

L'utilisation intégrée des capteurs à faible coût pour améliorer la gestion de la qualité de l'air







Remerciements

Co-auteurs et principaux contributeurs

Meenakshi Kushwaha, ILK Labs, Inde
Sumi Mehta, Vital Strategies, États-Unis
Pooja Arora, The Energy Research Institute, Inde
Timothy Dye, TD Environmental Services
Thomas Matte, Vital Strategies, États-Unis

Évaluateurs externes

Joshua Apte, Université du Texas, États-Unis
Solomon Teffera, SolTeff Environmental Consulting, États-Unis
Sachchida Tripathi, IIT Kanpur, Inde

Les auteurs et les contributeurs de ce guide remercient les acteurs et les partenaires gouvernementaux et de la société civile qui leur ont fourni des informations et des réflexions précieuses au cours d'un échange technique en ligne de deux jours, organisé en décembre 2020. La liste complète des participants à cet événement fait partie des annexes de ce document. Les échanges qui ont eu lieu lors de ces deux jours ont permis de rédiger ce rapport.

La publication de ce document a été rendue possible grâce au soutien financier de Bloomberg Philanthropies.

Vital Strategies. Utilisation intégrée de capteurs à faible coût pour améliorer la gestion de la qualité de l'air. Meenakshi Kushwaha, Sumi Mehta, Pooja Arora, Timothy Dye, Thomas Matte. New York, NY, 2022. Disponible sur : <https://www.vitalstrategies.org/resources/integrated-use-of-low-cost-sensors-to-strengthen-air-quality-management/>

Cet ouvrage est mis à disposition selon les termes de la licence internationale Creative Common AttributionNonCommercial-ShareAlike 4.0. Pour consulter une copie de cette licence, visitez <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> ou envoyez une lettre à Creative Commons, P.O. Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA. Le contenu de ce document peut être utilisé librement conformément à cette licence à condition que le matériel soit accompagné de l'attribution suivante : "Utilisation intégrée de capteurs à faible coût pour améliorer la gestion de la qualité de l'air". New York, NY ; 2022. Copyright ©Vital Strategies



Sommaire

Contexte et aperçu	2	Conception d'un réseau de CFC et placement des capteurs	16
Utiliser des capteurs à faible coût dans le cadre de programmes complets de gestion de la qualité de l'air et de systèmes de surveillance solides et intégrés	3	Pour la localisation	16
Applications possibles des CFC	7	Pour la cartographie de la qualité de l'air	16
Objectifs et conception du projet	8	Pour l'identification des zones de forte pollution	17
		Pour l'évaluation	17
		Autres considérations	18
		Assurance qualité/contrôle qualité	18
Choisir/ Définir les caractéristiques d'un capteur de mesure de la qualité de l'air	9	Pre-installation	18
Les indicateurs de performance	10	Étalonnage / Colocalisation	18
Exactitude et précision	11	La colocalisation pour évaluer la comparabilité des capteurs	18
Corrélation	11	La colocalisation avec un instrument de référence	19
Comparaisons entre différents appareils d'un même modèle	11	La maintenance des capteurs après leur installation	19
Dégradation des performances	11		
Réponse du capteur à de fortes concentrations	13	Références	21
Exhaustivité des données	13		
Effet des paramètres environnementaux	13	Annexe	
Évaluer la performance des CFC : des évaluations en laboratoire et sur le terrain	10	A. Mesurer le biais, l'exactitude et la précision	22
Autres facteurs à prendre en compte lors du processus de sélection des capteurs	13	B. Résumé des conseils pour guider l'élaboration d'une proposition de projet et l'évaluation des propositions d'offres de services	23
Alimentation en électricité	13		
Transmission des données	13		
Étalonnage	14		
Prendre en compte la durée du projet	14		
Choisir les services de données	14		
Gestion des données et accès aux données	14		
Examen des données	14		
Support client	14		
Modèle tarifaire	14		
Logistique	16		
Coût total	16		





Acronymes

BAM	Beta Attenuated Monitor (appareil à atténuation bêta)
CFC	Capteurs à Faible Coût
GQA	Gestion de la Qualité de l'Air
LUR	Land Use regression
PM	Particulate Matter (particules fines)
REQM	Racine de l'Erreur Quadratique Moyenne
RLM	Régression Linéaire Multiple
RLS	Régression Linéaire Simple
QAQC	Quality Assurance and Quality Control (assurance qualité et contrôle qualité)



Contexte et aperçu

En matière de santé environnementale, la pollution de l'air reste le facteur de risque qui est à l'origine du plus grand nombre de décès à l'échelle mondiale, soit près de 5 millions de décès chaque année, principalement dus à l'exposition aux particules fines ($PM_{2,5}$). C'est dans les pays qui connaissent un développement économique et une urbanisation rapides, ainsi qu'une forte augmentation des émissions liées aux activités industrielles, à la production d'électricité et aux transports motorisés que la charge que représente la pollution de l'air est la plus grande. Dans des pays où la qualité de l'air est peu ou pas réglementée, cela a pour conséquence une forte augmentation de la pollution, très mauvaise pour la santé. Ce problème de la pollution de l'air est renforcé dans beaucoup de ces pays par la persistance de sources de pollution préindustrielle, telle que l'utilisation de combustibles solides par les ménages, le brûlage de résidus de récoltes et celui des forêts pour défricher les terres ainsi que l'incinération des déchets à ciel ouvert.

Pour de nombreux gouvernements municipaux dans les pays à faible et moyen revenu, la complexité et le coût d'une meilleure connaissance et de la lutte contre la pollution de l'air sont des obstacles à la mise en œuvre ou à la poursuite d'actions efficaces d'amélioration de la qualité de l'air. Une nouvelle approche de la gestion de la qualité de l'air qui associe des solutions déjà connues et des innovations en matière de surveillance, d'évaluation, d'utilisation des données et d'organisation peut permettre d'accélérer les actions d'amélioration de la qualité de l'air, en particulier dans les villes qui ont actuellement des capacités techniques limitées.

Récemment, on a vu se développer un certain engouement pour les capteurs à faible coût en tant qu'outil permettant de combler les lacunes qui existent en matière de données dans le cadre de la surveillance en temps réel de la qualité de l'air. Pourtant, parce que les CFC sont des outils nouveaux, leur utilisation élargie pour orienter la gestion de la qualité de l'air et les politiques d'amélioration de la qualité de l'air nécessite une réflexion approfondie. En décembre 2020, plus de 50 experts internationaux et nationaux se sont réunis dans le cadre d'un échange technique en ligne afin de partager les connaissances internationales, les bonnes pratiques et des exemples d'utilisation de ces capteurs dans le but d'étudier de manière plus exhaustive ce qu'ils permettent de faire, leurs limites, leurs caractéristiques techniques et la façon dont ils doivent être choisis et déployés sur le terrain. Dans ce document, nous intégrons les enseignements tirés de cet événement au cadre plus large sur la surveillance de la qualité

de l'air fourni dans *Accelerating City Progress on Clean Air: Innovation and Action Guide*¹, un document de référence présentant des démarches et des innovations d'application rapide et qui ont fait leurs preuves pour améliorer la qualité de l'air.

En résumé, le présent rapport fournit des conseils pragmatiques sur l'utilisation des capteurs à faible coût (CFC) à partir de recherches appliquées et d'expériences de terrain, notamment sur l'identification des objectifs de la surveillance et des problématiques pour lesquelles les CFC peuvent être des outils adaptés, les caractéristiques techniques des CFC, les questions clés d'assurance et de contrôle qualité (c'est-à-dire la validation et la fiabilité de résultats précis, reproductibles et cohérents). Un des objectifs clés de ce document est de soutenir les efforts des gouvernements locaux et régionaux et de les aider à rédiger des dossiers d'appels d'offres pour obtenir l'ensemble des services nécessaires à la planification, au développement, au déploiement, à l'analyse d'une campagne d'utilisation de CFC, à l'intégration des données obtenues à d'autres données complémentaires sur la qualité de l'air et à la communication et à la gestion des résultats.

Ce rapport porte sur l'utilisation des CFC pour mesurer la concentration massique des $PM_{2,5}$, parce que c'est le polluant pour lequel la technologie des CFC est la plus adaptée, et parce que c'est l'indicateur le plus important de la qualité de l'air en matière de santé publique.

Q: Pourquoi est-ce une priorité de santé publique de mesurer et de réduire les émissions de particules fines ($PM_{2,5}$) ?

R : Il s'agit du polluant le plus néfaste pour la santé. Les $PM_{2,5}$ sont un indicateur d'un mélange de pollutions qui est à l'origine des maladies les plus graves et de décès partout dans le monde. Il a été démontré qu'elles sont une cause de maladies graves et de décès dus à des pathologies cardiovasculaires et respiratoires, au cancer et au diabète, qui sont inclus dans les estimations de leur charge de morbidité dans le monde, mais les $PM_{2,5}$ ont aussi un impact sur l'issue des grossesses et la santé des enfants, ce qui peut affecter le bien-être et la productivité des personnes tout au long de leur vie.

Ce rapport traite des sujets suivants :

- L'utilisation des CFC pour collecter des données exploitables permettant de combler les lacunes des réseaux de surveillance de référence officiels ;
- La production de données utiles pour définir l'emplacement des instruments de référence permanents ;
- L'évaluation des mesures ciblées de réduction de la pollution (par ex. la mise en place de zones piétonnes, l'adoption de sources d'énergie propres par les ménages à l'échelle d'un quartier) ;
- L'identification des zones de forte pollution et la réalisation de mesures le long des limites des infrastructures pour identifier les violations potentielles de la réglementation et les impacts locaux de sources épisodiques de pollution (par ex. dans des décharges de déchets solides, des sites industriels), et répondre aux situations d'urgence (par ex. incendies majeurs de bâtiments et/ou feux de forêt) ;
- La compréhension des limites importantes des CFC actuels, et notamment : la difficulté à distinguer les sources locales de PM parmi la forte pollution régionale, l'impossibilité de mesurer la composition des émissions pour identifier la répartition entre les sources d'émissions et l'impossibilité de mesurer de façon fiable les polluants gazeux les plus importants pour la gestion de la qualité de l'air (GQA) ;
- Des conseils pour rédiger des appels d'offres pour des services liés à la mise en place de CFC, notamment concernant les objectifs du projet, sa planification, la répartition dans l'espace des CFC et la sélection des sites d'installation, le choix des appareils, leur étalonnage, leur déploiement, leur entretien, le recueil de données, le transfert des données, l'assurance et le contrôle qualité et l'analyse des données ;
- Les bonnes pratiques pour rendre les données accessibles et parlantes pour de multiples parties prenantes techniques et non techniques, ce qui est nécessaire pour renforcer la responsabilisation des acteurs et le soutien envers les actions d'amélioration de la qualité de l'air.

Des outils simples de prise de décision et des modèles sont fournis dans ce document pour aider à la rédaction d'appels d'offres et éclairer l'évaluation des candidatures reçues.

Utiliser des capteurs à faible coût dans le cadre de programmes complets de gestion de la qualité de l'air et de systèmes de surveillance solides et intégrés

La surveillance de la pollution de l'air, y compris celle réalisée grâce à des capteurs à faible coût et d'autres méthodes innovantes, n'est qu'un aspect de la gestion de la qualité de l'air. En plus des données de surveillance, des estimations des émissions polluantes provenant des sources les plus importantes peuvent et doivent être utilisées pour élaborer des plans d'action d'amélioration de la qualité de l'air qui ont pour objectif de réduire les émissions néfastes, alors même que des réseaux de surveillance solides sont en train d'être mis en place et renforcés.

L'association de plusieurs démarches de surveillance peut permettre d'alimenter un programme solide de gestion de la qualité de l'air, répondre aux besoins en matière de gestion de la qualité de l'air à l'échelle régionale et nationale et fournir des données pour la recherche et l'information du public². Il existe un certain nombre de technologies permettant d'évaluer la qualité de l'air à partir du sol ou depuis des satellites dans l'espace. Au niveau du sol, la technique la plus précise est celle qui repose sur l'utilisation d'instruments de référence qui fournissent des données de grande qualité. Cependant, ces outils sont chers à l'achat et à l'usage. Les CFC semblent offrir la possibilité d'une surveillance moins coûteuse, mais la précision des mesures varie beaucoup en fonction de la technologie de détection et du polluant. La télédétection par satellite est une source essentielle d'informations sur la qualité de l'air au niveau international³, en particulier là où il n'existe aucune surveillance à partir du sol. Cette approche peut aussi permettre de combler les lacunes en matière de données dans les régions où il existe une surveillance à grande échelle réalisée à partir du sol⁴⁻⁷. Lorsqu'elles sont associées à des modèles de transport des substances chimiques et aux mesures de surface qui sont disponibles pour faire le lien entre les mesures réalisées dans une colonne atmosphérique et les concentrations de surface, les estimations obtenues par satellite des émissions de PM_{2,5} et de certains polluants gazeux fournissent des données qui ont une résolution spatiale variable (entre 1 et 10 km), mais ne fournissent pas de mesures locales, à l'échelle d'un quartier et avec une résolution temporelle.

Pour les pays où de nombreuses grandes villes ne disposent pas de capteurs de surface de référence, aucune technologie ne peut à elle seule permettre de réaliser une surveillance complète. En revanche, l'association de plusieurs technologies, dont les CFC, peut permettre de trouver des solutions avec un bon rapport coût-efficacité pour mettre en place une surveillance de la qualité de l'air et la renforcer par étapes



NIVEAU DE DISPONIBILITÉ DES DONNÉES ET DES CAPACITÉS	Niveau	Données disponibles
	<p>1</p> <p><u>Une surveillance limitée ou inexistante</u></p> <p>Aucune surveillance officielle durable de référence des niveaux de PM_{2,5}</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Estimations par satellite • Surveillance non officielle de référence des niveaux de PM_{2,5} • Recherches réalisées en utilisant la LUR, des capteurs à faible coût ou à partir d'une surveillance mobile
	<p>2</p> <p><u>Une surveillance de base pour soutenir un premier plan d'action</u></p> <p>Au moins un instrument de mesure des émissions de PM_{2,5} officiel et de référence en place avec collecte et utilisation continues des données (au moins pour l'information du grand public)</p>	<p><u>Phase 1+</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Un ou plusieurs instruments de mesure des émissions de PM_{2,5} fixes et de référence
	<p>3</p> <p><u>Une surveillance complète pour des actions durables</u></p> <p>Un réseau de plusieurs instruments de mesure des émissions de PM_{2,5} de référence et au moins une station de surveillance avancée qui recueille des échantillons de PM_{2,5} pour analyser leur composition et mesurer les polluants gazeux. Les données sont utilisées pour concevoir des politiques publiques.</p>	<p><u>Phase 2+</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Une station avancée de surveillance des particules de surface • Une ou plusieurs stations de surveillance de référence pour les polluants gazeux
	<p>4</p> <p><u>Un système intégré avancé</u></p> <p>Une surveillance de Phase 3 et une surveillance régulière avec une résolution spatiale élevée</p>	<p><u>Phase 3+</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Une modélisation régulière de la LUR ou des campagnes mobiles de surveillance régulières • Un réseau de capteurs à faible coût

AUGMENTER LES DISPOSITIFS DE SURVEILLANCE ET LA DENSITÉ DU RÉSEAU

Figure 2. Applications possibles des réseaux de capteurs à moindre coût (CFC) en fonction du niveau de disponibilité des données et des capacités

Questions prioritaires

- **CFC** La qualité de l'air représente-t-elle un risque pour la santé dans la ville / la région métropolitaine ?
- Pourquoi est-il important d'avoir un système officiel de surveillance fiable ?
- **CFC** Où les premiers capteurs de référence doivent-ils être placés ?

- Quelle est la situation de départ en termes de niveau et de tendances des émissions de $PM_{2,5}$ au moment où des mesures d'amélioration de la qualité de l'air sont prises ?
- **CFC** Où doivent être placés les instruments de référence ?
- La qualité de l'air locale respecte-t-elle les normes locales ?
- Quand ont lieu les épisodes de pollution de l'air ?
- **CFC** Que sait-on de la répartition des épisodes de pollution et/ou d'exposition de la population à la pollution de l'air ?

- Quelles sont les sources de pollution de l'air les plus importantes dans la ville/ la région métropolitaine ?
- Les mesures de lutte contre la pollution permettent-elles d'améliorer la qualité de l'air dans la ville/la région métropolitaine ?
- **CFC** Où doivent être placés des instruments de référence supplémentaires ?
- **CFC** Les sources locales d'émissions (par ex. l'incinération des déchets, l'utilisation d'énergie provenant de la biomasse) ont-elles un effet sur les niveaux de $PM_{2,5}$?
- **CFC** Existe-t-il des zones de forte exposition ?

- **CFC** Quelles sont les zones de forte pollution et les sources d'émissions à l'échelle des quartiers ?
- Les mesures de lutte contre la pollution de l'air améliorent-elles la qualité de l'air à l'échelle des quartiers ?
- **CFC** Les mesures de lutte contre la pollution de l'air qui sont ciblées géographiquement améliorent-elles la qualité de l'air dans les quartiers ?

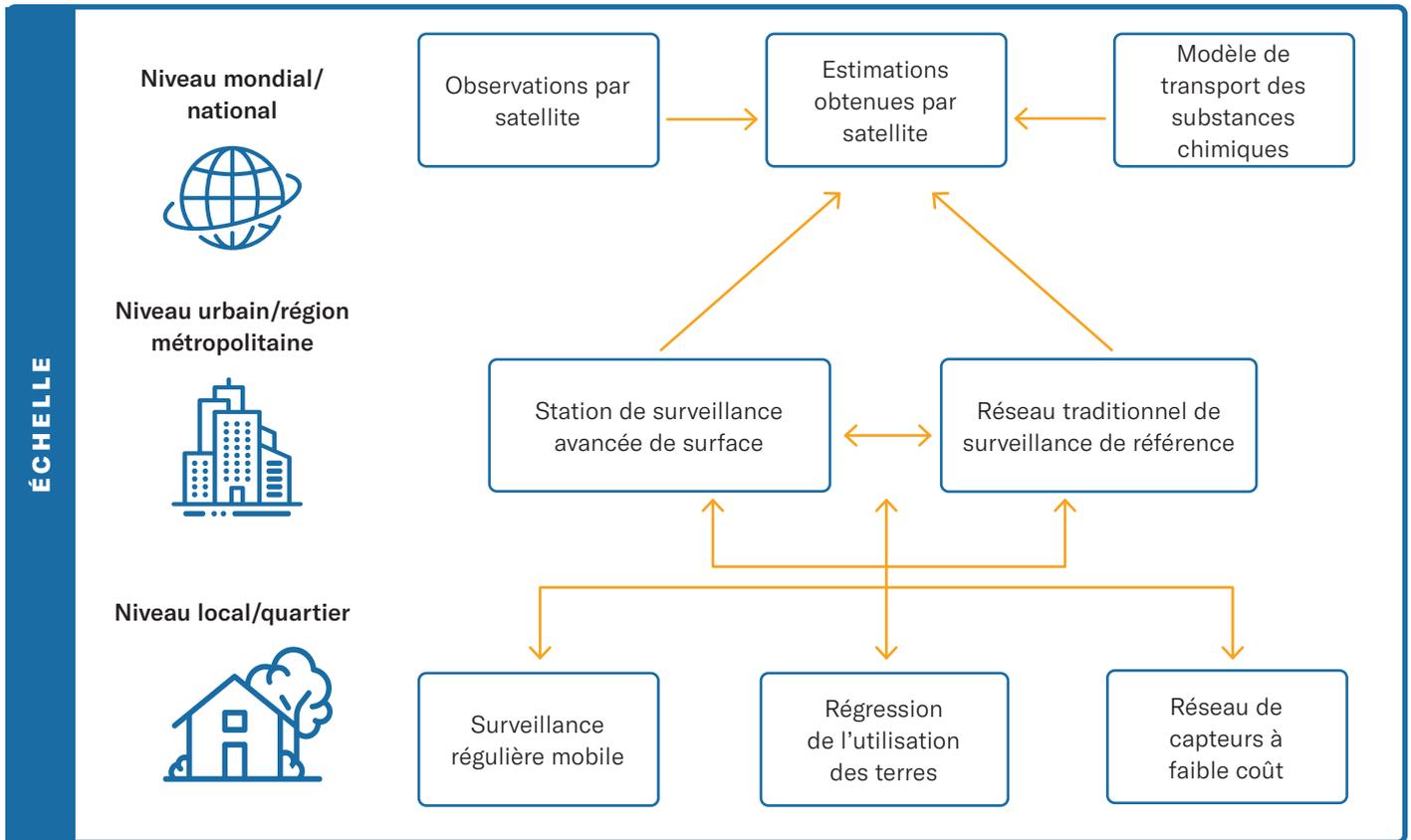


Figure 2. Système intégré de surveillance de la qualité de l'air

et de façon durable afin d'obtenir un système intégré (Figure 2). Les campagnes de déploiement de CFC et les réseaux de CFC peuvent être intégrés dans un système plus large de surveillance de la qualité de l'air qui utilise des données intégrées obtenues par des méthodes de télédétection par satellite, des instruments de surveillance de surface traditionnels et avancés, et une surveillance régulière basée sur une ou plusieurs approches avec une résolution spatiale élevée : la land use regression (LUR), la surveillance mobile, des campagnes de surveillance réalisées avec des CFC ou des réseaux de CFC. Un tel système permet d'évaluer les variations de la pollution de l'air à des résolutions spatiales et temporelles différentes, de guider le positionnement d'instruments de référence supplémentaires et d'intégrer les innovations au fil du temps. Le coût que représente le déploiement et la mise en œuvre d'un tel système peut varier de façon très importante selon les circonstances locales, mais un système hybride est probablement moins coûteux qu'un réseau réglementaire conventionnel avec de nombreux instruments de référence⁸. Il faut noter qu'un système hybride, en plus d'associer différentes technologies de surveillance, peut aussi intégrer des données crédibles issues de la surveillance réalisée par différents acteurs gouvernementaux et non gouvernementaux.

Applications possibles des CFC

La partie précédente présente un aperçu de la façon dont les CFC peuvent venir compléter d'autres méthodes de surveillance de la qualité de l'air classiques et innovantes dans le cadre d'un système complet de surveillance. Dans cette nouvelle partie, nous allons étudier les différentes applications possibles des CFC en fonction du niveau de départ des capacités de surveillance et des questions essentielles qui restent à traiter (Figure 1). Une utilisation pragmatique des CFC doit commencer par une évaluation des données de surveillance de la qualité de l'air existantes, pour identifier les questions essentielles qui sont pertinentes pour éclairer ou évaluer les décisions en matière de qualité de l'air. D'autre part, toutes les données disponibles et crédibles sur les niveaux de pollution de l'air doivent être répertoriées pour permettre d'évaluer comment les données issues des CFC peuvent combler les lacunes et être intégrées à d'autres données de surveillance de la qualité de l'air.

Par exemple, dans les villes qui ont peu ou pas de capacités de surveillance, les réseaux de CFC peuvent être utilisés pour vérifier que les estimations des niveaux de $PM_{2,5}$ réalisées grâce à la télédétection par satellite montrent bien que les normes sanitaires sont dépassées de façon importante à

l'échelle d'une ville et de la région qui l'entoure. Les réseaux de CFC peuvent aussi fournir des données exploitables initiales pour orienter l'élaboration d'un système de surveillance intégré à partir d'approches complémentaires, par exemple en parcourant des sites pour identifier l'emplacement d'instruments permanents de référence initiaux ou complémentaires. Dans les villes qui ont déjà installé au moins quelques instruments de référence, les CFC permettent de compléter la surveillance existante, de combler les lacunes liées à l'absence de capteurs dans certains espaces du réseau de surveillance, d'identifier des zones de forte pollution, et de mesurer l'efficacité d'actions d'amélioration de la qualité de l'air ciblées géographiquement. Les applications potentielles des CFC dépendent du niveau de départ en matière de données et de capacités dans une ville, des lacunes en matière de données essentielles et des questions qui se posent sur la qualité de l'air. Voir Figure 1.

Questions pratiques à prendre en compte avant de planifier un projet de surveillance de la qualité de l'air avec des CFC

- Quelle est la situation actuelle et quelles sont les capacités du système officiel de surveillance de la pollution de l'air de référence (Figure 1) ?
- Au vu des données officielles et non officielles sur les niveaux de pollution de l'air qui sont disponibles, quelles sont les lacunes en matière de données clés que les CFC pourraient venir combler et les questions sur les niveaux de pollution de l'air auxquelles les CFC pourraient permettre de répondre ?
- Quelles sont les limites des CFC disponibles à l'heure actuelle et quels sont leurs avantages et leurs inconvénients par rapport à d'autres méthodes de surveillance ? Les CFC permettent-ils de répondre à des questions essentielles ?
- Quelles sont les données complémentaires (par ex. sur les sources de $PM_{2,5}$, les émissions et leur répartition dans l'espace) qui sont disponibles ou qui nécessitent d'être collectées pour permettre de planifier un projet basé sur l'utilisation des CFC et de valoriser les données fournies par les CFC pour orienter ou évaluer les mesures de lutte contre la pollution de l'air ?

Objectifs et conception du projet

Ce rapport porte sur quatre applications concrètes de l'utilisation des CFC pour orienter la gestion de la qualité de l'air. Ces applications sont les suivantes :

- 1. LA LOCALISATION :** identifier la répartition dans l'espace des différents niveaux de $PM_{2,5}$ en l'absence d'instruments de surveillance de référence pour définir la localisation d'un premier instrument de référence ou d'appareil(s) supplémentaires pour combler les lacunes d'un réseau clairsemé.
- 2. LA CARTOGRAPHIE DE LA QUALITÉ DE L'AIR :** identifier les gradients d'exposition dans l'espace et le temps dans toute la ville pour évaluer les émissions et faire des prévisions, fournir des estimations de l'exposition pour des recherches sur la santé et guider le développement du réseau existant d'instruments de référence.
- 3. L'IDENTIFICATION DES ZONES DE FORTE POLLUTION :** identifier les zones où la pollution de l'air est la plus élevée du fait de la proximité avec des sources d'émissions, afin de définir les priorités de l'action locale ou de sensibiliser le grand public à certaines sources de pollution.
- 4. L'ÉVALUATION :** évaluer l'impact des mesures ciblées géographiquement qui ont été prises pour lutter contre la pollution émise par certaines sources spécifiques d'émissions et/ou réduire l'exposition à la pollution des populations qui vivent près de certaines sources spécifiques.

L'utilisation qui sera faite des réseaux de CFC et les questions prioritaires qui doivent être traitées dépendent du niveau des données et des capacités disponibles pour la gestion de la qualité de l'air (Figure 1).

Les quatre applications possibles reposent sur l'idée que les données fournies par les CFC seront utilisées conjointement avec celles fournies par des méthodes conventionnelles de gestion de la qualité de l'air, ainsi qu'avec celles fournies par d'autres méthodes innovantes et d'autres méthodes de mesure de la qualité de l'air, notamment la land use regression et la télédétection.

- Les CFC ne doivent pas être utilisés pour réaliser le suivi à long terme des niveaux de $PM_{2,5}$ à l'échelle d'une ville. Cela doit être fait en mettant en place au moins un ou plusieurs sites de surveillance de référence qui peuvent fournir des données cohérentes au fil du temps.

Les limites des capteurs à faible coût

Connaître les limites des CFC permet de garantir qu'ils ne sont utilisés que lorsqu'ils sont adaptés à l'usage que l'on souhaite en faire et d'éviter d'avoir des problèmes liés à la qualité des données ou d'autres problèmes sur lesquels les parties suivantes de ce rapport apporteront des conseils.

- L'exactitude et la précision des CFC constituent les principales limites de ces capteurs. Pour limiter les problèmes de qualité des données, il est important de choisir un appareil qui s'est révélé performant lorsqu'il a été testé lors d'un programme défini de test et d'évaluation, décrit dans ce document.
- À part pour les CFC qui servent à mesurer les $PM_{2,5}$, il n'a pas été démontré que les CFC qui existent à l'heure actuelle sont performants pour mesurer plusieurs polluants qui sont essentiels pour la gestion de la qualité de l'air, notamment pour analyser la composition des particules et les niveaux d'oxydes d'hydrogène, de dioxydes de soufre et d'ozone. D'autres méthodes existent, comme l'utilisation d'échantillonneurs de particules fines à moindre coût fonctionnant avec des filtres, et celle d'échantillonneurs passifs de polluants gazeux.
- Le faible coût à l'unité des CFC peut sembler intéressant, mais il faut prendre en compte les dépenses de personnel et les coûts d'autres ressources nécessaires au déploiement des appareils, à leur entretien, leur étalonnage et leur remplacement, ainsi que ceux liés à la gestion du réseau de données et à son entretien.
- Enfin, les réseaux de CFC peuvent générer des données qui semblent inquiétantes, mais ne sont pas exploitables. Par exemple, une augmentation très courte de l'ordre de quelques secondes ou minutes qui est mesurée par un unique capteur peut être le signe que ce capteur dysfonctionne, ou indiquer une augmentation passagère et très localisée de la pollution de l'air. Dans ce dernier cas, cela n'a pas beaucoup d'importance pour la gestion de la qualité de l'air et la santé publique, sauf si cela affecte une population importante ou si cela arrive régulièrement. Et dans un cas comme dans l'autre, cette augmentation peut venir distraire le personnel en charge de la qualité de l'air et détourner des ressources qui devraient être utilisées pour lutter contre les sources de pollution importantes qui sont déjà identifiées.

- Les CFC peuvent aider à choisir la localisation d'instruments de référence, mais pas les remplacer. En l'absence d'une surveillance de référence, les estimations fournies par satellite représentent une alternative pour assurer le suivi à long terme des tendances de la pollution de l'air.

Le choix des indicateurs les plus adéquats pour définir la performance des capteurs dépend de l'utilisation que l'on souhaite en faire. Des mesures qualitatives ou indicatives peuvent être utiles sur des sites isolés ou à des fins éducatives. Par exemple, pour comprendre les modifications générales de la pollution de l'air dans une école ou un centre communautaire, il n'est pas forcément nécessaire d'avoir des données de la plus grande qualité possible. Cependant, des données de meilleure qualité seront nécessaires pour pouvoir comparer les données fournies par les CFC à d'autres données fournies par d'autres types de capteurs ou à des normes.

Choisir/ Définir les caractéristiques d'un capteur de mesure de la qualité de l'air

La performance d'un capteur de mesure de la qualité de l'air est basée sur l'évaluation de son exactitude, sa précision et sa fiabilité. Elle peut être très variable d'un fabricant à l'autre à cause d'un certain nombre de facteurs (par ex. les conditions météorologiques, les niveaux de pollution). Pour

aider les utilisateurs et les acheteurs à choisir des capteurs, des organisations ont créé des centres d'évaluation et des protocoles de test afin de déterminer quels sont les capteurs qui fonctionnent le mieux. Ces organisations sont des agences gouvernementales, des institutions universitaires et des associations qui ont élaboré des moyens de tester les capteurs de mesure de la qualité de l'air grâce à des méthodes crédibles et indépendantes. Dans cette partie du rapport, vous trouverez un aperçu des méthodes d'évaluation, des ressources et d'autres critères pour vous permettre d'identifier quels sont les capteurs les meilleurs pour l'utilisation que vous souhaitez en faire. Des organismes de normalisation et de test ont récemment développé des méthodes de test^{9,10}. Pour les capteurs de mesure de la qualité de l'air, ces méthodes incluent généralement l'évaluation des capteurs à la fois en laboratoire et sur le terrain. Les évaluations en laboratoire testent les capteurs en même temps que des instruments de référence dans une chambre d'évaluation dans laquelle tous les paramètres sont contrôlés (température, humidité, concentration des polluants). Ces évaluations ne peuvent pas reproduire complètement les conditions d'utilisation des capteurs de la même manière que les évaluations de terrain. Elles permettent d'étudier la performance des appareils de façon systématique, mais il est difficile de reproduire toute l'étendue des conditions du réel dans un environnement

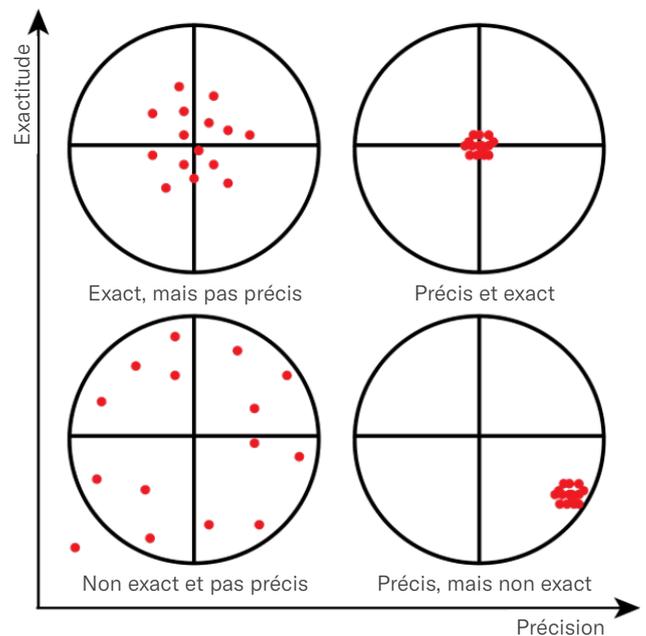
contrôlé. Les tests réalisés sur le terrain permettent à l'utilisateur de tester encore plus le capteur et de déterminer le niveau de performance global de l'appareil. Ils sont réalisés en plaçant plusieurs (au moins trois) capteurs à côté d'un instrument de référence.

Les indicateurs de performance

Les indicateurs de performance sont les paramètres utilisés pour décrire la façon dont un capteur de mesure de la qualité de l'air se comporte par rapport à un appareil standard (généralement un instrument de référence). De nombreux indicateurs permettent de connaître la performance d'un capteur et d'identifier celui qui est le plus adapté à l'utilisation que vous souhaitez en faire. Les indicateurs sont résumés brièvement ci-dessous et dans la Figure 4, et ils sont généralement applicables à la fois pour les particules et les polluants gazeux.

Figure 3 : Données d'échantillon illustrant différents niveaux d'exactitude par rapport à la précision

Source : <https://wp.stolaf.edu/it/gis-precision-accuracy/>



Évaluer la performance des CFC : des évaluations en laboratoire et sur le terrain

Évaluation en laboratoire

Une validation en laboratoire permet d'évaluer de façon systématique la performance des capteurs dans différentes conditions de température et d'humidité. Les évaluations sont généralement réalisées dans un caisson où tous les paramètres de test peuvent être contrôlés, maintenus et étudiés, à savoir la température, l'humidité relative et les concentrations en aérosols. Les évaluations en laboratoire sont utiles pour déterminer quelles sont les performances d'un capteur dans des conditions spécifiques et régulées, mais elles ne permettent pas de reproduire complètement les conditions réelles d'utilisation comme le permet une évaluation sur le terrain. La différence entre les conditions en laboratoire et les conditions sur le terrain peut être due à des facteurs comme la modification des conditions météorologiques et la différence qui peut exister entre les propriétés d'un polluant en laboratoire et sur le terrain.

Évaluation sur le terrain

Bien que les évaluations en laboratoire permettent d'étudier les performances de l'appareil de façon systématique, les conditions réelles d'utilisation sont difficiles à reproduire dans un environnement contrôlé. Une évaluation sur le terrain permet de montrer comment un appareil fonctionnera dans des conditions d'utilisation réelles. Les résultats des tests sur le terrain, notamment ceux impliquant la colocalisation des CFC avec un instrument de référence, doivent être étudiés lorsqu'on planifie un projet utilisant des CFC. Les évaluations sur le terrain doivent être menées dans des conditions similaires à l'usage envisagé et les performances de l'appareil doivent être comparées à celles des instruments de référence. Les stations de surveillance réglementaire déjà établies et fonctionnant avec des instruments de mesure des émissions de $PM_{2.5}$ de référence peuvent être utilisées comme des sites de colocalisation pour les évaluations sur le terrain.

Quelques ressources clés sur les évaluations des capteurs d'air

- Agence de protection de l'environnement des États-Unis – Objectifs de performance : <https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/air-sensor-performance-targets-and-testing-protocols>
- Centre d'évaluation des performances des capteurs de mesure de la qualité de l'air (AQSPEC en anglais) : <http://www.aqmd.gov/aq-spec>
- Air Paris : <http://www.airlab.solutions/en>

Exactitude et précision

L'exactitude et la précision sont deux indicateurs qui se réfèrent à la capacité des capteurs à mesurer une valeur exacte de façon fiable et répétée à chaque mesure (Figure 5). La précision est la capacité à mesurer la même chose à chaque fois et de façon cohérente. L'exactitude se réfère à la capacité du capteur de mesurer la valeur exacte, ou valeur vraie, ou pas. Par exemple, si un instrument de référence mesure une concentration de 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et que trois capteurs d'air placés à côté de lui mesurent des concentrations de 40, 40,5 et 42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, les appareils testés sont évalués comme précis (les valeurs sont proches), mais pas exactes (les valeurs sont différentes de celle affichée par l'instrument de référence). Voir l'annexe sur les indicateurs spécifiques pour déterminer la précision et le biais.

Corrélation

La corrélation mesure la façon dont les données recueillies par le capteur se comportent par rapport à celles d'un instrument de référence et cela peut être évalué dans le temps ou l'espace. La corrélation temporelle mesure comment des mesures prises par différents appareils varient ensemble au fil du temps. La corrélation spatiale mesure comment des paires de mesures, par exemple des moyennes hebdomadaires, prises à de multiples endroits, varient ensemble. Une forte corrélation ($>0,80$) indique que le capteur détecte des tendances similaires à celles indiquées par les données de référence. Cependant, les mesures réalisées par le capteur peuvent avoir un R^2 élevé, mais être très différentes des mesures de référence du fait du biais (par ex. un R^2 de 0,99 et une forte sur ou sous-estimation de la concentration réelle).

Un autre indicateur qui permet ce type de comparaison est la racine normalisée de l'erreur quadratique moyenne ou REQM normalisée. Lorsque cet indicateur a une valeur basse, cela signifie que les données recueillies par le capteur concordent davantage avec celles de l'instrument de référence. Voir l'annexe sur la façon de calculer les valeurs de R^2 et de la REQM.

Comparaisons entre différents appareils d'un même modèle

Lorsqu'on utilise plusieurs capteurs dans le cadre d'un projet, il est important de s'assurer que les mesures réalisées par les différents appareils concordent entre elles. Pour cela, il est recommandé lors du test de faire des comparaisons entre les différents appareils, en utilisant au moins trois appareils de la même fabrication, du même modèle et avec le même microprogramme.

Les facteurs d'étalonnage peuvent changer dans le temps et l'espace

L'étalonnage peut être un objectif difficile à atteindre pour la plupart des CFC qui mesurent les concentrations en $\text{PM}_{2,5}$. Le fonctionnement des CFC repose sur le principe optique de la diffusion lumineuse, aussi tout changement dans les propriétés optiques des particules a un impact sur la réponse des CFC. Ces propriétés (la distribution granulométrique, la réaction à l'humidité, etc.) changent fréquemment dans les zones urbaines et en fonction des saisons. Donc les facteurs d'étalonnage peuvent varier non seulement en fonction de la localisation du capteur, mais aussi dans le temps. Par exemple, les étalonnages réalisés dans une région peuvent ne pas s'appliquer dans une autre région et les étalonnages réalisés en été peuvent ne pas convenir pendant la mousson ou l'hiver. Pour répondre à ce problème, il est conseillé de garder un CFC à côté de l'instrument de référence (par ex. un appareil à atténuation bêta (BAM en anglais) dans la zone d'étude).

Dégradation des performances

Les performances d'un capteur peuvent diminuer avec le temps (dérive) pour plusieurs raisons : des éléments de l'appareil qui fonctionnent mal, un dépôt de particules sur les éléments internes de détection, ou d'autres facteurs environnementaux. La dérive des capteurs peut être positive ou négative et conduire à la conclusion erronée que les concentrations diminuent ou augmentent, dans le cadre de projets à long terme, de plus de six mois. Le fabricant doit

Des approches innovantes pour les contextes à ressources limitées

Pour les sites qui n'ont pas accès à une alimentation en électricité et à une connexion Wifi fiables, il est plus adapté d'utiliser des capteurs avec des batteries intégrées et des modules cellulaires. Certains groupes de chercheurs utilisent des ensembles de batteries portables associés à un module Wifi. Cette configuration apporte de la flexibilité lors du déploiement des capteurs dans des contextes où les ressources sont limitées, mais du fait de l'utilisation de matériel supplémentaire, il ne s'agit pas d'un système prêt à l'emploi, qu'il suffit de brancher et cela nécessite plus de temps de travail de la part du personnel pour assurer le suivi et le dépannage. Il faut aussi prendre en compte les coûts supplémentaires liés à l'achat et à l'entretien des ensembles de batteries et du module Wifi.

Les questions clés à se poser pour choisir des CFC

Application



Les CFC répondent-ils à vos besoins (par ex. mesurer les polluants qui vous intéressent) ?

OUI



Performance



Les CFC ont-ils été certifiés, testés ou évalués par un organisme crédible ?



NON

Choisissez un autre modèle de CFC

OUI



Évaluation sur le terrain



Les CFC ont-ils été testés dans votre région dans des conditions similaires à celles de leur utilisation prévue (météo, pollution) ?



NON

Des tests peuvent-ils être réalisés sur le terrain dans votre région ?



NON

Choisissez un autre modèle de CFC

OUI



Support



Les CFC remplissent-ils les autres conditions nécessaires à leur utilisation prévue (électricité, communication, assistance technique, etc.) ?



NON

Choisissez un autre modèle de CFC

OUI



VOUS POUVEZ UTILISER CES CFC

Figure 4. Les questions clés à se poser pour choisir des CFC

fournir des informations sur la durée de vie du capteur et les méthodes permettant de détecter ou de corriger la dérive des capteurs.

Réponse du capteur à de fortes concentrations

Étant donné que dans les zones de forte pollution, les conditions ambiantes peuvent dépasser les niveaux habituels auxquels les CFC ont été évalués, il est important d'identifier la réponse du capteur face à des concentrations extrêmes de polluants (par ex. des concentrations similaires à celles qui existent lors de la fête de Diwali ou lors des épisodes de smog à Delhi). Remarque : une performance très bonne dans une région où les concentrations sont plus faibles peut ne pas se confirmer dans d'autres régions.

Exhaustivité des données

L'exhaustivité des données est un indicateur qui donne des informations sur la fiabilité du capteur, c'est-à-dire sur le fait que le réseau de capteurs est opérationnel en permanence et génère un ensemble de données complet permettant de tirer des conclusions sur la qualité de l'air, ou si ce n'est pas le cas. Les données sur les variations saisonnières attendues de la concentration des polluants ne sont pas fiables si les capteurs ne fonctionnent pas pendant au moins un an. Des capteurs supplémentaires qui ont été testés et dont les données étaient comparables à celles des autres lors de tests réalisés en colocalisation avec d'autres instruments de mesure doivent être mis de côté pour garantir la continuité des mesures.

Effet des paramètres environnementaux

Il est important de vérifier que les appareils enregistrent des données sur la température et le taux d'humidité. Si ce n'est pas le cas, il faut prévoir d'enregistrer ces données de façon séparée, ou d'avoir accès à ces données grâce à une station météorologique proche des capteurs. (Parmi les différents modèles de CFC, l'humidité et la température sont des paramètres qui ont un impact sur la performance et il est donc important d'enregistrer ces données.)

Autres facteurs à prendre en compte lors du processus de sélection des capteurs

De nombreux autres facteurs sont essentiels à prendre en compte pour sélectionner un capteur qui répond aux objectifs qui ont été formulés. Certains de ces facteurs peuvent affecter de façon importante la performance du capteur, alors que d'autres peuvent avoir un effet sur les coûts initiaux et les coûts de maintenance des capteurs. Par exemple, une alimentation en électricité irrégulière peut être à l'origine d'un ensemble de données incomplet et limiter de ce fait l'analyse possible.

Alimentation en électricité

Il s'agit d'un aspect important à prendre en compte lors de la conception d'un réseau de capteurs pour des villes qui connaissent des coupures de courant fréquentes ou qui ont des difficultés d'accès à l'électricité. Les interruptions de l'alimentation en électricité des capteurs produisent des données de mauvaise qualité. Plusieurs options existent pour alimenter un CFC en électricité, dont la connexion au réseau, les panneaux solaires et les batteries. La mise en place d'une alimentation en électricité de secours peut permettre d'améliorer la fiabilité des données recueillies par le capteur. Dans le cas de l'électricité solaire, il faut s'assurer qu'il y a suffisamment de lumière du soleil. Il faut anticiper pour s'assurer que le site est alimenté en électricité ou dispose d'assez de lumière du soleil pour produire de l'électricité.

Durée prévue du projet	Éléments à prendre en compte
Projet à court terme	Performance, facilité d'installation, maintenance
Projet à moyen terme (un an et moins)	Étalonnage répété, dérive, pièces de rechange et remplacement
Projet à long terme (> 1 an)	Durée de vie, extension de garantie

Tableau 1. Éléments à prendre en compte pour choisir les CFC en fonction de la durée du projet

Questions clés pour orienter le choix des appareils, leur localisation et la mise en œuvre de l'étude menée

- Quels sont les principaux objectifs du projet ?
- À l'heure actuelle, quelles sont les capacités en matière de gestion de la qualité de l'air ?
- Quelles sont les données disponibles pour éclairer la conception de l'étude et répondre aux questions essentielles ?
- Dans quel délai est-il proposé d'obtenir des résultats ?
- Comment les données seront-elles analysées et présentées ?

Transmission des données

En général, les données des capteurs sont transmises à un cloud en temps réel. Cette transmission se fait soit via un réseau Wifi soit via un module cellulaire (une carte sim) à

l'intérieur du capteur. En backup, les données peuvent être stockées dans une mémoire interne (par ex. une carte SD) à laquelle il est possible d'accéder physiquement. Le Wifi peut être instable ou nécessiter des protocoles de sécurité supplémentaires, ce qui réduit la fiabilité des capteurs. Un module cellulaire peut induire des coûts mensuels qu'il faut prendre en compte.

Étalonnage

Les capteurs, comme tous les instruments de mesure, nécessitent un étalonnage régulier et une correction régulière des données collectées. La réponse d'un capteur peut varier avec les saisons, les propriétés des polluants et l'âge du capteur. Il est recommandé d'étalonner les capteurs sur le site de leur installation avant leur déploiement et ensuite de façon régulière après leur déploiement. Voir la partie sur l'étalonnage pour plus de détails. Il est nécessaire de demander au fabricant de CFC quels sont les protocoles à suivre pour réaliser l'étalonnage, quelle est la fréquence de ces réglages et quels sont les coûts supplémentaires à prendre en compte pour que le capteur reste bien étalonné.

Prendre en compte la durée du projet

La durée de la surveillance que vous prévoyez de mettre en place grâce à des CFC peut influencer sur les caractéristiques et les fonctionnalités du modèle de CFC que vous choisissez. Les projets à court terme d'une durée de quelques mois et les projets qui ne dépassent pas la durée d'une saison ne nécessitent pas forcément de gros efforts logistiques pour une localisation élargie ni pour ré-étalonner les appareils. Pour les projets à long terme, en particulier ceux qui durent plus d'un an, la durée de vie et les garanties associées sont des éléments importants. Étant donné qu'en général les capteurs ont une durée de vie d'un ou deux ans, il sera alors nécessaire de planifier le remplacement et l'entretien supplémentaire des appareils. D'autres coûts supplémentaires sont à prendre en compte lorsque le projet est long : des étalonnages répétés pour s'adapter aux saisons, la dérive des appareils, les frais liés à la gestion du réseau et des données, etc. (Tableau 1)

Choisir les services de données

Les capteurs génèrent de grandes quantités de données qui doivent être gérées, dont la qualité doit être contrôlée et qui doivent être accessibles pour garantir le succès de votre projet. Il est essentiel de savoir quels sont les services de données qui sont fournis (ou pas) par une entreprise qui fabrique des capteurs de mesure de la qualité de l'air. Par ailleurs, un

organisme de réglementation local ou régional peut fournir certains de ces services en interne s'il dispose de l'expérience et des outils nécessaires.

Gestion des données et accès aux données

Les fabricants de capteurs doivent fournir des informations détaillées sur l'endroit où les données sont stockées et la façon dont on peut y avoir accès. Les systèmes qui fonctionnent avec un cloud sont les plus adaptés et permettent de stocker, d'assurer le suivi et la qualité des données de façon simple.

Voici quelques questions qu'il faut se poser :

- Les données sont-elles accessibles directement ou protégées par un mot de passe ?
- Les utilisateurs ont-ils accès aux données brutes ?
- Qui possède les données ?
- Combien de temps les données seront-elles conservées après l'étude ?
- Y a-t-il des coûts supplémentaires pour disposer d'une application mobile/un site internet ?
- Y a-t-il un nombre maximum de personnes qui peuvent avoir accès au site internet/à l'application ?

Examen des données

Il est important de décider qui sera chargé de vérifier les données et de résoudre les problèmes identifiés. Si ce service est fourni par le fabricant, les fournisseurs doivent décrire la procédure et la fréquence de la vérification des données au quotidien afin d'identifier les problèmes le plus tôt possible, de faire les modifications nécessaires et de permettre de créer un ensemble complet de données de grande qualité.

Support client

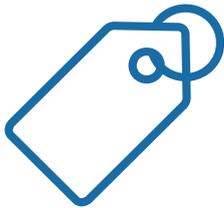
Vous pouvez avoir besoin d'une assistance supplémentaire de la part du fournisseur pour installer, faire fonctionner et utiliser les capteurs. C'est pourquoi il faut se poser les questions suivantes : Quelle est la durée du support client ? Qu'est-ce qui est inclus dans la garantie ? Qu'est-ce qui n'est pas inclus ? Le fournisseur dispose-t-il d'un service clientèle dans votre ville ou dans une région proche ?

Modèle tarifaire

Il existe deux types de modèles tarifaires sur le marché : 1) l'achat des capteurs et 2) l'abonnement ou la location. Lors de l'achat de ce type de matériel, il faut prendre en compte les coûts additionnels, par exemple le coût des accessoires, des pièces de rechange, des services et des envois lorsqu'une réparation est nécessaire ou pour l'entretien des appareils, les coûts de fonctionnement, le coût de l'accès aux données, etc. Vous pouvez demander un devis indiquant le prix des appareils

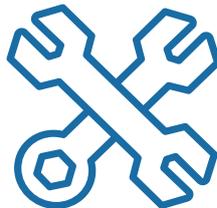
Coûts à prendre en compte pour choisir des CFC

Prix d'achat



Coût initial du matériel de surveillance

Entretien



Fournitures, pièces de rechange, services et envois lors des réparations

Infrastructures



Structures et infrastructures de support pour l'installation, sécurité

Baux commerciaux



Lorsque c'est le cas, bail commercial du site d'installatio

Services



Alimentation en électricité et réseaux mobiles fiables

Ressources humaines



Coûts RH pour le déploiement, l'étalonnage et l'entretien

Gestion des données



Matériel, frais et personnel pour la gestion des données

Figure 5. Coûts à prendre en compte pour choisir des CFC

dont vous avez besoin et le coût de la première année d'utilisation. Le modèle d'abonnement comprend généralement le matériel et les services associés. Un abonnement annuel peut inclure la maintenance, la réparation/le remplacement, l'accès aux données, les analyses QAQC, etc. Les services spécifiques qui sont inclus dépendent de chaque fabricant.

Logistique

Les projets qui incluent de nombreux capteurs placés à des endroits différents nécessitent souvent une grande flexibilité et une bonne répartition des capacités afin de faire le meilleur usage possible des ressources disponibles. Une fois la phase de mise en place passée, de nombreuses petites tâches peuvent se révéler chronophages et nécessiter beaucoup de ressources. Les temps de déplacement d'un emplacement à l'autre lors de la mise en place, le dépannage, la réparation, ou le remplacement de capteurs peuvent se révéler très longs. Il est donc utile d'avoir un gestionnaire de projet compétent qui peut fixer les priorités et planifier la maintenance du réseau le plus efficacement possible.

Coût total

Bien que le faible coût des capteurs à l'unité puisse paraître intéressant, les coûts liés aux ressources humaines et aux autres ressources nécessaires pour le déploiement, l'entretien, l'étalonnage, le remplacement des capteurs et les coûts de la gestion et de la maintenance du réseau de données¹¹ peuvent absorber une partie voire la totalité des économies réalisées lors de l'achat des appareils. Voici les éléments à prendre en compte (Figure 5) :

- Le prix à l'achat du matériel de surveillance ;
- Les fournitures, les pièces de rechange, le service et les envois lors des réparations et de l'entretien ;
- Les consommables, les envois, et les analyses des échantillons des appareils à filtre ;
- Les structures, les infrastructures de support, la sécurité ;
- Les baux immobiliers, lorsque cela s'applique ;
- Les services, notamment une alimentation en électricité et des réseaux mobiles fiables ;
- Les ressources humaines pour le déploiement, l'étalonnage et l'entretien ; et
- Le matériel, les frais et le personnel nécessaires à la gestion des données.

Conception d'un réseau de CFC et placement des capteurs

Pour déployer un réseau de capteurs à faible coût, il faut d'abord concevoir ce réseau puis choisir les lieux où seront installés les capteurs. Cela nécessite une planification importante pour définir la localisation générale des sites, le nombre de capteurs nécessaires et organiser la logistique d'installation des capteurs. Toutes ces tâches peuvent être réalisées par l'organisme de réglementation, des consultants ou dans certains cas par le fournisseur qui peut parfois fournir aussi ces services. Les appels d'offres doivent détailler les services spécifiques qui sont demandés et les candidatures doivent spécifier clairement l'identité de ceux qui fourniront ces services.

La conception d'un réseau de capteurs peut se révéler difficile, car le choix des localisations et du nombre de capteurs déployés dépend de l'utilisation qui en sera faite, de la couverture géographique du projet, du budget et d'autres éléments. Il y a plusieurs éléments essentiels à prendre en considération et ce sont les éléments suivants, classés par application :

Pour la localisation

Pour identifier de nouvelles localisations pour les instruments de surveillance de référence, des capteurs peuvent être installés dans de nombreux endroits pour étudier les gradients de la qualité de l'air (c'est-à-dire les différences de la qualité de l'air à l'échelle d'une région). La durée de la surveillance dépend de l'objectif de la surveillance de référence à mettre en place, mais cela peut être aussi bien un projet à court terme qu'à long terme (sur plusieurs saisons).

Pour la cartographie de la qualité de l'air

L'installation de capteurs pour cartographier la qualité de l'air d'une ville peut se faire sur plusieurs sites dans toute la ville afin de mesurer le gradient des concentrations de polluants et donc l'exposition de la population à ces polluants. Les lieux les plus adaptés pour cela se situent à proximité de sources d'émissions telles que des usines, des routes ou des intersections où la circulation est importante et de sites de référence comme des zones préservées ou des sites ruraux. Des sites qui risquent d'être affectés par des événements épisodiques comme le brûlage des résidus de cultures peuvent aussi être choisis pour cette application.

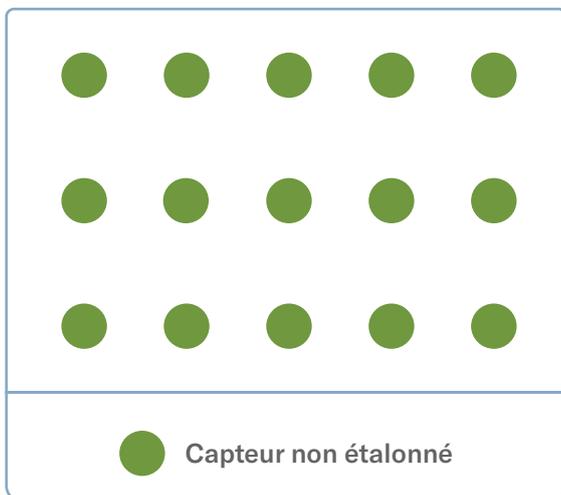
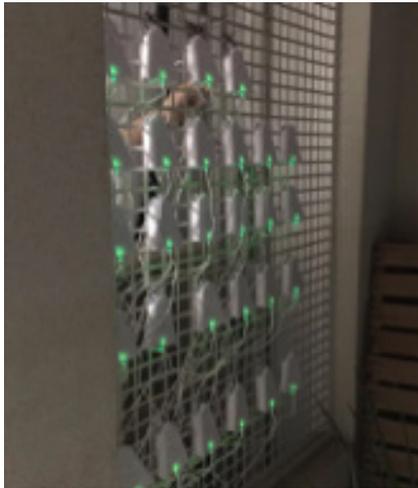


Figure 6. Exemple de colocalisation de capteurs pour des tests de comparabilité

Pour l'identification des zones de forte pollution

Pour identifier les zones de forte pollution, les capteurs doivent être installés sur des sites proches de la source d'émissions, à proximité d'une intersection où la circulation est importante, d'un pôle industriel, d'un site de combustion de biomasse à ciel ouvert ou d'une centrale électrique où les concentrations sont potentiellement élevées.

Pour l'évaluation

Pour évaluer l'impact des interventions politiques adoptées pour réduire la pollution de l'air sur une aire géographique spécifique, il faut que les sites d'installation des capteurs soient proches des sources identifiées comme ayant potentiellement un impact sur la population.

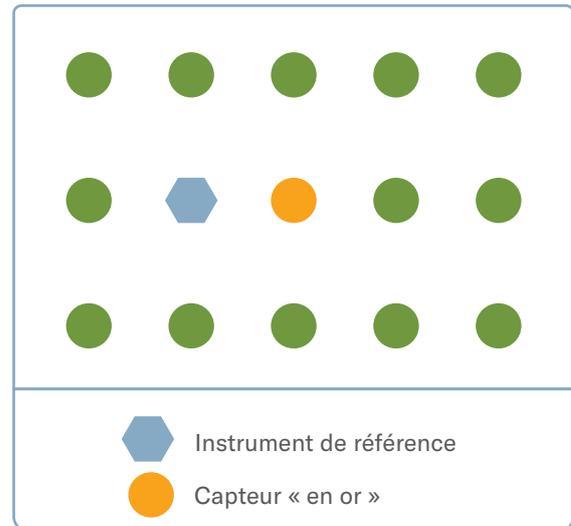


Figure 7. Étalonnage de capteurs réalisés en les plaçant en colocalisation avec un instrument de référence.

Colocalisation	Comparaison réalisée en plaçant les capteurs à côté d'un instrument de référence. Les capteurs et les instruments de référence sont placés les uns à côté des autres.
Étalonnage	Ajustement des données fournies par un capteur par rapport à une norme de référence. Les capteurs sont étalonnés par le fabricant (étalonnage d'usine) et aussi sur le terrain (en les plaçant à côté d'instruments de surveillance de référence) avant une campagne de mesure de la qualité de l'air. Comme la réponse d'un capteur peut changer avec les saisons, des étalonnages répétés sont nécessaires au cours de projets à moyen et long terme. Les méthodes utilisées pour réaliser des étalonnages à distance ou via le cloud doivent être soigneusement évaluées. Voir la Figure A1 dans l'Annexe pour en savoir plus.
Correction des données	Ajustement des données en fonction d'autres facteurs qui peuvent influencer la réponse des capteurs, par exemple, la température, l'humidité, etc.

Tableau 2. Définitions des termes généralement utilisés dans le domaine de l'assurance qualité/ du contrôle de la qualité des capteurs à faible coût : colocalisation, étalonnage et correction des données.

Autres considérations

La localisation et le nombre de capteurs déployés doivent aussi être définis en prenant en compte les éléments suivants¹² :

- **Les besoins en capteurs de remplacement** : budget à prévoir pour des capteurs supplémentaires pour remplacer ceux qui cessent de fonctionner au cours de l'étude.
- **Les conditions météorologiques** : la météo et le vent ont un effet sur la concentration et la répartition des polluants, donc il peut être intéressant d'installer des capteurs dans le sens du vent et contre le vent pour surveiller les flux de pollution vers l'intérieur et l'extérieur de la zone surveillée.
- **L'accès** : il est important d'avoir accès au site d'installation des capteurs pour pouvoir assurer la maintenance, le remplacement et réaliser d'autres activités au cours de l'étude. Un accord officiel peut être nécessaire pour définir les conditions et les procédures à suivre pour accéder au site.
- **L'alimentation en électricité** : Les capteurs peuvent nécessiter un branchement, être équipés de panneaux solaires ou les deux. Si une alimentation électrique est nécessaire, assurez-vous qu'il existe un accès à un réseau électrique fiable. Si vous utilisez l'énergie solaire, assurez-vous qu'il y a une exposition suffisante à la lumière du soleil (c'est-à-dire que les panneaux solaires ne sont pas à l'ombre de bâtiments ou d'autres structures).
- **La sécurité** : Les capteurs et le matériel peuvent être vandalisés et volés. Trouvez un endroit sûr, en hauteur, qui ne soit pas à portée de main, discret ou situé derrière un portail fermé à clé ou une clôture.
- **La hauteur** : Essayez de placer les capteurs à environ 1 à 2 mètres au-dessus du sol ou du toit. Évitez les endroits proches de sources locales de pollution (par ex. les cheminées, les aérations des cuisines) ou de « puits » de pollution (par ex. des arbres). Placez les capteurs dans un endroit où l'air circule sans problème pour qu'ils fournissent des mesures représentatives.

Assurance qualité/contrôle qualité

Cette partie décrit les démarches essentielles d'assurance qualité/de contrôle qualité qui permettent de garantir la qualité du projet.

Avant l'installation des capteurs

Étalonnage / Colocalisation

Les capteurs doivent être étalonnés pour fournir des données de bonne qualité. Certains fabricants peuvent fournir un facteur d'étalonnage ou des services d'étalonnage une fois que les capteurs sont déployés. Même si les capteurs peuvent être étalonnés une fois installés, ils doivent de toute façon être ré-étalonnés régulièrement avant, pendant et après l'étude. Les étalonnages sont définis en utilisant les données collectées lors d'une colocalisation. Il s'agit de comparer les résultats enregistrés par des capteurs lorsqu'ils sont placés les uns à côté des autres avec une norme ou une référence connue.

La définition des étalonnages est un domaine actif de recherches pour les institutions académiques et les fabricants, qui développent de nouvelles méthodes. On peut formuler plusieurs recommandations importantes concernant les étalonnages : 1) Comprendre la méthode utilisée pour étalonner les données du capteur, 2) Déterminer à quelle fréquence un capteur devra être étalonné et qui le fera, et 3) S'assurer que les données brutes et étalonnées sont archivées. Il est important de formaliser un guide d'étalonnage des CFC ou un guide de comparaison pour les colocalisations afin que tous les membres du personnel suivent la même procédure. Vous trouverez plus de détails sur les formules utilisées pour estimer le facteur d'étalonnage dans l'Annexe.

La colocalisation pour évaluer la comparabilité des capteurs

Tous les capteurs qui vont être déployés doivent être placés en colocalisation et testés afin d'identifier toutes les variations qui existent entre les mesures des différents capteurs (aussi appelées variabilité intramodèle). Ces colocalisations doivent être réalisées de préférence sur le terrain où les capteurs peuvent être très proches les uns des autres afin que l'air capté contienne des concentrations de polluant similaires, comme illustré sur la Figure 7. Cette méthode est d'une très grande importance lorsque l'on envisage d'utiliser les CFC pour réaliser des mesures afin de déterminer des gradients spatiaux (par ex. pour identifier des zones de forte pollution et pour cartographier la qualité de l'air). Ce type de colocalisation est réalisé généralement sur des durées de plusieurs jours à plusieurs semaines. Lors des colocalisations, il est aussi important d'évaluer la performance des capteurs dans les conditions de pollution et les conditions météorologiques attendues pendant le projet.

La colocalisation avec un instrument de référence

Une fois que les capteurs ont été évalués en termes de variabilité intramodèle, il faut étalonner au moins un capteur sur le terrain par le biais d'une colocalisation avec un instrument de référence afin de confirmer que l'air échantillonné contient des concentrations de polluants similaires, comme illustré sur la Figure 7. Ces étalonnages permettent de déterminer le degré d'exactitude par rapport à l'exactitude de la référence connue et de prouver que les capteurs fonctionnent comme annoncé. La colocalisation avec un instrument de référence doit être organisée pour tous les capteurs pendant plusieurs semaines au début de l'étude (si c'est possible). À la fin de l'étude, tous les capteurs doivent de nouveau être placés en colocalisation sur le site de référence. D'autres méthodes d'étalonnage sont utilisées par des chercheurs, comme la méthode du capteur « en or » dans laquelle le capteur étalonner ou capteur « en or » est utilisé pour étalonner d'autres capteurs sur le terrain.

La maintenance des capteurs après leur installation

L'étalonnage : Une fois que les critères de comparabilité et d'exactitude ont été établis lors de la phase prédéploiement, les capteurs déployés peuvent être étalonnés régulièrement (toutes les semaines ou tous les mois) en plaçant le capteur « en or » en colocalisation avec le reste des capteurs sur le terrain. Il s'agit d'un étalonnage par transfert. Une autre solution consiste à ramener les capteurs sur le site de référence et à les étalonner chacun leur tour.

L'exactitude : Les données générées par les capteurs doivent aussi être vérifiées régulièrement. Toute anomalie doit être documentée et corrigée de temps en temps afin d'éviter les difficultés liées au traitement de gros volumes de données. Pour avoir plus d'informations sur les méthodes d'estimation de l'exactitude, du biais et de la précision, vous pouvez vous référer à l'Annexe.

La validation des données : La validation des données est une étape importante avant d'analyser les données pour obtenir des conclusions définitives. Il faut interpréter visuellement les données brutes pour identifier les tendances inhabituelles, les aberrations, les dérives et les retards dans la réponse des capteurs. La validation des données doit avoir lieu le plus vite possible, tous les jours ou toutes les semaines. Une procédure de validation doit être définie pour permettre d'évaluer rapidement la qualité des données. C'est particulièrement important pour les villes qui n'ont pas d'historique de données permettant une comparaison.

Il existe d'autres tâches spécifiques à réaliser dans le cadre de la maintenance des capteurs parmi lesquelles :

- Vérifier que les appareils sont bien placés ;
- Nettoyer les capteurs ;
- Remplacer les consommables comme les batteries et d'autres accessoires (lorsque cela s'applique) ;
- Remplacer les capteurs qui génèrent des données erronées ou eux qui ont dépassé leur durée de vie ;
- Surveiller toute obstruction physique comme celle occasionnée par des arbres et des bâtiments qui peuvent apparaître au fur et à mesure de la surveillance ;
- Élaborer (au cours de l'installation), maintenir et valider un protocole pour enregistrer les actions réalisées et garantir qu'une méthodologie systématique est respectée.



Références

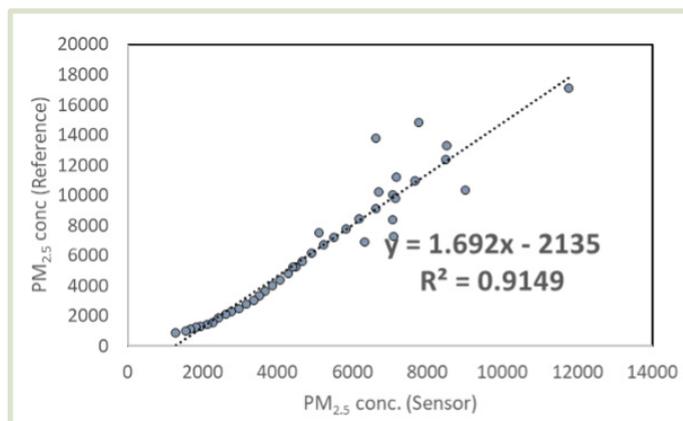
1. Vital Strategies 2020, Accelerating City Progress on Clean Air, Technical Guide. Viewed 19th August 2021, <https://www.vitalstrategies.org/resources/accelerating-city-progress-on-clean-air-innovation-and-action-guide/>
2. Martin RV, Brauer M, van Donkelaar A, Shaddick G, Narain U, Dey S. No one knows which city has the highest concentration of fine particulate matter. *Atmospheric Environ X*. 2019 Jun 24;100040.
3. GBD Compare | IHME Viz Hub [Internet]. [cited 2018 Jun 27]. Available from: <http://vizhub.healthdata.org/gbd-compare>
4. World Health Organization. Global Urban Ambient Air Pollution Database (update 2016) [Internet]. WHO. 2016 [cited 2016 Oct 21]. Available from: http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/cities/en/
5. WHO | Air quality guidelines - global update 2005 [Internet]. WHO. [cited 2016 Sep 14]. Available from: http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/outdoorair_aqg/en/
6. United Nations Environment Program (UNEP). Actions on Air Quality: Policies & Programmes for improving Air Quality Around the World [Internet]. 2015 [cited 2019 Sep 10]. Available from: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/17203/AQ_GlobalReport_Summary.pdf?sequence=1&isAllowed=y
7. Chow JC, Watson JG, Feldman HJ, Nolen JE, Wallerstein B, Hidy GM, et al. Will the Circle Be Unbroken: A History of the U.S. National Ambient Air Quality Standards. *J Air Waste Manag Assoc*. 2007 Oct;57(10):1151-63.
8. Brauer, M., Guttikunda, S.K., Nishad, K.A., Dey, S., Tripathi, S.N., Weagle, C. and Martin, R.V., 2019. Examination of monitoring approaches for ambient air pollution: A case study for India. *Atmospheric Environment*, 216, p.116940.
9. Duvall, R., A. Clements, G. Hagler, A. Kamal, Vasu Kilaru, L. Goodman, S. Frederick, K. Johnson Barkjohn, I. VonWald, D. Greene, AND T. Dye. Performance Testing Protocols, Metrics, and Target Values for Fine Particulate Matter Air Sensors: Use in Ambient, Outdoor, Fixed Site, Non-Regulatory Supplemental and Informational Monitoring Applications. U.S. EPA Office of Research and Development, Washington, DC, EPA/600/R-20/280, 2021.
10. ASTM WK64899, New Practice for Performance Evaluation of Ambient Air Quality Sensors and Other Sensor-Based Instruments, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, <https://www.astm.org>
11. Bachmann J. Managing Air Quality: Lessons from the American Experience. Collaborative Clean Air Policy Centre. 2019 Available from: <https://ccapc.org.in/policy-briefs/2019/us-experience-bachmann:14>.
12. EPA (2021). A Guide to Siting and Installing Air Sensors. Available at: <https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/guide-siting-and-installing-air-sensors> (Accessed: 7th September, 2021)

Annexe

A. Mesurer le biais, l'exactitude et la précision

Courbes d'étalonnage

Les courbes d'étalonnage peuvent être établies en utilisant les données issues de la colocalisation des capteurs avec des instruments de référence. Une analyse de régression linéaire simple (RLS), comme celle présentée sur la Figure A1, utilisant les relevés des données brutes pendant exactement la même durée de surveillance peut être utilisée pour élaborer des facteurs d'étalonnage. Les facteurs d'étalonnage dérivés d'équations mathématiques peuvent aussi être utilisés pour corriger les données des capteurs. Pour un étalonnage plus robuste, la régression linéaire multiple (RLM) permet d'inclure d'autres facteurs qui peuvent avoir une influence sur les mesures de la concentration en polluant, comme l'humidité et la température. Il faut noter que le facteur d'étalonnage peut évoluer avec les conditions environnementales et qu'il peut être nécessaire de refaire des étalonnages.



Equation d'étalonnage

$$y = 1.692x - 2135$$

Où 'y' est la concentration de PM_{2.5} de référence ; 'x' est la concentration de PM_{2.5} obtenue par les capteurs ; '1.692' est la pente ; Le coefficient R² est le coefficient de régression linéaire qui mesure la proximité des données à la droite de régression

Figure A1. Illustration d'une courbe d'étalonnage pour des données collectées lors de la colocalisation d'un capteur et d'un instrument de référence

La racine de l'erreur quadratique moyenne (REQM)

La REQM est une mesure de l'exactitude du modèle d'étalonnage qui peut être calculée en utilisant les concentrations prévues et celles de référence.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i (p_i - y_i)^2}{n}}$$

Où p_i est la valeur individuelle prédite, y_i est la valeur individuelle observée, et n est le nombre total d'observations dans le modèle

Biais

Le biais est le résultat obtenu à partir des données du capteur concernant les concentrations de polluant qui ne représente pas les concentrations réelles. C'est une erreur systématique dans les mesures qui donne pour résultat des mesures de concentration, soit plus élevées soit plus faibles pour tous les points de données avec une valeur d'écart fixe. Le biais doit être calculé régulièrement et de préférence à chaque étalonnage. La Figure A1 montre un graphique qui représente le biais dans les données d'un capteur.

Le biais peut être estimé en utilisant la formule suivante :

$$B = \left(\frac{C}{C_R} \right) - 1$$

Où B est le biais, C est la concentration moyenne de polluant mesurée par le capteur et C_R est la concentration moyenne du même polluant mesurée par l'instrument de référence.

Précision

La précision des données mesurées donne des informations sur le caractère répétable des concentrations mesurées lorsque le capteur est utilisé pour collecter des données plusieurs fois dans les mêmes conditions. Une durée de mesure courte sur un intervalle de 1 seconde peut avoir pour résultat une précision plus faible, qui peut être corrigée dans une certaine mesure en regroupant les données sous la forme de moyennes toutes les 5 minutes.

$$P = \left(\frac{C_s}{C_m} \right)$$

Où P est la précision, C_s est l'écart-type et C_m est la moyenne des mesures pour une concentration fixe.

B. Résumé des conseils pour guider l'élaboration d'une proposition de projet et l'évaluation des propositions d'offres de services

Cette partie a pour objectif d'éclairer l'élaboration des parties d'un appel d'offres sur la mise en place d'un réseau de capteurs de mesure de la qualité de l'air qui portent sur l'évaluation et les éléments techniques. Elle fournit un exemple du cadre nécessaire pour demander au fournisseur ses qualifications et son expérience et pour évaluer les offres reçues. Vous y trouverez des checklists des tâches, des services et des caractéristiques techniques qu'un organisme de réglementation peut demander à un fournisseur. Le modèle fourni peut être utilisé comme point de départ et être adapté en fonction des objectifs et du contexte du projet.

Critères d'évaluation d'une proposition

Les critères suivants peuvent être utilisés pour évaluer les offres de services reçues :

1. Étendue des services et de l'assistance couverts par l'offre
2. Performance et expérience démontrées dans un contexte pertinent
3. Antécédents de fourniture des mêmes services dans le pays/la région
4. Durée de la garantie et temps de traitement des réparations/remplacements
5. Qualité des données et facilité d'accès aux données
6. Coût total

Qualifications et expérience du fournisseur

Expériences passées

1. Faire la liste des projets passés réalisés avec les mêmes capacités
2. Pour chaque projet, inclure dans l'offre :
 - a. Une courte description
 - b. Le nom et les coordonnées des organisations clientes
 - c. Les dates de la fourniture de services
 - d. Les résumés des rapports ou des publications
 - e. Autorisation de contacter le client ? Oui Non

Démonstration de performance

Les candidats peuvent inclure les informations suivantes pour démontrer leurs performances passées :

- Publications revues par des pairs
- Rapports ou livres blancs publiés par des organisations indépendantes

- Certification de la technologie des capteurs basée sur des normes de performance définies par des agences gouvernementales et des associations
- Données probantes démontrant les performances des capteurs dans des conditions similaires en termes de pollution et de météorologie (comme décrit dans le cahier des charges)
- Preuves de l'évaluation des performances des capteurs par une organisation crédible
 - L'évaluation comprend-elle une évaluation sur le terrain ? Oui Non
 - Nom(s) de la ou des organismes d'évaluation :
 - À quelle date et sur quelle durée a eu lieu chaque évaluation ?

Expérience personnelle

Décrivez dans l'offre de services votre expérience personnelle pour chaque niveau de services d'assistance proposés.

Localisation des services de support client

Listez les lieux et les coordonnées des bureaux locaux et régionaux ainsi que les temps de traitement des plaintes et des demandes de remplacement.

Ajouts potentiels au cahier des charges

(à compléter par l'organisation publiant l'appel d'offres)

Contexte et objectifs

- Localisation principale de l'étude _____
- Objectif du réseau de capteurs _____
- Durée de l'étude _____
- Remarque : en général, une durée de 12 à 24 mois est la durée minimum nécessaire pour prendre des mesures dans des conditions diverses au cours de plusieurs saisons différentes. Il peut être intéressant d'envisager des options pour prolonger l'étude.
- Polluants qui vont être mesurés _____
- Nombre de capteurs _____
- Localisation des sites d'installation des capteurs (si disponible) _____
- Données auxiliaires nécessaires (sur les conditions météorologiques, les émissions, etc.) _____

Caractéristiques techniques des capteurs

Cocher la ou les cases pour lesquelles des informations sont fournies/des services sont inclus et fournir des détails supplémentaires dans la proposition d'offre de services.

- Performance du capteur
 - Préciser le biais, la précision, la corrélation et la racine de l'erreur quadratique moyenne (REQM) et fournir les données justificatives dans le cadre de votre proposition
Biais _____
Précision _____
Coefficient de corrélation minimum (avec l'instrument de référence) _____
REQM max _____
- Disponibilité du capteur
 - Préciser le taux moyen d'exhaustivité des données du capteur _____
Fournir les données justificatives dans le cadre de la proposition.
 - Remarque : le taux d'exhaustivité des données minimum doit être de 75 % c'est-à-dire que le capteur doit fonctionner et produire des données valables au moins 75 % du temps.
- Étalonnage des données
 - Décrire dans la proposition la façon dont les données sont étalonnées _____
 - Préciser la fréquence et les étapes du processus d'étalonnage des données _____
- Électricité et télécommunication
- Comment le capteur est-il alimenté en électricité ?
 - Panneaux solaires _____
 - Réseau électrique _____
 - Batterie _____
 - Dans le cas d'une batterie intégrée, préciser le temps nécessaire à sa charge complète _____

Comment les données sont-elles transmises ? (Cocher la réponse qui s'applique)

- Par Wifi _____
Coût pris en charge par le fournisseur?
 Oui Non
- Par réseau mobile _____
Coût pris en charge par le fournisseur?
 Oui Non

- Autres caractéristiques
 - Préciser la résolution temporelle des données _____
 - Remarque : le minimum requis est une fréquence de 1 minute
 - Préciser le format sous lequel les données sont stockées _____
 - Remarque : les données doivent être stockées sous un format lisible par les machines (par ex. csv)
 - Toutes les infrastructures de soutien c'est-à-dire l'installation, le montage, le support matériel doivent être incluses dans le devis.
 - Le capteur doit être étanche et doit pouvoir fonctionner par beau temps, dans le froid et sous la pluie.
 - Le fournisseur doit fournir le mode d'emploi et le manuel qui expliquent l'installation, le fonctionnement, la réparation des capteurs et la façon dont on accède aux données enregistrées.

Services d'installation

Cocher la ou les cases appropriées correspondant aux services fournis.

- Localisation : le fournisseur choisira les sites d'installation des capteurs en fonction des spécificités du projet et sera responsable de la mise en place de l'alimentation électrique, des infrastructures de soutien, de la rédaction des accords nécessaires pour avoir accès aux sites et devra garantir la sécurité et un accès sûr. Les sites choisis devront être représentatifs de la qualité de l'air dans la zone étudiée et devront présenter le moins d'interférences possible de leur environnement.
- Colocalisation sur le site des instruments de référence : Le fournisseur installera et fera fonctionner les capteurs à côté du site de référence avant le début du projet. Tous les capteurs qui ne répondent pas au cahier des charges seront remplacés par le fournisseur.
- Installation sur les sites choisis : Le fournisseur installera les capteurs sur les sites choisis. Il sera responsable des infrastructures nécessaires pour cette installation. Le fournisseur confirmera que chaque capteur fonctionne correctement une fois l'installation réalisée et documentera les conditions d'installation sur le site, la localisation et la hauteur.

Éléments essentiels à prendre en compte pour la rédaction d'un appel d'offres et l'évaluation des propositions d'offre de services

- S'assurer que les propositions de chaque fournisseur indiquent clairement les services support qui sont inclus (ou pas) dans leur devis.
- Les fournisseurs doivent aussi fournir des informations sur les coûts de remplacement des capteurs et les services fournis si la durée du projet dépasse la durée de la garantie.
- Préférer des fournisseurs dont le service client est local pour garantir un délai de traitement plus court des demandes de remplacement et de réparation des capteurs (afin de garantir la qualité des données).
- Demander quels sont les services complémentaires que les fournisseurs peuvent proposer (par ex. le choix des sites d'installation, la colocalisation avec des instruments de référence et l'installation sur site des capteurs).
- Les fournisseurs doivent présenter des preuves de la vérification/de l'évaluation de leurs CFC par une ou plusieurs organisations indépendantes et crédibles.
- Les fournisseurs doivent fournir des données sur les évaluations réalisées dans des contextes comparables pour étayer leurs revendications de performance sur le terrain. Il s'agit de s'assurer qu'il existe des données probantes sur la performance des CFC dans des conditions de pollution et des conditions météorologiques similaires.
- Les fournisseurs ne doivent pas proposer des modèles de capteurs uniques ou expérimentaux.

Maintenance et services liés à la garantie

- Préciser la durée de la garantie _____ (minimum 12 mois)
- Préciser le coût d'une garantie supplémentaire _____

Cocher les cases pour indiquer quels sont les services inclus dans la garantie.

- Maintenance régulière sur site.
Préciser à quelle fréquence cette maintenance aura lieu _____
- Prise en charge du coût du remplacement des capteurs (envois, installation, etc.)
Préciser le délai de traitement pour les demandes de réparation et de remplacement _____
Les frais d'envoi sont-ils couverts par la garantie ? _____

Éléments essentiels à prendre en compte pour la rédaction d'un appel d'offres et l'évaluation des propositions d'offre de services

- S'assurer que les propositions de chaque fournisseur indiquent clairement les services support qui sont inclus (ou pas) dans leur devis.
- Les fournisseurs doivent aussi fournir des informations sur les coûts de remplacement des capteurs et les services fournis si la durée du projet dépasse la durée de la garantie.
- Préférer des fournisseurs dont le service client est local pour garantir un délai de traitement plus court des demandes de remplacement et de réparation des capteurs (afin de garantir la qualité des données).
- Demander quels sont les services complémentaires que les fournisseurs peuvent proposer (par ex. le choix des sites d'installation, la colocalisation avec des instruments de référence et l'installation sur site des capteurs).
- Les fournisseurs doivent présenter des preuves de la vérification/de l'évaluation de leurs CFC par une ou plusieurs organisations indépendantes et crédibles.
- Les fournisseurs doivent fournir des données sur les évaluations réalisées dans des contextes comparables pour étayer leurs revendications de performance sur le terrain. Il s'agit de s'assurer qu'il existe des données probantes sur la performance des CFC dans des conditions de pollution et des conditions météorologiques similaires.
- Les fournisseurs ne doivent pas proposer des modèles de capteurs uniques ou expérimentaux.

Services de données

Cocher les cases appropriées pour indiquer quels sont les services inclus.

REMARQUE : les données doivent être enregistrées sous un format lisible par les machines (par ex. csv)

- Un système de gestion des données
Décrire le système de gestion des données dans la proposition d'offre de services _____
- Un portail de données en ligne
 - Préciser le nombre maximum d'utilisateurs (s'il y en a un) _____
 - Le portail est
 - public privé les deux options sont incluses
- Des services d'étalonnage des données
 - Préciser la fréquence des étalonnages _____

-
- Décrire la façon dont les données brutes et étalonnées seront stockées et comment on pourra y accéder (dans la proposition) _____
 - Une application mobile
 - L'application est
 - publique privée les deux options sont incluses
 - L'application fonctionne avec
 - Android iOS les deux
 - Conservation des données
 - Préciser la durée pendant laquelle les données seront stockées _____
 - Décrire la façon dont les données seront stockées et comment on pourra y accéder (dans la proposition) _____
 - Des contrôles qualité (requis)
 - Décrire le protocole des contrôles qualité (dans la proposition)
 - Des alarmes et des alertes
 - Décrire les types d'alertes disponibles (par ex. e-mails/SMS quand le capteur ne fonctionne pas ou qu'il y a des concentrations très élevées).
 - Une interface du programme d'application

Les services de formation

- Préciser si la formation a lieu en distanciel ou en présentiel _____
Combien de temps faut-il prévoir pour la formation ? _____
- Des déplacements sont-ils à prévoir ? _____

Cocher les cases appropriées concernant les formations proposées :

- Installation des capteurs, fonctionnement et maintenance
- Accès aux données
- Spécificités du portail internet et fonctionnement
- Procédures et méthodes d'étalonnage
- Protocoles de colocalisation
- Autres. Préciser _____

Support client

Cocher les cases appropriées concernant le support client fourni :

- Assistance téléphonique
Coordonnées _____
- Assistance en dehors des heures de bureau
Coordonnées _____
- Examen et analyse des données





L'utilisation intégrée des capteurs à faible coût pour améliorer la gestion de la qualité de l'air

