKO-THOT G. PROULX S. (2015). Appropriation des technologies. In *Sciences, technologies et sociétés de A à Z*, Presses de l'Université de Montréal. 264 p. DOI : 10.4000/books.pum.4240
- LEIGH S., GRIESEMER J. (1989). Institutional ecology, 'Translations', and Boundary objects: amateurs and professionals on Berkeley's museum of vertebrate zoologie, *Social Studies of Science*. *Social Studies of Science*, vol. 19(3): 387-420.
- MICHELIN L. 2019a. Rapport d'analyse sociologique de l'expérience BB-CLEAN. *MyUsages*. 223 p.

- MICHELIN L. (2020). « Questionnaire évaluatif de l'expérience BB-CLEAN 1 an après », MyUsages. 24 p.
- MILLERAND F. (2021). La participation citoyenne dans les sciences participatives : formes et figures d'engagement. *Études de communication* n°56 : 21-38.
- PESTRE D. (2014). Du gouvernement du progrès technique et de ses effets. Le gouvernement des technosciences. *Gouverner le progrès et ses dégâts depuis 1945*, Paris, La Découverte. 300 p.
- SILVEIRA P., STRASSER B. (2017) Expertise and Experience. The Dynamics of the Participant Population in the Citizen Sciences, Lausanne, Unige.
- SCHIELE B., CHENG D., CLAESSENS M., GASCOIGNE N. R. J., METCALFE J., SCHIELE B., SHI S. (2008). On and about the Deficit Model in an Age of Free Flow. *Communicating Science in Social Contexts*. pp. 93-117.
- STOCKLMAYER S., GILBERT J. (2013). *Engagement with Science: Models of Science Communication*. *Communication and engagement with science and technology: Issues and dilemmas*, London-New York, Routledge. 352 p.
- KIM S., PAULO E. (2010). InAir: Sharing Indoor Air Quality Measurements and Visualizations », CHI '10 Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Atlanta, USA.
- WRIGHT MILLS C. (1940). Situated Actions and Vocabularies of Motive” in *American Sociological Review*, Vol. 5(6): 904-913.
- ZASK J. (2012). *Participer. Essai sur les formes démocratiques de la participation*, Lormont, Ed Le Bord de l'Eau. 200 p.
- ZASK J., CASILLO I., BARBIER R., BLONDIAUX L., CHATEAURAYNAUD F., FOURNIAU J-M., LEFEBVRE R., NEVEU C., SALES D. (2013). Pragmatisme et participation. *Dictionnaire critique et interdisciplinaire de la participation*, Paris, GIS Démocratie et Participation.

ANNEXES

Annexe 1 : Lettre de saisine

2018 -SA- 0 2 7 1

COURRIER ARRIVE
21 DEC. 2018
DIRECTION GENERALEMINISTÈRE DES SOLIDARITÉS
ET DE LA SANTÉ

Direction générale de la santé

MINISTÈRE DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE

Direction générale de l'énergie et du climat

Direction générale de la prévention des risques

Paris, le 18 DEC. 2018

Le Directeur général de la santé

Le Directeur général de l'énergie et du climat

Le Directeur général de la prévention des risques

à

**Monsieur le Directeur général
de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de
l'alimentation, de l'environnement et du
travail (Anses)**14 rue Pierre et Marie Curie
94701 Maisons-Alfort cedex

N° 229.

Objet : Etat des connaissances sur l'utilisation de micro-capteurs par des citoyens pour le suivi de la qualité de l'air extérieur et de l'air intérieur.

Le développement de micro-capteurs pour le suivi de la qualité de l'air extérieur et intérieur connaît une expansion rapide ces dernières années. Il s'agit de dispositifs à coût réduit, portatifs ou facilement transportables et connectés, qui offrent de multiples champs d'application : connaissance de l'exposition individuelle, recherche, multiplication des points de mesure, information rapide du public, sensibilisation et éducation à la problématique de la qualité de l'air, etc. Ils sont utilisés par un public de plus en plus large : des acteurs institutionnels impliqués dans la surveillance de la qualité de l'air (Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air AASQA, Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air LCSQA, etc.), des organismes de recherche, des collectivités, des citoyens ou des associations de citoyens.

L'utilisation de ces micro-capteurs pose plusieurs questions, dont celles de leur fiabilité météorologique, de la gestion, de l'exploitation et de l'interprétation des données, et *in fine* de leur pertinence pour répondre à des problématiques de qualité de l'air. En France et à l'international, de nombreux projets scientifiques et initiatives citoyennes ont été engagés récemment sur le sujet impliquant par exemples des universités et laboratoires de recherche, des agglomérations ou communauté d'agglomérations ou encore des collectifs de citoyens. Ces études ont des objectifs variés : amélioration de la connaissance de la qualité de l'air, étude des changements de comportements induits par la connaissance de l'exposition individuelle, développement de la contribution du citoyen à la surveillance de la qualité de l'air, utilisation des données individuelles à des fins d'évaluation de risques sanitaires.

Des travaux de recensement des technologies existantes et des opportunités offertes ont été conduits ou sont en cours tant au niveau national, qu'eupéen ou international. Par exemple, la Commission Européenne a diffusé une plaquette d'information sur les différents types de micro-capteurs et les informations qu'ils peuvent fournir, le programme GAW (Global Atmospheric Watch porté par le WMO) va très prochainement publier une note pour guider les choix des utilisateurs de micro-capteurs en fonction du type de mesures qu'ils souhaitent mettre en œuvre. En parallèle, des travaux d'évaluation métrologique de ces micro-capteurs sont également menés par des organismes en charge de la surveillance de la qualité de l'air tels que l'Agence de protection de l'environnement des Etats-Unis (US EPA) ou au niveau européen par le Joint Research Centre (JRC). De même, un cahier des charges pour l'évaluation de ce type d'outils est en cours d'élaboration dans le cadre du Comité Européen de Normalisation (CEN). En France, le LCSQA a lancé début 2018 le premier essai national d'aptitude sur le terrain de micro-capteurs de gaz et de particules pour la mesure de la qualité de l'air ambiant, compte tenu de l'absence de cadre normatif national ou européen permettant de comparer les performances de ces différents appareils commercialisés aux appareils de mesures de référence. Pour finir, l'ADEME a lancé une étude sur l'utilisation des micro-capteurs en lien avec le changement de comportement et le CSTB engage en partenariat avec l'INERIS un travail d'élaboration d'un protocole d'évaluation des capteurs innovants à bas coûts destinés au grand public.

Compte tenu du développement rapide de ces outils et de la génération massive de données à grande échelle, nous souhaiterions pouvoir disposer d'éléments d'informations concernant notamment la pertinence, la validité et l'utilisation des données générées par des micro-capteurs utilisés dans des environnements extérieur et intérieur, en vue de caractériser l'exposition de populations, en particulier lorsque ces outils sont utilisés par un public non expérimenté pour la mesure de la qualité de l'air.

Dans ce contexte, un état des lieux des travaux mettant en œuvre des micro-capteurs au niveau national, européen et international afin de recenser les objectifs alloués à ces études et le cadre d'application de ces technologies doit être mené en faisant appel en tant que de besoin aux autres établissements publics disposant de données, notamment sur la métrologie des capteurs. L'analyse contribuera également à lister les technologies disponibles, leur validité métrologique lorsque celle-ci aura été évaluée, le contexte dans lequel elles sont mises en œuvre (objectifs suivis, polluants visés, design d'étude, etc.), ainsi que les opportunités et les limites de leur utilisation.

Il vous est ensuite demandé une évaluation de la validité des données générées par des micro-capteurs dans le cadre d'utilisations citoyennes à des fins de caractérisation de l'exposition. L'objectif de cette deuxième étape sera de dresser une liste de points clefs ou de préconisations à associer à la réalisation de mesures et la constitution de données par les micro-capteurs dans un objectif d'évaluation des expositions. Elle englobera la question de l'appareil de mesure et des outils informatiques associés pour la gestion des données massives. Cette étude pourra intégrer par exemple des paramètres liés à l'instrumentation (robustesse des données, performance du micro-capteur, connectivité, gestion des données massives, etc.), aux comportements de l'utilisateur (conditions d'utilisation des micro-capteurs, gestion et usages des données générées, etc.) et aux besoins de couplage pour l'interprétation des données (budget espace-temps, géolocalisation, conditions climatiques etc.). Enfin, vous fournirez à la puissance publique des éléments permettant de mettre en perspective les données générées par les micro-capteurs dans le cadre d'utilisations citoyennes avec les données obtenues par des capteurs classiques (par exemple par des industriels ou autres acteurs dans un objectif de surveillance de la qualité de l'air).

Vous associerez notamment à vos travaux le LCSQA, les AASQA, l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris), l'ADEME, le CSTB et l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI).

Nous vous remercions de bien vouloir nous indiquer, dans les meilleurs délais, les modalités de réponse à cette saisine dont le délai de traitement attendu est de 1 an.



Le Directeur général
de la santé



Le Directeur général de
l'énergie et du climat



Le Directeur général de la
prévention des risques

Copie : LSCQA, AASQA, Ineris, ADEME, CSTB, OQAI

Annexe 3 : Questionnaire A : profils et motivations des utilisateurs collectifs de systèmes capteurs

Microcapteur et qualité de l'air



L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) mène actuellement une expertise collective relative à l'utilisation de micro-capteurs par des citoyens pour le suivi de la qualité de l'air. Un groupe de travail a été mis en place afin de 1) réaliser un état des lieux des travaux mettant en œuvre des micro-capteurs au niveau national et international ; 2) d'évaluer l'intérêt et les limites des données générées par les micro-capteurs dans le cadre d'utilisations citoyennes dans un objectif de santé publique.

L'objectif de ce questionnaire est de connaître les citoyens qui participent à des projets de mesure de la qualité de l'air. Les répondants sont également invités à témoigner sous forme de retour d'expérience de leur participation ainsi qu'à exprimer leurs souhaits et propositions pour d'éventuelles améliorations des projets et outils de mesure de la qualité de l'air.

Traitement et protection des données: L'Anses, représentée par son directeur général, est responsable du traitement de données à caractère personnel. Le délégué à la protection des données est la directrice des affaires juridiques (saisine-daj@anses.fr). Les données sont conservées pour une durée de 12 mois. Conformément aux dispositions du Règlement (UE) 2016/679 relatif à la protection des personnes physiques à l'égard du traitement des données à caractère personnel et à la libre circulation de ces données (RGPD) et de la loi « informatique et libertés » du 6 janvier 1978 modifiée, vous disposez d'un droit d'accès, de rectification, de limitation et dans certains cas d'effacement relatifs aux informations qui vous concernent. Vous pouvez également, pour des motifs légitimes, vous opposer au traitement des données vous concernant. Les informations vous concernant sont transmises de façon anonyme à l'Unité d'Évaluation des Risques liés à l'Air (UERA) de la Direction de l'Évaluation des Risques (DER) de l'Anses. Les données collectées seront analysées et traitées par l'UERA. Les résultats de cette analyse seront présentés de façon agrégée dans un rapport d'expertise qui sera rendu public sur le site internet de l'Anses. Vous pouvez accéder aux informations vous concernant en vous adressant à : microcaptteurs@anses.fr.

La durée moyenne de réponse au questionnaire est de 15 à 20 minutes.

Microcapteur et qualité de l'air



Qui êtes-vous?

Vous êtes:

Un homme

Une femme

Ne souhaite pas répondre

Quel est votre âge?

Avez-vous des enfants?

Oui

Non

Précisez l'âge de chaque enfant (ex: 5, 7 et 10 ans)

De combien de personnes est composé votre foyer?

Microcapteur et qualité de l'air



Quelle est votre situation actuelle?

- Actif
- Chômeur
- Etudiant
- Retraité
- Autre

Précisez:

Quel métier exercez-vous (ou dernier métier exercé)?

Quel est le niveau de revenu de votre foyer?

- Moins de 800 euros par mois
- Entre 800 et 1500 euros par mois
- Entre 1500 et 2500 euros par mois
- Entre 2500 et 4500 euros par mois
- Plus de 4500 euros par mois

Microcapteur et qualité de l'air



Quel est votre niveau de diplôme?

- Brevet des collèges
- CAP, BEP
- Baccalauréat
- Bac + 2 (DEUG, BTS, DUT, DEUST)
- BAC + 3 (licence)
- Bac + 4 (master, maîtrise)
- Bac + 5 (master, DESS, diplôme d'ingénieur ou d'école de commerce)
- Bac + 8 (doctorat)
- Autre

Précisez:

Quelles études avez-vous suivies?

Microcapteur et qualité de l'air

**Vous habitez:**

- Une maison
 Un appartement

Votre appartement/maison est:

- Sur rue
 Sur cour

Quel est votre moyen de chauffage?**Quel est votre code postal?**

Microcapteur et qualité de l'air

**Quel est votre principal mode de déplacement?****Quels sont les autres modes de transport utilisés régulièrement ?**

Microcapteur et qualité de l'air



Votre intérêt pour le projet

Quel est le nom du projet de mesure de la qualité de l'air auquel vous avez participé?

Comment avez-vous découvert ce projet ?

- Contacté(e) par l'équipe du projet
- Bouche à oreille
- Information municipale
- Réseaux sociaux
- Autre

Précisez comment vous avez découvert ce projet:

Microcapteur et qualité de l'air



Qu'est ce qui vous a initialement intéressé dans le projet?

Connaissiez-vous les microcapteurs de qualité de l'air auparavant?

- Oui
- Non

Comment les avez-vous découvert ?

Microcapteur et qualité de l'air



Menez-vous d'autres activités en lien avec la qualité de l'air ou la santé, dans un cadre professionnel ou un cadre privé?

- Oui
- Non

Précisez la ou les activités menées en lien avec la qualité de l'air ou la santé:

Microcapteur et qualité de l'air



Avez-vous déjà participé à des projets citoyens et/ou de recherche participative?

- Oui
- Non

Décrivez le ou les projets:

Microcapteur et qualité de l'air



Comment vous informez-vous sur la pollution de l'air?

Microcapteur et qualité de l'air



La pollution de l'air est-elle une source de préoccupation pour vous?

- Oui
 Non

Précisez ce qui vous préoccupe:

Diriez-vous que la pollution de l'air a un impact sur votre santé ou celle de vos proches?

- Oui
 Non

Précisez comment la pollution impacte votre santé ou celle de vos proches:

Microcapteur et qualité de l'air



Votre expérience du projet

Qu'est ce que ce projet vous a apporté?

Quelles sont les difficultés que vous avez pu rencontrer?

Microcapteur et qualité de l'air



Avez-vous eu accès aux données produites?

- Oui
- Non

Était-ce:

- Lors de la production des données
- A posteriori

Les données produites par le microcapteur vous paraissent-elles compréhensibles?

- Oui
- Non

Précisez ce qui n'est pas compréhensible:

Microcapteur et qualité de l'air



Ces données vous-ont-elles surpris?

- Oui
- Non

Précisez ce qui vous a surpris:

Précisez ce qui ne vous a pas surpris:

Microcapteur et qualité de l'air



Avez-vous comparé vos données avec celles d'autres participants?

- Oui
- Non

A quelle(s) occasion(s)?

- Lors de réunions publiques autour du projet
- Echanges avec les proches (famille, amis, voisins...)
- Sur les réseaux sociaux
- Autre

Précisez à quelle(s) occasion(s) vous avez comparé les données:

Quel(s) enseignement(s) en avez-vous tiré?

Microcapteur et qualité de l'air



Avez-vous comparé vos données avec celles des Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA)?

- Oui
 Non

Quel(s) enseignement(s) en avez-vous tiré?

Microcapteur et qualité de l'air



Selon vous, comment le microcapteur pourrait-il être amélioré?

Selon vous, comment l'interface pourrait-elle être améliorée?

Microcapteur et qualité de l'air



Souhaitez-vous poursuivre ce type de mesures dans un cadre expérimental ou privé?

- Oui
 Non

Précisez pourquoi vous souhaitez poursuivre ce type de mesures:

Précisez pourquoi vous ne souhaitez pas poursuivre ce type de mesures:

Microcapteur et qualité de l'air



Recommanderiez-vous à vos proches d'utiliser des microcapteurs?

- Oui
 Non

Précisez pourquoi vous recommanderiez à vos proches d'utiliser des microcapteurs:

Précisez pourquoi vous ne recommanderiez pas à vos proches d'utiliser des microcapteurs:

Microcapteur et qualité de l'air



Cette expérience a-t-elle changé votre manière d'appréhender la pollution?

- Oui
- Non

Expliquez en quoi votre manière d'appréhender la pollution a évolué:

Expliquez en quoi votre manière d'appréhender la pollution n'a pas évolué:

Annexe 4 : Questionnaire B : profils et motivations des utilisateurs individuels de systèmes capteurs

Microcapteur et qualité de l'air



L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) mène actuellement une expertise collective relative à l'utilisation de micro-capteurs par des citoyens pour le suivi de la qualité de l'air. Un groupe de travail a été mis en place afin de 1) réaliser un état des lieux des travaux mettant en œuvre des micro-capteurs au niveau national et international ; 2) d'évaluer l'intérêt et les limites des données générées par les micro-capteurs dans le cadre d'utilisations citoyennes dans un objectif de santé publique.

L'objectif de ce questionnaire est de connaître les citoyens qui utilisent des microcapteurs pour mesurer la qualité de l'air. Les répondants sont également invités à témoigner sous forme de retour d'expérience ainsi qu'à exprimer leurs souhaits et propositions pour d'éventuelles améliorations des outils de mesure de la qualité de l'air.

Traitement et protection des données: L'Anses, représentée par son directeur général, est responsable du traitement de données à caractère personnel. Le délégué à la protection des données est la directrice des affaires juridiques ([adresse de la DPA](#)). Les données sont conservées pour une durée de 12 mois. Conformément aux dispositions du Règlement (UE) 2016/679 relatif à la protection des personnes physiques à l'égard du traitement des données à caractère personnel et à la libre circulation de ces données (RGPD) et de la loi « informatique et libertés » du 6 janvier 1978 modifiée, vous disposez d'un droit d'accès, de rectification, de limitation et dans certains cas d'effacement relatifs aux informations qui vous concernent. Vous pouvez également, pour des motifs légitimes, vous opposer au traitement des données vous concernant. Les informations vous concernant sont transmises de façon anonyme à l'Unité d'évaluation des Risques liés à l'Air (UERA) de la Direction de l'évaluation des Risques (DER) de l'Anses. Les données collectées seront analysées et traitées par l'UERA. Les résultats de cette analyse seront présentés de façon agrégée dans un rapport d'expertise qui sera rendu public sur le site internet de l'Anses. Vous pouvez accéder aux informations vous concernant en vous adressant à : microcapteurs@anses.fr.

La durée moyenne de réponse au questionnaire est de 15 à 20 minutes.

Microcapteur et qualité de l'air



Qui êtes-vous?

Vous êtes:

Un homme

Une femme

Ne souhaite pas répondre

Quel est votre âge?

Avez-vous des enfants?

Oui

Non

Précisez l'âge de chaque enfant (ex: 5, 7 et 10 ans)

De combien de personnes est composé votre foyer?

Microcapteur et qualité de l'air



Quelle est votre situation actuelle?

- Actif
- Chômeur
- Etudiant
- Retraité
- Autre

Précisez:

Quel métier exercez-vous (ou dernier métier exercé)?

Quel est le niveau de revenu de votre foyer?

- Moins de 800 euros par mois
- Entre 800 et 1500 euros par mois
- Entre 1500 et 2500 euros par mois
- Entre 2500 et 4500 euros par mois
- Plus de 4500 euros par mois

Microcapteur et qualité de l'air



Quel est votre niveau de diplôme?

- Brevet des collèges
- CAP, BEP
- Baccalauréat
- Bac + 2 (DEUG, BTS, DUT, DEUST)
- BAC + 3 (licence)
- Bac + 4 (master, maîtrise)
- Bac + 5 (master, DESS, diplôme d'ingénieur ou d'école de commerce)
- Bac + 8 (doctorat)
- Autre

Précisez:

Quelles études avez-vous suivies?

Microcapteur et qualité de l'air

**Vous habitez:**

- Une maison
- Un appartement

Votre appartement/maison est:

- Sur rue
- Sur cour

Quel est votre moyen de chauffage?**Quel est votre code postal?**

Microcapteur et qualité de l'air

**Quel est votre principal mode de déplacement?****Quels sont les autres modes de transport utilisés régulièrement ?**

Microcapteur et qualité de l'air



Votre intérêt pour le microcapteur

Depuis quand disposez-vous d'un microcapteur?

Racontez-nous comment vous avez découvert les microcapteurs:

Microcapteur et qualité de l'air



Avez-vous fabriqué un microcapteur?

- Oui
 Non

Comment avez-vous fabriqué le microcapteur?

Avez-vous acheté un microcapteur?

- Oui
 Non

Si vous avez acheté un microcapteur, de quelle marque et modèle s'agit-il?

Microcapteur et qualité de l'air



Quels polluants sont mesurés?

Qu'est ce qui vous a initialement intéressé dans le microcapteur?

Microcapteur et qualité de l'air



Menez-vous d'autres activités en lien avec la qualité de l'air ou la santé, dans un cadre professionnel ou un cadre privé?

- Oui
 Non

Précisez la ou les activités menées en lien avec la qualité de l'air ou la santé:

Microcapteur et qualité de l'air



Avez-vous déjà participé à des projets citoyens et/ou de recherche participative?

- Oui
- Non

Décrivez le ou les projets:

Microcapteur et qualité de l'air



Comment vous informez-vous sur la pollution de l'air?

Microcapteur et qualité de l'air



La pollution de l'air est-elle une source de préoccupation pour vous?

- Oui
- Non

Précisez ce qui vous préoccupe:

Diriez-vous que la pollution de l'air a un impact sur votre santé ou celle de vos proches?

- Oui
- Non

Précisez comment la pollution impacte votre santé ou celle de vos proches:

Microcapteur et qualité de l'air



Votre expérience du microcapteur

A quelle fréquence utilisez-vous le microcapteur?

- Tous les jours
- Au moins une fois par semaine
- Au moins une fois par mois
- Moins d'une fois par mois
- Autre

A quelles occasions utilisez-vous le microcapteur?

Microcapteur et qualité de l'air



Où réalisez-vous les mesures en priorité?

Jamais

Très souvent

En intérieur (ex: habitat, lieu de travail)

En extérieur (ex: rue, campagne)

En mobilité (ex: transports en commun, voiture, vélo)

Précisez les lieux de mesure:

Microcapteur et qualité de l'air



Vos pratiques de mesure ont-elles évolué dans le temps?

- Oui
 Non

Précisez comment vos pratiques de mesure ont changé:

Votre intérêt pour le microcapteur a-t-il évolué dans le temps?

- Oui
 Non

Précisez comment votre intérêt a évolué:

Microcapteur et qualité de l'air



Qu'avez-vous appris avec ce microcapteur?

Quelles sont les difficultés que vous avez pu rencontrer?

Microcapteur et qualité de l'air



Les données produites par le microcapteur vous paraissent-elles compréhensibles?

- Oui
 Non

Précisez ce qui n'est pas compréhensible:

Microcapteur et qualité de l'air



Ces données vous-ont-elles surprises?

- Oui
 Non

Précisez ce qui vous a surpris:

Précisez ce qui ne vous a pas surpris:

Microcapteur et qualité de l'air



Avez-vous comparé vos données avec celles d'autres utilisateurs de microcapteurs?

- Oui
 Non

Précisez à quelle(s) occasion(s) vous avez comparé les données:

Quel(s) enseignement(s) en avez-vous tiré?

Microcapteur et qualité de l'air



Avez-vous comparé vos données avec celles des Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA)?

- Oui
 Non

Quel(s) enseignement(s) en avez-vous tiré?

Microcapteur et qualité de l'air



Souhaiteriez-vous que le microcapteur fournisse des données supplémentaires en matière de qualité de l'air?

- Oui
 Non

Précisez le type de données dont vous souhaiteriez bénéficier:

Microcapteur et qualité de l'air



Selon vous, comment le microcapteur pourrait-il être amélioré?

Microcapteur et qualité de l'air



Recommanderiez-vous à vos proches d'utiliser des microcapteurs?

- Oui
 Non

Précisez pourquoi vous recommanderiez à vos proches d'utiliser des microcapteurs:

Précisez pourquoi vous ne recommanderiez pas à vos proches d'utiliser des microcapteurs:

Microcapteur et qualité de l'air



Cette expérience a-t-elle changé votre manière d'appréhender la pollution?

- Oui
- Non

Expliquez en quoi votre manière d'appréhender la pollution a évolué:

Expliquez en quoi votre manière d'appréhender la pollution n'a pas évolué:



anses

CONNAÎTRE, ÉVALUER, PROTÉGER

AGENCE NATIONALE DE SÉCURITÉ SANITAIRE
de l'alimentation, de l'environnement et du travail

14 rue Pierre et Marie Curie 94701 Maisons-Alfort Cedex
Tél : 01 42 76 40 40
www.anses.fr — @Anses_fr