



SOLUTIONS
POUR
NOTRE
AIR

CHALLENGE Microcapteurs 2025



Avec la participation de :



Révision : 11.02.2026

Table des matières

1 Introduction

2 Méthode

2.1 Catégories

2.2 Sites d'évaluation

2.3 Prétraitement et validation des données des capteurs

2.4 Critères de performance

2.5 Pondération des critères

2.6 Livrables

3 Discussion

3.1 Limitations

3.2 Perspectives

1 Introduction

Les progrès remarquables des technologies de capteurs au cours des deux dernières décennies ont ouvert la voie à une large gamme de nouvelles applications potentielles basées sur la mesure de la qualité de l'air. Cela a conduit à l'émergence d'un marché très dynamique, voire volatil, de solutions intégrées de surveillance de la qualité de l'air basées sur des capteurs à faible coût. Bien que des avancées significatives aient été réalisées ces dernières années pour élaborer des normes et des standards de performance, la grande diversité des dispositifs disponibles sur le marché – dont très peu ont fait l'objet d'un processus de certification de la qualité des données – peut induire une confusion, y compris parmi les utilisateurs experts, lorsqu'il s'agit de choisir une plateforme de mesure adaptée à une application spécifique.

Le Challenge AIRLAB Microcapteurs vise à répondre à la demande croissante d'une évaluation indépendante et objective des performances des solutions de surveillance de la qualité de l'air basées sur des microcapteurs. Cette édition s'appuie sur des efforts menés à l'échelle internationale, notamment le travail pionnier du South Coast Air Quality Management District à travers son Air Quality Sensor Performance Evaluation Center (AQ-SPEC) [1]. Pour l'édition 2025, AQ-SPEC rejoint le Challenge en tant que partenaire expert, aux côtés d'autres initiatives majeurs d'évaluation des capteurs de qualité de l'air telles que l'Air Quality Sensor Evaluation and Training Facility pour l'Afrique de l'Ouest (Afri-SET), le centre d'évaluation et de formation sur les capteurs en Inde, Indi-SET, au CSTEP (Center for Study of Science, Technology and Policy), et NILU (Norwegian Institute for Air Research). Leur expertise collective renforce la capacité du Challenge à évaluer la performance des capteurs dans une variété d'environnements et de cas d'usage. Cette collaboration vient également consolider l'approche holistique d'AIRLAB, qui ne se limite pas à la performance métrologique mais prend également en compte des aspects tels que l'utilité, l'ergonomie, la portabilité et le coût.

En outre, en partenariat avec Ile-de-France Mobilités et SNCF Gares & Connexions, l'édition 2025 du Challenge intégrera une évaluation des microcapteurs dans les gares ferroviaires souterraines, marquant une avancée importante dans l'évaluation des solutions de surveillance de la qualité de l'air pour les environnements de transport clos. Le Challenge est structuré comme un événement périodique dans lequel toutes les plateformes de capteurs participantes sont évaluées simultanément, offrant ainsi un état des lieux des microcapteurs commercialement disponibles à un moment donné.

L'édition actuelle du Challenge cherche à consolider et affiner son processus d'évaluation en s'appuyant sur l'expérience accumulée lors des quatre premières éditions (2018, 2019, 2021 et 2023). Elle vise également à dépasser certaines limites inhérentes au format d'un challenge, notamment en matière de généralisation des résultats, en diversifiant les environnements d'évaluation. Dans cette optique, la 5^e édition du Challenge Microcapteurs AIRLAB inclura deux sites d'évaluation en extérieur situés en dehors de la France métropolitaine, à Accra (Ghana) et Bangalore (Inde), qui présentent des conditions climatiques et de pollution significativement différentes. L'édition 2025 explorera ainsi l'impact de nouveaux paramètres sur la performance des microcapteurs, notamment des niveaux de pollution plus élevés, des profils d'émissions variés et des conditions météorologiques contrastées, en particulier des températures et une humidité plus élevées. Ces nouveaux sites ont été sélectionnés pour leurs caractéristiques environnementales distinctes ainsi que pour leurs solides capacités locales en matière de surveillance de la qualité de l'air et de recherche sur les microcapteurs.

L'objectif du présent document est de détailler les critères d'évaluation du Challenge ainsi que les protocoles de mesure associés. Il vient en complément du Règlement du Challenge Microcapteurs. Il est fourni à titre informatif et publié en parallèle de l'appel à participation. Le protocole pourra être modifié en cours de Challenge en raison de contraintes matérielles (par exemple, remplacement d'analyseurs de référence par d'autres modèles), d'ajustements liés aux besoins spécifiques d'évaluation de certains polluants en fonction des capteurs effectivement soumis, ou de tout autre changement jugé nécessaire par le Comité de Pilotage du Challenge pour garantir la qualité du processus d'évaluation. Toutes les modifications du protocole seront intégrées dans des versions révisées du présent document, et les participants seront dûment informés de chaque mise à jour.

2 Méthode

Afin que leurs microcapteurs de qualité de l'air soient évalués dans le cadre du Challenge, les candidats doivent soumettre leur dossier de candidature conformément aux Conditions générales du Challenge Microcapteurs. Une fois l'ensemble des candidatures reçues, le Jury se réunit pour les valider et effectuer une sélection préliminaire des solutions candidates sur la base de la complétude et de la pertinence des dossiers soumis.

Dans les deux mois suivant la sélection préliminaire, trois unités de chaque plateforme de microcapteurs par environnement de test sont réceptionnées, et une série de tests techniques initiaux est effectuée (par exemple, vérifications de récupération des données, robustesse mécanique en fonction de la catégorie d'usage, etc.) afin d'évaluer la solidité technique des solutions candidates. Sur la base de l'expérience acquise lors de cette phase, le Jury se réunit à nouveau pour déterminer quels candidats peuvent accéder à l'étape suivante du Challenge.

Par la suite, la qualité métrologique des capteurs candidats est évaluée en fonction des catégories d'usage spécifiées dans leur candidature, soit en laboratoire de métrologie, soit en conditions réelles. Ces tests fournissent les données de mesure et les informations d'usage nécessaires pour évaluer les solutions candidates selon les critères de précision et d'ergonomie. Les autres critères (à savoir utilité, portabilité et coût) sont évalués principalement sur la base de la vérification des spécifications du fabricant.

Dans cette section, nous présentons la méthodologie utilisée pour l'évaluation des solutions candidates. Nous commençons par définir les différentes catégories d'usage prises en compte par le Challenge, nous décrivons ensuite les environnements d'évaluation, et enfin, nous détaillons chaque critère d'évaluation ainsi que son mode de calcul.

2.1 Catégories

Dans le cadre du Challenge, nous définissons la catégorie d'un microcapteur comme son type d'utilisation ou son application prévue. Le Challenge comprend six catégories, dont certaines sont librement adaptées du rapport technique n° 1215 de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) sur les microcapteurs [2]. Elles sont regroupées en fonction du domaine d'application ciblé : Air extérieur et Air intérieur (voir Figure 1).

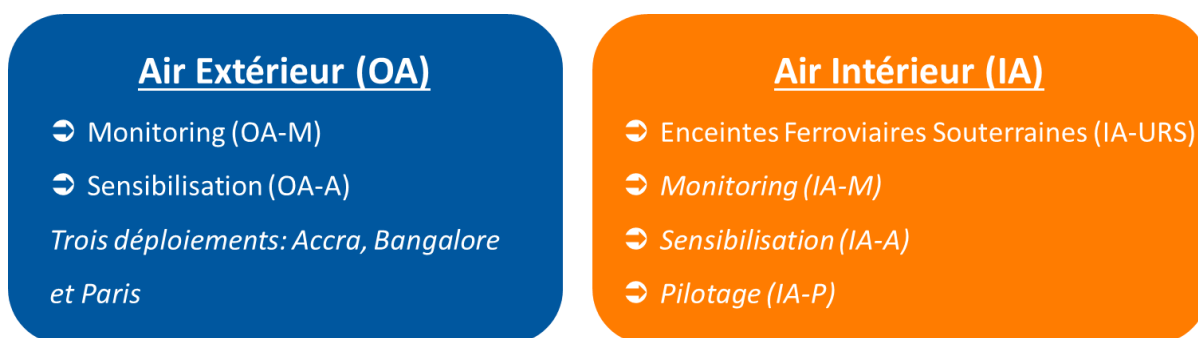


Figure 1 : Les six catégories du Challenge regroupées par domaine d'application.

Dans ce contexte, les six catégories d'usage sont définies comme suit :

- ❖ **Air Extérieur – Outdoor Air (OA) :**
 - **Sensibilisation – Awareness (OA-A)** – La sensibilisation du public ou de l'utilisateur dans un lieu fixe en air extérieur : favoriser l'information et la sensibilisation du public ou des usagers avec des données en air extérieur. Les exigences pour ce type d'application sont moindres sur la qualité des données. Ces Capteurs ne visent pas l'équivalence aux appareils de références mais la cohérence. Le panel de polluants suivis peut être restreint.

- **Monitoring (OA-M)** – L’intégration dans des dispositifs réglementaires de surveillance de la qualité de l’air afin de positionner au regard de la réglementation les concentrations relevées en air extérieur sur un site donné. Cela implique des exigences très hautes pour la qualité de données produites, très proches de celles attendues sur les appareils de référence. Les principaux polluants réglementés et problématiques sont à mesurer.
- ❖ **Air Intérieur – Indoor Air (IA) :**
 - **Enceintes Ferroviaires Souterraines (EFS) – Underground Railway Stations (IA-URS)** – La mesure de la qualité de l’air à l’intérieur des infrastructures ferroviaires souterraines, sur les quais des stations. Ces données pouvant compléter des dispositifs de surveillance de la qualité de l’air en EFS, il est attendu des données de qualités proches de celles produites par des appareils de référence et un suivi des polluants principaux de cet environnement – les matières particulaires.
 - **Sensibilisation – Awareness (IA-A)** – La sensibilisation du public ou de l’usager dans un lieu fixe en air intérieur : favoriser l’information et la sensibilisation du public ou des usagers avec des données en air intérieur. Les exigences pour ce type d’application sont moindres sur la qualité des données. Ces Capteurs ne visent pas l’équivalence aux appareils de références mais la cohérence. Le panel de polluants suivis peut être restreint.
 - **Monitoring (IA-M)** – Le soutien de la surveillance de la conformité à la réglementation de la qualité en air intérieur dans un lieu fixe : vérification des normes nationales de la qualité de l’air dans les établissements d’accueil collectif d’enfant de moins de 6 ans (crèches, halte-garderie...), les écoles maternelles et les écoles élémentaires. Cela implique une haute qualité de données en répondant aux exigences accréditations LAB REF30¹ ou au cahier des charges de l’INERIS sur ce sujet². Le processus de mesure suit des méthodes entièrement prescrites et les meilleures pratiques.
 - **Pilotage – Piloting (IA-P)** – Le pilotage de l’air intérieur dans un bâtiment : piloter, gérer, réguler l’air intérieur d’un bâtiment ou d’une installation en s’appuyant sur un Capteur multi-paramètres³ et facilement exploitable dans un bâtiment ou une installation. Les exigences pour ce type d’application sont moindres sur la qualité des données. Ces Capteurs ne visent pas l’équivalence aux appareils de références mais une forte cohérence, tout en fonctionnant en continu et en étant en capacité d’interagir avec le système de domotique et de remonter l’information rapidement et facilement à l’usager et/ou le gestionnaire.

2.2 Sites d’évaluation

Pour couvrir les différentes catégories du Challenge, l’édition 2025 prévoit cinq types de cadres d’évaluation : trois environnements statiques extérieurs et deux environnements intérieurs. Ceux-ci sont répertoriés dans le Tableau 1 et décrits en détail dans le reste de cette sous-section.

Tableau 1 : Les environnements d’évaluation du Challenge Microcapteurs AIRLAB 2025.

	Environnement d’évaluation	Lieu de déploiement	Catégories
Air Extérieur	Temperate climate – Europe	Paris, France	OA-M, OA-A
	Climat tropical – Afrique de l’Ouest	Accra, Ghana	OA-M, OA-A
	Climat tropical – Asie du Sud	Bangalore, Inde	OA-M, OA-A
Air Intérieur	Enceintes ferroviaires souterraines	Paris, France	IA-URS
	Espaces non spécifiques	Paris, France	IA-M, IA-A, IA-P

¹ qui reprend notamment les normes NF EN ISO 16017-2 et NF EN ISO 16000-4

² Evaluation de la conformité de kits pour la réalisation de mesures indicatives de formaldéhyde, de benzène et du dioxyde de carbone dans l’air intérieur d’établissements recevant des enfants - INERIS - 2017

³ Dans ce contexte, par capteur multi-paramètres on entend un capteur qui cible plusieurs polluants atmosphériques. La température, l’humidité ou la pression ne sont pas considérées comme des polluants atmosphériques.



Figure 2 : Site d'évaluation extérieur – Vues de la station de surveillance BP-Est : extérieur (gauche) et intérieur (droite).

L'environnement d'évaluation **Air extérieur – Climat tempéré (Europe)** est représenté par la station de surveillance réglementaire Boulevard Périphérique Est (BP-Est), située à proximité de la Porte Dorée (voir Figure 2). L'altitude de ce site est de 48 m, avec les coordonnées WGS 84 : 48° 50' 19" N (latitude) et 2° 24' 46" E (longitude). Cette station présente une particularité : en fonction de la direction du vent, elle peut se comporter soit comme une station de proximité trafic (vent d'Est), soit comme une station de fond urbain (vent d'Ouest). Elle offre ainsi une large gamme dynamique, ce qui en fait un site idéal pour tester de nouveaux équipements de mesure. Les catégories du Challenge évaluées à la station BP-Est sont **OA-A** et **OA-M**.

Les analyseurs suivants sont utilisés à BP-Est comme instruments de référence pour le Challenge Microcapteurs :

- Les **particules** en suspension sont mesurées à l'aide de deux analyseurs Met One BAM-1020⁴ à atténuation bêta (BAM) pour le **PM₁₀** et le **PM_{2.5}** (Référence normative pour l'air ambiant : NF EN 16450: 2017) ainsi que d'un analyseur PALAS Fidas 200⁵, un spectromètre optique, pour le comptage des particules (**PN**). Des **moyennes horaires** sont utilisées pour les BAM et le Fidas, bien que ce dernier permette des résolutions temporelles plus fines.
- Les **oxydes d'azote** sont mesurés par un analyseur à chimiluminescence Thermo Scientific 42i⁶, qui fournit des mesures de **NO** et **NO₂** (Référence normative pour l'air ambiant : NF EN 14211: 2012). Dans le cadre du Challenge, des **moyennes horaires** sont utilisées, mais les données de cet analyseur sont également disponibles à des résolutions plus fines (ex. moyennes sur 15 min, scans de 10 s).
- L'**ozone** est mesuré avec un analyseur d'absorption UV Teledyne API T400⁷ (Référence normative pour l'air ambiant : NF EN 14625: 2013). Des **moyennes horaires** sont utilisées, mais des données à résolution plus fine sont également disponibles (ex. moyennes sur 15 min, scans de 10 s).
- Le **carbone noir** des aérosols est mesuré avec un aethalomètre Magee Scientific AE33⁸. Des **moyennes horaires** sont utilisées, mais des résolutions temporelles allant jusqu'à 1 s sont possibles.

L'environnement d'évaluation **Air extérieur – Climat tropical – Afrique de l'Ouest** est représenté par la station de surveillance de fond urbain Afri-SET, située sur le campus de l'Université du Ghana à Legon, Accra, Ghana, aux coordonnées 5.65136° N, 0.18566° W, à une altitude de 108 m (voir Figure 3). Accra est la capitale et la plus grande ville du Ghana. Elle bénéficie d'un climat tropical avec une saison des pluies (d'avril à octobre) et une saison sèche (de novembre à mars). L'humidité est élevée toute l'année, mais elle est atténuée par les brises marines. L'Harmattan (de décembre à février)

⁴ <https://metone.com/air-quality-particulate-measurement/regulatory/bam-1020/>

⁵ <https://www.palas.de/en/product/fidas200>

⁶ <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/42i#42i>

⁷ <http://www.teledyne-api.com/products/oxygen-compound-instruments/t400>

⁸ <https://www.aerosolmageesci.com/products/aerosol-magee-scientific-aethalometer/>

apporte un air sec et poussiéreux, tandis que les fortes pluies culminent en avril-juillet et septembre-octobre. Les catégories d'usage évaluées sur ce site sont **OA-A** et **OA-M**.



Figure 3 : Site d'évaluation extérieur – Station Afri-SET (gauche) et emplacement du campus de l'Université du Ghana (droite).

Les analyseurs suivants seront utilisés à Afri-SET comme références pour le Challenge 2025 :

- Les **particules** en suspension sont mesurées à l'aide de l'analyseur Teledyne T640⁹, un spectromètre optique (principe de mesure décrit par la norme NF EN 16450: 2017) pour **PM₁₀** et **PM_{2.5}**. Des **moyennes horaires** sont utilisées, mais des résolutions temporelles plus fines sont également possibles.
- Les **oxydes d'azote** sont mesurés à l'aide d'un analyseur de chimiluminescence EcoTech Serinus 40 NOx¹⁰, qui fournit des mesures pour **NO** et **NO₂** (Référence normative pour l'air ambiant : NF EN 14211: 2012). Dans le cadre du Challenge, des **moyennes horaires** sont utilisées, mais les données de cet analyseur sont également disponibles à des résolutions plus fines (par exemple, des scans à la minute).
- L'**ozone** est mesuré à l'aide de l'analyseur par absorption UV 2B Technologies 106-L¹¹. Des **moyennes horaires** sont utilisées, mais des résolutions temporelles plus fines sont également possibles avec cet analyseur.



Figure 4 : Site d'évaluation extérieur – Station Indi-SET à Bengaluru : vue extérieure (gauche) et vue intérieure (droite).

L'environnement d'évaluation **Air extérieur – Climat tropical – Asie du Sud** est représenté par le premier centre Indi-SET établi par CSTEP sur son campus de Bangalore. Il constitue un site de fond

⁹ <https://www.atecorp.com/products/teledyne-api/t640>

¹⁰ <https://metone.com/products/serinus-40-nitrogen-oxides-analyzer/>

¹¹ <https://2btech.io/items/ambient-ozone-monitors/model-106-l-ozone-monitor/>

urbain situé à 13° 2' 54,6" N, 77° 34' 46,5" E, à environ 10 mètres au-dessus du niveau du sol (voir Figure 4). Bengaluru est la capitale de l'État du Karnataka et la troisième ville la plus peuplée de l'Inde. Située à 920 m d'altitude, Bangalore bénéficie d'un climat tropical de savane avec des températures modérées toute l'année. La saison sèche (novembre-avril) est chaude et ensoleillée, tandis que la saison des pluies (mai-octobre) apporte des averses de mousson, culminant de juin à septembre. L'humidité est modérée, et les soirées tendent à être plus fraîches en raison de l'altitude de la ville. Les catégories d'usage évaluées sur ce site sont **OA-A** et **OA-M**.

Les analyseurs suivants de **Indi-SET** seront utilisés à **Bengaluru** comme références pour le Challenge 2025 :

- Les **particules** en suspension sont mesurées à l'aide du Vasthi Instruments Vair-9009¹², fonctionnant selon le principe de l'atténuation des rayons bêta, et du Palas Fidas 200S¹³, basé sur la diffusion lumineuse optique par particules individuelles. Pour le Challenge, nous utilisons **PM_{2.5}** et **PM₁₀** du Vair-9009 et le comptage des particules (**PN**) du Fidas 200S. Des **moyennes horaires** sont utilisées, mais des résolutions temporelles plus fines sont possibles pour le Fidas.
- Les **oxydes d'azote** sont mesurés à l'aide de l'analyseur de chimiluminescence Kentek Mezus 210¹⁴, qui fournit des mesures pour **NO** et **NO₂**. Dans le cadre du Challenge, des **moyennes horaires** sont utilisées, mais les données de cet analyseur sont également disponibles à des résolutions plus fines (par exemple, des scans à la minute).
- L'**ozone** est mesuré avec l'analyseur d'absorption UV 2.B Technologies Model 108-L¹⁵. Des **moyennes horaires** sont utilisées, mais des données à résolution plus fine sont également disponibles (par exemple, moyennes sur 15 min, scans de 10 s).
- Le **carbone noir** des aérosols est mesuré avec un aethalomètre Magee Scientific AE33. Des **moyennes horaires** sont utilisées, mais des résolutions temporelles allant jusqu'à 1 s sont possibles.
- Le **monoxyde de carbone** est mesuré à l'aide du monitor Horiba Ambient CO APMA-370, utilisant une méthode d'analyse infrarouge à modulation croisée non-dispersive. Des **moyennes horaires** sont utilisées, mais des données sur 3 minutes sont également possibles.

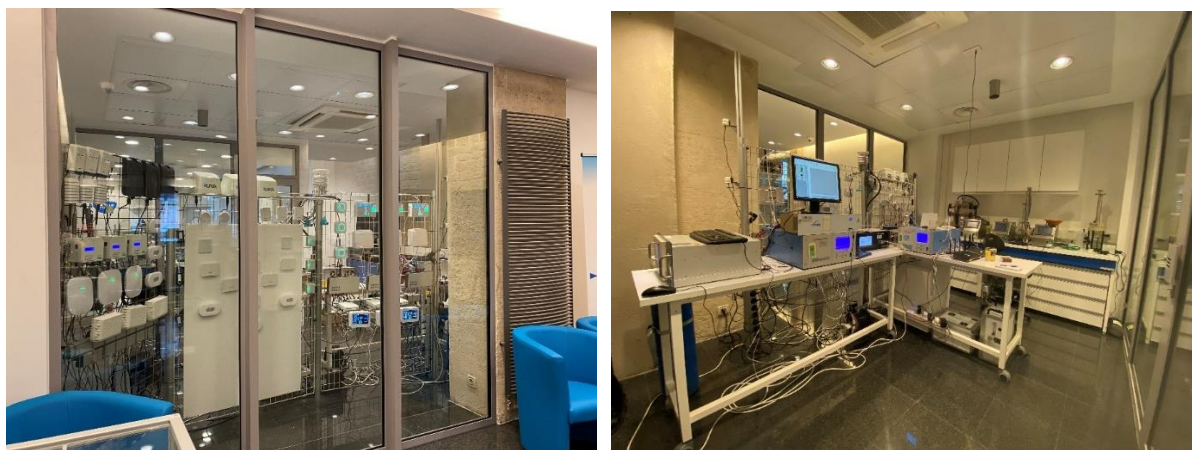


Figure 5 : Vue de face du déploiement des capteurs de qualité de l'air intérieur (gauche) et vue arrière montrant les analyseurs de référence (droite).

Pour l'évaluation des capteurs de qualité de l'air intérieur pour des espaces non spécifiques, une extension dédiée du laboratoire de métrologie Airparif est utilisée comme **environnement d'évaluation Air intérieur – Espaces non spécifiques** (voir Figure 5). Cet espace a été construit en janvier 2023 pour les tests d'exposition sur de grands volumes (i.e. taille de pièce) des systèmes de

¹² <https://vasthi.com/product/22/pm10-and-pm2.5-caaqms>

¹³ <https://www.palas.de/en/product/fidas200s>

¹⁴ <https://emin.asia/kentekmezus-210-kentek-mezus-210-nox-analyzer-0-1-0-5-1ppm-151761/pr.html>

¹⁵ <https://2btech.io/items/industrial-ozone-monitors/model-108-l-ozone-monitor/>

mesure. Il offre un accès facile aux analyseurs de référence et aux circuits de gaz, un contrôle climatique de la pièce permettant un certain degré de régulation de l'environnement, un accès contrôlé au déploiement et, enfin, la disponibilité d'un mur en verre qui permet de présenter les tests à des fins de communication.

Les catégories d'utilisation évaluées dans cet espace sont **IA-A**, **IA-M** et **IA-P**. À cet effet, les matériaux suivants sont utilisés comme référence :

- Les **particules** en suspension sont mesurées à l'aide du PALAS Fidas 200, un spectromètre optique (principe de mesure décrit par la NF EN 16450: 2017). Le Fidas fournit plusieurs sorties, y compris la granulométrie des particules. Actuellement, pour le Challenge, nous utilisons ses sorties **PM10**, **PM2.5**, **PM1** et comptage des particules (**PN**) avec une agrégation temporelle sur **10 minutes**.
- Le **dioxyde de carbone** est mesuré à l'aide du Thermo Scientific 410i¹⁶, un analyseur infrarouge non dispersif (NDIR), avec une agrégation temporelle sur **10 minutes**.
- Les **oxydes d'azote** sont mesurés par le Thermo Scientific 42i, un analyseur de chimiluminescence, qui fournit des mesures pour **NO** et **NO₂** (principe de mesure décrit par la NF EN 14211: 2012). Pour les évaluations intérieures, des moyennes sur **10 minutes** sont utilisées.
- Les **concentrations de composés organiques volatils (COV)** sont mesurées à l'aide du Syntech Spectras GC 955¹⁷, qui est basé sur la méthode d'échantillonnage pompé automatique avec chromatographie en phase gazeuse in-situ (principe décrit par la NF EN 14662-3). Il est configuré pour des mesures avec une **moyenne sur 15 minutes**.
- Les concentrations en **formaldéhyde** sont mesurées par prélèvement actif sur des cartouches imprégnées de 2,4-dinitrophénylhydrazine (DNPH), suivies d'une extraction par solvant et d'une analyse par chromatographie liquide haute performance (HPLC) avec détection UV, conformément à la norme NF EN 16000-4. Les cartouches sont exposées selon une périodicité de **8 heures**.

Afin d'étudier la réponse des capteurs, plusieurs scénarios de stimulation spécifiques sont considérés pour les évaluations intérieures, en utilisant des cigarettes classiques et électroniques, des bougies, de l'encens, des produits de nettoyage et la cuisine.



Figure 6 : Site d'évaluation Indoor Air – URS – Vue extérieure de la station Avenue Foch du RER C (à gauche) et station de surveillance de référence déployée sur le quai (à droite).

L'environnement d'évaluation **Indoor Air – Underground Railway Stations** est installé sur le quai de la station Avenue Foch, une station du RER C exploitée par la SNCF (voir Figure 6). Elle est située dans le

¹⁶ <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/410i#/410i>

¹⁷ <https://www.synspec.nl/products/gc-955.html>

16^e arrondissement de Paris, aux coordonnées 48°52'14"N (latitude) et 2°16'31"E (longitude). La catégorie du Challenge évaluée à la station Avenue Foch est **IA-URS**.

Une station de surveillance à long terme est déjà présente sur le quai de la station et servira de référence pour le Challenge. Elle comprend les analyseurs suivants :

- Les **particules** fines sont mesurées à l'aide du Thermo Scientific 1405-F, un moniteur basé sur la microbalance oscillante à élément effilé (TEOM) et un Filter Dynamics Measurement System (FDMS)¹⁸, fournissant des données pour **PM₁₀**, **PM_{2.5}**, **PM₁** (Norme de référence pour l'air ambiant : NF EN 16450: 2017) ainsi que d'un analyseur PALAS Fidas 200¹⁹, un spectromètre optique, pour le comptage des particules (**PN**). Des **moyennes sur 15 minutes** sont utilisées pour le Challenge, mais des résolutions temporelles plus fines sont possibles avec ce type d'analyseur.
- Le **dioxyde de carbone** est mesuré avec le Thermo Scientific 410i, un analyseur à infrarouge non dispersif (NDIR), avec une agrégation temporelle **moyenne de 15 minutes**.

2.3 Prétraitement et validation des données des capteurs

Afin d'assurer la cohérence et la transparence des données utilisées dans le processus d'évaluation, il est important de définir des lignes directrices claires pour le prétraitement des données et la validation technique. Cette section décrit les procédures de gestion de l'invalidation des données, des problèmes techniques et de la gestion de la perte de données potentielle. Bien que nous appliquions une validation technique pour garantir la fiabilité des données, il est important de noter que les critères environnementaux ne seront pas utilisés pour invalider les données. L'invalidation environnementale nécessiterait l'utilisation de connaissances d'experts, qui peuvent ne pas être disponibles pour tous les utilisateurs des systèmes de capteurs. Par conséquent, nous nous appuyons exclusivement sur la validation technique pour maintenir l'équité et la cohérence tout au long du Challenge. Le prétraitement et la validation des données seront réalisés selon les principes suivants :

- **Invalidation basée sur les algorithmes du fabricant** – L'invalidation des données sera gérée en utilisant les **algorithmes préexistants** mis en place par le fabricant, accessibles à tous les utilisateurs. Ces algorithmes seront appliqués de manière cohérente à toutes les données, et aucune demande d'invalidation supplémentaire de la part des participants, spécifique à la campagne du Challenge, ne sera acceptée.
- **Invalidation technique due aux valeurs aberrantes** – L'objectif de cette étape est de supprimer les valeurs aberrantes et autres données anormales résultant de sources d'erreur non systématiques ou de défaillances critiques des capteurs. Cependant, les erreurs systémiques – telles que celles résultant de sensibilités croisées, de sensibilités aux facteurs environnementaux ou d'autres limitations inhérentes à la technologie des capteurs – ne sont pas soumises à l'invalidation.
 - **Les données erronées non systémiques et aberrantes** seront supprimées selon des critères techniques.
 - **Les valeurs négatives seront conservées**, sauf si elles sont clairement causées par des dysfonctionnements du capteur.
 - **Les données aberrantes résultant de défaillances critiques identifiables des capteurs** (par exemple, des valeurs bloquées à zéro ou à un niveau maximum fixe) seront supprimées.

¹⁸ <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/fr/en/TEOM1405F>

¹⁹ <https://www.palas.de/en/product/fidas200>

- **Exigence de présence minimale de données valides** : un minimum de 75 % de données valides doit être disponible dans chaque **fenêtre d'agrégation** (par exemple, pour calculer les moyennes horaires lors des évaluations en extérieur).
- **Perte de données due à des problèmes d'infrastructure de déploiement** – La perte de données résultant de problèmes d'infrastructure de déploiement – tels que des pannes d'alimentation ou de communication, ou des erreurs dans l'installation ou la configuration des capteurs dont nous sommes responsables – n'affectera pas le **sous-critère Présence** dans le score d'évaluation. Ces problèmes seront clairement documentés et l'impact sur les données sera pris en compte de manière appropriée.

2.4 Critères de performance

Le AIRLAB Microsensors Challenge adopte une approche holistique pour l'évaluation des capteurs de qualité de l'air en combinant, pour l'édition 2025²⁰, les critères d'*exactitude*, d'*utilité*, d'*utilisabilité* et de *coût*. Cette section présente chacun de ces critères et détaille leurs modes de calcul.

1. **Exactitude** – L'exactitude est un critère défini sur la base de l'indice SET (pour Sensor Evaluation Toolkit), issu de la publication Fishbain et al., 2017 [3], enrichi de critères supplémentaires de justesse et de fidélité. L'Indice global de la méthode SET comprend 7 critères d'évaluation :

- La *racine de l'erreur quadratique moyenne* (RMSE) est une métrique couramment utilisée pour évaluer les écarts numériques. Bien qu'il s'agisse d'un excellent indicateur généraliste, populaire et performant, il est sensible aux valeurs aberrantes et peut, utilisé seul, pénaliser de manière disproportionnée les signaux contenant de grandes erreurs sporadiques. Ce défaut peut être compensé par l'utilisation de coefficients de corrélation.
- Le *coefficient de corrélation de Pearson* (ρ) caractérise la présence d'une relation linéaire entre deux signaux (par exemple, un capteur de référence et un capteur candidat). Il s'agit du critère de corrélation le plus couramment utilisé.
- Le *coefficient de corrélation de Kendall* (τ) et le *coefficient de corrélation de Spearman* (S) sont deux coefficients de corrélation de rang différents utilisés pour tester la présence d'une relation non linéaire entre deux variables.
- La métrique de *présence* ($s_{presence}$) évalue l'exhaustivité des données et permet d'identifier d'éventuels dysfonctionnements du capteur, des problèmes opérationnels ou des pertes de transmission des données.
- L'*analyse des sources* (s_{source}) évalue la capacité de l'appareil à identifier et localiser une source de pollution, en analysant la variation des niveaux de polluants en fonction de la direction du vent. Cette métrique optionnelle est présentée à titre informatif uniquement et n'est pas incluse dans notre critère d'Exactitude.
- Le score de correspondance *Match* (s_{match}) concerne l'utilisation courante de systèmes de classification de la qualité de l'air (par exemple, l'Indice de Qualité de l'Air) et dans des applications ne nécessitant pas de mesures absolues précises, telles que les projets de sciences participatives ou les estimations générales des risques. Il repose sur la division des gammes dynamiques de mesure du capteur de référence et du capteur candidat en un nombre égal de classes, puis sur la quantification de l'accord entre les classifications obtenues pour chaque paire référence-solution candidate de mesures.
- La métrique d'*énergie aux basses fréquences* (LFE – Lower Frequencies Energy) caractérise le signal du capteur acquis plutôt qu'une comparaison avec un instrument de référence et reflète la capacité du capteur à saisir la variabilité temporelle du polluant ciblé.

²⁰ Les éditions précédentes du Challenge incluaient également le critère de portabilité, associé aux catégories d'évaluation mobile. Pour l'édition 2025, aucune application mobile n'est pas considérée.

Les critères supplémentaires utilisés dans le Challenge sont les suivants :

- La *pente (b)* et l' *ordonnée à l'origine (a)* d'un modèle de régression linéaire entre les mesures de référence et celles du microcapteur. Ces deux paramètres permettent d'évaluer l'exactitude de la solution candidate. Un score partiel (s_b) est attribué en fonction de la valeur de la pente, dont les possibles valeurs sont classées en trois groupes (voir Tableau 2). Cette classification suit l'approche adoptée par le LNE et l'INERIS pour leur Certification "AIR Quality Sensor"²¹.

Tableau 2 : Attribution du score s_b pour la pente.

	Groupe A	Groupe B	Groupe C
Pente (b)	$0.7 \leq b \leq 1.3$	$0.5 \leq b < 0.7$ or $1.3 < b \leq 1.5$	$b < 0.5$ or $b > 1.5$
Score (s_b)	1	0.5	0

Un deuxième score partiel, s_a , est calculé sur la base de l'ordonnée à l'origine en utilisant la formule suivante :

$$s_a = \begin{cases} 1 - \frac{|a|}{\text{median}(Y_{REF})}, & \text{if } |a| \leq \text{median}(Y_{REF}) \\ 0, & \text{if } |a| > \text{median}(Y_{REF}) \end{cases}$$

où Y_{REF} désigne les données de référence.

Le score final pour le critère de *justesse*, s_t , est la moyenne entre s_b et s_a .

- La *reproductibilité* est une expression de la précision de la solution candidate et est calculée à travers les échantillons de microcapteurs d'une solution candidate. Elle inclut à la fois la variabilité due à des causes intrinsèques à une unité de capteur (par exemple, le bruit de mesure) et la variabilité inter-appareils (par exemple, due au processus de fabrication). Elle est calculée conformément à la norme CEN TS 17660²² comme l'écart-type de la reproductibilité, normalisé par la moyenne de la mesure et exprimé en pourcentage, s_R .

L'*Indice de Performance Intégrée* (IPI) agrège les huit métriques et a une valeur comprise entre 0 et 1 (1 étant équivalent à la méthode de référence) :

$$IPI = \text{moyenne}\{(1 - NRMSE), \rho, \tau, S, S_{presence}, S_{source}, S_{match}, LFE, s_t, 1 - s_R/100\}$$

où *NRMSE* représente l'*RMSE* normalisé, que nous calculons comme le ratio entre l'erreur et la plage de mesure :

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\max(Y_{REF}) - \min(Y_{REF})}$$

Dans le cadre du Challenge, l'exactitude des capteurs candidats est calculée en utilisant une mesure de référence et la méthode présentée pour calculer l'IPI avec des données acquises sur une période minimale de dix jours. Un exemple de résultat du calcul complet de l'exactitude est illustré dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Exemple de résultat d'exactitude.

	SET method									
	Match	RMSE	Pearson	Kendall	Spearman	Présence	LFE	Justesse	Repro	IPI
Capteur#1	0.44	0.85	0.83	0.62	0.82	0.96	0.99	0.84	0.89	0.80

²¹ <https://prestations.ineris.fr/en/certification/certification-sensors-system-air-quality-monitoring>

²² CEN TS 17660 standard: Air quality – Performance evaluation of air quality sensor systems

2. **Utilité** – Ce critère reflète la capacité d'un système de capteurs à fournir les fonctionnalités essentielles pour accomplir l'objectif ciblé. Les critères considérés pour évaluer l'Utilité varient en fonction de la catégorie d'utilisation, avec deux critères toujours présents : les *polluants ciblés* et la *récupération des données* :

- Le sous-critère des *polluants ciblés* récompense une bonne correspondance entre le type de mesures fournies par le système capteur et le polluant d'intérêt pour un environnement donné. Il est calculé sur la base du Tableau 4, en ajoutant les coefficients correspondants pour les polluants ciblés par la solution candidate, jusqu'à un score maximal de 1.

Tableau 4 : Grille d'évaluation pour le calcul du sous-critère des polluants ciblés.

	OA			IA	
	Afrique de l'Ouest	Asie du Sud	Europe	Non spécifique	URS
NO2	0.4	0.4	0.4	0.3	-
CO2	-	-	-	0.4	0.4
PM10	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4
PM2.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
PM1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
O3	0.3	0.3	0.3	-	-
CH2O	-	-	-	0.4	-
COV	-	-	-	0.4	0.2
BC	0.3	0.3	0.3	-	-
Benzene	0.2	0.2	0.2	0.4	-
SO2	0.3	0.1	0.1	-	-
CO	0.3	0.2	0.1	0.4	-
CP	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3
H2S	0.1	0.1	0.1	0.2	-
NH3	0.3	0.3	0.3	0.2	-
NO	0.2	0.2	0.2	0.2	-

- La *récupération des données* caractérise les options de communication permettant de récupérer les données de mesure du capteur pour inspection, analyse ou traitement ultérieur. Elle est calculée en fonction du Tableau 5, en ajoutant les options de communication disponibles pour la solution candidate, jusqu'à un score maximum de 1.

Tableau 5 : Evaluation grid for calculation of the data recovery sub-criterion.

	Air Extérieur	Air Intérieur
Connexion physique	0.25	0.25
Sans fil à courte distance (par ex : Bluetooth, WiFi)	0.25	0.75
Sans fil à longue distance (par ex : WWAN, LoRa)	0.75	0.75

Les cinq autres sous-critères qui, en fonction de la catégorie d'utilisation, peuvent faire partie du calcul des critères d'utilité ou d'utilisabilité sont :

- L'*autonomie* énergétique d'un produit microcapteur peut jouer un rôle important dans son utilité, en particulier pour les environnements qui n'ont pas accès à une source d'alimentation standard (par exemple, les applications mobiles, les lieux fixes distants, etc.) ou si

l'alimentation électrique, bien que disponible, est de mauvaise qualité (par exemple, sujette à des coupures). Cette caractéristique est évaluée selon la grille du Tableau 6.

Tableau 6 : Grille d'évaluation pour le sous-critère de l'autonomie.

	Autonomie en heures
1	> 72
0.9	72
0.8	48
0.7	24
0.6	16
0.5	8
0.4	6
0.3	4
0.2	2
0.1	1
0	Prise secteur

- L'*interopérabilité des données* caractérise la capacité d'un système à permettre l'échange de données avec d'autres systèmes sans restrictions techniques. Dans le cadre du Challenge, nous considérons la capacité des systèmes capteur candidats à permettre l'utilisation de leurs données par d'autres systèmes. Le score pour ce sous-critère est calculé selon le Tableau 7.

Tableau 7 : Grille d'évaluation pour le sous-critère de l'interopérabilité des données.

Données non accessibles	0.00
Format de données propriétaire	0.25
Format de données ouvert	0.75
Format ouvert respectant INSPIRE²³	1.00

- La *visualisation des données* joue un rôle important dans la compréhension des données de mesure. Cela est particulièrement vrai pour les dispositifs destinés à des utilisateurs non experts, comme c'est souvent le cas pour les microcapteurs de qualité de l'air. Dans ce contexte, nous considérons une partition bidimensionnelle des solutions de visualisation possibles (voir Tableau 8). Sur l'axe horizontal, nous considérons la disponibilité soit d'une solution de visualisation en temps réel, soit hors ligne (à posteriori à la prise de la mesure). Sur le deuxième axe, nous considérons si un affichage (ou un indicateur d'alerte) est intégré directement au capteur, s'il s'agit d'une solution à distance (par exemple, utilisant l'écran d'un téléphone mobile ou d'un ordinateur via un service cloud), ou s'il n'existe aucune possibilité d'afficher les données. La présence d'un affichage intégré n'a d'impact que pour les applications de sensibilisation dans les environnements intérieurs et les applications citoyennes, car cette fonctionnalité pourrait en fait être indésirable pour d'autres types d'applications.

Tableau 8 : Grille d'évaluation pour le sous-critère de visualisation des données.

	Temps réel		Hors ligne	
	IA-A	OA, IA-M, IA-P, IA-URS	IA-A	OA, IA-M, IA-P, IA-URS
Affichage intégré	1.00	1.00	0.75	0.75
Affichage à distance	0.75	1.00	0.50	0.75
Aucun	0.00	0.00	0.00	0.00

²³ <https://inspire.ec.europa.eu>

- Le sous-critère de *l'intervalle de mesure* fait référence à la période d'échantillonnage des solutions à microcapteurs. Une résolution temporelle relativement plus élevée est généralement nécessaire pour les applications de mesure mobile. La note pour ce sous-critère est attribuée selon le Tableau 9.

Tableau 9 : Grille d'évaluation pour le sous-critère de l'intervalle de mesure.

Période d'échantillonnage	Score
< 1 min	1.00
5 min	0.80
15 min	0.60
60 min	0.40
120 min	0.20
> 240 min	0.00

- Notifications en temps réel* – concerne la capacité du système à microcapteurs à transmettre des notifications à l'opérateur/utilisateur, soit directement via un écran ou un indicateur intégré, soit par messagerie à distance (par exemple, SMS, e-mail). La note de ce sous-critère est évaluée selon le Tableau 10.

Tableau 10 : Grille d'évaluation pour le sous-critère des notifications en temps réel.

Type de notification	Score
Aucune	0.00
Visuelle	0.50
A distance	0.75
Visuelle et à distance	1.00

La manière dont ces cinq sous-critères sont attribués au critère d'utilité en fonction de la catégorie d'utilisation est présentée dans le Tableau 11. La note globale du critère d'utilité est calculée comme la moyenne de tous les sous-critères pris en compte.

Tableau 11 : Sous-critères constituant le critère d'utilité en fonction de la catégorie d'utilisation.

OA-M	Polluants ciblés	Récupération des données	<i>Interopérabilité des données</i>	<i>Notifications en temps réel</i>	-
OA-A	Polluants ciblés	Récupération des données	<i>Visualisation des données</i>	<i>Notifications en temps réel</i>	-
IA-M	Polluants ciblés	Récupération des données	<i>Interopérabilité des données</i>	<i>Notifications en temps réel</i>	<i>Intervalle de mesure</i>
IA-A	Polluants ciblés	Récupération des données	<i>Visualisation des données</i>	<i>Notifications en temps réel</i>	-
IA-P	Polluants ciblés	Récupération des données	<i>Interopérabilité des données</i>	<i>Intervalle de mesure</i>	-
IA-URS	Polluants ciblés	Récupération des données	<i>Interopérabilité des données</i>	<i>Intervalle de mesure</i>	<i>Autonomie</i>

3. Utilisabilité – Ce critère caractérise la capacité de la solution candidate à fournir les conditions permettant à ses utilisateurs d'effectuer les tâches de manière sûre, efficace et efficiente tout en appréciant l'expérience. Les critères considérés pour évaluer l'ergonomie varient en fonction de la catégorie d'utilisation (détaillée dans le protocole du Challenge), deux critères étant toujours présents – la Facilité d'utilisation et le Résumé statistique :

- Le sous-critère de la *facilité d'utilisation* est calculé à l'aide d'un test de démarrage chronométré. Le capteur candidat est déballé et un chronomètre est lancé. Si disponible, son manuel d'utilisateur est consulté et le capteur est allumé. Le chronomètre est arrêté lorsque

son bon fonctionnement peut être confirmé (par exemple, les valeurs de mesure sont lues sur un écran intégré ou via une interface cloud). Deux notes sont attribuées à la suite de ce test. La première, $S_{impression}$, est basée sur l'impression générale de l'opérateur du test qui peut attribuer l'une des 4 qualifications possibles. Celles-ci sont ensuite notées en fonction de la grille d'évaluation du Tableau 12.

Tableau 12 : Grille d'évaluation pour la note d'impression générale.

Score	Qualificatif
0	Insatisfaisant
0.50	Moyen
0.75	Satisfaisant
1	Excellent

La deuxième note, S_{time} , est basée sur le temps écoulé pour effectuer le test et prend en compte la présence et la qualité du manuel d'utilisateur à travers un facteur de bonus-malus additif, qui est appliqué si le test de démarrage dure plus de 5 minutes. La note S_{time} , y compris tout facteur de bonus-malus potentiel, est limitée entre 0 et 1. Le principe de calcul de cette note est résumé dans le Tableau 13. La note finale pour le sous-critère de la facilité d'utilisation est la moyenne entre $S_{impression}$ et S_{time} .

Tableau 13 : Grille d'évaluation pour la note du temps écoulé.

	Temps écoulé [min]		Présence/qualité du manuel
1	≤ 5	-0.3	Pas de manuel
0.9	10	-0.1	Insatisfaisant
0.8	15	+0.1	Moyen
0.7	25	+0.2	Satisfaisant
0.6	30	+0.3	Excellent
0.5	45		
0.4	> 50		

- Résumé statistique** – ce sous-critère caractérise si le produit de microcapteurs offre ou non des options statistiques pour les données mesurées. Ces options statistiques concernent d'une part la possibilité d'accéder aux données historiques, soit sous forme brute, soit par des agrégations personnalisables, et d'autre part la disponibilité de résumés statistiques. Nous classons les résumés statistiques en deux grandes catégories : indicatifs ou comparatifs. Les statistiques indicatives sont des calculs directs basés uniquement sur les données mesurées (par exemple, moyenne, médiane, minimum, maximum), tandis que les statistiques comparatives mettent en évidence des relations par rapport à des références externes spécifiques (par exemple, niveaux limites, statistiques sur une population, une région ou une période historique). La méthode d'évaluation du critère d'analyse est présentée dans le Tableau 14.

Tableau 14 : Grille d'évaluation pour le sous-critère du résumé statistique.

		Statistique		
		Aucune	Indicative	Comparative
Historique	Aucun	0.00	0.25	0.50
	Brut uniquement	0.25	0.50	0.75
	Agrégations personnalisables	0.50	0.75	1.00

Les autres sous-critères pris en compte dans le calcul du critère d’ergonomie et leur attribution en fonction de la catégorie d’utilisation sont présentés dans le Tableau 15. La note globale du critère d’ergonomie est calculée comme la moyenne de tous les sous-critères pris en compte.

Tableau 15 : Sous-critères constituant le critère d’ergonomie en fonction de la catégorie d’utilisation.

OA-M	Facilité d'utilisation	Résumé statistique	Autonomie	Visualisation des données
OA-A	Facilité d'utilisation	Résumé statistique	Autonomie	-
IA-M	Facilité d'utilisation	Résumé statistique	Autonomie	Visualisation des données
IA-A	Facilité d'utilisation	Résumé statistique	Autonomie	Intervalle de mesure
IA-P	Facilité d'utilisation	Résumé statistique	Notifications en temps réel	Visualisation des données
IA-URS	Facilité d'utilisation	Résumé statistique	Notifications en temps réel	Visualisation des données

4. Le critère de l’**Empreinte Environnementale** évalue l'impact sur le cycle de vie du système de capteurs en tenant compte de facteurs tels que l'efficacité matérielle, le lieu de fabrication, les besoins en maintenance, la durée de vie attendue et les initiatives de Responsabilité Sociétale des Entreprises (RSE). Bien que cette évaluation fournisse une estimation partielle de l'impact environnemental du système et ne prétende pas être exhaustive, elle constitue une approximation précieuse, car même une évaluation partielle représente une étape significative pour comprendre les effets environnementaux globaux du système. Le score est basé sur les cinq sous-critères suivants :

- *Efficacité des matériaux* (20 %) – Évalue l'empreinte matérielle du capteur en fonction de sa masse, de son volume et de l'utilisation de matériaux durables. Il est calculé comme la moyenne de deux sous-scores : le *facteur de forme* et le score des *matériaux durables* :
- Le sous-critère du *facteur de forme* est calculé en fonction de deux caractéristiques du produit microcapteur : sa masse et son volume. En tenant compte du nombre de capteurs intégrés dans le système de capteurs, $N_{sensors}$, la valeur du sous-critère de l'encombrement est calculée en attribuant d'abord un score normalisé de masse, $s_{\overline{mass}}$, et un score normalisé de volume, $s_{\overline{volume}}$ (voir Tableau 16), puis en calculant le score d'encombrement comme suit :

$$S_{form\ factor} = \sqrt{s_{\overline{mass}} \cdot s_{\overline{volume}}}$$

où

$$\overline{mass} = \frac{Mass}{N_{sensors}}$$

et

$$\overline{volume} = \frac{Volume}{N_{sensors}}$$

Tableau 16 : Grilles d'évaluation des scores de masse (à gauche) et de volume (à droite) pour le sous-critère de la forme.

	<i>mass</i> in g		<i>volume</i> in cm ³
1	< 100	1	< 10
0.9	250	0.9	50
0.8	500	0.8	100
0.7	750	0.7	200
0.6	1000	0.6	400
0.5	2000	0.5	800
0.4	4000	0.4	1600
0.3	6000	0.3	3200
0.2	8000	0.2	6400
0.1	10000	0.1	12800
0	> 10000	0	> 12800

- Le score des *matériaux durables* est calculé en fonction du pourcentage de matériaux recyclés ou issus de sources responsables utilisés dans la production du système de capteurs (voir Tableau 17).

Tableau 17 : Grille d'évaluation du score des matériaux durables.

Matériaux recyclés ou issus de sources responsables	Score
≥ 50%	1.00
40%	0.80
30%	0.60
20%	0.40
10%	0.20
< 10%	0.00

- *Impact de la fabrication*²⁴ (20 %) – Évalue les émissions liées à la production et au transport du capteur. Il est calculé comme la moyenne de deux scores : le score du *lieu de fabrication* et le score de *l'énergie renouvelable*, déterminés selon le Tableau 18.

Tableau 18 : Grilles d'évaluation des scores du lieu de fabrication (gauche) et de l'énergie renouvelable (droite) pour le sous-critère d'impact de la fabrication.

Distance entre le lieu de fabrication et le lieu de déploiement	Score	Part des énergies renouvelables dans la fabrication	Score
≤ 500 km	1.00	≥ 50%	1.00
501-2000 km	0.75	25%-49%	0.5
2001-4500 km	0.50	< 25%	0.0
4501-6000 km	0.25		
> 6000km	0.00		

- *Maintenance et facilité d'entretien* (20 %) – Évalue la fréquence et l'impact environnemental de la maintenance. Il est calculé comme une moyenne pondérée du score de maintenance

²⁴ Cette évaluation concerne uniquement l'impact environnemental au niveau de l'assemblage du système et ne prend pas en compte l'impact environnemental des sous-composants individuels du capteur.

réduite ($s_{maintenance\ réduite}$) et du score des pratiques de maintenance écologiques ($s_{maintenance\ eco}$), selon la formule suivante :

$$s_{Maintenance} = 0.75 \cdot s_{maintenance\ réduite} + 0.25 \cdot s_{maintenance\ eco}$$

- Le sous-critère de *maintenance réduite* mesure la périodicité des opérations de maintenance nécessaires. Sa valeur représente la moyenne de la note de maintenance utilisateur et de la note de maintenance professionnelle. La première fait référence aux opérations de maintenance à réaliser par l'utilisateur du système microcapteur. Des exemples de ces opérations sont : le nettoyage des entrées, le changement de filtres, la calibration de base (par exemple, pour les niveaux zéro), le remplacement de la batterie, etc. La seconde est définie comme une mesure de la périodicité de toutes les opérations de maintenance qui ne peuvent pas être effectuées directement par l'utilisateur et nécessitent l'intervention d'un technicien spécialisé. Les valeurs de ces scores sont déterminées selon les grilles présentées dans le Tableau 19.

Tableau 19 : Grilles d'évaluation pour les scores de maintenance utilisateur (à gauche) et de maintenance professionnelle (à droite) pour le sous-critère de maintenance.

Maintenance Utilisateur		Maintenance Professionnelle	
Periodicité	Score	Periodicité	Score
Horaire	0	< Mensuelle	0
Quotidienne	0.1	Mensuelle	0.1
Hebdomadaire	0.2	Trimestrielle	0.3
Mensuelle	0.4	Annuelle	0.6
Trimestrielle	0.6	18 Mois	0.8
Annuelle	0.8	> 18 Mois	1
> Annuelle	1		

- Le score des pratiques de *maintenance écologiques* valorise la mise en place de pratiques responsables en matière de maintenance et d'entretien (ex. composants modulaires, diagnostics à distance, maintenance sans déchets). Ce score est calculé selon le Tableau 20.

Table 20 : Grille d'évaluation du score des pratiques de maintenance écologiques.

Nombre de pratiques mises en œuvre	Score
≥ 3	1.00
2	0.66
1	0.33
Aucune	0.00

- *Durée de vie et durabilité du produit (25 %)* – Valorise les capteurs ayant une durée de vie opérationnelle plus longue et une gestion responsable de leur fin de vie. Ce critère est calculé comme une moyenne pondérée du score de durée de vie prévue ($s_{durée\ de\ vie}$) et du score de gestion de fin de vie ($s_{fin\ de\ vie}$), selon la formule suivante :

$$s_{Durée\ de\ vie\ et\ durabilité} = 0.6 \cdot s_{durée\ de\ vie} + 0.4 \cdot s_{fin\ de\ vie}$$

Tableau 21 : Grilles d'évaluation des scores de durée de vie prévue (gauche) et de gestion de fin de vie (droite) pour le sous-critère durée de vie et durabilité du produit.

Durée de vie	Score	Gestion de fin de vie	Score
≥ 8 ans	1.00	Programme de reprise/recyclage & composants biodégradables	1.00
5-7 ans	0.66	Programme de reprise/recyclage ou composants biodégradables	0.50
3-4 ans	0.33	Aucun	0.00
< 3 ans	0.00		

- *Initiatives RSE et environnementales* (15 %) – Basé sur le nombre et la portée des initiatives RSE déclarées, ce critère est calculé selon le Tableau 22.

Table 22 : Grille d'évaluation du score des initiatives RSE et environnementales.

Nombre d'initiatives		Score
RSE		
≥ 4		1.00
3		0.75
2		0.50
1		0.25
Aucune		0.00

Le score final de l'**Empreinte Environnementale** est calculé comme une moyenne pondérée selon la formule suivante :

$$S_{Empreinte\ Environnementale} = 0.2 \cdot S_{Efficacit\ e\ des\ mat\ eriaux} + 0.2 \cdot S_{Impact\ de\ la\ fabrication} + 0.2 \cdot S_{Maintenance} + 0.25 \cdot S_{Dur\ ee\ de\ vie\ et\ durabilit\ e} + 0.15 \cdot S_{Initiatives\ RSE}$$

5. Le **Coût** est un critère de sélection important pour tout produit. Dans le cadre du Challenge, nous prenons en compte les coûts cumulatifs d'investissement et de fonctionnement (par exemple, pour les abonnements, le remplacement des éléments sensibles, etc.) sur les 3 premières années d'utilisation du système de microcapteurs, divisés par le nombre de capteurs intégrés dans le système, $N_{sensors}$. Le critère de coût est noté de manière similaire aux autres critères, sur une échelle de 0 (le plus cher) à 1 (le moins cher), comme présenté dans le Tableau 23, avec les coûts se situant entre deux classes consécutives étant notés par une linéarisation entre les deux indices de note correspondants.

Tableau 23 : Grille d'évaluation pour le critère de coût.

	Coût
1.0	<100 €
0.9	200 €
0.8	500 €
0.7	1 000 €
0.6	2 000 €
0.5	5 000 €
0.4	8 000 €
0.3	10 000 €
0.2	20 000 €
0.1	30 000 €
0.0	> 30000 €

2.5 Pondération des critères

Les critères de performance présentés dans la sous-section précédente sont naturellement plus ou moins pertinents en fonction de la catégorie d'utilisation ciblée par la plateforme. Par exemple, la précision d'un microcapteur qui concourt dans des catégories visant à soutenir des applications de surveillance (par exemple, OA-M, IA-M) est plus importante que pour des applications qui visent uniquement à sensibiliser (c'est-à-dire OA-A et IA-A). De même, le coût d'une plateforme destinée à des fins réglementaires est moins important que pour les autres catégories.

Afin de refléter ce type de considérations, nous utilisons un mécanisme de pondération des critères qui modifie les scores d'évaluation des critères comme suit :

- Une fois que les différents critères de performance sont évalués pour une plateforme microcapteur candidate, les scores obtenus sont ensuite pondérés pour chaque catégorie dans laquelle elle concourt, en utilisant les facteurs de pondération résumés dans le Tableau 24.
- Les scores pondérés résultants sont ensuite moyennés pour obtenir une note globale sur un système de notation par étoiles, entre 0 et 5 étoiles, pour chacune des catégories dans lesquelles la plateforme microcapteur concourt.
- Les capteurs concourant dans les catégories Air Extérieur fixe (OA-M et/ou OA-A) reçoivent des scores d'évaluation distincts pour chacun des trois environnements d'évaluation respectifs (c'est-à-dire Accra, Bangalore et Paris).

Table 24 : Pondération des critères de performance en fonction des catégories d'utilisation.

		Exactitude	Utilité	Utilisabilité	Empreinte		Coût	
					Environnementale	Paris	Accra/Bangalore	
OA	OA-M	5	5	3	2	3	4	
	OA-A	3	4	4	3	5		
IA	IA-M	5	5	3	2	3		
	IA-A	3	4	4	3	5		
	IA-P	3	5	4	2	4		
	IA-URS	5	5	3	2	3		

2.6 Livrables

Les résultats du Challenge sont publiés via une interface Web interactive dédiée, qui permet une expérience utilisateur interactive, offrant la possibilité de rechercher selon des critères spécifiques et de comparer côte à côte différentes solutions candidates. Pour l'édition actuelle, nous chercherons à consolider et affiner davantage cette interface interactive en fournissant de nouvelles fonctionnalités. Cependant, aucune refonte majeure de l'interface n'est envisagée. Les principes fondamentaux de clarté et d'accessibilité qui ont guidé les livrables des éditions précédentes du Challenge continueront à orienter sa conception.

Lors de l'édition précédente (2023), plusieurs nouvelles fonctionnalités ont été ajoutées à cette interface, et elles seront conservées pour l'édition actuelle :

- **Zoom sur les détails de performance** – la possibilité de visualiser davantage de détails des critères d'évaluation (par exemple, pour le critère de précision, une possibilité de voir les scores de ses sous-critères).
- **Graphiques de séries temporelles** – l'inclusion d'images de graphiques représentant l'évolution temporelle des capteurs par rapport à la référence..
- **Métriques supplémentaires d'exactitude** – à titre informatif, un certain nombre de métriques alternatives de précision, utilisées par d'autres initiatives d'évaluation de capteurs, sans impact direct sur le calcul du score de précision du Challenge AIRLAB (par exemple, R-carré, Erreur de biais moyen, Erreur absolue moyenne).

Une version finale du protocole sera publiée une fois que la nouvelle conception de l'interface des résultats sera finalisée. Étant donné que toutes les fonctionnalités de l'édition précédente seront toujours disponibles pour l'édition 2025, nous présentons ci-dessous l'interface des résultats du Challenge 2023 à titre de référence.

Le portail des résultats est disponible avec un support linguistique bilingue (c'est-à-dire en anglais et en français). Il se compose d'une vue à onglets avec quatre options sélectionnables intitulées *Recherche*, *Rapports*, *Comparaison* et *À propos*.

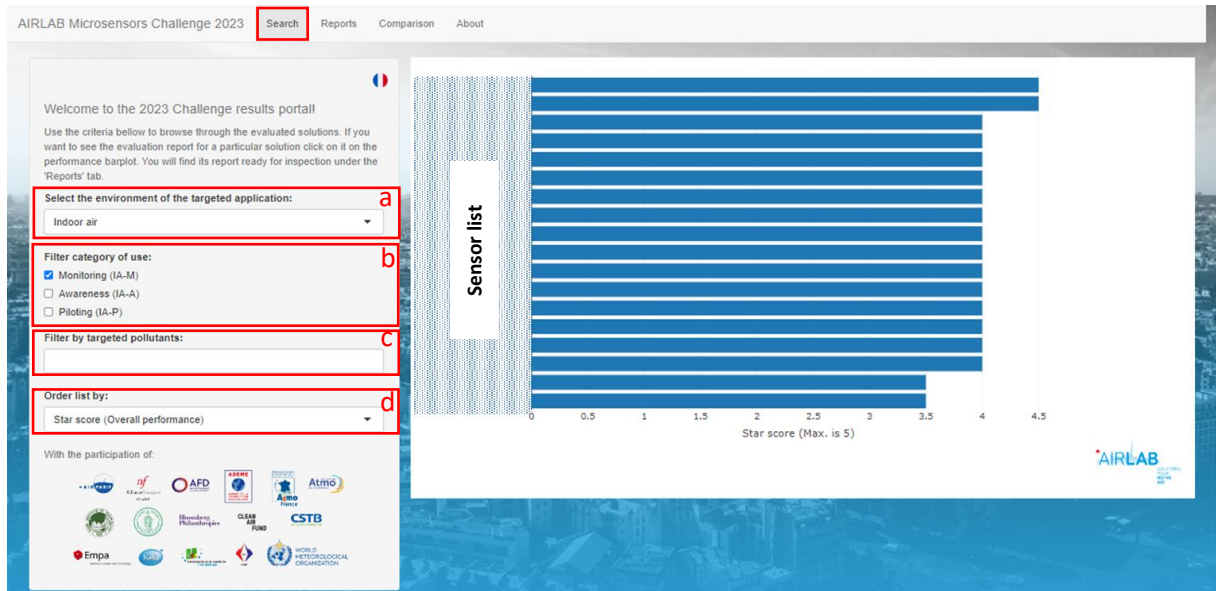


Figure 7 : Vue d'ensemble de l'onglet Recherche.

L'onglet **Recherche** (voir Fig. 7) permet à l'utilisateur de sélectionner l'environnement de déploiement pour l'application ciblée (a), la catégorie d'utilisation (b), de filtrer uniquement les solutions candidates qui fournissent des mesures pour les polluants d'une liste configurable (c), et de trier la liste des capteurs résultante en fonction d'un critère (d). La liste des capteurs est interactive, permettant à l'utilisateur de cliquer sur un capteur d'intérêt, ce qui définira ce capteur pour être visualisé dans l'onglet *Rapports*, et le premier capteur dans l'onglet *Comparaison*.

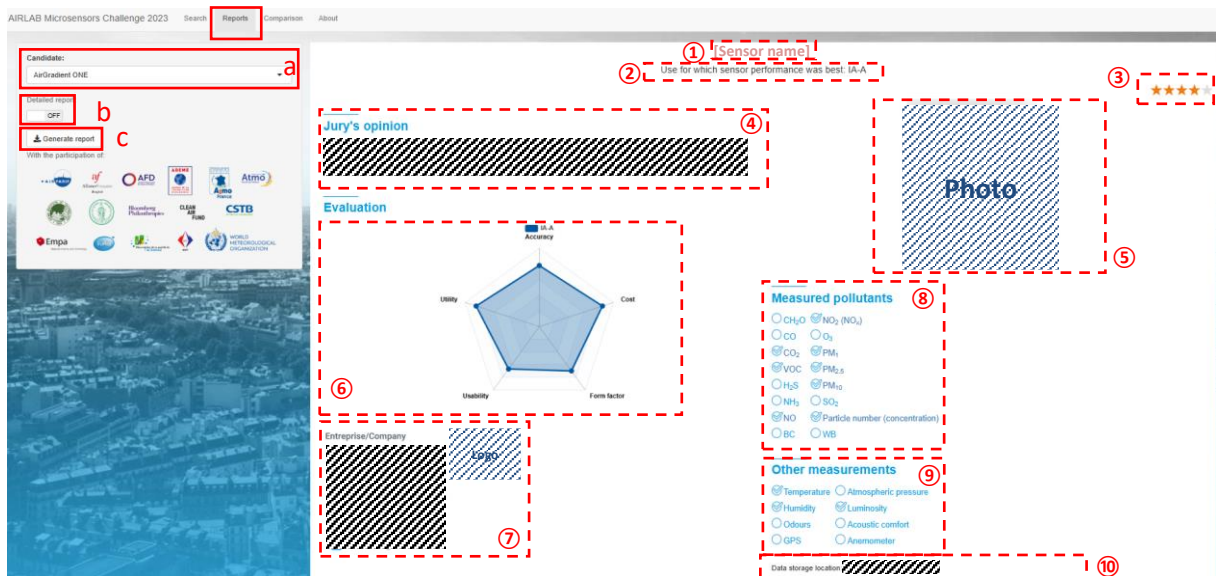


Figure 8 : Vue d'ensemble de l'onglet Rapports

L'onglet **Rapports** (voir Fig. 8) donne accès au rapport des résultats pour chaque solution candidate. Par défaut, si une sélection a été effectuée dans l'onglet Recherche, elle sera reflétée ici dans le rapport du capteur sélectionné pour l'affichage. Depuis le panneau latéral de cet onglet, la sélection du capteur

candidat peut être modifiée (a), l'affichage du rapport détaillé peut être activé ou désactivé (b) et un PDF du rapport affiché peut être téléchargé.

La version courte du rapport contient les éléments suivants :

- 1) Le nom du produit microcapteur.
- 2) Une phrase indiquant la catégorie dans laquelle le candidat a obtenu les meilleurs résultats.
- 3) La note globale en étoiles (de 0 à 5) du microcapteur pour la catégorie où il a obtenu les meilleurs résultats.
- 4) Un court paragraphe présentant l'avis général du jury du Challenge sur le microcapteur.
- 5) La photo du produit microcapteur.
- 6) Un graphique radar montrant les scores des cinq critères principaux du microcapteur pour chaque catégorie d'utilisation. Cliquer sur les éléments de la légende permet de masquer/afficher les différentes catégories d'utilisation.
- 7) Le nom, le logo et les coordonnées de l'entreprise commercialisant le produit microcapteur.
- 8) Une liste de contrôle marquant les polluants ciblés par la solution microcapteur. Passer la souris sur les polluants ciblés fait apparaître une info-bulle concernant leur niveau de traitement, tel que défini dans Schneider et al., 2019 [4].
- 9) Une liste de contrôle marquant les paramètres environnementaux supplémentaires mesurés.
- 10) Le lieu de stockage des données.

Lorsque le commutateur du rapport détaillé est activé, les informations supplémentaires suivantes sont affichées (voir Fig. 9) :

- 11) Représentation graphique détaillée de la répartition des résultats de précision : par catégorie d'utilisation, par polluant ciblé, et pour chacune des trois échantillons de microcapteurs fournis. Cela inclut également les trois nouvelles fonctionnalités introduites dans l'édition 2023 : graphiques de séries temporelles, détails des sous-critères et métriques supplémentaires, toutes accessibles via des boutons de commande.
- 12) Représentation graphique du résultat du critère d'utilité et de ses sous-critères par catégorie d'utilisation.
- 13) Représentation graphique du résultat du critère d'ergonomie et de ses sous-critères par catégorie d'utilisation.
- 14) Représentation graphique des résultats du critère de portabilité ou, pour les solutions statiques, du critère de forme du produit.
- 15) Représentation graphique du résultat du critère de coût.

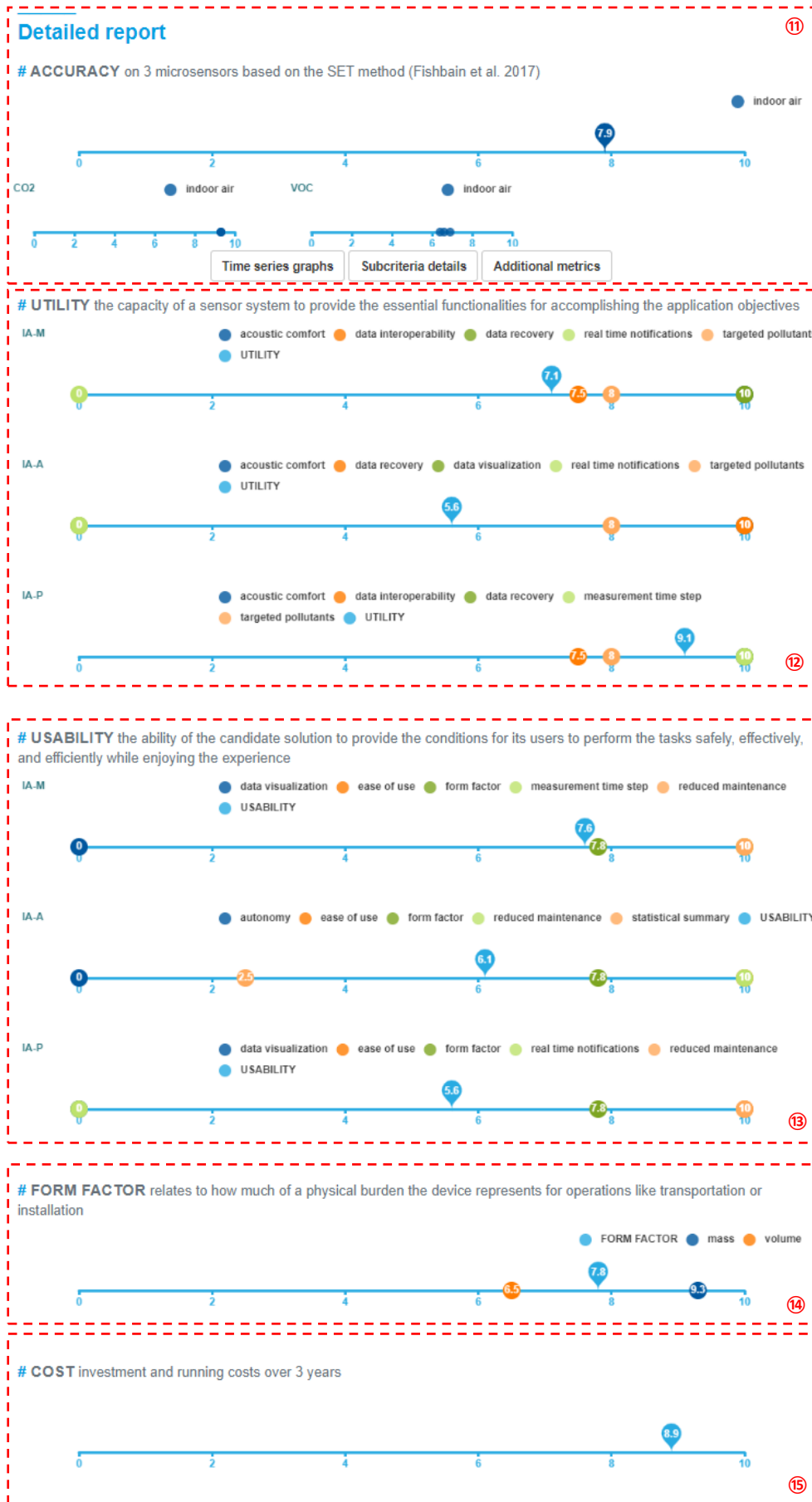


Figure 9 : Vue d'ensemble du rapport détaillé

L'onglet **Comparaison** (voir Fig. 10) permet une comparaison côte à côte de deux rapports de dispositifs et suit la même logique de composition des rapports. Une fois la première solution candidate sélectionnée, la deuxième peut être choisie uniquement parmi une liste de dispositifs qui partagent au moins un paramètre d'évaluation en commun avec le premier.

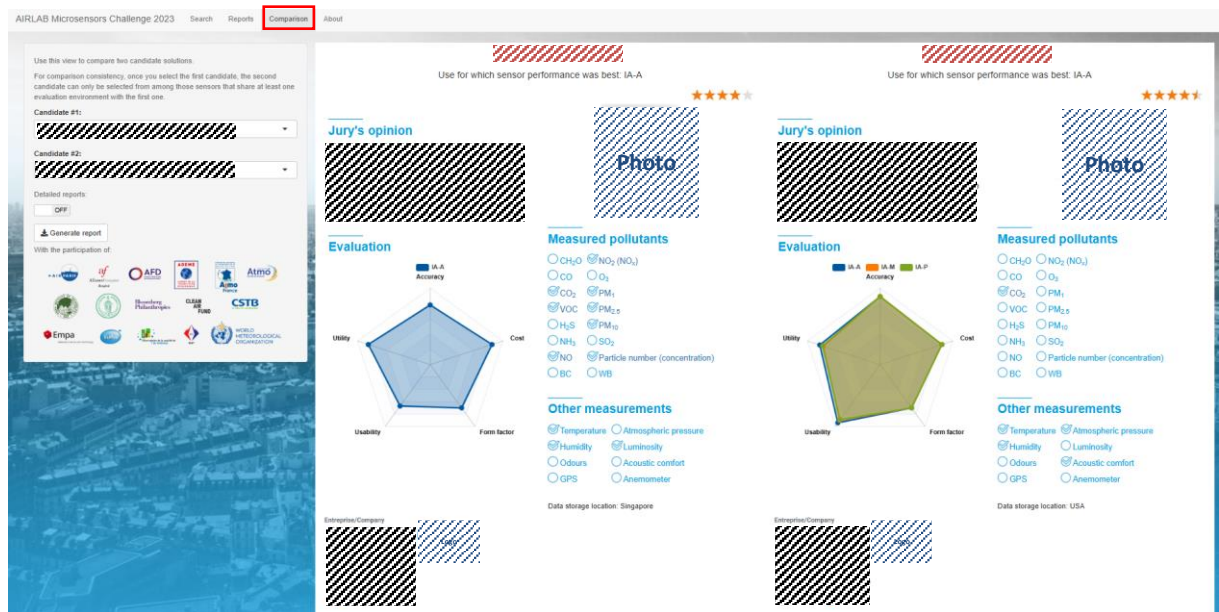


Figure 10: Overview of Comparison tab

L'onglet À propos fournit des informations générales sur le contexte du Challenge des Microcapteurs AIRLAB, son périmètre et ses limitations.

Tous les résumés des résultats sont rendus publiquement disponibles sur le site Web de l'AIRLAB²⁵.

²⁵ <http://www.airlab.solutions/>

3 Discussion

Le Challenge des Microcapteurs AIRLAB représente une évaluation périodique de l'état de l'art des solutions de microcapteurs disponibles sur le marché pour la surveillance de la qualité de l'air. Son objectif principal est de créer un vaste référentiel d'informations publiques au bénéfice de tous les utilisateurs potentiels (c'est-à-dire les chercheurs, l'industrie et le grand public).

Les résultats du Challenge des Microcapteurs AIRLAB sont publiés à des fins d'information uniquement et ne constituent pas une garantie de la performance des produits. Dans cette section, nous abordons les limitations du Challenge et les pistes d'amélioration pour les éditions futures.

3.1 Limitations

Une interprétation correcte des résultats du Challenge doit prendre en compte les limitations inhérentes à ce format d'évaluation. La première limitation découle du temps relativement court pendant lequel les microcapteurs candidats sont disponibles pour l'évaluation. La durée de la période d'évaluation représente un compromis entre le souhait d'avoir une période aussi représentative que possible pour le site d'évaluation et les contraintes matérielles du projet (par exemple, les heures de travail, les coûts d'instrumentation et de consommables, etc.). Ce raisonnement prend également en compte le fait que, étant donné que les solutions candidates sont temporairement prêtées par les participants, la durée de leur utilisation pour le Challenge doit rester dans des limites raisonnables.

Une deuxième limitation inhérente réside dans le choix du lieu du site d'évaluation du Challenge, qui, dans le cas des mesures extérieures, joue un rôle déterminant en contraignant la gamme dynamique des concentrations de polluants observables. Dans une certaine mesure, ce choix influencera également les niveaux de concentration intérieure observables. Cette limitation implique que les scores de performance des plateformes de microcapteurs évaluées dans des conditions géographiques, urbaines et climatiques spécifiques à Accra, à Bangalore ou à Paris pourraient différer de manière significative lorsqu'elles sont évaluées dans des lieux présentant des conditions très divergentes.

Pour certains polluants, comme le SO₂ et le CO, les concentrations observables dans la région parisienne sont très faibles, avec une gamme dynamique généralement limitée dans l'intervalle d'incertitude de l'analyseur de référence. Ainsi, pour les dispositifs de microcapteurs destinés à surveiller ces polluants en extérieur, toute évaluation significative est techniquement impossible.

Le principe de tester simultanément tous les microcapteurs candidats est fondamental dans la philosophie du Challenge des Microcapteurs AIRLAB. Cela nécessite toutefois une grande flexibilité en termes de volume pour le site d'évaluation en intérieur, ce qui élimine la possibilité de réaliser des tests de concentration contrôlés, qui sont généralement effectués dans des chambres d'exposition relativement petites.

L'utilisation d'une pièce entière pour le site d'évaluation en intérieur soulève des préoccupations en matière de sécurité pour des polluants particulièrement toxiques, comme le CO. Les plateformes de microcapteurs destinées à surveiller ce polluant à l'intérieur ne sont actuellement pas évaluées pour cette fonctionnalité.

3.2 Perspectives

Bien que les limitations intrinsèques dictées par le format du Challenge ne puissent être complètement éliminées, plusieurs mesures peuvent être envisagées pour améliorer la représentativité des résultats du Challenge. La limitation temporelle pourrait être abordée en augmentant la période d'évaluation et/ou en considérant des intervalles d'évaluation qui capturent les effets saisonniers.

Le Challenge des Microcapteurs AIRLAB 2025 a fait un pas important en avant pour améliorer la représentativité géographique de ses résultats par rapport aux éditions précédentes, en s'appuyant sur les progrès réalisés en 2023. Cette édition inclut deux nouvelles évaluations à Accra et Bengaluru, élargissant ainsi la diversité des environnements de mesure au-delà de la France métropolitaine. La représentativité géographique pourrait encore être améliorée en incorporant d'autres types de sites d'évaluation. L'intégration de sites de surveillance avec différentes typologies (par exemple, ruraux, industriels) pourrait renforcer la gamme dynamique pour certains polluants spécifiques (par exemple, l'ozone, le dioxyde de soufre). De plus, des collaborations continues avec des associations régionales et des organismes de surveillance renforceront davantage la représentativité des évaluations du Challenge.

4 Bibliographie

1. Polidori, A., Feenstra, B., Papapostolou, V., and Zhang, H., 2017. Field Evaluation of Low-cost Air Quality Sensors. *South Coast Air Quality Management District (SCAQMD)*, Diamond Bar, California, U.S.A. Accessed: 8 March 2019, [Online]. Available: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/protocols/sensors-field-testing-protocol.pdf?sfvrsn=0>
2. Lung, C., Jones, R., Zellweger, C., Karppinen, A., Penza, M., Dye, T., Hüglin, C., Ning, Z., Leigh, R., Hagan, D. et al., 2018. Low-Cost Sensors for the Measurement of Atmospheric Composition: Overview of Topic and Future Applications, *World Meteorological Organization (WMO)*, 2018, Geneva, Switzerland. Accessed: 8 March 2019, [Online]. Available: https://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/documents/Low_cost_sensors_post_review_final.pdf
3. Fishbain, B., Lerner, U., Castell, N., Cole-Hunter, T., Popoola, O., Broday, D.M., Iñiguez, T.M., Nieuwenhuijsen, M., Jovasevic-Stojanovic, M., Topalovic, D. and Jones, R.L., 2017. An evaluation tool kit of air quality micro-sensing units. *Science of the Total Environment*, 575, pp.639-648.
4. Schneider, P., Bartonova, A., Castell, N., Dauge, F.R., Gerboles, M., Hagler, G.S.W., Hüglin, C., Jones, R.L., Khan, S., Lewis, A.C., Mijling, B., Müller, M., Penza, M., Spinelle, L., Stacey, B., Vogt, M., Wesseling, J., and Williams, R.W., Toward a Unified Terminology of Processing Levels for Low-Cost Air-Quality Sensors, *Environmental Science & Technology* 2019 53 (15), 8485-8487