LCSQA

Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air

EXPLOITATION DES DONNEES DE LA BASE NATIONALE CAPT'AIR POUR LE RECENSEMENT DES EXPERIMENTATIONS DE CAPTEURS POUR LA QUALITE DE L'AIR

INERIS maîtriser le risque pour un développement durable

LNE Laboratoire National de Métrologie et d'Essais

IMT Lille Douai École Mines-Télécom IMT-Université de Lille

"L'expertise au service de la qualité de l'air"

Laboratoire Central de Surveillance
de la Qualité de l'Air

EXPLOITATION DES DONNEES DE LA BASE NATIONALE CAPT'AIR POUR LE RECENSEMENT DES EXPERIMENTATIONS DE CAPTEURS POUR LA QUALITE DE L'AIR

HARB Pamela, BOSSUYT Cédric

IMT Lille Douai

Septembre 2021

Vérification : REDON Nathalie, MATHE François, CRUNAIRE Sabine, SPINELLE Laurent
Approbation : LOCOGE Nadine, MARCHAND Caroline, MACE Tatiana

MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
Liberté
Égalité
Fraternité

LE LABORATOIRE CENTRAL DE SURVEILLANCE DE LA QUALITE DE L'AIR

Le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air est constitué des laboratoires de l'IMT Lille Douai, de l'Ineris et du LNE. Il mène depuis 1991 des études et des recherches à la demande du Ministère chargé de l'environnement, et en concertation avec les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA). Ces travaux en matière de pollution atmosphérique ont été financés par la Direction Générale de l'Énergie et du Climat (bureau de la qualité de l'air) du Ministère chargé de l'Environnement. Ils sont réalisés avec le souci constant d'améliorer le dispositif de surveillance de la qualité de l'air en France en apportant un appui scientifique et technique au ministère et aux AASQA.

L'objectif principal du LCSQA est de participer à l'amélioration de la qualité des mesures effectuées dans l'air ambiant, depuis le prélèvement des échantillons jusqu'au traitement des données issues des mesures. Cette action est menée dans le cadre des réglementations nationales et européennes mais aussi dans un cadre plus prospectif destiné à fournir aux AASQA de nouveaux outils permettant d'anticiper les évolutions futures.

TABLE DES MATIERES

RESUME **7**

ABSTRACT **9**

REMERCIEMENTS ET COLLABORATIONS **10**

1. INTRODUCTION **11**

1.1 Termes et définitions 11

1.2 Contexte général 11

2. STRUCTURATION ET FONCTIONNEMENT DE CAPT'AIR **13**

3. RECENSEMENT DES BASES DE DONNEES EXISTANTES POUR LES SYSTEMES CAPTEURS ET COMPARAISON AVEC CAPT'AIR **15**

3.1 Echelle internationale 15

3.2 Echelle européenne 17

3.3 Echelle nationale 17

3.4 Comparaison avec Capt'Air 18

4. EXPLOITATION STATISTIQUE DES DONNEES CAPT'AIR **19**

4.1 Evolution du nombre d'expérimentations recensées sur Capt'Air 19

4.2 Contribution à la base de données Capt'Air 20

4.3 Commercialisation des systèmes capteurs 21

4.4 Systèmes capteurs et expérimentations associées 21

4.5 Polluants étudiés 22

4.6 Objectifs associés à la réalisation des expérimentations 23

4.7 Environnement étudié 24

4.8 Durées et périodes de mesure associées aux expérimentations recensées 26

4.9 Taux de remplissage des champs 27

4.10 Exploitation statistique des expérimentations menées avec des systèmes capteurs pour la mesure des concentrations en $PM_{2,5}$ 28

4.11 Exploitation statistique des expérimentations menées avec des systèmes capteurs pour la mesure des concentrations en PM_{10} 34

4.12 Exploitation statistique des expérimentations menées avec des systèmes capteurs pour la mesure du NO_2 37

4.13 Exploitation statistique des expérimentations menées avec des systèmes capteurs pour la mesure de l'O_3 40

5. RETOURS D'EXPERIENCE ET EVOLUTIONS 42

6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES..... 45

7. REFERENCES..... 47

8. LISTE DES ANNEXES..... 49

RESUME

Ce rapport présente une synthèse des informations disponibles dans la base de données Capt'Air mise en place depuis 2019 pour recenser des systèmes capteurs utilisés pour l'évaluation de la qualité de l'air et des expérimentations menées en laboratoire ou sur le terrain avec ces derniers.

La première partie établit une comparaison avec d'autres bases de données nationales ou internationales permettant de bien cerner les forces, mais également certaines limites de Capt'Air. Les principaux avantages de Capt'Air résident dans le fait que c'est une base de données évolutive et qu'elle est complétée par des utilisateurs expérimentés, membres du dispositif national de surveillance de la qualité de l'air (AASQA et LCSQA). L'hétérogénéité des protocoles tests est aussi un fort de Capt'Air. En effet, le fait que les expérimentations recensées sont menées selon différents protocoles permet de pouvoir extrapoler les performances de certains usages définis. Néanmoins, Capt'Air montre également quelques limitations comme l'absence d'informations sur certains paramètres fondamentaux (reproductibilité, taux de recouvrement de données etc..) Ou encore le manque d'informations sur les protocoles utilisés pour les expérimentations renseignées qui peut laisser à interprétation les résultats consignés.

Puis, une exploitation statistique des informations disponibles dans la base de données montre que les polluants pour lesquels des expérimentations sont renseignées, sont principalement les polluants réglementés au sens de la Directive 2008/50/CE et plus particulièrement les $PM_{2,5}$, les PM_{10} et le NO_2. De plus, la très grande majorité de ces expérimentations sont des évaluations métrologiques (80-90%), de courte durée (< 6 mois) et menées en air ambiant extérieur (>70%). Pour finir, il est à noter que plus de 60% des 69 systèmes capteurs recensés ne sont associées qu'à 1 à 2 expérimentations.

Par ailleurs, une analyse plus fine des données présentes dans Capt'Air a permis d'identifier les systèmes capteurs présentant les meilleures performances globales vis-à-vis de plusieurs critères qualitatifs (mise en œuvre, versatilité, énergie et fiabilité) et quantitatifs (R2Max et pente associée à R2MAX)[1]. On retrouve notamment :

- l'ATMOTRACK version 1.2 et le POLLUTRACK pour la mesure des concentrations massiques en $PM_{2,5}$;
- l'ATMOTRACK version 1.2 pour la mesure des concentrations massiques en PM_{10} ;
- le système WT1 de RUBIX et le CAIRNET V2 pour la mesure des concentrations en NO_2 ;
- l'AQMESH version 4.0 pour la mesure des concentrations en O_3.

Enfin, au regard des résultats de l'exploitation ainsi que d'un premier retour d'expérience des utilisateurs de Capt'Air, des évolutions sont envisagées afin d'améliorer la base de données. La possibilité de faire une recherche en fonction de l'utilisation envisagée (cartographie, amélioration de la couverture spatiale et/ou temporelle etc..) fait partie des pistes de réflexion principale.

[1] On note qu'il ne s'agit pas ici d'un jugement mais uniquement d'une extraction des informations renseignées et donc sur un nombre restreint et non exhaustif de systèmes et d'expérimentations.

ABSTRACT

This report presents a review of the database Capt'Air set up since 2019 to identify sensor systems used for the assessment of air quality and experiments carried out in the laboratory or in the field with them.

In the first section, a comparison with other data bases from all around the world puts forward strength but also limitations of Capt'Air. The main advantages of Capt'Air come from its own definition. Indeed, Capt'Air is meant to be an evolutive database filled out by members of the national air monitoring network (LCSQA and AASQA). The heterogeneity of experimental protocols is also a strength of Capt'Air. Indeed, the fact that the identified experiments are carried out according to different protocols makes it possible to extrapolate performances for certain defined uses. However, Capt'Air also shows some limitations such as some missing fundamental information (reproducibility, data recovery rate, etc..) Or the lack of information on the protocols used for the informed experiments which may leave the recorded results open to interpretation.

At this stage, the statistical exploitation of the database shows that $PM_{2.5}$, PM_{10} and NO_2 are the main pollutants studied in Capt'Air. Moreover, the majority of experiments are short metrological experiments with ambient outdoor air[2]. Another point is the fact that a lot of sensor system found in Capt'Air are associated with only few experiments.

Sensor system with best performances regarding some qualitative (implementation, versatility, energy and reliability) and quantitative (R2MAX and slope associated to R2MAX) criteria are also put forward. We found in particular:

- ATMOTRACK 1.2 and POLLUTRACK for $PM_{2.5}$,
- ATMOTRACK 1.2 for PM_{10},
- RUBIX WT1 and CAIRNET V2 for NO_2,
- AQMESH 4.0 for O_3.

Finally, based on the statistical exploitation results and also a feedback from Capt'Air users, upgrades are considered in order to develop the database. A reflection will be undertaken on the possibility to do a search based on considered use

[2] We insist that this is not a judgment but only an extraction of the information provided on a limited and non-exhaustive number of systems and experiments.

REMERCIEMENTS ET COLLABORATIONS

Nous tenons à remercier M. Franck Tempet et M. Alban Guinard pour les développements informatiques et la gestion de la base de données Capt'Air.

Nous remercions également M. Arnaud Dussart (société The Loop), M. Bertrand Devigne, M. Médéric Baron et M. David Gille pour la gestion des certificats de sécurité.

Enfin, nous remercions les contributeurs AASQA et LCSQA qui permettent de faire vivre Capt'Air par les renseignements exhaustifs qu'ils y portent ainsi que l'ensemble des utilisateurs qui permettent de faire évoluer l'outil pour le rendre plus fonctionnel et utile.

1. INTRODUCTION

1.1 Termes et définitions

Les travaux du Groupe d'experts AFNOR sur les capteurs AFNOR/X43D-GECapteurs, démarrés en 2020 et auxquels participent notamment des membres du LCSQA et des AASQA, visent à rédiger un premier fascicule de documentation (FD) incluant un ensemble de définitions relatives à l'utilisation de dispositifs de type « 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 pollutions spécifiques (atmosphères de travail).

La définition actuelle donnée au terme « capteur » est la suivante : « 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 ». L'élément sensible correspond au dispositif intégré au capteur permettant d'obtenir un signal associable à la concentration d'un polluant recherché dans l'air.

La définition pour le terme « système capteur » est la suivante : « 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 » (FD X43-121, version soumise à consultation, mai 2021).

Dans le présent document, c'est le terme « système capteur » qui est utilisé.

1.2 Contexte général

L'accroissement du marché des systèmes capteurs contribue à l'adoption de ces outils pour des initiatives citoyennes et par de nombreux organismes privés et publics pour la surveillance de la qualité de l'air ambiant [1]. Parfois même ces systèmes sont associés à des travaux de recherche. Ces technologies émergentes constituent, depuis quelques années, des outils alternatifs aux méthodes de mesures conventionnelles avec parmi les principaux avantages la possibilité d'améliorer la résolution spatiale et/ou temporelle des mesures et de permettre la mise en place d'une évaluation de la qualité de l'air dans des zones reculées ou mal renseignées.

L'évolution du suivi de la qualité de l'air, passant de la couverture réglementaire avec des instruments de référence, à des réseaux mixtes impliquant à la fois ces mêmes instruments en association à des systèmes capteurs, a été reconnu depuis plusieurs années notamment aux Etats-Unis [2]. L'émergence de ces technologies a également été observée en Europe. Des systèmes capteurs ont été développés et testés en comparaison avec des méthodes de référence dans plusieurs initiatives européennes telles que le projet COST TD 1105 (EuNetAir - European Network on New Sensing Technologies for Air-Pollution Control and Environmental Sustainability) [3]. Le Joint Research Center (JRC), a publié en 2019 une synthèse d'essais de comparaison de systèmes capteurs à des instruments de référence intitulée « Review of sensors for air quality monitoring »[3]. La synthèse est focalisée sur les systèmes capteurs mesurant les PM, O3, NO2 et CO. Les performances de 110 capteurs commercialisés ont été comparées sur la base d'un ensemble de critères à savoir : le coefficient de détermination (R^2) correspondant à une régression linéaire classique, l'accès aux données et la possibilité de les ajuster, l'aptitude à mesurer plusieurs polluants avec un système unique et le prix du système capteur. Cette comparaison a abouti à identifier le modèle AirSensEUR v.2 comme étant le système capteur le plus performant.

Cependant, pour pouvoir intégrer la mesure des systèmes capteurs dans le cadre réglementaire de la surveillance de la qualité de l'air ambiant telle que décrite dans les Directives Européennes 2008/50/CE du 21 mai 2008 et 2015/1480 (UE) du 28 août 2015, ces instruments doivent démontrer leur comparabilité aux différentes méthodes citées dans les Directives et satisfaire aux objectifs de qualité des données correspondants [4]. Néanmoins, dans les discussions en cours pour la révision des Directives, la Commission Européenne devrait clarifier les conditions de mise en œuvre des différentes méthodes de surveillance de la qualité de l'air ambiant [5]. Dans ce contexte, il est attendu que les systèmes capteurs puissent être mentionnés pour la première fois dans les futures directives sur la qualité de l'air.

Au regard de l'adoption de ces technologies pour la surveillance de la qualité de l'air, les études de performances des systèmes capteur sont essentielles afin de s'assurer que les systèmes capteurs répondent aux objectifs de mesure assignés, qu'il s'agisse de la surveillance de l'air ambiant ou d'autres domaines d'utilisation (ex. : air intérieur…) [6-8]. De ce fait, des bases de données, telles que Capt'Air, qui recensent des études réalisées avec des capteurs ou des systèmes capteurs s'avèrent d'une grande utilité afin de pouvoir comparer leurs performances et juger de leur adéquation avec un usage donné.

Ce rapport est dédié à l'étude des informations présentes dans la base de données Capt'Air. Dans un premier temps, une comparaison à d'autres bases de données ou systèmes de collecte d'informations sur les systèmes capteurs existants est effectuée afin de définir les points communs, les différences et les complémentarités avec Capt'Air. Ensuite, une exploitation des données disponibles dans Capt'Air est proposée pour réaliser une synthèse facilement assimilable des performances des systèmes capteurs et de l'atteinte des objectifs fixés lors des expérimentations menées en laboratoire ou sur le terrain. Enfin, les résultats d'une enquête lancée en mars 2021 auprès des utilisateurs de Capt'Air sont présentés afin de constituer un premier retour d'expériences et de proposer des axes d'amélioration pour l'outil Capt'Air.

[3] https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC116534

2. STRUCTURATION ET FONCTIONNEMENT DE CAPT'AIR

La structuration de Capt'Air a été décrite dans une précédente note[4] et est illustrée sur la Figure 1. Un système capteur est rendu unique par son fabricant, son modèle et son numéro de version. A ce système capteur peut être associée une ou plusieurs expérimentations portant chacune sur un polluant ciblé dans une situation donnée (période et lieu) et répondant à l'un ou l'autre des deux objectifs suivants :

- Evaluation métrologique consistant en la comparaison entre le système capteur et une méthode prise en référence ;
- Utilisation terrain permettant d'évaluer l'adéquation d'un système capteur pour un usage dans des conditions définies.

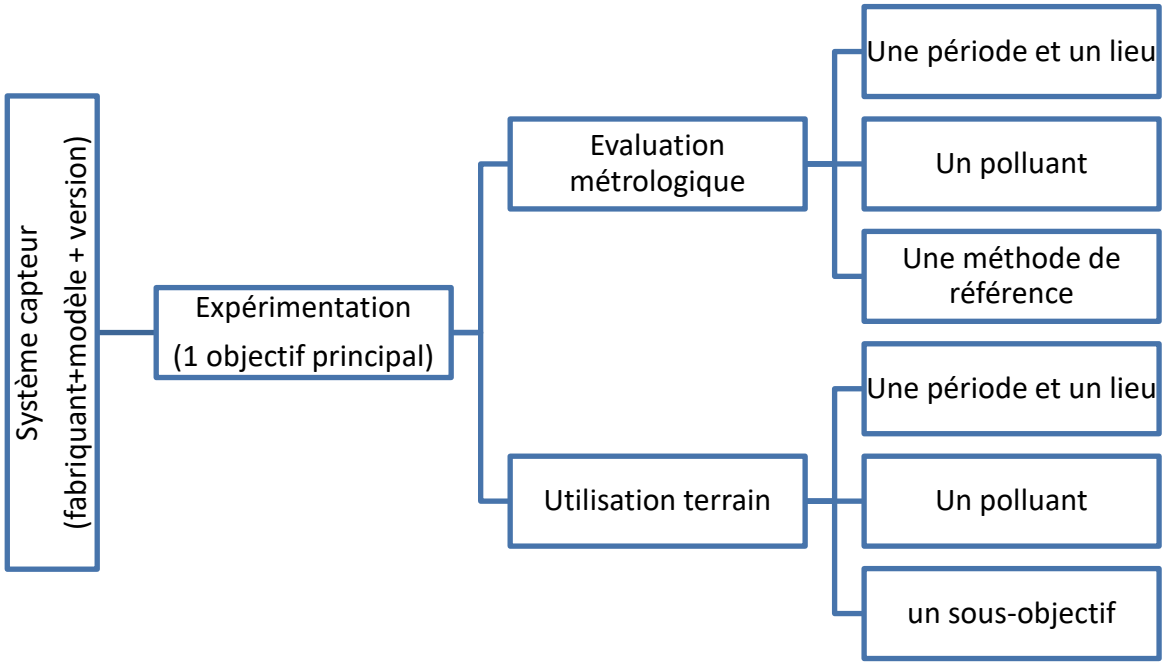

Figure 1 : Représentation schématique de la structuration de Capt'Air

Dans sa forme actuelle, Capt'Air se présente comme un système de recherche par filtre dont les résultats d'une recherche donnent en retour une liste de systèmes capteurs répondant aux critères sélectionnés. Ainsi, par exemple, quand un utilisateur réalise une recherche de systèmes capteurs pour la mesure des $PM_{2,5}$, le résultat obtenu sera une liste des systèmes capteurs renseignés dans Capt'Air pour mesurer ce polluant. En sélectionnant alors l'un des systèmes capteurs de la liste des résultats, une nouvelle liste présentant de l'ensemble des expérimentations (sans se limiter au seul polluant recherché) menées avec ce système capteur s'affiche. Une dernière étape de filtre permet de n'afficher que les études qui concernent le système et le polluant sélectionnés (voir Figure 2).

[4] https://www.lcsqa.org/fr/rapport/captair-la-base-de-donnees-nationale-pour-le-recensement-des-experimentations-de-capteurs

1) L'onglet Recherche permettant de de retourner à la page d'accueil (image ci-dessus) après avoir consulté une donnée
2) L'onglet mot de passe permettant de modifier son mot de passe dès la première connexion
3) L'onglet déconnexion permettant de se déconnecter de Capt'air
4) La liste des critères caractérisant les différents systèmes capteur, présentés en menus déroulant, le premier menu (« Principaux critères ») est déroulé par défaut
5) La liste des systèmes regroupant les systèmes capteur associés aux critères sélectionnés
6) La liste des expérimentations associées au système capteur sélectionné (EN CLIQUANT SUR UN SYSTEME CAPTEUR, LA LIGNE COMPLETE APPARAIT ALORS EN JAUNE)

Figure 2 : Capture d'écran d'une fenêtre de recherche par polluant (ici $PM_{2,5}$) et de son résultat obtenu dans Capt'Air

La sélection d'une expérimentation donnée permet d'accéder à des informations regroupées selon plusieurs catégories :
- "Détails des sous-éléments testés",
- "Qui a renseigné ?",
- "Caractéristiques générales de la configuration testée",
- "Objectifs du projet",
- "Détails concernant l'évaluation métrologique menée",
- "Utilisation terrain".

Il est à noter, qu'en fonction du ou des objectifs associés à l'expérimentation l'une ou les deux dernières catégories de la liste précédente peuvent être complétées. Un index à droite de l'écran permet d'accéder rapidement à chaque catégorie. Enfin, une fonction permet aussi d'exporter les résultats de recherche sous forme de fichier CSV afin d'être en mesure de les analyser sous tableur.

3. RECENSEMENT DES BASES DE DONNEES EXISTANTES POUR LES SYSTEMES CAPTEURS ET COMPARAISON AVEC CAPT'AIR

Un total de cinq bases de données, autres que Capt'Air, ont été identifiées. Trois sont à l'échelle internationale : deux bases de données américaines (AQ-SPEC[5] et EPA[6]) et une base de données chinoise (Sensing the Air Quality: Research on Air Quality Sensors[7]).

La base de données LIFE VAQQUMS[8] a été construite dans le cadre d'un projet européen et il y a une base de données française (AIRLAB à travers « challenge microcapteurs »[9]).

3.1 Echelle internationale

Deux bases de données de systèmes capteurs utilisées pour la surveillance de la qualité de l'air ambiant peuvent être identifiées aux États-Unis. Une a été constituée dans le cadre du programme AQ-SPEC et l'autre est issue de l'agence pour la protection de l'environnement (EPA).

Le **programme AQ-SPEC** « Air Quality Sensor Performance Evaluation Center » vise à évaluer les performances de capteurs commerciaux « à bas coût » sur la base de protocoles établis. Les expériences recensées dans cette base de données sont réalisées par la même équipe de travail et sont conduites suivant un protocole de tests bien défini selon deux étapes. La première étape est une évaluation sur le terrain des réponses des capteurs vis-à-vis de systèmes de référence pour la surveillance règlementaire de la qualité de l'air. Les capteurs qui présentent des performances « acceptables » (un $R^2 > 0,4$ et un taux de recouvrement de données > 75%) sont testés, dans un deuxième temps, au laboratoire dans une enceinte en parallèle avec des instruments de référence.

La base de données est séparée en deux bases distinctes, l'une portant sur les systèmes capteurs de polluants particulaires (particules, PM_1, $PM_{2,5}$ et PM_{10}) et l'autre sur les systèmes capteurs de polluants gazeux à savoir : O_3, CO, CO_2, NO, NO_2, SO_2, HCHO, COV, NH_3. A fin mai 2021, la base de données AQ-SPEC pour les capteurs particulaires regroupe 62 systèmes capteurs tandis que celle pour les capteurs gazeux regroupe 27 systèmes capteurs. Les résultats des études sont présentés sous forme de tableaux regroupant les critères suivants :

- modèle,
- prix du capteur,
- espèces testées,
- coefficient de détermination (R^2) pour l'approche terrain,
- coefficient de détermination (R^2) pour l'approche laboratoire (à noter que les R^2 laboratoire/terrain sont déterminés pour des régressions linéaires classiques),
- Erreur Absolue Moyenne pour les approches terrain (EAM terrain en $\mu g.m^{-3}$) et laboratoire (EAM laboratoire en $\mu g.m^{-3}$).

[5] http://www.aqmd.gov/aq-spec

[6] https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/evaluation-emerging-air-sensor-performance

[7] https://aqicn.org/sensor/

[8] https://vaquums.eu/sensor-db#b_start=0

[9] http://www.airlab.solutions/fr/projets/microsensor-challenge

De plus, les données concernant les systèmes capteurs de polluants gazeux sont complétées par une information sur le type de capteur. Ces résultats sont accompagnés d'un rapport d'essais au format pdf.

A noter qu'avec cette base de données, une recherche par fabricant, principe de mesure, type de polluant (gaz, particule) ou paramètre météorologique (température, humidité relative, pression) est possible. L'étude de cette base de données a montré un récent accroissement du nombre de systèmes capteurs répertoriés, passant de 69 systèmes capteurs mi-mars 2021 à 89 systèmes capteurs à fin mai 2021. La base de données AQ-SPEC semble donc être alimentée régulièrement.

Concernant la **base de l'EPA** « Environmental Protection Agency », les systèmes capteurs sont évalués sur leur capacité à mesurer les concentrations des polluants atmosphériques pour un objectif règlementaire et leur facilité d'usage. Les capteurs sont placés à proximité d'un système de référence de la qualité de l'air. Là encore, la base de données est répartie en deux bases de données distinctes, l'une regroupant les systèmes capteurs de polluants gazeux (O_3, CO, CO_2, NO, NO_2, SO_2) et l'autre regroupant les systèmes capteurs de polluants particulaires (PM_1, $PM_{2,5}$, PM_4, PM_{10}). A fin mai 2021, on dénombre 13 systèmes capteurs pour les polluants particulaires et 13 systèmes capteurs pour les polluants gazeux, soit 26 systèmes capteurs référencés au total. Les résultats sont présentés sous forme d'un tableau regroupant des critères liés à la conception du système et aux résultats d'essais de performance :

- Modèle du capteur,
- Principe de mesure,
- Détails de la mise en œuvre (résolution temporelle, unité de mesure, modalité de mesure : fixe, mobile),
- Typologie de localisation,
- Appareil de référence utilisé,
- Durée de test et durée d'agrégation,
- Coefficient de détermination (R^2) issu des régressions linéaires classiques.

En complément des résultats présentés, les liens vers les articles publiés des études réalisées sont donnés.

En Chine, le **projet « Sensing the Air Quality: Research on Air Quality Sensors »** recense 22 éléments sensibles, capteurs ou systèmes capteurs à fin mai 2021. Là encore, la base de données les regroupe selon deux catégories : polluants particulaires ($PM_{2,5}$ et PM_{10}) soit 16 capteurs et systèmes capteurs et polluants gazeux (O_3, CO et NO_2) soit 6 éléments sensibles. Les fiches techniques de chacun des systèmes, renseignant les principaux critères de conception et/ou d'utilisation tels que donnés par le fabricant, sont disponibles en cliquant sur la photo du système capteur. Les résultats sont présentés sous forme de séries temporelles hebdomadaires comparant la réponse de chacun des 22 éléments sensibles, capteurs ou systèmes capteurs à celles données par des appareils de référence.

3.2 Echelle européenne

La base de données constituée dans le cadre du projet européen LIFE VAQUUMS a pour objectif de déterminer les performances de systèmes capteurs $PM_{2,5}$, PM_{10}, NO_2 et O_3. Au démarrage du projet en 2017, un inventaire de systèmes capteurs utilisés dans le cadre de projets de recherche ou d'initiatives citoyennes a permis de répertorier 34 systèmes capteurs différents. Parmi eux et sur la base du retour d'expériences formulé par les différents utilisateurs, 18 systèmes capteurs ont été finalement retenus et ont subi des séries d'essais en laboratoire et sur le terrain. L'approche laboratoire vise à comparer la justesse des résultats capteurs par rapport à ceux d'un système de référence. Ensuite, les capteurs sont transférés sur site et testés dans une approche terrain visant également la comparaison des résultats des systèmes capteurs vis-à-vis d'un système de référence. Les résultats sont présentés sous la forme de rapports d'essai des performances. En complément de l'étude menée dans le cadre du projet, les travaux d'autres équipes faisant référence aux mêmes systèmes capteurs ont également été recensés et sont présentés sous la forme d'une liste de publications accompagnée de liens d'accès aux documents. A noter que sur cette base de données, seule une recherche des systèmes capteurs par espèce cible est possible.

3.3 Echelle nationale

La plateforme d'échanges et d'expérimentations AIRLAB® « accélérateur de solutions innovantes pour la qualité de l'air » est un projet partenarial coordonné par Airparif. Les systèmes capteurs représentent un des axes auxquels s'intéresse AIRLAB à travers notamment la réalisation de « challenge AIRLAB microcapteurs », qui se déroulent tous les ans depuis 2018. L'objectif de ces challenges est de mettre en comparaison à des systèmes pris en référence, de systèmes capteurs fournis par des participants volontaires, dans différents environnements d'application : air ambiant, air intérieur et air citoyen[10], tout en apportant des critères d'information et de choix pour les utilisateurs en fonction de leurs besoins. Le rapport annuel contient une double page d'information concernant chacun des systèmes capteurs évalués. Sur la première, on retrouve des informations générales telles que l'avis du jury, les polluants mesurés (non limité aux espèces règlementées), les autres mesures, ainsi qu'un diagramme d'évaluation comprenant cinq critères : le coût, l'encombrement, l'ergonomie, l'exactitude et la pertinence. La seconde page détaille ces différents critères. A noter que le protocole d'expérimentation est disponible[11], expliquant comment ont été réalisées les qualifications, mais aussi comment sont définis les différents critères étudiés et les notations associées.

[10] L'environnement « Air Citoyen » correspond à des usages comme la sensibilisation d'un individu à la pollution ou l'estimation de l'exposition personnelle pour évaluer les impacts sur la santé humaine de la pollution de l'air.

[11] http://airlab.solutions/sites/default/files/Protocole%20-%20Challenge_Microcapteurs%202021%20EN.pdf

3.4 Comparaison avec Capt'Air

La base de données Capt'Air[12] a été lancée en 2019 et est donc la plus récente des bases. Elle répond au besoin d'accéder de façon simple aux conclusions issues d'expérimentations menées en laboratoire ou sur le terrain avec des capteurs ou systèmes capteurs. Cette base de données permet le recensement et le partage d'informations sur les systèmes capteurs et les expérimentations (nationales et/ou internationales) menées à l'aide de ces derniers.

A la date du 15 mars 2021, Capt'Air regroupe un total de 139 systèmes capteurs répertoriés à partir de la littérature scientifique, des fiches techniques des fournisseurs ou des expérimentations menées dans le cadre des travaux menés par le LCSQA ou les AASQA. Cette base de données est alimentée au fil de l'eau par des contributeurs préalablement inscrits. Du point de vue des critères de performance renseignés, Capt'Air présente de nombreuses similitudes avec les autres bases de données citées précédemment, tant sur les critères liés à la conception (modèle, dimensions, espèces ciblées et prix du capteur) que ceux liés à l'utilisation (alimentation, connexion, récupération de données, etc.) ou encore ceux liés aux résultats d'essais de performances métrologiques notamment le coefficient de détermination R^2, le temps de réponse, la répétabilité et la reproductibilité, les polluants interférents et l'influence des paramètres environnementaux (température et humidité relative).

Néanmoins, Capt'Air présente plusieurs avantages par rapport à ces bases de données :

- Capt'Air dispose d'une interface web simple d'accès permettant un partage d'informations conséquent et rapide entre membres du dispositif et organismes autorisés ;
- Les expérimentations sont renseignées par des experts du dispositif national de surveillance de la qualité de l'air (LCSQA et AASQA) ce qui garantit un bon niveau de pertinence des informations portées ;
- Le nombre de systèmes capteurs renseigné sur Capt'Air est plus important et couvre un nombre de polluants et d'usages possibles plus grands que pour les autres bases identifiées ;
- Capt'Air est la seule base disposant d'un moteur de recherche permettant de discriminer les systèmes sur la base d'un grand nombre de paramètres (ex. : fournisseur, technologie, taille, type de polluant, etc.). De ce fait, Capt'Air est capable d'apporter de façon synthétique un maximum d'informations concernant les systèmes capteurs afin de pouvoir identifier clairement s'ils correspondent ou non aux besoins de l'utilisateur.
- Capt'Air est un outil informatique évolutif en fonction des nouveaux besoins ou usages à venir.

Cependant, deux principales limites de la base de données Capt'Air sont constatées :

- La disparité entre les protocoles de tests utilisés rend difficile la comparaison immédiate des résultats issus des expérimentations. Néanmoins, pour les autres bases de données identifiées les protocoles de tests ne sont également pas forcément renseignés ou ne sont pas forcément en adéquation avec l'usage envisagé ;

[12] https://captair-lcsqa.fr/

- Des informations sont parfois incomplètes ou manquantes (par méconnaissance ou par doute), notamment sur certains paramètres non-obligatoires qui pourraient être fondamentaux pour certains usages.

4. EXPLOITATION STATISTIQUE DES DONNEES CAPT'AIR

L'exploitation statistique présentée dans cette section correspond aux données renseignées dans Capt'Air depuis son lancement en 2019 et jusqu'à la mi-mars 2021. Durant cette période, 139 systèmes capteurs et 244 expérimentations ont été recensés. Toutefois près de 50% des systèmes capteurs recensés des ne sont pas encore associés à des expérimentations. Ces derniers ont donc été écartés de l'analyse statistique et ne rentrent pas dans le traitement de données présenté ci-après. Ainsi, l'étude a porté au final sur 69 systèmes capteurs différents pour un total de 244 expérimentations.

4.1 Evolution du nombre d'expérimentations recensées sur Capt'Air

Les expérimentations recensées dans Capt'Air ont été menées entre 2015 et 2020. La Figure 33 montre la répartition du nombre d'expérimentations en fonction des années de leur réalisation. La ligne verticale discontinue correspond au lancement de la base de données Capt'Air et sépare ainsi les expérimentations réalisées avant la mise en place de Capt'Air (« *avant Capt'Air* ») et les expérimentations réalisées après la mise en place de Capt'Air (« *après Capt'Air* »). La Figure 3 montre une augmentation significative du nombre d'expérimentations entre 2015 et 2019. 88% des expérimentations recensées sont réalisées en 2018 et 2019. Cette augmentation s'explique par l'augmentation de l'intérêt général et grandissant pour l'utilisation des systèmes capteurs. On note que le nombre d'expérimentations a presque doublé entre ces deux années et justifie ainsi encore plus l'utilité de Capt'Air en réponse à la tendance croissante d'utilisation des systèmes capteurs dans des études en lien avec l'évaluation de la qualité de l'air. La chute du nombre d'expérimentations menées en 2020 et renseignées dans Capt'Air peut avoir deux raisons : la diminution effective du nombre de campagnes dans un contexte mondial de crise sanitaire ou le décalage entre le traitement des données de l'expériementation et son porté à connaissance dans Capt'Air (i.e. l'étude est finalisée mais le traitement ou la publication des données sont en cours). Ces hypothèses pourront être vérifiées en fonction des résultats d'exploitation de Capt'Air à fin 2021.

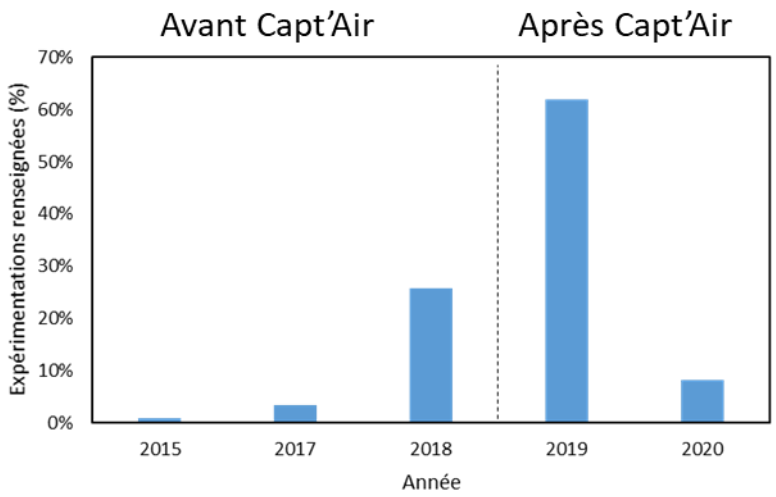

Figure 3 : Répartition des expérimentations renseignées dans Capt'Air en fonction de l'année de réalisation de l'étude (période 2015 et 2020).

4.2 Contribution à la base de données Capt'Air

L'ajout d'expérimentations dans Capt'Air est actuellement strictement réservé aux experts AASQA et LCSQA inscrits et ayant reçu un profil « contributeur ». Il est donc intéressant de regarder la répartition des expérimentations recensées dans Capt'Air par ces deux entités. Actuellement, environ deux tiers (69%) des expérimentations sont renseignées par les AASQA et un tiers (31%) par le LCSQA. La Figure 4 présente l'évolution de cette répartition entre 2018 et 2020. On constate que la part des AASQA a significativement augmenté à partir de 2019 ce qui met en avant l'accroissement de l'intérêt de cette base de données pour les AASQA.

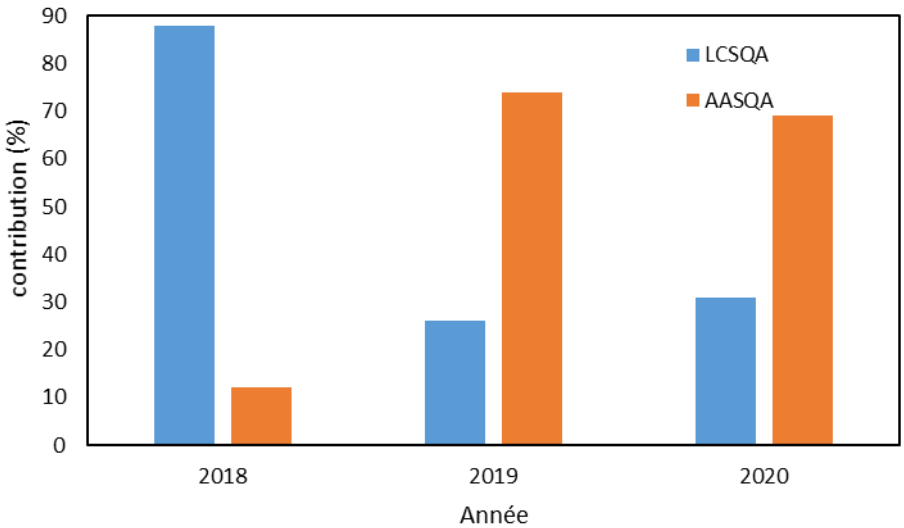

Figure 4 : Evolution de la répartition des contributions à Capt'Air par les AASQA et le LCSQA entre 2018 et 2020.

4.3 Commercialisation des systèmes capteurs

L'exploitation des champs « toujours commercialisé », « prix » et « coût de fonctionnement » permet d'avoir une vision sur la représentativité par Capt'Air du marché des systèmes capteurs en France.

On note que 84% des systèmes capteurs sont toujours commercialisés, que 9% ne le sont plus et que pour 7% le champ « toujours commercialisé » n'a pas été renseigné. De plus, un contrôle (via la consultation des sites web des fabricants et distributeurs) a été réalisé afin de déterminer si ce champ correspondait bien toujours à la réalité. Au total, 87% des systèmes capteurs présents dans Capt'Air sont toujours commercialisés à la date du 20 mai 2021, tandis que 13% d'entre eux ne le sont pas. Seuls trois systèmes capteurs étant « labellisés » comme « toujours commercialisés » dans Capt'Air ne le sont plus et aucun système capteur identifié comme « non commercialisé » ne l'est à cette date.

Par ailleurs, on note que pour les systèmes capteurs dont les prix d'achat sont renseignés (soit 50%), la fourchette est très large. Le prix moyen est de 3000€ mais avec une gamme de prix allant de 100 à 14 000€.

D'une autre part, les coûts de fonctionnement engendrés par l'utilisation de systèmes capteurs ont été évalués pour 23 systèmes uniquement et peuvent atteindre jusqu'à 4000€ par an. Les informations concernant les différents postes de coûts intégrés et la durée prise en compte pour leur établissement sont des éléments importants de comparaison qui manquent actuellement dans Capt'Air. L'ajout d'un champ dédié à ces précisions est prévu dans les prochaines évolutions de Capt'Air.

4.4 Systèmes capteurs et expérimentations associées

Le nombre d'expériences associées à un système capteur peut donner une indication sur son intérêt et conforter les conclusions sur ses performances globales. Plus ce nombre est important, plus le jugement donné sur les performances est fondé. Les diagrammes circulaires ci-dessous (Figure 55) montrent que quelle que soit la nature des polluants, gazeux ou particulaires, plus de 90% des systèmes capteurs sont associés à un nombre d'expérimentations inférieur ou égal à 5. Une minorité des systèmes capteurs est associée à plus de 5 expérimentations. Le modèle SDS011 de NOVAFITNESS, dédié à la mesure des polluants particulaires ($PM_{2,5}$ et PM_{10}), est le seul système capteur associé à plus de dix expérimentations. **Par conséquent, à ce stade, les conclusions tirées sur les performances globales des systèmes capteurs ne sont pas forcément extrapolables à toutes les utilisations.**

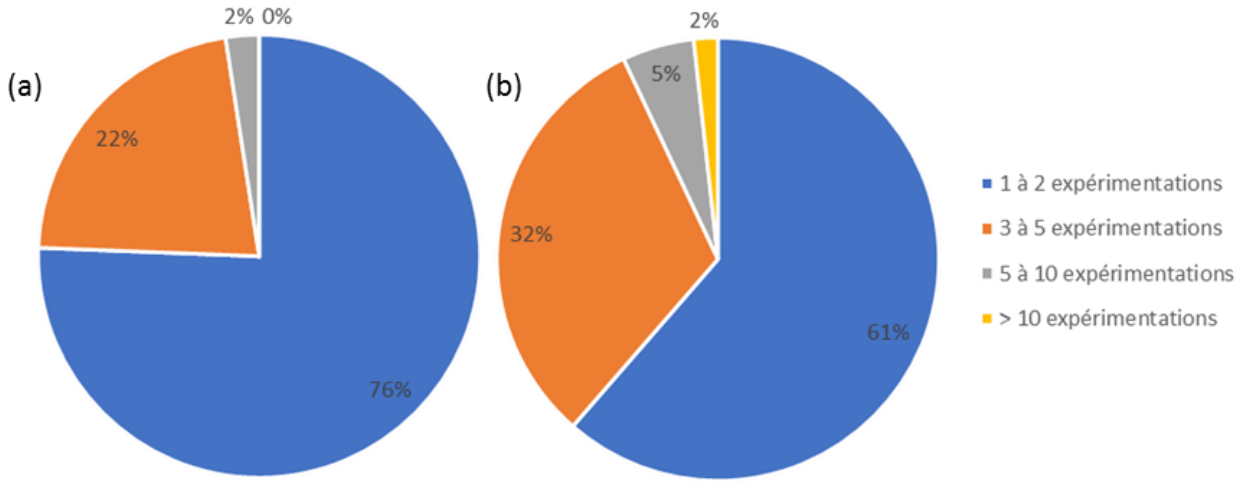

Figure 5 : Répartitions des systèmes capteurs de polluants gazeux (a) et particulaires (b) en fonction du nombre d'expérimentations auxquelles ils sont associés dans Capt'Air.

4.5 Polluants étudiés

La liste de polluants inscrits dans Capt'Air regroupe 33 espèces d'intérêt pour la surveillance de la qualité de l'air. Cette liste est présentée dans le Tableau 1. De cette liste, seuls 10 polluants ont donné lieu au renseignement d'expérimentations. Ces polluants sont marqués en gras dans le Tableau 1 et représentent pour la quasi-totalité des polluants réglementés pour la surveillance de l'air ambiant.

Tableau 1 : Liste des polluants inscrits dans Capt'Air et en gras liste des polluants pour lesquels des expérimentations y sont renseignées.

NH_3	**COVT**	BTX-BTEX	TSP
Hydrocarcures -HCT-HCNM	Composés soufrés	Amines	Black carbon
H_2S	Composés halogénés	Amides	**PM_1**
H_2O	Composés aromatiques	Aldéhydes	**$PM_{2,5}$**
Formaldéhyde	**CO_2**	Alcools	**PM_{10}**
Ethers	CH_4	Acides carboxyliques	SO_2
Esters	Cétones	**Particules***	**O_3**
NO_x	**NO_2**	**NO**	**CO**
Benzène			

*La mesure issue des systèmes capteurs est un comptage (nombre de particules par m^3)

Par ailleurs, le nombre d'expérimentations portant sur chacun de ces polluants est très variable. La Figure 66 représente la répartition par polluant des expérimentations renseignées dans Capt'Air. Cette figure montre que 74% des expérimentations recensées se focalisent sur les 3 polluants que sont les $PM_{2,5}$, PM_{10} et NO_2. On note que les expérimentations portant sur la mesure des $PM_{2,5}$ constituent 31% des expérimentations totales. Il est logique que les espèces réglementaires soient principalement concernées puisqu'il s'agit du périmètre de travail prioritaire des AASQA, mais cela renforce **l'intérêt d'ouvrir la base à d'autres structures publiques menant des expérimentations capteurs pour documenter les autres espèces (notamment pour la qualité de l'air intérieur).**

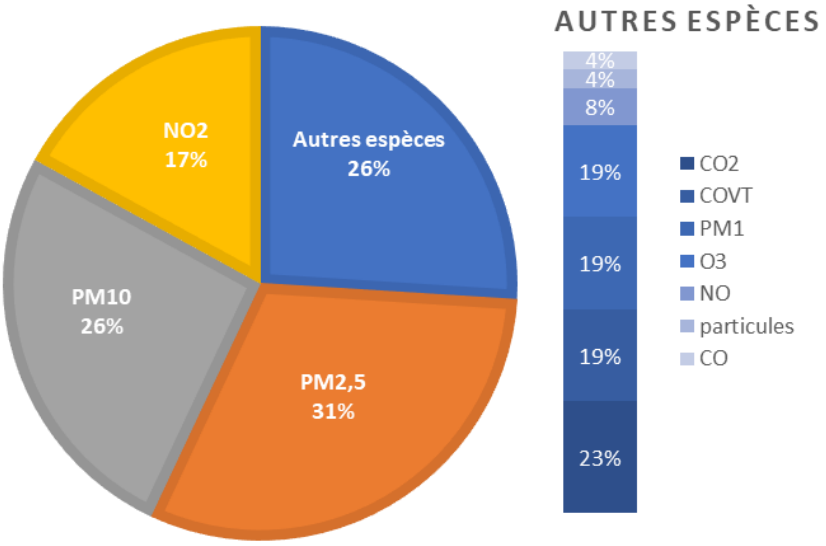

Figure 6 : Répartition par polluant des expérimentations renseignées dans Capt'Air

4.6 Objectifs associés à la réalisation des expérimentations

Dans Capt'Air, le choix de l'objectif principal associé à la réalisation d'une expérimentation peut se faire selon une liste de trois objectifs : « évaluation métrologique », « utilisation terrain » ou « évaluation métrologique et utilisation terrain ». Pour le traitement statistique des informations, les expérimentations qui sont associés au double objectifs « Evaluation métrologique et utilisation terrain » ont été dissociées en deux expérimentations distinctes.

Ainsi, 91% des expérimentations s'avèrent être destinés à effectuer une « évaluation métrologique » du système capteur contre uniquement 9% « d'utilisation terrain ». Cela s'explique probablement par le fait que l'utilisation des systèmes capteurs est une thématique en plein essor et que l'évaluation préalable de l'aptitude d'un système capteur à fournir des données fiables et utilisables avant son application est la préoccupation première des utilisateurs.

Par ailleurs, les objectifs principaux associés aux expérimentations peuvent être déclinés en sous-objectifs. Les Figure 77(a) et 7(b) montrent la répartition des expérimentations en fonction des différents sous-objectifs qu'il est possible de renseigner dans Capt'Air respectivement pour l'évaluation métrologique et l'utilisation terrain.

La Figure 7(a) révèle que la majorité des évaluations métrologiques sont réalisées afin de comparer les mesures des systèmes capteurs avec une méthode de référence. En effet cela permet d'établir une corrélation entre les mesures du système capteur et celle d'un appareil de référence et permet donc de renseigner les performances du système capteur.

La Figure 7(b) montre que les expérimentations associées à l'utilisation terrain des systèmes capteurs sont, en grande majorité, menées afin d'améliorer la couverture spatiale du territoire (57%). Une autre fraction non négligeable, soit environ un quart des expérimentations, sont réalisées dans le but d'évaluer la dynamique temporelle d'un polluant. L'usage envisagé pourrait être donc un paramètre de recherche d'un système capteur. Une réflexion d'évolution de la base pour permettre une recherche par usage ciblé va être lancée.

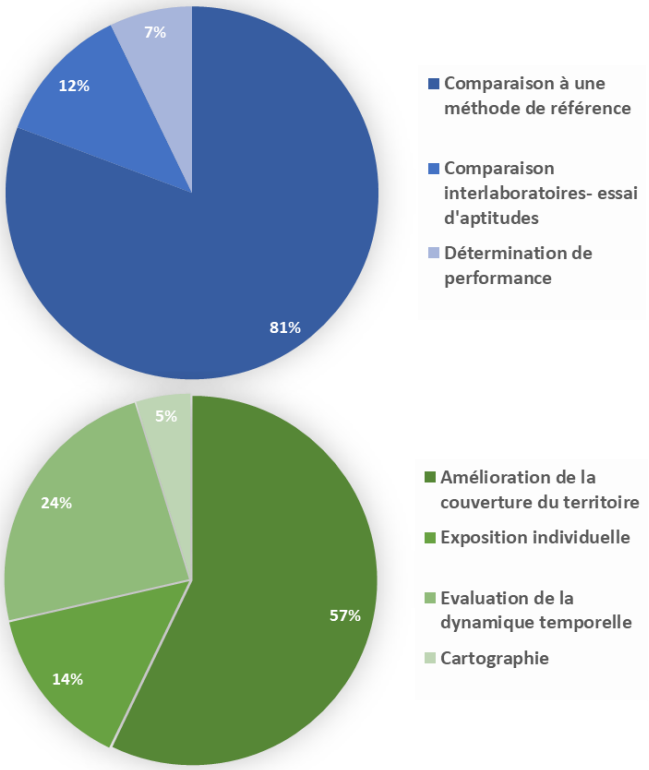

Figure 7 : Répartition par sous-objectifs du nombre d'expérimentations dont l'objectif principal est « évaluation métrologique » (a) ou « utilisation terrain » (b).

4.7 Environnement étudié

Le suivi de la qualité de l'air peut être associé soit à l'air ambiant extérieur soit à l'air intérieur. En fonction des environnements, les polluants d'intérêt ainsi que les niveaux de concentrations rencontrés peuvent différer. Par conséquent, la conception des systèmes capteurs, leurs servitudes d'utilisation ainsi que leurs performances peuvent varier selon ces ceux domaines.

Une évaluation statistique du nombre d'expérimentations en fonction de l'environnement dans lequel le système capteur est utilisé, a été faite. Les résultats, en fonction de l'objectif principal de mesure, sont présentés sur les Figure 88a et 8b. On remarque que, quel que soit l'objectif principal des expérimentations recensées dans Capt'Air, l'environnement extérieur est le plus étudié. Les deux raisons principales pour privilégier l'air extérieur sont les suivantes :

- La surveillance de la qualité de l'air ambiant extérieur rentre dans les missions du LCSQA et des AASQA qui sont à ce jour les seuls contributeurs de Capt'Air ;
- Le besoin de juger la complémentarité des systèmes capteurs vis-à-vis des appareils usuels de surveillance en les testant à proximité des stations de mesures règlementées afin de pouvoir comparer les mesures et s'assurer de la fiabilité des données.

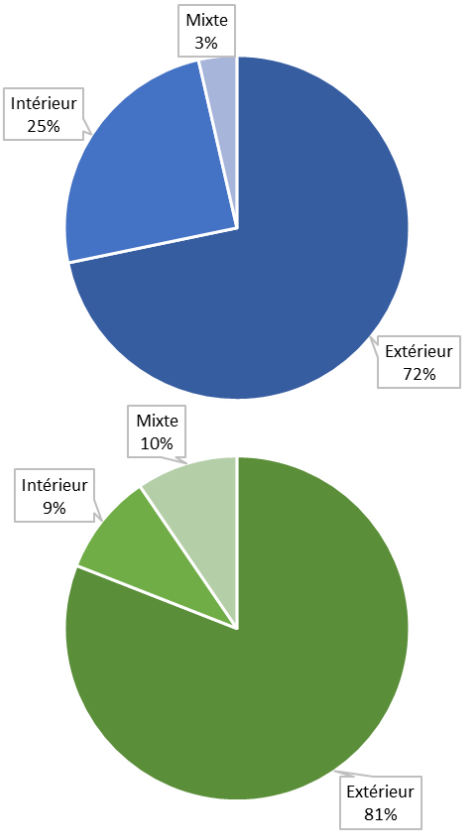

Figure 8 : Répartition par environnement d'étude des expérimentations associées à l'objectif principal « évaluation métrologique » (a) et « utilisation terrain » (b)

Il sera intéressant de voir comment évolue cette répartition si la base est ouverte à d'autres structures pour l'apport de nouvelles expérimentations.

4.8 Durées et périodes de mesure associées aux expérimentations recensées

La Figure 9 représente la distribution du nombre d'expérimentations en fonction de la durée correspondante pour les objectifs principaux « évaluation métrologique » (en bleu) et « utilisation terrain » (en vert). On constate qu'il existe deux groupes de données :

- Un premier groupe constitué des expérimentations dont la durée est inférieure à 6 mois (durée usuellement rencontrée) et qui est principalement associé à des expérimentations dont l'objectif principal est l'évaluation métrologique de systèmes capteurs.
- Un second groupe formé par les expérimentations dont la durée est supérieure à 6 mois et qui comprend majoritairement des utilisations terrain des systèmes capteurs.

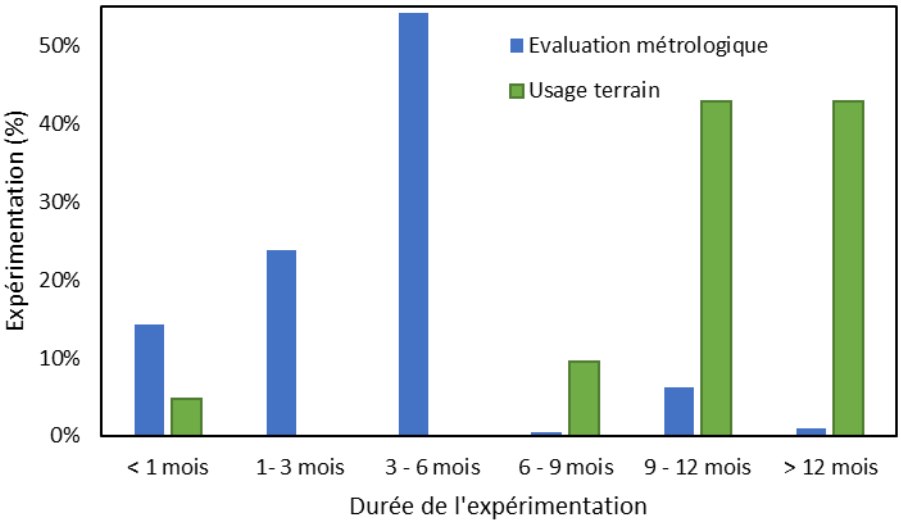

Figure 9 : Répartition en fonction de la durée et de l'objectif principal des expérimentations recensées dans Capt'Air

Cette répartition était prévisible au regard de la répartition des expérimentations en fonction des objectifs principaux (voir § 4.6). En effet, une évaluation métrologique se fait généralement sur une durée suffisante afin d'évaluer par exemple les performances d'un système capteur sur 2 saisons distinctes. Par ailleurs, l'exploitation des périodes de tests montre que l'évaluation métrologique est conduite en grande majorité (68%) lors des périodes estivales (Figure 10a). Cette période est probablement privilégiée afin de limiter les effets de l'humidité relative qui est considérée comme un principal paramètre interférent mais aussi pour permettre des niveaux de concentrations plus élevés pour certains polluants comme l'ozone.

A l'inverse, l'utilisation terrain des systèmes capteurs pour l'amélioration de la couverture temporelle ou pour l'évaluation de la dynamique temporelle d'un polluant se fait sur une durée longue couvrant des périodes de tests mixtes (77%), hivernale[13] et estivale[14], comme le montre la Figure 10 b. Ces essais de longue durée permettent de constater des tendances et ou variations inter-saisonnières par exemple et de pouvoir mieux les corréler à des évènements de pollution possibles et/ou des variations des conditions environnementales.

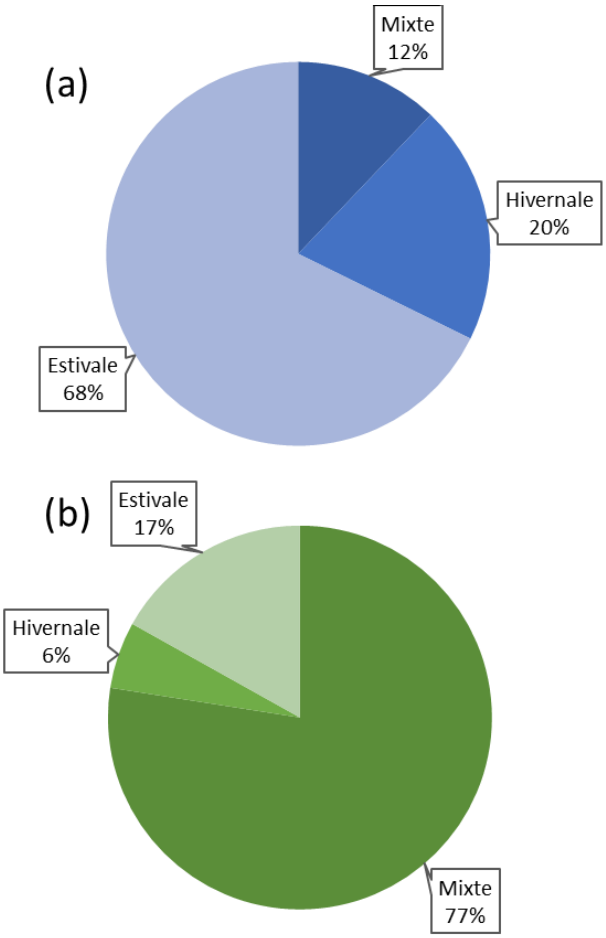

Figure 10 : Répartition en fonction des périodes des expérimentations dont l'objectif principal est l'évaluation métrologique (a) ou l'utilisation terrain (b)

4.9 Taux de remplissage des champs

Sur Capt'Air, la plupart des champs à renseigner ne sont pas obligatoires. Il a donc été intéressant d'étudier certains champs jugés importants au regard de l'utilisation de Capt'Air et de voir comment les contributeurs les renseignent.

[13] La période hivernale est comprise entre le 1er novembre et le 31 mars
[14] La période estivale est comprise entre le 1er avril et le 30 octobre

On peut ainsi voir sur la Figure 11 le taux de remplissage (en %) des champs suivants : “Toujours commercialisé”, “Principe de mesure”, “Prix”, “Coût de fonctionnement” pour l’intégralité des expérimentations, ainsi que “Nombre de capteurs identiques”, “Pente associée au R^2MAX” et “R^2MAX” pour les évaluations métrologiques et enfin “Typologie de localisation” et “Typologie d’influence” pour à la fois les évaluations métrologiques et les utilisations terrains. Quelques résultats intéressants sont à noter. Tout d’abord, le champ « nombre de capteurs identiques » a été complété pour l’ensemble des expérimentations recensées dans Capt’Air dont l’objectif principal est l’évaluation métrologique ». On obtient également des taux de complétude satisfaisants pour les entrées concernant l’état de commercialisation des systèmes capteurs (88%) ainsi que le principe de mesure (74%). A l’inverse les champs associés aux coûts d’investissement ou de fonctionnement des systèmes ou aux résultats des corrélations obtenus pour les évaluations métrologiques sont moins complétés (< 50%).

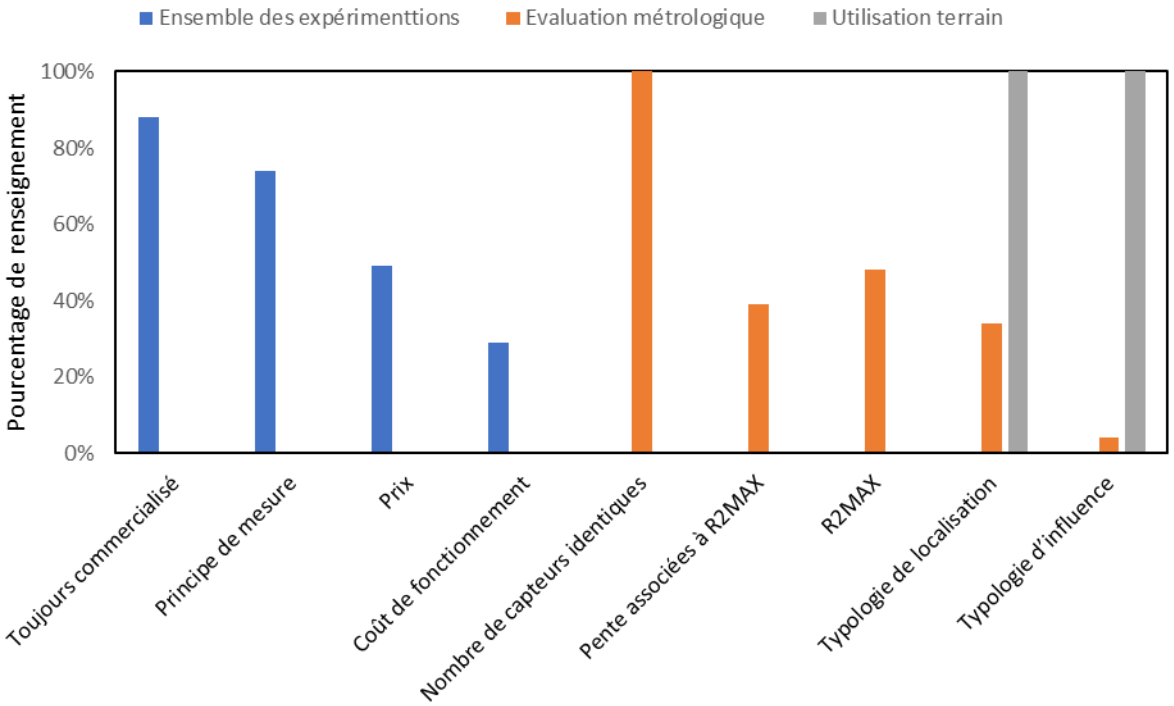

Figure 11 : Taux de remplissage sur Capt’Air de certains champs d’intérêt jugé majeur

4.10 Exploitation statistique des expérimentations menées avec des systèmes capteurs pour la mesure des concentrations en $PM_{2,5}$

Au 30 mars 2021, 79 expérimentations recensées dans Capt’Air, soit 31%, portent sur le polluant $PM_{2,5}$. Par rapport à l’objectif principal, au sous-objectif et à la durée de l’expérimentation, les répartitions des expérimentations concernant les $PM_{2,5}$ sont globalement similaires à celles déterminées pour l’ensemble des données disponibles dans Capt’Air (voir Annexe 1). A savoir que concernant l’objectif principal des expérimentations, 88% des expérimentations ont pour objectif une évaluation métrologique des systèmes capteurs, seulement 9 expérimentations (11%) correspondent à l’utilisation terrain. La comparaison à une méthode de référence reste le sous-objectif de la majorité des expérimentations (59%).

La durée des expérimentations est très variable, 25% des expérimentations renseignées présentent une durée inférieure à 1 mois. Un tiers des expérimentations sont menées entre 3 et 6 mois. Et seulement une expérience a été réalisée sur une durée supérieure à un an. On note qu'en grande majorité les expérimentations sont conduites sur l'air ambiant extérieur (70%) et durant la période estivale (53%).

Par ailleurs, l'exploitation statistique permet une comparaison des performances des systèmes capteurs en fonction de l'usage principal pour lequel ils ont été déployés. Concernant l'utilisation terrain, pour 22% des expérimentations le champ « le système répond-t-il aux objectifs fixés ? » n'a pas été renseigné, 56% des systèmes capteurs étudiés répondent aux objectifs établis par les utilisateurs tandis que 22% n'y répondent pas.

En ce qui concerne l'évaluation métrologique, les critères à prendre en compte pour l'évaluation des performances des systèmes capteurs ont été définis dans le rapport LCSQA intitulé « Résultats du premier essai national d'aptitude des micro-capteurs (EAµC) pour la surveillance de la qualité de l'air »[15] publié en avril 2020.
Pour rappel, les critères proposés sur le plan qualitatif sont :

- la mise en œuvre,
- la versatilité,
- la fiabilité,
- l'énergie.

Sur le plan quantitatif, les critères à prendre en compte sont :

- la pente,
- le coefficient de détermination R^2 pris pour des régressions linéaires classiques,
- la variabilité,
- le MAPE (Mean Absolute Percentage Error).

On peut retrouver la définition de ces critères ainsi que la grille de notation associée aux performances en Annexe 5 de ce rapport. Comme pour le traitement des résultats des essais d'aptitude menées en 2018, on a considéré ici qu'un système capteur montre une des performances acceptables lorsque sa note attribuée est ≥ 3. Pour qualifier les systèmes capteurs, une échelle de « qualificatifs » pour les notes de 0 à 5 (« non déterminé », « médiocre », « faible », « acceptable », « bon », « très bon ») est proposée.

En Annexe 6 sont indiqués les champs qui ont été pris en compte dans Capt'Air pour associer une note à chacun des 8 critères qualitatifs ou quantitatifs indiqués ci-dessus. On note que pour le critère « variabilité », le champ « reproductibilité » n'a pas été renseigné sur Capt'Air et que pour le critère « MAPE », aucun champ ne correspond sur Capt'Air. **Parmi les pistes d'évolution de Capt'Air, il est donc prévu de passer le champ « reproductibilité » en champ obligatoire et de remplacer le champ « incertitudes » par un champ « indicateur relatif d'incertitudes » en le complétant par une liste à choix multiples pour apporter des précisions (RMSE, MAPE, autre (à préciser)) afin de pouvoir établir des « radars d'évaluation des performances »[15] plus complets pour chacun des systèmes capteurs pour lesquels des expérimentations sont renseignées dans Capt'Air.**

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

En raison du nombre important des systèmes capteurs renseignés dans Capt'Air pour la mesure des $PM_{2,5}$, une étape de présélection des deux systèmes ayant les meilleures notes sur les critères quantitatif a été réalisée afin de tracer les radars correspondants pour l'évaluation des performances et de les comparer le cas échéant à ceux obtenus pour des systèmes capteurs ayant participé par ailleurs aux essais d'aptitudes LCSQA (EAµC).

La procédure de pré-sélection de systèmes capteurs est présentée sur la Figure 12. Un premier tri est réalisé en fonction de la note attribuée au critère « pente associée au R^2 MAX » et un deuxième tri en fonction de la note attribuée au champ « R^2MAX ». On note que respectivement, 60% et 42% des informations relatives aux champs « pente associée au R^2 MAX » et « R^2MAX », n'ont pas été renseignés ce qui peut à ce stade biaiser les résultats. Les systèmes capteurs, pour lesquels les valeurs de pente et R2MAX ne sont pas renseignées, ont été écartés de la présente comparaison de performances. Les bornes à prendre en compte pour établir les notes associées aux valeurs de « pente associée au R^2MAX » et de « R^2MAX » sont identiques à celles définies lors des EAµC pour la pente et le R^2 (voir Annexe 6).

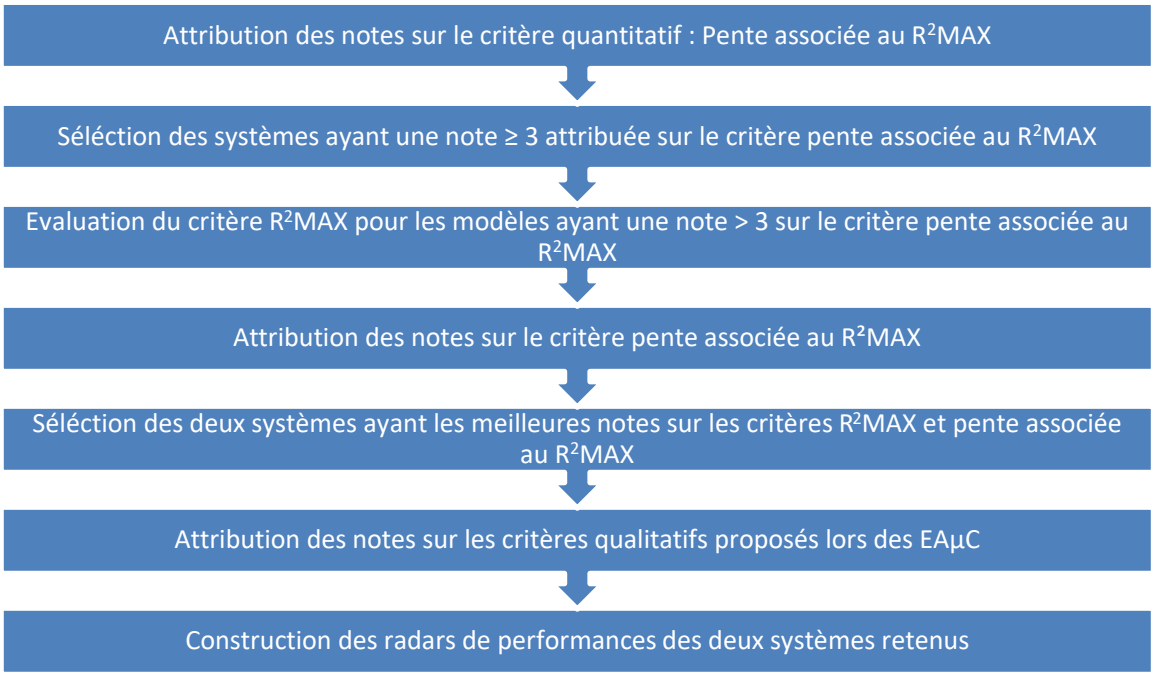

Figure 12 : Logigramme présentant la procédure de pré-sélection de deux systèmes capteurs et la construction de leurs radars de performances correspondants

La répartition des systèmes capteurs en fonction de la note attribuée à la valeur de la pente associée au R^2MAX est présentée sur la Figure 133. On constate que 14 systèmes capteurs (soit 50%) montrent de très bonnes performances avec une note attribuée équivalente à la note maximale de 5 et que 21% des systèmes capteurs renseignés sont associés à une note < 3, ils peuvent ainsi être considérés comme non acceptables à ce stade.

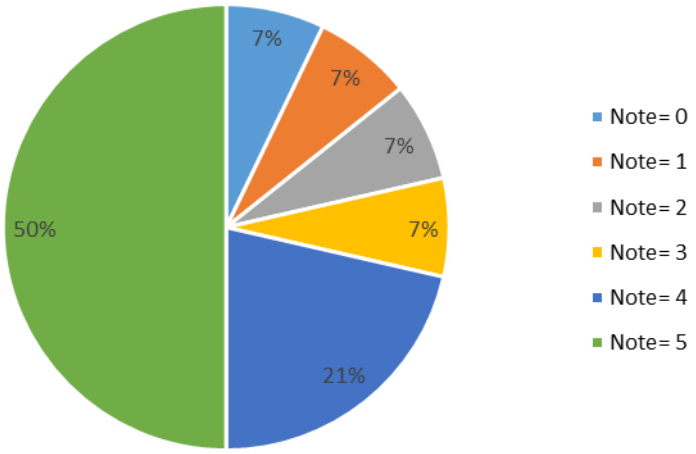

Figure 13 : Répartition des systèmes capteurs $PM_{2,5}$ en fonction de la note attribuée au regard de la valeur de la pente associée au R^2MAX

Ensuite, une deuxième évaluation est réalisée sur les 79% (soit 22 systèmes capteurs) restants (note ≥ 3). Cette fois, une répartition des systèmes capteurs en fonction de la note attribuée au regard de la valeur de R^2MAX est réalisée. Comme le montre la Figure 14, 64% des systèmes capteurs présentent de performances acceptables avec une note ≥ 3 (soit un $R^2MAX \geq 0,7$). De plus, 14% des systèmes montrent de très bonnes performances avec un $R^2MAX > 0,9$ (note=5).

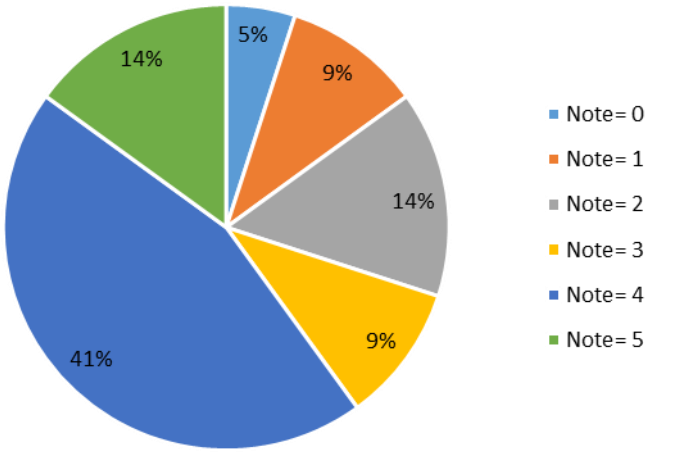

Figure 14 : Répartition des systèmes capteurs $PM_{2,5}$ en fonction de la note attribuée au regard de la valeur du R^2MAX

La liste des systèmes capteurs ayant une note de 5 pour la valeur R^2MAX est présentée dans le Tableau 2 de même que les valeurs de pente associées au R^2MAX et le nombre de systèmes capteurs identiques testés. Les deux systèmes capteurs ayant la valeur de R^2MAX la plus élevée correspondent aux modèles ATMOTRACK de 42FACTORY. Toutefois, 20 systèmes capteurs identiques du modèle ATMOTRACK1.2 ont été testés et c'est la valeur R^2MAX qui a été renseignée sur Capt'Air, la question de la variabilité des R^2 obtenus pour un nombre important de systèmes testés se pose. **Pour écarter cette ambiguïté, il est prévu d'ajouter, dans les prochaines évolutions de Capt'Air, la valeur de la médiane obtenue pour le coefficient de détermination R^2 et de la pente associée à ce R^2 médian si le nombre de systèmes testés est supérieur ou égal à 3.**

Tableau 2 : Liste des systèmes capteurs $PM_{2,5}$ renseignés dans Capt'Air et ayant les meilleures performances sur la base de la valeur du R^2MAX

Modèle	Fabricant	Paramètre		Nombre de systèmes capteurs identiques testés
		Pente	R^2MAX	
ATMOTRACK1.2	42FACTORY	0,90	0,96	20
ATMOTRACK ND	42FACTORY	1,68	0,95	2
POLLUTRACK fixe	PLANET WATCH24	1,21	0,91	1
POLLUTRACK fixe	PLANET WATCH24	1,15	0,91	2
PMS 1003 2.5	PLANTOWER	1,55	0,91	1
PMS 1003 2.5	PLANTOWER	0,67	0,9	3

Il est à noter que l'ATMOTRACK1.2 de 42FACTORY et le POLLUTRACK fixe de PLANET WATCH24 sont les systèmes capteurs ayant une note de 5 sur les deux critères « pente associée au R^2MAX » et « R^2MAX ». Par la suite, ces deux systèmes ont été étudiés vis-à-vis des autres critères de performances tels que définis lors des essais d'aptitudes EAµC. Les radars d'évaluation de ces 2 modèles, construits à partir des données renseignées dans Capt'Air, sont présentés sur la Figure 15. On remarque que les radars des deux systèmes sont très comparables. En l'absence de données dans Capt'Air pour les critères « variabilité » et « indicateur relatif d'incertitudes », les radars sont présentés avec des notes portées fictivement à la valeur de 0. Même si les notes attribuées sur les critères qualitatifs (mise en œuvre, versatilité et énergie) sont relativement basses (< 3), la note maximale de 5 est attribuée pour 3 critères : pente associée à R^2, R^2 et fiabilité. Ces modèles sont donc identifiés comme les systèmes capteurs les plus performants vis-à-vis de la mesure des concentrations en $PM_{2,5}$ parmi ceux pour lesquels des expérimentations ont été renseignées dans Capt'Air avant fin mars 2021.

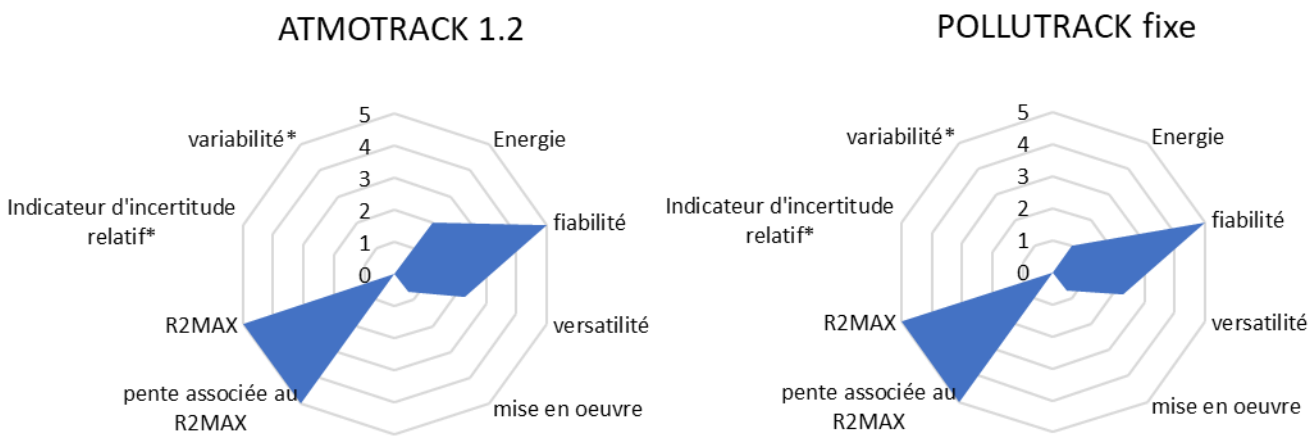

Figure 15 : Radars d'évaluation construits à partir des données disponibles dans Capt'Air à fin mars 2021 pour les systèmes capteurs ATMOTRACK 1.2 et POLLUTRACK utilisés pour la mesure des concentrations en $PM_{2,5}$ dans l'air ambiant (la note de 0 est une note fictive correspondant à l'absence d'information)*

On note que l'ATMOTRACK 1.2 figure parmi les modèles évalués lors de l'EAµC[16]. En comparant les résultats obtenus pour ce modèle après l'exploitation des données disponibles dans Capt'Air au radar d'évaluation obtenu pour l'EAµC (rappelé sur la Figure 16), on constate que les empreintes obtenues sont différentes. Sur les critères qualitatifs, en raison de l'absence de renseignement de certains champs dans Capt'Air, notamment pour l'installation physique et la documentation, on minimise la note associée au critère « mise en œuvre » par rapport à l'EAµC. Sur les critères quantitatifs, le R^2 pris en compte pour l'évaluation lors des EAµC correspond à la valeur médiane trouvée alors que pour les données disponibles dans Capt'Air, c'est la valeur maximale qui est renseignée ce qui explique la note plus élevée attribuée sur Capt'Air. La même explication pourrait-être proposée pour expliquer la différence entre les notes attribuées aux pentes associée à R^2. **Ce point justifie l'intérêt de l'ajout d'un champ R^2 médian et pente associée à ce R^2 médian dans Capt'Air dans les prochaines évolutions**.

[16] https://www.lcsqa.org/fr/rapport/resultats-du-premier-essai-national-daptitude-des-micro-capteurs-eamc-pour-la-surveillance

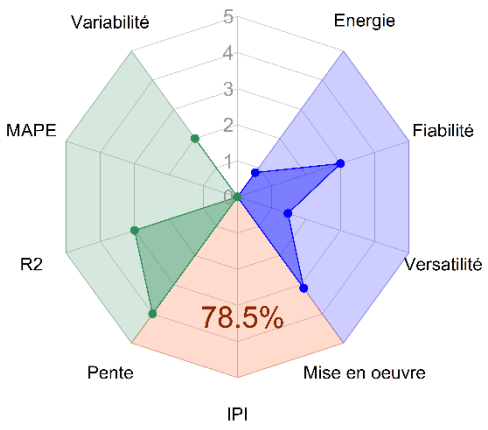

Figure 16 : Radar d'évaluation de performances du modèle ATMOTRACK 1.2 obtenus pour l'EAµC (source : rapport EAµC[14])

4.11 Exploitation statistique des expérimentations menées avec des systèmes capteurs pour la mesure des concentrations en PM_{10}

Au 31 mai 2021, 62 expérimentations (soit 24%) portant sur les PM_{10} ont été recensées dans Capt'Air. Les résultats concernant l'objectif principal et les sous-objectifs associés aux expérimentations PM_{10} sont assez similaires à ceux observés pour les $PM_{2,5}$ et pour l'ensemble des polluants confondus (voir Annexe 2). Ainsi 89% des expérimentations associées aux systèmes capteurs pour la mesure des concentrations en PM_{10} sont des évaluations métrologiques. A noter que la comparaison à une méthode de référence reste le sous-objectif de la très grande majorité des expérimentations avec 50 expérimentations (soit 81%).

Concernant la durée des expérimentations, on retrouve là encore des résultats assez semblables à ceux annoncés pour les $PM_{2,5}$. Notamment, 74% des expérimentations ont une durée inférieure à 6 mois, avec 13% des expérimentations ayant une durée inférieure à 1 mois. A noter tout de même que 7 expérimentations ont une durée supérieure à 1 an, dont 6 utilisations terrain et une évaluation métrologique, ce qui suggère que l'utilisation « pérenne » de systèmes capteurs en PM_{10} serait plus recherchée par rapport à celle pour les $PM_{2,5}$. De plus, là encore, la majorité des expérimentations se font en période estivale (58%) et en air ambiant extérieur.

La comparaison des performances des systèmes capteurs en fonction de l'usage pour lequel ils ont été déployés n'a pas été fait à ce stade compte tenu du nombre trop faible d'expérimentations renseignées et donc du manque de représentativité. En fonction des nouvelles entrées réalisées dans Capt'Air, ce point sera évalué dans les futures exercices d'exploitation de données.

Au niveau de l'évaluation métrologique, comme décrit pour les $PM_{2,5}$, il a tout d'abord été fait une pré-sélection des deux systèmes capteurs ayant les meilleures notes sur les critères quantitatifs. A noter que 27 expérimentations concernant les PM_{10} (soit 49% des évaluations métrologiques) n'avaient pas de valeur de pente associée au R^2 MAX renseignée et que 26 expérimentations (soit 47% des évaluations métrologiques) n'avaient pas de valeur de R^2 MAX renseignée ce qui peut biaiser les conclusions apportées.

La répartition des systèmes capteurs en fonction de la note attribuée à la valeur de la pente associée au R^2MAX est présentée sur la Figure 17. On voit ainsi que presque la moitié des systèmes capteurs montre de très bonnes performances avec une note maximale de 5. On voit également que les systèmes capteurs ont une note attribuée à la valeur de pente plutôt bien répartie entre 1 et 4. A noter enfin que la grande majorité des expérimentations (68%) ont une note associée à la valeur de pente supérieure ou égale à 3 ; ces systèmes peuvent être considérés comme acceptables.

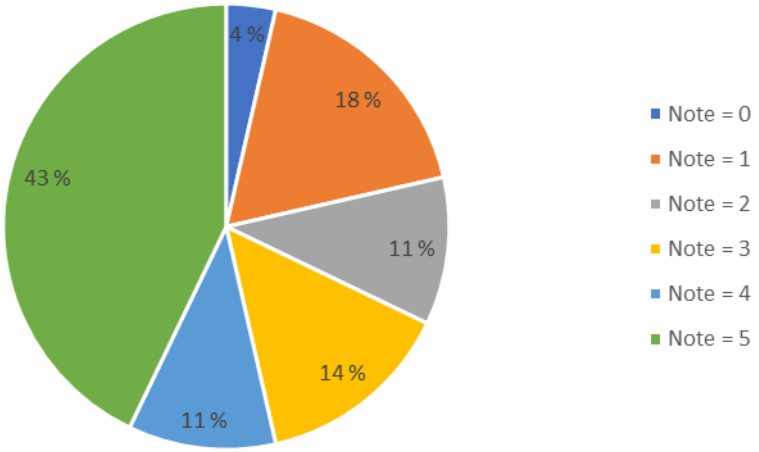

Figure 17 : Répartition des systèmes capteurs PM_{10} en fonction de la note attribuée au regard de la valeur de la pente associée au R^2 MAX

Par la suite, une deuxième évaluation est réalisée par rapport aux 19 expérimentations retenues (note ≥ 3 sur le critère pente). Cette nouvelle évaluation repose désormais sur la note attribuée au R^2MAX. La Figure 18 montre ainsi qu'une seule expérimentation a une note attribuée au R^2MAX de 5. De manière plus générale, seulement 37% des expérimentations présentent de performances acceptables (note ≥ 3) vis-à-vis du R^2MAX.

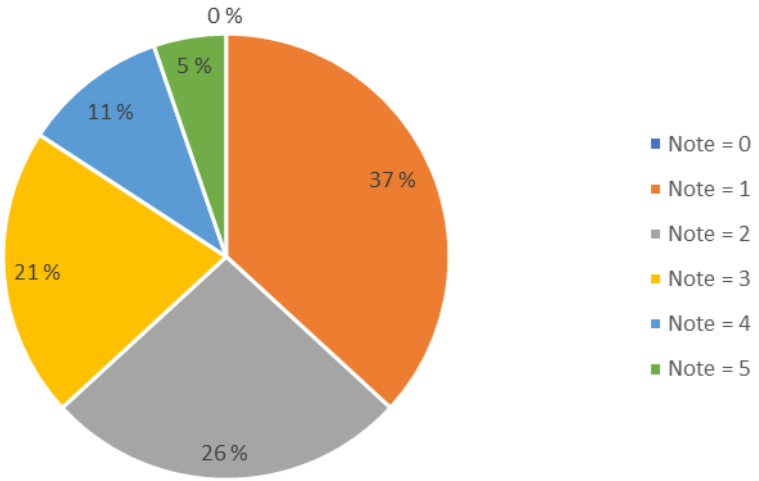

Figure 18 : Répartition des systèmes capteurs PM_{10} en fonction de la note attribuée à la valeur de R^2MAX

Suita à ces deux évaluations, les deux systèmes capteurs ayant obtenus les meilleures notes pour les critères « pente associée au R^2MAX » et « R^2MAX », sont l'ATMOTRACK 1.2 et le AIRMATRIX V2 BT-2.5. Ces deux systèmes ont ensuite été étudiés vis-à-vis des autres critères de performances tels que définis lors des essais d'aptitudes EAµC. Les radars d'évaluation ainsi créés sont présentés sur la Figure 19. Plusieurs points sont à relever. On peut voir que bien que les deux systèmes aient des notes assez similaires par rapport aux critères quantitatifs (≥ 4), l'AIRMATRIX dispose de notes qualitatives très médiocres (≤2). L'ATMOTRACK, disposant de notes bien supérieures sur le plan qualitatif (≥ 2), notamment concernant la fiabilité et la mise en œuvre, peut être considéré comme un très bon système capteur pour la mesure des concentrations en PM_{10} parmi les systèmes capteurs pour lesquels des expérimentations ont été renseignées dans Capt'Air jusqu'à fin mars 2021.

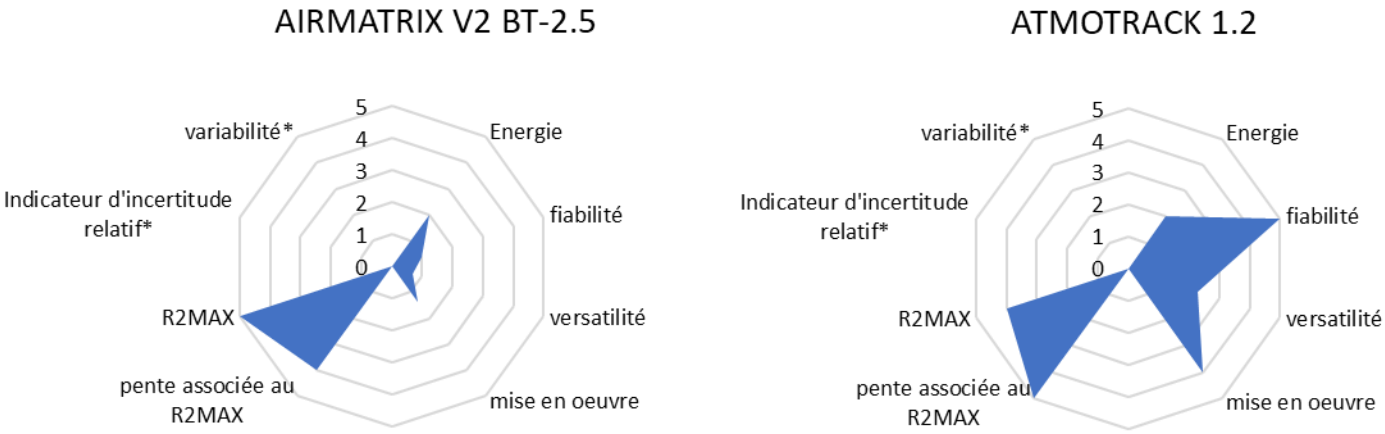

Figure 19 : Radars d'évaluation construits à partir des données disponibles dans Capt'Air à fin mars 2021 pour les systèmes capteurs ATMOTRACK 1.2 et AIRMATRIX V2 BT-2.5 utilisés pour la mesure des concentrations en PM_{10} dans l'air ambiant (la note de 0 est une note fictive correspondant à l'absence d'information)*

On note que les résultats obtenus pour ces deux modèles sont en accord avec ceux trouvés pour l'EAµC (Figure 16). Pour l'AIRMATRIX, les notes attribuées sur les critères R^2 et pente associée à R^2 sont de 4 et 5 respectivement. En revanche, il présente des notes faibles (< 2) sur les critères qualitatifs. En ce qui concerne l'ATMOTRACK, les notes attribuées à la pente, au R^2 et aux critères qualitatifs, autre que la fiabilité, sont en cohérences avec celles attribuées lors de l'EAµC. Par ailleurs, en comparant les radars des systèmes capteurs obtenus pour l'EAµC, la même conclusion trouvée, à partir de l'exploitation de données de Capt'Air, peut-être tirée : l'ATMOTRACK dispose de notes supérieures sur le plan qualitatif (fiabilité et mise en œuvre).

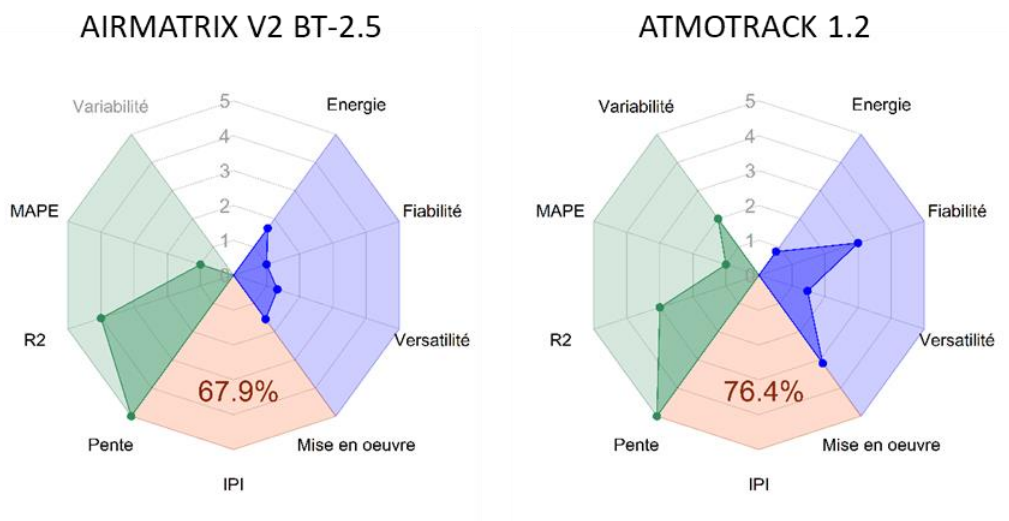

Figure 20 : Radars d'évaluation des performances des modèles AIRMATRIX v2 BT-2.5 et ATMOTRACK 1.2 obtenus pour la mesure des concentrations en PM10 lors de l'EAµC (source : rapport EAµC[164])

4.12 Exploitation statistique des expérimentations menées avec des systèmes capteurs pour la mesure du NO_2

Au 31 mai 2021, 41 expérimentations (soit 16%) recensées dans Capt'Air portent sur le polluant NO_2 (voir Annexe 3).

Comme précédemment, une très grande majorité (90% soit 37 expérimentations) des expérimentations sont menées dans l'objectif de réaliser une évaluation métrologique en comparaison à une méthode de référence (76%).

Concernant la durée des expérimentations, il est important de noter que la très grande majorité des expérimentations (90%) a duré moins de 6 mois et est conduite en air ambiant extérieur, principalement en période estivale (68%). Quatre expérimentations avaient pour objectif « utilisation terrain » dont trois expérimentations menées dans le but de l'« amélioration de la couverture du territoire » et une expérimentation pour l' « évaluation de la dynamique temporelle ». A noter que, 3 des 4 utilisations terrain recensées ont duré plus d'un an.

L'exploitation statistique des données concernant la mesure du NO_2 a également permis une comparaison des performances des systèmes capteurs en fonction de leur usage. Concernant les utilisations terrain, le champ « le système répond-il aux objectifs fixés ? » a été renseigné positivement à 2 reprises et est resté non-renseigné pour les 2 autres expérimentations

Concernant les évaluations métrologiques, pour près de la moitié des expérimentations ni le R^2MAX ni la pente associée à ce coefficient n'ont été renseigné.

La répartition des systèmes en fonction de la note attribuée à la valeur de la pente associée au R^2MAX est présentée sur la Figure 21. On constate que, comme pour les $PM_{2,5}$, 50% des systèmes capteurs montrent d'excellentes performances avec une note attribuée à la valeur de R^2MAX égale à la note maximale de 5. De la même manière, 15% des systèmes capteurs renseignés sont associés à une note < 3, ils seront ainsi considérés comme non performants à ce stade et donc non retenus pour la suite du traitement.

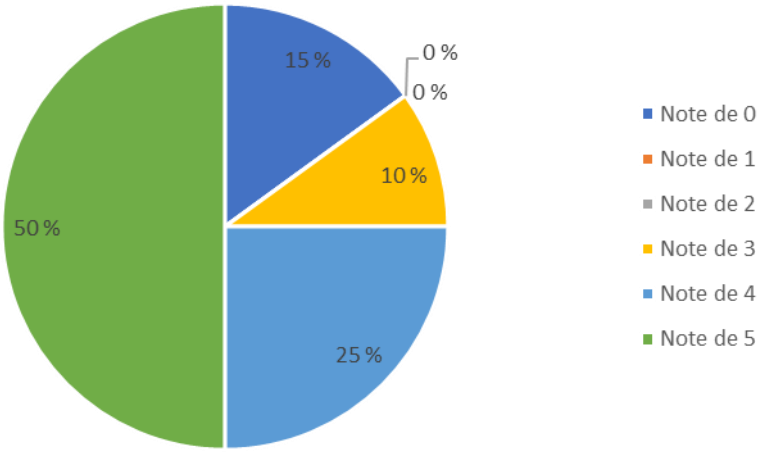

Figure 21 : Répartition des systèmes capteurs NO_2 en fonction de la note attribuée au regard de la valeur de la pente associée au R^2MAX

Une deuxième évaluation est réalisée, ne prenant en compte que les 85% des systèmes capteurs avec une note associé au R^2MAX supérieure ou égale à 3. Les résultats de cette deuxième évaluation sont présentés sur la Figure 222. On voit ainsi que seulement 1 système capteur a pu avoir la note de 5. Cependant, en regardant les notes associées au R^2MAX de 3 et 4, on peut voir que la majorité des systèmes (88%) présentent tout de même de performances acceptables vis-à-vis de la valeur du R^2MAX.

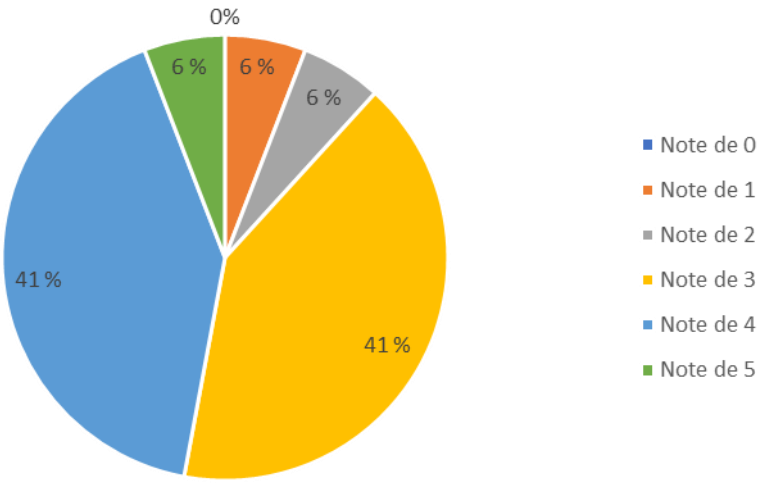

Figure 22 : Répartition des systèmes capteurs NO_2 en fonction de la note attribuée au regard de la valeur du R^2MAX

Au regard de ces deux évaluations, les deux systèmes capteurs retenus car présentant les meilleures performances en termes de R^2MAX et de pente associée au R^2MAX sont le RUBIX WT1 et le CAIRNET V2. Ces deux systèmes ont alors été étudiés vis-à-vis des critères qualitatifs, comme pour les $PM_{2,5}$ et les PM_{10}. On retrouve le radar d'évaluation de ces modèles Figure 23. On voit ainsi que les deux systèmes ont des performances quantitatives et qualitatives quasi-similaires. Même si les notes associées au critère de mise en œuvre et de versatilité sont faibles, les notes de pente, de R^2MAX, de fiabilité et d'énergie nous permettent de considérer ces deux systèmes capteurs comme les systèmes capteurs les plus performants vis-à-vis de la mesure des concentrations en NO_2 parmi les systèmes capteurs pour lesquels des expérimentations ont été renseignées sur Capt'Air.

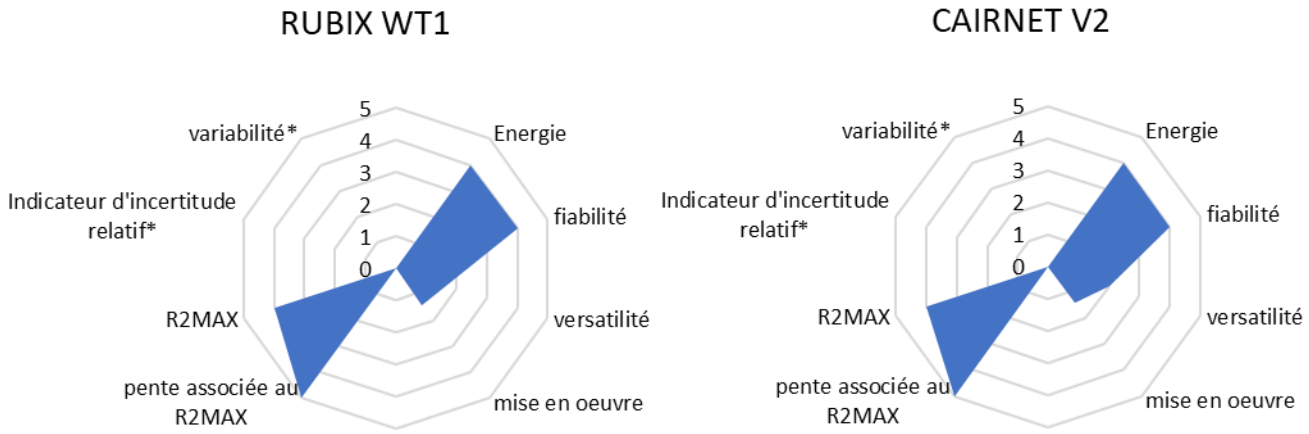

Figure 23 : Radars d'évaluation construits à partir des données disponibles dans Capt'Air à fin mai 2021 pour les systèmes capteurs RUBIX WT1 et CAIRNET V2 utilisés pour la mesure des concentrations en NO_2 dans l'air ambiant (la note de 0 est une note fictive correspondant à l'absence d'information)*

En comparant les résultats de ces modèles à ceux obtenus pour l'EAµC (Figure 244), on constate que les notes attribuées sur les critères qualitatifs notamment « fiabilité » « énergie » et « versatilité » sont comparables à celles qu'on attribue à ce même modèle sur la base des expérimentations renseignées sur Capt'Air. En revanche sur les critères « pente » et « R^2 » la note qu'on attribue sur Capt'Air est maximisée comparé à celles de l'EAµC. Ceci s'explique par le fait que sur Capt'Air les valeurs renseignées correspondent aux valeurs maximales trouvées lors des expérimentations.

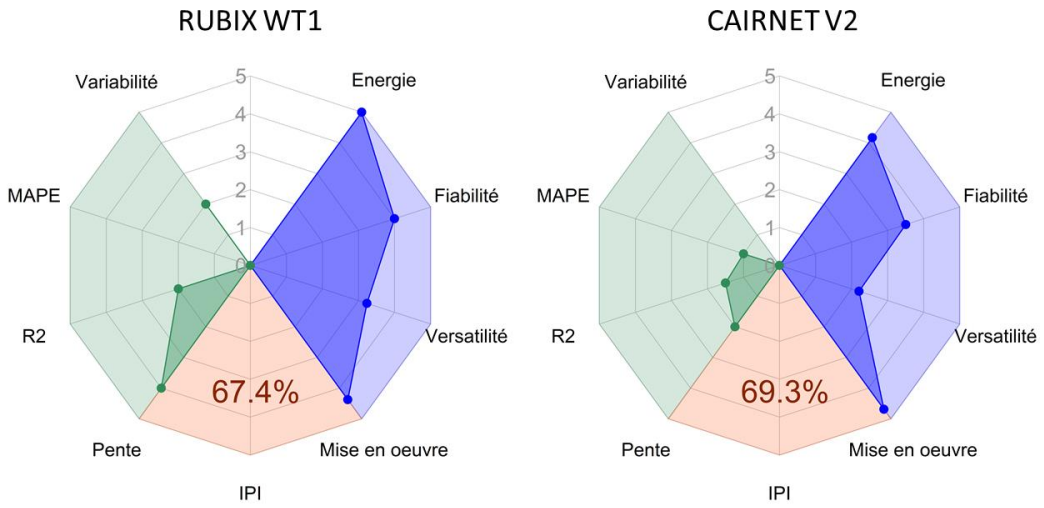

Figure 24 : Radars d'évaluation des performances des modèles RUBIX WT1 et CAIRNET V2 obtenus pour l'EAµC (source : rapport EAµC [16])

4.13 Exploitation statistique des expérimentations menées avec des systèmes capteurs pour la mesure de l'O_3

A fin mai 2021, 13 expérimentations (soit 5%) recensées sur Capt'Air portent sur la mesure des concentrations en O_3. Etant donné le faible nombre d'expérimentations renseignées, les résultats présentés ci-après sont simplement donnés à titre indicatif et il sera nécessaire de les conforter lors des exploitations à venir des données présentes dans Capt'Air.

L'exploitation statistique des données vis-à-vis de l'O_3 permet de noter que l'intégralité des expérimentations sont réalisées avec pour objectif principal une évaluation métrologique. Concernant les modalités de réalisation de cette évaluation, 7 expérimentations ont été réalisées en comparaison avec une méthode prise en référence et 5 expérimentations lors d'une comparaison inter-laboratoires. La mesure de cette espèce étant à ce jour non maitrisée par des systèmes capteurs. Un travail de qualifications de ces systèmes reste important afin de mieux optimiser leur déploiement. (Voir Annexe 4).

Concernant la durée des expérimentations, on peut voir, comme pour les autres polluants, que la majorité d'entre elles ont duré moins de 6 mois (11 expérimentations). Il est intéressant de noter que les 2 expérimentations restantes avaient une durée comprise entre 9 et 12 mois, ce qui est assez rare concernant les évaluations métrologiques au vu des résultats sur les autres polluants. La recherche d'une utilisation de systèmes capteurs en O_3 à l'échelle de l'année est peut-être sous entendue.

L'évaluation portant d'abord sur le critère quantitatif « R^2MAX » puis sur celui de la « pente associée au R^2MAX » a été menée. Il est important de noter que les champs « pente associée au R^2MAX » et « R^2MAX » n'ont été renseignés que pour seulement 4 des 13 expérimentations concernant le NO_2. Les 4 notes attribuées par rapport au critère « pente associée au R^2MAX » sont supérieures à 3 (2 ayant la note de 4 et 2 ayant la note de 5) tandis que seules 3 expérimentations ont une note relative à la valeur du R^2MAX supérieure ou égale à 3 (les 3 ayant une note de 3).

Au regard de ces deux évaluations, les deux capteurs présentant les meilleures performances concernant les critères quantitatifs sont l'AQT-420 de VAISALA et l'AQMESH 4.0. On retrouve ainsi Figure 25 les radars d'évaluation pour ces deux systèmes. On peut voir que, bien que possédant des notes vis-à-vis des critères quantitatifs identiques, la partie qualitative des radars nous montre que, sur la base des informations contenues dans Capt'Air, l'AQMESH 4.0 est le système capteur qui montre les meilleures performances vis-à-vis de la mesure des concentrations en ozone dans l'air ambiant.

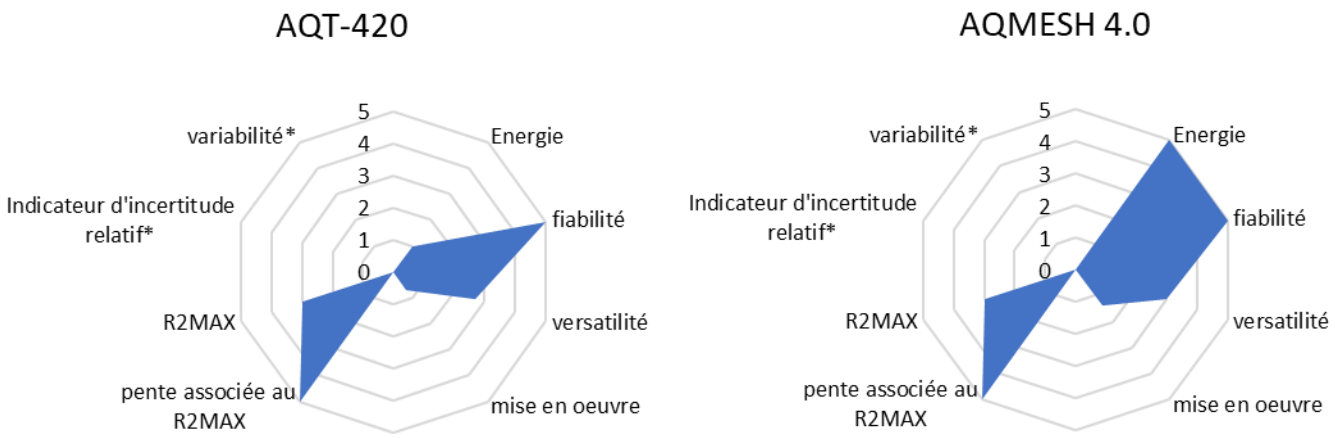

Figure 25 : Radars d'évaluation construits à partir des données disponibles dans Capt'Air à fin mai 2021 pour les systèmes capteurs AQT-420 et AQMESH 4.0 utilisés pour la mesure des concentrations en O_3 dans l'air ambiant (la note de 0 est une note fictive correspondant à l'absence d'information)*

La comparaison des radars de performances avec ceux obtenus pour ces mêmes modèles lors de l'EAµC (Figure 26), montre également des notes comparables sur les critères quantitatifs. Néanmoins, l'AQMESH se démarque avec des notes bien meilleures sur le plan qualitatif.

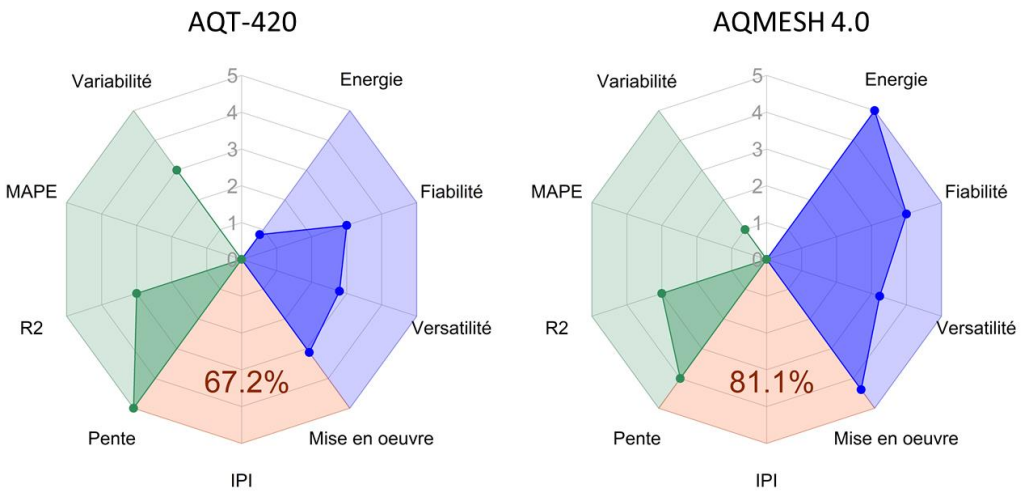

Figure 26 : Radar d'évaluation de performances des modèles AQT-420 et AQMESH 4.0 obtenus pour l'EAµC (source : rapport EAµC[16])

5. RETOURS D'EXPERIENCE ET EVOLUTIONS

Afin d'effectuer un retour d'expérience de l'utilisation de Capt'Air et de rendre compte des difficultés rencontrées ainsi que des attentes des utilisateurs, une enquête à destination des membres inscrits sur Capt'Air a été menée entre mars et mai 2021. Les questions posées sont en lien avec :
- les profils utilisateurs de Capt'Air,
- la fréquence d'utilisation,
- les difficultés rencontrées,
- la pertinence du guide d'utilisation,
- l'identification de champs d'intérêt manquants,
- des suggestions d'amélioration de Capt'Air.

Cette enquête a fait l'objet de 13 réponses, soit 41% des membres AASQA inscrits sur Capt'Air. Ce taux de réponse est jugé satisfaisant compte tenu de la courte période de consultation. Les résultats sont présentés ci-après.

Tout d'abord, il est noté que la grande majorité des personnes (85%) ayant répondu au sondage font partie des AASQA. Seul 1 réponse provient d'un membre du LCSQA (Figure 27)

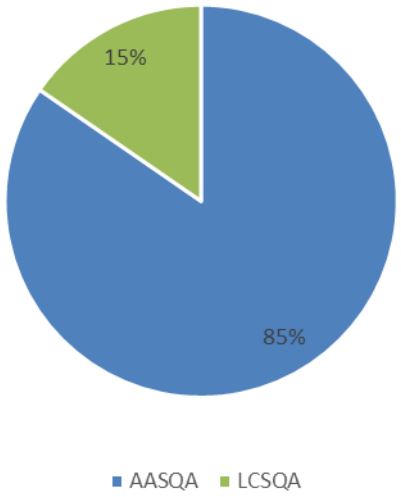

Figure 27 : Répartition des personnes ayant répondu au sondage en fonction de leur organisme d'appartenance

Ensuite, sur la Figure 288 est représentée la fonction qu'occupe les personnes interrogées au sein de leur organisme. On voit ainsi que la grande majorité des personnes ayant répondu sont soit ingénieur/responsable d'études, soit technicien.

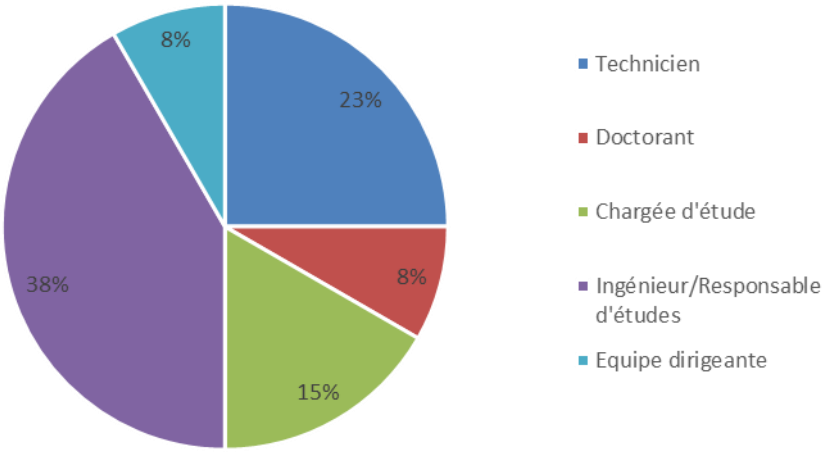

Figure 28 : Répartition des personnes ayant répondu au sondage en fonction du poste qu'ils occupent au sein de leur organisme

La Figure 29 représente la répartition des répondants en fonction du type de profil utilisateur dont ils disposent sur Capt'Air. On peut ainsi voir que la grande majorité a un profil de contributeur (62%). A noter que 15% des personnes interrogées ne connaissent pas leur profil utilisateur. On précise que le profil utilisateur correspondant à chaque compte utilisateur figure sur la page d'accueil dans le bandeau noir à droite de l'onglet « Recherche ».

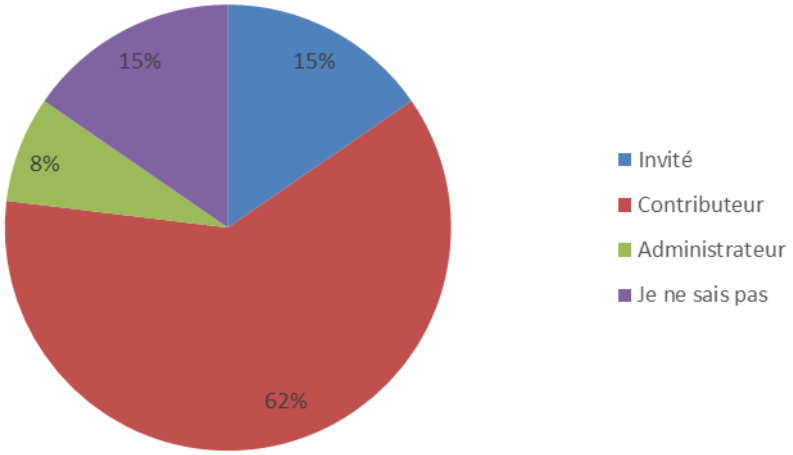

Figure 29 : Répartition des personnes ayant répondu au sondage en fonction de leur profil utilisateur sur Capt'Air

La grande majorité des personnes interrogées (69%) utilise Capt'Air entre une fois par an et une fois tous les 6 mois (Figure 30). Il est à noter qu'une personne n'utilise plus ou pas Capt'Air parmi les personnes interrogées sans justification précise.

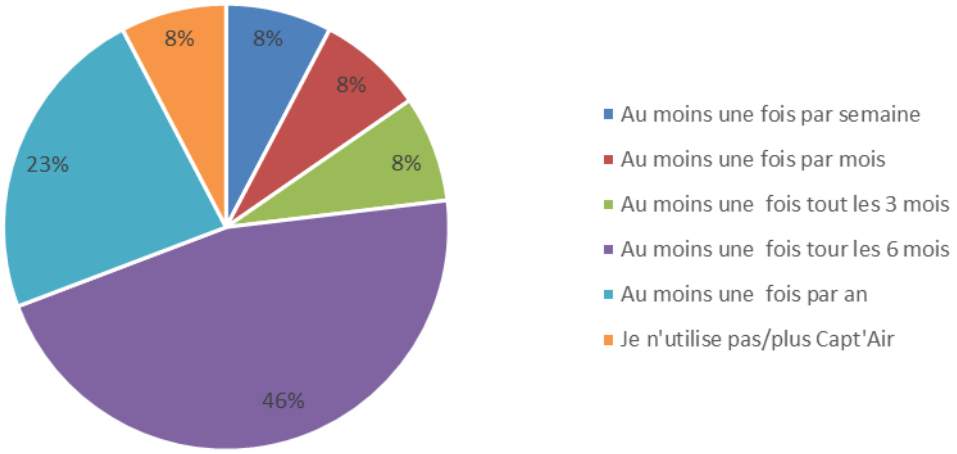

Figure 30 : Répartition des personnes ayant répondu au sondage en fonction de leur fréquence d'utilisation de Capt'Air

Parmi les personnes interrogées, 92% estiment ne pas avoir rencontré de problèmes particuliers lors de leur utilisation de Capt'Air.

15% des personnes interrogées estiment qu'il manque certains champs d'intérêt sur Capt'Air. Les champs qu'il est proposé d'ajouter sont une photo du système ainsi que ainsi que le détail des moyens métrologiques utilisés lors de l'étude du système capteur (notamment le système de dopage des concentrations lorsque celles rencontrées dans l'air extérieur étaient jugées insuffisantes).

Parmi les personnes interrogées, la majorité (61%) estime que Capt'Air pourrait présenter un intérêt en dehors des membres du dispositif national de surveillance (comme des organismes de recherche, ou des laboratoires pour l'aide au choix d'un système capteur).

Quelques suggestions ont également été formulées. Il est rappelé qu'une mise à jour de Capt'Air a été réalisée en début d'année 2021 et que certaines suggestions ont d'ores et déjà été couvertes. En dehors de cela, quelques points restent encore pertinents. Tout d'abord, il semblerait intéressant pour les utilisateurs d'avoir un résumé des résultats sans avoir besoin de rentrer dans les fiches de chacune des expérimentations. Ensuite, un champ « contexte » a été demandé, permettant de donner diverses informations complémentaires concernant l'expérimentation (par exemple : le cadre du projet financé, les urls d'accès au site web du projet, aux documents mis en ligne).

Afin de répondre aux besoins des utilisateurs, il est envisagé, parmi les pistes d'évolution de Capt'Air :

- **Un calcul automatique des 8 notes relatives aux critères qualitatifs et quantitatifs tels que définis dans les travaux LCSQA concernant les essais d'aptitudes sur le terrain des systèmes capteurs et permettant d'aboutir, pour chaque expérimentation à un radar de performance.**
- **L'ajout d'une illustration pour tous les systèmes capteurs présents dans Capt'Air.**

6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Afin de faciliter le partage et l'assimilation de résultats obtenus à l'issue d'expérimentations impliquant l'utilisation de systèmes capteurs pour la surveillance de la qualité de l'air, la base de données Capt'Air a été lancée en 2019 et compte à la mi-mars 2021, 59 inscrits dont 39 ayant un profil « contributeur ». A cette même date, 139 systèmes capteurs et 244 expérimentations ont été renseignés dans la base Capt'Air.

En comparaison à d'autres bases de données ou de référencement de systèmes capteurs, Capt'Air est à ce jour la seule base disposant d'un moteur de recherche permettant de sélectionner les systèmes à partir d'un grand nombre de paramètres (ex. : fournisseur, technologie, taille, type de polluant, etc.). A partir du moment où un système capteur est présent dans Capt'Air, il est très facile de retrouver l'ensemble de ses caractéristiques et de lister les expérimentations qui lui ont été associées. Néanmoins, **Capt'Air montre ses limites dans la recherche d'un ou des systèmes capteurs qui seraient utilisables et adaptés pour un usage ciblé,** notamment en raison :

- L'absence d'informations sur certains paramètres fondamentaux (reproductibilité, taux de recouvrement de données etc..)
- Le manque d'informations sur les protocoles utilisés pour les expérimentations renseignées qui peut laisser à interprétation les résultats consignés.

Aussi, dans les prochaines phases de développement de Capt'Air, une réflexion devra être engagée pour combler ces limites. Ce travail se fera en complément des travaux qui ont abouti à la parution de la note de cadrage[17] pour l'utilisation des capteurs et systèmes capteurs pour la mesure des polluants gazeux et particulaires**.**

Sur la base des données renseignées dans Capt'Air et en comparaison avec les critères définis par le LCSQA pour le premier essai national d'aptitudes des micro-capteurs, le modèle Atmotrack 1.2 a été identifié comme système capteur satisfaisant pour la mesure des concentrations dans l'air ambiant en $PM_{2,5}$ et PM_{10}. Le modèle Pollutrack utilisé en station fixe affiche également de très bonnes performances vis-à-vis de la mesure de $PM_{2,5}$. Deux systèmes différents ont été identifiés pour la mesure de NO_2 (RUBIX WT1 et CAIRNET V2). Enfin, pour la mesure d'O_3, l'AQMESH 4.0 sort du lot des dispositifs recensés dans la base.

[17] https://www.lcsqa.org/fr/rapport/note-de-cadrage-pour-lutilisation-des-capteurs-et-systemes-capteur-pour-la-mesure-des

Au regard de l'exploitation des données disponibles dans Capt'Air réalisée dans ce rapport et des retours d'expériences sur l'utilisation de Capt'Air, des évolutions à apporter à la base de données Capt'Air sont à prévoir :

1- **Systématiser le renseignement de certains champs dont l'intérêt majeur a été identifié** et pour lesquels les taux de remplissage sont faibles (ex. : R^2MAX, pente associée au R^2MAX, typologie de localisation et typologie d'influence, reproductibilité, …).

2- **Ajouter / modifier des champs d'intérêt majeur** :

- Valeur médiane obtenue pour le coefficient de détermination R^2 et pente associée à ce R^2 médian,
- Remplacer le champ « incertitudes » par le champ « indicateur d'incertitude » en le complétant par une liste à choix multiples pour apporter des précisions : RMSE, MAPE, IPI, autre (à préciser),
- Concernant le coût de fonctionnement, préciser ce qui est intégré ainsi que la durée prise en compte pour son établissement (ex. : mensuel, annuel, ...),
- Ajouter dans la description du système capteur la liste des polluants que le système capteur est capable de mesurer simultanément,
- Ajouter une illustration de tous les systèmes présents dans la base.

3- Un calcul automatique des 8 notes relatives aux critères qualitatifs et quantitatifs tels que définis dans les travaux LCSQA concernant les essais d'aptitudes sur le terrain des systèmes capteurs et permettant d'aboutir, pour chaque expérimentation à un radar de performance.

7. REFERENCES

1. Kumar P, Morawska L, Martani C, Biskos G, Neophytou M, Di Sabatino S, et al. The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. Environment international. 2015;75:199-205.

2. Snyder EG, Watkins TH, Solomon PA, Thoma ED, Williams RW, Hagler GS, et al. The changing paradigm of air pollution monitoring. Environmental science & technology. 2013;47(20):11369-77.

3. Penza M. COST Action TD1105-European Network on New Sensing Technologies for Air Pollution Control and Environmental Sustainability. Overview and Plans. Procedia engineering. 2015;120:476-9.

4. Karagulian F, Gerboles M, Barbiere M, Kotsev A, Lagler F, Borowiak A. Review of sensors for air quality monitoring. Review of Sensors for Air Quality Monitoring: Luxembourg. 2019.

5. Borrego C, Coutinho M, Costa AM, Ginja J, Ribeiro C, Monteiro A, et al. Challenges for a new air quality directive: the role of monitoring and modelling techniques. Urban Climate. 2015;14:328-41.

6. Castell N, Viana M, Minguillón MC, Guerreiro C, Querol X. Real-world application of new sensor technologies for air quality monitoring. ETC/ACM Technical Paper. 2013;16.

7. Lewis A, Edwards P. Validate personal air-pollution sensors. Nature News. 2016;535(7610):29.

8. Spinelle L, Aleixandre M, Gerboles M. Protocol of evaluation and calibration of low-cost gas sensors for the monitoring of air pollution. Publication Office of the European Union, Luxembourg. 2013.

8. LISTE DES ANNEXES

Annexes	Titres
Annexe 1	Résultats de l'exploitation des données $PM_{2,5}$
Annexe 2	Résultats de l'exploitation des données PM_{10}
Annexe 3	Résultats de l'exploitation des données NO_2
Annexe 4	Résultats de l'exploitation des données O_3
Annexe 5	Définition des critères de performances des systèmes capteurs de l'essai national d'aptitudes des micro-capteurs
Annexe 6	Tableau corrélation champ pris en compte sur Capt'Air pour déterminer les critères de performances

ANNEXES

Annexe 1 : Résultats de l'exploitation des données de $PM_{2,5}$

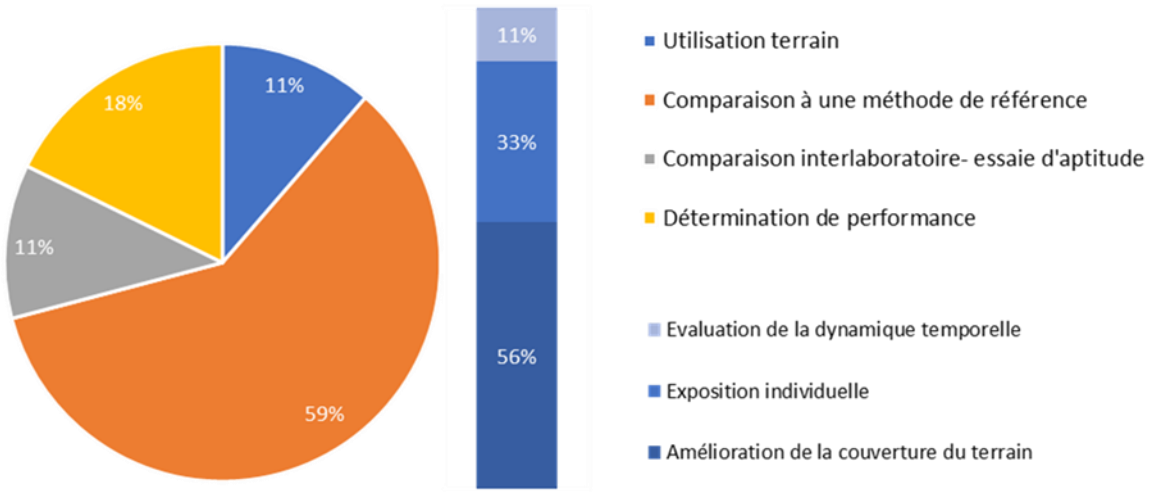

Figure 31: Répartition des expérimentations menées sur les $PM_{2,5}$ en fonction de l'objectif de l'expérimentation

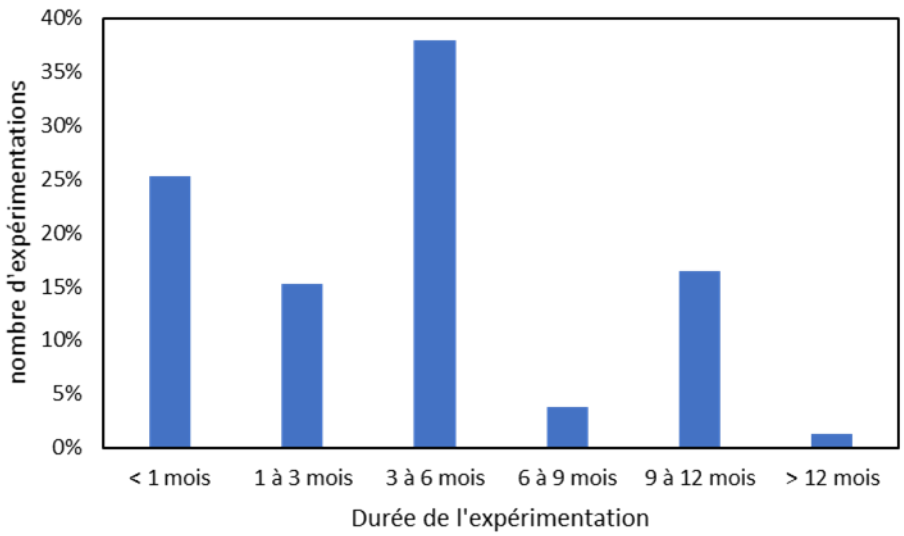

Figure 32 : Répartition des expérimentations concernant les $PM_{2,5}$ en fonction de leur durée

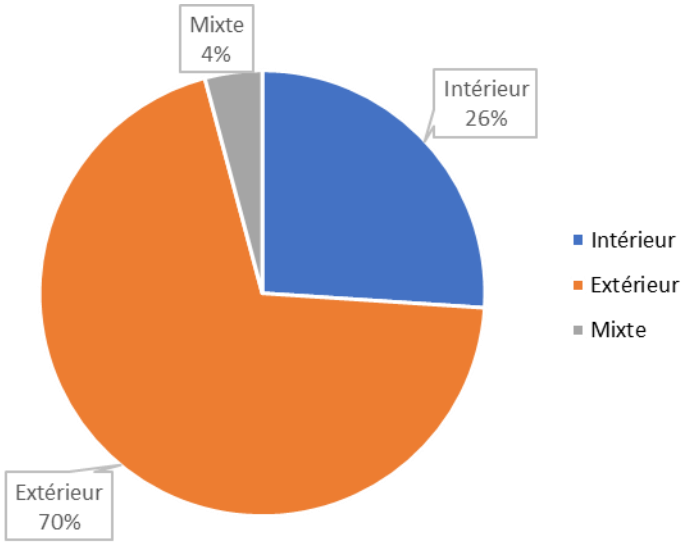

Figure 33 : Répartition des expérimentations en fonction de l'environnement étudié

Annexe 2 : Résultats de l'exploitation des données de PM_{10}

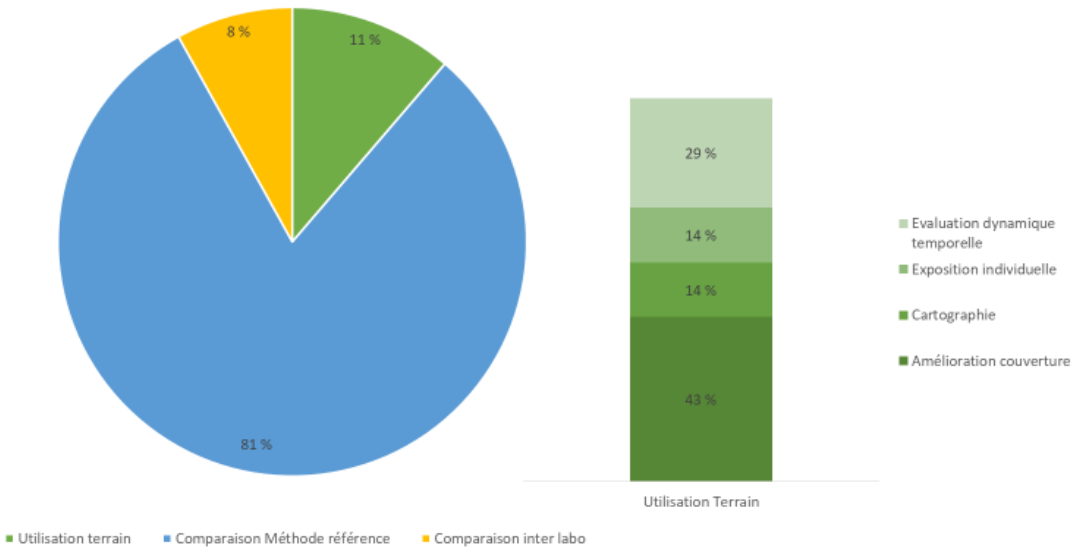

Figure 34 : Répartition des expérimentations menées sur les PM_{10} en fonction de l'objectif de l'expérimentation

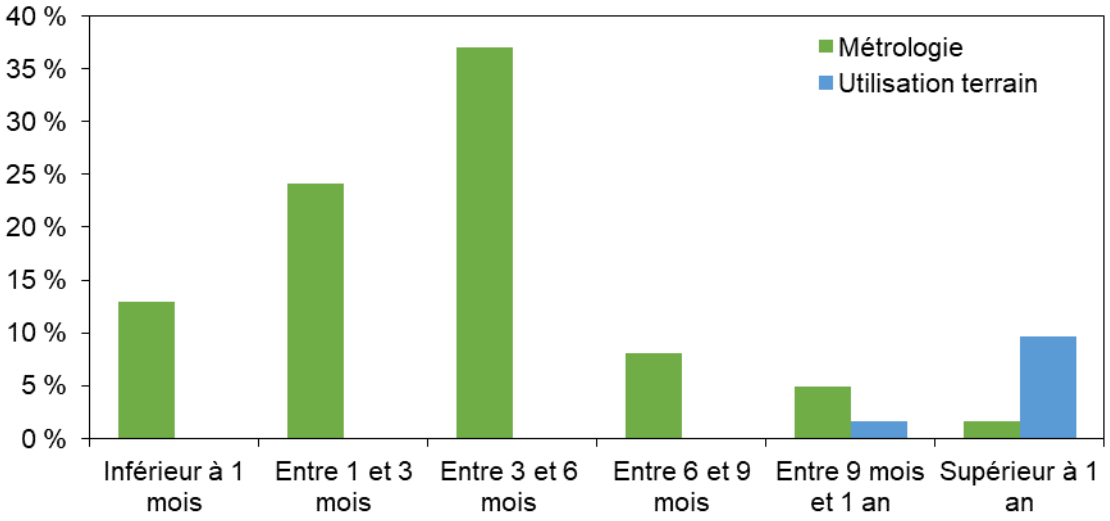

Figure 35 : Répartition des expérimentations concernant les PM_{10} en fonction de leur durée

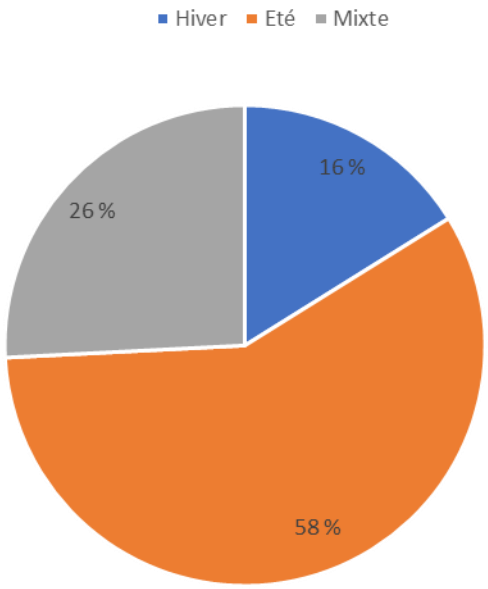

Figure 36 : Répartition des expérimentations concernant les PM_{10} en fonction de la période d'expérimentation

Annexe 3 : Résultats de l'exploitation des données de NO_2

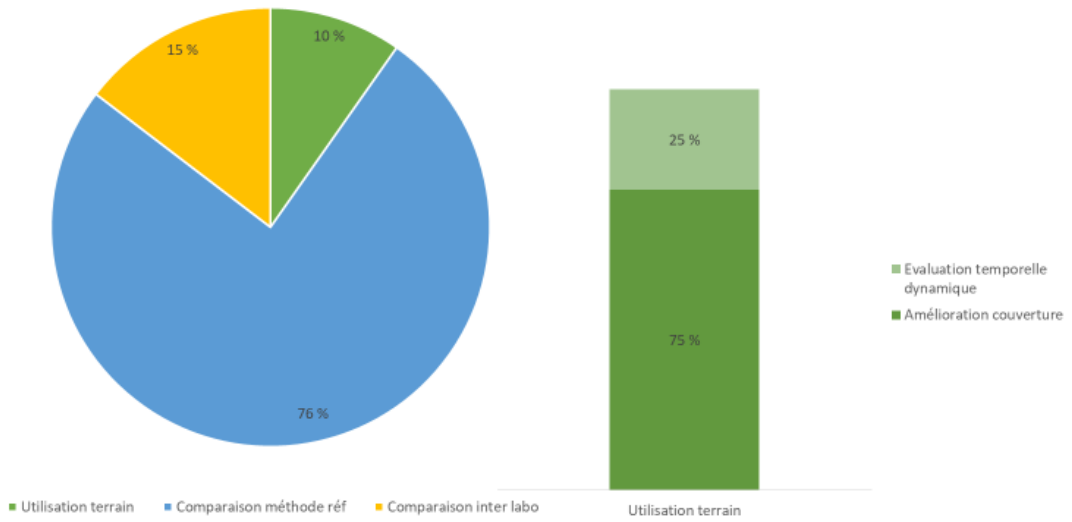

Figure 37 : Répartition des expérimentations concernant l'O_3 en fonction de l'objectif de l'expérimentation

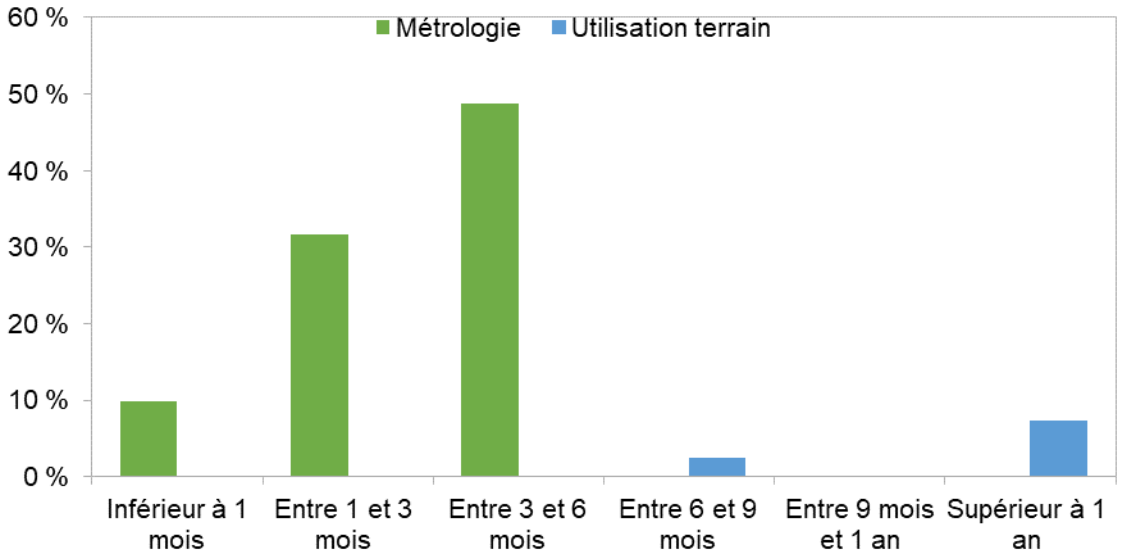

Figure 38 : Répartition des expérimentations en fonction de leur durée

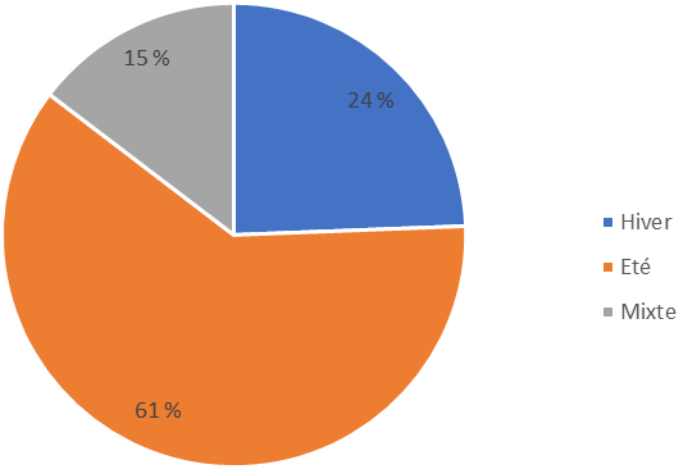

Figure 39 : Répartition des expérimentations en fonction de la période d'expérimentation

Annexe 4 : Résultats de l'exploitation des données de O_3

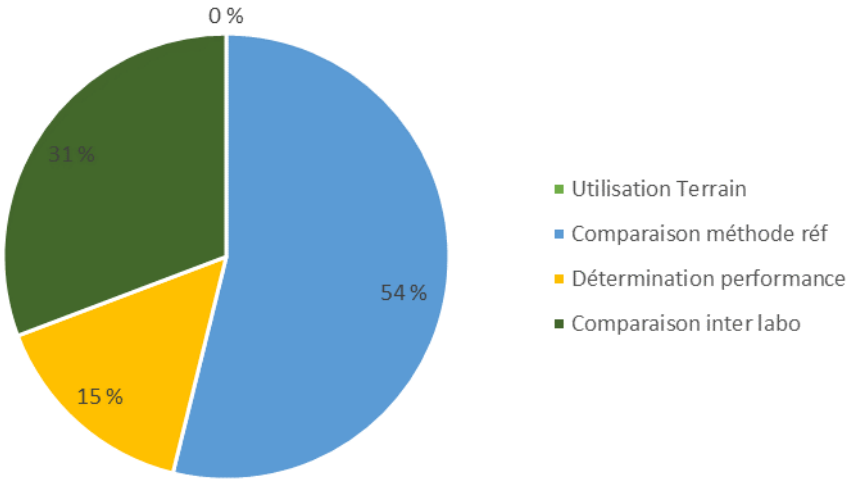

Figure 40 : Répartition des expérimentations associées à l'O_3 en fonction de leur objectif

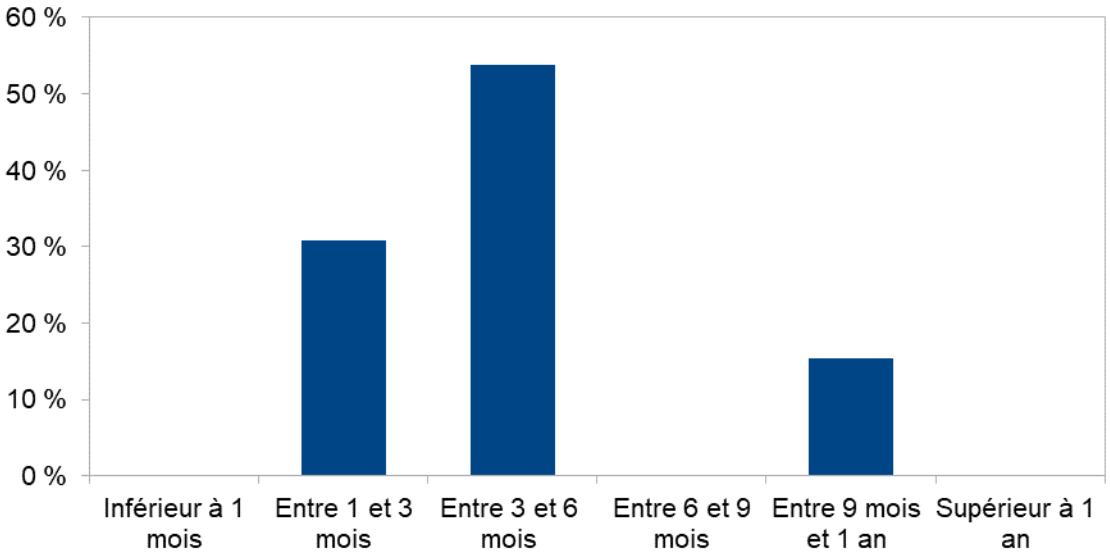

Figure 41 : Répartition des expérimentations associées à l'O_3 en fonction de leur durée

Annexe 5 : Rappel des critères de performances des systèmes capteurs définis dans le rapport EAµC[14]

- **<u>Critère énergie</u> :**

Il se décompose en trois volets :

• le nombre de sources d'énergie possibles pour alimenter le système : secteur, batterie ou les deux ➔ 1 point attribué par type de source disponible ;

• dans le cas d'une alimentation par batterie, la possibilité d'un apport d'énergie renouvelable (ex. : panneaux solaires, éolien, etc.) pour la recharge en ligne de la batterie a été prise en compte ➔ 1 point si oui ;

• autonomie annoncée par le constructeur :

☞ non connue ou < 1 jour ➔ 0 point

☞ de 1 jour à 1 mois ➔ 1 points

☞ > 1 mois ➔ 2 points

- **<u>Critère Fiabilité</u> :**

Il correspond au taux de recouvrement des données valides issues du capteur avant moyennage par l'utilisateur « p » lors de la période d'essai.

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

Période minimale de couverture mesure indicative Directive européenne 2008/50/CE	**p ≤ 14%**	**1 point**
Peu de données, représentativité de la dynamique faible	**14% < p ≤ 45%**	**2 points**
Pertes raisonnables Représentativité acceptable	**45% < p ≤ 75%**	**3 points**
Couverture dynamique équivalente site fixe Directive européenne 2008/50/CE – situation hivernale	**75% < p ≤ 90%**	**4 points**
Couverture dynamique équivalente site fixe Directive européenne 2008/50/CE	**p > 90%**	**5 points**

- **<u>Critère versatilité</u> :**

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.

Ce critère se décompose selon quatre volets :

• le nombre de types de communication des données possibles : locale, filaire (câble propriétaire, USB, Ethernet), sans fil local (Wifi, Bluetooth, ZigBee, LoRa), sans fil GSM ➔ 1 point par type, max 3 points ;

• le type de visualisation, remontée et stockage des données (local, carte SD, logiciel tiers, serveur, API) ➔ 1 point par type, max 4 points ;

• la nature et l'accès aux données brutes, traitées, étalonnées ou vérifiées, ajustables ➔ 1 point par type, max 4 points ;

• le nombre de paramètres mesurés (autres polluants, localisation GPS, température, humidité relative, etc.) ➔ 1 à 4 points.

La note attribuée au système correspond à :

$$note\ finale = \frac{Somme\ des\ points\ du\ système}{Total\ \max possible\ (15)} * 5$$

- **<u>Critère de mise en œuvre</u> :**

Ce critère se décompose en 5 volets :

• l'installation physique du système : éléments de fixation et facilité de mise en place, étanchéité, tenue à la rouille, … ➔ 0 à 2 points ;

• la documentation associée au système : présence ou non d'une documentation technique (version papier/téléchargeable), manuel d'utilisation, fiche d'évaluation des performances, diagnostics préalables, QA/QC ➔ 0 à 1 point ;

• l'installation électrique : alimentation fournie ou non, compatibilité avec la prise secteur, longueur de câble, … ➔ 0 à 2 points ;

• l'accessibilité de la donnée (dématérialisée ou non), si locale, par câble ou action de démontage nécessaire, nécessité d'un logiciel tiers, etc. ➔ 0 à 2 points ;

La note attribuée au système correspond à :

$$note\ finale = \frac{Somme\ des\ points\ du\ système}{Total\ \max possible\ (7)} * 5$$

- **Critère de variabilité :**

La variabilité témoigne de l'écart de reproductibilité entre différents réplicas d'un même système. Elle est calculée en utilisant la formule suivante :

$$Variabilité = \frac{écart - type}{moyenne} \times 100$$

La note attribuée dépend du pourcentage ainsi calculé :

Variabilité					
> 75%	<75%	<50%	<25%	<10%	<5%
0	1	2	3	4	5

- **Critère de pente :**

Le graphique des concentrations mesurées par les capteurs en fonction des concentrations mesurées par les instruments de référence permet de tracer la courbe de corrélation[18]. Un exemple est donné **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** pour les mesures d'ozone du système J.

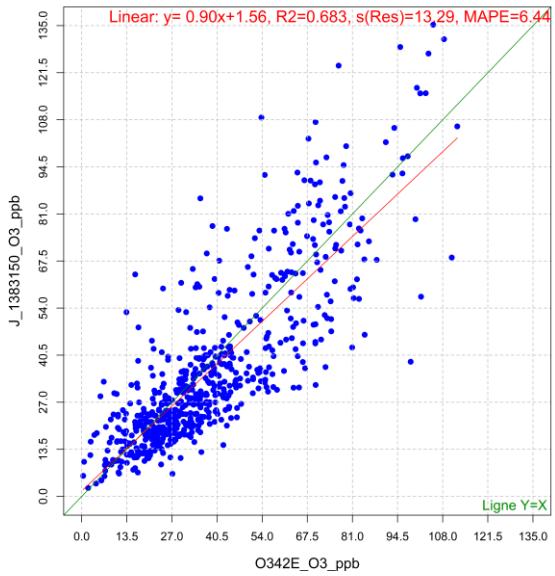

Figure 42 : Exemple de graphique de corrélation pour les mesures d'ozone du système J.

[18] Copyright 2018 EUROPEAN UNION Licensed under the EUPL, Version 1.2 or subsequent versions of the EUPL (the "License"); You may not use this work except in compliance with the License. A copy of the License is given here after. Unless required by applicable law or agreed to in writing, software distributed under the License is distributed on an "AS IS" basis, WITHOUT WARRANTIES OR CONDITIONS OF ANY KIND, either express or implied. See the License for the specific language governing permissions and limitations under the License https://eupl.eu/1.2/en/. Authors: Michel Gerboles, michel.gerboles@ec.europa.eu; Laurent Spinelle, laurent.spinelle@ineris.fr; Alexander Kotsev, alexander.kotsev@ec.europa.eu; Federico Karagulian, federico.karagulian@ec.europa.eu; Marco Signorini, marco.signorini@liberaintentio.com.

Dans cet exercice, seule la régression linéaire a été retenue comme modèle commun à l'ensemble des capteurs. Ainsi, **la valeur de la pente** (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, ligne rouge) caractérise la capacité du capteur à produire des mesures justes par rapport à l'instrument de référence. Si les deux mesures sont identiques, la pente idéale sera égale à 1 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, ligne verte). Le **R^2**, appelé coefficient de détermination (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, R2) caractérise la capacité du capteur à produire des mesures fidèles au regard des mesures de référence. On appelle cette caractéristique "la dispersion des mesures" et sa valeur idéale de 1 signifie que le capteur et la méthode de référence sont parfaitement synchrones.

Ainsi, dans notre schéma de notation, plus on s'éloigne d'une pente de la valeur idéale de 1 pour R^2 et pour la pente, plus la note attribuée est basse, comme présenté dans les tableaux suivants :

Pente						
Valeur	**p>5 ou p≤0,02**	**5≥p>4 ou 0,02<p≤0,25**	**4≥p>3 ou 0,25<p≤0,33**	**3≥p>2 ou 0,33<p≤0,5**	**2≥p>1,5 ou 0,5<p≤0,75**	**1,5≥p≥1 ou 0,75<p≤1**
Note	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**

R^2						
Valeur	**NC**	**≤0,3**	**≤0,5**	**≤0,7**	**≤0,9**	**>0,9**
Note	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**

Annexe 6 : Table de corrélation entre champs pris en compte sur Capt'Air et les données de l'EAµC pour déterminer les notes relatives aux 4 critères qualitatifs de performances

	Données prises en compte pour l'EAµC	**Champs sur Capt'Air pris en compte**
Critère « énergie »	Nombre de sources d'alimentation	Mode d'alimentation
	La possibilité d'utiliser une source d'énergie renouvelable	Mode d'alimentation "Solaire" (seule source d'énergie renouvelable sur Capt'air)
	Autonomie batterie	Autonomie sur batterie
Critère « fiabilité »	Taux de recouvrement des données	Couverture temporelle journalière moyenne (faible taux de remplissage du champ "taux de recouvrement")
Critère « versatilité »	Nombre de type de communication	Mode de communication
	Type de visualisation, stockage des données	Lieu de stockage des données
	Nature et accès aux données	Accès aux données brutes, Correction des données possible par l'utilisateur, Correction des données possible par le fabricant. (Pas de champ sur la manière dont sont traitées les données)
	Nombres de paramètres mesurés	Paramètres complémentaires mesurées
Critère « mise en œuvre »	Installation physique	*Aucun champ correspondant*
	Documentation	*Aucun champ correspondant*
	Installation électrique	Mode d'alimentation (pas de champ par rapport à la longueur de câble)
	Accessibilité de la donnée	Logiciel d'acquisition, Présence d'un système de visualisation de la donnée

direction et secrétariat du LCSQA
INERIS - parc technologique Alata - BP 2 - F60550 Verneuil-en-Halatte
tél. 03 44 55 69 16 - www.lcsqa.org