Expertise métrologique du dispositif de surveillance de la qualité de l'air du port de Saint-Malo (35 400)

Campagne de mesure 2022

Version du 16/02/23

3 rue du Bosphore,
Tour Alma, 8e étage
35200 RENNES
contact@airbreizh.asso.fr
Tél. 02 23 20 90 90

www.airbreizh.asso.fr

Expertise du dispositif de surveillance de la qualité de l'air du port de Saint-Malo (35400)

Etude réalisée par Air Breizh à la demande de EDEIS

Avertissements

Les informations contenues dans ce rapport traduisent la mesure d'un ensemble d'éléments à un instant et un lieu donné, caractérisé par des conditions climatiques propres.

Air Breizh ne saurait être tenu pour responsable des évènements pouvant résulter de l'interprétation et/ou de l'utilisation des informations faites par un tiers.

Conditions de diffusion

Air Breizh est l'organisme agréé de surveillance de la qualité de l'air dans la région Bretagne, au titre de l'article L221-3 du Code de l'environnement, précisé par l'arrêté du 13 juin 2022 pris par le ministère de l'Environnement portant renouvellement de l'agrément de l'association.

À ce titre et compte tenu de ses statuts, Air Breizh est garant de la transparence de l'information sur les résultats des mesures et les rapports d'études produits selon les règles suivantes :

Air Breizh réserve un droit d'accès au public à l'ensemble des résultats de mesures et rapports d'études selon plusieurs modalités : document papier, mise en ligne sur son site internet www.airbreizh.asso.fr, résumé dans ses publications, …

Toute utilisation de ce rapport et/ou de ces données doit faire référence à Air Breizh.

Air Breizh ne peut, en aucune façon, être tenu responsable des interprétations et travaux utilisant ses mesures et ses rapports d'études pour lesquels Air Breizh n'aura pas donné d'accord préalable.

Organisation interne – contrôle qualité

Projet :	Expertise du dispositif de surveillance de la qualité de l'air du port de Saint-Malo (35400)

Version (date)	**Modifications**	**Auteur**	**Validation**
Version du 16/02/23	Création	F. Moreau (ingénieur d'études)	O. Cesbron (Ingénieur d'études) O. Le Bihan (Responsable du service études)

Expertise du dispositif de surveillance de la qualité de l'air du port de Saint-Malo (35400)

Table des matières

Avertissements 2
Conditions de diffusion 2
Organisation interne – contrôle qualité 2
Introduction 7
Présentation de la zone d'étude 8
1. Description de la zone d'étude 8
2. Descriptif des activités du port 9
Partie 1 : Analyse du choix des 4 sites retenus 11
1. Positionnement des capteurs 11
2. Environnement des capteurs 12
3. Avis sur le positionnement des capteurs 15
Partie 2 : Contrôle métrologique des capteurs choisis 16
1. Analyse des caractéristiques des appareils 16
2. Résultats du challenge AIRLAB 20
3. Campagne de comparaison métrologique 21
Partie 3 : Analyse des mesures des premiers mois de fonctionnement du dispositif 50
Partie 4 : Comparaison des mesures du Port (camion laboratoire) à la station de référence Rocabey 52
Conclusion 58
Annexes 61
Annexe 1 : Présentation d'Air Breizh 62
Annexe 2 : Fiches de synthèse - Résultats du challenge AIRLAB 64

Index des Figures

Figure 1 : Côte Bretagne Nord – Localisation de la ville de Saint-Malo [data.gouv.fr] 8
Figure 2 : Port de Saint-Malo 9
Figure 3 : Point de mesure – Port de Saint-Malo. 11
Figure 4 : Inventaire des émissions (Air Breizh) 12
Figure 5 : Capteur TDN, Terminal du Naye. 13
Figure 6 : Capteur JC2, Quai Châteaubriand. 13
Figure 7 : Capteur PNJC, pôle naval Jacques Cartier. 13
Figure 8 : Capteur V8, Quai des Corsaires. 14
Figure 9 : Camion laboratoire positionné sur le site V8 21
Figure 10 : PM10 - Régression linéaire V8/TDN - moyenne journalière (gauche) ; horaire (droite) - µg/m^3 26
Figure 11 : PM2,5 - Régression linéaire V8/TDN - moyenne journalière (gauche) ; horaire (droite) - µg/m^3 27
Figure 12 : NO_2 - Régression linéaire V8/PNJC - moyenne journalière (gauche) ; horaire (droite) - µg/m^3 28
Figure 13 : SO_2 - Régression linéaire V8/JC2 - moyenne journalière (gauche) ; horaire (droite) - µg/m^3 29
Figure 14 : SO_2 - Régression linéaire PNJC/JC2 - moyenne journalière (gauche) ; horaire (droite) - µg/m^3 29
Figure 15 : SO_2 - Régression linéaire V8/PNJC - moyenne journalière (gauche) ; horaire (droite) - µg/m^3 30
Figure 16 : CO - Régression linéaire TDN/JC2 (moyenne horaire - µg/m^3) 31
Figure 17 : NH_3 - Régression linéaire V8/JC2 - moyenne journalière (gauche) ; horaire (droite) - µg/m^3 32
Figure 18 : NH_3 - Régression linéaire PNJC/TDN - moyenne journalière (gauche) ; horaire (droite) - µg/m^3 32
Figure 22 : O_3 - Régression linéaire PNJC/TDN - moyenne journalière (gauche) ; horaire (droite) - µg/m^3 33
Figure 20 : H_2S - Régression linéaire JC2/V8 - moyenne journalière (gauche) ; horaire (droite) - µg/m^3 34
Figure 21 : PM10- Régression linéaire V8/analyseur - moyenne journalière (gauche) ; horaire (droite) - µg/m^3 39
Figure 22 : PM2,5 - Régression linéaire V8/analyseur - moyenne journalière (gauche) ; horaire (droite) - µg/m^3 40
Figure 23 : NO_2 - Régression linéaire V8/analyseur - moyenne journalière (gauche) ; horaire (droite) - µg/m^3 41
Figure 24 : NO_2 - Régression linéaire TDN/analyseur - moyenne journalière (gauche) ; horaire (droite) - µg/m^3 42
Figure 25 : NO_2 - Régression linéaire PNJC/analyseur - moyenne journalière (gauche) ; horaire (droite) - µg/m^3 42
Figure 26 : NO_2 - Régression linéaire JC2/analyseur - moyenne journalière (gauche) ; horaire (droite) - µg/m^3 42
Figure 27 : SO_2 - Régression linéaire V8/analyseur - moyenne journalière (gauche) ; horaire (droite) - µg/m^3 43
Figure 28 : PM10 – évolution journalière, du 01/01 au 01/07/2022 50
Figure 29 : NO_2 – évolution journalière, du 10/02 au 01/07/2022 51
Figure 30 : Emplacement des points de mesure sur la zone d'étude et par rapport à la station Rocabey 53
Figure 31 : Roses des vents à la station Dinard. 53
Figure 32 : PM10 – évolution horaire, du 28/09 au 23/10/2022 55
Figure 33 : PM10 – évolution journalière, du 28/09 au 23/10/2022 55
Figure 34 : NO_2– évolution horaire, du 28/09 au 23/10/2022 57
Figure 35 : NO_2– évolution journalière, du 28/09 au 23/10/2022 57

Index des tableaux

Tableau 1 : Environnements de proximité des capteurs. 14
Tableau 2 : Tableau de synthèse – caractéristiques capteur Ellona WT1 **(en µg/m³)** 18
Tableau 3 : Critères d'évaluation du taux de recouvrement (tc) 22
Tableau 4 : Critères d'évaluation du coefficient de détermination (R^2) 23
Tableau 5 : Critères d'évaluation de la pente (p) 24
Tableau 6 : Classement des appareils en fonction des résultats des tests métrologiques 24
Tableau 7 : Taux de recouvrement sur la période de mesure du 27/09 au 24/10/2022 (données horaires) 25
Tableau 8 : PM10 - intercomparaison des capteurs WT1 – du 28/09 au 09/10/2022 (µg/m³) 25
Tableau 9 : PM2,5 - intercomparaison des capteurs WT1 – du 28/09 au 09/10/2022 (µg/m³) 26
Tableau 10 : NO_2 - intercomparaison des capteurs WT1 – du 28/09 au 09/10/2022 (µg/m³) 27
Tableau 11 : SO_2 - intercomparaison des capteurs WT1 – du 28/09 au 09/10/2022 (µg/m³) 28
Tableau 12 : CO - intercomparaison des capteurs WT1 – du 28/09 au 09/10/2022 (µg/m³) 30
Tableau 13 : NH_3 - intercomparaison des capteurs WT1 – du 28/09 au 09/10/2022 (µg/m³) 31
Tableau 14 : O_3 - intercomparaison des capteurs WT1 – du 28/09 au 09/10/2022 (µg/m³) 32
Tableau 15 : H_2S - intercomparaison des capteurs WT1 – du 28/09 au 09/10/2022 (µg/m³) 34
Tableau 16 : COV - intercomparaison des capteurs – du 28/09 au 09/10/2022 (µg/m³) 35
Tableau 17 : Synthèse des résultats des tests de reproductibilité (PM10 ; PM2,5 et CO). 35
Tableau 18 : Synthèse des résultats des tests de reproductibilité (NO_2). 36
Tableau 19 : Synthèse des résultats des tests de reproductibilité (O_3 ; NH_3 et SO_2) 36
Tableau 20 : Synthèse des résultats des tests de reproductibilité (COV et H_2S) 37
Tableau 21 : PM10 – comparaison capteurs WT1/analyseur – du 28/09 au 09/10/2022 (µg/m³) 38
Tableau 22 : PM2,5 – comparaison capteurs WT1/analyseur – du 28/09 au 09/10/2022 (µg/m³) 39
Tableau 23 : NO_2 – comparaison capteurs WT1/analyseur – du 28/09 au 09/10/2022 (µg/m³) 40
Tableau 24 : SO_2 – comparaison capteurs WT1/analyseur – du 28/09 au 09/10/2022 (µg/m³) 42
Tableau 25 : Synthèse des résultats de la comparaison capteurs WT1/analyseurs. 43
Tableau 26 : PM10 - Résultats des tests de contrôle métrologique 45
Tableau 27 : NO_2 - Résultats des tests de contrôle métrologique 45
Tableau 28 : PM2,5 - Résultats des tests de contrôle métrologique 46
Tableau 29 : SO_2 - Résultats des tests de contrôle métrologique 46
Tableau 30 : CO - Résultats des tests de contrôle métrologique 47
Tableau 31 : H_2S - Résultats des tests de contrôle métrologique 47
Tableau 32 : COV - Résultats des tests de contrôle métrologique 48
Tableau 33 : NH_3 - Résultats des tests de contrôle métrologique 48
Tableau 34 : O_3 - Résultats des tests de contrôle métrologique 49
Tableau 35 : Synthèse statistiques des concentrations du 01/01 au 01/07/2022 (µg/m³) 50

Tableau 36 : Synthèse statistiques des concentrations du 10/02 au 01/07/2022 (µg/m^3).....51
Tableau 37 : PM10 - Synthèse statistiques du 28/09 au 23/10/2022 54
Tableau 38 : NO_2 - Synthèse statistique du 28/09 au 23/10/2022.....56

INTRODUCTION

En décembre 2021, la société EDEIS, concessionnaire du port de Saint Malo, a installé un réseau de micro-capteurs WT1 commercialisés par la société Ellona.

Ces derniers assurent la mesure des paramètres suivants dans l'air ambiant : particules fines (PM_{10}, $PM_{2.5}$), NO_2, SO_2, NH_3, CO, O_3, H_2S et COV.

Lors de la dernière Commission Ad Hoc du port le 18 octobre 2021, le Sous-Préfet de Saint-Malo a demandé qu'une expertise du réseau de mesure soit conduite par Air Breizh afin d'étudier la pertinence de ce dispositif et le cadre de l'exploitation des résultats, notamment leur comparaison éventuelle avec ceux de la station de surveillance réglementaire d'Air Breizh (station Rocabey).

Préalablement au traitement des résultats, une comparaison métrologique des capteurs avec des appareils de surveillance réglementaires a été réalisée pour étudier la qualité de ce système de surveillance et déterminer si les mesures sont exploitables pour surveiller la qualité de l'air sur le port.

La présente étude se déroulera en 3 étapes :

- Analyse du positionnement des 4 stations et des polluants mesurés ;
- Contrôle métrologique des capteurs ;
- Analyse des mesures des premiers mois de fonctionnement du dispositif.

En complément et afin de participer à l'amélioration des connaissances sur la qualité de l'air du port, les résultats des instruments de référence installés sur le port durant la campagne de contrôle métrologique, ont été comparés à ceux de la station Rocabey.

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Dans cette partie introductive, la zone portuaire de Saint-Malo et ses activités sont présentées pour mettre en contexte l'étude.

1. Description de la zone d'étude

La commune de Saint-Malo (code insee : 35 288) est située dans le Nord-Est de la Bretagne, dans le département d'Ille-et-Vilaine, sur le littoral de la Manche et sur la rive droite de l'estuaire de la Rance. La commune comptait 46 803 habitants en 2019 selon l'INSEE.

Le port de Saint-Malo est positionné à proximité de l'Angleterre et des îles Anglo-Normandes ce qui en fait un point de passage privilégié pour les échanges de fret et de passagers. Le port se divise en deux zones : le port intérieur composé de 4 bassins à flot accueillant les activités de pêche, de commerce et le port de plaisance Vauban. Le port extérieur est lui composé du terminal ferries, de l'avant-port, du port de plaisance des Sablons et de l'anse Saint-Père. Si la Région Bretagne est l'autorité portuaire sur ce port, elle délègue l'exploitation des activités de commerce à EDEIS. En ce qui concerne le transport de marchandises, elles sont manutentionnées sur les quais des bassins intérieurs, suivant la nature des produits et la taille des navires.

A noter la présence d'une installation industrielle exploitée par TIMAC Agro dans l'emprise de la zone portuaire (site 'Quai Intérieur' ou QI). Cette usine est spécialisée dans la fabrication des engrais et produits destinés à la nutrition animale.

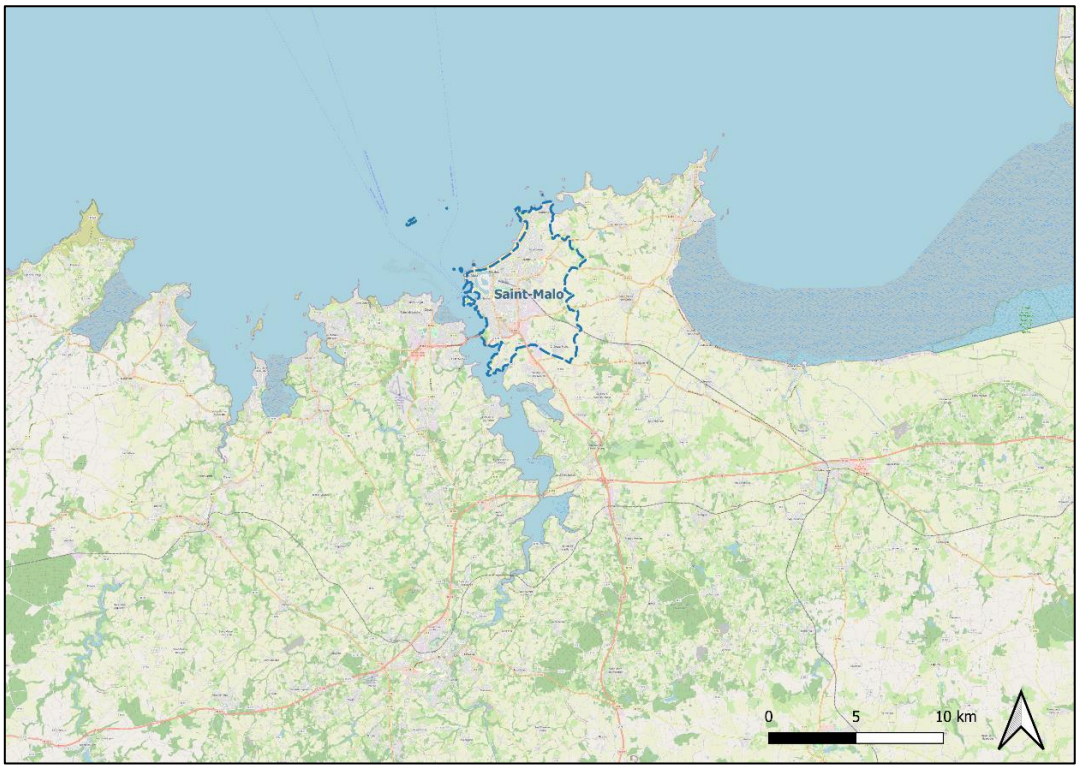


Figure 1 : Côte Bretagne Nord – Localisation de la ville de Saint-Malo [data.gouv.fr]

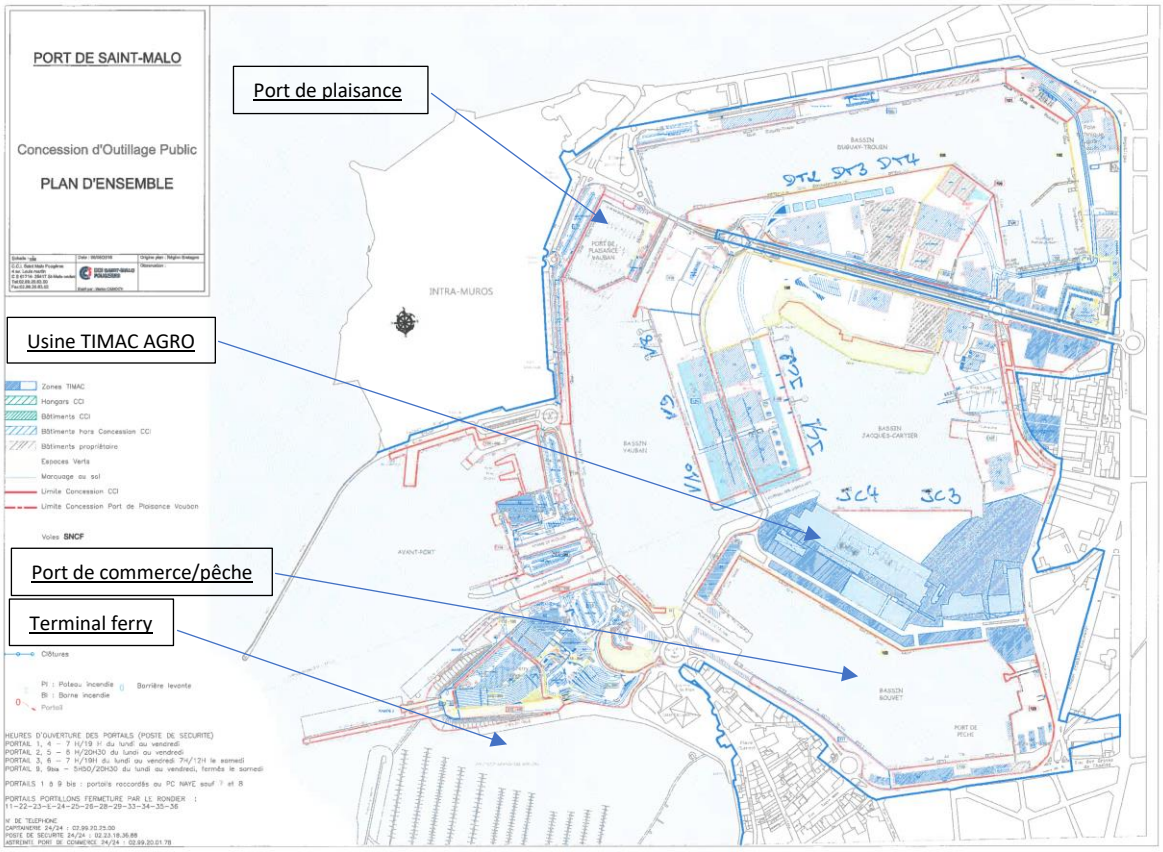


Figure 2 : Port de Saint-Malo

2. Descriptif des activités du port

Les informations présentées dans ce chapitre ont été communiquées par l'exploitant EDEIS lors d'une réunion spécifique suivie d'une visite des installations réalisée le 7 juillet 2022.

En 2019, 313 navires de commerce ont fait escale à Saint-Malo dans le port intérieur, soit un peu moins de 13 navires par semaine. Ces navires ont une taille comprise entre 50 et 149 mètres, avec une majorité de navires entre 80 et 119 mètres.

Les vracs solides recouvrent les marchandises suivantes :

- bois sciés
- pneus broyés
- aliments de bétail, tourteaux, graines oléagineuses
- magnésie, ferrailles
- gravier lavé, coquilles brisées, sables de mer, sel, pierres concassées (granulats)
- engrais (phosphate, potasse, urée, sulfate, maërl, nitrate d'ammonium, etc.).

Les vracs liquides recouvrent les marchandises suivantes :

- acide phosphorique
- soude

Saint-Malo est reliée toute l'année par des ferries avec Portsmouth en Angleterre, et par des navires à grande vitesse avec les îles de Jersey et de Guernesey. Du printemps à l'automne, les compagnies d'excursion côtière assurent la liaison Saint-Malo – Dinard ainsi qu'un ensemble d'excursions maritimes en Rance et dans la baie de Saint-Malo entre le cap Fréhel et les îles Chausey.

L'autre volet de l'activité passagers est l'accueil des paquebots de croisière : La grande majorité des escales se fait sur coffre dans l'estuaire de la Rance. Le trafic est saisonnier.

Le port de Pêche de Saint-Malo, situé dans le Bassin Bouvet, abrite une criée qui traite et commercialise chaque année environ 1 500 T de produits. Il est fréquenté par une soixantaine de société de pêche.

Le pôle de réparation navale Jacques Cartier offre un ensemble d'équipements et de services permettant la construction, la maintenance et la réparation de tous types de bateaux. Le pôle technique Duguay-Trouin, quant à lui, est réservé aux bateaux de plus petite taille. Équipé de 3 pontons flottants, il est à disposition des professionnels du nautisme.

Les activités de plaisances sont réparties entre deux zones : Vauban & Sablons. Situé dans l'avant-port, au pied de la Cité d'Aleth, le port de plaisance des Sablons est concédé à la Ville de Saint-Malo. 1 200 places sont disponibles, avec des pontons équipés en eau potable, électricité, station d'avitaillement en carburant et de pompage des eaux grises et de sanitaires.

Situé dans le port intérieur, au pied des remparts, le port de plaisance Vauban est lui concédé à la Chambre de commerce et d'industrie d'Ille-et-Vilaine. Accessible par l'écluse du Naye, sa capacité est de 220 places et il dispose de divers équipements : bornes à eau et à électricité, sanitaires, bac à huiles usées et containers à déchets.

Certaines de ces activités sont susceptibles d'avoir un impact sur la qualité de l'air de la zone portuaire :

- **Le trafic routier et maritime : émissions de particules fines, d'oxydes d'azote et de dioxyde de soufre (trafic maritime).**
- **Le déchargement et la manipulation de produit pulvérulents (magnésie, phosphate, coquilliers, etc.) : émission de particules fines.**
- **La réparation navale : émissions liées aux activités (colles, peintures, soudure, etc.).**

Le chapitre suivant a pour objectif d'étudier le positionnement des capteurs et la nature des activités réalisées à proximité.

Expertise du dispositif de surveillance de la qualité de l'air du port de Saint-Malo (35400)

PARTIE 1 : ANALYSE DU CHOIX DES 4 SITES RETENUS

L'objectif de cette partie est d'une part de qualifier l'emplacement des sites retenus par EDEIS pour le positionnement des capteurs (site sous influence d'une source d'émission, mesure éloignée des sources en direction des habitations, etc.). Pour ce faire, Air Breizh s'est inspiré des critères du Guide national d'implantation des stations de surveillance de la qualité de l'air (LCSQA 2016).

D'autre part, l'enjeu est également de déterminer les polluants susceptibles d'être émis dans l'environnement de chacun des points sur la base du recueil des activités exercées.

1. Positionnement des capteurs

4 capteurs WT1 ont été positionnés par la société EDEIS et son prestataire ELLONA sur la zone portuaire, au plus proche des sources de pollution potentielles, pour mesurer les niveaux de pollution dans l'air :

- **Quai des Corsaires (V8)** : zone de manutention ;
- **Quai Châteaubriand (JC2)** : zone de déchargement matériaux pulvérulents ;
- **Pôle naval Jacques Cartier (PNJC)** : zone de réparation/entretien des bateaux ;
- **Terminal du Naye (TDN)** : zone de trafic routier, entrée/sortie du terminal Ferry.

1 station météorologique a été positionnée sur le toit du centre des affaires « Le Carré ».

La Figure 3 ci-après présente le positionnement des capteurs sur la zone portuaire.

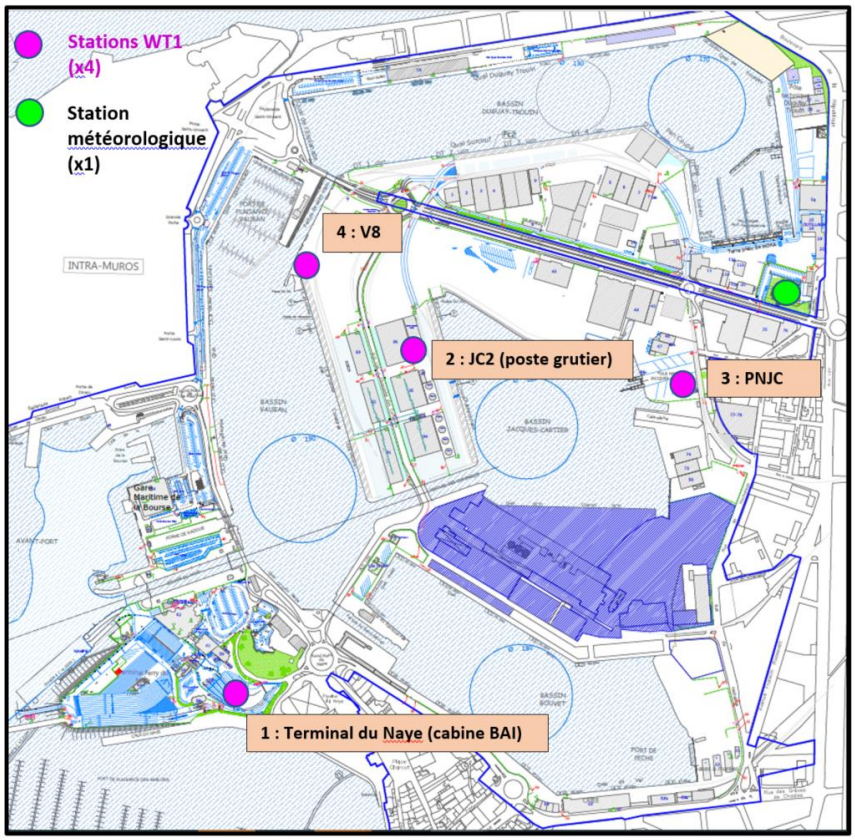


Figure 3 : Point de mesure – Port de Saint-Malo.

2. Environnement des capteurs

a) Environnement de fond

Pour évaluer l'environnement des capteurs, les émissions de la commune de Saint Malo peuvent être étudiées dans une première approche.
D'après l'inventaire des émissions réalisé par Air Breizh (ISEA), la répartition des principaux polluants par secteur est la suivante pour la commune de Saint-Malo (source : année 2018 ISEA v4) :

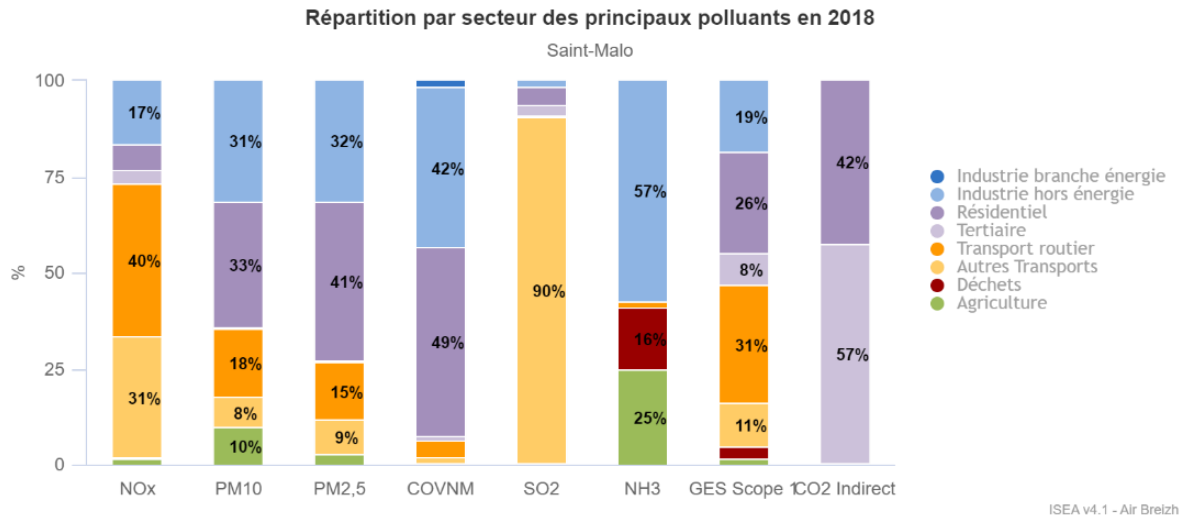


Figure 4 : Inventaire des émissions (Air Breizh)

Sur ce graphique, la catégorie « autres transport » (en jaune) prend en compte les émissions liées notamment au trafic maritime. On peut voir que le SO_2 est majoritairement émis par ce secteur (90%) ainsi qu'une partie des oxydes d'azote (NOx) et des particules (PM10 et PM2.5). Les polluants précédemment cités sont susceptibles d'être retrouvés sur la zone d'étude, en lien avec le trafic maritime. Les NOx et PM sont également générées par le trafic routier, particulièrement important dans ce secteur, notamment en période estivale.

L'usine TIMAC Agro, spécialisée dans la fabrication d'engrais, dispose de deux usines à St Malo dont l'une est implantée dans le port intérieur (Figure 2). Sur la Figure 4, les émissions d'ammoniac (NH_3) associées au secteur « industrie hors énergie » sont en partie liées à cette activité. Ainsi, des émissions diffuses d'ammoniac sont susceptibles d'être mesurées sur la zone d'étude.

b) Environnement de proximité

Le Tableau 1 ci-après présente un bilan des activités réalisées à proximité des capteurs avec les principaux polluants susceptibles d'être émis.

Le premier **point de mesure 'TDN'** est situé au niveau du terminal Ferry du Naye, sur une des cabines de la station de péage. Le capteur se trouve à proximité immédiate du passage des voitures et des camions, à faible vitesse.
Les principaux polluants traceurs du trafic routier sont le NO_2 et les particules fines. Du monoxyde de carbone peut être retrouvé mais celui-ci est rapidement dégradé.

Figure 5 : Capteur TDN, Terminal du Naye.

Le second **point de mesure 'JC2'** est situé dans une zone de manutention et de stockage, au niveau du Quai Châteaubriand. Ici, la manipulation de produits pulvérulents est susceptible d'émettre des particules fines et les engins de manutention sont des sources de NO_2.

Figure 6 : Capteur JC2, Quai Châteaubriand.

Le troisième **point 'PNJC'**, au pôle naval Jacques Cartier, est situé dans un environnement de construction et de carénage des navires. Ici, des solvants contenant des COVs sont susceptibles d'être utilisés dans les peintures. Les générateurs utilisés pour les appareils filaires peuvent également émettre des NOx, des particules et du monoxyde de carbone.

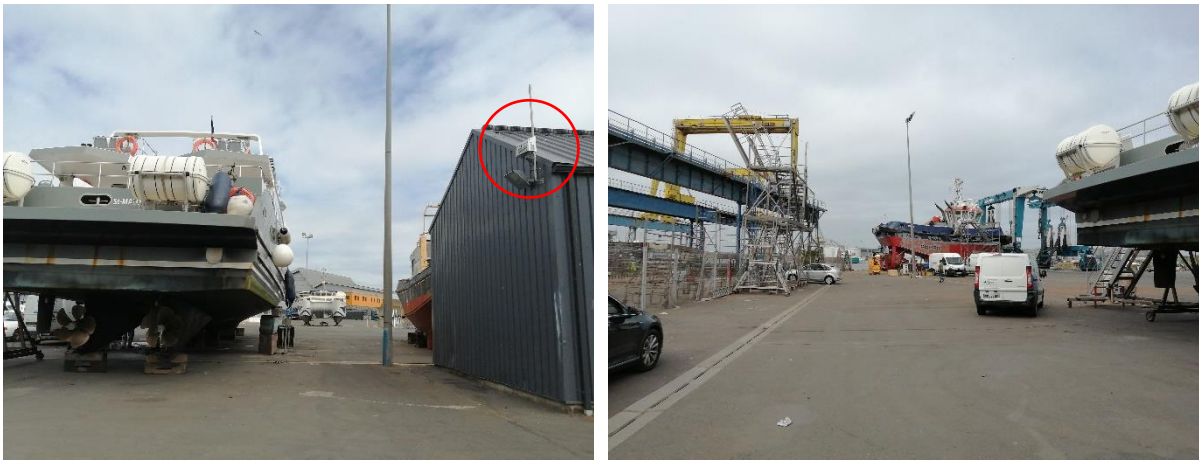


Figure 7 : Capteur PNJC, pôle naval Jacques Cartier.

Le quatrième **point 'V8'**, au Quai des Corsaires, est situé proche d'une zone de déchargement de matériaux et de stockage de bois. Les hangars de stockage de matériaux sont situés à 150 m du capteur. Ce point semble moins soumis aux envols de poussières du fait des matériaux manipulés à proximité. Les engins utilisés pour la manutention des marchandises représentent des sources de NO_2 et de particules.

Figure 8 : Capteur V8, Quai des Corsaires.

Concernant les paramètres mesurés, l'ozone n'est pas un polluant spécifique de la zone portuaire. Il s'agit d'un un polluant secondaire, produit dans la basse atmosphère sous l'effet du rayonnement solaire et de réaction photochimiques entre les NOx, les COV, le CO et le CH4. En générale, l'ozone est consommé par les NOx (cycle de Chapman) en contexte urbain trafic. Les concentrations en ozone sont plus importantes dans des contextes périurbains et rurales où les réactions avec les NOx sont moins importantes. **L'intérêt de la mesure de l'O_3 sur la zone portuaire est donc limité** (zone riche en NO_2).

La mesure de l'O_3 ne semble pas prioritaire dans un contexte portuaire. Selon les points de mesure, certains polluants doivent être systématiquement mesurés car ils sont issus d'une pollution multi-sources (NO_2, SO_2, PM et NH_3). En revanche, la mesure des autres polluants est utile pour étudier l'influence de sources locales (CO, COV, H_2S).

Tableau 1 : Environnements de proximité des capteurs.

numéro	Nom	nom court	hauteur	Distance zones fréquentés	Influence	A proximité	Polluants suspectés dû à l'environnement								
							PM10	PM2,5	NO_2	SO_2	NH_3	CO	COV	H_2S	O_3
1	Terminal du Naye	TDN	3,5 m	50 m (bureaux)	trafic routier	voitures et camions **(2 m)**	X	X	X	X	X	X			
2	Quai Châteaubriand	JC2	4,5 m	300 m (port de plaisance)	industriel	produits pulvérulents, HCl (en cuves), cuves GNR, magnésie, sels marles, sable coquillage, passage de véhicules et bâteaux **(20 - 50 m)**	X	X	X	X	X				
3	Pôle Naval Jacques Cartier	PNJC	5,5 m	50 m (habitations)	industriel	Rénovation de bâteau, construction, passage de véhicules, carrainage, soudure **(5 -10 m)**	X	X	X	X	X	X	X		
4	Quai des Corsaires	V8	1,5 m	50 m (port de plaisance)	industriel	Camion, bois, magnésie, sels, marl, végétaux, décomposition de végétaux (vase) **(10 - 20m)**	X	X	X	X	X			X	

3. Avis sur le positionnement des capteurs

Pour l'implantation des stations réglementaires de notre réseau mesure, le guide du LCSQA[1] est utilisé comme référence.

Les stations de mesure peuvent être classifiées en fonction de leur environnement d'implantation :

- Station urbaine
- Station périurbaine
- Station rurale
  - Proche de zone urbaine
  - Régionale
  - Nationale.

Mais aussi en fonction des types d'influence prédominante par polluant :

- Mesure sous influence industrielle
- Mesure sous influence du trafic
- Mesure de fond

Les stations de surveillance réglementaire ont pour objet de mesurer l'exposition de la population dans des contextes variés (urbain/rural, …) et sous l'influence de différentes sources d'émissions. Elles sont donc positionnées à proximité des zones habitées ce qui n'est pas le cas des sites retenus par EDEIS dans l'emprise du port puisque ces derniers sont au plus proches des sources d'émissions.

Deux types d'influence ont été mise en évidence pour les 4 sites retenus : trafic routier et industrielle.

Le guide du LCSQA précise ce qui suit concernant l'implantation d'une station de mesure réglementaire sous influence industrielle :

« En accord avec l'annexe III.B.1.e de la Directive 2008/50/CE[2] et l'annexe III.1 de la Directive 2004/107/CE[3], la mesure permet de fournir des informations sur les concentrations les plus élevées auxquelles la population résidant près d'une source fixe est susceptible d'être exposée.

L'implantation doit permettre le suivi des phénomènes d'accumulation et de panache en fonction de la météorologie et de la topographie locale. Les caractéristiques de la source (hauteur de cheminée, vitesse d'éjection des gaz, tonnage annuel...) peuvent aussi conditionner l'implantation de la station.

Note : En cas d'influence dominante ou prépondérante d'une source industrielle en zone urbaine, il conviendra de favoriser une implantation à l'endroit où la densité de population dans un rayon de 1 km est la plus élevée (ex : supérieure à 4 000 hab / km²). »

[1] LCSQA, février 2017 : Conception, implantation et suivi des stations françaises de surveillance de la qualité de l'air

[2] Directive 2008/50/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 mai 2008 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe

[3] DIRECTIVE 2004/107/CE du parlement européen et du conseil du 15 décembre 2004 concernant l'arsenic, le cadmium, le mercure, le nickel et les hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'air ambiant

L'implantation des capteurs au niveau des zones du port considérées comme les plus pénalisantes permet de mesurer la pollution de proximité directe avec la source. Cependant, dans le cas d'une mesure de l'exposition moyenne de la population, le guide du LCSQA préconise « une implantation à l'endroit où la densité dans un rayon de 1 km est la plus élevée ».

Les implantations retenues par EDEIS pour le positionnement des capteurs permettent de caractériser les émissions de zones d'activités exercées à proximité immédiates de celles-ci.

En revanche, du fait de leur éloignement des zones d'habitations, la typologie des capteurs n'a pas vocation à quantifier l'exposition de la population riveraine du port.

PARTIE 2 : CONTROLE METROLOGIQUE DES CAPTEURS CHOISIS

Depuis quelques années, des micro-capteurs de pollution se développent offrant de nouvelles perspectives dans le domaine de la mesure jusqu'à présent centrée sur les mesures homologuées (analyseurs fixes).

EDEIS a fait le choix des micro-capteurs WT1 ELLONA, assurant la surveillance en continu de plusieurs paramètres : particules fines (PM_{10}, $PM_{2.5}$), NO_2, SO_2, NH_3, CO, O_3, H_2S et COV.

Dans le cadre de cette étude, le contrôle métrologique des capteurs sera réalisé sur la base :

- d'une analyse des caractéristiques des appareils, telles que annoncées par le fabriquant, en fonction du contexte des mesures: limite de détection, plage de mesure, conditions optimales de mesures (humidité, température) ;
- des résultats des tests métrologiques disponibles : challenge air lab 2019 et 2021 ;
- d'une campagne de comparaison métrologique avec des équipements de référence sur les paramètres à enjeux localement.

Cette dernière étape a été réalisée via l'installation de notre camion laboratoire sur la zone portuaire, pendant une **durée de 4 semaines (test de justesse)**.

Les capteurs ont été regroupés sur le site V8 pendant les deux premières semaines de mesure, ce qui a permis de tester la répétabilité des mesures dans les mêmes conditions d'exposition.

Les paramètres suivants ont été mesurés en parallèle avec des appareils homologués pour la surveillance réglementaire : particules fines (PM_{10} et $PM_{2,5}$), NO_2 et SO_2.

Cette campagne a permis de vérifier les critères suivants :

- Fiabilité des capteurs (taux de recouvrement des données sur la période) ;
- Répétabilité des capteurs (comparaison entre capteurs) ;
- Justesse des capteurs (comparaison à la référence).

1. Analyse des caractéristiques des appareils

Cette partie a pour objectif d'évaluer la compatibilité des capteurs choisis dans le contexte de la zone d'étude.

a) Présentation des capteurs ELLONA WT1

La société Ellona (anciennement Rubix), a développé la station de microcapteur WT1 (Watch Tower 1). Cet appareil est conçu pour la surveillance de la qualité de l'air extérieur et permet de mesurer une grande diversité de polluants selon différentes caractéristiques.

Présentant un degré de précision moins important que les appareils de mesure fixe, ce type de capteur permet d'avoir des mesures dites 'indicatives' sur les niveaux de concentration.

b) Caractéristiques des capteurs

Dans cette partie, les caractéristiques des capteurs (fournies par le fabriquant) sont évaluées en fonction des polluants mesurés et des valeurs de références associées (niveaux de fond, valeurs réglementaires, valeurs guides de l'OMS). Les niveaux de fond moyens et les maximums rencontrés en 2021 à la station périurbaine de fond de Saint-Malo (Rocabey) ont été utilisés dans le cadre de cette analyse.

Pour le monoxyde de carbone (CO) non suivi à la station Rocabey, les niveaux mesurés à la station Plouvorn (près de Landivisiau) ont été utilisés comme référence pour évaluer les caractéristiques des capteurs WT1. Il s'agit du seul point de mesure au niveau régional. La moyenne semestrielle a été utilisée pour avoir une estimation des niveaux de fond (la station a été installée en 2022).

Du fait du contexte peu industrialisé de la région Bretagne, le SO_2 ne fait plus l'objet de mesures en continu. Il est suivi via d'autres méthodes comme la modélisation ou l'inventaire des émissions. Néanmoins, ce polluant peut être mesuré lors d'études ponctuelles de la qualité de l'air sur des thématiques spécifiques. De ce fait, les niveaux mesurés lors de l'étude 2017[4] ont été utilisés comme référence.

Le H_2S, non suivi en contexte urbain, fait l'objet d'une surveillance saisonnière sur certaines baies Bretonnes lors des échouages estivaux. Le site de l'Hôtellerie, à Hillion (22120), présentant les concentrations les plus élevées de la saison 2021, a été pris comme référence.

3 caractéristiques des capteurs ont été étudiées :

- **la gamme de mesure** qui permet d'estimer la plus haute valeur que l'appareil est capable de mesurer ;
- **la résolution** qui correspond au plus petit écart que l'appareil peut mesurer entre deux valeurs ;
- **la limite de détection** qui correspond à la plus petite valeur mesurable par l'appareil avec un niveau d'incertitude acceptable.

Le Tableau 2 ci-après synthétise ces éléments. Les caractéristiques des appareils qui ne sont pas cohérentes avec les valeurs de référence sont marquées en rouge dans le tableau.

[4] Etude Air Breizh 2017 - Evaluation des niveaux de particules à St Malo – Recherche de sources.

Tableau 2 : Tableau de synthèse – caractéristiques capteur Ellona WT1 ***(en µg/m³)***

Polluants	Max gamme de mesure	Résolution	LOD	Station Rocabey PUF (2021)		Réglementation			OMS		Commentaires
				Moyenne annuelle	Max annuel (valeurs horaires)	Annuelle	Horaire	Journalière	Annuelle	Journalière	
	µg/m³										
O_3	29 400	5,9	17,64	57	123		180 (IR*)	120 (objectif qualité)		100	
NO_2	28 200	5,7	**17,2**	**9**	83	**40** (objectif qualité)	200 (VL)		10	25	
NH_3	105 000	**21,2**	**63,7**	**6**	229						Polluant non réglementé
PM2,5	5 000	0,1	0,1	10	68	10 (objectif qualité)			5	15	
PM10	5 000	0,1	0,1	21	131	30 (objectif qualité)	50 (VL)		15	45	
				Station Plouvorn (2022)							
				Moyenne semestrielle, du 01/01 au 15/06/2022	Max semestriel (horaire), du 01/01 au 15/06/2022						
CO	300 000	6,6	**200,0**	**169**	477			10 000*		4000	Station installée en janvier 2022
				Site de l'Hôtellerie							
				Moyenne saison (2021)	Max saison (2021)						
H_2S	18 070	4,2	12,5	15	201 (moyenne journalière)					150	Polluant non réglementé ; saison de 5 mois entre mai et septembre
				Station Rocabey PUF (2017)							
				Moyenne campagnes (2017)	Max campagnes (2017)						
SO_2	99 560	**21,0**	**65,5**	**0.02**	**2.7** (moyenne horaire)	**50** (objectif qualité)	350 (VL)	125 (VL)			Polluant non suivi par la mesure en Bretagne
COV (totaux)	100 ppm	0,001 ppm	0,005 ppm	/	/	/	/	/			Les mesures réalisés par Air Breizh sont faites par screening (quantification unitaire)

**LOD : Limite de détection*
**VL : Valeur Limite réglementaire pour la protection de la santé humaine*
**IR : Seuil d'information et de recommandation*
**PUF : station de mesure périurbaine de fond*
** Maximum journalier de la moyenne glissante sur 8h*

La **gamme de mesure** permet d'estimer la plus haute valeur que l'appareil est capable de mesurer. Ici, les gammes de mesure sont toutes bien supérieures aux valeurs seuils réglementaires et aux concentrations maximales rencontrées à la station Rocabey ou sur les autres sites de mesure. **Les gammes de mesure des polluants semblent donc cohérentes avec les niveaux les plus élevés susceptibles d'être rencontrés sur la zone.**

La **résolution** de l'appareil correspond au plus petit écart que l'appareil peut mesurer entre deux valeurs. Dans le tableau, la mesure du NH_3 présente une résolution de 21 µg/m^3, ce qui est supérieur à la moyenne annuelle mesurée à la station Rocabey en 2021 (6 µg/m^3). Pour le SO_2, la résolution du capteur (21 µg/m^3) est bien supérieure à la moyenne des niveaux mesurés lors de la campagne de 2017. **Les résolutions pour les mesures du SO_2 et du NH_3 ne semblent pas adaptées car elles sont supérieures aux niveaux de fond habituellement rencontrés. Les résolutions semblent cohérentes pour les autres polluants.**

La **limite de détection** (LOD) correspond à la plus petite valeur mesurable par l'appareil avec un niveau d'incertitude acceptable. Des concentrations inférieures à la LOD peuvent être mesurées mais avec une marge d'erreur importante.

Dans le Tableau 2, **Les LOD de l'appareil pour la mesure du NO_2 et du SO_2 ne semblent pas adaptées car elles sont bien supérieures aux niveaux de fond mesurés à la station Rocabey** (mesures 2021 pour le NO_2 et étude 2017 pour le SO_2). De plus, la LOD pour le SO_2 dépasse le seuil réglementaire. Ainsi, ce seuil pourrait être atteint ou dépassé sans que l'appareil puisse fournir une mesure fiable de ce dépassement.

Le NH_3 et le H_2S ne sont pas des polluants réglementés en France. Cependant, le NH_3 a fait l'objet de mesure en continu à la station Rocabey en 2021 en raison du contexte local. Le H_2S n'est pas suivi en ville mais fait l'objet d'une surveillance saisonnière lors des échouages estivaux.

Pour la mesure du H_2S, les caractéristiques du capteur semble convenir à la surveillance, suivant le système de comparaison utilisés précédemment. Cependant, la LOD correspondante au NH_3 est supérieure à la moyenne annuelle mesurée en 2021 à la station Rocabey.

Concernant la mesure du monoxyde de carbone (CO), la LOD des capteurs atteint la moyenne semestrielle mesurée à la station Plouvorn mais reste faible par rapport à la valeur limite réglementaire (10 000 µg/m^3).

Les COV totaux ne sont pas mesurés par Air Breizh, (utilisation de screening pour rechercher des composés en particulier). Néanmoins, les caractéristiques des capteurs fournis par le fabricant semblent cohérentes pour ces mesures.

Les polluants présentant des caractéristiques compatibles avec le contexte de la surveillance du port sont les suivants : PM10, PM2.5, O_3, H_2S, CO.

En revanche, les caractéristiques des capteurs pour la mesure du NO_2, du NH_3 et du SO_2 ne semblent pas compatibles dans ce contexte. Pour ces capteurs, la limite de détection est supérieure au niveau de fond ce qui implique un risque de surestimation.

2. Résultats du challenge AIRLAB

Ces dernières années, les améliorations techniques sur les capteurs de pollution (miniaturisation, connectivité, …) entraînent le développement de nouveaux "réseaux" en équipant des logements, du mobilier urbain, des véhicules ou des citoyens. Ainsi, de nombreux projets d'expérimentation et d'innovation sur la qualité de l'air se développent en s'appuyant notamment sur des microcapteurs.

Le challenge AIRLAB, organisé par le LASAIR, laboratoire d'analyse rattaché à l'AASQA Airparif, a pour but d'évaluer les performances des appareils mesurant la qualité de l'air disponibles sur le marché. L'objectif est de valoriser les innovations tout en apportant des critères d'information et de choix pour les utilisateurs en fonction de leurs besoins par rapport à ces nouvelles technologies.

La société Ellona (anciennement Rubix) a présenté le capteur WT1 au challenge AIRLAB des saisons 2019 et 2021. **Les résultats détaillés sont disponibles en annexe 2**. Une synthèse est présentée ci-après.

Challenge 2019

Les caractéristiques du capteur WT1 ont été notées selon les critères d'évaluation du challenge AIRLAB. Un classement a ensuite été effectué avec les autres participants. Bien que l'évaluation porte sur 5 critères (accès des données, ergonomie, exactitude, pertinence et coût), seule l'évaluation de la pertinence et de l'exactitude des mesures sera étudiée ici.

Selon la classification, le capteur WT1 obtient la note maximale (10) dans la catégorie « pertinence », en raison du nombre et de la diversité des polluants mesurables.

L'exactitude des mesures est évaluée à partir de la méthode SET (Fishbain et al. 2017) ; 3 polluants ont été mesurés : le NO_2, les PM_{10} et les $PM_{2.5}$. Pour le NO_2, le capteur obtient la note moyenne de 8, ce qui correspond à une bonne qualité de données selon les critères du challenge. Cependant, la qualité des données fournies pour les particules (PM10 et PM2.5) était mauvaise (note inférieure à 2).

La note globale du capteur WT1 est de 3 sur 5 ($21^{ème}$ sur 24). Concernant la mesure du NO_2, le capteur se classe $9^{ème}$ sur 11 au concours.

Une fiche de synthèse des résultats du challenge AIRLAB est disponible en annexe 2.

Challenge 2021

Dans l'édition 2021, les critères d'évaluation ont changé. Les capteurs sont évalués sur la base de 5 critères (exactitude, utilité, utilisabilité, encombrement et coût). Seule l'évaluation de l'exactitude des mesures et de l'utilité du capteur est étudiée ici.

Comme en 2019, l'exactitude des mesures est évaluée à partir de la méthode SET (Fishbain et al. 2017). Lors de cette édition, le NO_2 et les particules (PM2.5 et PM1) ont été évalués. Le score attribué au NO_2 a légèrement baissé mais reste bon. La précision des mesures a été très bonne pour les particules avec un score de 9/10. Lors de la précédente édition, la précision des mesures de particules avait été mauvaise. Les PM10 n'ont pas été évaluées sur cette édition.

L'évaluation de l'utilité du capteur est la capacité à fournir les fonctionnalités essentielles pour atteindre les objectifs de l'application. Ce critère d'évaluation se décompose en sous partie :

- Interopérabilité des données
- Maintenance réduite
- Pas de temps de mesure
- Polluants ciblés
- Récupération des données

Le capteur WT1 obtient la note de 9.1/10 pour cette catégorie, avec 3 sous-critères à 10/10 (pas de temps de mesure, polluants ciblés et récupération des données).

Plus globalement, le capteur WT1 améliore son score par rapport à l'édition précédente avec une note de 4 sur 5.

Les résultats de ces concours montrent que les capteurs obtiennent de bons résultats pour la mesure du NO_2 sur les deux éditions.

La note attribuée pour la mesure des particules était faible sur l'édition de 2019 alors qu'elle a été satisfaisante pour les PM2,5 et les PM1 lors de l'édition 2021 (les PM10 n'ont pas été évaluées).

3. Campagne de comparaison métrologique

La campagne de comparaison métrologique a eu lieu du 27 septembre au 24 octobre 2022.

Un camion laboratoire équipé d'analyseurs a été installé au point V8 pour mesurer en continu les particules (PM10 ; PM2,5), les oxydes d'azote (NO_x) et le dioxyde de soufre (SO_2).

Figure 9 : Camion laboratoire positionné sur le site V8

Le tableau ci-dessous synthétise les principales caractéristiques de ces analyseurs :

Tableau 1 : Caractéristiques des analyseurs utilisés pour la comparaison métrologique.

	Appareil	**Max gamme de mesure**	**Limite de détection**
NO_x	AC32e	1 900 µg/m^3	0.6 µg/m^3
SO_2	APSA370	2 700 µg/m^3	1.3 µg/m^3
PM10	BAM	1 000 µg/m^3	1 µg/m^3
PM2.5			

Ces analyseurs sont homologués par le LCSQA pour la surveillance réglementaire de la qualité de l'air.

Les 4 capteurs ont été rassemblés sur le même site (site V8) du 27 septembre au 10 octobre 2022, pour tester la reproductibilité et la justesse des mesures (comparaison à la référence). Les capteurs ont ensuite été replacés sur leurs sites d'origine.

Des critères d'évaluation ont permis de porter un avis sur la qualité des mesures de ces capteurs. Ils sont détaillés dans le chapitre suivant.

a) Critères d'évaluation

Fiabilité - Taux de recouvrement des données :

La fiabilité des instruments, en fonction notamment du mode d'énergie, a été appréhendée sur toute la durée des mesures via le calcul du taux de recouvrement. Il est calculé comme suit :

$$Taux\ de\ recouvrement\ (tc\ \%) = \frac{nb\ de\ données\ capteur}{nb\ total\ de\ données\ durant\ la\ campagne} \times 100$$

Le tableau ci-dessous résume les critères d'évaluation des taux de performances des capteurs, issus du 1er essai national d'aptitude des micro-capteurs pour la surveillance de la qualité de l'air organisé par le LCSQA[5].

Tableau 3 : Critères d'évaluation du taux de recouvrement (tc)

	Critères
Période minimale de couverture mesure indicative Directive européenne 2008/50/CE	tc ≤ 14%
Peu de données, représentativité de la dynamique faible	14% < tc ≤ 45%
Pertes raisonnables, représentativité acceptable	45% < tc ≤ 75%
Couverture dynamique équivalente site fixe Directive européenne 2008/50/CE	75% < tc ≤ 90%
Couverture dynamique équivalente site fixe Directive européenne 2008/50/CE	tc > 90%

Dans le cadre de la surveillance réglementaire, le taux de recouvrement des analyseurs sur une période donnée doit être supérieur à 90% pour permettre l'exploitation des données (Arrêté du 16 avril 2021 relatif au dispositif national de surveillance de la qualité de l'air ambiant).

Reproductibilité et comparaison à la référence (justesse) :

Les données de mesure des 4 capteurs ont été comparées entre elles et avec la référence selon une régression linéaire. Les paramètres de la droite de corrélation ont été analysés comme suit :

Le coefficient de détermination (R^2) a d'abord été observé pour vérifier si les variations des capteurs étaient simultanées. Un R^2 proche de 1 signifie que les données du capteur et de la

[5] LCSQA, novembre 2018 : 1er Essai national d'Aptitude des micro-Capteurs (EAµC) pour la surveillance de la qualité de l'air : Synthèse des résultats

référence sont synchrones. Dans le cas d'un R^2 trop faible (< 0.5), l'analyse de la pente (ci-après) devient secondaire puisque les mesures des deux appareils ne sont pas simultanées.

Dans un second temps, nous avons observé la valeur de **la pente (p)** de cette droite de régression qui caractérise le décalage des mesures entre capteur. Si les mesures sont identiques, la pente sera égale à 1. La corrélation parfaite des mesures forme donc une droite linéaire d'équation y=x.

L'ordonnée à l'origine montre l'erreur systématique que peut avoir un appareil par rapport à un autre. Le décalage peut être plus ou moins acceptable en fonction du polluant mesuré. Dans le cas où les deux précédents paramètres (R^2 et p) sont satisfaisants, l'ordonnée à l'origine sera interprétée au cas par cas, en fonction des concentrations de la nature des polluants mesurés.

Des critères issus du protocole de certification « Air quality sensor » créé par le LNE et l'INERIS[6], ont été utilisés pour évaluer les appareils de mesure.

Les deux premières divisions sont compatibles avec les exigences pour la mesure spécifiée dans la Directive 2008/50/CE concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe[7] conformément aux correspondances suivantes :

- **Division A** : corrélation des mesures **« satisfaisante » au regard de l'objectif du réseau de mesure,** comparable aux objectifs de qualité des données de la mesure Indicative.

- **Division B** : corrélation des mesures **« moyennement satisfaisante »,** comparable aux objectifs de qualité des données de l'estimation Objective.

- **Division C** : corrélation des mesures **« non satisfaisante »,** catégorie d'objectifs de qualité n'entrant pas dans le champ d'application de la Directive 2008/50/CE. Pour cette division, le niveau d'exigence en matière d'incertitude est uniquement suffisant pour des études de sciences participatives, des actions pédagogiques, etc.

Les critères relatifs aux paramètres de la régression linéaire sont présentés dans les tableaux ci-dessous :

Tableau 4 : Critères d'évaluation du coefficient de détermination (R^2)

	R^2		
Valeur	$R^2 \leq 0,5$	$0,5 < R^2 < 0,75$	$\geq 0,75$
Note	**C**	**B**	**A**

[6] Air quality sensor, septembre 2020 : Protocole d'évaluation des systèmes capteurs pour la mesure de la qualite de l'air ambiant en point fixe

[7] Directive 2008/50/EC of the European Parliament and the Council of 21 May 2008 on Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe, https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/50/2015-09-18.

Tableau 5 : Critères d'évaluation de la pente (p)

	Pente (p)		
Valeur	p ≤ 0,5 ou p ≥ 1.5	0.5 < p ≤ 0.7 ou 1 ,3 ≥ p > 1.5	1,3 < p < 0,7
Note	**C**	**B**	**A**

A noter que l'évaluation des capteurs WT1 sur la base de ces critères ne saurait remplacer le protocole de certification « Air quality sensor ». En effet, l'évaluation des capteurs réalisée dans la présente étude sur la base des seuls paramètres de régression linaire n'a pas la prétention de remplacer un contrôle métrologique complet, réalisé par un organisme d'accréditation spécialisé.

En fonction des résultats de ces deux tests métrologiques, les capteurs ont été classés en 3 catégories :

- **Cas 1** : La reproductibilité des capteurs entre eux et la comparaison à la référence (justesse) ne sont pas satisfaisantes ; **l'utilisation des capteurs est déconseillée pour la surveillance de la qualité de l'air du port**.

- **Cas 2** : La reproductibilité est satisfaisante (ou moyennement satisfaisante) ; la justesse n'est pas satisfaisante. L**a comparaison des niveaux est possible entre les capteurs mais des artéfacts sont possibles**. Les résultats ne peuvent pas être comparés à la station de référence Rocabey.

- **Cas 3** : La reproductibilité et la comparaison à la référence (justesse) sont satisfaisantes (ou moyennement satisfaisantes) ; **les capteurs peuvent être comparés entre eux et à la station de référence (Rocabey)**. Il s'agit de la situation jugée idéale dans le contexte de la surveillance de la qualité de l'air du port.

Tableau 6 : Classement des appareils en fonction des résultats des tests métrologiques

	Etape 1 (reproductibilité satisfaisante)	**Etape 2** (justesse satisfaisante)
Cas 3	✓	✓
Cas 2	✓	✗
Cas 1	✗	✗

Dans les parties suivantes, le nom des sites de mesure a été utilisé pour nommer les capteurs. Lors de la période des tests de reproductibilité et de comparaison avec la référence, du 27/09 au 10/10/2022, les capteurs étaient regroupés sur le site V8.

b) Fiabilité des capteurs

Le Tableau 7 ci-dessous présente les taux de recouvrement des appareils sur toute la période de mesure, du 27 septembre au 24 octobre 2022, en données horaires.

Tableau 7 : Taux de recouvrement sur la période de mesure du 27/09 au 24/10/2022 (données horaires)

	V8	TDN	PNJC	JC2
Taux de recouvrement (%)	100%	100%	100%	100%

Les taux de recouvrement des capteurs sont de 100%, ce qui montre une **très bonne fiabilité de ce système de surveillance**.

Les analyseurs présents dans le camion laboratoire ont eu un taux de recouvrement moins important, en raison des coupures de courant successives sur la période de mesure.

c) Reproductibilité des capteurs

Les données de mesure des 4 capteurs ont été comparées entre elles selon une régression linéaire. Les résultats des paramètres de régression linéaire sont présentés dans les tableaux suivants.

Pour rappel les capteurs étaient positionnés sur le site V8 pendant la phase de contrôle métrologique, du 27/09 au 10/10/2022. Pour s'affranchir des journées incomplètes, les données journalières ont été exploitées du 28/09 au 09/10/2022. Les données horaires ont été exploitées sur la même période, du 28/09 – 00:00 au 09/10/2022 - 23:00, pour pouvoir être comparables aux données journalières.

Ainsi, un échantillon de 288 valeurs horaires et 12 valeurs journalières a été utilisé pour les régressions linéaires.

L'objectif de ce traitement est de vérifier que les capteurs sont reproductibles entre eux et donc que leurs mesures sont comparables.

Ces résultats ne sont valables que dans les conditions de mesure rencontrées. En effet, les concentrations mesurées lors de la campagne ont été très faibles pour certains polluants.

Particules PM10 :

Le Tableau 8 ci-dessous présente les résultats des tests de reproductibilité (ou d'intercomparaison) des capteurs pour la mesure des PM10.

Tableau 8 : PM10 - intercomparaison des capteurs WT1 – du 28/09 au 09/10/2022 (µg/m³)

PM10												
Comparaison	V8/TDN		V8/PNJC		V8/JC2		TDN/PNJC		TDN/JC2		PNJC/JC2	
Données	Journalières	Horaires	Journalières	Horaires	Journalières	Horaires	Journalières	Horaires	Journalières	Horaires	Journalières	Horaires
R^2	0,99	0,94	0,99	0,97	1,00	0,95	1,00	0,96	0,99	0,97	0,99	0,93
p	0,84	0,8	0,83	0,79	0,81	0,78	0,98	1,00	0,95	1,01	0,97	0,97
Ordonnée à l'origine	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0

Pour toutes les comparaisons inter-capteurs et pour les deux pas de temps, les paramètres de de corrélation (R^2 et p) sont satisfaisants compte tenu des critères d'évaluation. L'ordonnée à l'origine est également satisfaisante car très faible (inférieure à 1 µg/m^3).

Concernant la mesure des PM10, la corrélation des capteurs est très satisfaisante quel que soit le pas de temps considéré. Ci-dessous, un exemple de graphique de corrélation :

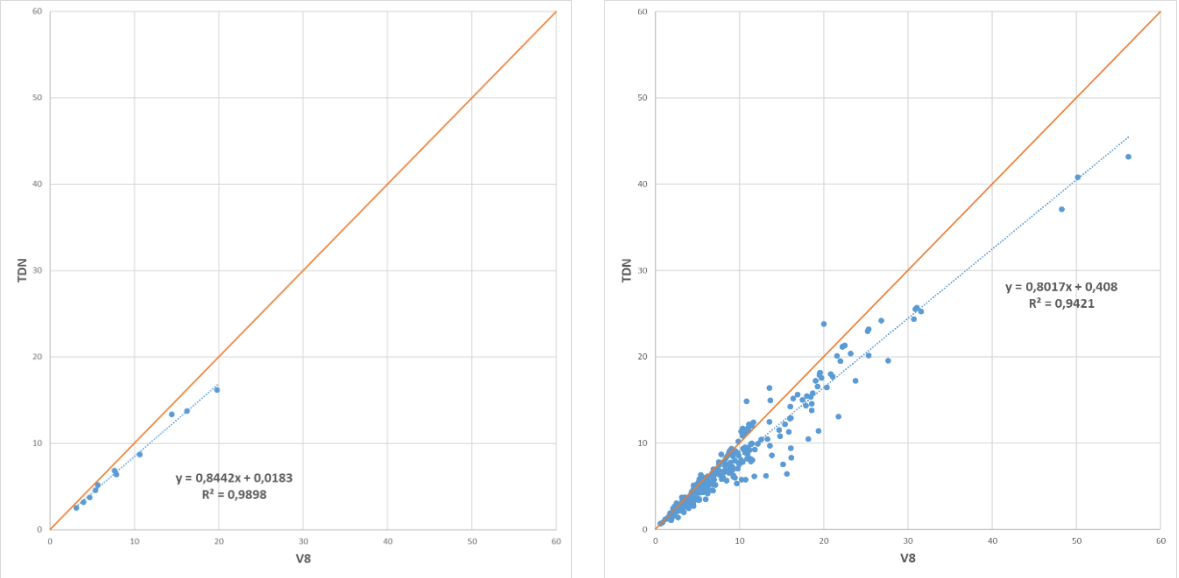


Figure 10 : PM10 - Régression linéaire V8/TDN - moyenne journalière (gauche) ; horaire (droite) - µg/m^3

Particules PM2,5 :

Le Tableau 9 ci-dessous présente les résultats de l'intercomparaison des capteurs pour la mesure des PM2,5.

Tableau 9 : PM2,5 - intercomparaison des capteurs WT1 – du 28/09 au 09/10/2022 (µg/m^3)

PM2,5												
Comparaison	V8/TDN		V8/PNJC		V8/JC2		TDN/PNJC		TDN/JC2		PNJC/JC2	
Données	Journalières	Horaires	Journalières	Horaires	Journalières	Horaires	Journalières	Horaires	Journalières	Horaires	Journalières	Horaires
R^2	0,98	0,95	0,99	0,97	1	0,97	0,99	0,97	0,99	0,98	1	0,96
p	0,96	0,91	0,99	1,02	0,91	1,1	1,02	0,95	0,94	1,03	0,92	1,05
Ordonnée à l'origine	0	0	-1	1	0	0	0	1	0	0	0	0

Pour toutes les comparaisons inter-capteurs et pour les deux pas de temps, les paramètres de de corrélation (R^2 et p) sont satisfaisants compte tenu des critères d'évaluation. L'ordonnée à l'origine est également satisfaisante car très faible (inférieure à 1 µg/m^3).

Concernant la mesure des PM2,5, la corrélation des capteurs est satisfaisante quel que soit le pas de temps considéré. Ci-dessous, un exemple de graphique de corrélation :

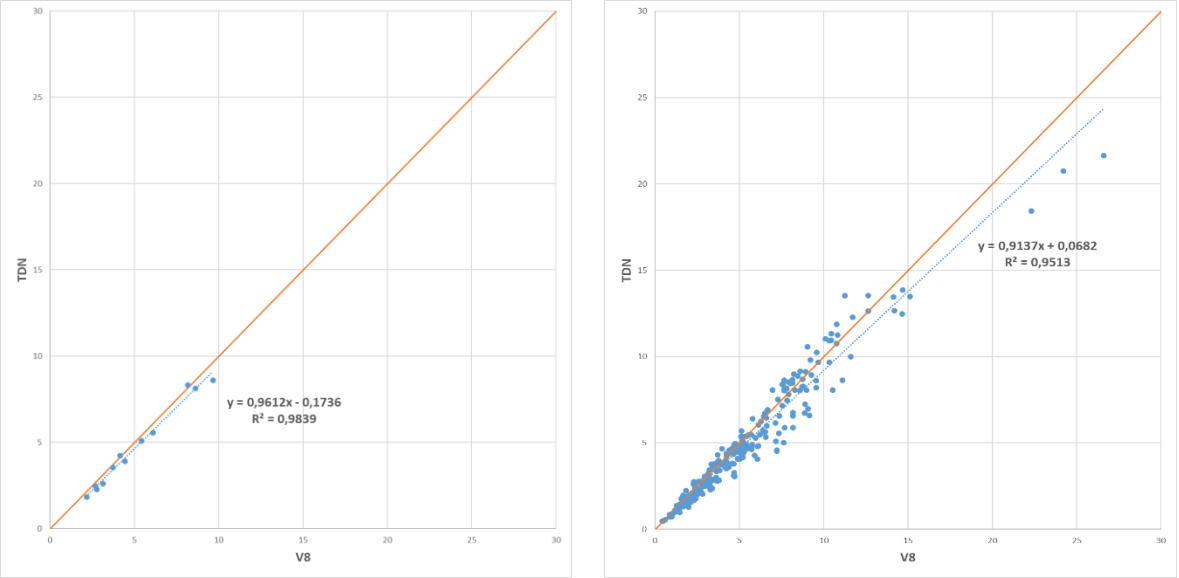


Figure 11 : PM2,5 - Régression linéaire V8/TDN - moyenne journalière (gauche) ; horaire (droite) - µg/m³

Dioxyde d'azote (NO_2) :

Le Tableau 10 ci-dessous présente les résultats de l'intercomparaison des capteurs pour la mesure du NO_2.

Tableau 10 : NO_2 - intercomparaison des capteurs WT1 – du 28/09 au 09/10/2022 (µg/m³)

NO_2												
Comparaison	**V8/TDN**		**V8/PNJC**		**V8/JC2**		**TDN/PNJC**		**TDN/JC2**		**PNJC/JC2**	
Données	**Journalières**	**Horaires**	**Journalières**	**Horaires**	**Journalières**	**Horaires**	**Journalières**	**Horaires**	**Journalières**	**Horaires**	**Journalières**	**Horaires**
R^2	0,98	0,96	1	0,97	0,87	0,93	0,97	0,97	0,89	0,91	0,89	0,92
p	1,05	0,92	1	0,96	0,91	0,89	0,93	1,10	0,86	0,83	0,92	0,92
Ordonnée à l'origine	1	0	35	35	13	14	35	35	13	13	-19	-19

Pour toutes les comparaisons inter-capteurs et pour les deux pas de temps, les paramètres de de corrélation (R^2 et p) sont satisfaisants compte tenu des critères d'évaluation.

Cependant, les capteurs PNJC et JC2 semblent décalés entre eux et par rapport aux autres capteurs, comme le montre le décalage de l'ordonnée à l'origine par rapport au 0. Les écarts vont de 13 à 35 µg/m³ alors que la concentration de fond sur la période de mesure était autour de 8 µg/m³ (moyenne horaire de l'analyseur sur la période).

Cet écart systématique pourrait être corrigé par un offset qui serait appliqué à l'ensemble du jeu de données de ces deux capteurs pour décaler la droite de régression.

Concernant la mesure du NO_2, tous les capteurs ont une corrélation satisfaisante quel que soit le pas de temps considéré. Pour deux capteurs (PNJC et JC2), des corrections de leur niveau de base permettraient d'améliorer les résultats de ces corrélations.

Ci-dessous, un exemple de graphique de corrélation :

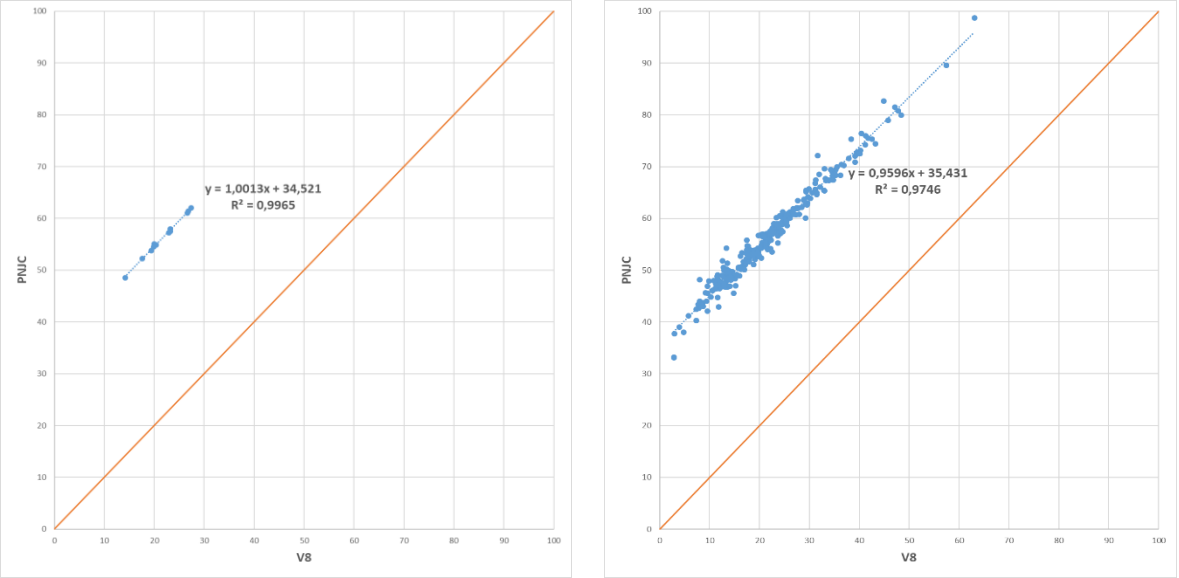


Figure 12 : NO_2 - Régression linéaire V8/PNJC - moyenne journalière (gauche) ; horaire (droite) - µg/m³

Dioxyde de soufre (SO_2) :

Le Tableau 11 ci-dessous présente les résultats de l'intercomparaison des capteurs pour la mesure du SO_2.

Tableau 11 : SO_2 - intercomparaison des capteurs WT1 – du 28/09 au 09/10/2022 (µg/m³)

SO_2												
Comparaison	V8/TDN		V8/PNJC		V8/JC2		TDN/PNJC		TDN/JC2		PNJC/JC2	
Données	Journalières	Horaires	Journalières	Horaires	Journalières	Horaires	Journalières	Horaires	Journalières	Horaires	Journalières	Horaires
R^2	0,18	0,05	0,73	0,61	0,83	0,55	0,22	0,08	0,23	0,06	0,84	0,78
p	0,47	0,27	0,65	0,62	1,05	0,67	0,31	0,19	0,5	0,18	1,41	1,01
Ordonnée à l'origine	8	11	1	2	17	22	6	8	25	29	17	21

Pour le SO_2, **seuls trois capteurs présentent des résultats satisfaisants ou moyennement satisfaisants** au regard des paramètres de corrélation (R^2 et p) : V8, PNJC et JC2. Le capteur TDN n'est pas corrélé avec les autres capteurs.

Les capteurs semblent être mieux corrélés en moyennes journalières, comme le montre les coefficients de détermination plus proches de 1 sur ce pas de temps.

Seule l'ordonnée à l'origine de la comparaison V8/PNJC présente un faible décalage par rapport au 0. Pour les comparaisons V8/JC2 et PNJC/JC2, les écarts vont de 17 à 22 µg/m³ alors que **la concentration de fond sur la période de mesure était autour de 0,7 µg/m³** (moyenne du camion laboratoire sur la période). Le capteur JC2 semble décalé par rapport au 0.

Ci-dessous, les graphiques de corrélation de ces trois capteurs sont présentés et interprétés.

On peut voir sur ces graphiques que la corrélation des mesures du SO_2 entre les capteurs V8 et JC2 est bonne en moyenne journalière. L'ordonnée à l'origine pourrait être corrigée pour se rapprocher de la droite y=x (en orange). En revanche, la corrélation en moyenne horaire est mauvaise entre ces mêmes capteurs ; les points sont écartés de la droite de corrélation et

asynchrones dans les niveaux faibles. La correction de cette droite ne pourrait pas améliorer cette tendance car le coefficient de corrélation est trop faible (R^2 = 0,55).

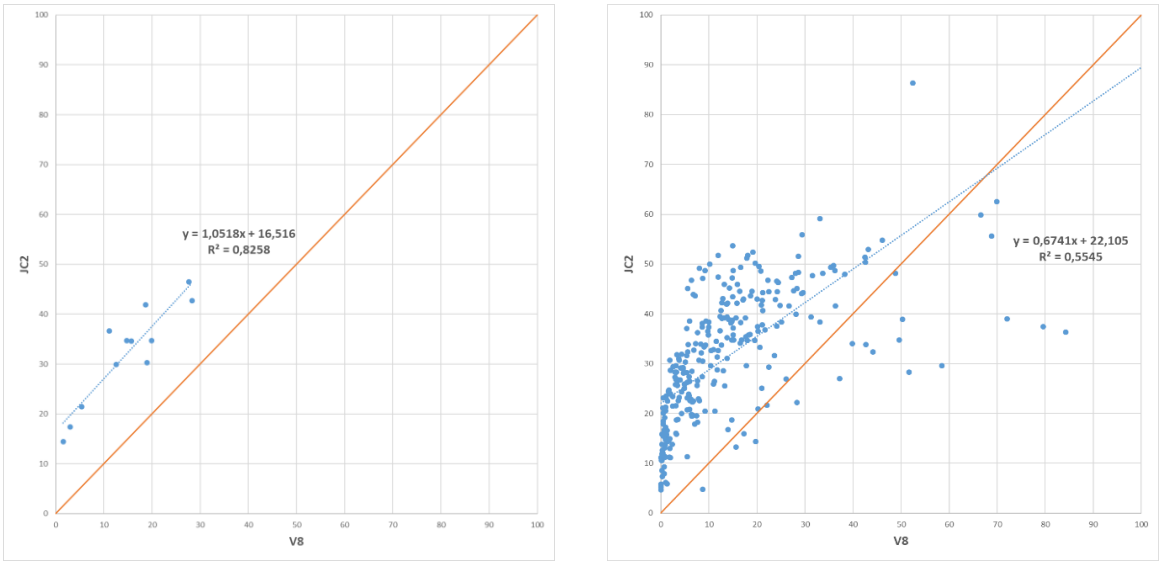


Figure 13 : SO_2 - Régression linéaire V8/JC2 - moyenne journalière (gauche) ; horaire (droite) - µg/m^3

Pour les capteurs PNJC et JC2, les points sont proches de la droite de corrélation (moyenne horaire) mais les mesures sont asynchrones dans les niveaux faibles. Le capteur JC2 semble responsable des écarts dans les niveaux faibles. L'ordonnée à l'origine pourrait être corrigée pour se rapprocher de la droite y=x (en orange) mais cette correction ne pourrait pas améliorer la corrélation des capteurs dans les niveaux faibles.

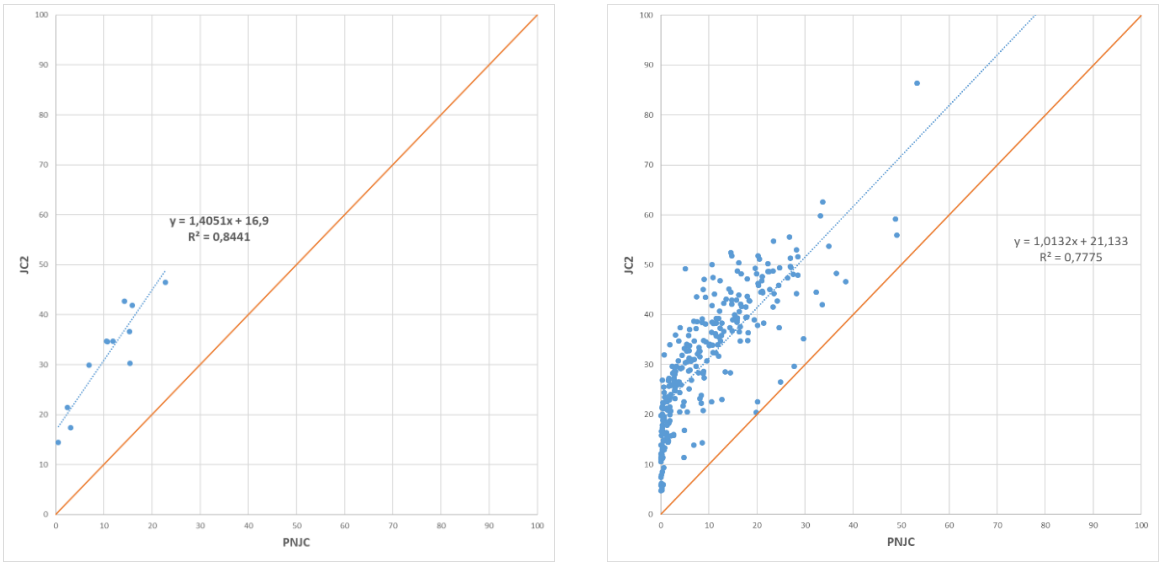


Figure 14 : SO_2 - Régression linéaire PNJC/JC2 - moyenne journalière (gauche) ; horaire (droite) - µg/m^3

On peut voir sur les deux graphiques ci-après que la corrélation des capteurs V8/PNJC est bien meilleure en moyenne journalière. En effet, les points sont plus proches de la droite de corrélation.

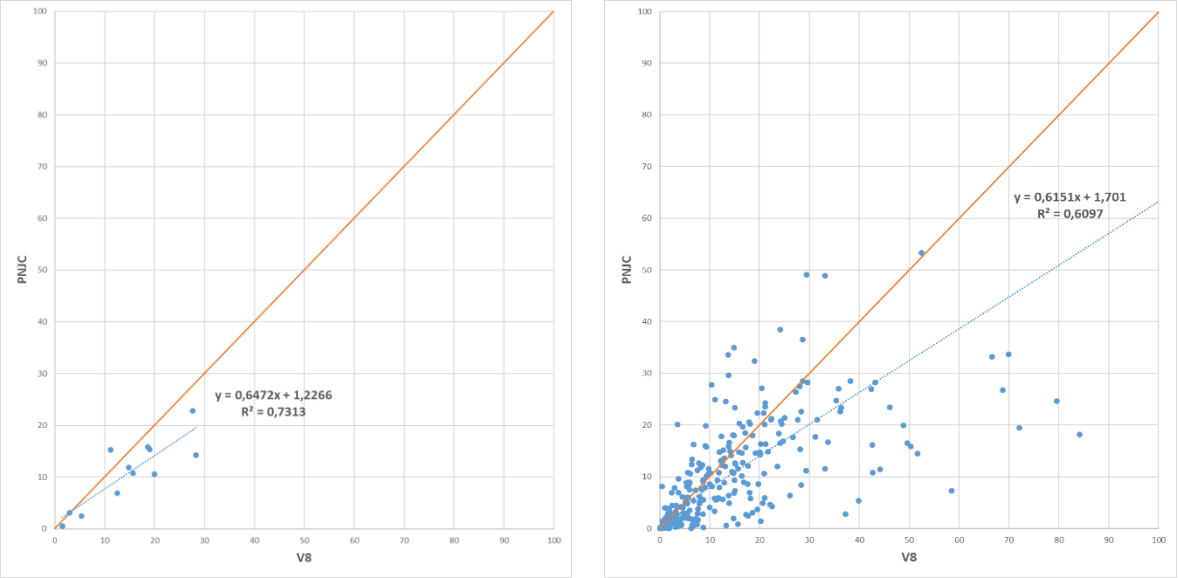


Figure 15 : SO_2 - Régression linéaire V8/PNJC - moyenne journalière (gauche) ; horaire (droite) - µg/m³

Pour le SO_2, seuls trois capteurs présentent des résultats satisfaisants ou moyennement satisfaisants au regard des paramètres de corrélation (R^2 et p) : V8, PNJC et JC2. Cependant, le capteur JC2 semble décalé par rapport au 0, un offset pourrait être appliqué pour corriger la droite de régression. La reproductibilité de ces capteurs est meilleure en moyenne journalière. La corrélation des capteurs PNJC et JC2 est satisfaisante en moyenne horaire mais les mesures sont asynchrones dans les niveaux faibles.

Les concentrations en SO_2 mesurés lors de la campagne ont été majoritairement inférieures à la limite de détection des appareils (LD = 65,5 µg/m³).

Les mesures du capteur TDN ne sont pas reproductibles avec les autres capteurs.

Monoxyde de carbone (CO) :

Le Tableau 12 ci-dessous présente les résultats de l'intercomparaison des capteurs pour la mesure du CO.

Tableau 12 : CO - intercomparaison des capteurs WT1 – du 28/09 au 09/10/2022 (µg/m³)

CO												
Comparaison	V8/TDN		V8/PNJC		V8/JC2		TDN/PNJC		TDN/JC2		PNJC/JC2	
Données	Journalières	Horaires	Journalières	Horaires	Journalières	Horaires	Journalières	Horaires	Journalières	Horaires	Journalières	Horaires
R^2	0,99	0,99	1	1	0,99	0,99	0,99	0,99	1	0,99	0,99	0,99
p	1,06	1,09	0,93	0,94	1,07	1,07	0,87	0,86	1	0,98	1,14	1,13
Ordonnée à l'origine	5	4	-2	-2	1	1	-5	-5	-3	-3	3	3

Pour toutes les comparaisons inter-capteurs et pour les deux pas de temps, les paramètres de corrélation sont très satisfaisants (R^2 et p), compte tenu des critères d'évaluation.

Les ordonnées à l'origine sont très peu éloignées du 0 pour la majorité des capteurs ; les écarts vont de 1 à 6 µg/m³. Par comparaison, la concentration de fond mesurée à la station Plouvorn était de 130 µg/m³ (moyenne horaire) sur la période de mesure. Les écarts par rapport au 0 semblent très faibles comparés à cette concentration de fond.

La régression linéaire sur la Figure 16 ci-contre montre la corrélation des mesures en moyenne horaire du capteur JC2 avec le capteur TDN.

On peut voir que les mesures en CO entre les deux capteurs sont bien corrélées sur une large gamme de mesure.

Concernant la mesure du CO, la corrélation des capteurs est très satisfaisante quel que soit le pas de temps retenu.

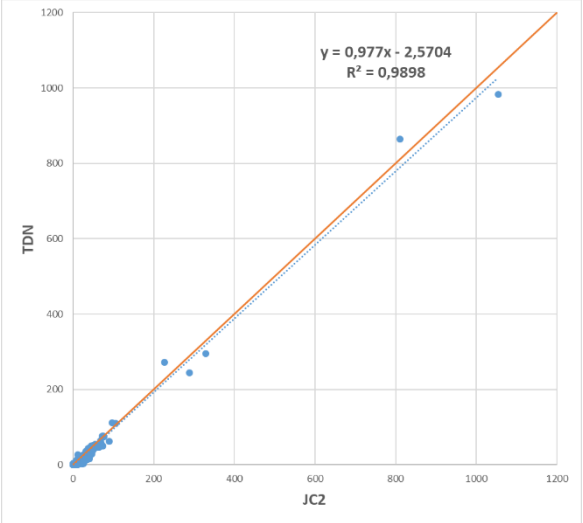


Figure 16 : CO - Régression linéaire TDN/JC2 (moyenne horaire - µg/m³)

Ammoniac (NH_3) :

Le Tableau 13 ci-dessous présente les résultats de l'intercomparaison des capteurs pour la mesure du NH_3.

Tableau 13 : NH_3 - intercomparaison des capteurs WT1 – du 28/09 au 09/10/2022 (µg/m³)

NH_3												
Comparaison	V8/TDN		V8/PNJC		V8/JC2		TDN/PNJC		TDN/JC2		PNJC/JC2	
Données	Journalières	Horaires	Journalières	Horaires	Journalières	Horaires	Journalières	Horaires	Journalières	Horaires	Journalières	Horaires
R^2	0,01	0,47	0,13	0,59	0,25	0,66	0,89	0,95	0,46	0,67	0,68	0,78
p	0,07	0,29	0,22	0,36	0,79	0,83	0,95	1,08	1,75	1,99	2,11	1,94
Ordonnée à l'origine	-5	-40	-27	-49	-104	-111	3	2	14	12	5	7

Pour le NH_3, **deux capteurs sont très satisfaisants au regard des paramètres de corrélation** (R^2 et p) : TDN/PNJC. Le décalage est faible car l'ordonnée à l'origine est proche de 0.

La comparaison V8/JC2 en moyenne horaire montre des résultats moyennement satisfaisants pour le coefficient de détermination et la pente au regard des critères d'évaluation.

Cependant, les comparaisons avec le capteur V8 montre que l'ordonnée à l'origine est largement décalée par rapport au 0. En comparaison, la concentration de fond sur la période de mesure était d'environ 6 µg/m³ à la station Rocabey (données horaires).

La régression linéaire sur la Figure 17 ci-dessous montre la corrélation des mesures en moyennes horaires et journalières du capteur V8 avec le capteur JC2. Sur le graphique en données horaires, on peut voir que les points sont éparpillés autour de la droite de corrélation. Les mesures proches de 0 semblent moins synchrones entre les deux capteurs. Le graphique de corrélation en données journalières montre qu'il n'y a pas eu assez de variation de concentration pour obtenir un coefficient de détermination satisfaisant.

Seules les mesures en NH_3 des capteurs PNJC et TDN sont reproductibles (moyenne horaire et journalière). La régression linéaire de ces deux capteurs est présentée sur la Figure 18 ci-dessous**.**

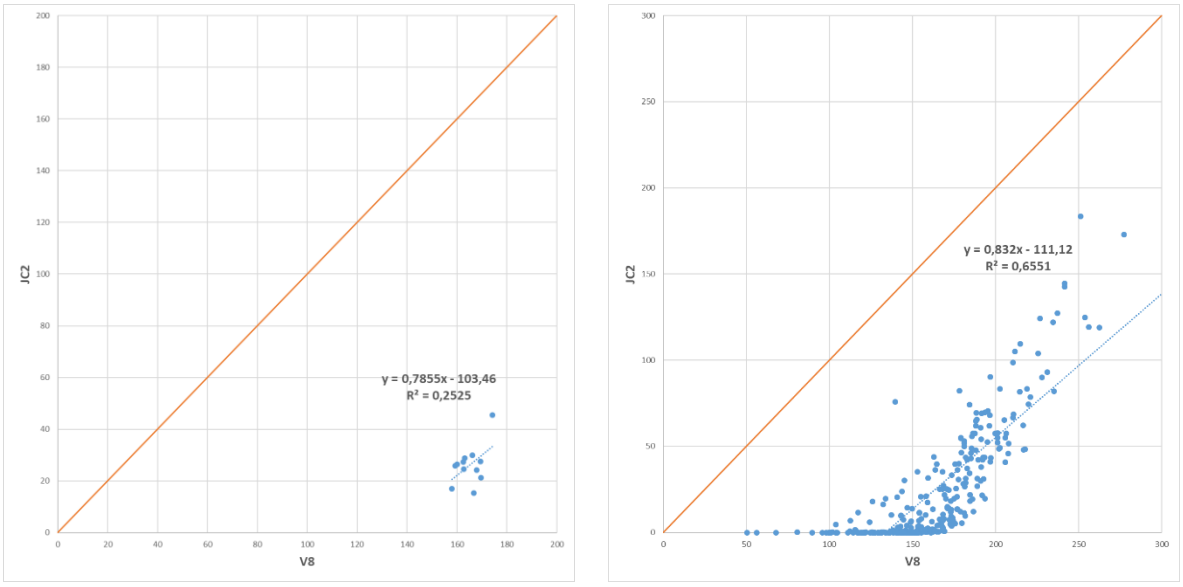


Figure 17 : NH_3 - Régression linéaire V8/JC2 - moyenne journalière (gauche) ; horaire (droite) - µg/m³

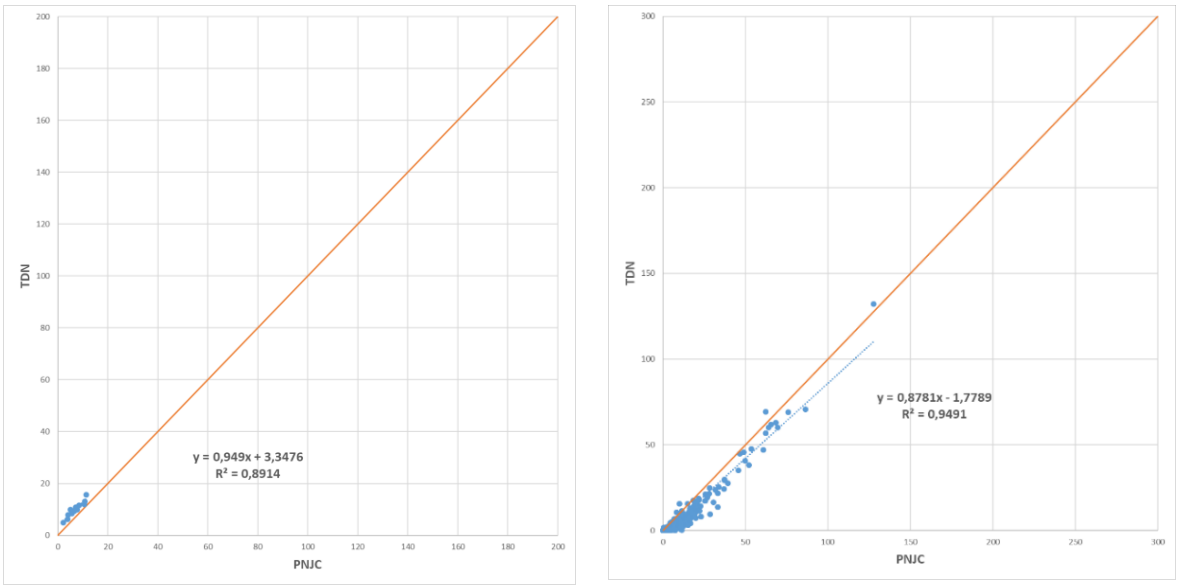


Figure 18 : NH_3 - Régression linéaire PNJC/TDN - moyenne journalière (gauche) ; horaire (droite) - µg/m³

Ozone (O_3) :

Le Tableau 14 ci-dessous présente les résultats de l'intercomparaison des capteurs pour la mesure d'ozone.

Tableau 14 : O_3 - intercomparaison des capteurs WT1 – du 28/09 au 09/10/2022 (µg/m³)

O_3												
Comparaison	**V8/TDN**		**V8/PNJC**		**V8/JC2**		**TDN/PNJC**		**TDN/JC2**		**PNJC/JC2**	
Données	**Journalières**	**Horaires**	**Journalières**	**Horaires**	**Journalières**	**Horaires**	**Journalières**	**Horaires**	**Journalières**	**Horaires**	**Journalières**	**Horaires**
R^2	0,03	0,44	0,17	0,16	0,46	0,66	0,52	0,7	0,02	0,43	0,05	0,24
p	0,05	0,3	-0,13	0,16	1,1	1,53	0,83	0,71	0,87	2,69	-1,11	2,38
Ordonnée à l'origine	39	-25	216	144	109	3	141	147	343	250	590	-48

Pour l'ozone, deux capteurs sont moyennement satisfaisants au regard des paramètres de corrélation (R^2 et p) : TDN/PNJC. La corrélation est meilleure sur un pas de temps horaire (R^2 = 0,7). Cependant, l'ordonnée à l'origine est largement décalée par rapport au 0. La concentration de fond sur la période de mesure était de 49 µg/m^3 à la station Rocabey (moyenne horaires).

La régression linéaire sur la Figure 19 ci-dessous montre la corrélation des mesures en moyenne horaire et journalière du capteur PNJC en fonction du capteur TDN.

On peut voir que les données horaires sont agglomérées en forme de nuage avec un décalage par rapport à la droite y=x (en orange). L'écart systématique du capteur PNJC pourrait être ajusté par un offset qui serait appliqué à l'ensemble du jeu de données pour décaler la droite de régression.

Concernant les données journalières, il n'y a pas eu suffisamment de variation de concentration sur la période de mesure. Le coefficient de détermination et la pente sont faibles alors qu'ils devraient être meilleurs que ceux obtenus en données horaires.

Même si une incertitude importante est associée à la reproductibilité des capteurs PNJC et TDN pour la mesure de l'ozone, l'évolution des niveaux semble cohérente.

Concernant la mesure de l'ozone, seuls les paramètres de corrélation (R^2 et p) des capteurs TDN et PNJC sont moyennement satisfaisants. Un offset pourrait être appliqué pour corriger le décalage par rapport au 0. Les données des capteurs JC2 et V8 ne peuvent être comparées à ces capteurs du fait d'une reproductibilité non satisfaisante.

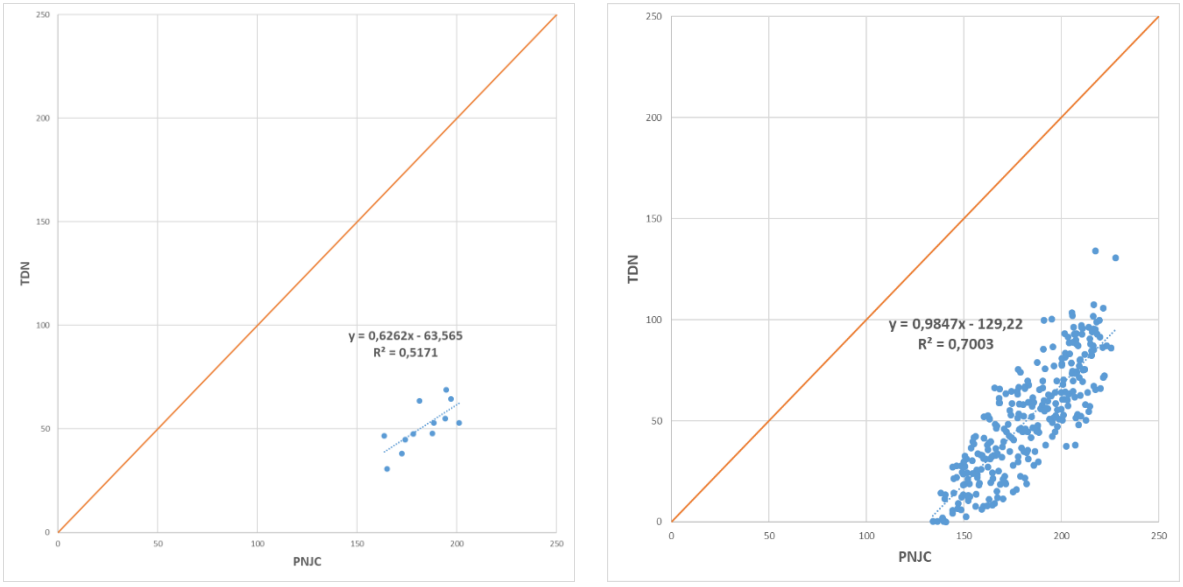


Figure 19 : O_3 - Régression linéaire PNJC/TDN - moyenne journalière (gauche) ; horaire (droite) - µg/m^3

Sulfure d'hydrogène (H_2S) :

Le Tableau 15 ci-dessous présente les résultats de l'intercomparaison des deux capteurs assurant la mesure de l'H_2S.

Tableau 15 : H_2S - intercomparaison des capteurs WT1 – du 28/09 au 09/10/2022 (µg/m³)

H_2S		
Comparaison	**JC2/V8**	
Données	**Journalières**	**Horaires**
R^2	0,63	0,78
p	0,85	0,89
Ordonnée à l'origine	-1	-1

Pour l'hydrogène sulfuré, la corrélation des deux capteurs en moyenne horaire est satisfaisante au regard des paramètres de corrélation (R^2 et p). Le décalage est faible car l'ordonnée à l'origine est proche de 0.

La régression linéaire sur la Figure 20 ci-dessous montre la corrélation des mesures en moyenne horaire et journalière du capteur JC2 en fonction du capteur V8.

Concernant les données journalières, il n'y a pas eu suffisamment de variation de concentration sur la période de mesure. Le coefficient de détermination est faible alors qu'il devrait être meilleur que celui obtenu en données horaires

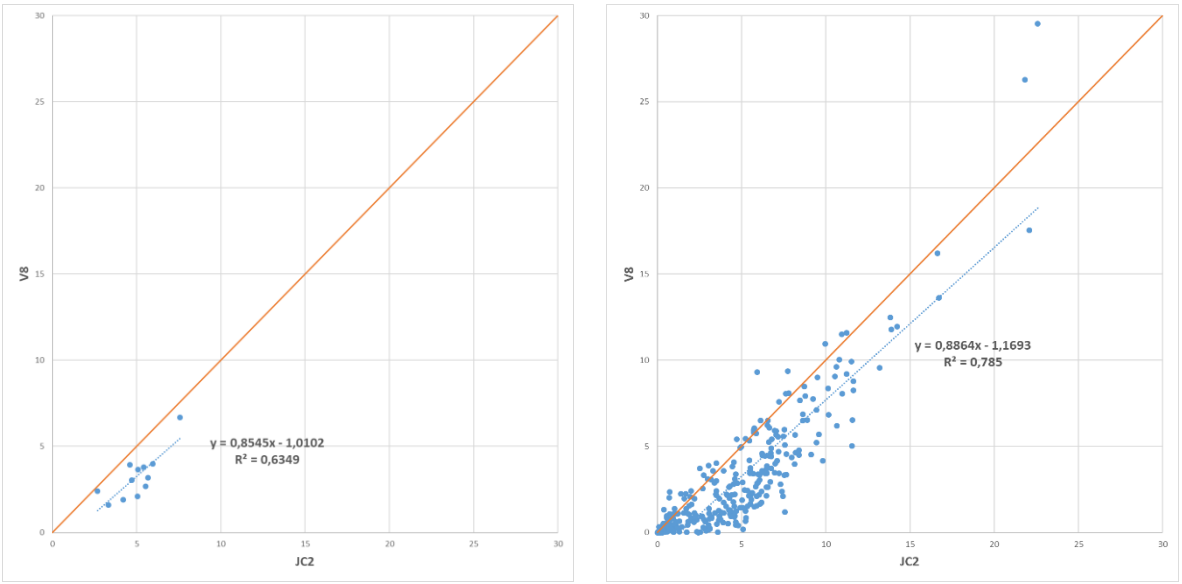


Figure 20 : H_2S - Régression linéaire JC2/V8 - moyenne journalière (gauche) ; horaire (droite) - µg/m³

Composés organiques volatiles (COV) :

Le Tableau 16 ci-dessous présente les résultats de l'intercomparaison des capteurs assurant la mesure des composés organiques volatils.

Tableau 16 : COV - intercomparaison des capteurs – du 28/09 au 09/10/2022 (µg/m³)

COV		
Comparaison	PNJC/TDN	
Données	**Journalières**	**Horaires**
R^2	0,68	0,70
p	0,06	0,07
Ordonnée à l'origine	-50	-95

Pour les COV, bien que le coefficient de détermination soit satisfaisant, la pente de la droite de corrélation n'est pas satisfaisante au regard des critères d'évaluation.

Les mesures des deux capteurs PNJC et TDN ne peuvent donc pas être comparées entres-elles.

Synthèse des résultats - reproductibilité

Compte tenu des précédents résultats des tests de reproductibilité, les capteurs ont été classés en fonction de l'exploitation de leurs jeux de données et de la qualité de la reproductibilité.

Exploitable en l'état, reproductibilité satisfaisante	S
Exploitable en l'état, reproductibilité moyenne	M
Décalage des capteurs, reproductibilité satisfaisante	Ds
Décalage des capteurs, reproductibilité moyenne	Dm
Non exploitable	N

Le Tableau 17 **ci-dessous montre que 3 polluants sont mesurés de manière reproductible et sans décalage par les 4 capteurs du réseau de mesure quel que soit le pas de temps considéré (horaire ou journalier) : les particules fines PM10 et PM2,5 et le monoxyde de carbone (CO). Les données de mesure de ces 4 appareils peuvent être comparées entre elles.**

Tableau 17 : Synthèse des résultats des tests de reproductibilité (PM10 ; PM2,5 et CO).

	PM10					PM2.5					CO				
		V8	TDN	JC2	PNJC		V8	TDN	JC2	PNJC		V8	TDN	JC2	PNJC
HORAIRE	V8					V8					V8				
	TDN	S				TDN	S				TDN	S			
	JC2	S	S			JC2	S	S			JC2	S	S		
	PNJC	S	S	S		PNJC	S	S	S		PNJC	S	S	S	
JOUR	V8					V8					V8				
	TDN	S				TDN	S				TDN	S			
	JC2	S	S			JC2	S	S			JC2	S	S		
	PNJC	S	S	S		PNJC	S	S	S		PNJC	S	S	S	

Pour le NO_2, les données des 4 capteurs sont comparables sur les deux pas de temps sous réserve d'une correction des niveaux de base des capteurs JC2 et PNJC.

Le Tableau 18 **ci-dessous synthétise les résultats obtenus lors des tests de reproductibilité.**

Tableau 18 : Synthèse des résultats des tests de reproductibilité (NO_2).

	NO2				
		V8	TDN	JC2	PNJC
HORAIRE	V8				
	TDN	S			
	JC2	Ds	Ds		
	PNJC	Ds	Ds	Ds	
JOUR	V8				
	TDN	S			
	JC2	Ds	Ds		
	PNJC	Ds	Ds	Ds	

Pour les autres paramètres testés, les résultats sont peu ou pas satisfaisants suivant les couples de capteurs considérés. Le *Tableau 19* ci-dessous synthétise les résultats obtenus lors des tests de reproductibilité pour l'ammoniac (NH_3), le dioxyde de souffre (SO_2) et l'ozone (O_3).

Pour le NH_3, seuls les capteurs TDN et PNJC sont reproductibles avec des données exploitables en l'état. Les données des deux autres capteurs ne sont pas corrélées à ces capteurs et ne peuvent donc pas être exploitées.

Concernant la mesure du SO_2, les données du capteur TDN ne peuvent pas être comparées à celles des trois autres capteurs. **Malgré une reproductibilité moyenne, les données des capteurs PNJC, JC2 et V8 peuvent être exploitées sous réserve d'une correction du niveau de base.** Ces résultats pourraient être liés à une limite de détection du capteur bien supérieure au niveau de fond rencontré pendant l'essai.

Pour la mesure de l'ozone (O_3), seule la corrélation des capteurs TDN et PNJC est moyennement satisfaisante sous-réserve d'une correction du niveau de base.

Tableau 19 : Synthèse des résultats des tests de reproductibilité (O_3 ; NH_3 et SO_2)

	O3					NH3					SO2				
		V8	TDN	JC2	PNJC		V8	TDN	JC2	PNJC		V8	TDN	JC2	PNJC
HORAIRE	V8					V8					V8				
	TDN	N				TDN	N				TDN	N			
	JC2	N	N			JC2	Dm	N			JC2	Dm	N		
	PNJC	N	Dm	N		PNJC	N	S	N		PNJC	M	N	Ds	
JOUR	V8					V8					V8				
	TDN	N				TDN	N				TDN	N			
	JC2	N	N			JC2	N	N			JC2	Ds	N		
	PNJC	N	Dm	N		PNJC	N	S	N		PNJC	M	N	Dm	

Pour la mesure du sulfure d'hydrogène (H_2S), la corrélation des capteurs V8 et JC2 en moyenne horaire est satisfaisante au regard des critères d'évaluation. Cependant il n'y a pas eu suffisamment de variation de concentration en moyenne journalière pour pouvoir conclure sur la corrélation des capteurs.

Les mesures des capteurs V8 et JC2 ne sont pas reproductibles pour la mesure des COV.

Tableau 20 : Synthèse des résultats des tests de reproductibilité (COV et H_2S)

	COV					H2S				
		V8	TDN	JC2	PNJC		V8	TDN	JC2	PNJC
HORAIRE	V8					V8				
	TDN					TDN				
	JC2	N				JC2	S			
	PNJC					PNJC				
JOUR	V8					V8				
	TDN					TDN				
	JC2	N				JC2	M			
	PNJC					PNJC				

Ces tests de reproductibilité mettent en avant des performances satisfaisantes pour 5 paramètres pour lesquels les données des capteurs peuvent être comparées entre elles. Cela concerne : les particules fines PM10 et PM2.5, le monoxyde de carbone, le dioxyde d'azote et l'hydrogène sulfuré.

Pour 3 autres paramètres, les résultats sont comparables pour quelques capteurs :

- Ammoniac : TDN et PNJC
- Dioxyde de soufre : PNJC, V8 et JC2 (après correction)
- O_3 : TDN et PNJC (après correction)

Les mesures de COV ne sont pas reproductibles. Les données des deux capteurs assurant cette mesure ne peuvent être comparées.

Limite de l'approche

La corrélation des mesures des capteurs a été présentée sous la forme de régressions linéaires. Cependant, cette approche implique d'avoir une gamme de mesure (terrain) suffisante pour pouvoir affiner les paramètres de la droite de corrélation. Ainsi, le faible nombre de données journalières n'a pas permis d'avoir de bons résultats de corrélation. D'après notre expérience sur les systèmes capteurs, la reproductibilité des capteurs est plus satisfaisante en moyenne journalière.

d) Comparaison à la méthode de référence (camion laboratoire)

Les données de chacun des capteurs ont été comparées à l'appareil de référence pour déterminer leur justesse. Les paramètres de la droite de corrélation ont été interprétés comme suit.

Cette comparaison ne porte pas sur l'ensemble des composés mesurés par les capteurs (non disponibilité de certains appareils de référence). Les paramètres suivants ont fait l'objet d'un test de justesse : particules fines (PM10 et PM2.5), dioxyde d'azote et dioxyde de soufre.

Pour rappel la période de contrôle métrologique s'est tenue du 27/09 au 10/10/2022. Les capteurs étaient positionnés sur le site V8. Pour s'affranchir des journées incomplètes, les moyennes journalières ont été exploitées du 28/09 au 09/10/2022. Les moyennes horaires ont été exploitées sur la même période, du 28/09 – 00:00 au 09/10/2022 - 23:00, pour pouvoir être comparables aux moyennes journalières.

Sur cette période de mesure, les analyseurs de référence ne fonctionnaient pas du 01/10 au 03/10/2022 en raison d'une coupure de courant.

Particules PM10 :

Le Tableau 21 ci-dessous présente les résultats de la comparaison des capteurs avec l'analyseur pour la mesure des PM10.

Tableau 21 : PM10 – comparaison capteurs WT1/analyseur – du 28/09 au 09/10/2022 (µg/m³)

PM10								
Comparaison	V8/analyseur		TDN/analyseur		PNJC/analyseur		JC2/analyseur	
Données	Journalières	Horaires	Journalières	Horaires	Journalières	Horaires	Journalières	Horaires
R^2	0,77	0,30	0,80	0,35	0,79	0,32	0,77	0,33
a	0,94	0,47	0,78	0,42	0,77	0,39	0,75	0,4
b	0	4	0	4	-1	3	0	3

Pour les PM10, toutes les comparaisons en moyennes journalières capteur/analyseur sont satisfaisantes selon les trois paramètres de corrélation : R^2, p et ordonnée à l'origine.

Sur le pas de temps horaire, les corrélations sont mauvaises comme le montre les coefficients de détermination (0,3).

Concernant la mesure des PM10, la corrélation des capteurs avec l'analyseur est satisfaisante sur un pas de temps journalier. Ci-dessous, un exemple de régression linéaire :

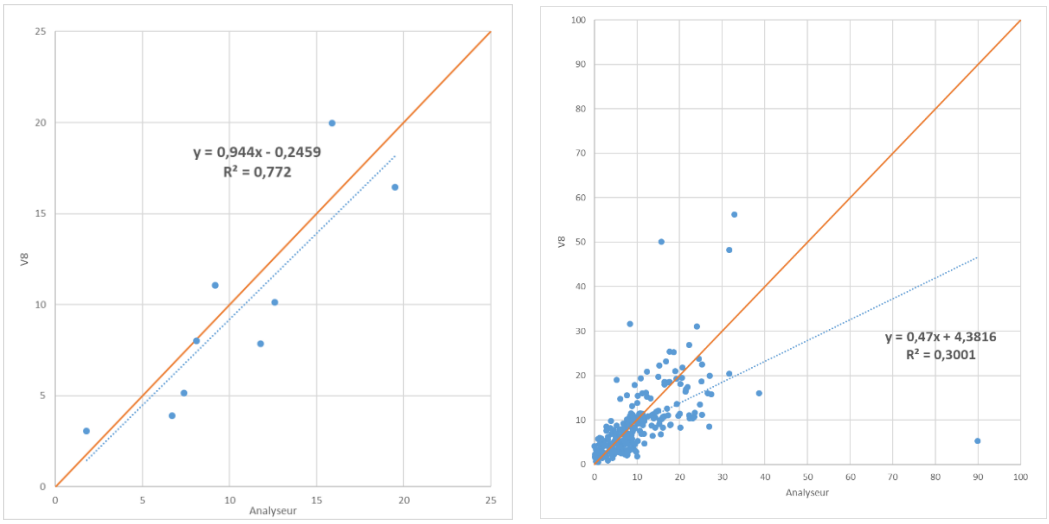


Figure 21 : PM10- Régression linéaire V8/analyseur - moyenne journalière (gauche) ; horaire (droite) - µg/m³

Particules PM2,5 :

Le Tableau 22 ci-dessous présente les résultats de la comparaison des capteurs avec l'analyseur pour la mesure des PM2,5.

Tableau 22 : PM2,5 – comparaison capteurs WT1/analyseur – du 28/09 au 09/10/2022 (µg/m³)

PM2,5								
Comparaison	V8/analyseur		TDN/analyseur		PNJC/analyseur		JC2/analyseur	
Données	Journalières	Horaires	Journalières	Horaires	Journalières	Horaires	Journalières	Horaires
R^2	0,47	0,12	0,48	0,13	0,46	0,12	0,47	0,11
a	2,77	0,58	2,57	0,56	2,63	0,56	2,47	0,5
b	-1	4	-1	4	-1	3	-1	3

Pour la mesure des PM2,5, les capteurs ne sont pas corrélés avec l'analyseur de référence. En effet, les coefficients de détermination ne dépassent pas 0,5.

Ces résultats ne sont pas en phase avec ceux du challenge Air lab 2021 qui étaient très bons pour les particules PM2,5 (score : 9/10). En 2019, les résultats du challenge Air lab n'étaient pas satisfaisants.

Les graphiques ci-dessous montre un exemple de régression linéaire :

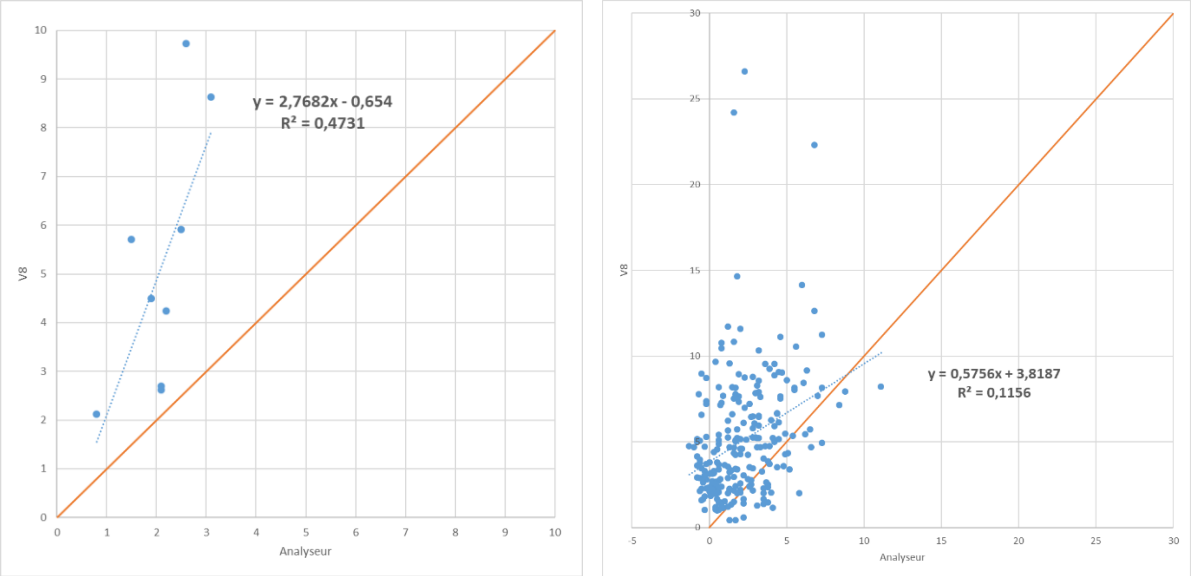


Figure 22 : PM2,5 - Régression linéaire V8/analyseur - moyenne journalière (gauche) ; horaire (droite) - µg/m³

Dioxyde d'azote (NO_2) :

Le Tableau 23 ci-dessous présente les résultats de la comparaison des capteurs avec l'analyseur pour la mesure du NO_2.

Tableau 23 : NO_2 – comparaison capteurs WT1/analyseur – du 28/09 au 09/10/2022 (µg/m³)

NO_2								
Comparaison	**V8/analyseur**		**TDN/analyseur**		**PNJC/analyseur**		**JC2/analyseur**	
Données	**Journalières**	**Horaires**	**Journalières**	**Horaires**	**Journalières**	**Horaires**	**Journalières**	**Horaires**
R^2	0,68	0,65	0,59	0,64	0,65	0,65	0,47	0,58
a	0,93	1,02	0,95	1,09	0,94	1	0,76	0,9
b	14	13	15	14	48	48	26	25

Excepté le R^2 en moyenne journalière pour la comparaison JC2/analyseur, les coefficients de détermination sont tous supérieurs à 0,5 ; ils sont donc considérés comme moyennement satisfaisants. Les valeurs des pentes sont satisfaisantes selon les critères d'évaluation.

Cependant, les ordonnées à l'origine présentent toutes un écart par rapport au 0. Les écarts vont de 13 à 48 µg/m³ alors que la concentration de fond sur la période de mesure était autour de 8 µg/m³ (moyenne horaire du camion laboratoire sur la période).

Cet écart systématique pourrait être ajusté par un offset qui serait appliqué à l'ensemble du jeu de données, pour décaler la droite de corrélation.

Les graphiques ci-dessous montrent les régressions linéaires entre les mesures des capteurs et l'analyseur.

Sur les graphiques en moyennes horaires, on peut voir que les 4 capteurs sont moins bien corrélés avec l'analyseur dans les niveaux faibles, probablement en raison de leur limite de détection assez haute (LD = 56,4 µg/m³).

Sur les graphiques en moyennes journalières, on peut voir que les points sont proches de la droite de corrélation mais la gamme de mesure (terrain) et le nombre de données (9) ne sont pas jugés suffisants pour obtenir une corrélation satisfaisante. **En considération de cette analyse, la corrélation du capteur JC2 avec l'analyseur est considéré au même niveau que les autres, étant donné sa proximité avec la catégorie B.**

Concernant la mesure du NO_2, la corrélation des capteurs V8, TDN, PNJC et JC2 avec l'analyseur est moyennement satisfaisante au regard des critères d'évaluation.

En moyenne journalière, il semble que la faible gamme de mesure et le faible nombre de données aient faussé l'interprétation de la corrélation capteurs/analyseur.

Pour les données horaires, la corrélation des capteurs avec l'analyseur est moins bonne dans les niveaux faibles, en lien avec l'incertitude de mesure en dessous de la limite de détection (LD capteur : 56,4 µg/m³).

L'ordonnée à l'origine des droites de corrélation est décalée par rapport au 0. L'application d'un offset pourrait corriger le décalage de la droite de corrélation.

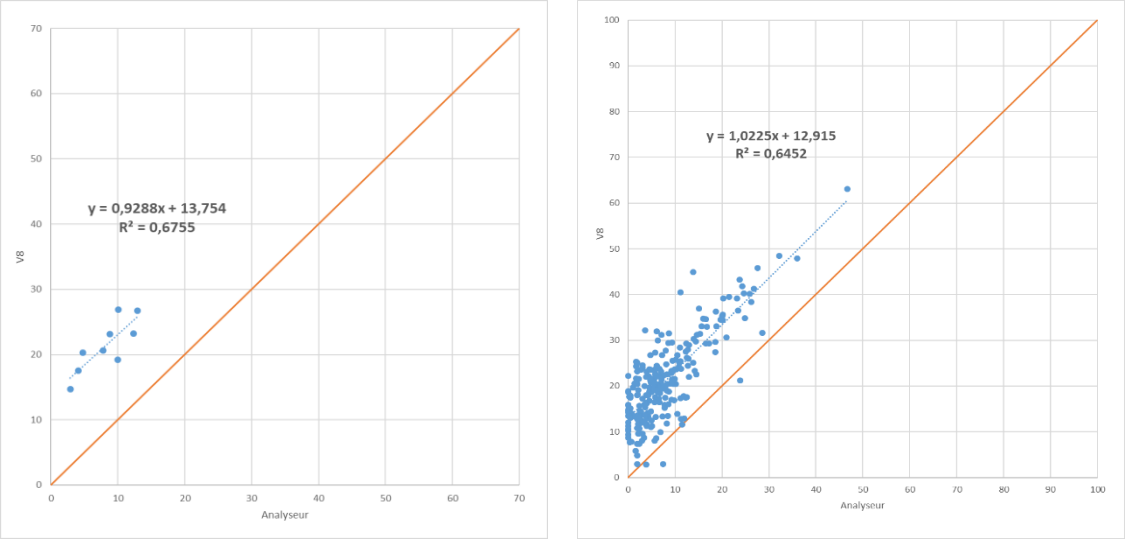


Figure 23 : NO_2 - Régression linéaire V8/analyseur - moyenne journalière (gauche) ; horaire (droite) - µg/m³

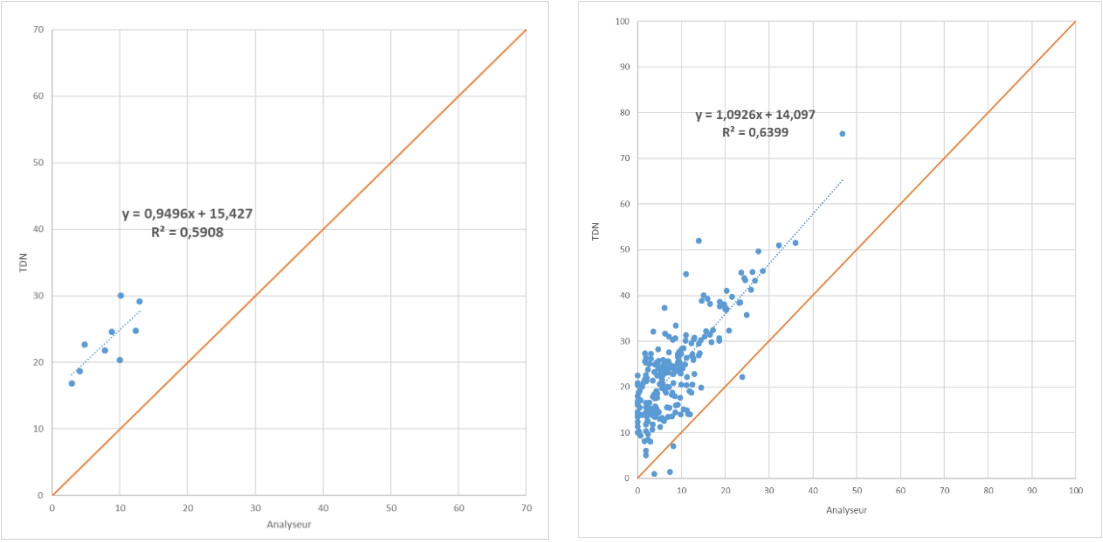


Figure 24 : NO_2 - Régression linéaire TDN/analyseur - moyenne journalière (gauche) ; horaire (droite) - µg/m³

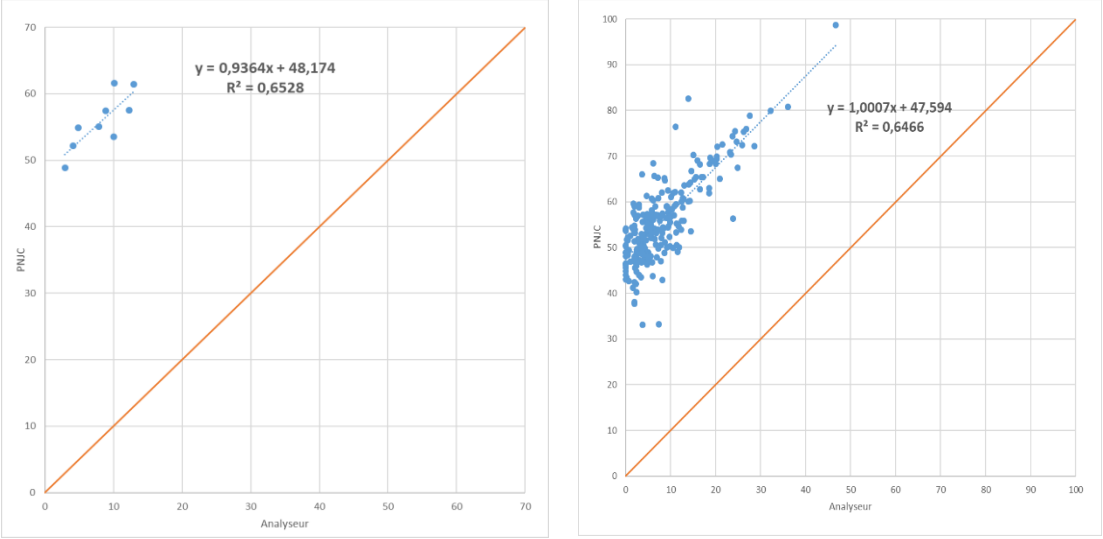


Figure 25 : NO_2 - Régression linéaire PNJC/analyseur - moyenne journalière (gauche) ; horaire (droite) - µg/m³

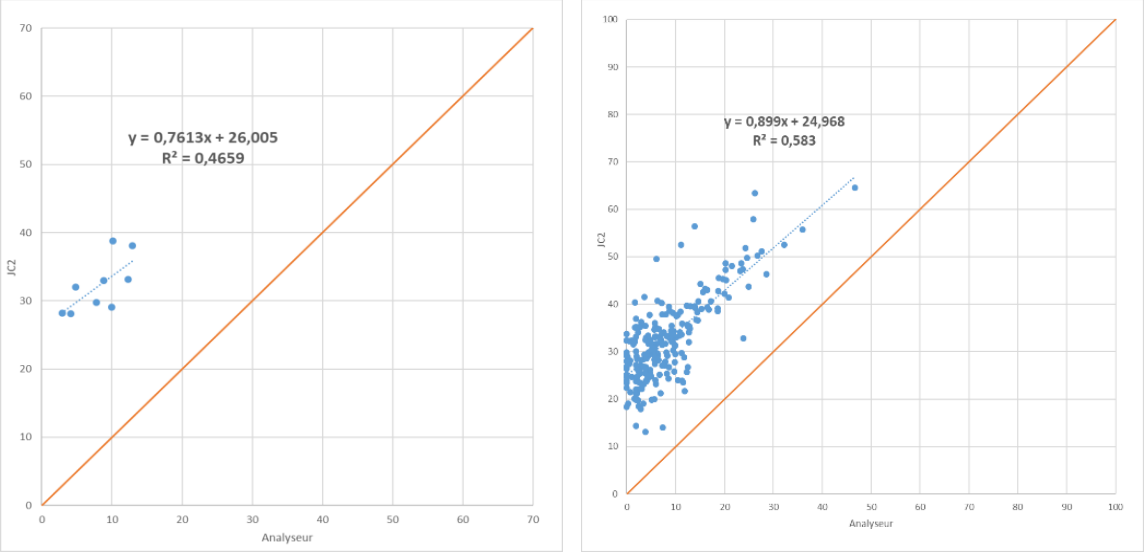


Figure 26 : NO_2 - Régression linéaire JC2/analyseur - moyenne journalière (gauche) ; horaire (droite) - µg/m³

Dioxyde de soufre (SO_2) :

Le Tableau 24 ci-dessous présente les résultats de la comparaison des capteurs avec l'analyseur pour la mesure du SO_2.

Tableau 24 : SO_2 – comparaison capteurs WT1/analyseur – du 28/09 au 09/10/2022 (µg/m³)

SO_2								
Comparaison	**V8/analyseur**		**TDN/analyseur**		**PNJC/analyseur**		**JC2/analyseur**	
Données	**journalières**	**horaires**	**journalières**	**horaires**	**journalières**	**horaires**	**journalières**	**horaires**
R^2	0,17	0,03	0,53	0,26	0,23	0,03	0,34	0,03
a	5,16	3,75	11,7	14,95	4,8	3,19	8,42	3,82
b	9	11	6	5	6	7	23	27

Pour la mesure du SO_2, **les capteurs ne sont pas corrélés avec l'analyseur de référence**. En effet, les coefficients de détermination ne dépassent pas 0,5.

Un exemple de graphique de régression linéaire est présenté ci-dessous.

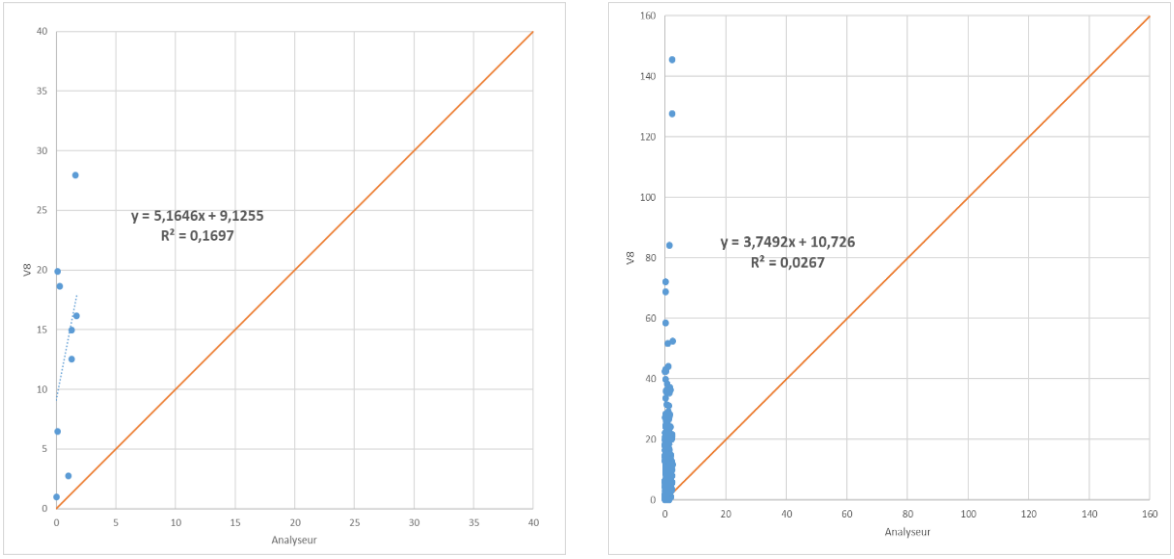


Figure 27 : SO_2 - Régression linéaire V8/analyseur - moyenne journalière (gauche) ; horaire (droite) - µg/m³

On peut voir que le capteur V8 n'est pas dans la même gamme de mesure que l'analyseur, la corrélation n'est pas satisfaisante.

Synthèse des résultats des tests de justesse – comparaison avec le camion laboratoire

Compte tenu des précédents résultats des tests de comparaison avec les méthodes de référence, les capteurs ont été classés en fonction de l'exploitation de leurs jeux de données et de la qualité de la comparaison.

Exploitable en l'état, comparaison satisfaisante	S
Exploitable en l'état, comparaison moyenne	M
Décalage par rapport à la référence, comparaison satisfaisante	Ds
Décalage par rapport à la référence, comparaison moyenne	Dm
Non exploitable	N

Le Tableau 25 ci-dessous présente la synthèse des résultats des tests de reproductibilité des capteurs WT1.

Tableau 25 : Synthèse des résultats de la comparaison capteurs WT1/analyseurs.

Comparaison	V8		TDN		PNJC		JC2	
Données	**Journalières**	**Horaires**	**Journalières**	**Horaires**	**Journalières**	**Horaires**	**Journalières**	**Horaires**
PM10	S	N	S	N	S	N	S	N
PM2,5	N	N	N	N	N	N	N	N
NO_2	Dm	Dm	Dm	Dm	Dm	Dm	Dm*	Dm
SO_2	N	N	N	N	N	N	N	N

** Critère arrondi au supérieur*

Au vu des résultats de la corrélation des capteurs avec les analyseurs de référence, seule la mesure des PM10, sur un pas de temps journalier, apparait satisfaisante.

Les 4 capteurs obtiennent des résultats moyennement satisfaisants pour la mesure du NO_2, en moyennes journalières et horaires. Un décalage par rapport à l'analyseur est présent pour tous les capteurs. Un offset pourrait être appliqué aux capteurs pour corriger ce décalage.

Les résultats des mesures en PM2,5 ne sont pas corrélés avec les mesures de l'analyseur de référence, bien que les mesures soient dans le même ordre de grandeur.

Les résultats des mesures de SO_2 ne sont pas cohérents avec les mesures de l'analyseur de référence.

Limite de l'approche

La corrélation des mesures a été présentée sous la forme de régressions linéaires. Cependant, cette approche implique d'avoir une gamme de mesure (terrain) suffisante pour pouvoir affiner les paramètres de la droite de corrélation. Ainsi, le faible nombre de données journalières n'a pas permis d'avoir de bons résultats de corrélation. D'après notre expérience sur les systèmes capteurs, la reproductibilité des capteurs est plus satisfaisante en moyenne journalière.

e) Synthèse des résultats des tests de contrôle métrologique

En fonction des résultats de ces deux tests métrologiques, les capteurs peuvent être classés selon 3 catégories présentées précédemment.

Cas 3 : La reproductibilité et la comparaison à la référence (justesse) sont satisfaisantes ou moyennement satisfaisantes ; **les capteurs peuvent être comparés entre eux et à la station de référence (Rocabey)**.

- **Particules PM10 :**

Le Tableau 26 présente les résultats des tests de contrôle métrologique pour les PM10.

Les mesures **journalières** en PM10 sont reproductibles et comparables à la référence. Les données peuvent être exploitées en l'état. Cependant, les données horaires ne sont pas exploitables.

➔ **Les mesures journalières peuvent être comparées à celles de la station Rocabey.**

Tableau 26 : PM10 - Résultats des tests de contrôle métrologique

PM10								
Données	Horaires				Journalières			
Capteurs	V8	TDN	PNJC	JC2	V8	TDN	PNJC	JC2
Cas 1								
Cas 2	X	X	X	X				
Cas 3					X	X	X	X

- **Dioxyde d'azote NO_2** :

Le Tableau 27 présente les résultats des tests de contrôle métrologique pour le NO_2.

Les mesures **horaires et journalières** en NO_2 sont reproductibles et comparables à la référence. Cependant, **une erreur systématique est présente** (décalage par rapport au 0). **Un offset** pourrait être appliqué pour corriger cet écart.

➔ **Les mesures horaires et journalières peuvent être comparées à la station Rocabey après correction du niveau de base.**

Tableau 27 : NO_2 - Résultats des tests de contrôle métrologique

NO_2								
Données	Horaires				Journalières			
Capteurs	V8	TDN	PNJC	JC2	V8	TDN	PNJC	JC2
Cas 1								
Cas 2								
Cas 3	X*	X*	X*	X*	X*	X*	X*	X*

**Erreur systématique*

Cas 2 : La reproductibilité est satisfaisante ou moyennement satisfaisante ; **la comparaison des niveaux est possible entre les capteurs mais des artéfacts sont possibles**.

➔ **Les polluants ci-dessous ont été comparés à l'analyseur de référence :**

- **Particules PM2,5 :**

Le Tableau 28 présente les résultats des tests de contrôle métrologique pour les PM2,5.

Les mesures en PM2,5 sont reproductibles entre les capteurs. Cependant, les mesures ne sont pas comparables à la référence. Des risques d'artéfacts sont possibles comme par exemple des perturbations liées à l'humidité.

Tableau 28 : PM2,5 - Résultats des tests de contrôle métrologique

PM2,5								
Données	Horaires				Journalières			
Capteurs	V8	TDN	PNJC	JC2	V8	TDN	PNJC	JC2
Cas 1								
Cas 2	X	X	X	X	X	X	X	X
Cas 3								

- **Dioxyde de soufre (SO_2) :**

Le Tableau 29 présente les résultats des tests de contrôle métrologique pour le SO_2.

Les mesures en SO_2 sont reproductibles **entre 3 capteurs (V8, PNJC et JC2).** Cependant, les mesures du capteur TDN ne sont pas exploitables.

Les mesures ne sont pas comparables à la référence. Des risques d'artéfacts sont possibles comme par exemple des perturbations liées à d'autres composés soufrés.

Tableau 29 : SO_2 - Résultats des tests de contrôle métrologique

SO_2								
Données	Horaires				Journalières			
Capteurs	V8	TDN	PNJC	JC2	V8	TDN	PNJC	JC2
Cas 1		X				X		
Cas 2	X*		X*	X*	X*		X*	X*
Cas 3								

**Erreur systématique*

➔ **Les polluants suivants n'ont pas été comparés à l'analyseur de référence :**

- **Monoxyde de carbone (CO) :**

Le Tableau 30 présente les résultats des tests de contrôle métrologique pour le CO.

Les mesures en CO sont reproductibles entre les capteurs. Les mesures n'ont pas été comparées à la référence.

Tableau 30 : CO - Résultats des tests de contrôle métrologique

CO								
Données	Horaires				Journalières			
Capteurs	V8	TDN	PNJC	JC2	V8	TDN	PNJC	JC2
Cas 1								
Cas 2	X	X	X	X	X	X	X	X
Cas 3								

- **Hydrogène sulfuré (H_2S) :**

Le Tableau 31 présente les résultats des tests de contrôle métrologique pour l'H_2S.

Les mesures en H_2S sont reproductibles entre les capteurs (**2 capteurs testés**). Les mesures n'ont pas été comparées à la référence.

Tableau 31 : H_2S - Résultats des tests de contrôle métrologique

H_2S				
Données	Horaires		Journalières	
Capteurs	V8	JC2	V8	JC2
Cas 1				
Cas 2	X	X	X	X
Cas 3				

Les mesures de CO et d'H_2S pourraient intégrer le cas 3 sous réserve d'un test de justesse satisfaisant avec un équipement de référence.

Cas 1 : Les deux tests ne sont pas satisfaisants ; **l'utilisation des capteurs est déconseillée pour la surveillance de la qualité de l'air du port**.

- **Composés Organiques Volatiles (COV) :**

Le Tableau 32 présente les résultats des tests de contrôle métrologique pour les COV.

Tableau 32 : COV - Résultats des tests de contrôle métrologique

COV				
Données	Horaires		Journalières	
Capteurs	TDN	PNJC	TDN	PNJC
Cas 1	X	X	X	X
Cas 2				
Cas 3				

Hors classe : pour certains paramètres, en raison d'une situation hétérogène en fonction des capteurs, le classement selon les trois catégories n'a pas pu être effectué.

➔ **Les polluants suivants n'ont pas été comparés à l'analyseur de référence :**

- **Ammoniac (NH_3) :**

Le Tableau 33 présente les résultats des tests de contrôle métrologique pour le NH_3.

Les mesures en NH_3 sont reproductibles entre les capteurs TDN et PNJC. Les mesures n'ont pas été comparées à la référence

Tableau 33 : NH_3 - Résultats des tests de contrôle métrologique

NH_3								
Données	Horaires				Journalières			
Capteurs	V8	TDN	PNJC	JC2	V8	TDN	PNJC	JC2
Cas 1	X			X	X			X
Cas 2		X	X			X	X	
Cas 3								

- **Ozone (O_3)** :

Le Tableau 34 présente les résultats des tests de contrôle métrologique pour l'O_3.

Tableau 34 : O_3 - Résultats des tests de contrôle métrologique

O_3								
Données	Horaires				Journalières			
Capteurs	V8	TDN	PNJC	JC2	V8	TDN	PNJC	JC2
Cas 1	X			X	X			X
Cas 2		X*	X*			X*	X*	
Cas 3								

**Erreur systématique*

Les résultats des tests métrologiques ne sont pas homogènes entre les capteurs. Ces résultats peuvent être liés aux capteurs ou à la technologie utilisée.

En synthèse, au regard des tests réalisés, la comparaison des données des capteurs du port avec les données de la station réglementaire Rocabey est possible, à titre indicatif, pour les paramètres suivants :

- **PM10 : uniquement pour les données Journalières (données horaires non exploitables) ;**
- **NO_2 : après correction de la ligne de base (données horaires et journalières).**

Ces résultats sont valables sur la base des tests réalisés lors de la campagne de mesure et dans les niveaux de concentrations rencontrés.

Pour ces paramètres, une analyse des données collectées durant les premiers mois de fonctionnement des capteurs (de janvier à juin 2022) est réalisé dans le chapitre suivant.

PARTIE 3 : ANALYSE DES MESURES DES PREMIERS MOIS DE FONCTIONNEMENT DU DISPOSITIF

Dans cette partie, les données des capteurs pour les paramètres ayant eu de bons résultats aux tests métrologiques (cas 3) ont été analysés pendant les premiers mois de fonctionnement et comparées à la station de référence Rocabey. Les données journalières ont été utilisées.

Particules PM10 :

Le Tableau 35 ci-dessous présente la moyenne et la médiane des capteurs et de la station Rocabey pour la mesure des PM10 entre le 01/01 et le 01/07/2022.

Tableau 35 : Synthèse statistiques des concentrations du 01/01 au 01/07/2022 (µg/m³)

	V8	PNJC	JC2	TDN	**Rocabey**
Moyenne	18	12	16	14	**26**
Médiane	14	10	13	11	**23**

La Figure 28 ci-dessous présente l'évolution journalière des concentrations en PM10 mesurées par les capteurs et par la station Rocabey (en rouge).

On peut voir que les profils sont assez proches entre les capteurs, malgré un décalage lors des pics de concentration. Les niveaux mesurés par le capteur V8 sont généralement plus forts lors des pics de concentration. Le capteur PNJC semble avoir les niveaux les plus faibles par rapport aux autres capteurs.

Deux pics isolés (flèches noir) ont été mesurés par les capteurs PNJC et JC2. Ces pics ont pu être provoqués par une pollution locale sur les sites de mesure.

La moyenne et la médiane des concentrations mesurées à Rocabey sont bien supérieures à celles mesurées sur le port par les capteurs. Sur le graphique, on peut voir que la ligne de base de la courbe rouge (station Rocabey) est plus élevée par rapport à la ligne de base des autres courbes (capteurs). Les niveaux de fond mesurés sur le port semblent plus faibles par rapport à ceux mesurés par la station Rocabey.

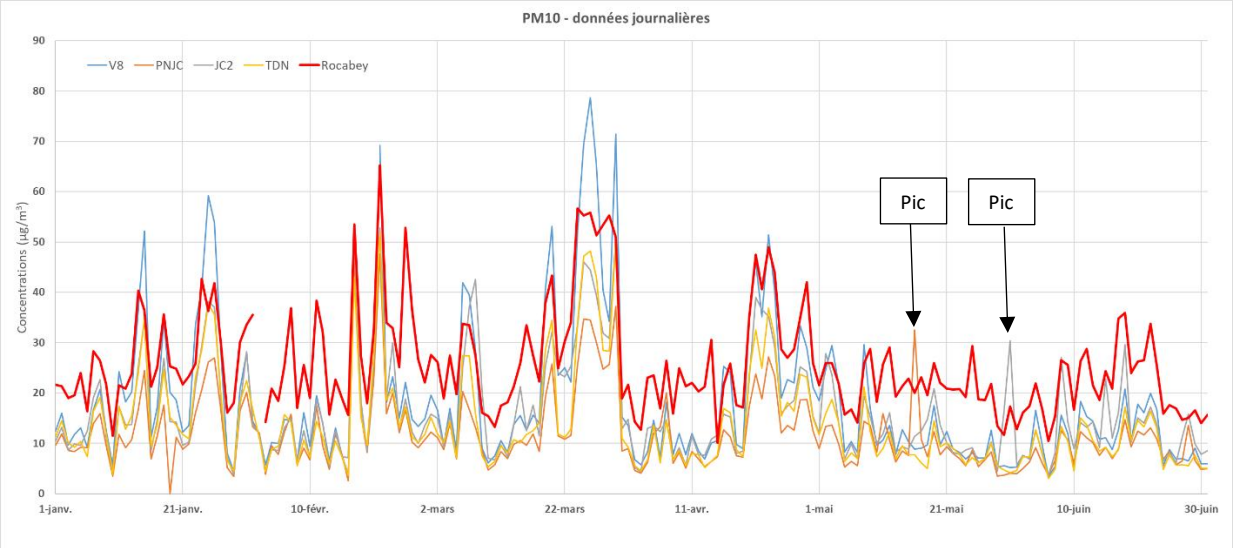


Figure 28 : PM10 – évolution journalière, du 01/01 au 01/07/2022

Dioxyde d'azote (NO_2) :

Pour étudier les profils des capteurs sur la même ligne de base, une correction des jeux de données a été réalisée (offset). Pour cela, la valeur de l'ordonnée à l'origine obtenue par la comparaison des capteurs avec l'analyseur de référence a été utilisée.

- Capteur V8 : - 14 µg/m³
- Capteur PNJC : - 48 µg/m³
- Capteur JC2 : - 26 µg/m³
- Capteur TDN : - 15 µg/m³

Le Tableau 36 ci-dessous présente la moyenne et la médiane des capteurs (après application des offset) et de la station Rocabey pour la mesure du NO_2 entre le 10/02 et le 01/07/2022. Les données entre le 01/01 et le 09/02/2022 n'ont pas pu être exploitées.

Tableau 36 : Synthèse statistiques des concentrations du 10/02 au 01/07/2022 (µg/m³)

	V8	PNJC	JC2	TDN	**Rocabey**
Moyenne	7	8	7	9	**9**
Médiane	6	7	6	8	**8**

La moyenne et la médiane des concentrations mesurées à Rocabey sont très proches de celles mesurées sur le port par les capteurs.

Le graphique ci-dessous présente l'évolution journalière des concentrations en PM10 mesurées par les capteurs entre le 10/02 et le 01/07/2022.

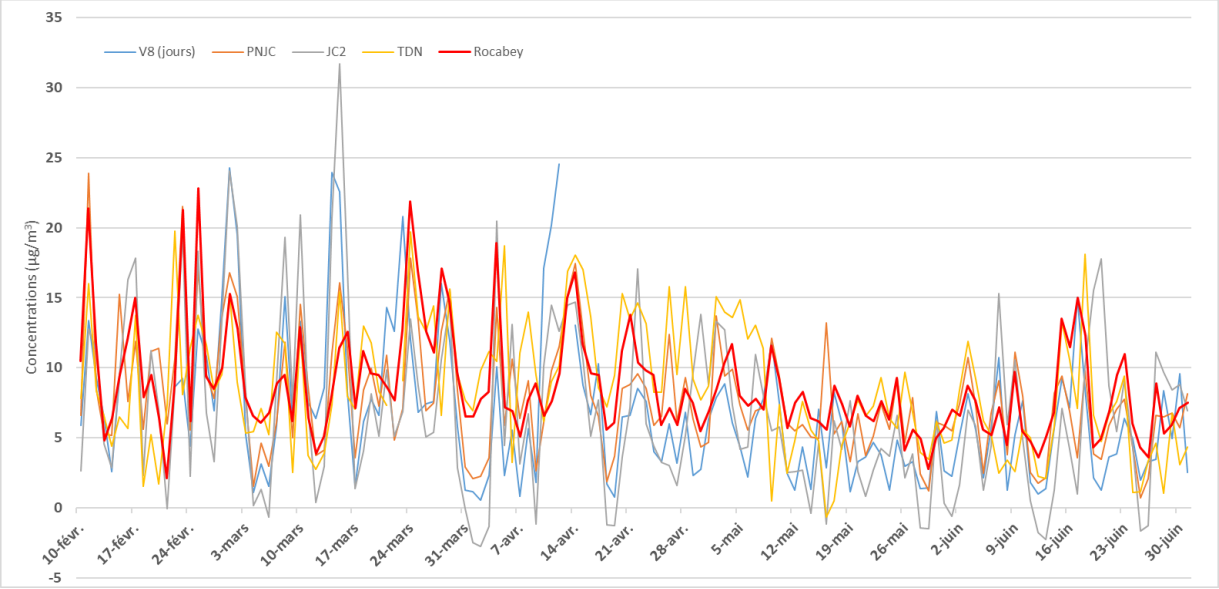


Figure 29 : NO_2 – évolution journalière, du 10/02 au 01/07/2022

On peut voir que certains pics de concentration sont identifiés par tous les capteurs mais les courbes n'ont pas vraiment de cohérence entre elles dans les valeurs faibles. Le NO_2 est un polluant qui réagit très vite, les niveaux mesurés peuvent être très différents en fonction des sites de mesure.

Les concentrations mesurées sur la période de mesure sont inférieures à la limite de détection des appareils (56,4 µg/m³), ce qui confère une incertitude plus importante sur les mesures.

PARTIE 4 : COMPARAISON DES MESURES DU PORT (CAMION LABORATOIRE) A LA STATION DE REFERENCE ROCABEY

Dans cette partie, les données de mesure du camion laboratoire installé sur le point V8 au port entre le 28/09 et le 23/10 sont comparées à celles de la station périurbaine de fond « Rocabey ».

La mise en place d'équipements de référence dans la zone portuaire dans le cadre de cette étude constitue une opportunité afin d'enrichir les connaissances sur les variations spatiales des concentrations à St Malo. Pour cette raison, une comparaison des niveaux enregistrés au port avec ceux de la station réglementaire Rocabey a été réalisée en complément dans le présent chapitre.

a) Conditions d'exposition des sites de mesure pendant la campagne

La Figure *30* de la page suivante présente l'emplacement du site de mesure sur le port de Saint Malo (point V8) et la position de la station Rocabey.

Pour connaître l'exposition de ces deux sites de mesure, les conditions de vents sont étudiées.

Les conditions de vitesse et de direction des vents sont souvent représentées par une rose des vents. Cette représentation permet de visualiser sur une période donnée :

- Le pourcentage de vent pour chaque direction : plus la pale est de grande taille, plus les vents venant de cette direction ont été nombreux pendant la période ;
- Les vitesses des vents venant de chaque direction et leur occurrence : la couleur de chaque pale indique la classe de vitesse et la taille indique le pourcentage de vent avec cette vitesse.

Ainsi, plus la pale sera grande, plus les vents en provenance de cette direction seront fréquents (direction majoritaire) et au sein de cette pale, plus les couleurs bleues seront foncées (ou orange pour la normale des vents), plus les vents seront forts.

La Figure *31* présente la rose des vents issue de la station météo France de Dinard pendant la période de mesure (du 28/09 au 23/10/2022) et les roses de vents dans les conditions normales mensuelles (octobre) et annuelles (calculées sur la période 1991-2020).

La période de mesure a été dominée par des vents de Sud/Sud-Ouest (figure 31).

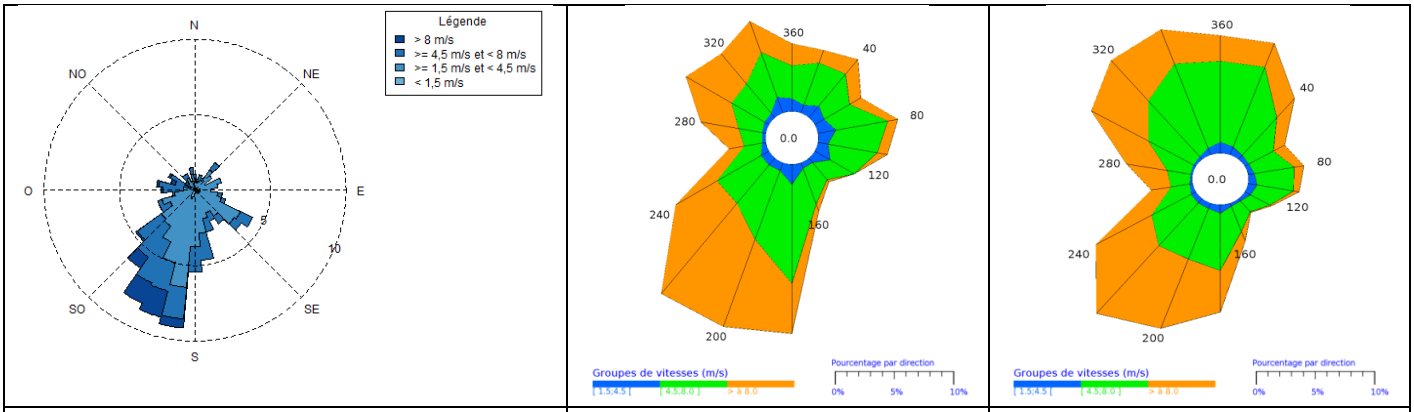
Dans ces conditions, le site du port était majoritairement sous l'influence du terminal du NAYE (cf. Figure 30). Cette influence est aussi présente dans les conditions normales du mois d'octobre et pendant l'année. **Cette direction de vent n'est que très peu favorable à l'exposition du site V8 aux émissions provenant du port**.

Les vents provenant du secteur Nord sont généralement plus présents comme on peut le voir sur les normales de rose de vent. Dans ces conditions normales, le site V8 est davantage exposé aux vents provenant du port et de la mer.

Lors de la campagne, la station Rocabey a été le plus souvent sous l'influence du port et des quartiers résidentiels par vent de Sud-Ouest.

Pendant la campagne de mesure, les conditions de vent n'étaient pas favorables à l'exposition du camion laboratoire aux émissions du port contrairement à la station Rocabey.

Figure 30 : Emplacement des points de mesure sur la zone d'étude et par rapport à la station Rocabey



Rose des vents, du 28/09 au 23/10/2022, station Dinard	Normales de rose de vents du mois d'octobre, entre 1991 et 2020, station Dinard	Normales de rose de vents entre 1991 et 2020, station Dinard

Figure 31 : Roses des vents à la station Dinard.

Particules PM10 :

Les graphiques de la page suivante présentent les évolutions horaires et journalières des niveaux de PM10 entre le 28/09 et le 23/10/2022. L'analyseur du camion laboratoire a subi 3 coupures de courant pendant la période de mesure : du 01/10 au 03/10 ; du 11/10 au 12/10 et du 18/10 au 20/10/2022. Le taux de couverture des données du camion laboratoire sur la période de mesure est de 79 % en données horaires et 69% en données journalières.

Le Tableau 37 ci-dessous présente une synthèse statistique des résultats.

Tableau 37 : PM10 - Synthèse statistiques du 28/09 au 23/10/2022

	Rocabey (station périUF)		**Port – pt V8 (camion laboratoire)**	
	Journalières	Horaires	Journalières	Horaires
1er quartile	8,5	10,2	6,3	4,9
Médiane	14,9	13,3	8,6	8,8
Moyenne	16,8	16,8	8,8	10,3
3ème quartile	21,6	21,5	12,4	13,9
Max	35,6	148	20,9	89,9

Sur la période de mesure, les moyennes horaires et journalières les plus élevées ont été mesurées à la station Rocabey (16,8 µg/m^3). Sur la Figure 32, de nombreux pics de concentration sont présents à la station Rocabey, influençant la moyenne sur la période de mesure.

La médiane et le premier quartile des jeux de données (horaires et journaliers) sont plus forts à la station Rocabey en comparaison avec le camion laboratoire. Ces différences montrent que la concentration de fond est plus élevée à la station Rocabey.

Les niveaux les plus forts ont été mesurés à la station Rocabey. Le max atteint 148 µg/m^3 sous les vents faible provenant du Sud-Est, le 11/10/2022 à 22:00 (TU) en moyenne horaire et 35,6 µg/m^3 le même jour (moyenne journalière). Ce jour, l'analyseur du camion laboratoire était arrêté en raison d'un souci d'alimentation électrique.

Un pic de concentration en moyenne horaire de 90 µg/m^3 a été enregistré le 28/09/2022 à 05 :00 (TU) au niveau du port par le camion laboratoire lorsque les vents provenaient du Nord (vitesse de vents : 3,9 m/s). L'analyseur de la station Rocabey n'a pas vu cette hausse de concentration, ce qui pourrait être la conséquence d'une pollution micro-locale dans l'environnement du camion laboratoire. Lors de ce pic, les concentrations en PM2,5 et en NO_2 mesurées par le camion laboratoire sont restées faibles.

Les niveaux de fonds en PM10 mesurés à la station périurbaine de fond « Rocabey » sont plus élevés par rapport à ceux mesurés au port de Saint-Malo par le camion laboratoire (facteur 1.5 entre les médianes).

Pendant la période de mesure certains pics de concentrations ont été enregistrés à la station Rocabey sans que les appareils situés sur le port ne remarquent ces hausses de concentration.

Ces constats pourraient être liés aux conditions de vents pendant la campagne. Le camion laboratoire positionné sur le pt V8 du port a été très peu exposé aux vents en provenance du port de commerce contrairement à la station Rocabey.

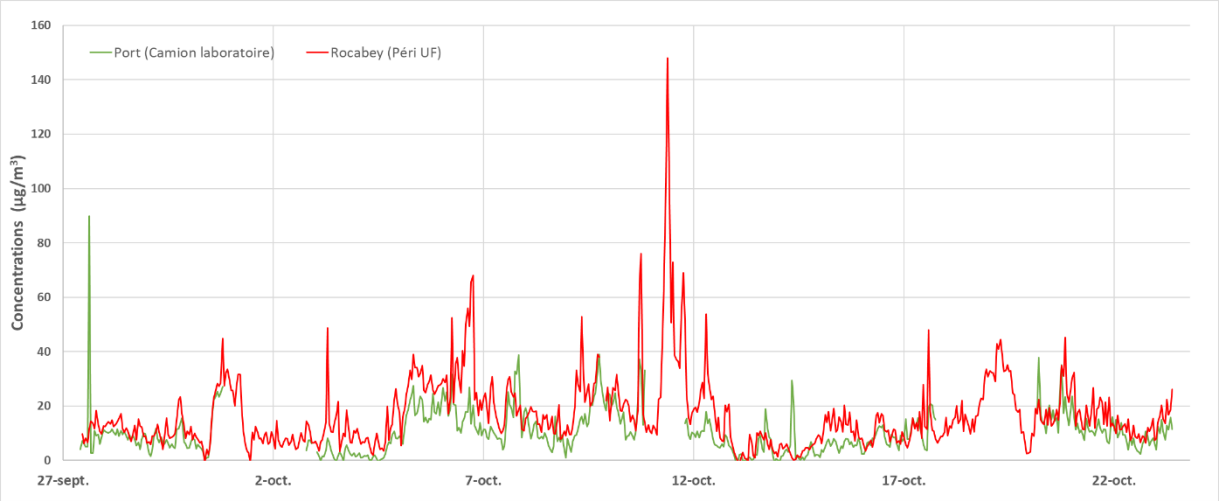


Figure 32 : PM10 – évolution horaire, du 28/09 au 23/10/2022

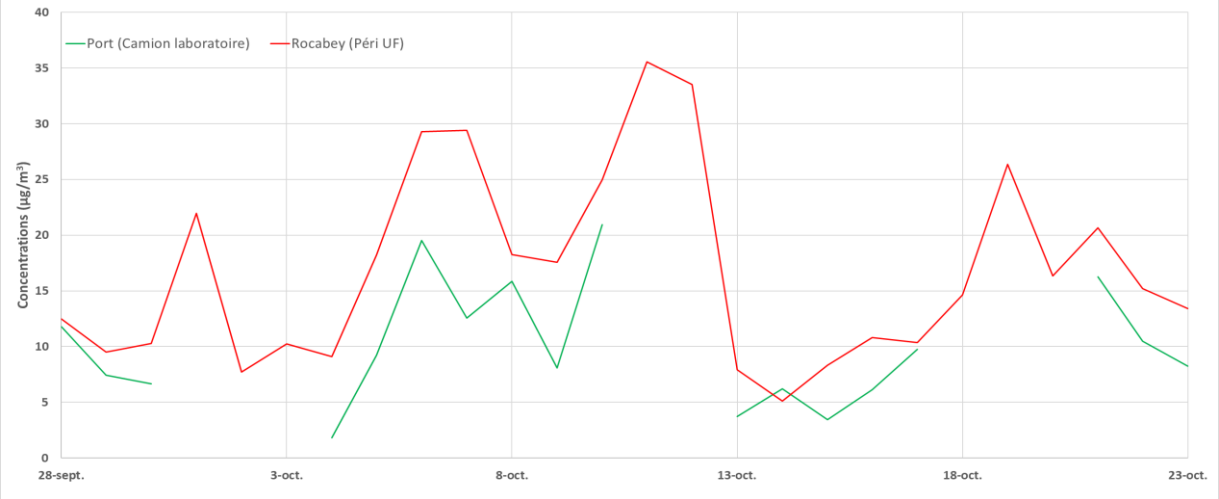


Figure 33 : PM10 – évolution journalière, du 28/09 au 23/10/2022

Dioxyde d'azote NO_2 :

Les graphiques de la page suivante présentent les évolutions horaires et journalières des niveaux de NO_2 entre le 28/09 et le 23/10/2022. L'analyseur du camion laboratoire a subi 3 coupures de courant pendant la période de mesure : du 01/10 au 03/10 ; du 11/10 au 17/10 et du 18/10 au 20/10/2022. Le taux de couverture des données du camion laboratoire sur la période de mesure est de 60 % en données horaires et 54 % en données journalières.

En raison de ces faibles taux de couverture, la représentativité des traitements statistiques effectués sur la période est limitée. Une interprétation des résultats est réalisée à titre indicatif.

Le Tableau 38 ci-dessous présente une synthèse statistique des résultats à titre indicatif.

Tableau 38 : NO_2 - Synthèse statistique du 28/09 au 23/10/2022

	Rocabey (station périUF)		**Port Pt v8 (Camion laboratoire)**	
	Journalières	Horaires	Journalières	Horaires
1er quartile	3,1	1,6	7,9	3,8
Médiane	4,9	3,9	10,0	7,5
Moyenne	5,9	5,9	9,3	11,0
3ème quartile	8,0	7,7	12,3	14,5
Max	14,9	47,8	15,8	88,6

Sur la période de mesure, les moyennes horaires et journalières les plus élevées ont été mesurées au niveau du port (camion laboratoire). Sur la Figure 34, on peut voir que la station Rocabey enregistre beaucoup moins de variation des niveaux de NO_2.

La médiane et le premier quartile des jeux de données (horaires et journaliers) sont deux fois plus élevées sur le port par rapport au niveau de la station Rocabey. Ces différences montrent que la concentration de fond est plus élevée sur le port.

Les niveaux les plus forts ont été mesurés par l'analyseur du camion laboratoire. Le maximum atteint 89 µg/m^3 le 11/10/2022 à 07:00 en moyenne horaire sous les vents faibles provenant du Nord-Ouest. A la station Rocabey, la concentration en NO_2 mesurée à ce moment est deux fois moins importante (46 µg/m^3).

Les concentrations en NO_2 mesurées à la station périurbaine de fond « Rocabey » sont plus faibles par rapport au niveau de fond mesuré sur le port de Saint-Malo (pt V8).

Les résultats semblent plutôt cohérents au regard de la typologie des deux sites de mesure. En revanche, le nombre de données du camion laboratoire est insuffisant pour affirmer avec certitude ces différences de niveau de fond entre le port et la station Rocabey.

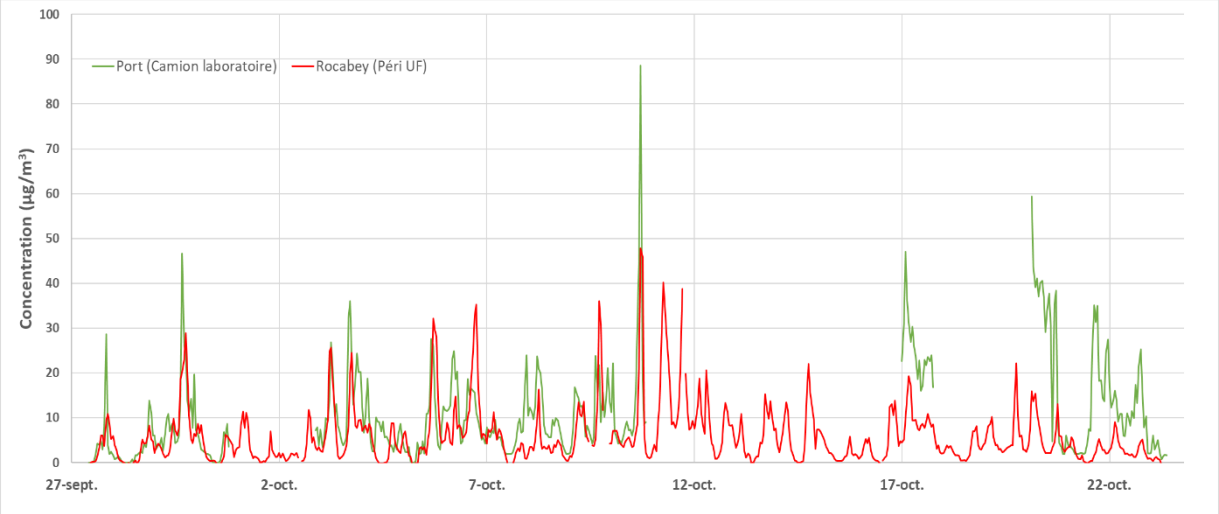


Figure 34 : NO_2– évolution horaire, du 28/09 au 23/10/2022

Figure 35 : NO_2– évolution journalière, du 28/09 au 23/10/2022

CONCLUSION

En décembre 2021, la société EDEIS, concessionnaire du port de Saint Malo, a installé un réseau de micro-capteurs WT1 commercialisés par la société Ellona.

Ces derniers assurent la mesure des paramètres suivants : particules fines (PM_{10}, $PM_{2.5}$), NO_2, SO_2, NH_3, CO, O_3, H_2S et COV.

Lors de la dernière Commission Ad Hoc du port le 18 octobre 2021, le Sous-Préfet de Saint-Malo a demandé qu'une expertise métrologique du réseau de mesure soit conduite afin d'étudier la pertinence de ce dispositif et le cadre de l'exploitation des résultats.

Dans ce cadre, EDEIS a sollicité Air Breizh pour conduire les missions suivantes :

- Analyse du positionnement des 4 stations ;
- Analyse du choix des polluants mesurés ;
- Analyse des mesures des premiers mois de fonctionnement du dispositif.

Préalablement au traitement des résultats, une comparaison métrologique des capteurs avec des appareils de surveillance réglementaire a été réalisée pour étudier la qualité de ce système de surveillance et déterminer l'usage possible des données de mesure.

➢ Analyse du choix des 4 sites retenus

Parmi les polluants mesurés par les capteurs, certains sont émis par des sources locales au niveau du port (CO, COV et H_2S), et d'autres par des sources multiples (NO_X, PM10, PM2,5, SO_2 et NH_3).

La mesure de l'O_3 ne semble pas prioritaire dans ce contexte portuaire.

L'implantation des capteurs au niveau des zones les plus pénalisantes du port (retenues par EDEIS) permet de mesurer la pollution de proximité directe avec la source.

En revanche, pour mesurer l'exposition moyenne de la population riveraine des installations du port, le guide du LCSQA préconise « une implantation à l'endroit où la densité de population dans un rayon de 1 km est la plus élevée »,

Du fait des implantations retenues par EDEIS pour les capteurs, les données collectées ne sont pas représentatives de l'exposition des riverains du port.

➢ Contrôle métrologique des capteurs choisis

❖ *Caractéristiques des capteurs :*

Sur la base des caractéristiques des capteurs (limite de détection, résolution et gamme de mesure), la mesure des particules (PM10 et PM2,5), de l'ozone (O_3), de l'hydrogène sulfuré (H_2S) et du monoxyde de carbone (CO) est adaptée à la surveillance de l'air ambiant sur la zone portuaire.

En revanche, les performances des capteurs pour la mesure du NO_2, du NH_3 et du SO_2 ne semblent pas convenir dans ce contexte. Pour ces capteurs, la limite de détection est supérieure au niveau de fond, ce qui implique une incertitude élevée des données dans cette gamme de concentration.

❖ ***Résultats du challenge Airlab :***

Le Challenge international microcapteurs AIRLAB vise à évaluer régulièrement les progrès en matière d'efficacité et de fiabilité de ces nouvelles technologies de mesure de la qualité de l'air.

Les capteurs utilisés par EDEIS ont participé aux challenge Airlab ; ils obtiennent de bons résultats pour la mesure du NO_2 sur les deux dernières éditions (2019 et 2021). En revanche, la mesure des particules n'a pas été bonne sur l'édition de 2019 alors qu'elle était satisfaisante pour les PM2,5 et les PM1 lors de l'édition 2021 (les PM10 n'ont pas été évaluées).

Les résultats des test métrologiques de la présente étude sont comparables aux résultats du challenge Airlab pour la mesure du NO_2 et des PM10. En revanche, les résultats des mesures en PM2,5 n'ont pas été satisfaisants.

❖ ***Campagne de comparaison métrologique :***

Dans un premier temps, les capteurs ont été rassemblés sur le même site (site V8) du 27 septembre au 10 octobre 2022, pour tester la reproductibilité et la justesse des mesures. Des critères issus du protocole de certification « Air quality sensor » créé par le LNE et l'INERIS, ont été utilisés pour mener cette évaluation. A la suite de ces tests, les capteurs ont été classés selon 3 catégories (cas 1, 2 et 3).

Le <u>cas 3</u> rassemble les polluants pouvant être comparés <u>à titre indicatif</u> avec la station Rocabey ; ce sont les suivants :

- **PM10 : uniquement pour les données Journalières (données horaires non exploitables) ;**
- **NO_2 : après correction de la ligne de base (données horaires et journalières).**

Ces résultats sont valables sur la base des tests réalisés lors de la campagne de mesure et dans les niveaux de concentration rencontrés.

En vue d'une pérennisation du réseau de mesure, un processus de contrôle métrologique régulier sera à mettre en place par l'exploitant pour vérifier l'absence de dérive dans le temps des appareils.

Pour les particules (PM2,5), le dioxyde de soufre, le monoxyde de carbone et l'hydrogène sulfuré, la reproductibilité est satisfaisante ou moyennement satisfaisante (<u>cas 2</u>) ; la comparaison des niveaux entre capteurs est possible mais des artéfacts de la mesure sont possibles (ce qui explique le défaut de justesse par rapport à la référence, lorsque cela a pu être testé).

Le monoxyde de carbone et l'hydrogène sulfuré, n'ayant pas été comparés aux équipements de référence, pourraient intégrer le cas 3 sous réserve d'un test de justesse satisfaisant.

Pour les composés organiques volatils, l'ammoniac et l'ozone, l'utilisation des capteurs pour une surveillance de la qualité de l'air du port est déconseillée (<u>cas 1</u>).

Analyse des mesures des premiers mois de fonctionnement du dispositif.

Les données des capteurs ayant eu de bons résultats aux tests métrologiques (cas 3) ont été analysés pendant les premiers mois de fonctionnement et comparées à la station de référence Rocabey. Cela concerne le dioxyde d'azote et les particules fines PM10. Les données journalières ont été utilisées.

Pour les PM10, les niveaux de fond mesurés sur le port sont plus faibles par rapport à ceux mesurés par la station Rocabey.

Pour le NO_2, les niveaux de fond mesurés sur le port (après correction de la ligne de base) sont équivalents aux niveaux mesurés à la station Rocabey. Néanmoins, la limite de détection importante associée à ce polluant confère une incertitude significative dans la gamme de mesure rencontrée.

Comparaison des mesures du Port (camion laboratoire) à la station de référence Rocabey

Les niveaux de fonds en PM10 mesurés à la station périurbaine de fond « Rocabey » sont plus élevés par rapport à ceux mesurés au port de Saint-Malo par le camion laboratoire (facteur 1.5 entre les médianes).

Pendant la période de mesure certains pics de concentrations ont été enregistrés à la station Rocabey sans que les appareils situés sur le port ne remarquent ces hausses de concentration.

Ces constats pourraient être liés aux conditions de vents pendant la campagne. Le camion laboratoire positionné sur le pt V8 du port a été très peu exposé aux vents en provenance du port de commerce contrairement à la station Rocabey.

Les concentrations en NO_2 mesurées à la station périurbaine de fond « Rocabey » sont plus faibles par rapport au niveau de fond mesuré sur le port de Saint-Malo (pt V8).

Les résultats semblent plutôt cohérents au regard de la typologie des deux sites de mesure. En revanche, le nombre de données du camion laboratoire est insuffisant pour affirmer avec certitude ces différences de niveau de fond entre le port et la station Rocabey.

Perspectives

Les conclusions de ce travail mettent en avant l'intérêt de ces microcapteurs (pour certains paramètres) comme outil de suivi des activités exercées sur le port. Le positionnement des capteurs, proches des sources, appuie ce constat.

Néanmoins, la mise en œuvre d'une politique de contrôle métrologique semble nécessaire pour vérifier la pertinence du réseau de mesure (exemple : comparaison régulière à une référence, dans l'absolu et en relatif (carte de contrôle))

Au vu de ses performances, nous recommandons que ce dispositif ne soit pas utilisé comme outil de diagnostic de la qualité de l'air dans la zone portuaire en comparaison des seuils réglementaires et des mesures de la station de fond Rocabey. Seuls des équipements approuvés par le LSCQA permettront de répondre à cette demande.

ANNEXES

Annexe 1 : Présentation d'Air Breizh 62

Annexe 2 : Fiches de synthèse - Résultats du challenge AIRLAB 64

Expertise du dispositif de surveillance de la qualité de l'air du port de Saint-Malo (35400)

ANNEXE 1 : PRESENTATION D'AIR BREIZH

La surveillance de la qualité de l'air est assurée en France par des associations régionales, constituant le dispositif national représenté par la Fédération ATMO France,
Ces organismes, agréés par le Ministère de la Transition écologique et solidaire, ont pour missions de base, la mise en œuvre de la surveillance et de l'information sur la qualité de l'air, la diffusion des résultats et des prévisions, et la transmission immédiate au Préfet et au public, des informations relatives aux dépassements ou prévisions de dépassements des seuils de recommandation et d'information du public et des seuils d'alerte,

En Bretagne, cette surveillance est assurée par Air Breizh depuis 1986,

Le réseau de mesure s'est régulièrement développé et dispose en 2017, de 18 stations de mesure, réparties sur le territoire breton, ainsi que d'un laboratoire mobile, de cabines et de différents préleveurs, pour la réalisation de campagnes de mesure ponctuelles,

L'impartialité de ses actions est assurée par la composition quadripartite de son Assemblée Générale regroupant quatre collèges :

- Collège 1 : services de l'Etat,
- Collège 2 : collectivités territoriales,
- Collège 3 : émetteurs de substances polluantes,
- Collège 4 : associations de protection de l'environnement et personnes qualifiées,

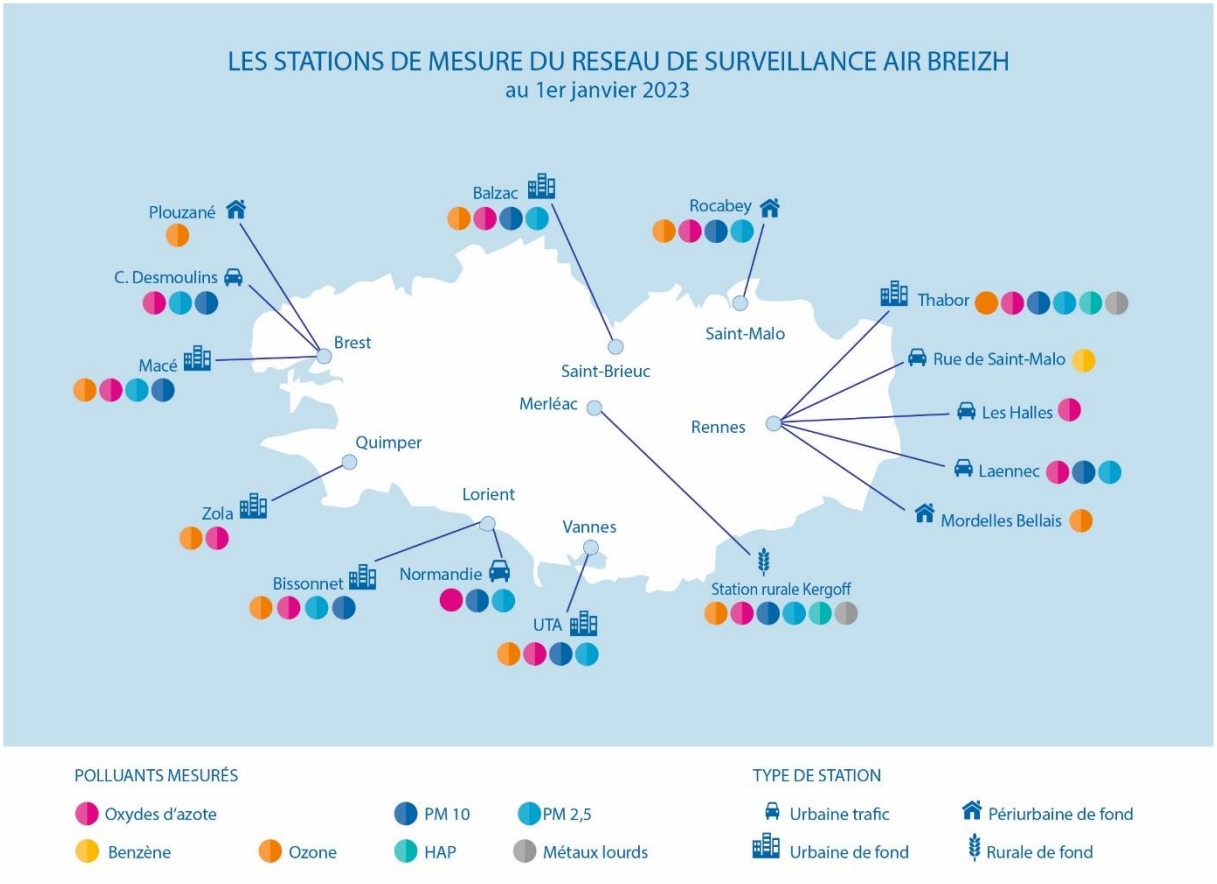
Missions d'Air Breizh

- Surveiller les polluants urbains nocifs (SO2, NO2, CO, O3, Métaux lourds, HAP, Benzène, PM10 et PM2,5) dans l'air ambiant,
- Informer la population, les services de l'Etat, les élus, les industriels…, notamment en cas de pic de pollution, Diffuser quotidiennement l'indice ATMO, sensibiliser et éditer des supports d'information : plaquettes, site web…,
- Etudier l'évolution de la qualité de l'air au fil des ans, et vérifier la conformité des résultats par rapport à la réglementation,
- Apporter son expertise sur des problèmes de pollutions spécifiques et réaliser des campagnes de mesure à l'aide de moyens mobiles (laboratoire mobile, tubes à diffusion, préleveurs, jauges OWEN…) dans l'air ambiant extérieur et intérieur.

Réseau de surveillance en continu

La surveillance de la qualité de l'air pour les polluants réglementés est assurée via des d'analyseurs répartis au niveau des grandes agglomérations bretonnes, Ce dispositif est complété par d'autres outils comme l'inventaire et la modélisation, qui permettent d'assurer une meilleure couverture de notre région,

Expertise du dispositif de surveillance de la qualité de l'air du port de Saint-Malo (35400)



Implantation des stations de mesure d'Air Breizh (au 01/01/23)

Moyens

Afin de répondre aux missions qui lui incombent, Air Breizh compte seize salariés, et dispose d'un budget annuel de l'ordre de 2 millions d'euros, financé par l'Etat, les collectivités locales, les émetteurs de substances polluantes, et des prestations d'intérêt général et produits divers.

ANNEXE 2 : FICHES DE SYNTHESE - RESULTATS DU CHALLENGE AIRLAB

AIRLAB

CHALLENGE MICROCAPTEURS

2019

RUBIX WT1

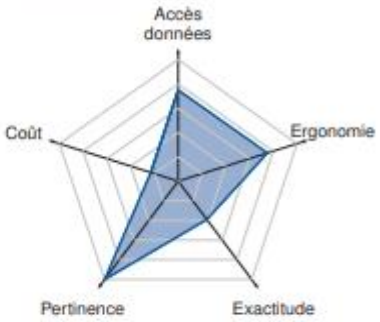
Usage pour lequel l'évaluation était la meilleure : Surveillance en air extérieur

Avis du jury

OA-M ★★★☆☆

Cet appareil est conçu pour la surveillance de la qualité de l'air extérieur. Il fournit des mesures de NO_2, $PM_{2.5}$ et PM_{10}, avec une bonne qualité de données pour le NO_2, mais très mauvaise pour les particules. Il a un design esthétique agréable et de haute qualité des services de cloud et de l'API. Il s'agit toutefois d'une solution coûteuse pour l'application ciblée.

Évaluation



Usages évalués :
- en air extérieur
- en air intérieur
- en mobilité

Polluants mesurés

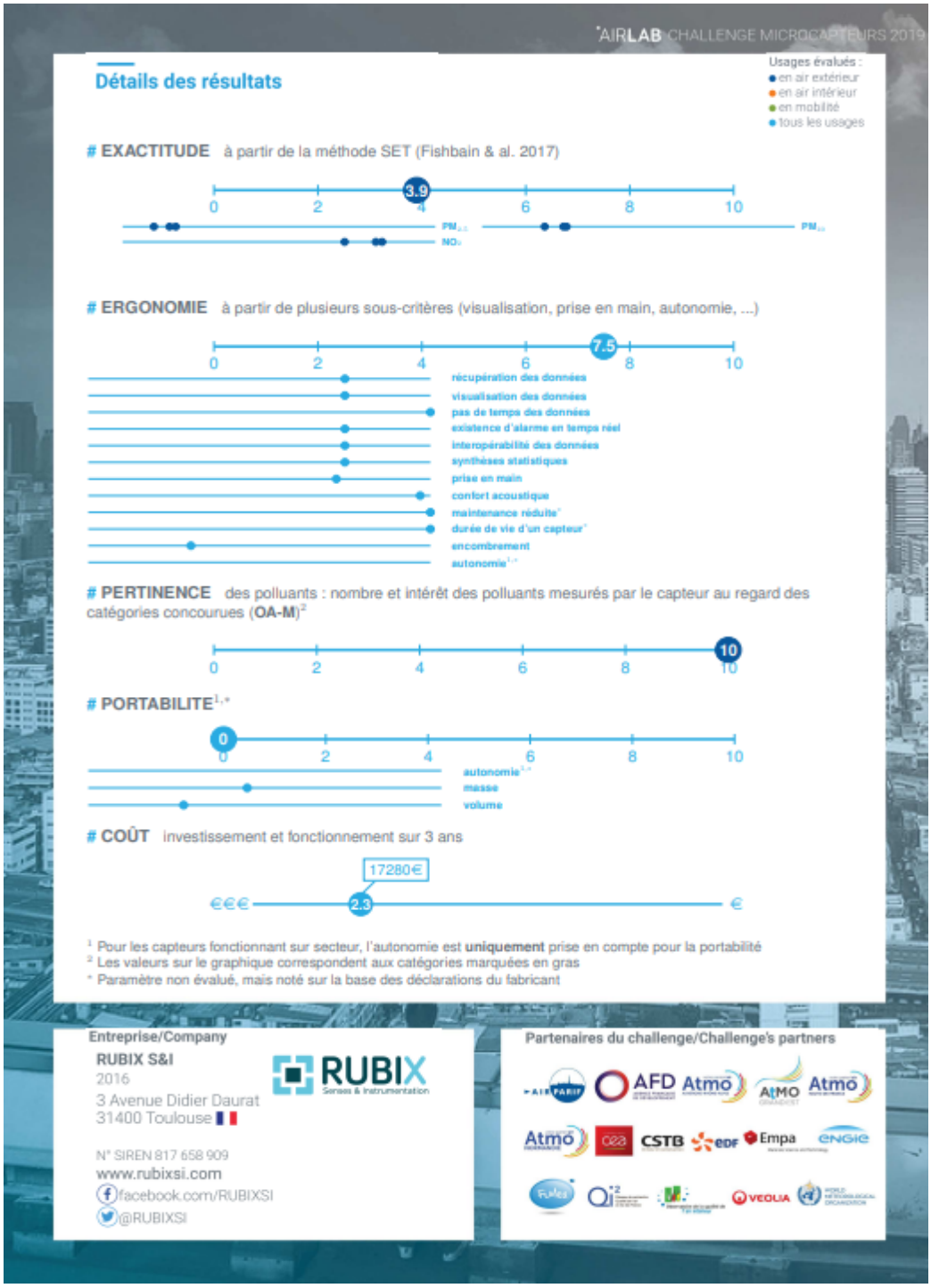
- ○ CH_2O
- ○ CO
- ○ CO_2
- ○ COV
- ○ H_2S
- ○ NH_3
- ○ NO
- ☑ NO_2 (NO_x)
- ○ O_3
- ○ PM_1
- ☑ $PM_{2.5}$
- ☑ PM_{10}
- ○ SO_2
- ○ Particules en nombre

Autres mesures

- ☑ Température
- ☑ Humidité
- ○ Odeurs
- ○ GPS
- ☑ Pression
- ○ Luminosité
- ☑ Confort acoustique
- ○ Anémomètre

Lieu de stockage des données : Europe

Expertise du dispositif de surveillance de la qualité de l'air du port de Saint-Malo (35400)



Expertise du dispositif de surveillance de la qualité de l'air du port de Saint-Malo (35400)

RUBIX WT1

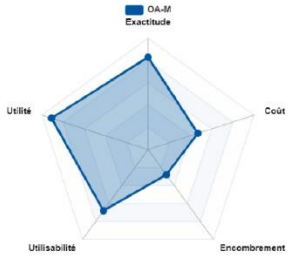
Utilisation pour laquelle les performances du capteur étaient les meilleures : OA-M

★★★★☆

Avis du jury

Le WT1 a fourni une très bonne performance globale en termes de précision dans l'édition actuelle, avec une excellente qualité pour les PM2.5, très bonne pour les PM1, et bonne pour le NO2. Il fournit une liste plus qu'adéquate des polluants ciblés. Toutefois, l'ajout des PM10 serait également le bienvenu pour les applications de surveillance. Il dispose d'options complètes de récupération des données, de notifications en temps réel et est relativement facile à configurer. En tant que tel, il obtient un très bon score en termes d'utilité et s'en sort également bien en termes de convivialité. Il est toutefois pénalisé par sa taille importante et son coût, qui reste relativement élevé par rapport à d'autres concurrents.

Evaluation



Polluants mesurés

- ☐ CH_2O
- ☑ NO_2 (NO_x)
- ☐ CO
- ☐ O_3
- ☐ CO_2
- ☑ PM_1
- ☐ COV
- ☑ $PM_{2.5}$
- ☐ H_2S
- ☐ PM_{10}
- ☐ NH_3
- ☐ SO_2
- ☐ NO
- ☐ Comptage particules (concentration)

Autres mesures

- ☑ Température
- ☐ Pression atmosphérique
- ☑ Humidité
- ☐ Luminosité
- ☐ Odeurs
- ☑ Confort acoustique
- ☐ GPS
- ☐ Anémomètre

Lieu de stockage des données : CLOUD (ALLEMAGNE, FINLANDE), l'hébergeur est une société Allemande

Entreprise/Company

Rubix S&I

2015

3 Avenue Didier Daurat
31400 Toulouse

N° SIREN 817 658 909

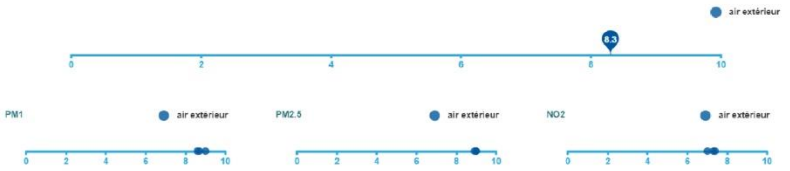
www.rubixsi.com

facebook.com/RUBIXSI

@RUBIXSI RUBIX S&I

Rapport détaillé

 # EXACTITUDE à partir de la méthode SET (Fishbain & al. 2017)



 # UTILITE la capacité d'un système de capteurs à fournir les fonctionnalités essentielles pour atteindre les objectifs de l'application

 # UTILISABILITE 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 offrant une expérience utilisateur agréable

 # ENCOMBREMENT représente la charge physique que représente l'appareil pour des opérations telles que le transport ou l'installation

 # COUT investissement et fonctionnement sur 3 ans

AIRLAB