

ACTIVITÉ T.1.3

Mise en place de campagnes de suivi et d'évaluation des données

Produit T.1.3.1.

Rapport des résultats de la campagne et analyse des données qualitatives et quantitatives

Partenaire Responsable: ARPAT

Auteurs du rapport:

- **ARPAL** – Agenzia Regionale per la Protezione dell’Ambiente della Liguria;
- **UNIGE** – Università degli Studi di Genova;
- **ARPAS** – Agenzia Regionale per la Protezione dell’Ambiente della Sardegna;
- **UNICA** – Università degli Studi di Cagliari;
- **ARPAT** – Agenzia Regionale per la Protezione dell’Ambiente della Toscana;
- **ATMOSUD** – Association Agréée par le ministère en charge de l’Environnement pour la Surveillance de la Qualité de l’Air de la région Provence-Alpes-Côte d’Azur;
- **QUALITAIR CORSE** – Association Agréée par le ministère en charge de l’Environnement pour la Surveillance de la Qualité de l’Air sur la région Corse.

Table des matières

1. Introduction.....	1
2. Stations de surveillance	2
2.1. LIGURIE.....	4
2.2. SARDAIGNE.....	7
2.3. TOSCANE.....	10
2.4. RÉGION PACA	13
2.5. CORSE.....	15
3. Capteurs low cost ou autres instruments non conventionnels	20
3.1 LIGURIE.....	22
3.2 SARDAIGNE.....	31
3.3 TOSCANE.....	33
3.4 RÉGION PACA	36
3.5 CORSE.....	38
4. Paramètres surveillés.....	48
4.1 LIGURIE.....	54
4.2 SARDAIGNE.....	58
4.3 TOSCANE.....	85
4.4 RÉGION PACA	114
4.5 CORSE.....	125
5. Source apportement.....	152
5.1. LIGURIE.....	154
5.2. SARDAIGNE.....	161
5.3. TOSCANE.....	164
5.4. REGIONE PACA.....	184
5.5. CORSE.....	191
6. Conclusion	200

1. Introduction

Le présent document a pour objet de résumer et de décrire les résultats du "Projet AER NOSTRUM - Air bien commun". Le projet a été finalisé à la réalisation d'un observatoire transfrontalier pour le contrôle de la qualité de l'air dans les ports, financé par le Fonds Européen de Développement Régional de l'Union Européenne dans le cadre du Programme de Coopération Territoriale Européenne entre l'Italie et la France, dénommé Interreg Italie-France Maritime 2014-2020, dans une perspective de promotion de la durabilité des ports bordant la Méditerranée centre-septentrionale. L'objectif général est, en effet, celui de contribuer à préserver ou améliorer la qualité de l'air à proximité des ports de la zone du projet, tout en favorisant la croissance soutenable des activités portuaires, dans le respect de la législation et des politiques environnementales européennes.

Le présent document a été rédigé par ARPAT à partir des contributions individuelles des partenaires du projet Aer Nostrum:

- ARPAL – Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Liguria;
- UNIGE – Università degli Studi di Genova;
- ARPAS – Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Sardegna;
- UNICA – Università degli Studi di Cagliari;
- ARPAT – Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Toscana;
- ATMOSUD – Association Agréée par le ministère en charge de l'Environnement pour la Surveillance de la Qualité de l'Air de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur;
- QUALITAIR CORSE – Association Agréée par le ministère en charge de l'Environnement pour la Surveillance de la Qualité de l'Air sur la région Corse.

Chaque partenaire a contribué individuellement à rendre compte des modalités d'exécution et des résultats obtenus par les campagnes de suivi sur ses sites, identifiés à l'intérieur des zones portuaires des cinq régions géographiques faisant partie de la coopération transfrontalière du projet.

Les partenaires compétents pour le contrôle de la qualité de l'air sur leurs territoires respectifs au niveau régional (ARPAL, ARPAT, ARPAS, QUALITAIR CORSE et ATMOSUD), ont également exploité dans ce projet certaines stations appartenant au réseau de surveillance de la qualité de l'air territorial, qui permet d'évaluer chaque année la qualité de l'air en utilisant les critères établis par les directives européennes et nationales. Les partenaires, dans le but d'augmenter la résolution spatiale et temporelle des données, ont également utilisé des instruments intelligents qui ont conduit à une approche innovante et complémentaire des connaissances traditionnelles.

L'étude du fonctionnement de l'instrumentation non conventionnelle sous plusieurs angles était un objectif important du projet en vue d'obtenir des informations sur leur fiabilité et d'évaluer les meilleurs modes opératoires à appliquer au sein du projet.

Les conclusions, après avoir analysé les produits T.1.3 de chaque région et leurs conclusions, ont cherché à donner une vue d'ensemble de l'état de la qualité de l'air des ports de la Méditerranée centrale et septentrionale.

2. Stations de surveillance

Tableau des figures

Figure 2.1: Zones portuaires soumises à la surveillance d'Aer Nostrum.	3
Figure 2.1.1: Zone de surveillance et sites identifiés à proximité du Vieux Port de Gênes.	4
Figure 2.2.1: Carte des emplacements dans la région de Cagliari (ARPAS).	7
Figure 2.2.2: Carte des emplacements dans la région de Cagliari (UNICA).	8
Figure 2.2.3: Carte des emplacements dans la région d'Olbia (ARPAS).	9
Figure 2.2.4: Carte des emplacements dans la région d'Olbia (UNICA).	9
Figure 2.3.1: Description des sites d'intérêt et typologie.	11
Figure 2.3.2: Échantillonneur radiello.	11
Figure 2.3.3: Description des sites pour l'échantillonnage passif.	12
Figure 2.4.1: Carte du système installé dans la rade de Toulon-la Seyne-Brégaillon en 2021.	13
Figure 2.5.1: Maillage Ajaccio (2.5km x 2.5km) et Maillage Bastia (2.5km x 2.5km)	15
Figure 2.5.2: Carte du système installé à Ajaccio en 2021.	16
Figure 2.5.3: Carte du dispositif déployé sur Bastia en 2021.	18

Tableau des tableaux

Tableau 2.1: Légende type de station, type de zone et type de site utilisé dans les cartes.	3
Tableau 2.1.1: Liste des stations de mesure dans le port de Gênes.	5
Tableau 2.3.1: Description des sites d'intérêt et typologie.	10
Tableau 2.3.2: Description des sites d'intérêt et typologie.	11
Tableau 2.3.3: Liste des périodes d'échantillonnage et des sites équipés d'échantillonneurs passifs.	12
Tableau 2.4.1: Liste des périodes et des sites d'échantillonnage.	13
Tableau 2.4.2: Liste des espèces mesurées et des instruments utilisés pour chaque élément du dispositif de mesure.	14
Tableau 2.5.1: Périodes d'échantillonnage choisies pour cette étude.	15
Tableau 2.5.2: Liste des lieux et instruments pour la campagne AER NOSTRUM sur Ajaccio.	17
Tableau 2.5.3: Liste des lieux et instruments pour la campagne AER NOSTRUM sur Bastia.	19

Dans l'image suivante, nous avons représenté sur une carte les zones portuaires impliquées dans le suivi du projet Aer Nostrum. Pour chaque zone portuaire chaque partenaire a défini les points de prélèvement qui seront décrits dans les cartes suivantes.

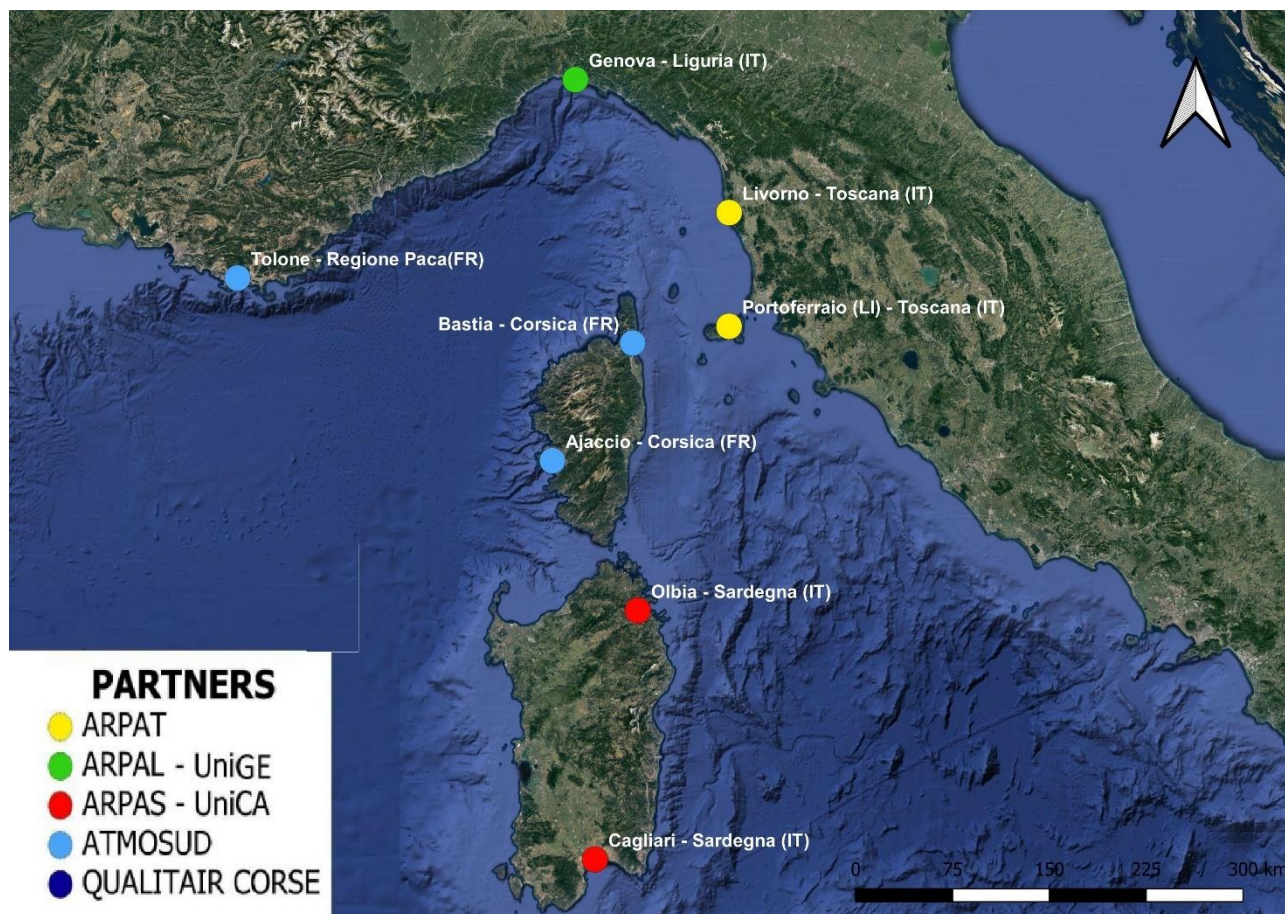


Figure 2.1: Zones portuaires soumises à la surveillance d'Aer Nostrum.

Les cartes représentant les points de surveillance choisis pour chaque région sont présentées ci-dessous.

Tableau 2.1: Légende type de station, type de zone et type de site utilisé dans les cartes.

Type de site	Type de zone	Type de site de suivi
Trafic (T-rouge)	Urbain (U)	Station fixe (carré)
Industriel (I-blue)	SubUrbain (S)	Station mobile (étoile)
Background (B- jaune)	Rural (R)	Station low-cost (triangle)

2.1. LIGURIE

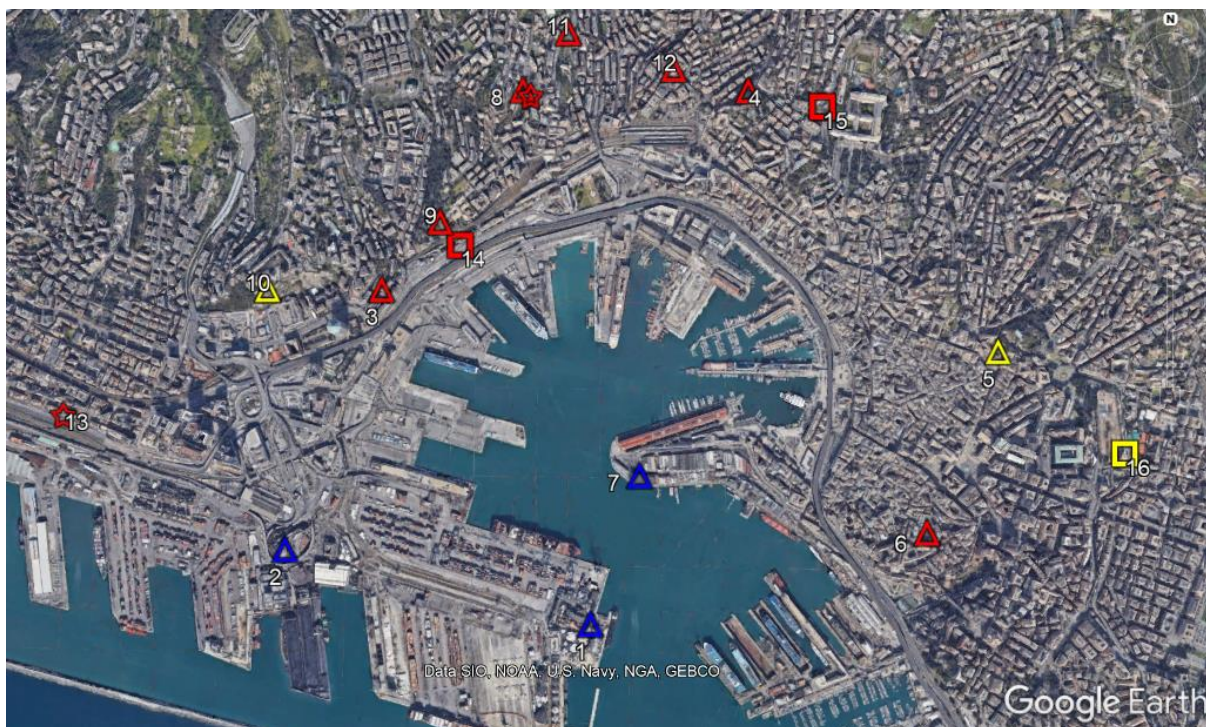


Figure 2.1.1: Zone de surveillance et sites identifiés à proximité du Vieux Port de Gênes.

La campagne menée par ARPAL a été développée dans la zone autour du port de Gênes (domaine d'environ 3x3 km²) et en collaboration avec les partenaires locaux, les sites possibles ont été préalablement identifiés où les connaissances découlant à la fois des mesures déjà disponibles et de la modélisation. À partir des sites sur la carte, grâce à des visites de terrain (mars 2021 ÷ mars 2022) réalisées avec le concours de la Ville de Gênes, de l'Autorité portuaire locale et de la Marine italienne, on a procédé à l'identification détaillée des sites, en parvenant à définir une douzaine de points de mesure. Grâce à la petite taille des instruments « intelligents », il a également été possible d'utiliser des sites où il n'est normalement pas possible d'effectuer des mesures de la qualité de l'air à l'aide d'instruments conventionnels, à savoir des musées et des villas ou des bâtiments dans la zone portuaire ou, plus généralement, des lieux où le contexte densément urbanisé ne permet pas d'espaces adéquats. Plusieurs questions ont été abordées concernant la facilité d'installation/accès, les éventuelles gênes que les instruments peuvent causer au personnel/visiteurs et la fourniture de l'alimentation électrique nécessaire à l'installation de l'instrumentation. Sur ce dernier aspect, afin de rendre utilisables les sites non alimentés par le secteur, il a été décidé d'utiliser des instruments équipés d'un système d'alimentation par panneau photovoltaïque et batterie de secours. Il est à noter qu'à ces points de la zone s'ajoutent 3 stations fixes du Réseau Qualité de l'Air (RQA) géré par ARPAL (Parc Acquasola, Via Buoizzi et Corso Firenze, indiquées en bleu sur la carte ci-dessous) : dans toutes ces stations sont mesurés les oxydes d'azote et dans deux stations (Via Buoizzi et Corso Firenze) également les PM₁₀. Il y a également deux stations mobiles dans la zone : la première située Largo San Francesco da Paola à San Teodoro et la seconde située Lungomare Canepa.

Tableau 2.1.1: Liste des stations de mesure dans le port de Gênes.

Stations avec capteurs intelligents	
1. Dépôt Huiles minérales	7. Ancienne blanchisserie industrielle
2. Phare	8. Largo S. Francesco da Paola – S. Teodoro ¹
3. École Gastaldi-Abba	9. Parc Villa Rosazza
4. Château Albertis	10. Via Del Fossato
5. Villa Di Negro	11. Via Bari - Gare du funiculaire
6. Musée Sant'Agostino	12. Institut hydrographique de la Marine
Stations avec instruments conventionnels	
13. Lungomare Canepa	15. Corso Firenze
14. Via Buoizzi	16. Parc Acquasola

La campagne a été réalisée dans la zone entourant le port de Gênes, avec des sites identifiés dans la zone entourant le vieux port, à savoir la zone la plus proche des deux terminaux passagers. La campagne expérimentale comprenait toutes les stations fixes et mobiles appartenant au Réseau de Qualité de l'air ARPAL ainsi que des capteurs «intelligents» installés sur des sites convenablement choisis autour de la zone portuaire.

Paramètres surveillés

Les mesures de NO₂ et de PM au moyen d'instruments « intelligents » aux sites de mesure définis dans le paragraphe précédent ont été effectuées en respectant les besoins et les activités des établissements (musées, bâtiments) dans lesquels les instruments sont situés et les phases de vérification sur les sites où des instruments conventionnels sont présents, essentiellement sans interruption une fois les instruments vérifiés et considérés comme pleinement opérationnels. Cela a certes représenté un engagement plus important que celui des deux campagnes saisonnières initialement fixées, mais a permis de collecter une grande quantité de données.

En raison des problèmes bien connus d'approvisionnement en composants électroniques et en diverses matières premières causés par l'urgence Covid19, des retards importants ont été enregistrés dans l'acquisition d'instruments, ce qui a entraîné un décalage du calendrier des activités d'environ 6 mois : le démarrage effectif de la première campagne sur les sites de mesure (qui n'a été possible qu'après l'achèvement réussi des vérifications avec les instruments conventionnels sur les sites d'essai) a eu lieu en décembre 2021 et n'a concerné qu'une partie des instruments ; les périodes d'échantillonnage pour lesquelles des statistiques descriptives ont été réalisées sont indiquées à l'Annexe 2 - ARPAL.

Au cours des deux campagnes de mesure saisonnières, des échantillons de particules atmosphériques (PM10) ont été collectés quotidiennement au moyen d'un échantillonneur gravimétrique à faible volume (DIGITEL DPA14) sur le site de San Teodoro à la station mobile de Largo San Francesco da Paola et sur le site de Corso Firenze à la station fixe de RQA ARPAL, pendant l'été 2021 et le printemps 2022. Après la détermination gravimétrique effectuée par ARPAL, les échantillons ont été remis au Département de Physique de l'Université de Gênes, pour la réalisation de déterminations analytiques visant à définir la teneur en :

- Métaux ;
- Ions (anions et cations) ;
- Carbone élémentaire (CE) et Carbone Organique (CO) ;
- Levoglucosan.

La liste des paramètres mesurés sur les différents sites, les instruments utilisés pour chaque espèce et la résolution temporelle sont résumés dans l'Annexe 2 - ARPAL.

En plus des données de concentration, des données météorologiques ont été acquises à la station mobile située Largo San Francesco da Paola - San Teodoro. Comme escompté, on a vu qu'en l'absence de forçage

¹ Une instrumentation conventionnelle est également présente

synoptique, la circulation dominante est celle d'une brise avec des vents qui, pendant la journée, soufflent de la zone portuaire et tournent de la terre à partir de la fin de l'après-midi et jusqu'au milieu de la matinée du lendemain. En plus de ces données, on a également utilisé pour les évaluations les données de vent de la station de Gênes - Vieux Port, qui est plus représentative spatialement.

2.2. SARDAIGNE

• Zone du port de Cagliari

La charge d'émission de la zone de Cagliari est assez élevée pour la plupart des polluants, et se caractérise donc par un tissu urbain pertinent et densément peuplé, influencé non seulement par les activités portuaires, mais aussi par les activités aéroportuaires, ferroviaires et industrielles en général. ARPAS a positionné le Laboratoire Mobile (ci-après LABCAG), spécifiquement dans le cadre du projet Aer Nostrum, sur le quai Sabaudo du port de Cagliari.

Pour la comparaison et l'évaluation de l'impact du port sur la zone urbaine, deux stations fixes ont été identifiées, représentatives du fond urbain de la zone, situées dans des zones résidentielles des municipalités de Monserrato et Quartu Sant'Elena, nommées CENMO1 et CENQU1. La station de trafic urbain de référence est CENCA1, située dans la municipalité de Cagliari, dans le parc urbain de Monte Claro, à côté du tronçon routier central de Via Cadello.

UNICA, d'autre part, a identifié quatre stations de fond (IA, MI, MB et ML) et deux stations industrielles (MP et MS). Les échantillonneurs passifs Radiello et PUF ont été positionnés dans chaque site, tandis que le suivi avec les compteurs de particules ELPI et DiSCmini a été effectué uniquement dans la station MS, à proximité des quais pour les navires de croisière, ro-ro et ro-pax. Les stations ont été sélectionnées avec l'intention de couvrir toute la zone portuaire, de plus, certaines positions ont été choisies en correspondance avec les stations fixes et/ou mobiles d'ARPAS afin de pouvoir effectuer une comparaison des données (MS, IB, OP et OC). Plus de détails sur les postes de travail individuels sont donnés dans l'Annex1 - UNICA.

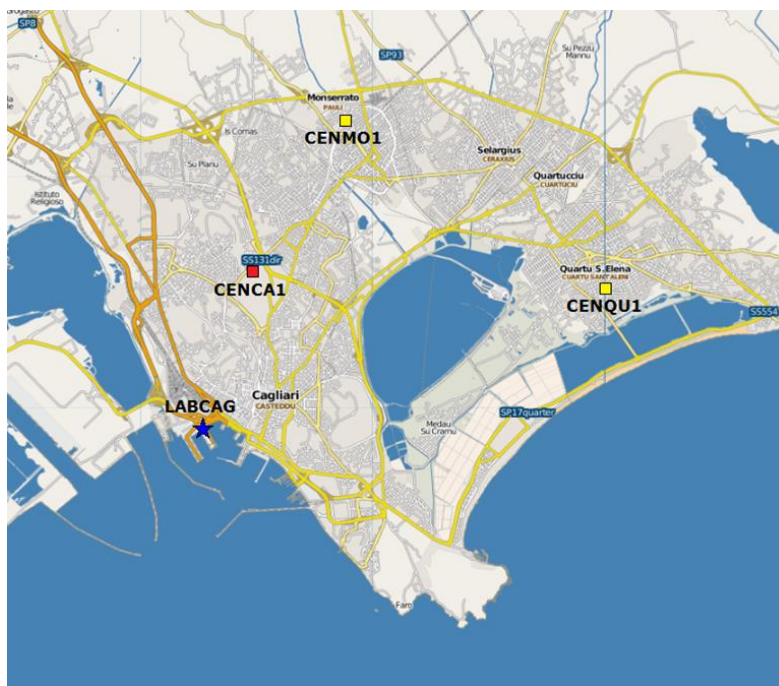


Figure 2.2.1: Carte des emplacements dans la région de Cagliari (ARPAS).



Figure 2.2.2: Carte des emplacements dans la région de Cagliari (UNICA).

La période de surveillance de l'ARPAS était la même pour toutes les stations de la zone du 04/10/2021 au 31/08/2022. L'Annexe 1 - ARPAS contient les Station Files, numérotés respectivement de 1.1 à 1.4, qui décrivent les métadonnées de la station mobile et des stations fixes. La pièce jointe 2 - ARPAS, contient le formulaire Périodes de mesure 2.1, qui résume les périodes d'échantillonnage de toutes les stations. L'UNICA a réalisé deux campagnes de surveillance distinctes dans le port de Cagliari, une en hiver et une en été. La campagne d'hiver a eu lieu aux mois de février-mars 2022, tandis que celle d'été a été réalisée aux mois de juin et juillet 2022. En particulier, les préleveurs passifs Radiello ont été exposés pendant une période de deux semaines, les préleveurs passifs PUF pendant une période de cinq/six semaines, tandis que les deux compteurs de particules (ELPI et DiSCmini) ont été utilisés dans le port de Cagliari, dans chacune des deux campagnes, pendant trois/quatre jours.

• Zone du port de Olbia

Des niveaux d'émission significatifs sont enregistrés dans la zone d'Olbia, principalement produits par le transport routier et le chauffage domestique, en plus des activités portuaires et aéroportuaires.

ARPAS a positionné son Laboratoire Mobile (ci-après LABOLB) sur le quai d'Isola Bianca dans le port d'Olbia. Pour la comparaison et l'évaluation de l'impact du port par rapport à la zone urbaine, les stations fixes CENS10 ont été identifiées, une station de trafic, située dans la Via Roma, à proximité d'une route d'accès importante à la zone urbaine d'Olbia, et CEOLB1, station defond, située dans le parc urbain Fausto Noce à Olbia.

L'UNICA, d'autre part, a identifié deux stations de fond (OP et PT), deux industrielles (OM et IB) et une station de trafic (OC). Les échantillonneurs passifs Radiello et PUF ont été positionnés dans chaque station, tandis que la surveillance avec les compteurs de particules ELPI et DiSCmini a été effectuée uniquement dans la station IB près des quais pour les navires de croisière, ro-ro et ro-pax. Les stations ont été sélectionnées avec l'intention de couvrir toute la zone portuaire, de plus, certaines positions ont été choisies en correspondance avec les stations fixes et/ou mobiles d'ARPAS afin de pouvoir effectuer une comparaison des données (MS, IB, OP et OC). Plus de détails sur les postes de travail individuels sont donnés dans la pièce jointe 1 - UNICA.

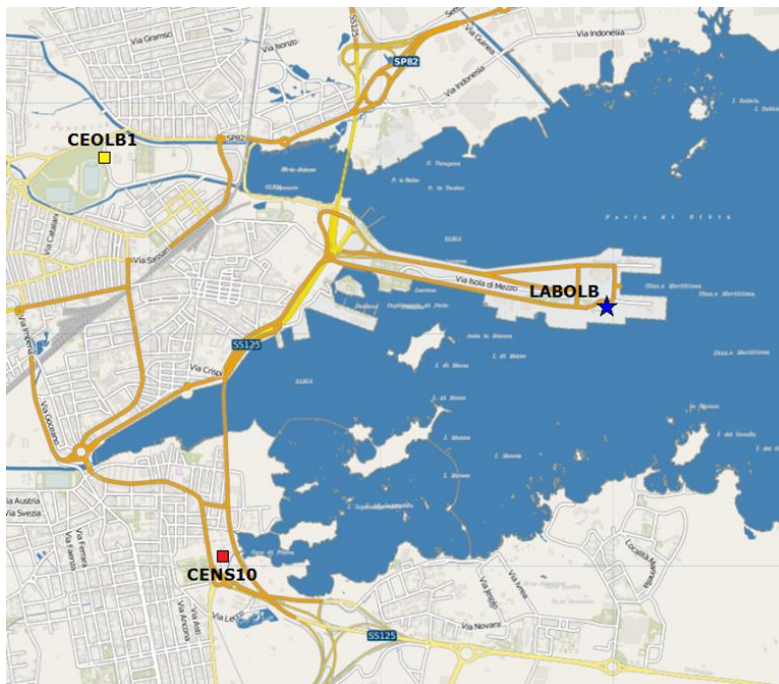


Figure 2.2.3: Carte des emplacements dans la région d'Olbia (ARPAS).



Figure 2.2.4: Carte des emplacements dans la région d'Olbia (UNICA).

La période de surveillance de l'ARPAS était la même pour toutes les stations de la zone du 29/10/2021 au 31/08/2022. L'Annexe 1 - ARPAS contient les Fichiers Station, numérotés respectivement de 1.5 à 1.7, qui décrivent les métadonnées de la station mobile et des stations fixes. L'annexe 2 - ARPAS, contient la feuille de période de mesure 2.2, qui résume les périodes d'échantillonnage de toutes les stations. UNICA a réalisé deux campagnes de surveillance dans le port d'Olbia, une en hiver et une en été. La campagne d'hiver a eu lieu en février, tandis que la campagne d'été a été réalisée en juin et juillet 2022. En particulier, les préleveurs passifs Radiello ont été exposés pendant une période de deux semaines, les préleveurs passifs PUF pendant cinq/six semaines, tandis que les deux compteurs de particules (ELPI et DiSCmini) n'ont été utilisés que pendant la campagne d'été, pendant quatre jours.

2.3. TOSCANE

Les sites d'intérêt pour l'étude du territoire dans le cadre de ce projet identifiés par l'ARPAT sont les suivants:

- trois sites de stations fixes RRQA dans la municipalité de Livourne : LI-Cappiello (UB), LI-La Pira (UB) et LI-Carducci (UT);
- un site hébergeant une station fixe d'intérêt local dans la commune de Collesalvetti à Stagno : LI-Stagno (UI);
- trois sites pour les enquêtes sur les équipements mobiles dans le territoire portuaire provincial, deux dans le port de Livourne et un dans le port de Portoferraio (île d'Elbe) : Fortezza Vecchia, Calata Bengasi et Portoferraio.

Ces sites représentent les différentes réalités portuaires de la province de Livourne : la réalité commerciale-industrielle dans la partie nord représentée par le site de Calata Bengasi (UI), la réalité commerciale-touristique dans la zone centrale de la ville représentée par le site de Fortezza Vecchia (UI), et la réalité strictement touristique représentée par le site de Portoferraio (UI) sur l'île d'Elbe, située au sud de Livourne dans la municipalité de Portoferraio.

Les périodes d'échantillonnage étaient les mêmes pour les quatre stations fixes de Livourne, et des périodes différentes pour les trois stations mobiles. Sur le site de Portoferraio, en revanche, une seule période d'analyse était prévue.

Tableau 2.3.1: Description des sites d'intérêt et typologie.

Type de site		Nom du site	Période d'échantillonnage par site	
			Début de l'échantillonnage	Début de l'échantillonnage
Stations fixes	UB	LI-Cappiello	01/07/21	30/06/22
	UB	LI-La Pira	01/07/21	30/06/22
	UT	LI-Carducci	01/07/21	30/06/22
	UI	LI-Stagno	01/07/21	30/06/22
Stations mobiles	UI	Fortezza Vecchia	16/07/21	07/08/21
			14/10/21	30/11/21
			01/12/21	09/01/22
			29/04/22	30/06/22
	UI	Calata Bengasi	16/07/21	10/09/21
			14/10/21	12/10/21
			01/12/21	01/03/22
			02/03/22	27/04/22
	UI	Portoferraio	07/07/21	14/09/21

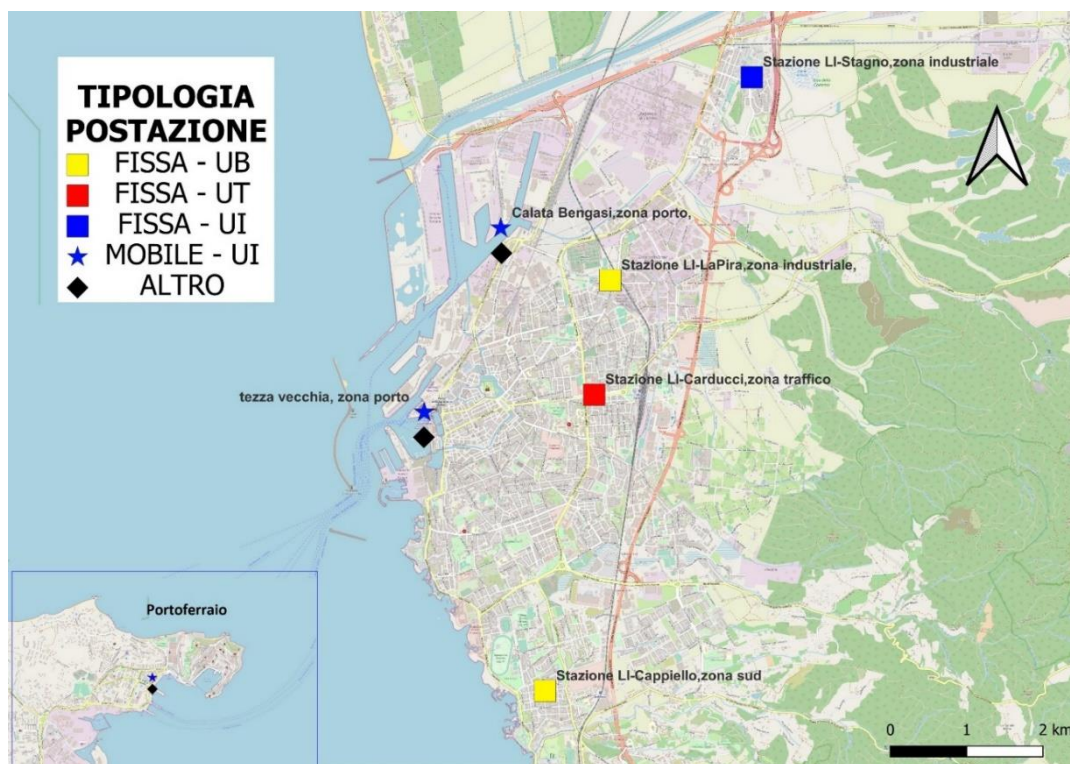


Figure 2.3.1: Description des sites d'intérêt et typologie.

Quatre enquêtes saisonnières ont été réalisées avec des échantillonneurs passifs pour le SO₂ et le NO₂ sur dix sites situés dans la municipalité de Livourne et ses environs: un site dans la zone portuaire et neuf sites dans la zone urbaine s'étendant à partir du port de Livourne:

- vers le nord, dans la localité plus touristique de Calambrone (commune de Pise) et dans la localité industrielle de Stagno (commune de Collesalveti) à proximité de la raffinerie;
- vers le centre ville, à l'interface port-ville des zones du centre ville caractérisées par la circulation automobile et les activités commerciales ;
- vers le sud, dans des quartiers à dominante résidentielle.

La carte montre les dix sites couverts par cette enquête, tandis que les tableaux décrivent les caractéristiques des dix sites et les périodes d'enquête.

Tableau 2.3.2: Description des sites d'intérêt et typologie.



Figure 2.3.2: Échantillonneur radiello.

Stations d'échantillonneurs		
Nom du site	Type de site	Type de station
Calambrone	U	B
Via Enriques	U	I
Via La Pira	U	B
Piscina Bastia	U	B
Palestra Gemini	U	B
Scoglio della Regina	U	B
Via Toti	U	B
Calata Bengasi	U	I
Via Marradi	U	T
Centro città	U	T

Tableau 2.3.3: Liste des périodes d'échantillonnage et des sites équipés d'échantillonneurs passifs.

Période d'échantillonnage par site		
Nom du site	Nom du site	Nom du site
Stations d'échantillonneurs passifs	03/08/21	07/09/21
	30/11/21	24/12/21
	03/03/21	17/03/21
	17/03/21	01/04/21

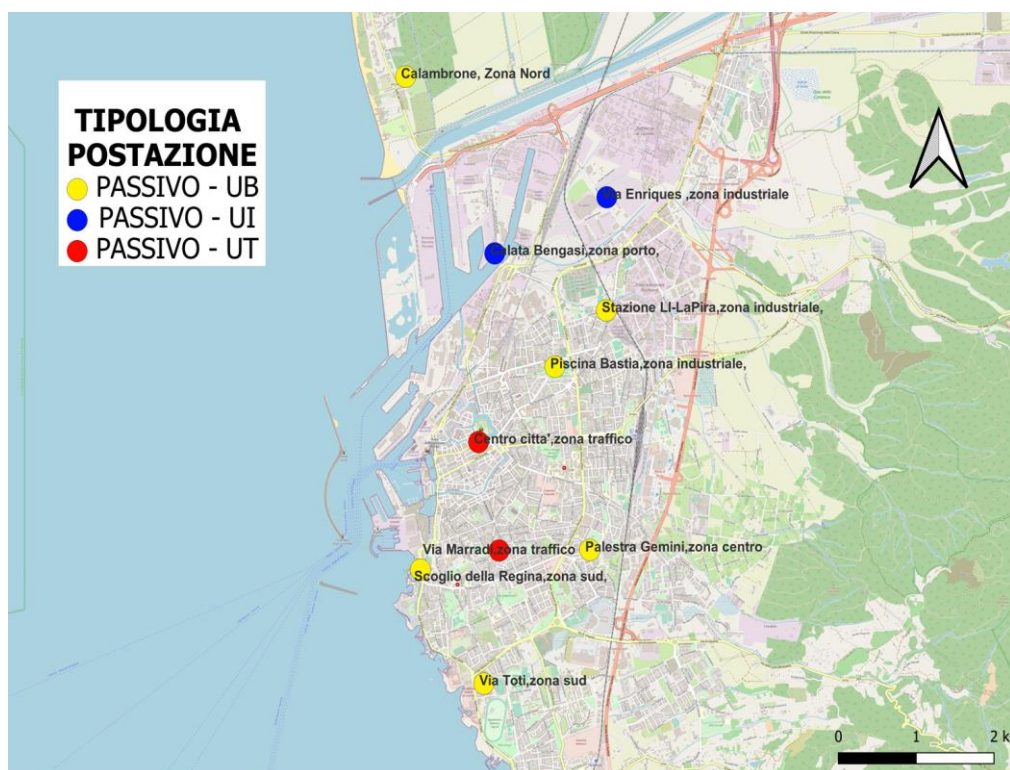


Figure 2.3.3: Description des sites pour l'échantillonnage passif.

L'annexe 1 - ARPAT contient les cartes de station, qui décrivent également les paramètres surveillés dans chaque station et les méthodes. L'annexe 2 - ARPAT contient la feuille de période de mesure et résume les périodes d'échantillonnage de toutes les stations.

2.4. RÉGION PACA

Le dispositif de cette campagne est réparti sur trois zones, localisées au niveau du port de Toulon, du port de la Seyne-Brégaillon et du Parc d'Activités Marines (PAM) de Saint Mandrier, situé près de l'entrée de la rade. Ce dispositif est composé de stations fixes du réseau de mesures permanent d'AtmoSud, de stations mobiles, ainsi que d'un jeu de microcapteurs installés chez des riverains résidant à des hauteurs différentes. D'abord installée en 2020 sur le toit de la DDTM83 (Direction Départementale des Territoires et de la Mer du Var), la cabine de Toulon a été déplacée le 15/06/21 à l'entrée du terminal ferry TCA, de façon à mieux intercepter les vents en provenance de la rade. Une cabine instrumentée par le Laboratoire de Chimie de l'Environnement a également été installée près de la cabine AtmoSud, de manière à enregistrer des données complémentaires aux données acquises dans le cadre de la surveillance classique de la qualité de l'air.

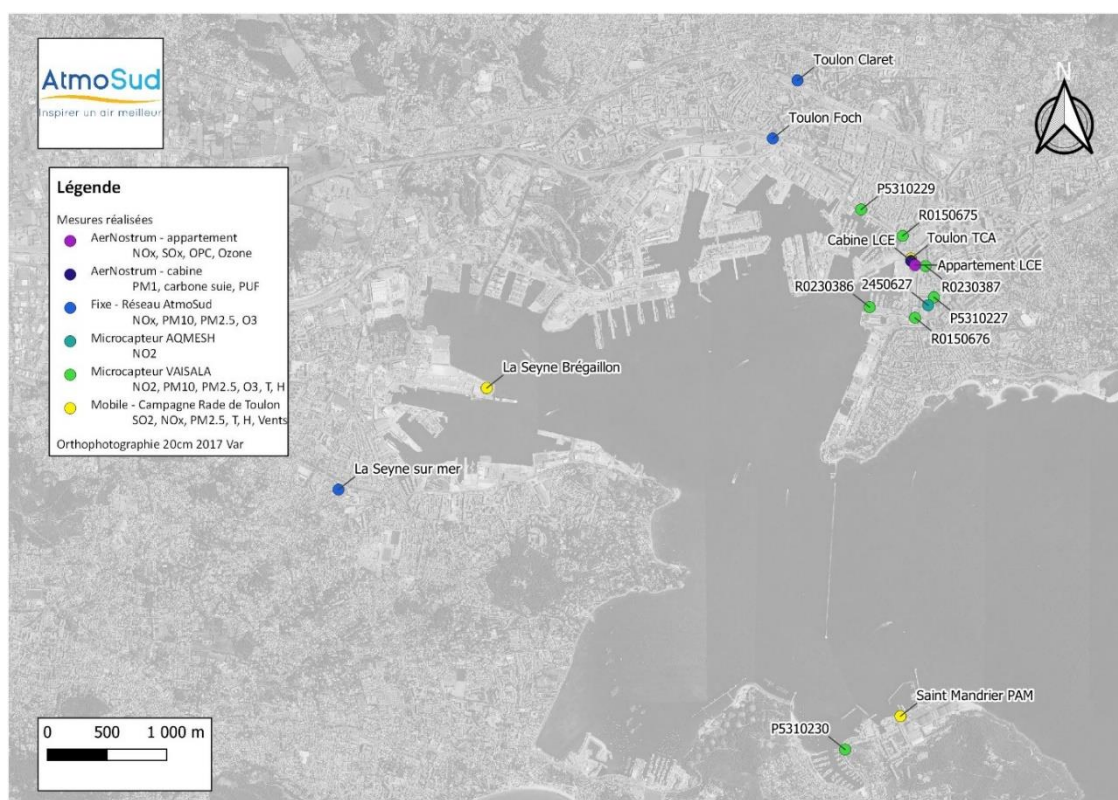


Figure 2.4.1: Carte du système installé dans la rade de Toulon-la Seyne-Brégaillon en 2021.

Le tableau indique les périodes d'échantillonnage et les sites.

La liste des paramètres mesurés, les instruments 13esoluti, la 13esolution temporelle de ces mesures et les coordonnées des points de mesure sont présentés en Annexe 1 – Atmosud.

Tableau 2.4.1: Liste des périodes et des sites d'échantillonnage.

Type de cabine	Site	Période d'échantillonnage
Cabines mobiles Atmosud	Brégaillon	28/07/2021 – 06/10/2021
	Saint Mandrier	28/07/2021 – 06/10/2021
	Porto di Toulon	15/06/2021
Cabine mobile LCE	Port de Toulon	25/08/2021 – 21/09/2021
Micro capteurs		10/08/2021 – 20/10/2021

Il est à noter que sur les huit microcapteurs installés, deux n'ont pas fonctionné (P5310230 et R0230386 sur la carte).

En plus des données de concentration, les cabines mobiles du TCA de Toulon et de Brégaillon ont été utilisées pour collecter des données météorologiques, notamment celles relatives à la vitesse et à la direction du vent qui seront décrites plus loin.

Tableau 2.4.2. Liste des espèces mesurées et des instruments utilisés pour chaque élément du dispositif de mesure.

Stations	Mesures	Instruments	Résolution
Cabine mobile AtmoSud Port de Toulon	PM2.5	BAM1020 (MetOne)	1h
	Black carbon	AE33 (Magee)	10s, 15min
	SO ₂	API100E (Teledyne)	10s, 15min
	NO _x	API200E (Teledyne)	10s, 15min
	O ₃	API400E (Teledyne)	10s, 15min
	Particules fines	EnviCPC100 (Pallas)	10s, 15min
	Métaux lourds	PX375 (Horiba)	1h
	Température/Humidité/Vents	Tridi USA-1 (Metek)	10s, 15min
Cabine mobile LCE Port de Toulon	PM1, carbone suie, nombre et taille des particules + analyse de leurs composantes chimiques	MAAP (Thermo)	1min
		SMPS (Grimm)	2min
		AMS (Aerodyne)	30s
		OPC (Grimm)	1min
	CO, CO ₂ , CH ₄	G2401 (Picarro)	5s
Cabine mobile AtmoSud La Seyne Brégaillon	SO ₂	API100E (Teledyne)	10s, 15min
	NO _x	API200E (Teledyne)	10s, 15min
	PM2.5	BAM1020 (MetOne)	1h
	Température/Humidité/Vents	Tridi USA-1 (Metek)	10s, 15min
Cabine mobile AtmoSud Saint Mandrier PAM	SO ₂	APS370 (Horiba)	10s, 15min
	NO _x	APNA370 (Horiba)	10s, 15min
	PM2.5	BAM1020 (MetOne)	1h
Station fixe AtmoSud La Seyne sur Mer	NO _x	API200E (Teledyne)	15min
Station fixe AtmoSud Toulon Claret	PM2.5	BAM1020 (MetOne)	1h
	PM10	BAM1020 (MetOne)	1h
	NO _x	API200T (Teledyne),	15min
	O ₃	SERINUS10 (Ecotech)	15min
Station fixe AtmoSud Toulon Foch	NO _x	API200E (Teledyne)	15min
	PM10	BAM1020 (MetOne)	1h
Microcapteurs riverains VAISALA (7 sites)	NO ₂ + PM2.5 + PM10 + O ₃ + Température/Humidité	AQT420	5min, 15min
Microcapteurs riverains AQMesh (1 site)	NO ₂	AQMesh Combo	5min, 15min

2.5. CORSE

Dans le cadre du projet AER NOSTRUM, deux campagnes de mesure ont été mises en place autour des ports d'Ajaccio et de Bastia. Celles-ci s'appuient sur une partie du réseau fixe de surveillance de Qualitair Corse, à laquelle se rajoutent des stations mobiles ainsi qu'une flotte de micro-capteurs. Enfin, quatre stations météo ont été ajoutées afin de corrélérer les données obtenues avec les différentes sources de pollution.

L'objectif de cette campagne est de quantifier la contribution des navires à la pollution globale, notamment celle issue du trafic routier et des centrales thermiques présentes à proximité plus ou moins immédiate des villes. Elle s'inscrit dans le cadre de la partie T1 du projet AER NOSTRUM, et vise à approfondir les connaissances sur la qualité de l'air en milieu portuaire à proximité des villes.

Afin de mener à bien ces missions, Qualitair Corse a pu bénéficier du soutien de résidents locaux ayant accepté de recevoir chez eux des micro-capteurs mesurant au plus près l'impact des navires dans les habitations. De même, grâce au soutien de la Mairie de Bastia ainsi que des Chambres de Commerce et d'Industrie de Corse, le réseau complet de mesure a pu être déployé, au plus proche des ports.

En plus d'apporter des réponses plus précises sur l'état actuel de la pollution, les données recueillies servent à calibrer deux modèles chacun d'un maillage d'environ 2.5km x 2.5km autour de chaque port.



Figure 2.5.1: Maillage Ajaccio (2.5km x 2.5km) et Maillage Bastia (2.5km x 2.5km).

Les premiers instruments de mesures ont été progressivement déployés dans le cadre de la campagne AER NOSTRUM à partir de début juillet 2021, pour une fin officielle de mesure fin septembre 2022. Deux périodes estivales sont donc comprises, offrant alors la possibilité de comparer les mesures durant la haute saison à celle de la basse saison, et d'une année sur l'autre. Les périodes choisies dans la cadre de cette étude sont les suivantes.

Tableau 2.5.1: Périodes d'échantillonnage choisies pour cette étude.

Période d'analyse	
01/07/2021	30/09/2021
01/07/2021	01/07/2022
01/07/2022	30/09/2022

La campagne de mesure a pour objectif d'avoir la meilleure représentativité de la qualité de l'air autour des ports de Bastia et Ajaccio au moyen de différents instruments positionnés à des emplacements stratégiques, plus ou moins proches des ports et à des hauteurs différentes. Les informations météorologiques ainsi que les différentes données logistiques et techniques du port compléteront le modèle.

Qualitair Corse possède déjà dans chaque ville, à proximité des ports, les stations de références suivantes.

- Un site urbain [PM₁₀ / PM_{2,5} / PM₁ (+ comptage 180nm → 18 µm), NO_x, SO₂ e Météo (DV, VV, TC, PA, HR)];
- Un site trafic (PM₁₀, NO_x, SO₂ e Météo (DV, VV)).

A cela a été rajouté un lot de micro capteurs NO₂ (x12) et PM_x (x10) ainsi que 4 stations météo pour étendre au maximum le périmètre d'action. Les emplacements des capteurs sont choisis principalement par rapport à leur pertinence pour le projet mais dépendent aussi des contraintes techniques et administratives.

Enfin, un compteur de particules ultra fines CPC ainsi qu'un analyseur de PM_x viennent renforcer en précision le maillage de ces mesures dans une station mobile sur Bastia.

Les données des stations fixes et mobiles sont automatiquement transférées dans la base de données de Qualitair Corse, puis intégrées au modèle. Celles des micro-capteurs sont transférées sur le site du fournisseur, puis intégrées dans notre base de données par la suite au moyen d'API, application faisant l'interface entre les bases de données et le logiciel de traitement.

Toutes les informations des mesures sont compilées dans l'Annexe 2 - QualitairCorse.

• Zone du port d'Ajaccio

Au total, sept lieux ont été choisis pour mailler au mieux la campagne de mesures. Quatre à proximité immédiate du port et trois en ville.

Pour compléter les mesures de polluants, deux nouvelles stations météo ont été installées au niveau du local des accès du port de commerce ainsi que sur la capitainerie sud Tino Rossi, venant s'ajouter à celle déjà existante sur Canetto.



Figure 2.5.2: Carte du système installé à Ajaccio en 2021.

Les instruments sur Ajaccio se décomposent selon le parc suivant:

- trois stations météo;
- cinq couples de micro-capteurs NO₂ / PMX;
- Deux analyseurs de PMX, modèle FIDAS (Particules fines PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀);
- Deux analyseurs de SO₂;
- Deux analyseurs de NO₂.

Tableau 2.5.2: Liste des lieux et instruments pour la campagne AER NOSTRUM sur Ajaccio.

Lieux	Instruments	Pas de temps	Coordonnées	Hauteurs au sol
Local des accès	Micro-capteur PMX	1h	41°55'34.774"N 8°44'22.55"E	5m
	Micro-capteur NO ₂ + DV / VV	1/4h		
Gare maritime	Micro-capteur PMX	1h	41°55'17.584"N 8°44'23.331"E	20m
	Micro-capteur NO ₂	1/4h		
Capitainerie Sud AJA	Micro-capteur PMX	1h	41°55'5.236"N 8°44'36.342"E	10m
	Micro-capteur NO ₂ + DV / VV	1/4h		
Hôpital Ajaccio	Micro-capteurs NO ₂ /PMX	1h	41°55'23.017"N 8°44'9.419"E	15m
Station fixe Canetto	Micro-capteur PMX	1h	41°55'28.938"N 8°44'8.587"E	3m
	FIDAS (PMX) + NO _x + SO ₂ + Micro-capteur NO ₂ + DV / VV	1/4h		
Station fixe Abbatucci	NO _x + SO ₂ + CO + PM ₁₀	1/4h	41°55'32.46"N 8°44'17.979"E	3m
Station temporaire Sampiero	MiniMOB (FIDAS PMX + SO ₂)	1/4h	41°55'25.474"N 8°44'21.504"E	3m

Les emplacements avec des dispositifs calibrés selon les directives du LCSQA sont grisés dans le tableau et correspondent aux stations temporaires et fixes du dispositif de mesure.

• Zone du port de Bastia

Concernant la ville de Bastia, la topologie particulière du lieu permet de définir plusieurs points de mesures à différentes hauteurs permettant d'affiner la représentation spatiale 3D de la modélisation.

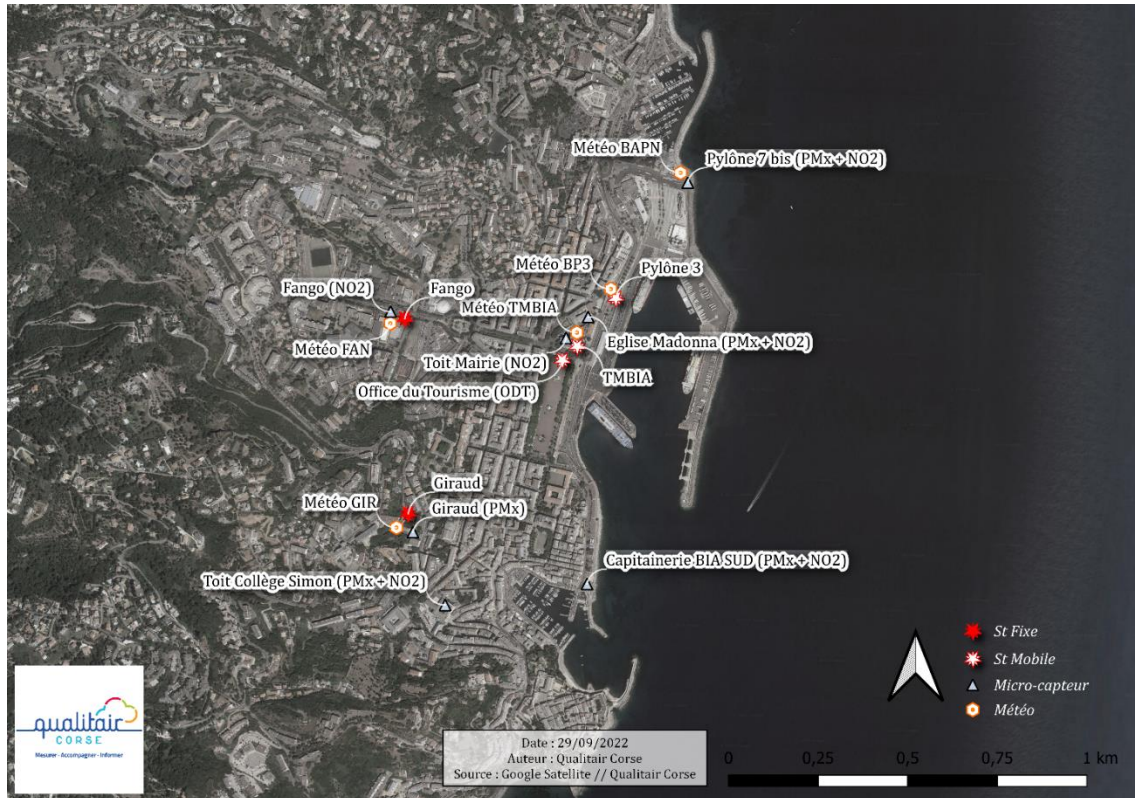


Figure 2.5.3: Carte du dispositif déployé sur Bastia en 2021.

Les instruments se décomposent selon le parc suivant :

- Cinq stations météo;
- Cinq couples de micro-capteurs NO₂ / PMX ;
- Deux analyseurs PM, modèle FIDAS (particules fines PM1, PM2.5 e PM10);
- Un analyseur NO_x + Un capteur NO₂;
- Un Compteur de Particules CPC (7nm -> 1um);
- Un Analyseur de PMX, modélé EDM180 (PM1, PM2.5 e PM10).

Tableau 2.5.3: Liste des lieux et instruments pour la campagne AER NOSTRUM sur Bastia.

Lieux	Instruments	Pas de temps	Coordonnées	Hauteurs au sol
Pylône 7 bis	Micro-capteur PMX	1h	42°42'12.061"N 9°27'12.549"E	3m
	Micro-capteur NO ₂ + DV / VV	1/4h		
Capitainerie Sud BIA	Micro-capteur PMX	1h	42°41'46.238"N 9°27'8.996"E	5m
	Micro-capteur NO ₂	1/4h		
Eglise Madonna	Micro-capteur PMX	1h	42°42'10.382"N 9°27'9.346"E	15m
	Micro-capteur NO ₂	1/4h		
Collège Simon	Micro-capteur PMX	1h	42°41'44.325"N 9°26'51.604"E	20m
	Micro-capteur NO ₂	1/4h		
Toit Mairie	Micro-capteur NO ₂	1h	42°42'8.165"N 9°27'7"E	25m
	FIDAS (PMX) + DV/VV	1/4h		
Station fixe Fango	PM10 + NO _x + SO ₂ + DV/VV	1/4h	42°42'10.23"N 9°26'46.703"E	3m
Station fixe Giraud	Micro-capteur PMX	1h	42°41'52.638"N 9°26'47.006"E	3m
	FIDAS (PMX) + NO _x + SO ₂ + DV/VV	1/4h		
Station temporaire ODT	FIDAS (PMX) + NO _x	1/4h	42°42'7.065"N 9°27'6.315"E	3m
Station temporaire Pylône 3	PMX + CPC + SO ₂ + DV/VV	1/4h	42°42'22.457"N 9°27'21.36"E	15m

3. Capteurs low cost ou autres instruments non conventionnels

Table des figures

Figure 3.1.1: Enregistreur de données ACRONET et Enregistreur de données ZENO.	22
Figure 3.1.2: Capteur UniTec SENS-IT.	23
Figure 3.1.3: Capteur.....	24
Figure 3.1.4: Lignes de régression entre les instruments intelligents et de référence et évolution temporelle des PM1, PM2.5 et PM10 sur le site de Largo San Francesco da Paola -San Teodoro.	27
Figure 3.1.5: Site de tests de Gênes - Corso Europa.	27
Figure 3.1.6: Études de corrélation des PM10 et PM2.5 entre les instruments intelligents et de référence sur le site de Gênes - Corso Europa. Dans le tableau, les principaux indicateurs statistiques obtenus avec R.....	28
Figure 3.1.7: Études de corrélation des NO ₂ entre les instruments intelligents et de référence sur le site de Gênes - Corso Europa. Dans le tableau, les principaux indicateurs statistiques obtenus avec R.	28
Figure 3.1.8: Études de corrélation des NO ₂ entre les instruments intelligents et de référence et entre les deux instruments intelligents sur le site de Gênes Largo San Francesco da Paola-San Teodoro.	29
Figure 3.1.9: Études de corrélation des PM10 entre les instruments intelligents et de référence et entre les deux instruments intelligents sur le site de Gênes Largo San Francesco da Paola-San Teodoro.	30
Figure 3.2.1 Corrélation linéaire entre les concentrations de NO ₂ (µg/m ³), SO ₂ (µg/m ³), benzène (µg/m ³) et Σ6 HAP (ng/m ³) obtenues par échantillonnage passif (PUF, Radiello) et celles obtenues par échantillonnage actif par ARPAS.	31
Figure 3.3.1: Compteurs de particules : OPC et NanoScan.	33
Figure 3.3.2: Corrélation entre la concentration de PM10 et PM2.5 obtenues avec l'OPC et la méthode gravimétrique.	34
Figure 3.4.1: Corrélation station/microcapteur sur la période allant du 28/07/21 au 10/08/21 à la station Toulon Claret.....	37
Figure 3.4.2: Corrélation station/microcapteur sur la période allant du 07/10/21 au 20/10/21 à la station Toulon Claret	37
Figure 3.5.1: Comparaison mesures PM _{2.5} – St fixe Giraud / µCapteurs Airly.....	40
Figure 3.5.2: Comparaison mesures NO ₂ – St fixe Fango / µCapteurs Agriscope.....	42
Figure 3.5.3: Comparaison mesures NO ₂ – St fixe Canetto / µCapteurs Agriscope.....	42
Figure 3.5.4: Comparaison µCapteurs NO ₂ avec station de référence Canetto.....	43
Figure 3.5.5: Capteurs extérieurs Ellona en reproductibilité sur Giraud, Bastia (la gauche)	45
Figure 3.5.6: Capteurs Intérieurs Ellona en reproductibilité à Qualitair Corse, Corte.	45
Figure 3.5.7: Comparaison PM10 Ellona / Station de référence Giraud.	45
Figure 3.5.8: Comparaison NO ₂ Ellona / Station de référence Giraud.....	46
Figure 3.5.9: Comparaison SO ₂ Ellona / Station de référence Giraud.....	46

Table des tableaux

Tableau 3.1.1: Caractéristiques techniques de l'instrument.....	24
Tableau 3.3.1: Liste des périodes d'échantillonnage et des sites équipés de compteurs optiques de particules.....	33
Tableau 3.3.2: Comparaison des données relatives aux PM10 et PM2.5 obtenues avec l'OPC et la méthode gravimétrique.	34
Tableau 3.3.3: Comparaison des valeurs moyennes obtenues avec les échantillonneurs passifs et la méthode officielle.	35
Tableau 3.3.4: Comparaison des valeurs moyennes obtenues avec les échantillonneurs passifs et la méthode officielle	35
Tableau 3.5.1: Types de site de mesure – Ajaccio.	38
Tableau 3.5.2: Types de site de mesure – Bastia.....	39
Tableau 3.5.3: Coefficients de validation pour le PM2.5 - Source, Air Quality Sensor & CEN/TC264/WG42.	40
Tableau 3.5.4: Résultats régression linéaire pour les capteurs Airly en comparaison avec la station fixe Giraud.	41
Tableau 3.5.5: Données régression linéaire pour µCapteurs PM (évaluation sur les PM2.5).	41
Tableau 3.5.6: Résultats régression linéaire NO ₂	43
Tableau 3.5.7: Résultats Coefficients de régression linéaire NO ₂	44
Tableau 3.5.8: Identifiants et Emplacements des capteurs Ellona.....	44

Ce chapitre présente les capteurs low cost et toute l'instrumentation non conventionnelle utilisée dans le projet. Chaque partenaire présente sa propre instrumentation donnant des indications sur les méthodes utilisées pour valider les données obtenues.

3.1 LIGURIE

Les capteurs intelligents utilisés par ARPAL pour déterminer les NO₂ et les particules sont illustrés ci-dessous.

Il faut préciser que la collecte des données sur le terrain, le prétraitement et la transmission (via un réseau 4G) au centre de collecte sont effectués à l'aide de deux modèles différents d'enregistreurs de données, la station ACRONET (utilisée dans les systèmes réalisés par CIMA) et Zeno (utilisée dans les systèmes réalisés par ORION).



Figure 3.1.1: Enregistreur de données ACRONET et Enregistreur de données ZENO.

		
Station « Orion » pour la mesure en temps réel des PMX et l'échantillonnage sur filtre (dans sa configuration avec alimentation par panneau solaire)	Station « Orion » pour la mesure en temps réel des NO₂ et PMX.	Station « CIMA » pour la mesure en temps réel des NO₂ et PMX.

Mesure de NO₂

- SENS-IT

Les capteurs SENS-IT sont fabriqués par ORION srl et ont été sélectionnés par les deux fournisseurs d'instruments intelligents identifiés dans ce projet, CIMA et bien sûr Orion. Ces capteurs sont basés sur

le principe connu sous le nom de Thick Film - Metal Oxide Semiconductor (TF-MOS) ; le phénomène à la base de leur fonctionnement est l'adsorption sur la surface du capteur d'ions oxygène qui réagissent avec les gaz polluants présents dans l'air. Lorsque le semi-conducteur à base d'oxydes métalliques est chauffé à une certaine température, l'oxygène contenu dans l'air est adsorbé sous forme ionique à sa surface. Les électrons de la bande de conduction du semi-conducteur sont transférés de la zone de surface à l'oxygène adsorbé. Une zone d'appauvrissement se crée près de la surface et un potentiel de surface est généré, qui agit comme une barrière empêchant le flux d'électrons entre les grains. En présence de gaz réducteurs, la densité de surface de l'oxygène chargé négativement diminue la hauteur de la barrière, qui baisse au contact des grains. La hauteur réduite de la barrière diminue la résistance du capteur, qui est alors détectée par l'électronique. En présence de gaz oxydants, en revanche, la réaction entraîne une diminution des électrons libres et une augmentation de la barrière de potentiel et donc de la résistance du capteur. La conductivité est directement liée à la concentration du gaz. La base du capteur (2,5 x 2,5 mm) se compose d'un substrat en alumine, d'une couche chauffante et d'une couche isolante. La couche active de détection est constituée de particules nanométriques d'oxyde métallique semi-conducteur (film épais). Le signal est recueilli par deux électrodes en or. Les principales caractéristiques du capteur sont présentées ci-dessous :

- Dimensions : 50 x 50 x 140 (h) mm
- Sortie : RS485 et analogique 0-5 V
- Consommation : 150 mA (12Vdc)
- CPU intégrée avec tampon de données

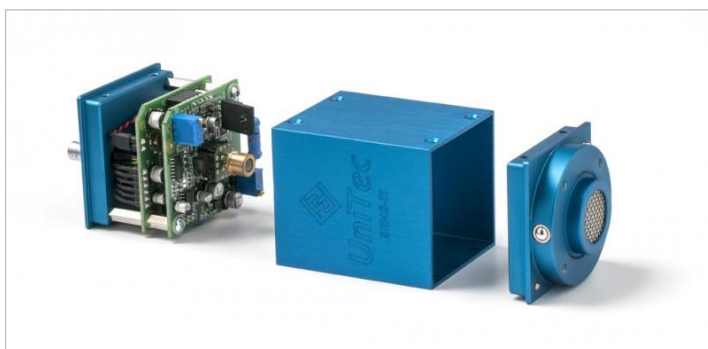


Figure 3.1.2: Capteur UniTec SENS-IT.

Mesure des PM10

Les particules sont déterminées à l'aide de deux capteurs différents. Sur 8 systèmes (réalisés par Orion) on a utilisé le capteur SPS30, sur les 4 systèmes réalisés par CIMA le capteur FDS15.

Parallèlement à la mesure des particules en temps réel, 4 des systèmes réalisés par Orion sont équipés d'un micro-échantillonneur MICROVOL 1110. La présence de ce système a permis de vérifier la justesse de la mesure en temps réel. Cette vérification n'est toutefois possible qu'à moyen terme, car l'utilisation d'un débit d'échantillonnage de 3 l/min signifie que, pour les concentrations typiques de la zone d'étude, il faut au moins dix jours pour avoir une accumulation suffisante de particules afin d'effectuer une détermination gravimétrique ayant une incertitude faible.

Les principales caractéristiques des 3 capteurs utilisés pour les mesures sont détaillés ci-dessous.

- SPS30

Le capteur est fabriqué par Sensirion (<https://sensirion.com/>) et utilise un système optique pour la mesure et la surveillance en continu des particules, qui sont détectées par mesure optique de la lumière diffusée (optical scattered light measurement), comme le montre la figure ci-dessous.

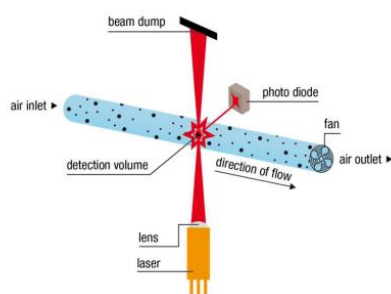


Figure 3.1.3: Capteur.

Le tableau suivant présente les principales caractéristiques techniques : comme on peut le constater, l'instrument permet de mesurer les fractions ayant un diamètre aérodynamique de 1 - 2,5 - 4 - 10 μm et la distribution relative du nombre de particules par unité de volume.

Tableau 3.1.1: Caractéristiques techniques de l'instrument.

Parameter	Conditions	Value	Units
Mass concentration range	-	0 to 1'000	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Mass concentration size range	PM1.0	0.3 to 1.0	μm
	PM2.5	0.3 to 2.5	μm
	PM4	0.3 to 4.0	μm
	PM10	0.3 to 10.0	μm
Mass concentration precision ^{1,2} for PM1 and PM2.5 ³	0 to 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	± 10	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
	100 to 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	± 10	% m.v.
Mass concentration precision ^{1,2} for PM4, PM10 ⁴	0 to 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	± 25	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
	100 to 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	± 25	% m.v.
Maximum long-term mass concentration precision limit drift	0 to 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	± 1.25	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ / year
	100 to 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	± 1.25	% m.v. / year
Number concentration range	-	0 to 3'000	$\#/\text{cm}^3$
Number concentration size range	PM0.5	0.3 to 0.5	μm
	PM1.0	0.3 to 1.0	μm
	PM2.5	0.3 to 2.5	μm
	PM4	0.3 to 4.0	μm
	PM10	0.3 to 10.0	μm
Number concentration precision ^{1,2} for PM0.5, PM1 and PM2.5 ³	0 to 1000 $\#/\text{cm}^3$	± 100	$\#/\text{cm}^3$
	1000 to 3000 $\#/\text{cm}^3$	± 10	% m.v.
Number concentration precision ^{1,2} for PM4, PM10 ⁴	0 to 1000 $\#/\text{cm}^3$	± 250	$\#/\text{cm}^3$
	1000 to 3000 $\#/\text{cm}^3$	± 25	% m.v.
Maximum long-term number concentration precision limit drift ²	0 to 1000 $\#/\text{cm}^3$	± 12.5	$\#/\text{cm}^3$ / year
	1000 to 3000 $\#/\text{cm}^3$	± 1.25	% m.v. / year
Sampling interval	-	1 $\pm$ 0.04	s
Typical start-up time ⁵	number concentration	200 – 3000 $\#/\text{cm}^3$	8 s
		100 – 200 $\#/\text{cm}^3$	16 s
		50 – 100 $\#/\text{cm}^3$	30 s
Sensor output characteristics	PM2.5 mass concentration		Calibrated to TSI DustTrak™ DRX 8533 Ambient Mode
	PM2.5 number concentration		Calibrated to TSI OPS 3330
Lifetime ⁶	24 h/day operation		> 10 years
Acoustic emission level	0.2 m	max.	25 dB(A)
Long term acoustic emission level drift	0.2 m	max.	+0.5 dB(A) / year
Additional T-dependent mass and number concentration precision limit drift ²	temperature difference to 25°C	typ.	± 0.5 % m.v. / °C
Weight	-		26.3 $\pm$ 0.3 g

- FDS15

Ce système est fabriqué par Dr. Foedisch AG (<https://www.foedisch.org/>) et est basé sur un capteur optique pour la mesure et la surveillance en continu des particules fines. Les particules sont détectées par mesure optique de la lumière diffusée (optical scattered light measurement). L'air à l'entrée, avant

de pénétrer dans la cellule de mesure, est aspiré par un ventilateur et, selon la température ambiante, est automatiquement préchauffé à 50 °C. Pour la mesure des PM2.5, une climatisation supplémentaire a lieu via un cyclone supplémentaire. L'ajout d'un précipitateur électrostatique supplémentaire permet de mesurer les concentrations dans des environnements très pollués (concentrations ponctuelles jusqu'à 2000 µg/m³ et concentrations moyennes jusqu'à 500 µg/m³). Le boîtier compact en aluminium permet d'effectuer des mesures dans toutes les conditions météorologiques.

Voilà ci-dessous les principales caractéristiques de mesure de l'instrument:

- Mesure des particules fines (PM10)
- Principe de mesure : scattered light (mesure de la lumière diffusée)
- Air d'admission chauffé jusqu'à 50 °C
- Débit forcé
- Contrôle périodique et correction du point zéro et du point de référence
- Boîtier : boîtier compact en aluminium ;
- Dimensions : 130 mm x 160 mm x 90 mm (L x H x P)
- Poids : environ 2 kg
- Degré de protection : IP 23
- Alimentation (en option) : 12-24 VDC, 2,1 A ; fusible min., 5 A
- Puissance absorbée en courant continu (max) : 50 W (24 VDC)
- Température de fonctionnement : -20 + 50 °C
- Humidité relative de l'air : jusqu'à 100 %.
- Capteurs : 2 capteurs optiques ; contrôle et acquisition du signal
- Débit : 2 l/min
- Interface : RS485 - Modbus
- Ventilateur : pour un débit forcé
- Chauffage : pour le conditionnement du gaz de mesure (maintien de la différence du point de rosée)
- Teneur en particules : jusqu'à 200 µg/m³
- Limite de détection : 2 µg/m³

- MICROVOL-1100

L'échantillonneur de particules MicroVol-1100 est un système permettant de prélever des particules PM10, PM2.5 ou PTS. Il se compose d'un système avec une pompe, un porte-filtre de 47 mm et une carte de contrôle du débit (qui est maintenu constant à la valeur fixée, généralement 3 l/min) et de stockage des données d'échantillonnage. Le système peut être contrôlé à distance afin que l'échantillonnage puisse être lancé lorsque certaines conditions se produisent.

1.2.1 Flow Control

Volumetric flow-rate range ¹ :	1 – 4.5 l/min
Flow accuracy:	2% of reading
Flow repeatability:	0.5% of reading

1.2.2 Inlet Assembly

Inlet Assembly material:	Anodised aluminium
Size Selective Inlets:	PM ₁₀ (standard), TSP (pending)
PM _{2.5} adaptor (option)	
Cut-point:	50% cut-point at 3 l/min volumetric flow-rate
Filter holder material:	Polycarbonate
Filter element:	Ø47mm Polypropylene-ringed circular filter (various materials and pore sizes available)

1.2.3 Operating environment

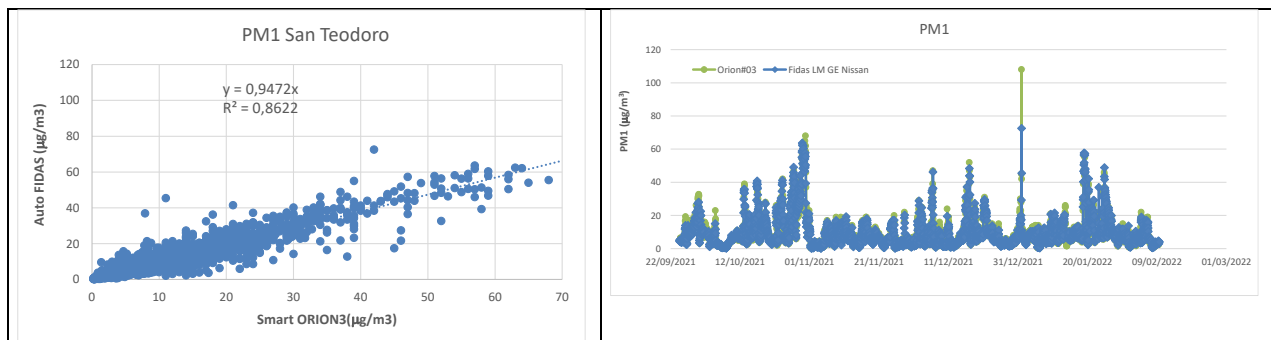
Ambient temperature range:	0 to +45°C
Temperature accuracy:	±1°C
Barometric pressure range:	600-900 mm Hg (Torr) (800-1200 hPa)
Barometric Pressure accuracy:	±4 mm Hg (Torr)



Comparaison entre les instruments intelligents et les instruments de référence

Dans ce paragraphe, les données mesurées par les capteurs intelligents sont comparées à celles des stations de référence : cette activité a été menée à différents moments sur deux sites appartenant au RQA ARPAL, Largo San Francesco da Paola-San Teodoro et Corso Europa. Le premier site est celui qui présente le plus d'intérêt pour le projet car il est certainement plus représentatif des impacts du port sur la zone urbaine. Le second site est celui caractérisé par les valeurs les plus élevées d'oxydes d'azote car il s'agit du site le plus impacté par le trafic de motorisé dans la ville de Gênes. Le premier site a été retenu parce qu'il présente les caractéristiques environnementales les plus similaires à celles où sont installés les instruments intelligents. Dans le second cas, nous avons opté pour le site où sont enregistrées les valeurs les plus élevées de NO₂ et, dans de nombreux cas, de PM₁₀.

La première phase de l'expérimentation s'est concentrée sur les particules relatives à la première fourniture d'instruments (capteur SPS30) et a été réalisée de manière quasi continue sur le site Largo San Francesco da Paola - San Teodoro de septembre 2021 à février 2022. Vous trouverez ci-dessous les données collectées avec quelques analyses statistiques.



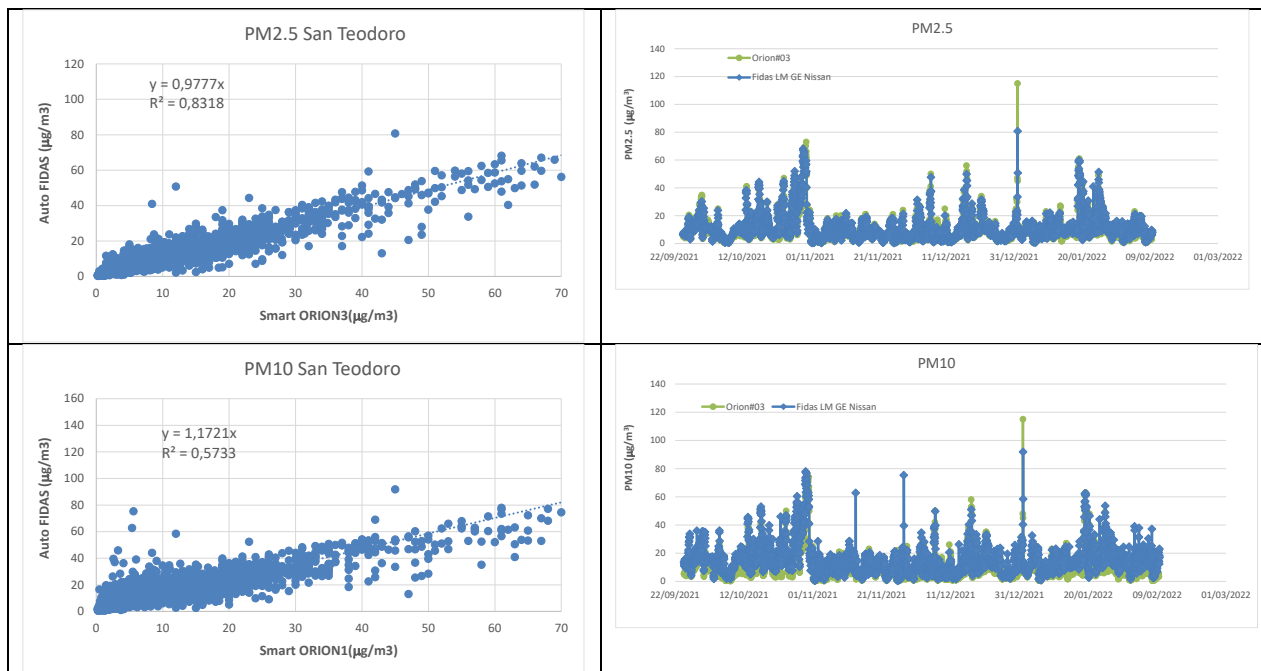


Figure 3.1.4: Lignes de régression entre les instruments intelligents et de référence et évolution temporelle des PM1, PM2.5 et PM10 sur le site de Largo San Francesco da Paola -San Teodoro.

D'après l'analyse des données, il est évident que les particules les plus fines sont mieux représentées, tandis que les PM10 ont un coefficient de corrélation moins robuste. Cela reflète l'une des principales limites de la plupart des systèmes optiques intelligents dans la détermination des particules, à savoir le volume d'échantillonnage limité qui est « analysé » par le système de mesure. En effet, alors que les instruments traditionnels comptent les particules individuelles dans le volume d'échantillonnage comme étant représentatif de l'air ambiant, les instruments low cost, ne capturant qu'une très petite fraction des particules d'aérosol (de l'ordre de 3 à 5%), doivent utiliser des procédures statistiques et des algorithmes d'extrapolation pour dériver la mesure à partir des plus petites fractions, car le « comptage » serait affecté par de trop grandes incertitudes. En effet, dans un aérosol typique, la densité des particules constituant la fraction PM10 est extrêmement faible et, par conséquent, les PM10 ne peuvent pas être mesurées directement par ce type de capteur, mais doivent être dérivées des valeurs des fractions les plus petites, qui sont en revanche plus faciles à déterminer.

Ensuite, une autre période de tests a été réalisée sur le site du RQA Gênes - Corso Europa : pendant environ un mois à compter de la mi-décembre 2021, des données ont été collectées à partir d'un système intelligent équipé d'un capteur PMX SPS30 et d'un capteur NO₂ Sensit. Les résultats de cette expérimentation sont très réconfortants, tant pour les PM2.5 que pour le NO₂, comme le montrent les graphiques ci-dessous.



Figure 3.1.5: Site de tests de Gênes - Corso Europa.

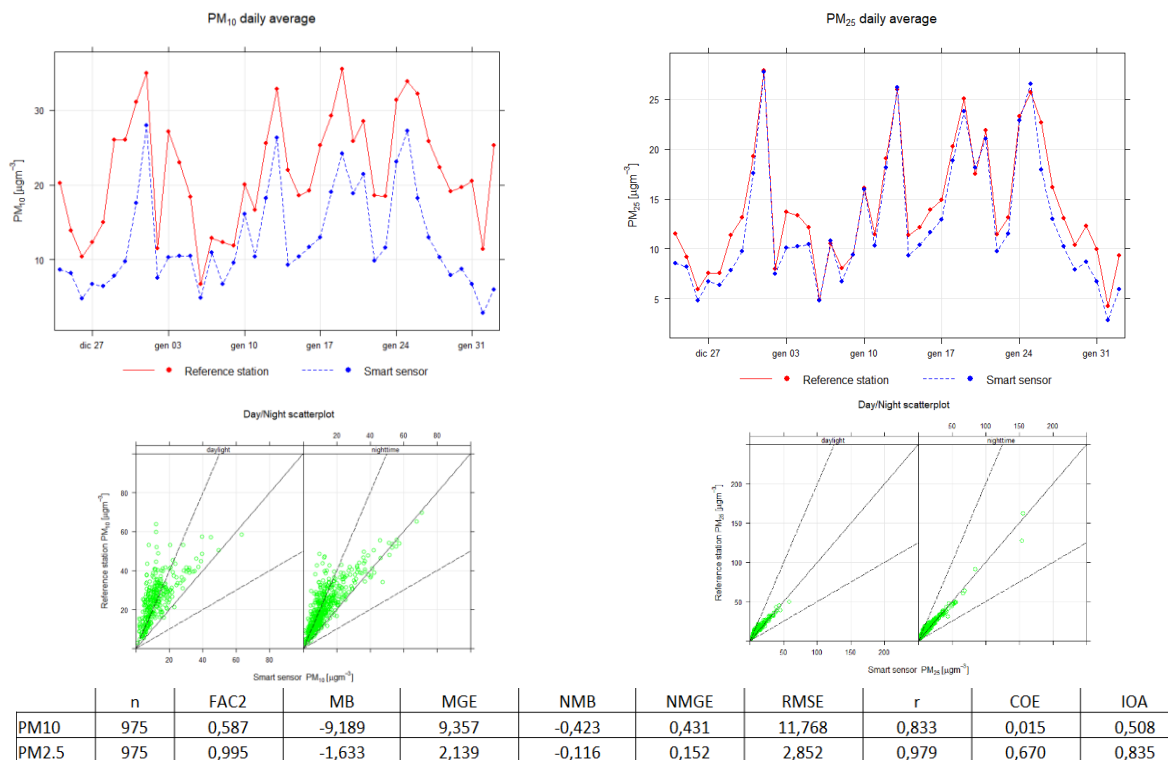


Figure 3.1.6: Études de corrélation des PM₁₀ et PM_{2.5} entre les instruments intelligents et de référence sur le site de Gênes - Corso Europa. Dans le tableau, les principaux indicateurs statistiques obtenus avec R.

Pour les PM₁₀, les considérations faites ci-dessus s'appliquent.

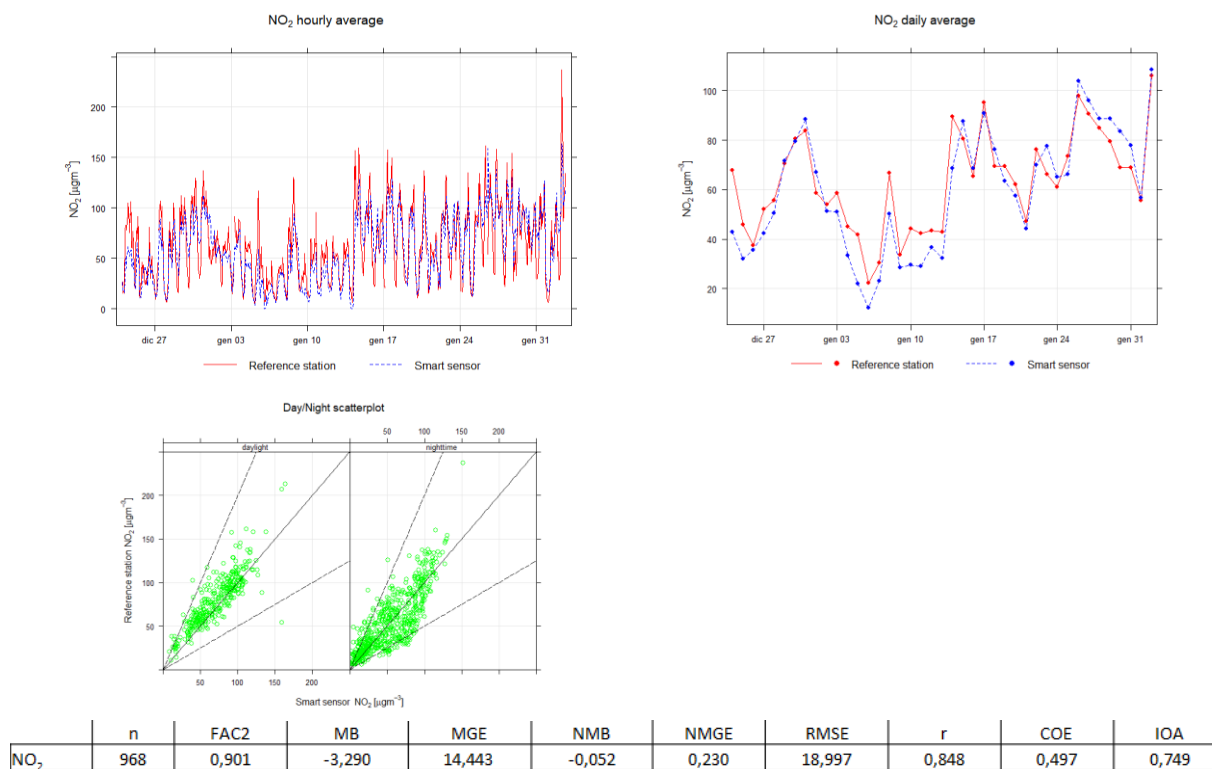


Figure 3.1.7: Études de corrélation des NO₂ entre les instruments intelligents et de référence sur le site de Gênes - Corso Europa. Dans le tableau, les principaux indicateurs statistiques obtenus avec R.

Pour les NO₂, la comparaison avec l'instrumentation de référence montre une excellente reproduction des valeurs moyennes horaires et journalières, tant en termes d'évolution temporelle que de valeurs absolues : on note que pendant la période de tests, les valeurs moyennes journalières ont été caractérisées par une grande variabilité avec des valeurs allant de 20 à plus de 100 µg/m³.

Au vu de ces résultats et aussi pour pallier les retards d'approvisionnement liés à la pandémie, au fur et à mesure que les instruments étaient livrés, ils étaient installés sur les sites de mesure après une brève période d'inter-comparaison au siège d'ARPAL. La comparaison avec les instruments de référence a été reportée à l'automne 2022, lorsque les volumes d'activités liés à la saison touristique du port sont certainement plus faibles et que la surveillance est moins significative.

Sur le site de Largo San Francesco da Paola - San Teodoro, cependant, l'appariement des instruments intelligents et de référence a été maintenu : ceci a été fait afin d'évaluer la corrélation entre les données tout au long de l'année civile et d'évaluer les éventuelles différences d'exactitude par rapport aux mesures traditionnelles liées à la saisonnalité.

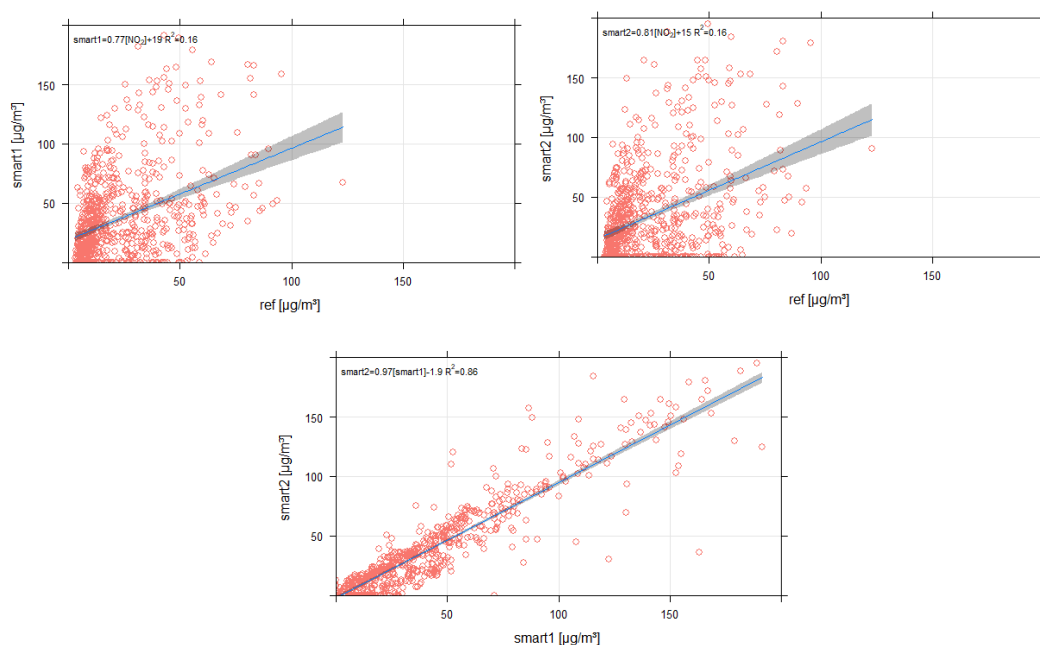


Figure 3.1.8: Études de corrélation des NO₂ entre les instruments intelligents et de référence et entre les deux instruments intelligents sur le site de Gênes Largo San Francesco da Paola-San Teodoro.

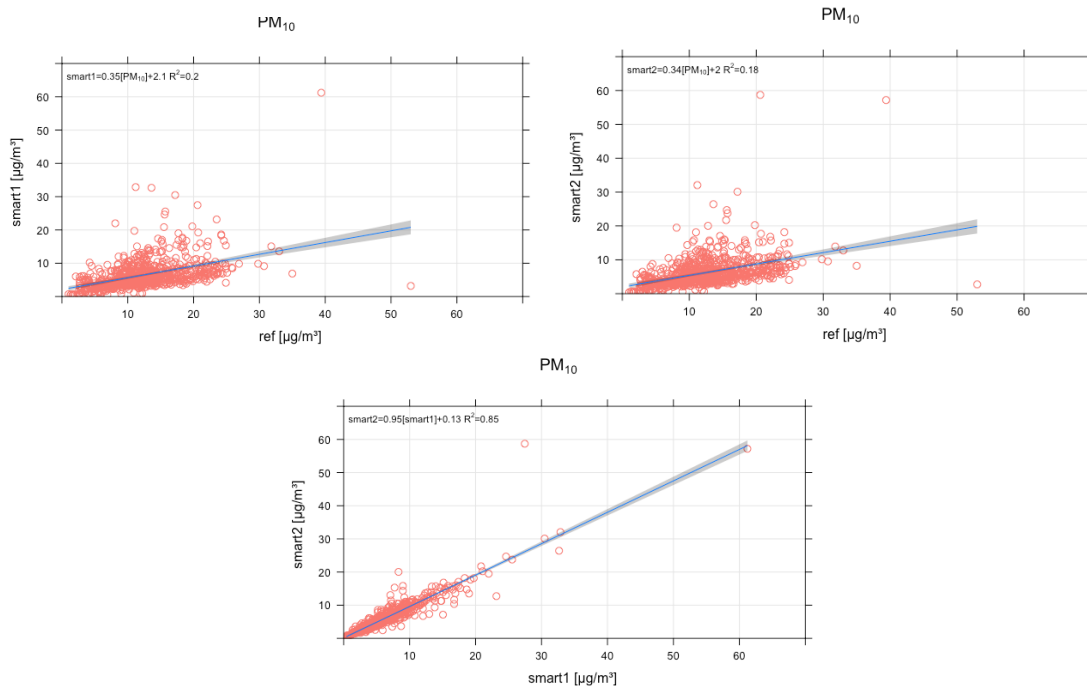


Figure 3.1.9: Études de corrélation des PM₁₀ entre les instruments intelligents et de référence et entre les deux instruments intelligents sur le site de Gênes Largo San Francesco da Paola-San Teodoro.

De l'analyse d'une période représentative de plus d'un mois entre deux instruments intelligents du même type et entre les instruments intelligents et de référence installés sur le site de Largo San Francesco da Paola, comme on peut le voir dans les figures précédentes, il est évident que dans la période analysée entre septembre et mi-octobre 2022, il n'y a pas eu de bons résultats : cela pourrait être imputable aux conditions météorologiques et environnementales, qui étaient différentes par rapport à celles du test effectué à Corso Europa où les résultats avaient été plus satisfaisants. Une surestimation des NO₂ par les instruments intelligents peut être observée avec une différence moyenne de l'ordre de 20% et une donnée à l'origine de 18 µg/m³ de concentration mesurée.

En outre, on peut constater que les mesures des NO₂ et des PM₁₀ entre les deux instruments intelligents étaient très proches les unes des autres, montrant une excellente précision mais une mauvaise exactitude.

3.2 SARDAIGNE

UNICA a utilisé des échantillonneurs passifs Radiello et PUF pendant les campagnes de surveillance afin d'augmenter la résolution spatiale et temporelle des mesures. L'échantillonnage passif est une technique de surveillance définie ainsi parce que la capture du polluant se produit par diffusion moléculaire de la substance à travers l'échantillonneur sans nécessiter l'utilisation d'énergie, ce qui est ainsi obtenu est une seule valeur de concentration moyenne pondérée dans le temps. Les échantillonneurs Radiello (brevetés par la Fondazione Maugeri - IRCCS, Padoue) ont été utilisés pour la détermination de NO_2 , SO_2 et BTEX, tandis que les échantillonneurs PUF (Recetox, Université Masaryk, Brno, République tchèque) ont été utilisés pour déterminer $\Sigma 15$ HAP : acénaphthylène (Ace), acénaphthène (Acy), fluorène (Flu), phénanthrène (Phe), anthracène (Ant), fluoranthène (Flt), pyrène (Pyr), benzo(a)anthracène (BaA), chrysène (Chr), benzo(b)fluoranthène (BbF), benzo(k)fluoranthène (BkF), benzo(a)pyrène (BaP), indeno(1,2,3-cd)pyrène (IcdP), dibenz(a,h)anthracène (DahA) et benzo(ghi)pérylène (BghiP) et $\Sigma 7$ PCB : PCB 28, PCB 52, PCB 101, PCB 118, PCB 153, PCB 138 et PCB 180. Les valeurs obtenues au cours des deux campagnes (hiver/été) dans quatre stations (IB, OC, OP à Olbia et MS à Cagliari) ont été comparées aux données fournies par les stations ARPAS fixes et/ou mobiles, afin de vérifier la fiabilité de l'utilisation des échantillonneurs passifs par rapport aux méthodes officielles et de produire une évaluation statistique (R^2 et corrélation). Sur la base des données fournies par ARPAS, la comparaison n'a été possible que pour le NO_2 , le SO_2 , le benzène et les $\Sigma 6$ HAP (BaA, BbF, BkF, BaP, DahA et IcdP). En particulier, étant donné que les échantillonneurs passifs fournissent une valeur moyenne intégrée dans le temps, la moyenne des données quotidiennes obtenues avec les échantillonneurs actifs sur la période d'exposition correspondante des échantillonneurs passifs a été prise en compte.

Les graphiques montrent qu'il existe une corrélation significative uniquement pour le benzène et les HAP. Pour le NO_2 , les données sont discordantes, notamment pour les valeurs obtenues en hiver dans l'EM et l'IB. Ces anomalies s'expliquent par l'humidité relative élevée (environ 75 %) mesurée pendant la période considérée, qui a probablement rendu moins efficace la capture du polluant par la cartouche adsorbante radiello. Pour le SO_2 , en revanche, les échantillonneurs passifs présentent des valeurs inférieures au seuil de détection, ce qui rend difficile la corrélation des données.

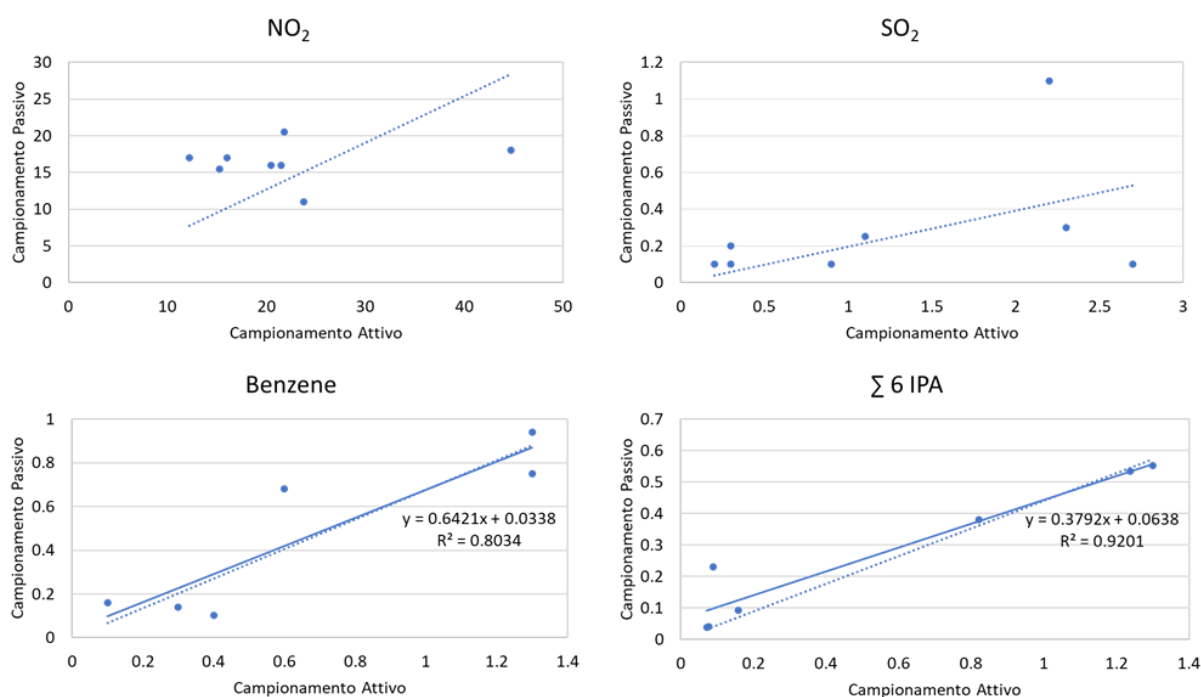


Figure 3.2.1 Corrélation linéaire entre les concentrations de NO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), SO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), benzène ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) et $\Sigma 6$ HAP (ng/m^3) obtenues par échantillonnage passif (PUF, Radiello) et celles obtenues par échantillonnage actif par ARPAS.

En outre, UNICA a mesuré la distribution et la concentration numérique des particules ultrafines (PUF) à l'aide d'un impacteur électrique à basse pression et d'un contacteur de particules portable. L'impacteur électrique basse pression, modèle ELPI+™ permet de détecter en temps réel le diamètre et le nombre de particules (plage de diamètres 6 nm - 10 µm) à un emplacement fixe. L'analyseur portable DiSCmini prélève des échantillons dans la zone respiratoire via une connexion reliant le conimètre à l'échantillonneur, ce qui permet une évaluation fiable de l'exposition.

L'utilisation simultanée des deux échantillonneurs permet donc de tirer plusieurs conclusions :

- a) estimer les concentrations environnementales de particules ultrafines dans les différentes fractions granulométriques ;
- b) évaluer l'importance du facteur distance par rapport à la source d'exposition, comme le suggèrent de nombreuses données de la littérature ;
- c) identifier des événements individuels correspondant à des pics de concentration, permettant de réaliser une évaluation spécifique des risques dans certaines tâches, susceptibles d'affecter la santé de sujets hypersensibles.

3.3 TOSCANE

En plus des instruments classiques de suivi de la qualité de l'air, des compteurs de particules ont également été utilisés:

- un compteur optique de microparticules (OPC) Grimm modèle 11A;
- un compteur de nanoparticules (NanoScan) TSI modèle 3910.



Figure 3.3.1: Compteurs de particules : OPC et NanoScan.

Grâce à cette instrumentation, des investigations approfondies ont été menées sur les sites portuaires de Portoferraio, Calata Bengasi et Fortezza Vecchia par le biais de sondages discontinus (carte des sites). Les sites d'échantillonnage et les périodes d'enquête sont indiqués dans le tableau.

Tableau 3.3.1: Liste des périodes d'échantillonnage et des sites équipés de compteurs optiques de particules.

Sito	Compteur optique de particules OPC		NanoScan SMPS	
	Début de l'enquête	Fin de l'enquête	Début de l'enquête	Fin de l'enquête
Portoferraio	4 août 2021	15 septembre 2021	-	-
Calata Bengasi	7 octobre 2021	12 octobre 2021	5 octobre 2021	15 octobre 2021
	11 janvier 2022	3 février 2022	13 janvier 2022	22 janvier 2022
	2 mars 2022	23 mars 2022	11 avril 2022	24 avril 2022
	-	-	6 juin 2022	17 juin 2022
Fortezza Vecchia	12 octobre 2021	21 octobre 2021	-	-
	28 avril 2022	16 mai 2022	-	-

Afin d'évaluer grossièrement la fiabilité des données obtenues avec les compteurs optiques de microparticules, des moyennes journalières de PM₁₀ et PM_{2.5} ont été calculées sur la base des concentrations massiques que l'instrument renvoie pour chaque donnée élémentaire. Ces concentrations ont été comparées aux données obtenues en parallèle avec la méthode gravimétrique officielle sur le site de Calata Bengasi.

Après cette comparaison, les résultats obtenus avec le compteur optique de particules ont été considérés comme fiables pour les deux paramètres.

Tableau 3.3.2: Comparaison des données relatives aux PM10 et PM2.5 obtenues avec l'OPC et la méthode gravimétrique.

Site	Période	moyennes journalières	Comparaison des moyennes totales des PM10 et PM2.5 µg/m³		
			PM10 OPC	PM10 EN 12341	PM10 R²
Calata Bengasi	7/10/21 - 27/04/22	60	18	21	0.86
			PM2.5 OPC	PM2.5 EN 12341	PM2.5 R²
			11	11	0.85

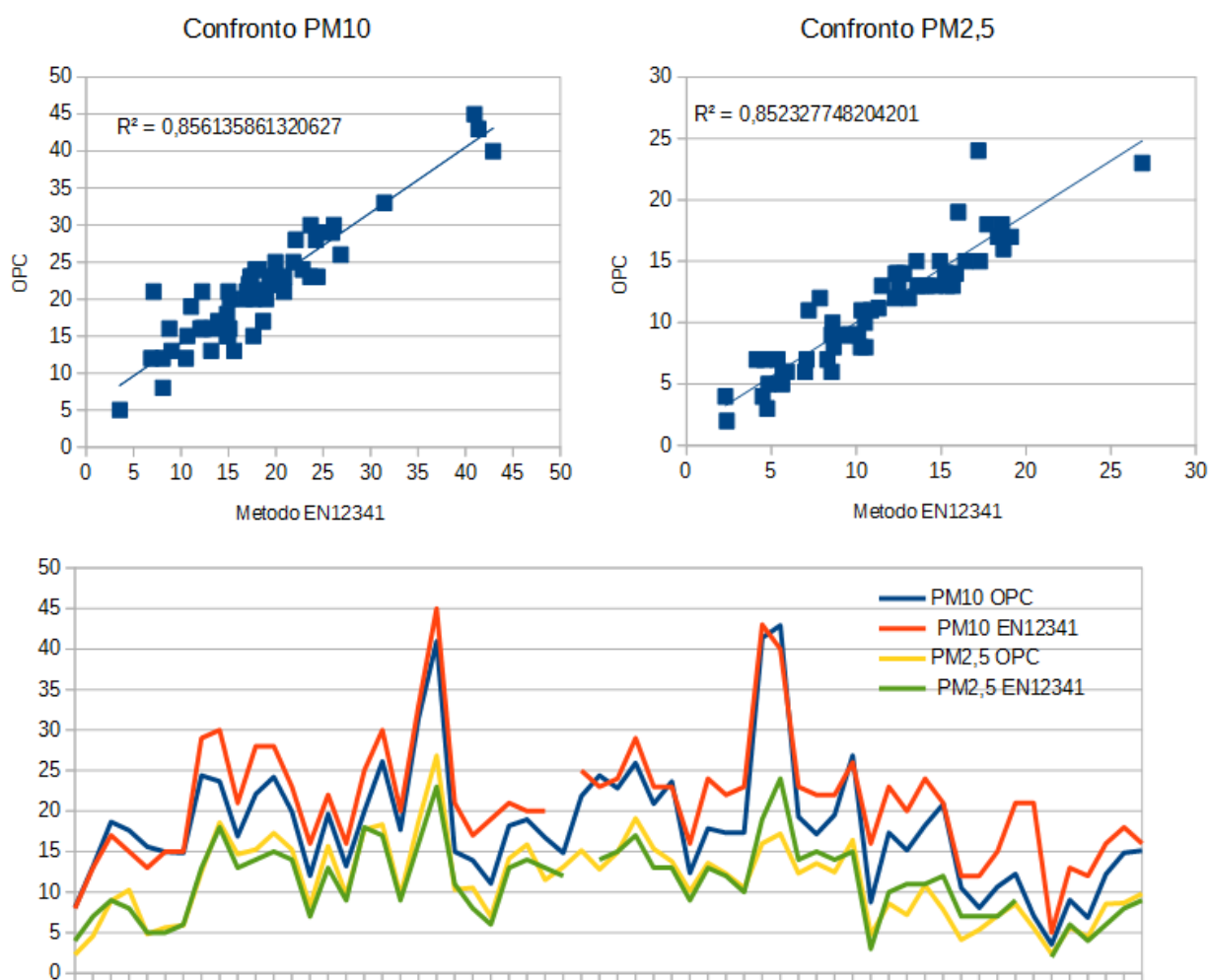


Figure 3.3.2: Corrélation entre la concentration de PM10 et PM2.5 obtenues avec l'OPC et la méthode gravimétrique.

Échantillonneurs passifs

Afin d'évaluer la fiabilité des données obtenues pour le NO₂ et le SO₂ avec les échantillonneurs passifs, les résultats ont été comparés aux données obtenues en parallèle par la méthodologie officielle. Le tableau montre les résultats de la comparaison qui a été effectuée pour les sites de La Pira et de Calata Bengasi pour le NO₂ et le SO₂.

Tableau 3.3.3: Comparaison des valeurs moyennes obtenues avec les échantillonneurs passifs et la méthode officielle..

Site	Méthode	Moyenne NO ₂ µg/m ³			Écart %
		03/08 - 07/09	03/03 - 17/03	17/03 - 01/04	
Calata Bengasi	Échantillonneur passif	25	23	24	-19%
	Méthode UNI EN 14211	29	28	32	
La Pira	Échantillonneur passif	12	16	12	-16%
	Méthode UNI EN 14211	14	16	18	

Tableau 3.3.4: Comparaison des valeurs moyennes obtenues avec les échantillonneurs passifs et la méthode officielle

Site	Méthode	Moyenne SO ₂ µg/m ³			Écart %
		03/08 - 07/09	03/03 - 17/03	17/03 - 01/04	
Calata Bengasi	Échantillonneur passif	1	0	1	-1
	Méthode UNI EN 14211	3	0	1	
La Pira	Échantillonneur passif	0	0	1	-2
	Méthode UNI EN 14211	2	2	3	

Sur la base des vérifications des données disponibles, les résultats obtenus avec les échantillonneurs passifs ont été considérés comme fiables pour les deux paramètres considérés.

3.4 RÉGION PACA

Les données des microcapteurs sont connues pour être entachées d'une incertitude de mesure bien plus importante que celle des instruments installés dans les stations fixes et mobiles du réseau. En l'état actuel des progrès, leur valeur absolue n'est pas suffisamment robuste pour être utilisée dans une démarche sanitaire, telle qu'un comptage de dépassements de seuils où une estimation du niveau d'exposition moyen. Néanmoins, si les hausses de concentrations mesurées par les microcapteurs ne sont pas exploitables en valeur absolue, la variabilité de leur signal fournit une information semi-quantitative, qui permet de détecter l'occurrence d'événements ponctuels.

Dans cette section, une estimation de la qualité des données enregistrées par les microcapteurs est d'abord réalisée par comparaison aux données d'une station permanente du réseau de mesures. La variabilité des concentrations mesurées par les microcapteurs est ensuite analysée. Pour cette analyse, les données de la cabine et des stations fixes sont désignées comme étant les données de référence. L'objectif principal est de déterminer l'origine spatiale des maxima de concentration enregistrés, visualisés à l'aide de roses de pollution.

Comparaison avec une station de référence

Pour estimer la qualité des données enregistrées par les microcapteurs de la campagne, il est possible, dans une première approche, d'étudier la corrélation entre les données d'une station de référence et les données. Les figures présentent les corrélations obtenues sur les périodes de fonctionnement du microcapteur qui coïncident avec la campagne de mesures, du 28/07/21 au 10/08/21 puis du 07/10/21 au 20/10/21. On observe une différence de comportement entre la période estivale et le début de l'automne. Les coefficients de corrélation sont plus faibles sur les données de la première période. Cette différence de qualité des données peut s'expliquer en partie par la maintenance du microcapteur, effectuée entre les deux périodes, mais pas seulement. AtmoSud observe habituellement une dégradation des mesures de NO_x en été, en lien avec les fortes températures. Ce constat s'applique à plusieurs modèles de microcapteurs.

Ces figures illustrent le fait que même si un microcapteur présente un état de fonctionnement normal en laboratoire, sa mesure pourra être affectée par des éléments extérieurs, qui viennent dégrader la qualité de la mesure. Parmi ces éléments extérieurs, on peut citer la température, mais également l'humidité et le vent. Ces éléments s'ajoutent à la dérive normale de l'instrument, qui est non linéaire et non prédictible.

Il en résulte une incertitude de mesure difficilement estimable un fois que le capteur est en place, si celui-ci n'est pas installé sur une station. Pour les NO_x , il reste possible, dans de bonnes conditions, d'obtenir une concordance satisfaisante avec la mesure de référence, à l'image des concentrations en NO mesurées sur la seconde période (conditions tempérées) avec un coefficient de corrélation R^2 de près de 0,94.

Du côté des particules, les scores de concordance des PM_{10} sont stables d'une période à l'autre. Les concentrations en $\text{PM}_{2.5}$ affichent quant à elles des R^2 bas et indiquent presque une absence de corrélation avec les données de la station sur la période estivale.

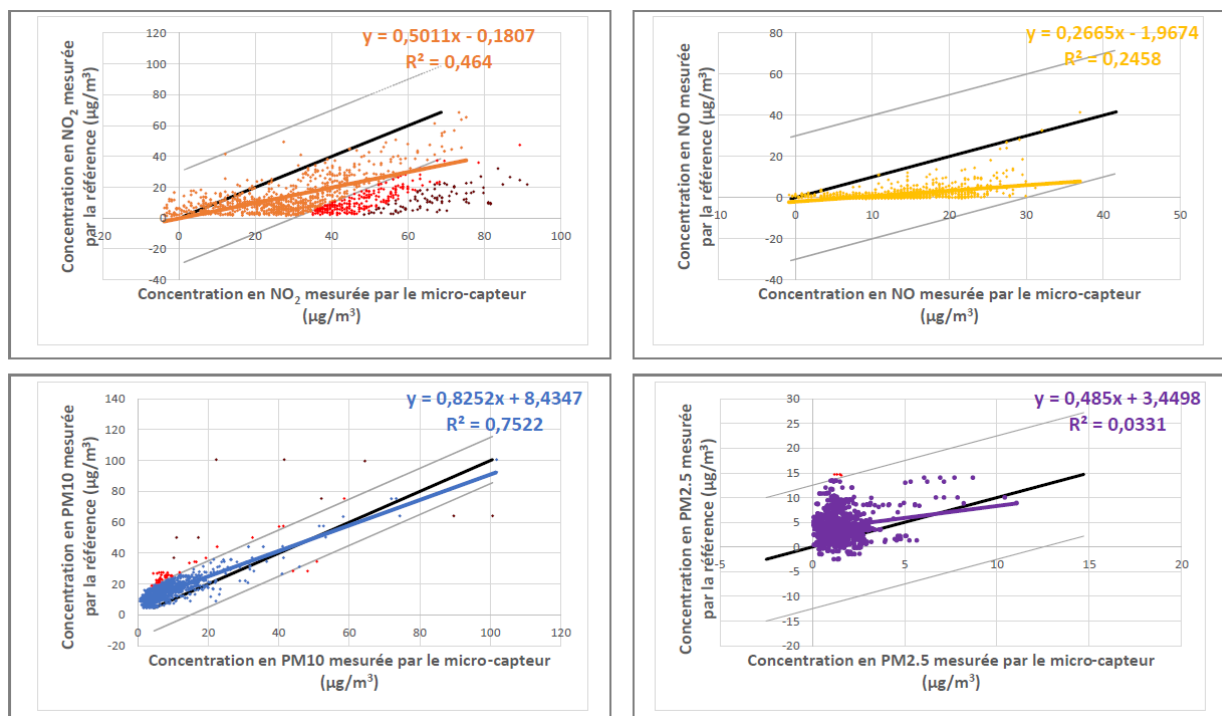


Figure 3.4.1: Corrélation station/microcapteur sur la période allant du 28/07/21 au 10/08/21 à la station Toulon Claret.

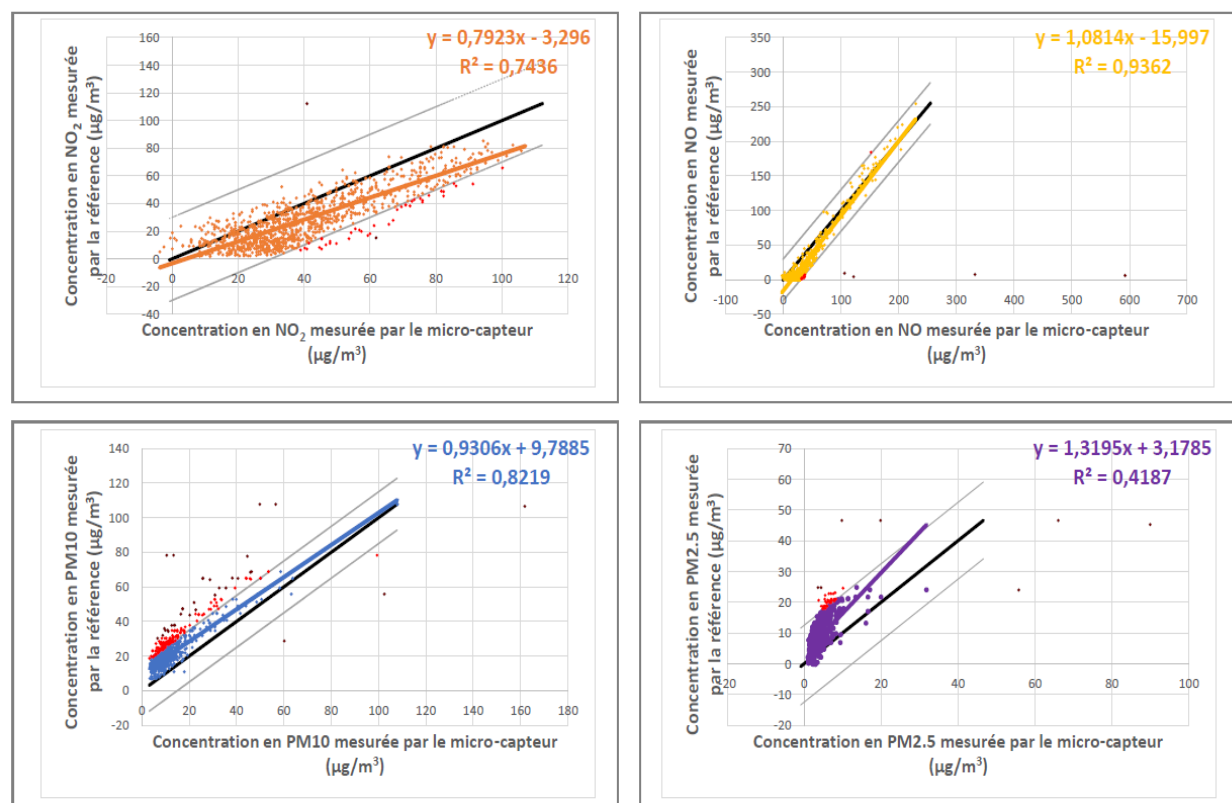


Figure 3.4.2: Corrélation station/microcapteur sur la période allant du 07/10/21 au 20/10/21 à la station Toulon Claret

3.5 CORSE

Dans le cadre du projet AER NOSTRUM, les emplacements des capteurs et stations de mesure ont été choisis afin de diversifier au maximum la représentativité des zones habitables impactées par différentes conditions de vents.

Les capteurs / analyseurs peuvent être disposés différemment en fonction de la zone. Des capteurs ont donc été placés soit sur des balcons de particuliers – incluant donc de potentiels effets de turbulence aux abords des murs – transposant ainsi le constat de suie sur les bords des fenêtres en données tangibles mesurables, soit sur des toits ou bien encore directement au niveau des stations fixes.

Des rapports de vie des capteurs / stations de mesures seront rédigés afin d'assurer un suivi tout au long de la campagne (Installation, Maintenance, Problèmes techniques/administratifs, etc.).

Un contrôle régulier est mis en place pour vérifier qu'aucun dysfonctionnement ne survient durant la période (validation des données). Les emplacements des capteurs sont choisis principalement par rapport à leur pertinence pour le projet mais dépendent aussi des contraintes techniques et administratives.

Suite aux différentes phases de repérage pendant l'année et après signature des différentes conventions d'occupation de l'espace public, voici la liste des emplacements des points de mesure ainsi que leur type d'influence.

Tableau 3.5.1: Types de site de mesure – Ajaccio.

Lieux	Capteurs	Influence principale	Type d'emplacement
Local des Accès	µCapteur PMX / NO ₂ + Météo	Portuaire + Routière	Toit dégagé
Toit Gare Maritime	µCapteur PMX / NO ₂	Portuaire	Toit dégagé
Capitainerie Sud AJA	µCapteur PMX / NO ₂ + Météo	Portuaire	Toit dégagé
Hôpital Ajaccio	µCapteur PMX / NO ₂	Portuaire	Balcon
St mobile Sampiero	FIDAS + SO ₂	Portuaire + Routière	Station mobile Parking
St fixe Abbatucci	NO _x + PM10 + CO + SO ₂	Routière	Toit Station Fixe
St fixe Canetto	µCapteur PMX / NO ₂ Black Carbon + Météo + NO _x + SO ₂	Urbaine	Toit Station Fixe

Tableau 3.5.2: Types de site de mesure – Bastia.

Lieux	Capteurs	Influence principale	Type d'emplacement
Pylône 7 bis	µCapteur PMX / NO ₂ + Météo	Portuaire + Routière	Pylône dégagé
Capitainerie Sud BIA	µCapteur PMX / NO ₂	Portuaire + Routière	Toit dégagé
Eglise Madonna	µCapteur PMX / NO ₂	Portuaire	Balcon
Toit Mairie BIA	FIDAS + NO ₂ + Météo	Portuaire	Toit dégagé
Collège Simon	µCapteur NO ₂ /PMX	Urbaine	Toit dégagé
St mobile ODT	FIDAS + NO _x	Routière	Station fixe
St mobile Pylône 3	CPC + Analyseur PM + SO ₂ + Météo	Portuaire + Routière	Station mobile Parking
St fixe Fango	Météo + PM10 + SO ₂ + NO _x	Routière	Station fixe
St fixe Giraud	µCapteur PMX / NO ₂ + NO _x + SO ₂ + FIDAS + Météo Vent	Urbaine	Station fixe

Une première étape importante pour la phase T1 du projet consistait à calibrer / valider les micro-capteurs reçus par des mesures communes à un endroit de référence. Restait alors à déterminer par méthode de régression linéaire les meilleurs éléments à placer aux endroits stratégiques.

Pendant une certaine période, les données des micro-capteurs ont été récupérées et comparées avec celles d'une station de référence. Cela a permis d'établir alors une classification qualitative des capteurs en calculant les différents coefficients R² et pentes selon une méthode de régression linéaire.

La méthode pour évaluer la pertinence des résultats se base sur une méthode de régression linéaire pour tracer une courbe de corrélation, et en sortir des coefficients révélateurs de la performance des micro-capteurs (pente, R², ordonnée à l'origine). Les données calculées sont alors comparées à des critères de référence dépendant du type de polluant.

Les mesures seront disponibles sur la plate-forme MONICA.

Reproductibilité Airly - PM

Après la réception des micro-capteurs Airly PM en février 2021, une étape de comparaison avec des données de référence a été mise en place jusqu'en juin 2021 au niveau de la station de mesure de Giraud. Les 10 capteurs ont été installés au même endroit afin de comparer les valeurs mesurées entre elles (répétabilité) puis avec celles du FIDAS (justesse). Les capteurs Airly ont la possibilité de mesurer les concentrations en PM1, PM2.5 et PM10.

Tableau 3.5.3: Coefficients de validation pour le PM_{2.5} - Source, Air Quality Sensor & CEN/TC264/WG42.

		PM _{2.5}		
		Division A	Division B	Division C
LABORATOIRE	Justesse (pente)	$0,7 \leq p \leq 1,3$	$0,5 \leq p < 0,7$ ou $1,3 < p \leq 1,5$	$p < 0,5$ ou $p > 1,5$
	Linéarité (de 0 à 120 µg/m ³)	$R^2 \geq 0,75$	$0,5 \leq R^2 < 0,75$	$R^2 < 0,5$
	Limite de détection	$LD \leq 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$5 \mu\text{g}/\text{m}^3 < LD \leq 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$LD > 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$
	Répétabilité (à 80 µg/m ³)	$r \leq 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$5 \mu\text{g}/\text{m}^3 < r \leq 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$r > 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$
	Influence de l'humidité relative (15% et 80%) à 80 µg/m ³	$\text{Écart} \leq 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$10 \mu\text{g}/\text{m}^3 < \text{Écart} \leq 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$\text{Écart} > 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$
	Dérive à zéro à 3 semaines	$d_{\text{zéro}} \leq 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$5 \mu\text{g}/\text{m}^3 < d_{\text{zéro}} \leq 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$d_{\text{zéro}} > 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$
	Dérive au point échelle (PE) à 3 semaines (à 80 µg/m ³)	$d_{\text{PE}} \leq 10 \%$	$10\% < d_{\text{PE}} \leq 15 \%$	$d_{\text{PE}} > 15 \%$
TERRAIN	Reproductibilité ($u(\text{bs},s)$)	$u(\text{bs},s) < 7,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$u(\text{bs},s) < 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$u(\text{bs},s) < 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$
	Pente	$0,7 \leq p \leq 1,3$	$0,5 \leq p < 0,7$ ou $1,3 < p \leq 1,5$	$p < 0,5$ ou $p > 1,5$
	Linéarité	$R^2 \geq 0,75$	$0,5 \leq R^2 < 0,75$	$R^2 < 0,5$
	MAPE	$< 50\%$	de 50% à 100%	$> 100\%$
DIR 2008/50/EC	Saisie minimale de données	$\geq 90 \%$	de 14% à 90%	$< 14\%$
	Incertitude terrain (DQO@ 50µg/m ³)	$U \leq 50\%$ ($U \leq 25\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$50 < U \leq 100\%$ ($25 < U \leq 50\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$100 < U \leq 200\%$ ($50 < U \leq 100\mu\text{g}/\text{m}^3$)

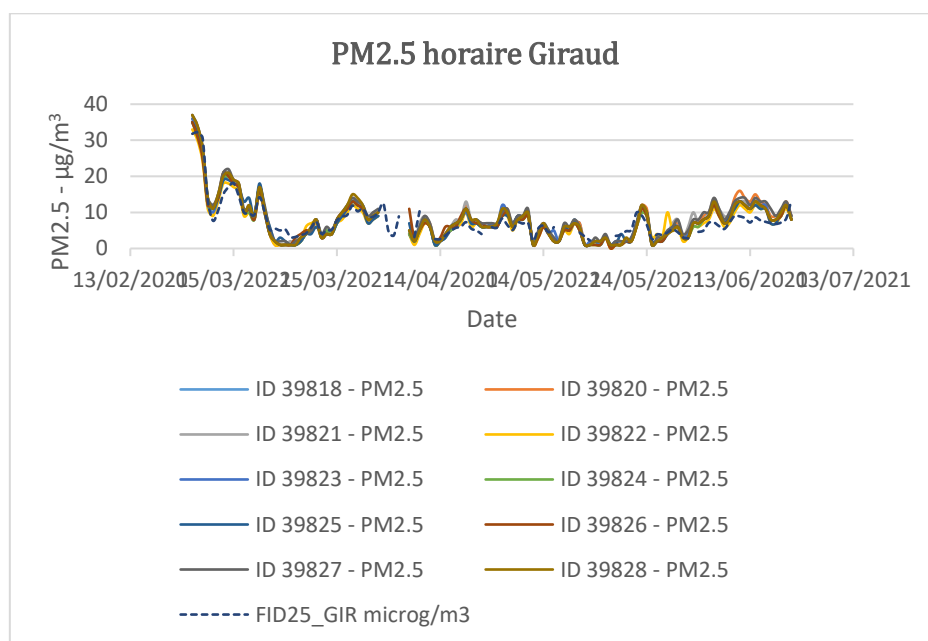


Figure 3.5.1: Comparaison mesures PM_{2.5} – St fixe Giraud / µCapteurs Airly

Tableau 3.5.4: Résultats régression linéaire pour les capteurs Airly en comparaison avec la station fixe Giraud.

Caractéristi-ques	ID 39818 - PM1	ID 39820 - PM1	ID 39821 - PM1	ID 39822 - PM1	ID 39823 - PM1	ID 39824 - PM1	ID 39825 - PM1	ID 39826 - PM1	ID 39827 - PM1	ID 39828 - PM1
Pente	1,26	1,38	1,26	1,22	1,28	1,20	1,24	1,28	1,37	1,30
OO	-1,62	-1,29	-0,87	-1,01	-1,12	-0,97	-0,72	-0,85	-0,81	-1,28
R ²	0,92	0,85	0,87	0,83	0,86	0,89	0,85	0,87	0,87	0,89
Caractéristi-ques	ID 39818 - PM2.5	ID 39820 - PM2.5	ID 39821 - PM2.5	ID 39822 - PM2.5	ID 39823 - PM2.5	ID 39824 - PM2.5	ID 39825 - PM2.5	ID 39826 - PM2.5	ID 39827 - PM2.5	ID 39828 - PM2.5
Pente	1,16	1,22	1,20	1,05	1,15	1,14	1,15	1,13	1,21	1,22
OO	-1,26	-0,93	-0,51	-0,52	-0,65	-0,80	-0,61	-0,55	-0,31	-0,97
R ²	0,91	0,82	0,85	0,84	0,85	0,85	0,85	0,83	0,84	0,86
MAPE	9%	9%	11%	4%	6%	5%	6%	5%	16%	9%
Caractéristi-ques	ID 39818 - PM10	ID 39820 - PM10	ID 39821 - PM10	ID 39822 - PM10	ID 39823 - PM10	ID 39824 - PM10	ID 39825 - PM10	ID 39826 - PM10	ID 39827 - PM10	ID 39828 - PM10
Pente	0,56	0,55	0,58	0,50	0,55	0,50	0,53	0,50	0,55	0,61
OO	3,95	4,38	5,02	4,21	4,83	4,30	4,53	4,66	5,62	4,70
R ²	0,67	0,55	0,59	0,62	0,62	0,58	0,59	0,56	0,57	0,63
Caractéristi-ques sans DUST	ID 39818 - PM10	ID 39820 - PM10	ID 39821 - PM10	ID 39822 - PM10	ID 39823 - PM10	ID 39824 - PM10	ID 39825 - PM10	ID 39826 - PM10	ID 39827 - PM10	ID 39828 - PM10
Pente	1,41	1,60	1,58	1,28	1,44	1,39	1,45	1,42	1,56	1,57
OO	-6,05	-7,40	-6,19	-4,59	-5,10	-5,67	-5,74	-5,68	-5,72	-6,08
R ²	0,64	0,52	0,56	0,55	0,60	0,56	0,57	0,52	0,55	0,60

Tableau 3.5.5: Données régression linéaire pour μ Capteurs PM (évaluation sur les PM2.5).

ID	ID lieu	Pente	R ²	Ordonnée origine
5993	80752	1,22	0,82	-0,93
6063	39821	1,21	0,85	-0,51
6070	39822	1,05	0,84	-0,52
6076	39823	1,15	0,85	-0,65
6082	39824	1,14	0,85	-0,8
6109	80788	1,15	0,85	-0,61
6115	80727	1,13	0,83	-0,55
6152	80724	1,21	0,84	-0,31
6436	80789	1,22	0,86	-0,97

Les résultats montrent une très bonne réactivité pour les PM1 et PM2.5, avec des pentes en moyenne à 1,25. L'ordonnée à l'origine est suffisamment proche de zéro pour être validée.

En ce qui concerne les PM10, les coefficients sont moins probants. Les calculs ont été faits avec et sans prendre en compte l'épisode de particules fines du Sahara survenu durant la période. Les capteurs photosensibles des micro-capteurs ont plus de difficulté à mesurer des grains de sable comme ceux-là, d'où la différence.

Le choix de la répartition des capteurs sur Ajaccio et Bastia s'est fait principalement en se basant sur les résultats du PM2.5. Les capteurs à proximité immédiate du port sont ceux avec les meilleurs coefficients de pente / R². Les capteurs 6070 pour Giraud (Bastia) et 6115 pour Canetto (Ajaccio) ont été désignés comme les plus efficaces, et dès lors utilisés comme références.

Reproductibilité Agriscope – NO₂

Après la réception des micro-capteurs Agriscope NO₂ en février 2021, une étape de comparaison avec des données de référence a été mise en place jusqu'en juin 2021 au niveau des stations de mesure du Fango et Canetto.

Les 12 capteurs ont été répartis en deux lots, une moitié au Fango, l'autre à Canetto, afin de comparer sur deux sites les valeurs mesurées entre les capteurs d'un même lot (répétabilité) et avec celle de l'analyseur NO_x sur place (justesse).

La méthode pour évaluer la pertinence des résultats se base sur une méthode de régression linéaire pour tracer une courbe de corrélation, et en sortir des coefficients révélateurs de la performance des micro-capteurs (pente, R², coefficient à l'origine).

Un échantillon de résultats sur une semaine est visible ci-dessous pour les deux sites de mesure. Les données peuvent être récupérées en base horaire ou quart-horaire. La mesure de référence est identifiée par NO2FAN ou NO2CAN, en gras sur les courbes.

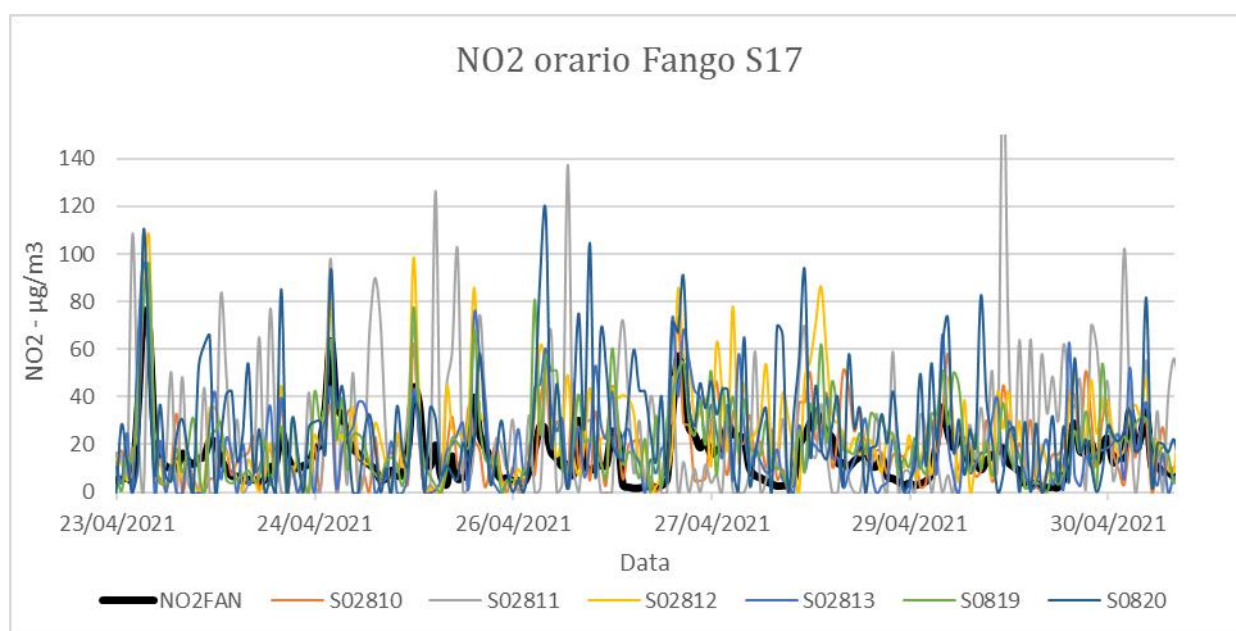


Figure 3.5.2: Comparaison mesures NO₂ – St fixe Fango / µCapteurs Agriscope.

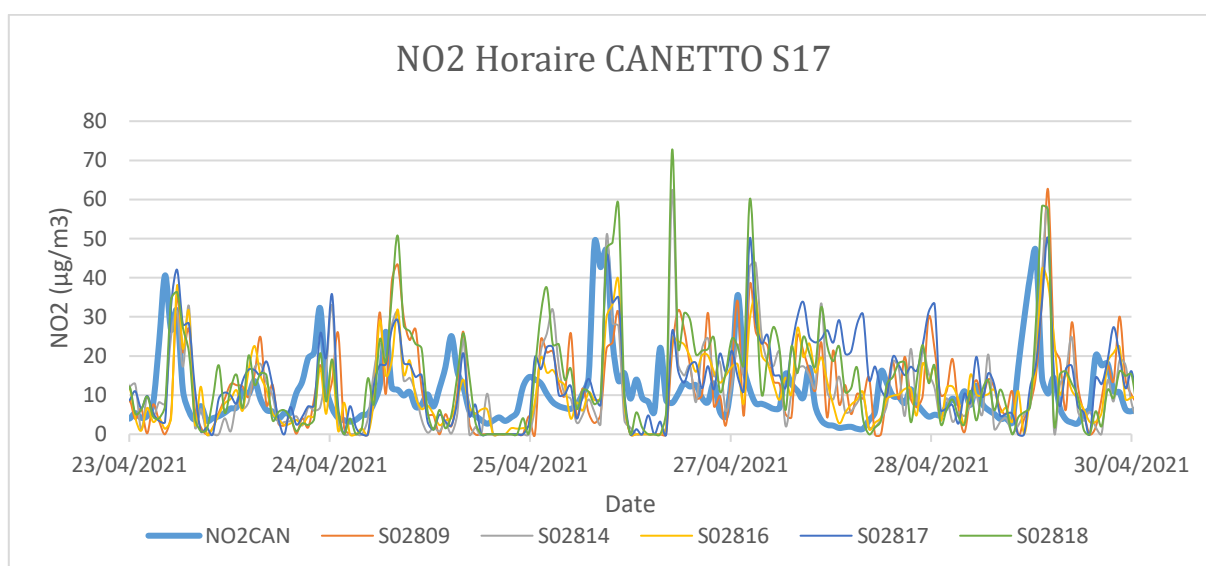


Figure 3.5.3: Comparaison mesures NO₂ – St fixe Canetto / µCapteurs Agriscope.

En fonction du site, on peut apercevoir des tendances différentes. Les mesures sur Canetto suivent relativement bien la mesure de référence, avec des oscillations supplémentaires s'apparentant à du bruit. Celles sur le Fango en revanche ont beaucoup plus de bruit en grandes amplitudes, similaires pour chaque capteur.

Afin de classer les résultats, il est intéressant de hiérarchiser les capteurs en fonction des critères ci-dessous établis par le protocole d'évaluation des systèmes capteurs pour la mesure de la qualité de l'air ambiant en point fixe.

Le fournisseur Agriscope a été recontacté afin d'obtenir des explications sur de tels écarts, et il semblerait qu'un mauvais coefficient usine ait été configuré sur certains capteurs. Après mise à jour, les valeurs sont ensuite compilées via l'outil d'équivalence, les résultats sont les suivants:

Tableau 3.5.6: Résultats régression linéaire NO₂.

Fango	Capteur						
	S02810	S02811	S02812	S02813	S02819	S0820	S2815
Pente	1,05	6,61	1,69	1,44	1,40	3,86	N/A
OO	-0,48	-0,72	-5,60	-2,78	-3,39	-32,43	N/A
R ²	0,22	0,07	0,48	0,31	0,50	0,09	N/A

Canetto	Capteur				
	S02809	S02814	S02816	S02817	S02818
Pente	1,29	1,40	1,02	1,23	1,60
OO	-2,37	-3,47	0,31	0,37	-3,49
R ²	0,38	0,48	0,32	0,45	0,51

Les résultats montrent une très grande disparité entre les capteurs et le classement change en fonction du paramètre choisi (pente / Ordonnée à l'origine / R²). Certains ont une justesse acceptable (pente aux alentours de 1) mais un coefficient de linéarité très faible (~0).

Dès lors, il a fallu établir un critère principal, puis secondaire pour hiérarchiser les capteurs. La pente est ainsi le premier, R² le second puis l'ordonnée à l'origine finit la répartition.

Le choix de la répartition des capteurs sur Ajaccio et Bastia s'est fait principalement en se basant sur les résultats de pente. Les capteurs à proximité immédiate du port sont ceux avec les meilleurs coefficients de pente / R². Les capteurs 2819 pour Fango (Bastia) et 2817 pour Canetto (Ajaccio) ont été désignés comme les plus efficaces, et dès lors utilisés comme références.



Figure 3.5.4: Comparaison μ Capteurs NO₂ avec station de référence Canetto.

Tableau 3.5.7: Résultats Coefficients de régression linéaire NO₂.

ID	ID lieu	Ville	Lieu	Pente	R ²	OO	DATE	Statut AER
2809	AJA Hôpital	AJACCIO	App. Gilles	1,29	0,38	-2,37	28/06/2021	OK
2810	BIA Collège Simon	BASTIA	Collège Simon Vinciguerra	1,05	0,22	-0,48	08/07/2021	OK
2811	2811	CORTE	QC	6,61	0,07	-72,4	26/07/2021	NOK
2812	AJA Local Accès	AJACCIO	Local Accès	1,69	0,48	-5,6	03/08/2021	OK
2813	BIA Capitainerie SUD	BASTIA	Capitainerie SUD BIA	1,44	0,31	-2,78	01/07/2021	OK
2814	AJA Capitainerie SUD	AJACCIO	Capitainerie SUD AJA	1,4	0,48	-3,47	05/08/2021	OK
2815	BIA Eglise Madonna	BASTIA	App. JC				01/07/2021	OK
2816	AJA Gare Maritime	AJACCIO	Toit Gare Maritime	1,02	0,32	0,31	03/08/2021	OK
2817	AJA Canetto	AJACCIO	CANETTO	1,23	0,45	0,37	21/05/2021	OK
2818	BIA Pylône 7	BASTIA	Pylône 7 BIS	1,6	0,51	-3,49	06/08/2021	OK
2819	BIA Fango	BASTIA	FANGO	1,4	0,5	-3,39	21/05/2021	OK
2820	BIA Toit Mairie	BASTIA	Toit Mairie	3,86	0,09	-32,43	26/07/2021	OK

Le capteur 2811 a été jugé beaucoup trop peu performant car éloigné de tous les critères de sélection et dès lors écarté en début d'étude. Le capteur 2815 a été renvoyé durant la phase de calibration et n'a été reçu qu'au moment de placer les capteurs sur site, il n'a donc pas de coefficients calculés.

Reproductibilité Ellona – PM, NO₂, SO₂

Dans le cadre d'un partenariat avec l'entreprise Ellona et afin d'approfondir les connaissances, il a été jugé intéressant d'étudier le transfert de la pollution extérieure vers la pollution intérieure. Ainsi, un total de 8 capteurs a été prêté durant la période estivale 2022 par Ellona, quatre capteurs air extérieur (WT1 – PMX / NO₂ / SO₂ / T°C / HR / infos diverses d'environnement) ainsi que quatre capteurs air intérieur (POD2 – PMX / NO₂ / SO₂ / T°C / HR / infos diverses). Ils forment alors quatre couples de micro-capteurs, et ont été installés sur Ajaccio et Bastia.

Tableau 3.5.8: Identifiants et Emplacements des capteurs Ellona.

Lieux		Capteur Intérieur	Capteur Extérieur
Ajaccio	Hôpital Ajaccio	POD2-00693	WT1-30143
	Capitainerie Tino Rossi Ajaccio	POD2-00692	WT1-30142
Bastia	Mairie Bastia	POD2-00200	WT1-30144
	Capitainerie Vieux Port Bastia	POD2-00690	WT1-30145

Avant leur installation, un essai de reproductibilité a été réalisé au niveau de la station fixe de Giraud afin de tester les comportements des capteurs et de les comparer entre eux / avec les analyseurs de référence.



Figure 3.5.5: Capteurs extérieurs Ellona en reproductibilité sur Giraud, Bastia (la gauche).



Figure 3.5.6: Capteurs Intérieurs Ellona en reproductibilité à Qualitair Corse, Corte.

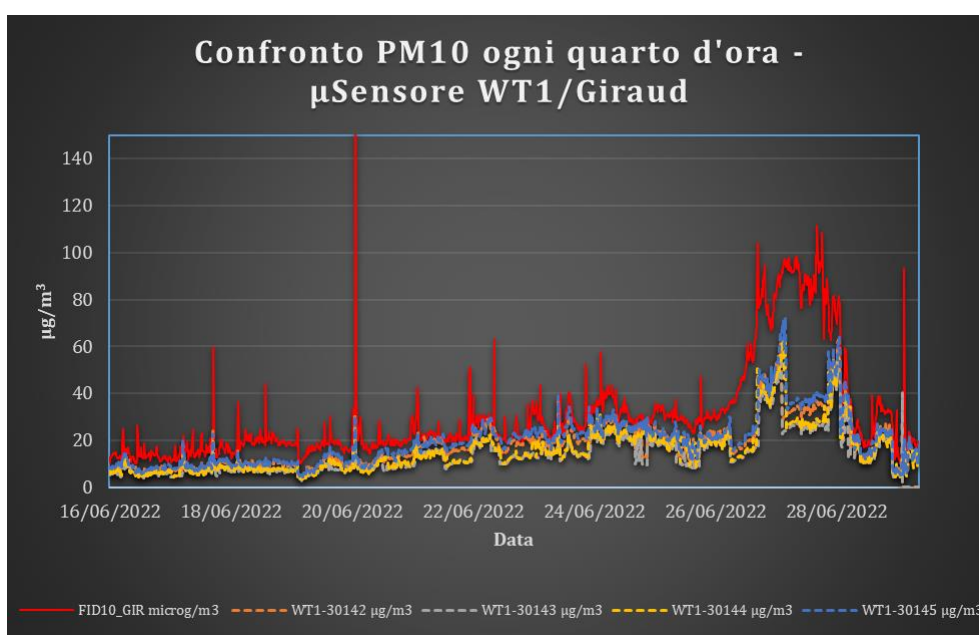


Figure 3.5.7: Comparaison PM10 Ellona / Station de référence Giraud.

Les résultats montrent une bonne reproductibilité des résultats entre les micro-capteurs, avec une tendance à la sous-évaluation de la mesure. De manière générale, la technologie PM des micro-capteurs a du mal à évaluer avec précision la concentration en particules plus grossières (notamment lors d'épisodes de pollution du Sahara, pendant lesquels le sable ramené est souvent mal interprété par les micro-capteurs).

Ellona semble montrer une bonne réactivité sur les PM. En ce sens, il se rapproche des capteurs Airly utilisés depuis la saison estivale 2021, ayant démontré une fiabilité jugée suffisante pour les besoins de l'étude.

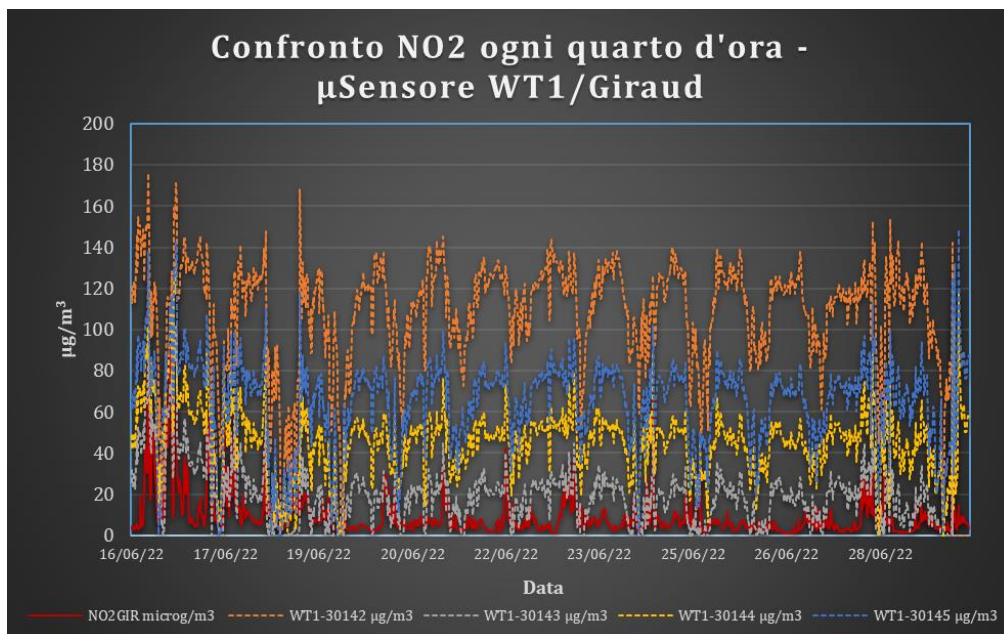


Figure 3.5.8: Comparaison NO₂ Ellona / Station de référence Giraud.

Les résultats sont beaucoup moins éloquentes en ce qui concerne les mesures de dioxyde d'azote. En effet, aucun des capteurs ne semble mesurer la même valeur, réduisant ainsi l'indice de répétabilité. Cela est principalement dû à un problème de calibration de l'offset ainsi que du coefficient de pente. A noter que cela peut se corriger a posteriori avec le fournisseur.

L'essai reste tout de même étonnant en ce qui concerne la justesse de la mesure, les tendances n'étant pas du tout les mêmes (un pic mesuré par la station correspond à une chute au niveau des micro-capteurs). Il est alors approprié de se poser la question de la pertinence des mesures NO₂ et de leur future prise en compte lors de l'étude.

A titre de comparaison, le fournisseur Agriscope semble avoir également du mal à fournir un instrument fiable quant à la mesure du NO₂. Les problèmes ont été nombreux à tout point de vue (matériel, remontée et traitement des données, mesure...).

Le temps manquant à l'étude, il n'a pas été possible d'approfondir la calibration des capteurs Ellona en ce qui concerne le NO₂.

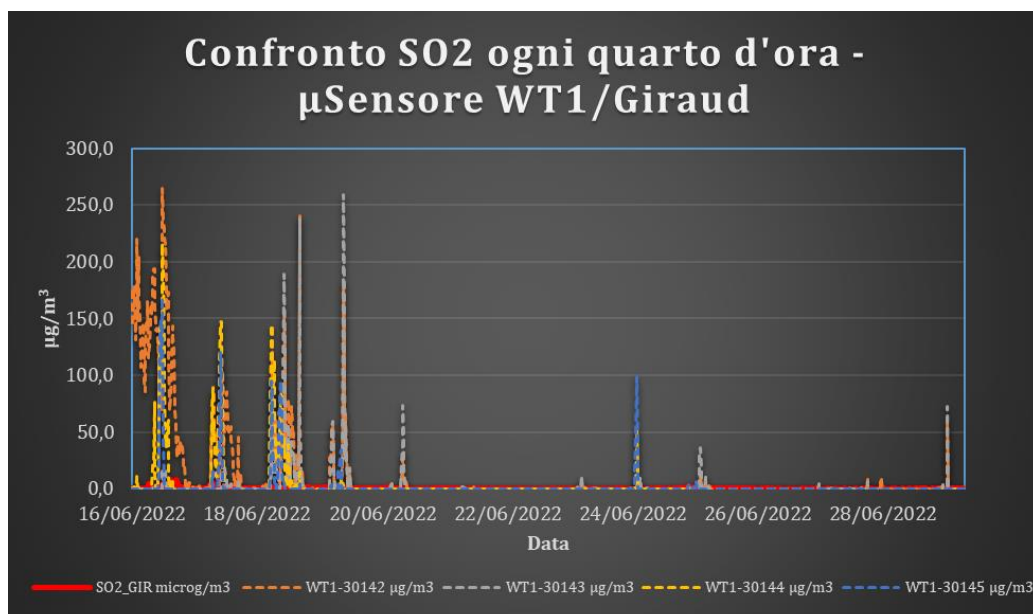


Figure 3.5.9: Comparaison SO₂ Ellona / Station de référence Giraud.

Même constat en plus aggravé sur le SO_2 , les capteurs semblent devoir avoir besoin de calibration excessive pour s'adapter à l'environnement. Après discussions avec le fournisseur, les coefficients ont pu être ajustés, et les mesures ont pu devenir légèrement plus pertinentes.

Pour conclure, les essais sur Ellona et Agriscope sont assez discutables dans la mesure où une calibration capteur par capteur se doit d'être effectuée régulièrement, sans garantie de résultat. La question de la précision, répétabilité et pertinence des résultats peut être posée, hors, le principal avantage de ce type de solution devrait être la capacité d'utiliser ces outils sans devoir y consacrer un temps précieux à s'adapter à chaque capteur (dans la mesure où une reproductibilité avec une station fixe est possible). Une fois le capteur installé, il devient impossible de s'assurer du « bon fonctionnement » de celui-ci.

L'objectif de ces micro-capteurs étant de pouvoir à minima donner une tendance de pollution, ce critère n'est pas atteint pour les gaz selon la campagne de mesure réalisée pour ce projet.

4. Paramètres surveillés

Table des figures

Figure 4.1.1: Échantillonneur PalasFidas sur la station mobile du site de San Teodoro.	54
Figure 4.1.2: Échantillonneur gravimétrique Digital sur le site de San Teodoro (à gauche) et de Corso Firenze (à droite) pour les campagnes expérimentales.	54
Figure 4.1.3: Rose de pollution et évolution temporelle des NO ₂ sur le site de San Teodoro (ligne rouge) aux heures de départ des navires de passagers pendant le weekend de Pâques 2022.	56
Figure 4.1.4: Charge de poussières sahariennes attendues pendant les jours de fin octobre, selon le WMO Barcelona Dust Regional Center.	56
Figure 4.1.5: Séries chronologiques de PM ₁₀ et PM _{2.5} provenant des instruments intelligents et de référence pendant le transport transfrontalier de poussières du Sahara à la fin du mois d'octobre 2022.	57
Figure 4.2.1: Tendance des moyennes horaires, journalières et mensuelles de SO ₂	60
Figure 4.2.2: Tendance des moyennes horaires, journalières et mensuelles de NO ₂	61
Figure 4.2.3: Percentiles des valeurs de pollution par direction du vent.	62
Figure 4.2.4: Tendance des moyennes horaires, journalières et mensuelles de C ₆ H ₆	63
Figure 4.2.5: Percentiles des valeurs de pollution par direction du vent.	64
Figure 4.2.6: Tendance des moyennes horaires, journalières et mensuelles de PM ₁₀	65
Figure 4.2.7: Tendance des moyennes horaires, journalières et mensuelles de PM _{2.5}	66
Figure 4.2.8: Concentrations de BTEX (µg/m ³) aux stations de Cagliari en hiver (à gauche) et en été (à droite).	67
Figure 4.2.9: Concentrations de C ₆ H ₆ (µg/m ³) aux stations de Cagliari en hiver (à gauche) et en été (à droite).	67
Figure 4.2.10: Concentrations de NO ₂ (µg/m ³) aux stations de Cagliari en hiver (à gauche) et en été (à droite).	67
Figure 4.2.11: Concentrations de SO ₂ (µg/m ³) aux stations de Cagliari en hiver (à gauche) et en été (à droite).	68
Figure 4.2.12: Concentrations de Σ 15 HAP (ng/m ³) aux stations de Cagliari en hiver (à gauche) et en été (à droite).	68
Figure 4.2.13: Composition des HAP (%) aux stations de Cagliari en hiver (à gauche) et en été (à droite).	68
Figure 4.2.14: Composition des HAP (%) aux stations de Cagliari en hiver (à gauche) et en été (à droite).	69
Figure 4.2.15: Concentrations de Σ 7 PCB (pg/m ³) aux stations de Cagliari en hiver (à gauche) et en été (à droite).	69
Figure 4.2.16: Composition des PCB (%) aux stations de Cagliari en hiver (à gauche) et en été (à droite).	70
Figure 4.2.17: Tendance des moyennes horaires, journalières et mensuelles de SO ₂	72
Figure 4.2.18: Percentiles des valeurs de pollution par direction du vent.	72
Figure 4.2.19: Tendance des moyennes horaires, journalières et mensuelles de NO ₂	74
Figure 4.2.20: Percentili dei valori di inquinamento per direzione di provenienza del vento.	74
Figure 4.2.21: Tendance des moyennes horaires, journalières et mensuelles de C ₆ H ₆	76
Figure 4.2.22: Percentiles des valeurs de pollution par direction du vent.	76
Figure 4.2.23: Tendance des moyennes horaires, journalières et mensuelles de PM ₁₀	77
Figure 4.2.24: Tendance des moyennes journalières et mensuelles de PM _{2.5}	78
Figure 4.2.25: Concentrations de BTEX (µg/m ³) aux stations d'Olbia en hiver (à gauche) et en été (à droite).	79
Figure 4.2.26: Concentrations de C ₆ H ₆ (µg/m ³) aux stations d'Olbia en hiver (à gauche) et en été (à droite).	79
Figure 4.2.27: Concentrations de NO ₂ (µg/m ³) aux stations d'Olbia en hiver (à gauche) et en été (à droite).	79
Figure 4.2.28: Concentrations de SO ₂ (µg/m ³) aux stations d'Olbia en hiver (à gauche) et en été (à droite).	80
Figure 4.2.29: Concentrations de Σ 15 HAP (ng/m ³) aux stations d'Olbia en hiver (à gauche) et en été (à droite). ..	80
Figure 4.2.30: Composition des HAP (%) aux stations d'Olbia en hiver (à gauche) et en été (à droite).	80
Figure 4.2.31: Composition des HAP (%) aux stations d'Olbia en hiver (à gauche) et en été (à droite).	81
Figure 4.2.32: Concentrations de Σ 7 PCB (pg/m ³) aux stations d'Olbia en hiver (à gauche) et en été (à droite).	81
Figure 4.2.33: Composition des PCB (%) aux stations d'Olbia en hiver (à gauche) et en été (à droite).	81
Figure 4.2.34: Variation temporelle des concentrations numériques de particules ultrafines (UFP) (Part/cm ³) mesurées par ELPI pendant la campagne hivernale dans le port de Cagliari.	82
Figure 4.2.35: Variation temporelle des concentrations numériques de particules ultrafines (UFP) (Part/cm ³) mesurées par le compteur personnel de particules DiSCmini pendant la campagne d'hiver dans le port de Cagliari.	82
Figure 4.2.36: Variation temporelle des concentrations numériques de particules ultrafines (UFP) (Part/cm ³) mesurées par ELPI pendant la campagne estivale dans le port de Cagliari.	83
Figure 4.2.37: Variation temporelle des concentrations numériques de particules ultrafines (UFP) (Part/cm ³) mesurées par le compteur personnel de particules DiSCmini pendant la campagne d'été dans le port de Cagliari.	83

Figure 4.2.38: Variation temporelle des concentrations numériques de particules ultrafines (UFP) (Part/cm ³) mesurées par ELPI pendant la campagne d'été dans le port d'Olbia.....	84
Figure 4.2.39: Variazione temporale delle concentrazioni numeriche di particelle ultrafini (UFP) (Part/cm ³) misurata dal contatore di particelle personale DiSCmini durante la campagna estiva nel porto di Olbia.....	84
Figure 4.3.1: Tendence des concentrations moyennes horaires et journalières de NO et NO ₂ sur les sites de Fortezza Vecchia et Calata Bengasi.....	86
Figure 4.3.2: Comparaison des valeurs de NO _x entre les sites portuaires et les stations RRQA.....	87
Figure 4.3.3: Concentrations moyennes annuelles de NO ₂ obtenues avec des échantillonneurs passifs.....	88
Figure 4.3.4: Tendence des concentrations moyennes horaires et journalières de NO et NO ₂ sur le site de Portoferraio.....	90
Figure 4.3.5: Comparaison des valeurs de NO _x entre le site de Portoferraio et les stations RRQA.....	91
Figure 4.3.6: Tendances des moyennes horaires de I C ₆ H ₆ et des dérivés sur les sites de Fortezza Vecchia et Calata Bengasi	96
Figure 4.3.7: Comparaison des valeurs moyennes des sites portuaires avec la station de fond urbaine RRQA.	97
Figure 4.3.8: Moyennes quotidiennes de PM ₁₀ et PM _{2.5} sur le site de Fortezza Vecchia.	99
Figure 4.3.9: Moyennes quotidiennes de PM ₁₀ et PM _{2.5} sur le site de Calata Bengasi.	101
Figure 4.3.10: Tendances des moyennes journalières des PM ₁₀ et PM _{2.5} pour les deux sites portuaires de Livourne, sur toute la période d'échantillonnage.....	102
Figure 4.3.11: Comparaison des PM ₁₀ et PM _{2.5} entre le site de Fortezza Vecchia et les sites RRQA.	104
Figure 4.3.12: Comparaison des PM ₁₀ et PM _{2.5} entre le site de Calata Bengasi et les sites RRQA.	105
Figure 4.3.13: Andamento stagionale metalli pesanti.	106
Figure 4.3.14: Concentrations moyennes en ng/m ³ des cinq métaux sur les différents sites étudiés.....	108
Figure 4.3.15: Moyennes quotidiennes de PM ₁₀ et PM _{2.5} sur le site de Portoferraio.	109
Figure 4.3.16: Comparaison des PM ₁₀ et PM _{2.5} entre le site de Portoferraio et les sites RRQA.	111
Figure 4.3.17: Tendence des concentrations de Benzo(a)pyrène sur le site de Portoferraio et certaines stations RRQA.	112
Figure 4.3.18: Comparaison entre le site de Portoferraio et certains sites urbains de la RRQA.	113
Figure 4.4.1: Recherche de dépassements des lignes directrices (LD) horaires de l'OMS (2021) pour les concentrations en NO ₂	115
Figure 4.4.2: Recherche de dépassements des lignes directrices (LD) journalières de l'OMS (2021) pour les concentrations en NO ₂ , PM _{2.5} et SO ₂	116
Figure 4.4.3: Profils de concentrations journaliers en NO ₂ (gauche) et NO (droite) des microcapteurs (bleu), de la cabine AtmoSud Toulon TCA (rouge), des stations fixes Toulon Claret (vert) et Toulon Foch (gris).	117
Figure 4.4.4: Carte des roses de pollution des maxima de concentrations en NO ₂ enregistrés par la cabine TCA et les microcapteurs avant 13h (TU).	118
Figure 4.4.5: Carte des roses de pollution des maxima de concentrations en NO ₂ enregistrés par la cabine TCA et les microcapteurs après 13h (TU).	118
Figure 4.4.6: Carte des roses de pollution normalisées des maxima de concentrations en NO enregistrés par la cabine TCA et les microcapteurs avant 13h (TU).	119
Figure 4.4.7: Carte des roses de pollution normalisées des maxima de concentrations en NO enregistrés par la cabine TCA et les microcapteurs après 13h (TU).	119
Figure 4.4.8: Profils de concentrations journalières en PM ₁₀ (gauche) et PM _{2.5} (droite). Les courbes bleu désignent les données des microcapteurs, les courbes rouges les données de la cabine, les courbes vertes et grises les données des stations Toulon Claret et Toulon Foch respectivement.....	120
Figure 4.4.9: Comparaison entre concentrations brutes mesurées par les microcapteurs (lignes bleues), concentrations mesurées par la référence (lignes vertes) et concentrations mesurées par les microcapteurs réhaussées au niveau de la référence (lignes oranges), pour les PM ₁₀ et PM _{2.5}	121
Figure 4.4.10: Carte des roses de pollution harmonisées des maxima de concentrations en PM _{2.5} enregistrés par la cabine TCA et les microcapteurs avant 13h (TU).	122
Figure 4.4.11: Carte des roses de pollution harmonisées des maxima de concentrations en PM _{2.5} enregistrés par la cabine TCA et les microcapteurs après 13h (TU).	123
Figure 4.4.12: Fréquence de comptage des vitesses et directions des vents en pourcentage.....	123
Figure 4.4.13: Nombre total de navires à quai (bleu) incluant les ferries à quai (orange) dans les ports de Toulon et la Seyne-Brégaillon entre le 01/07/21 et le 30/09/21. La résolution temporelle du comptage des navires est de 5 minutes.....	124

Figure 4.4.14 : A Saint Mandrier, nombre de passages par jour des navires entrant ou sortant de la rade (bleu), incluant les ferries (orange).	124
Figure 4.5.1: Station Météo sur Canetto, présence de bâtiments à l'ouest. Rose des vents sur Canetto - Période Estivale 2021.	125
Figure 4.5.2: R Rose des vents sur Ajaccio (Port Nord - Local des Accès et Port Sud - Capitainerie Sud) – Période estivale 2021.	126
Figure 4.5.3: Rose des vents sur Ajaccio – Taille arbitraire.....	126
Figure 4.5.4: Panache d'un navire sur Ajaccio suivant la composante de vent principale Nord / Sud.	127
Figure 4.5.5: Rose des vents Bastia – Taille arbitraire.....	127
Figure 4.5.6: Rose des vents la journée. Rose des vents la nuit. Station du Fango.....	128
Figure 4.5.7: Rose des vents la journée. Rose des vents la nuit. Toit Mairie Bastia.	128
Figure 4.5.8: Navires à quai sur Ajaccio – Été 2021 – Données CCI – Pas de temps horaire.	129
Figure 4.5.9: Navires à quai sur Bastia – Été 2021 – Données CCI2B – Pas de temps horaire.	129
Figure 4.5.10: Valeurs NO ₂ (Moyenne horaire et journalière) sur Ajaccio avec ligne directrice OMS – 2021.....	131
Figure 4.5.11: Valeurs NO ₂ (Moyenne horaire et journalière) sur Bastia avec ligne directrice OMS – 2021.	132
Figure 4.5.12: Valeurs NO ₂ (Moyenne horaire et journalière) sur Ajaccio avec ligne directrice OMS – 2022.....	132
Figure 4.5.13: Valeurs NO ₂ (Moyenne horaire et journalière) sur Bastia avec ligne directrice OMS – 2022.	133
Figure 4.5.14: Valeurs SO ₂ (Moyenne horaire et journalière) sur Ajaccio, en dessous des lignes directrices OMS – 2021.	133
Figure 4.5.15: Valeurs SO ₂ (Moyenne horaire et journalière) sur Bastia, en dessous des lignes directrices OMS – 2021.	134
Figure 4.5.16: Valeurs SO ₂ (Moyenne horaire et journalière) sur Ajaccio, en dessous des lignes directrices OMS – 2022.	134
Figure 4.5.17: Valeurs SO ₂ (Moyenne horaire et journalière) sur Bastia, en dessous des lignes directrices OMS – 2022.	135
Figure 4.5.18: Valeurs PM _{2.5} (Moyenne horaire et journalière) sur Ajaccio avec ligne directrice OMS – 2021.....	135
Figure 4.5.19: Valeurs PM _{2.5} (Moyenne horaire et journalière) sur Bastia avec ligne directrice OMS – 2021.....	136
Figure 4.5.20: Valeurs PM _{2.5} (Moyenne horaire et journalière) sur Ajaccio avec ligne directrice OMS – 2022.	136
Figure 4.5.21: Valeurs PM _{2.5} (Moyenne horaire et journalière) sur Bastia avec ligne directrice OMS – 2022.	137
Figure 4.5.22: Valeurs CPT (Moyenne horaire et journalière) sur Ajaccio – 2021.	137
Figure 4.5.23: Valeurs CPT (Moyenne horaire et journalière) sur Bastia – 2021.....	138
Figure 4.5.24: Valeurs CPT (Moyenne horaire et journalière) sur Ajaccio – 2022.	138
Figure 4.5.25: Valeurs CPT (Moyenne horaire et journalière) sur Bastia – 2022.....	139
Figure 4.5.26: Profil horaire des valeurs moyennes et maximales en NO ₂ sur Ajaccio durant la période estivale 2021.	140
Figure 4.5.27: Profils horaires SO ₂ , PM _{2.5} et CPT sur Ajaccio durant la période estivale 2021.....	141
Figure 4.5.28: Mesures Moyenne journalières NO ₂ Ajaccio – Période Estivale 2021 – Micro-capteurs (µNO ₂) et analyseurs (NO ₂).....	142
Figure 4.5.29: Mesures Max journaliers NO ₂ Ajaccio – Période Estivale 2021 – Micro-capteurs (µNO ₂) et analyseurs (NO ₂).....	143
Figure 4.5.30: Mesures moyennes journalières PM _{2.5} Bastia – Période Estivale 2021 – Micro-capteurs (µNO ₂) et analyseurs (NO ₂).....	144
Figure 4.5.31: Mesures Max journaliers NO ₂ Bastia – Période Estivale 2021 – Micro-capteurs (µNO ₂) et analyseurs (NO ₂).....	144
Figure 4.5.32: Mesures moyennes journalières PM _{2.5} Ajaccio – Période Estivale 2021 – Micro-capteurs (µPM _{2.5}) et analyseurs (PM _{2.5}).	145
Figure 4.5.33: Mesures Max journaliers PM _{2.5} Ajaccio – Période Estivale 2021 – Micro-capteurs (µPM _{2.5}) et analyseurs (PM _{2.5}).	146
Figure 4.5.34: Mesures moyennes journalières PM _{2.5} Bastia – Période Estivale 2021 – Micro-capteurs (µPM _{2.5}) et analyseurs (PM _{2.5}).	147
Figure 4.5.35: Mesures Max journaliers PM _{2.5} Bastia – Période Estivale 2021 – Micro-capteurs (µPM _{2.5}) et analyseurs (PM _{2.5}).	147
Figure 4.5.36: Concentration en PM _{2.5} en extérieur (AW) et intérieur (AP) sur Ajaccio (Hôpital AJA – courbe du haut / Capitainerie Sud – courbe du bas).	149
Figure 4.5.37: Transfert de concentrations en PM _{2.5} sur Ajaccio entre l'air extérieur (AW30142 & AW 30143) vers l'air intérieur (AP692 & AP693).....	149

Figure 4.5.38: Concentrations SO ₂ en intérieur mesurées par Ellona (Ajaccio & Bastia) - Août/Septembre 2022...	150
Figure 4.5.39: Transfert concentrations en SO ₂ obtenues sur Ajaccio (mesures Ellona en intérieur et extérieur) - Août/Septembre 2022.	150
Figure 4.5.40: Transfert concentrations en NO ₂ obtenues sur Ajaccio (mesures Ellona en intérieur et extérieur) - Août/Septembre 2022.	151

Table de tableaux

Tableau 4.2.1: Port de Cagliari - Principaux indicateurs statistiques des polluants surveillés.	58
Tableau 4.2.2: Zone de Cagliari - Comparaison des indicateurs statistiques relatifs au SO ₂	59
Tableau 4.2.3: Zone de Cagliari -Comparaison des indicateurs statistiques de NO ₂	60
Tableau 4.2.4: Zone de Cagliari - Comparaison des indicateurs statistiques du C ₆ H ₆	62
Tableau 4.2.5: Zone de Cagliari -Comparaison des indicateurs statistiques des PM10.	64
Tableau 4.2.6: Zone de Cagliari - Comparaison des indicateurs statistiques des PM2.5.	65
Tableau 4.2.7: Port d'Olbia - Principaux indicateurs statistiques des polluants surveillés.....	70
Tableau 4.2.8: Zone d'Olbia-Comparaison des indicateurs statistiques du SO ₂	71
Tableau 4.2.9: Zone d'Olbia – Comparaison des indicateurs statistiques de NO ₂	73
Tableau 4.2.10: Zone d'Olbia – Comparaison des indicateurs statistiques du C ₆ H ₆	75
Tableau 4.2.11: Zone d'Olbia – Comparaison des indicateurs statistiques des PM10.....	77
Tableau 4.2.12: Zone d'Olbia – Comparaison des indicateurs statistiques des PM2.5.....	78
Tableau 4.3.1: Données sur les NO _x sur le site de Fortezza Vecchia.	85
Tableau 4.3.2: Données sur les NO sur le site de Calata Bengasi.	86
Tableau 4.3.3: Comparaison des concentrations de NO _x des sites portuaires et des stations RRQA.	87
Tableau 4.3.4: Concentrations moyennes saisonnières et annuelles de NO ₂ obtenues avec des échantillonneurs passifs.	88
Tableau 4.3.5: Concentrations moyennes annuelles de NO ₂ obtenues avec des échantillonneurs passifs et RRQA.	89
Tableau 4.3.6: Données NO _x sur le site de Portoferraio.....	89
Tableau 4.3.7: Comparaison des concentrations de NO _x des sites de Portoferraio et des stations RRQA.	90
Tableau 4.3.8: Données sur les CO sur les sites de Fortezza Vecchia Calata Bengasi.	91
Tableau 4.3.9: Données sur les CO sur le site de Portoferraio.	92
Tableau 4.3.10: Données sur les SO ₂ sur les sites de Fortezza Vecchia Calata Bengasi.	92
Tableau 4.3.11: Données sur les SO ₂ sur le site de Portoferraio.....	93
Tableau 4.3.12: Données C ₆ H ₆ sur le site Fortezza Vecchia.	93
Tableau 4.3.13: Données C ₆ H ₆ sur le site Calata Bengasi.....	94
Tableau 4.3.14: Comparaison des données des sites portuaires et de la station RRQA.	97
Tableau 4.3.15: Données sur les PM10 et PM2.5 sur le site de Fortezza Vecchia.	98
Tableau 4.3.16: Données saisonnières sur les PM10 et PM2.5 sur le site de Fortezza Vecchia.	98
Tableau 4.3.17: Fraction PM2.5 dans PM10 sur le site de Fortezza Vecchia.	99
Tableau 4.3.18: Données sur les PM10 et PM2.5 sur le site de Calata Bengasi.....	100
Tableau 4.3.19: Données saisonnières sur les PM10 et PM2.5 sur le site de Calata Bengasi.....	100
Tableau 4.3.20: Frazione PM2.5 nel PM10 nel sito di Calata Bengasi.	101
Tableau 4.3.21: Comparaison des PM10 et PM2.5 du site portuaire de Fortezza Vecchia avec les stations RRQA.	103
Tableau 4.3.22: Comparaison des PM10 et PM2.5 du site portuaire de Calata Bengasi avec les stations RRQA.	103
Tableau 4.3.23: Concentrations moyennes en ng/m ³ des cinq métaux sur les deux sites étudiés.	105
Tableau 4.3.24: Concentrations moyennes en ng/m ³ des cinq métaux sur les différents sites étudiés.....	106
Tableau 4.3.25: Données sur les PM10 et PM2.5 sur le site de Portoferraio.....	109
Tableau 4.3.26: Fraction PM2.5 dans PM10 sur le site de Portoferraio.....	109
Tableau 4.3.27: Comparaison des PM10 et PM2.5 du site portuaire de Portoferraio avec les stations RRQA.....	110
Tableau 4.3.28: Concentrations des sept congénères de HAP dans les PM10 à Portoferraio (ng/m ³).....	111
Tableau 4.3.29: Concentrations de Benzo(a)pyrène sur le site de Portoferraio et certaines stations RRQA.....	112
Tableau 4.4.1: Comparaison des concentrations en NO ₂ , PM2.5 et SO ₂ mesurées lors des campagnes estivales 2020 et 2021, au niveau de la cabine mobile du port de Toulon et des stations fixes de Toulon Foch, Toulon Claret et la Seyne-Brégaillon.....	114
Tableau 4.5.1: Valeurs des polluants principaux sur Ajaccio – Période estivale 2021.	130
Tableau 4.5.2: Valeurs des principaux polluants sur Bastia – Période estivale 2021.....	130
Tableau 4.5.3: Lignes directrices définies par l'OMS pour les polluants principaux – OMS.....	131
Tableau 4.5.4: Dates épisodes de pollution particules fines.....	141

Tableau 4.5.5: Données régression linéaire pour μ Capteur PM (évaluation sur les PM2.5) – Capteur placé ensuite au niveau d'Eglise Madonna.....	148
---	-----

Dans ce chapitre, les résultats de la surveillance que chaque partenaire a effectuée dans sa propre région de compétence sont discutés.

Les données élémentaires sont disponibles sur MONI.C.A., plateforme partagée avec les Partenaires pour collecter les données du projet Aer Nostrum.

4.1 LIGURIE

Les activités de surveillance de la qualité de l'air dans le cadre du projet AER NOSTRUM font appel, comme on le sait, à des instruments traditionnels et « intelligents ». Les instruments intelligents ont déjà été illustrés dans le chapitre précédent : ici, les instruments traditionnels sont brièvement présentés. En détail, ARPAL a renforcé l'une de ses stations mobiles en ajoutant aux instruments existants (un analyseur de NO_x, Teledyne T200) un capteur automatique de particules certifié conforme à la réglementation en vigueur pour la détermination des PM₁₀ et PM_{2.5} (PALAS FIDAS 200E) et une station météorologique Luft WS600 all-in-one.

La station mobile ainsi équipée a été positionnée sur le site Largo San Francesco da Paola - San Teodoro (identifié sur la carte par le numéro 8), accompagnée d'un échantillonneur gravimétrique de particules (DIGITEL modèle DPA-14), qui a été utilisé aussi bien pour tester l'instrument automatique que pour collecter les échantillons de PM₁₀ nécessaires à la spéciation pour l'étude d'attribution des sources.



Figure 4.1.1: Échantillonneur PalasFidas sur la station mobile du site de San Teodoro.

Comme nous l'expliquons plus en détail ci-dessous, l'étude d'attribution des sources a également été réalisée sur un autre site, celui du RQA de Corso Firenze : là aussi, un échantillonneur de particules DIGITEL modèle DPA-14 a été utilisé pour collecter les PM₁₀.



Figure 4.1.2: Echantillonneur gravimétrique Digitel sur le site de San Teodoro (à gauche) et de Corso Firenze (à droite) pour les campagnes expérimentales.

Toutes les données acquises à partir des instruments intelligents et des instruments conventionnels concernés par le projet sont mises à disposition en temps quasi réel pour être saisies dans la plateforme MONICA ; de la même manière, les mêmes données sont mises à disposition en aval des activités de validation de premier niveau. Ce résultat a été obtenu grâce au déploiement du système d'acquisition et de gestion des données sur la qualité de l'air (progiciel OPAS), qui a été mis à jour pour permettre à la fois l'intégration en temps réel des données provenant des instruments intelligents installés sur le terrain et leur gestion en termes de visualisation et de diffusion sur d'autres plateformes.

Analyse des résultats

L'annexe 3 - ARPAL présente les résultats et les indicateurs statistiques des instruments intelligents et des instruments du réseau fixe pour la période juillet-septembre 2022 au cours de laquelle tous les instruments intelligents étaient pleinement opérationnels.

Il est à noter que quelques dépassements des limites fixées par la réglementation en vigueur ont été enregistrés pour la valeur horaire de NO₂ : ces dépassements ont été enregistrés uniquement par les instruments intelligents, alors que les instruments de référence n'ont atteint que des valeurs légèrement supérieures à 180 mg/m³ dans un seul cas.

Pour ce paramètre, les instruments intelligents ont détecté des valeurs de concentration moyennes 50% plus élevées que les instruments traditionnels installés sur le même site de référence (Largo San Francesco da Paola). En outre, des concentrations moyennes plus élevées ont été enregistrées en août et sur des sites à l'intérieur de la zone portuaire (Dépôt Huiles minérales et Ancienne blanchisserie industrielle).

Aucun dépassement des limites fixées par la réglementation en vigueur pour la valeur moyenne journalière des PM₁₀ n'a été enregistré.

Quant aux deux fractions réglementées de particules, en revanche, les instruments intelligents ont détecté des valeurs de concentration moyennes inférieures de 20 % à celles des instruments traditionnels installés sur le même site de référence pour les PM₁₀, tandis que les valeurs moyennes étaient plus similaires pour les PM_{2.5}. En outre, des concentrations moyennes plus élevées ont été enregistrées en août et sur les sites à l'intérieur de la zone portuaire (Dépôt Huiles minérales et Ancienne blanchisserie industrielle) aussi pour les particules.

La station dénommée École Gastaldi-Abba (voir n° 3 sur la figure 1), située sur la terrasse d'une école donnant sur la Sopraelevata (l'une des principales artères de trafic motorisé de Gênes) et sur la zone du terminal des ferries, est le site où ont été détectées les concentrations les plus élevées des paramètres contrôlés pendant la campagne de mesure.

Études de cas

Nous présentons ci-après quelques cas jugés intéressants qui se sont vérifiés en dehors des trois mois considérés comme représentatifs dans ce rapport.

- **Événement du weekend de Pâques**

Un événement important concernant la concentration de NO₂ a été constaté pendant le week-end de Pâques, caractérisé par un trafic intense dans le terminal de passagers en raison de la présence de nombreux ferries et bateaux de croisière. En particulier, comme on peut le voir sur le graphique de la figure ci-dessous, la concentration moyenne enregistrée par la station mobile ARPAL sur le site de San Teodoro - Largo San Francesco da Paola a été plus élevée pendant les heures de départ et d'arrivée des principaux navires et dans des conditions de vent provenant du secteur S-SO, comme le montre la Rose de pollution pour les NO₂ réalisée séparément pour le 15 avril 2022 à différents intervalles de temps.

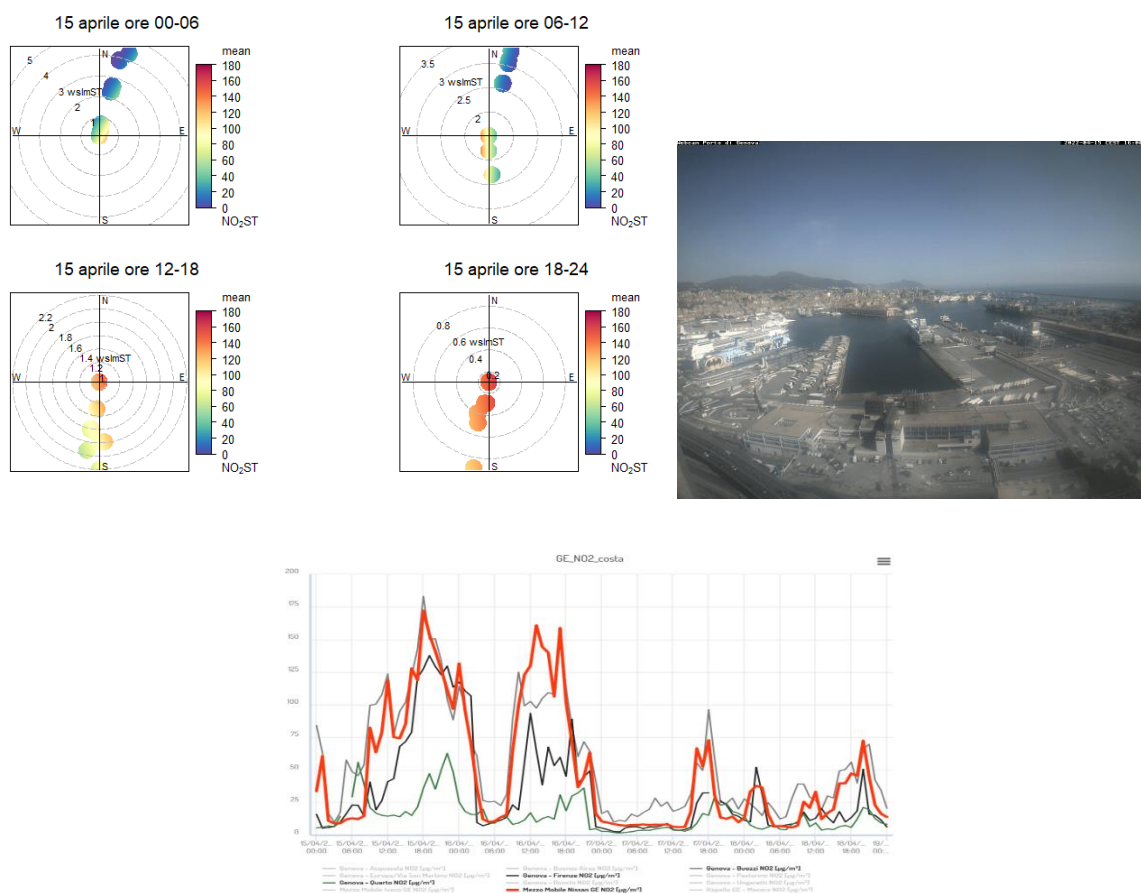


Figure 4.1.3: Rose de pollution et évolution temporelle des NO₂ sur le site de San Teodoro (ligne rouge) aux heures de départ des navires de passagers pendant le weekend de Pâques 2022.

• Événement advection de poussières sahariennes fin octobre

Un événement particulièrement significatif pour mettre en évidence les limites des instruments intelligents dans les mesures des PM₁₀ est celui qui s'est produit à la fin du mois d'octobre 2022, lorsqu'il y a eu une forte advection de poussières sahariennes à des niveaux élevés qui a duré quelques jours dans un cadre d'absence de précipitations et de forte stabilité atmosphérique, entraînant des dépassements des valeurs limites journalières des PM₁₀ les jours entre le 23 et le 28 octobre 2022.

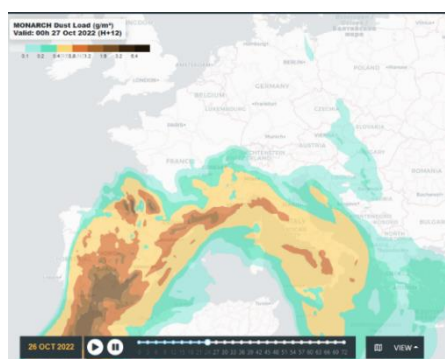


Figure 4.1.4: Charge de poussières sahariennes attendues pendant les jours de fin octobre, selon le WMO Barcelona Dust Regional Center.

Dans la première phase, les mesures horaires effectuées à l'aide d'instruments certifiés (en noir sur les graphiques ci-dessous) ont montré une augmentation marquée de la fraction la plus grossière des

particules, les PM10 atteignant des valeurs de l'ordre de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La fraction des particules de diamètre aérodynamique inférieur à 2,5 μm a montré une augmentation beaucoup plus faible au cours des premiers jours de transport du sable, puis une augmentation relative plus importante les jours suivants. Cela est probablement dû au fait que les particules les plus grossières ont précipité les premières par gravité et que les plus petites ont atteint le sol par la suite. Les mesures effectuées au moyen des instruments intelligents ont montré de grandes limites dans la représentation de ce phénomène particulier.

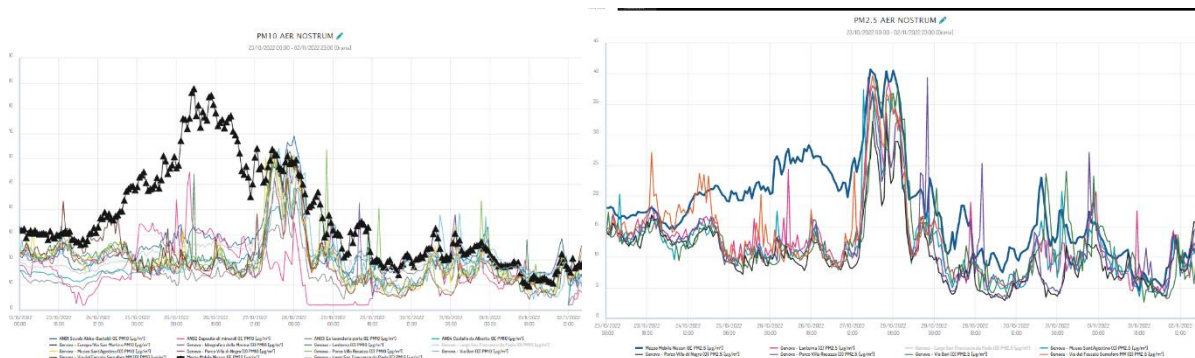


Figure 4.1.5: Séries chronologiques de PM10 et PM2.5 provenant des instruments intelligents et de référence pendant le transport transfrontalier de poussières du Sahara à la fin du mois d'octobre 2022.

Comme le montrent les graphiques ci-dessus, les pics des PM10 des premiers jours ont été presque totalement « manqués » par les instruments intelligents, et ce n'est que lorsque la fraction des PM2.5 a augmenté (représentée en bleu dans les graphiques pour les instruments de référence) que les valeurs des PM10 sont également redevenues comparables à celles mesurées par les instruments conventionnels.

4.2 SARDAIGNE

- Site portuaire de Cagliari

ARPAS

Ci-dessous le tableau récapitulatif avec les principaux indicateurs statistiques des polluants contrôlés dans le port de Cagliari, pendant la période de mesure du 04/10/2021 au 31/08/2022.

Tableau 4.2.1: Port de Cagliari - Principaux indicateurs statistiques des polluants surveillés.

LABCAG Le Port de Cagliari	C ₆ H ₆ µg/m ³	CO mg/m ³	NO ₂ µg/m ³	O ₃ µg/m ³	PM10 µg/m ³	PM2.5 µg/m ³	SO ₂ µg/m ³
% funz.	97	94	92	94	93	93	93
Min	0,0	0,0	0,0	0,0	5,3	0,2	0,0
25° perc.	0,3	0,2	9,5	36,8	15,8	6,5	0,0
Mediana	0,5	0,2	17,3	58,2	20,3	9,5	0,2
Media	0,8	0,2	22,0	54,9	22,7	10,4	0,7
75° perc.	1,1	0,2	29,9	74,2	26,3	12,5	0,8
Max	13,5	1,6	123,8	139,6	134,7	43,4	14,6
Max MG	4,2	0,7	61,9	103,4	134,7	43,4	4,9
Max MM8	-	1,1	-	114,1	-	-	-

En général, les mesures enregistrées sont conformes aux limites légales, à savoir:

- C₆H₆ présente une moyenne de 0,8 µg/m³, dans la limite légale de 5 µg/m³;
- CO présente une moyenne mobile maximale sur huit heures de 1,1 mg/m³, alors que la limite légale est de 10 mg/m³;
- NO₂ présente une moyenne horaire maximale de 124 µg/m³, alors que la limite légale est de 200 µg/m³; la moyenne est de 22 µg/m³, alors que la référence légale est de 40 µg/m³;
- O₃ présente une moyenne mobile maximale journalière sur huit heures de 114 µg/m³, par rapport à l'objectif de 120 µg/m³; les moyennes horaires maximales sont de 140 µg/m³, en dessous du seuil d'information (180 µg/m³) et du seuil d'alerte (240 µg/m³);
- les PM10 affichent une moyenne de 23 µg/m³ par rapport à la limite légale de 40 µg/m³; le nombre de dépassements quotidiens de 50 µg/m³ était de 8 par rapport à une limite annuelle de 35;
- PM2.5 une moyenne de 10 µg/m³ a été enregistrée, alors que la limite légale est de 25 µg/m³;
- Enfin pour SO₂ le maximum horaire était de 15 µg/m³, contre une limite légale de 350 µg/m³, tandis que le maximum moyen journalier était de 5 µg/m³, contre une référence réglementaire de 125 µg/m³.

L'annexe 3 – ARPSAS contient les fiches de résultats statistiques et d'indicateurs, numérotées respectivement de 3.1 à 3.4, qui décrivent les tendances des données des stations impliquées dans la campagne de surveillance.

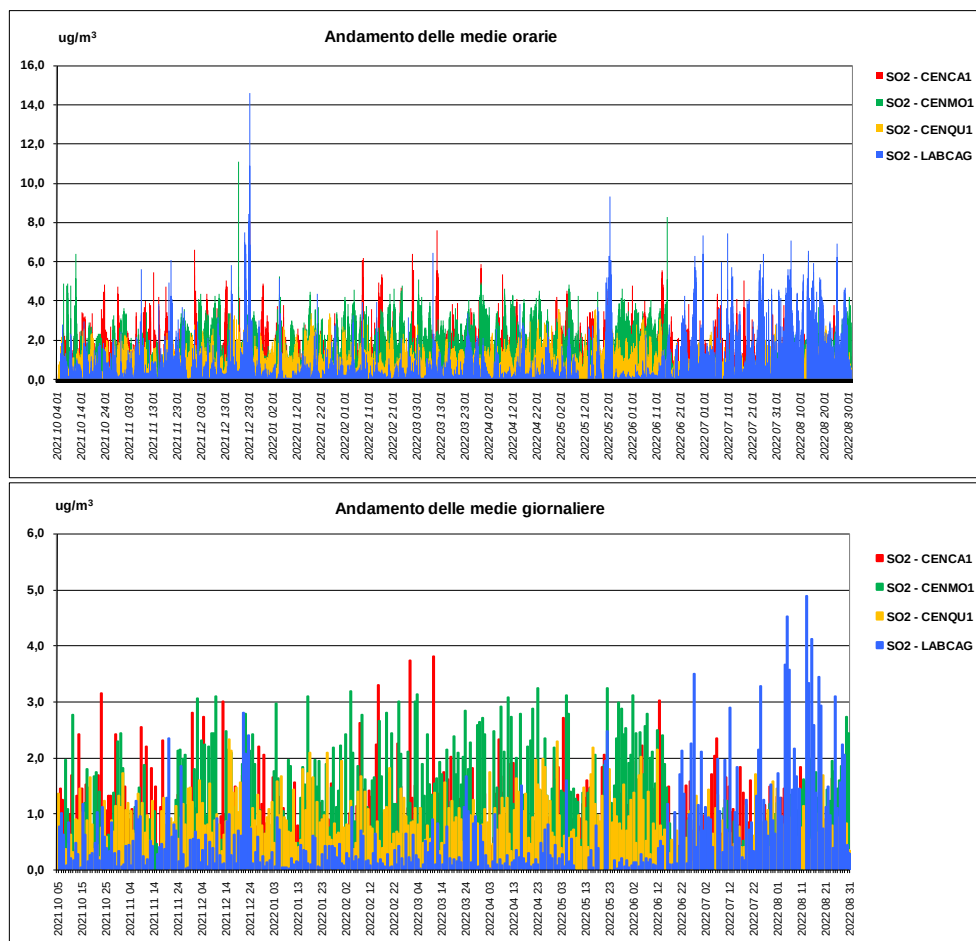
Gaz: Résultats et discussion

En ce qui concerne le SO₂, il faut noter que les concentrations, bien que plutôt faibles, présentent généralement des valeurs du même ordre de grandeur dans toutes les stations, avec des maxima horaires et journaliers mesurés au port épisodiquement supérieurs à ceux typiquement mesurés pendant la même période dans la zone de Cagliari par les stations CENCA1 (Cagliari - UT), CENMO1 (Monserrato - UB) e CENQU1 (Quartu S.E. - UB).

Tabella 4.2.2: Zona di Cagliari - Comparazione des indicateurs statistiques relatifs au SO₂.

Port de Cagliari	SO ₂ - LABCAG µg/m ³	SO ₂ - CENCA1 µg/m ³	SO ₂ - CENMO1 µg/m ³	SO ₂ - CENQU1 µg/m ³
Min	0,0	0,0	0,0	0,0
25° perc.	0,0	0,4	0,6	0,5
Mediana	0,2	0,8	1,2	0,8
Media	0,7	1,0	1,4	0,9
75° perc.	0,8	1,4	2,1	1,2
Max	14,6	8,1	11,1	3,8
Max MG	4,9	3,8	3,2	2,3

Les diagrammes ci-dessous montrent l'évolution du dioxyde de soufre dans le port de Cagliari en comparant les moyennes horaires, journalières et mensuelles avec les stations voisines. Bien qu'il soit évident que les valeurs moyennes de SO₂ mesurées dans la zone sont proches et regroupées, et ne dépassent pas la valeur assez basse de 1 µg/m³, on constate que les maxima moyens horaires et journaliers mesurés au port de Cagliari augmentent pendant la période estivale, atteignant des valeurs modestes.



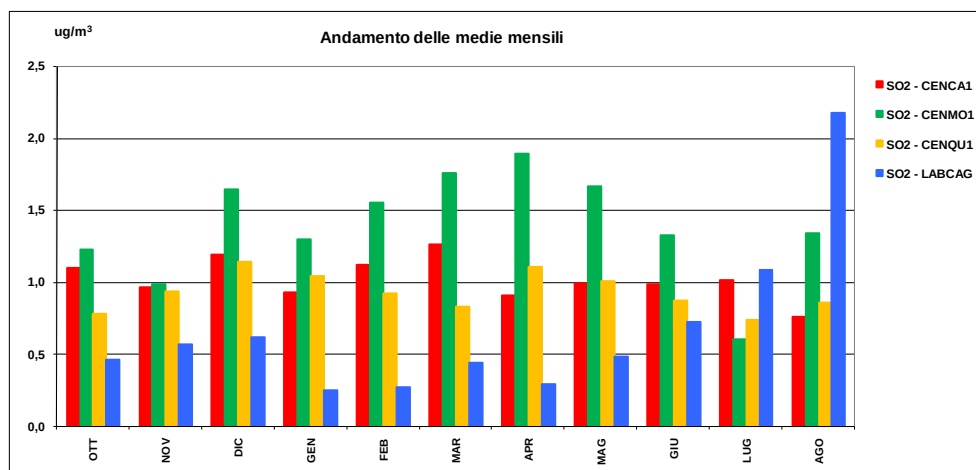


Figure 4.2.1: Tendence des moyennes horaires, journalières et mensuelles de SO₂.

En ce qui concerne le NO₂, on observe une moyenne de 22 µg/m³, à comparer avec les mesures des stations fixes qui varient entre 11 µg/m³ (CENMO1 et CENQU1) et 22 µg/m³ (CENCA1), et un maximum horaire de 124 µg/m³ par rapport aux valeurs de la zone urbaine qui varient entre 76 µg/m³ (CENQU1) et 104 µg/m³ (CENMO1). En général, il y a des différences statistiques importantes entre les mesures prises au port et les stations de fond fixes (CENMO1 et CENQU1), alors qu'il y a une affinité étroite avec les mesures de la station de trafic CENCA1, comme le montre le tableau ci-dessous.

Tableau 4.2.3: Zone de Cagliari -Comparaison des indicateurs statistiques de NO₂.

Port de Cagliari	NO ₂ - LABCAG µg/m ³	NO ₂ - CENCA1 µg/m ³	NO ₂ - CENMO1 µg/m ³	NO ₂ - CENQU1 µg/m ³
Min	0,0	0,0	0,0	0,0
25° perc.	9,5	10,6	4,3	4,7
Mediana	17,3	18,5	7,4	7,6
Media	22,0	22,4	10,5	10,8
75° perc.	29,9	31,2	13,8	13,4
Max	123,8	99,5	104,1	76,2
Max MG	61,9	50,1	27,8	29,9

Les graphiques ci-dessous montrent que les tendances sont en accord avec les fluctuations saisonnières, avec des concentrations plus élevées en période hivernale, et que les moyennes horaires et journalières de NO₂, mesurées dans la zone portuaire, sont fréquemment plus élevées que celles des stations de la zone.

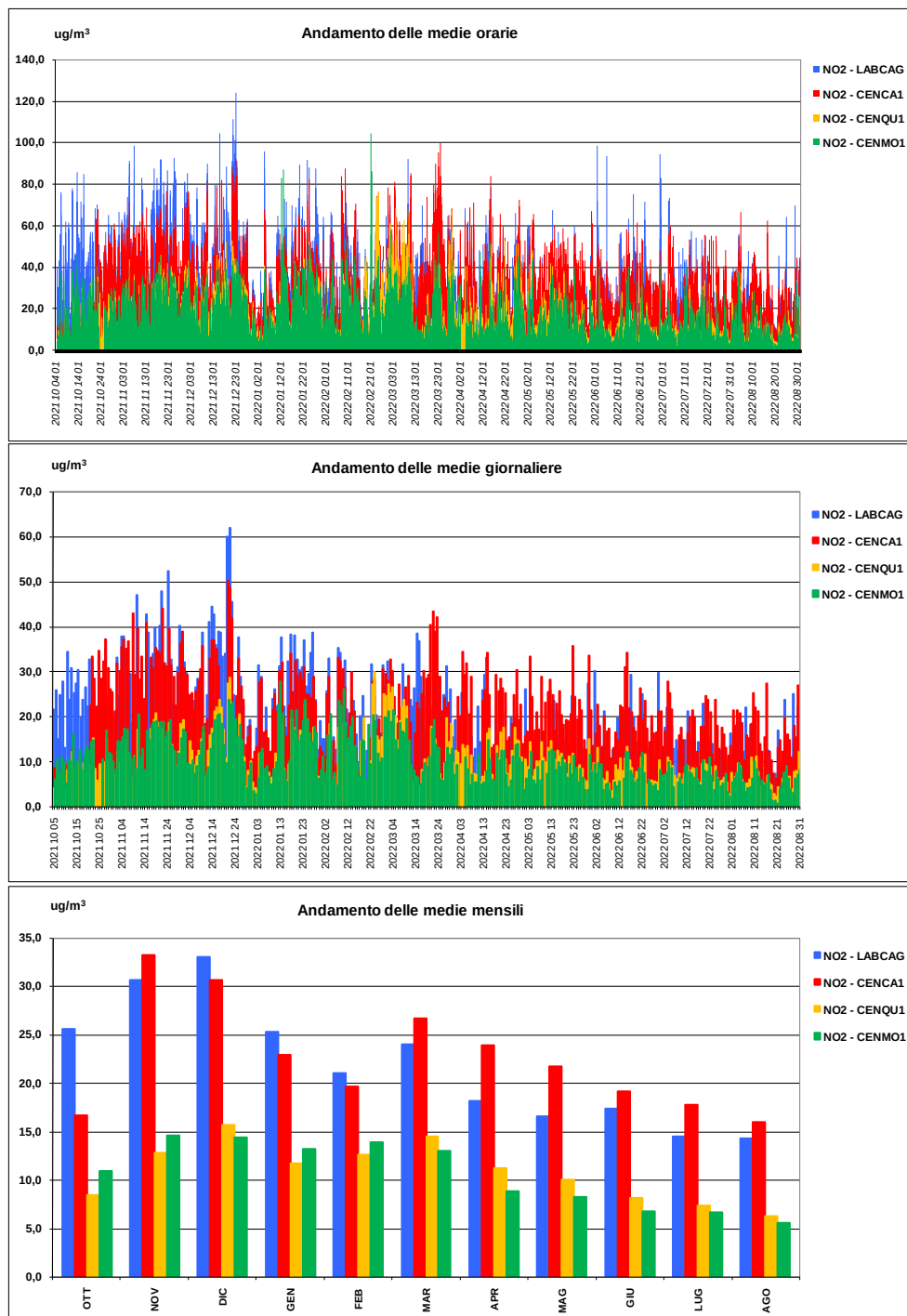


Figure 4.2.2: Tendance des moyennes horaires, journalières et mensuelles de NO₂.

La corrélation entre la surveillance et les sources d'émission de NO₂ est mise en évidence en schématisant la distribution des percentiles en fonction de la direction du vent: on constate une distribution diffuse du polluant, ce qui serait pleinement justifié par les émissions combinées des activités portuaires et du trafic routier intense sur les routes adjacentes.

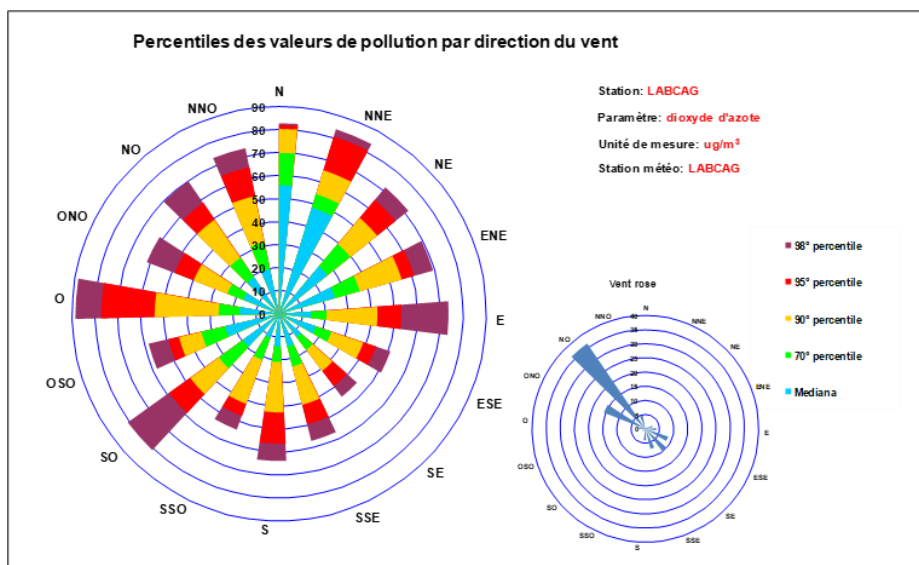


Figure 4.2.3: Percentiles des valeurs de pollution par direction du vent.

Ces considérations doivent toutefois être confirmées par des études ultérieures sur les émissions et la modélisation.

En ce qui concerne le benzène mesuré dans la zone portuaire pendant la période considérée, il faut noter que les valeurs sont faibles, avec une moyenne de $0,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ce qui est parfaitement conforme aux tendances des autres stations urbaines, comme le montre le tableau suivant.

Tableau 4.2.4: Zone de Cagliari - Comparaison des indicateurs statistiques du C_6H_6 .

Port de Cagliari	C_6H_6 - LABCAG $\mu\text{g}/\text{m}^3$	C_6H_6 - CENCA1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	C_6H_6 - CENMO1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	C_6H_6 - CENQU1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Min	0,0	0,0	0,1	0,0
25° perc.	0,3	0,3	0,2	0,1
Mediana	0,5	0,5	0,4	0,2
Media	0,8	0,8	0,6	0,6
75° perc.	1,1	0,9	0,7	0,4
Max	13,5	11,3	5,8	17,0
Max MG	13,5	11,3	5,8	17,0

Les graphiques ci-dessous, relatifs aux tendances des moyennes horaires, journalières et mensuelles, montrent des pics plus élevés en période hivernale, en corrélation avec toutes les stations de la zone, et des mesures nettement plus faibles en période estivale.

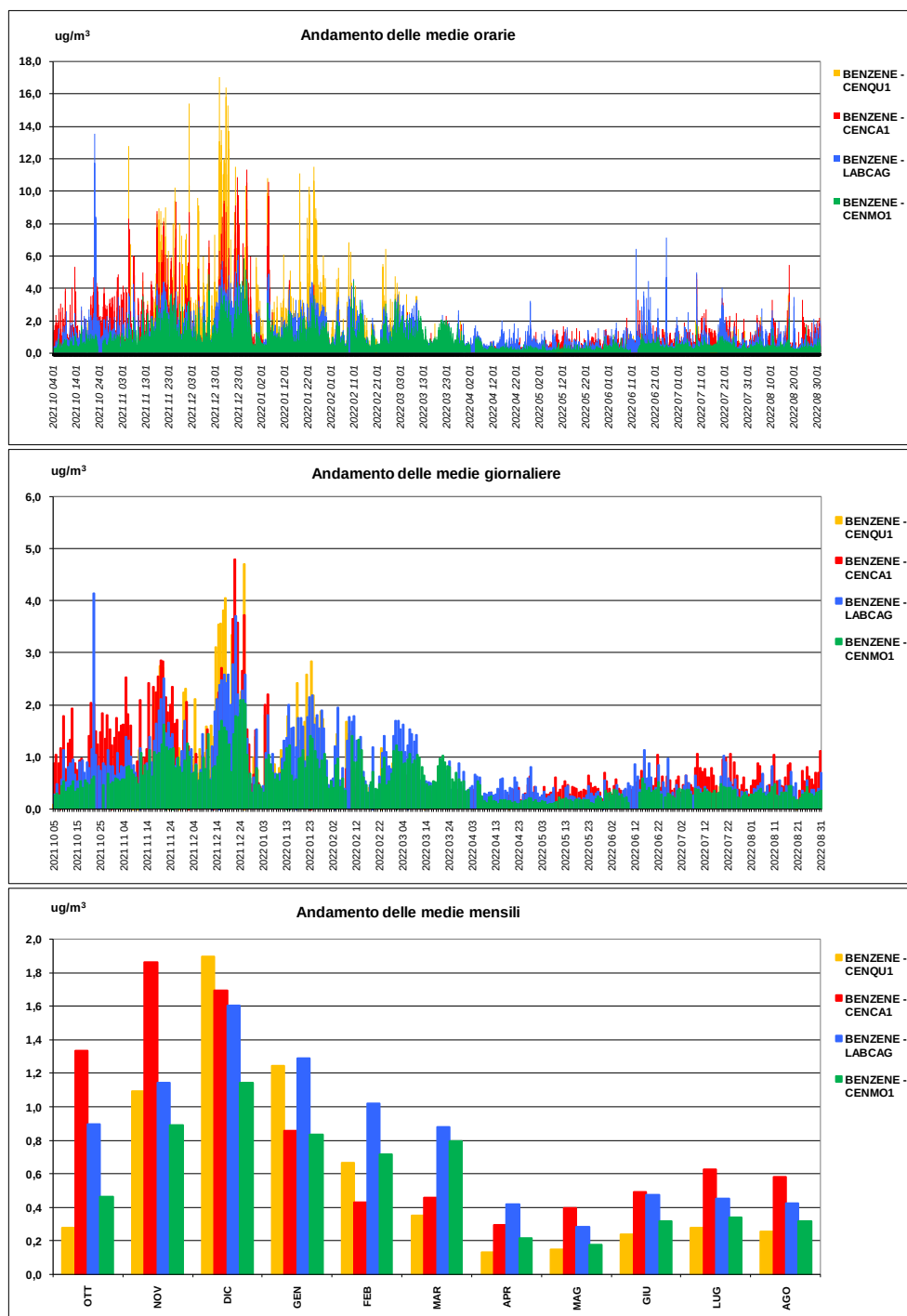


Figure 4.2.4: Tendance des moyennes horaires, journalières et mensuelles de C_6H_6 .

La corrélation entre les mesures et les sources d'émission de benzène montre, comme pour le NO_2 , une distribution diffuse du polluant, due au fait que la station mobile est immergée et entourée par les différentes sources d'émission, qui identifie toutefois deux directions principales attribuables au trafic routier, de la direction NNE, et aux activités portuaires, de la direction SO. Ces considérations sont indicatives pour les études ultérieures d'émission/modélisation.

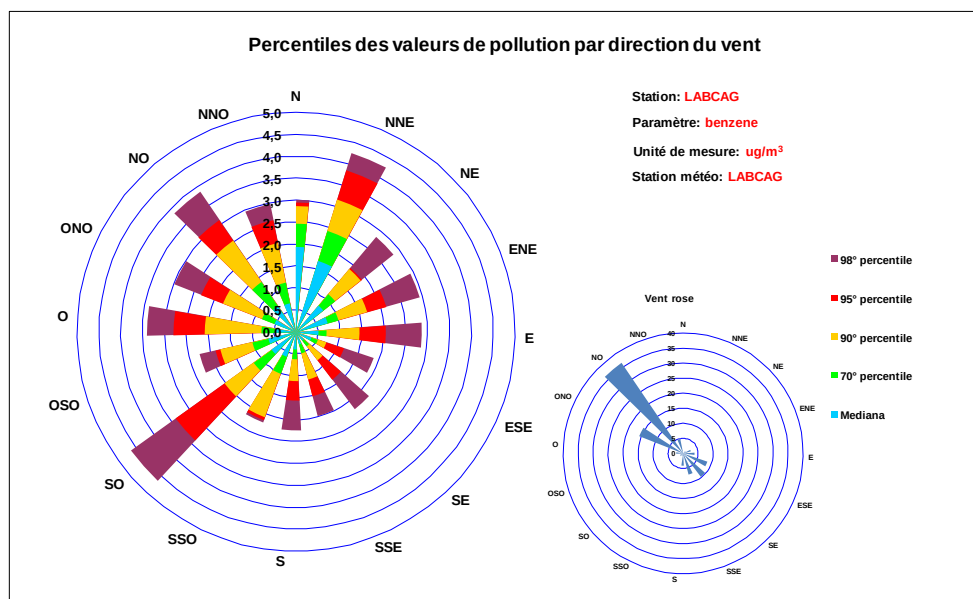


Figure 4.2.5: Percentiles des valeurs de pollution par direction du vent.

PARTICOLATO: risultati e discussioni

Il PM10 misurato dal LABCAG mostra un andamento intermedio rispetto alle stazioni fisse. La media è di $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$, rispetto a una variazione nell'area da $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (CENQU1) a $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (CENMO1). Il numero di superamenti della media giornaliera è 8, da confrontare con una oscillazione nell'area urbana tra 3 (CENQU1) e 22 (CENMO1).

Tableau 4.2.5: Zone de Cagliari - Comparaison des indicateurs statistiques des PM10.

Port de Cagliari	PM10 - LABCAG $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM10 - CENCA1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM10 - CENMO1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM10 - CENQU1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Min	5,3	9,1	9,8	4,2
25° perc.	15,8	19,4	20,8	12,7
Mediana	20,3	24,5	25,4	16,2
Media	22,7	26,6	29,4	18,5
75° perc.	26,3	31,0	34,8	21,1
Max MG	134,7	70,6	85,9	64,2
Superamenti	8	7	22	3

Les diagrammes suivants (journaliers et mensuels) montrent des tendances cohérentes et uniformes entre les relevés effectués dans le port de Cagliari par rapport aux autres sites de la zone.

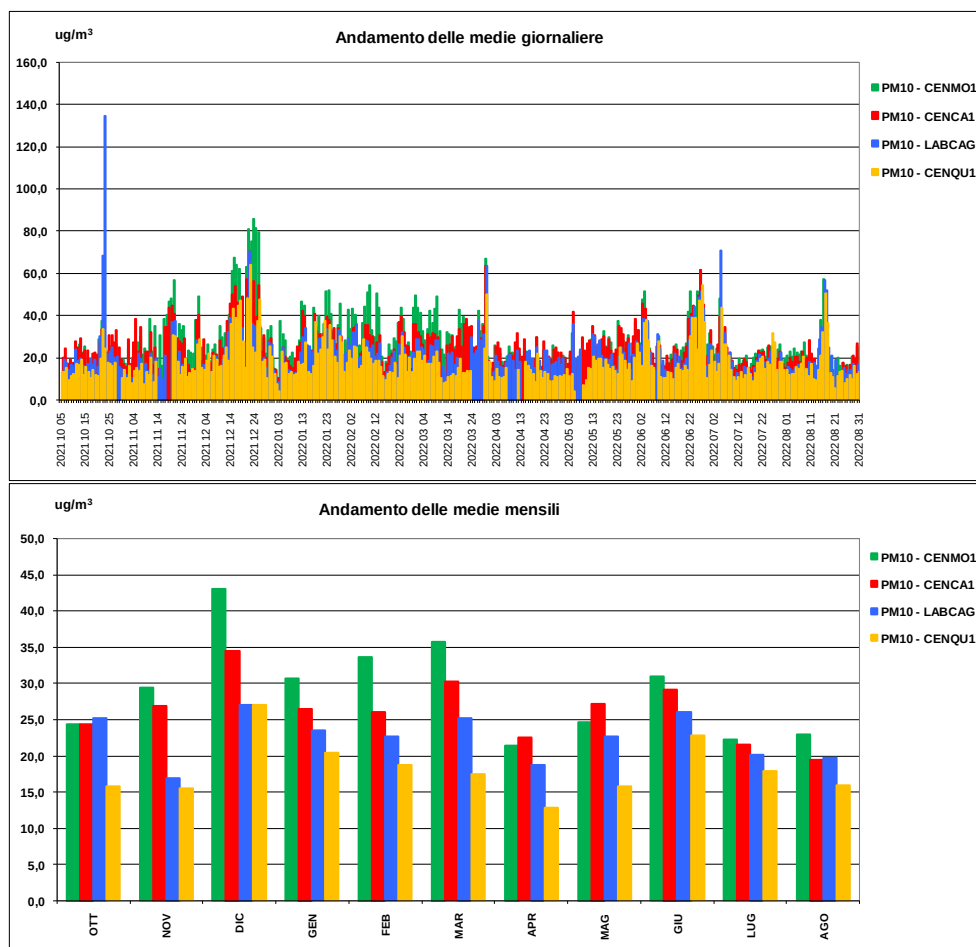


Figure 4.2.6: Tendence des moyennes horaires, journalières et mensuelles de PM10.

Les PM2.5 présentent également une tendance intermédiaire avec une moyenne de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$; dans la zone, les valeurs varient entre $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (CENMO1) et $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (CENCA1), comme le montre le tableau de comparaisons statistiques ci-dessous.

Tableau 4.2.6: Zone de Cagliari - Comparaison des indicateurs statistiques des PM2.5.

Port de Cagliari	PM2.5 - LABCAG $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM2.5 - CENCA1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM2.5 - CENMO1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Min	0,2	4,8	1,7
25° perc.	6,5	9,9	3,7
Mediana	9,5	11,6	5,0
Media	10,4	13,2	6,1
75° perc.	12,5	15,1	7,4
Max MG	43,4	46,9	28,5

La tendance des mesures est confirmée visuellement par les diagrammes ci-dessous, où l'on constate des concentrations plus élevées en période hivernale et une forte uniformité des tendances.

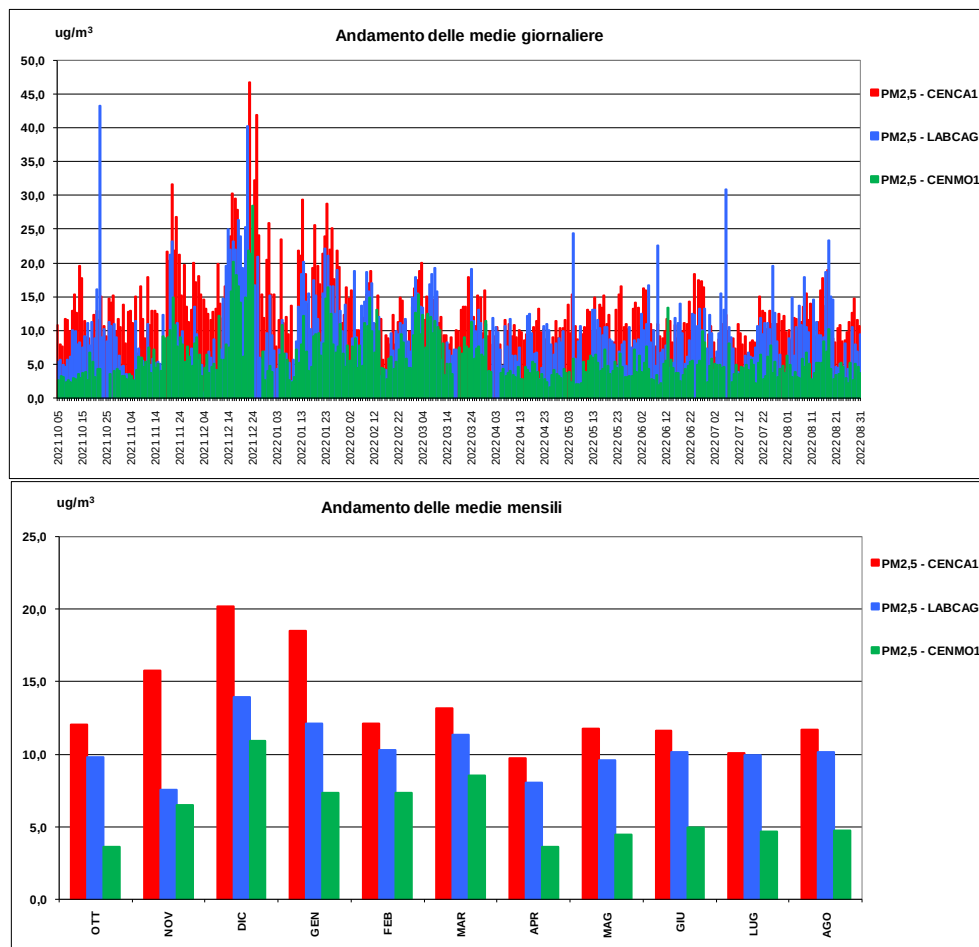


Figure 4.2.7: Tendance des moyennes horaires, journalières et mensuelles de PM2.5.

UNICA

Nous rapportons ci-dessous les résultats des deux campagnes de surveillance (hiver-été) réalisées dans les périodes février - mars 2022 et juin - juillet 2022 dans le port de Cagliari, en utilisant des échantillonneurs passifs.

Pour chaque polluant, nous représentons graphiquement les résultats en suivant la légende des couleurs utilisée dans les cartes : station de fond (jaune), station industrielle (bleu) et station de trafic (rouge).

BTEX: Parmi ces composés, le benzène joue un rôle important car sa présence dans l'air est presque exclusivement due aux activités liées au cycle de l'essence, comme c'est le cas pour les autres BTEX, il s'avère donc être un excellent traceur de la pollution due au trafic automobile. Les concentrations de ces polluants sont généralement plus élevées en période hivernale qu'en été probablement en raison du chauffage domestique. Dans le graphique, cette tendance est modérément visible, mais elle est évidente pour le benzène, avec une moyenne de $0,74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en hiver dans tous les points d'échantillonnage, sauf dans la station ML où la valeur est légèrement inférieure ($0,46 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et dans le MB avec une valeur inférieure à la limite de détection ($<0,018 \mu\text{g}/\text{m}^3$), tandis que dans la campagne d'été nous avons une réduction marquée des concentrations avec des valeurs minimales dans la station de fond MI avec $0,091 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et IA avec $0,10 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

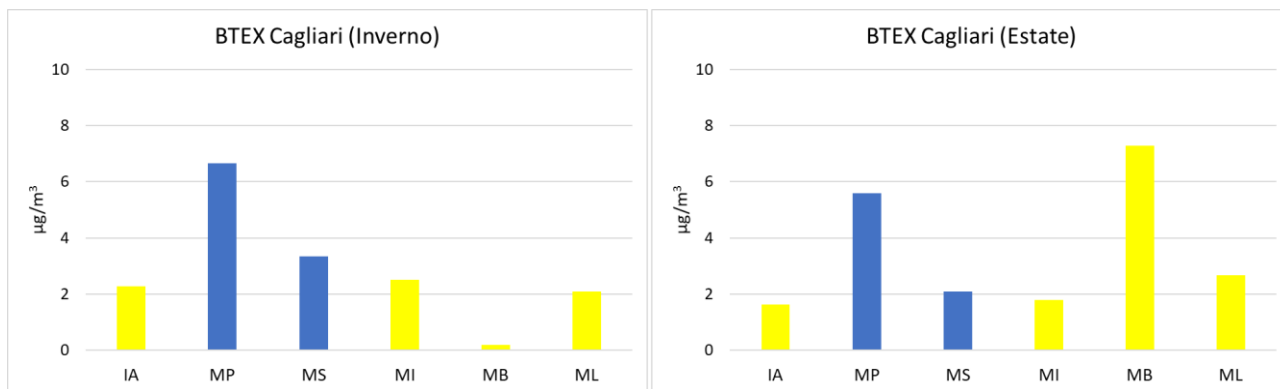


Figure 4.2.8: Concentrations de BTEX (µg/m³) aux stations de Cagliari en hiver (à gauche) et en été (à droite).

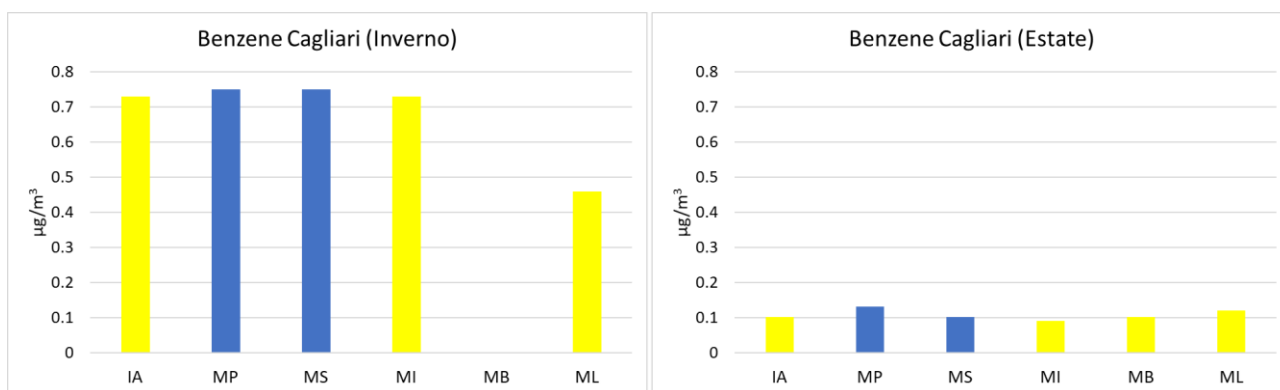


Figure 4.2.9: Concentrations de C₆H₆ (µg/m³) aux stations de Cagliari en hiver (à gauche) et en été (à droite).

NO₂: Comme le C₆H₆, le NO₂ est aussi un polluant primaire; les graphiques des deux campagnes montrent des valeurs assez similaires entre les périodes estivale et hivernale: la figure montre la valeur la plus élevée à la station MS (11 µg/m³) et la plus basse à la station IA (4,2 µg/m³) dans la période hivernale, tandis que dans la campagne estivale nous trouvons la valeur la plus élevée à la même station MS (15,5 µg/m³) et la concentration la plus basse à la station ML (8,1 µg/m³).

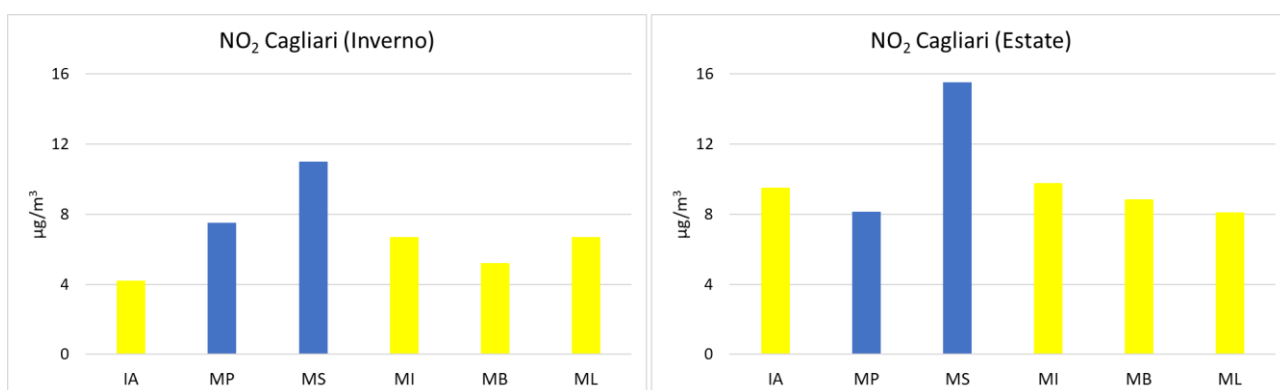


Figure 4.2.10: Concentrations de NO₂ (µg/m³) aux stations de Cagliari en hiver (à gauche) et en été (à droite).

SO₂: Dans la figure, on peut voir qu'en période hivernale, les valeurs de dioxyde de soufre aux stations IA et MI sont inférieures au seuil de détection (<0,1 µg/m³), tout en restant faibles aux autres stations, ces valeurs augmentent légèrement en période estivale à toutes les stations avec une concentration moyenne de 0,2 µg/m³.

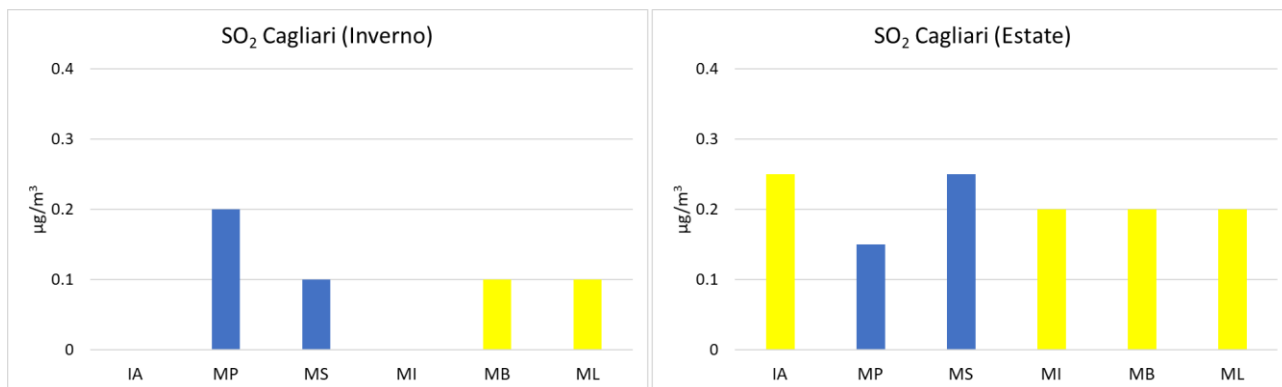


Figure 4.2.11: Concentrations de SO₂ (µg/m³) aux stations de Cagliari en hiver (à gauche) et en été (à droite).

HAP: Les concentrations atmosphériques (ng/m³) de $\Sigma 15$ HAP variaient de 1,27 (IA) à 12,62 (MS) en hiver et de 3,2 (IA) à 22,24 (MI) en été. Le naphtalène n'a pas été pris en compte dans la sommation, car des concentrations élevées ont été trouvées dans les blancs de transport et de laboratoire. Cela est dû à sa grande volatilité et à son omniprésence.

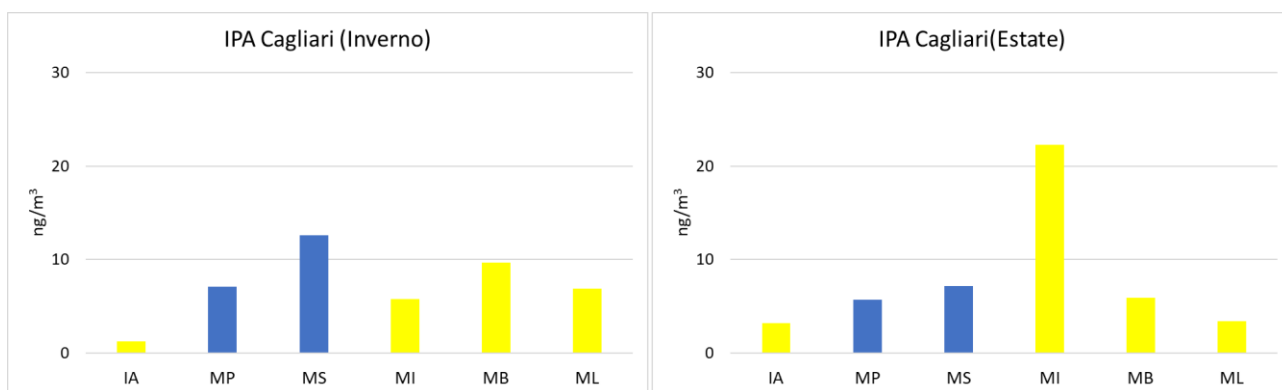


Figure 4.2.12: Concentrations de $\Sigma 15$ HAP (ng/m³) aux stations de Cagliari en hiver (à gauche) et en été (à droite).

Le profil des HAP, comme on peut le voir sur la figure 8, était dominé par les HAP à 3 et 4 cycles, qui représentent plus de 90 % des $\Sigma 15$ HAP.

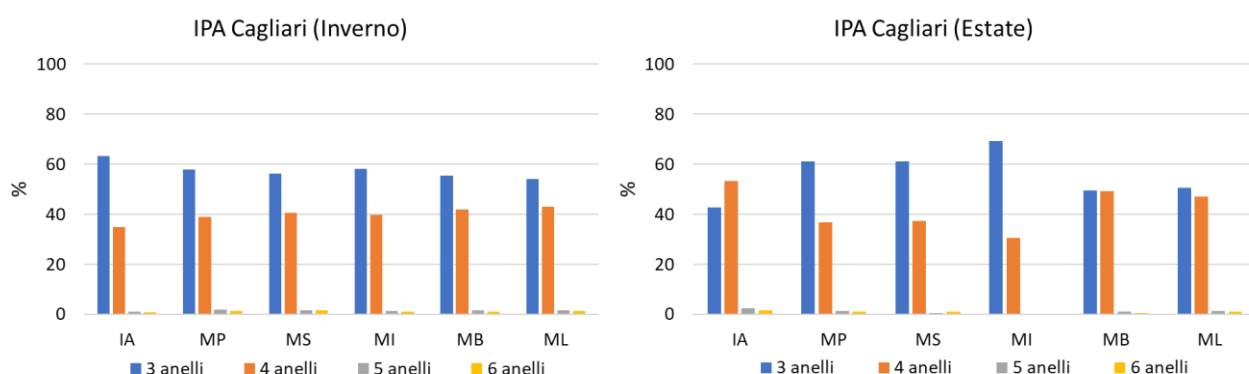


Figure 4.2.13: Composition des HAP (%) aux stations de Cagliari en hiver (à gauche) et en été (à droite).

Les HAP les plus dominants, tant en hiver qu'en été, étaient le phénanthrène (40-52%), suivi du fluoranthène (19-26%) et du pyrène (11-22%), qui se trouvent principalement dans la phase gazeuse (figure 9). En ce qui concerne le benzo(a)pyrène (indicateur de risque cancérigène pour les HAP évalués), la valeur maximale trouvée en hiver était de 0,033 ng/m³ (MS) et de 0,015 ng/m³ (MP) en été.

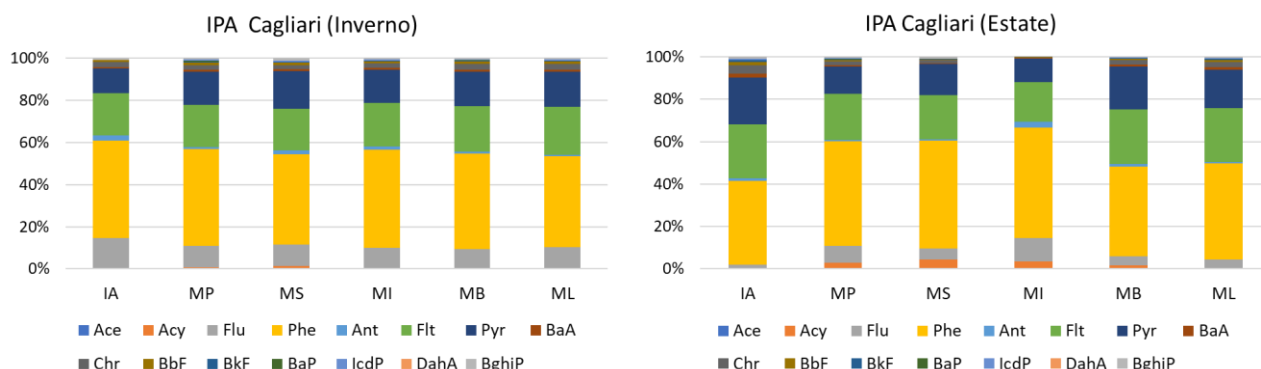


Figure 4.2.14: Composition des HAP (%) aux stations de Cagliari en hiver (à gauche) et en été (à droite).

PCB: Les résultats pour les $\Sigma 7$ PCBs (Cl3-7) sont présentés dans la figure. Les concentrations de PCB en suspension dans l'air (pg/m^3) ont été détectées sur tous les sites d'échantillonnage et variaient de 2 à 21 en hiver et de 31 à 100 en été. Les concentrations les plus élevées ont été observées en été sur le site industriel MP (100 pg/m^3) où les PCB 153 et 101 étaient dominants (22% et 20% respectivement). Dans toutes les autres stations surveillées, les PCB dominants étaient les congénères 28 et 52. Les congénères les plus chlorés ont une volatilité plus faible et peuvent être éliminés efficacement par dépôt lié aux particules. Des différences saisonnières dans les concentrations de PCB (pg/m^3) dans l'air ont été observées dans toutes les stations et ont montré le schéma suivant : été > hiver. Ce comportement des PCB est cohérent avec l'influence de la réémission induite par la température par volatilisation à partir de sources directement exposées à l'air (par exemple le sol, les vieux équipements, les sources externes) et a montré une augmentation des PCB plus légers (faible poids moléculaire) pendant les périodes plus chaudes.



Figure 4.2.15: Concentrations de $\Sigma 7$ PCB (pg/m^3) aux stations de Cagliari en hiver (à gauche) et en été (à droite).

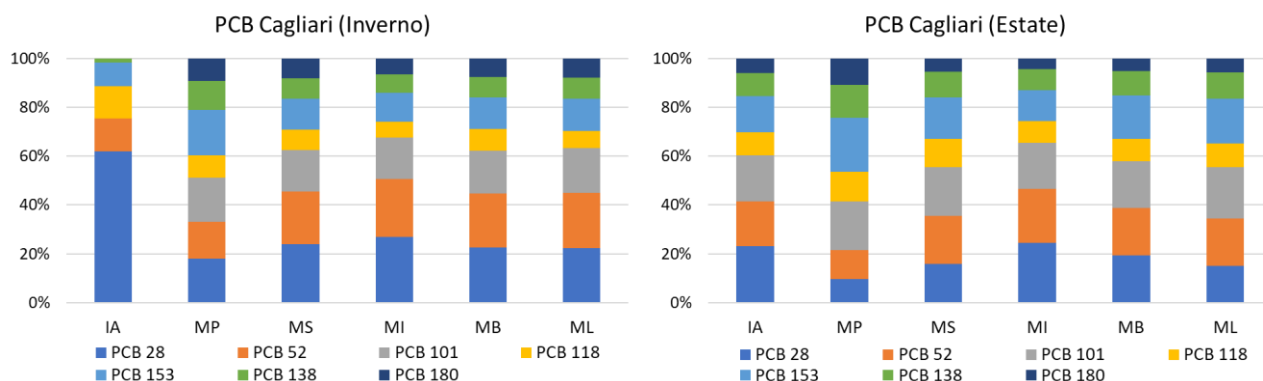


Figure 4.2.16: Composition des PCB (%) aux stations de Cagliari en hiver (à gauche) et en été (à droite).

• Zone du port d'Olbia

ARPAS

Ci-dessous le tableau récapitulatif avec les principaux indicateurs statistiques des polluants contrôlés dans le port d'Olbia, pendant la période de mesure du 29/10/2021 au 31/08/2022.

Tableau 4.2.7: Port d'Olbia - Principaux indicateurs statistiques des polluants surveillés.

LABLOB Port d'Olbia	C ₆ H ₆ µg/m ³	CO mg/m ³	NO ₂ µg/m ³	O ₃ µg/m ³	PM10 µg/m ³	PM2.5 µg/m ³	SO ₂ µg/m ³
% funz.	90	92	93	95	91	90	94
Min	0,0	0,1	0,0	0,0	3,1	1,4	0,0
25° perc.	0,1	0,2	16,4	26,4	9,9	5,1	0,3
Mediana	0,2	0,2	28,3	50,9	13,1	7,8	0,8
media	0,3	0,3	31,3	50,5	13,6	7,7	1,5
75° perc.	0,4	0,3	42,9	73,3	15,8	9,4	1,5
Max	7,8	1,2	126,7	133,7	38,8	25,2	83,8
Max MG	1,3	0,5	67,5	93,6	38,8	25,2	15,0
Max MM8	-	1,1	-	114,1	-	-	-

En général, les mesures enregistrées sont conformes aux limites légales, à savoir:

- C₆H₆ présente une moyenne de 0,3 µg/m³, dans la limite légale de 5 µg/m³;
- CO présente une moyenne mobile maximale sur huit heures de 0,8 mg/m³, alors que la limite légale est de 10 mg/m³;
- NO₂ présente une moyenne horaire maximale de 127 µg/m³, alors que la limite légale est de 200 µg/m³; la moyenne est de 31 µg/m³, alors que la référence légale est de 40 µg/m³;
- O₃ présente une moyenne mobile maximale journalière sur huit heures de 122 µg/m³, par rapport à l'objectif de 120 µg/m³; les moyennes horaires maximales sont de 134 µg/m³, en dessous du seuil d'information (180 µg/m³) et du seuil d'alerte (240 µg/m³);
- les PM10 présentent une moyenne de 14 µg/m³ par rapport à la limite légale de 40 µg/m³; il n'y a pas de dépassement journalier de 50 µg/m³ par rapport à une limite annuelle de 35;
- une moyenne de 8 µg/m³ a été enregistrée pour les PM2.5, alors que la limite légale est de 25 µg/m³;
- enfin, en ce qui concerne le SO₂, le maximum horaire est de 84 µg/m³, contre une limite légale de 350 µg/m³, tandis que le maximum moyen journalier est de 15 µg/m³, contre une référence réglementaire de 125 µg/m³.

L'annexe 3 – ARPAS contient les fiches de résultats statistiques et d'indicateurs, numérotées respectivement de 3.5 à 3.7, qui décrivent les tendances des données des stations impliquées dans la campagne de surveillance.

Gaz: Risultats et discussion

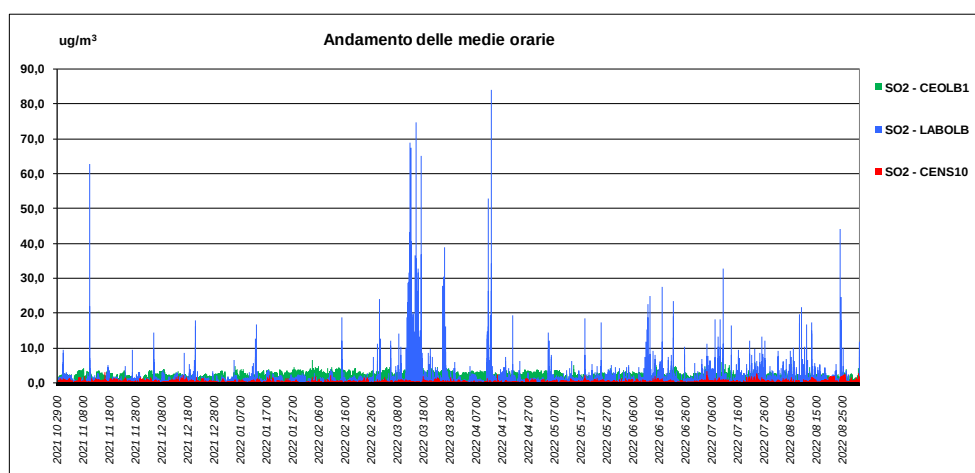
En ce qui concerne le SO₂, il faut noter que les concentrations dans la zone portuaire présentent des valeurs avec des maxima horaires et journaliers épisodiquement plus élevés que ceux typiquement mesurés dans la même période dans la zone d'Olbia par les stations CENS10 (Via Roma - UT) et CEOLB1 (Via Fausto Noce - UB).

Tableau 4.2.8: Zone d'Olbia-Comparaison des indicateurs statistiques du SO₂.

Port d'Olbia	SO ₂ - LABOLB µg/m ³	SO ₂ - CENS10 µg/m ³	SO ₂ - CEOLB1 µg/m ³
Min	0,0	0,0	0,2
25° perc.	0,3	0,1	1,9
Mediana	0,8	0,3	2,3
Media	1,5	0,4	2,4
75° perc.	1,5	0,5	2,8
Max	83,8	3,1	7,9
Max MG	15,0	1,5	4,0

En effet, à proximité des quais, on enregistre une moyenne horaire maximale de 84 µg/m³ par rapport aux valeurs des stations fixes variant entre 3 µg/m³ (CENS10) et 8 µg/m³ (CEOLB1), et une moyenne journalière maximale de 15 µg/m³ par rapport aux valeurs des stations fixes variant entre 2 µg/m³ (CENS10) et 4 µg/m³ (CEOLB1).

Les diagrammes ci-dessous montrent l'évolution du dioxyde de soufre dans le port d'Olbia en comparant les moyennes horaires, journalières et mensuelles avec les stations voisines. Bien qu'il soit évident que les valeurs moyennes de SO₂ mesurées dans la zone sont proches et groupées, et ne dépassent pas la valeur assez basse de 2 µg/m³, on note fréquemment des épisodes de forte pollution, bien que dans les limites réglementaires.



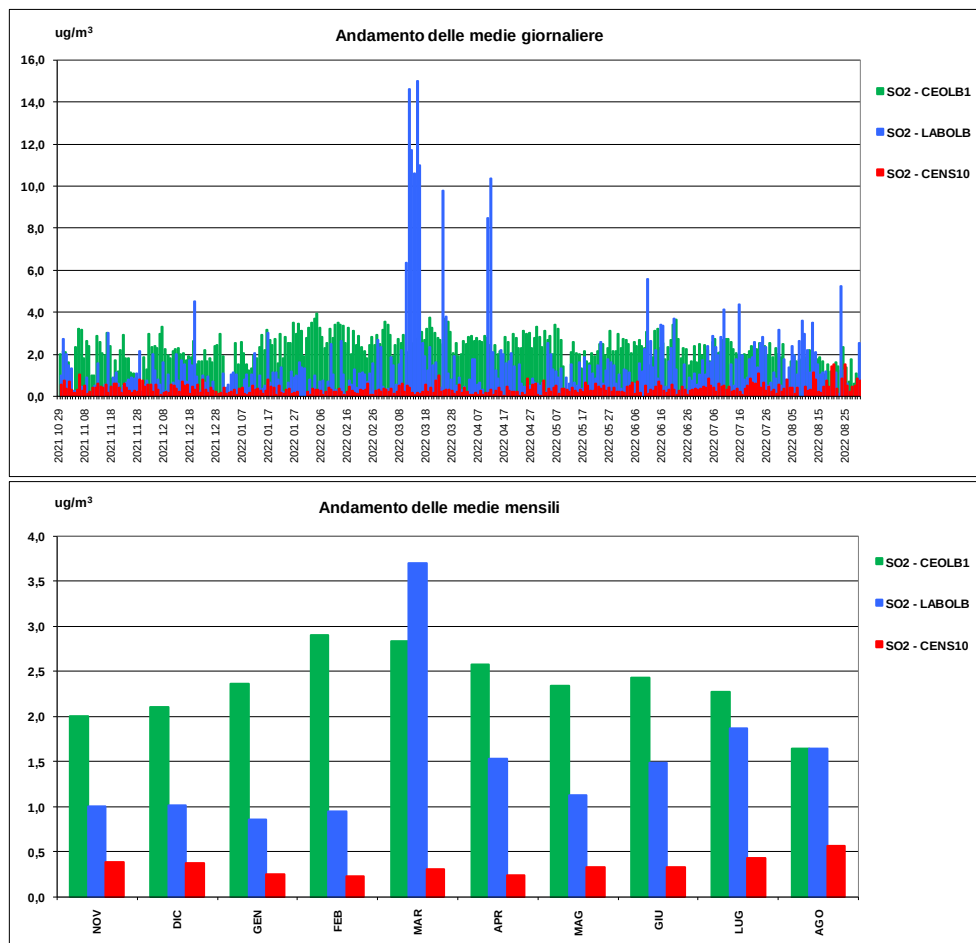


Figure 4.2.17: Tendence des moyennes horaires, journalières et mensuelles de SO_2 .

La corrélation entre la surveillance et les sources d'émission de SO_2 est mise en évidence en schématisant la distribution des percentiles en fonction de la direction d'origine du vent : l'analyse des données montre une forte corrélation avec l'origine du polluant dans la direction NNE et E, au niveau des quais du port.

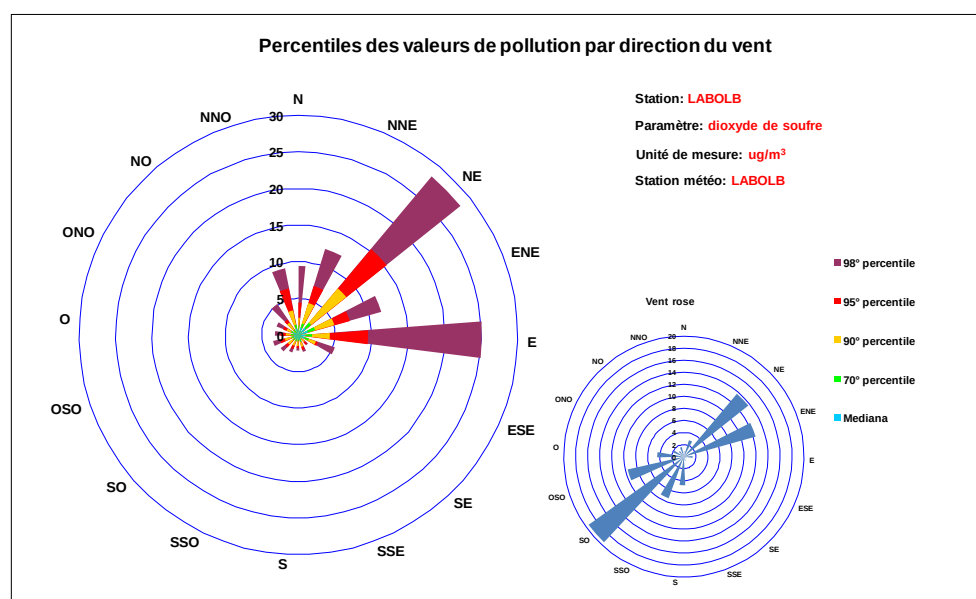


Figure 4.2.18: Percentiles des valeurs de pollution par direction du vent.

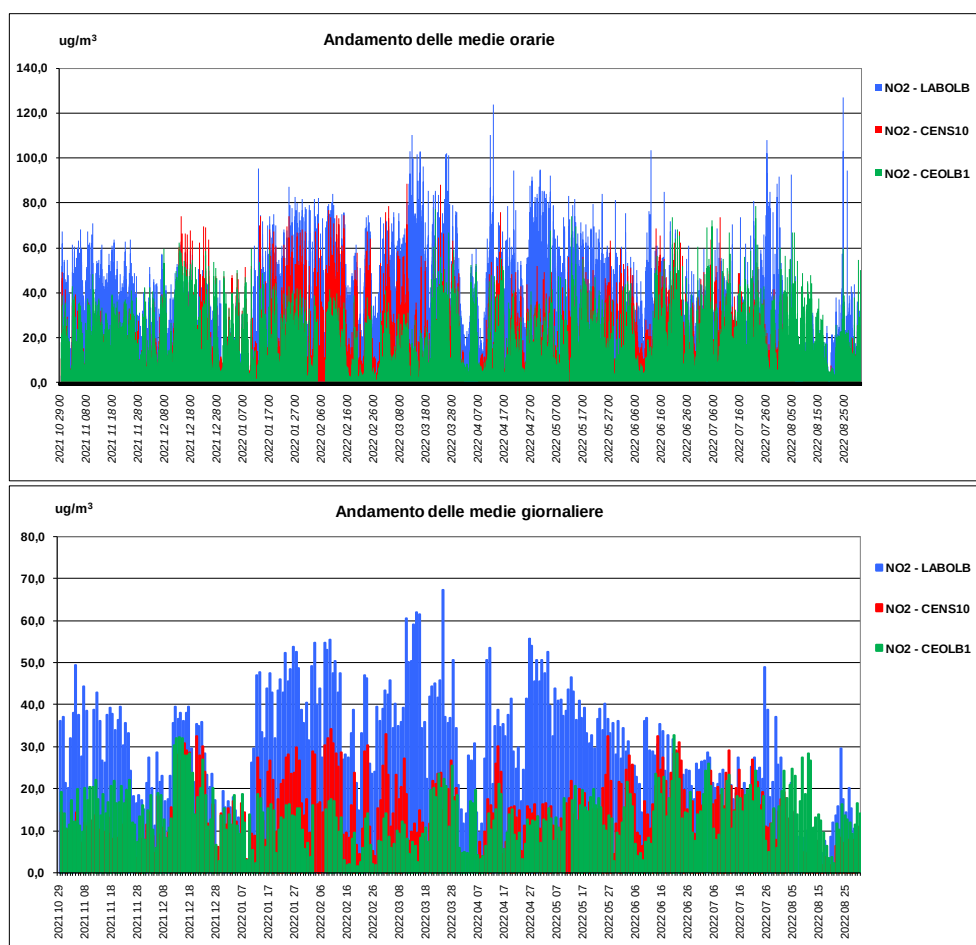
En ce qui concerne le NO₂, on enregistre une moyenne de 31 µg/m³, à comparer aux mesures des stations fixes qui varient entre 14 µg/m³ (CEOLB1) et 16 µg/m³ (CENS10), et un maximum horaire de 127 µg/m³ à comparer aux valeurs de la zone urbaine qui varient entre 79 µg/m³ (CEOLB1) et 89 µg/m³ (CENS10).

Tableau 4.2.9: Zone d'Olbia – Comparaison des indicateurs statistiques de NO₂.

Port d'Olbia	NO ₂ - LABOLB µg/m ³	NO ₂ - CENS10 µg/m ³	NO ₂ - CEOLB1 µg/m ³
Min	0,0	0,0	0,0
25° perc.	16,4	6,7	5,1
Mediana	28,3	12,0	10,4
Media	31,3	15,8	14,1
75° perc.	42,9	21,3	19,8
Max	126,7	88,5	78,5
Max MG	67,5	34,4	32,9

En général, il y a des différences statistiques importantes entre les mesures prises dans le port et les stations fixes, tant pour le trafic (CENS10) que pour le fond (CEOLB1).

Sur les graphiques ci-dessous, il est visuellement évident que les tendances dans la zone portuaire montrent des concentrations significativement plus élevées que les mesures aux stations fixes.



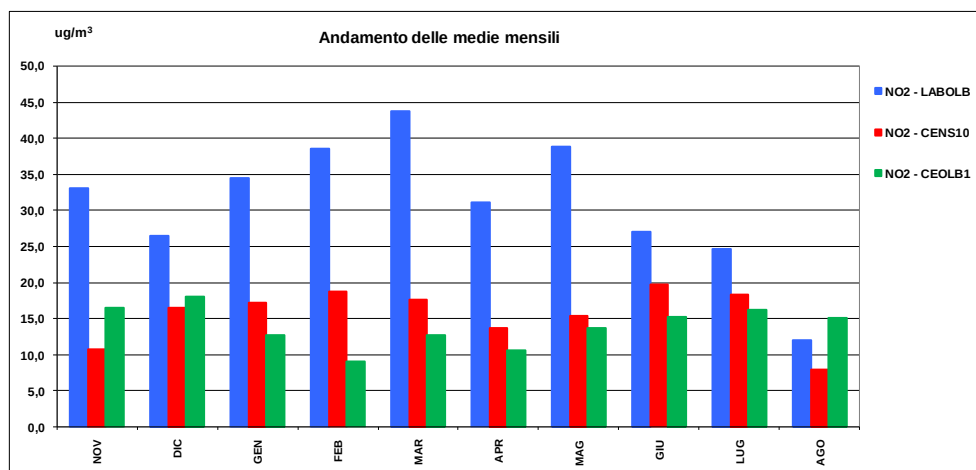


Figure 4.2.19: Tendence des moyennes horaires, journalières et mensuelles de NO₂.

La corrélation entre les mesures et les sources d'émission de NO₂ montre une distribution diffuse du polluant, due au fait que la station mobile est immergée et entourée de diverses sources d'émission, avec de multiples quais présents dans la zone portuaire. Ces considérations doivent toutefois être confirmées par des études ultérieures d'émission/modélisation.

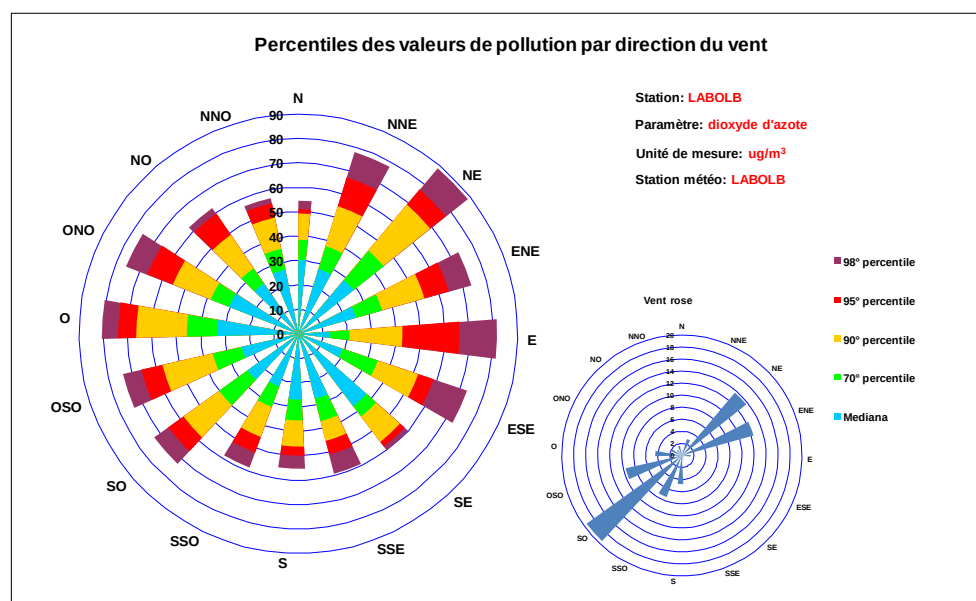


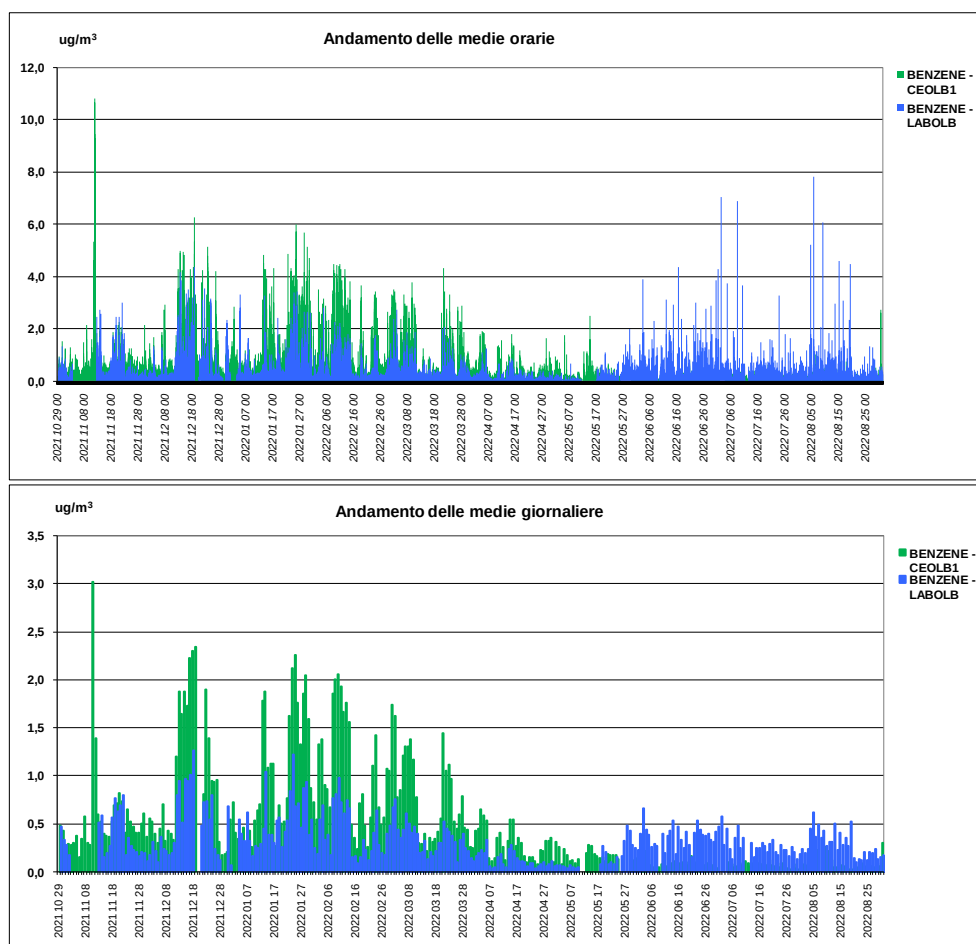
Figure 4.2.20: Percentili dei valori di inquinamento per direzione di provenienza del vento.

En ce qui concerne le benzène mesuré dans la zone portuaire au cours de la période considérée, il convient de noter que les valeurs sont faibles, avec une moyenne de 0,3 µg/m³, ce qui correspond aux tendances observées à la station fixe CEOLB1, comme le montre le tableau ci-dessous.

Tabella 4.2.10: Zona d'Olbia – Comparazione des indicateurs statistiques du C₆H₆.

Port d'Olbia	C ₆ H ₆ - LABOLB µg/m ³	C ₆ H ₆ - CEOLB1 µg/m ³
Min	0,0	0,0
25° perc.	0,1	0,1
Mediana	0,2	0,2
Media	0,3	0,5
75° perc.	0,4	0,6
Max	7,8	10,8
Max MG	1,3	3,0

Les graphiques ci-dessous montrent que la tendance des valeurs dans la zone portuaire est moins sensible aux fluctuations saisonnières qu'à la station de fond CEOLB1.



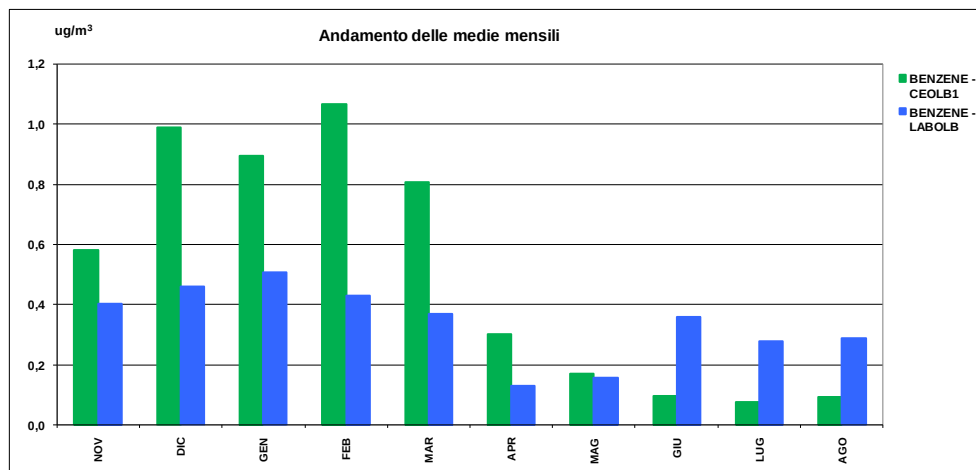


Figure 4.2.21: Tendence des moyennes horaires, journalières et mensuelles de C_6H_6 .

La corrélation entre les mesures et les sources d'émission de benzène montre deux directions principales, spécifiquement de la direction ENE/E, et de ONO à SSE, qui nécessitent cependant des investigations supplémentaires pour une interprétation correcte afin d'identifier les sources d'émission. Ces considérations sont indicatives pour les études ultérieures d'émission/modélisation.

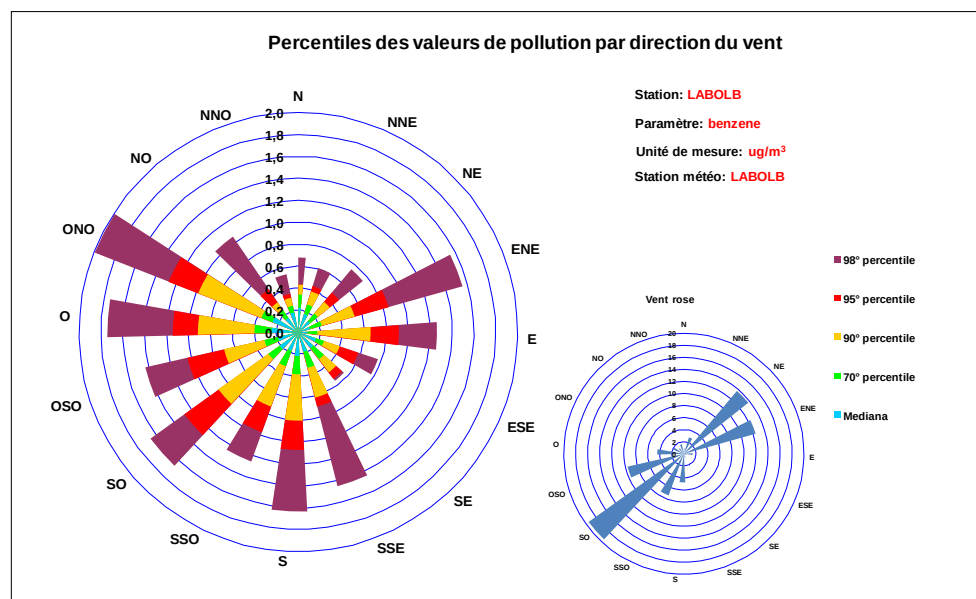


Figure 4.2.22: Percentiles des valeurs de pollution par direction du vent.

PARTICULATE: Résultats et discussion

Les PM10 mesurés par LABOLB montrent des valeurs significativement plus basses que dans les stations fixes. La moyenne est de $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$, contre une variation aux stations fixes de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (CENS10) à $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (CEOLB1). Il n'y a pas de dépassement de la moyenne journalière, contre une fluctuation dans la zone urbaine entre 1 (CENS10) et 3 (CEOLB1).

Tableau 4.2.11: Zone d'Olbia – Comparaison des indicateurs statistiques des PM10.

Port d'Olbia	PM10 - LABOLB $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM10 - CENS10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM10 - CEOLB1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Min	3,1	6,1	6,2
25° perc.	9,9	14,8	16,6
Mediana	13,1	18,8	21,5
Media	13,6	20,1	24,2
75° perc.	15,8	23,6	30,6
Max MG	38,8	54,8	62,3
Superamenti	0	1	3

Les diagrammes suivants (journaliers et mensuels) montrent des tendances cohérentes et uniformes entre les relevés effectués au port d'Olbia par rapport aux autres sites de la zone urbaine.

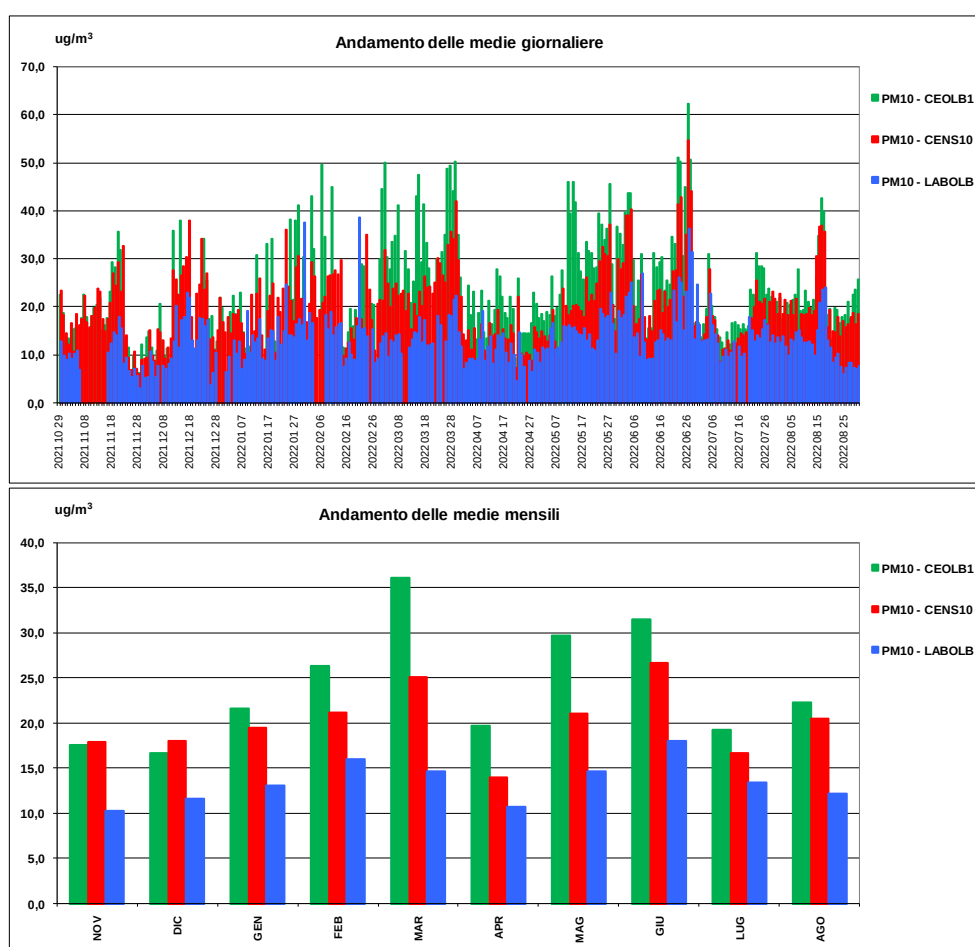


Figure 4.2.23: Tendence des moyennes horaires, journalières et mensuelles de PM10.

Les PM2.5, mesurées par la station mobile LABOLB, présentent des valeurs modestes avec une moyenne globale de $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tableau 4.2.12: Zone d'Olbia – Comparaison des indicateurs statistiques des PM2.5.

Port d'Olbia	PM2.5 - LABOLB µg/m³
Min	1,4
25° perc.	5,1
Mediana	7,8
Media	7,7
75° perc.	9,4
Max MG	25,2

La tendance de la mesure est confirmée visuellement par les diagrammes ci-dessous, où une forte uniformité de la tendance des données est évidente, sans variations saisonnières significatives.

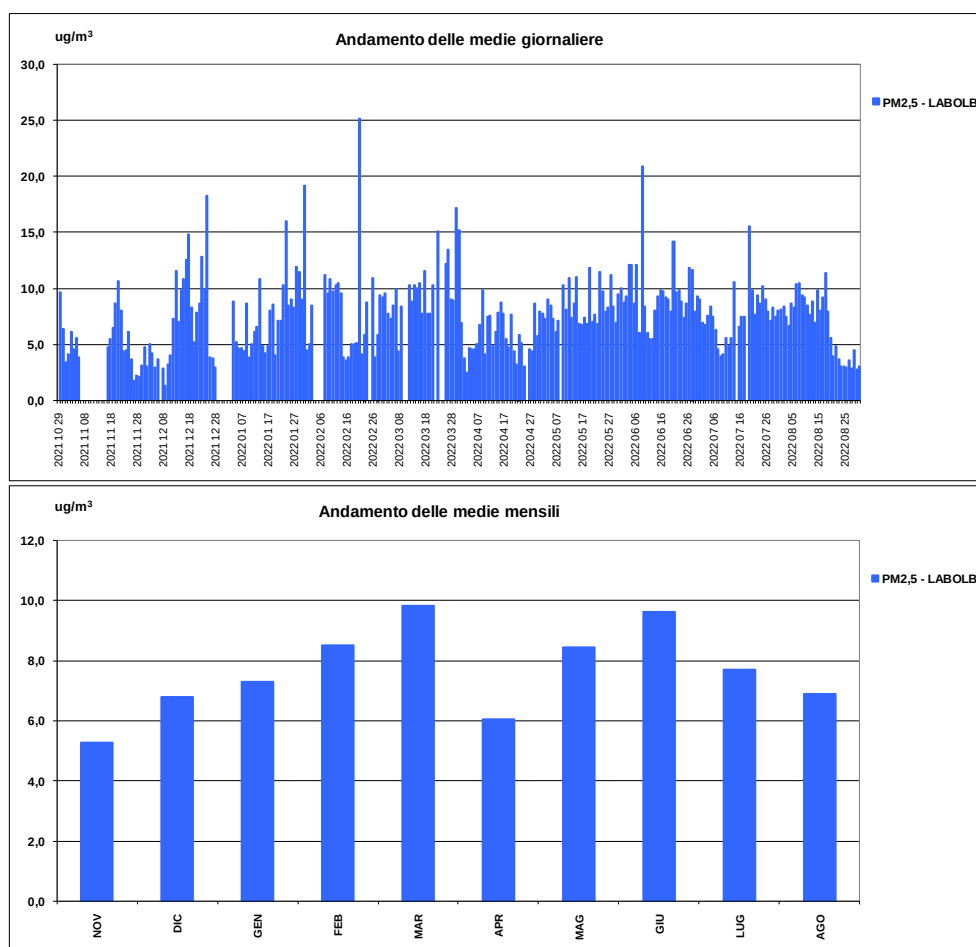


Figure 4.2.24: Tendance des moyennes journalières et mensuelles de PM2.5.

UNICA

Nous rapportons ci-dessous les résultats des deux campagnes de surveillance (hiver-été) réalisées dans les périodes février - mars 2022 et juin - juillet 2022 dans le port d'Olbia, en utilisant des échantillonneurs passifs.

Pour chaque polluant, nous représentons graphiquement les résultats en suivant la légende des couleurs utilisée dans les cartes : station de fond (jaune), station industrielle (bleu) et station de trafic (rouge).

BTEX: Olbia montre la même tendance que Cagliari pour ces polluants et en particulier le C_6H_6 montre une diminution des concentrations dans la période estivale avec des valeurs similaires dans presque tous les points échantillonnés (moyenne $0,14 \mu\text{g}/\text{m}^3$), sauf à la station OM ($0,28 \mu\text{g}/\text{m}^3$), tandis qu'en hiver la plus haute concentration détectée est à la station OC ($1,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

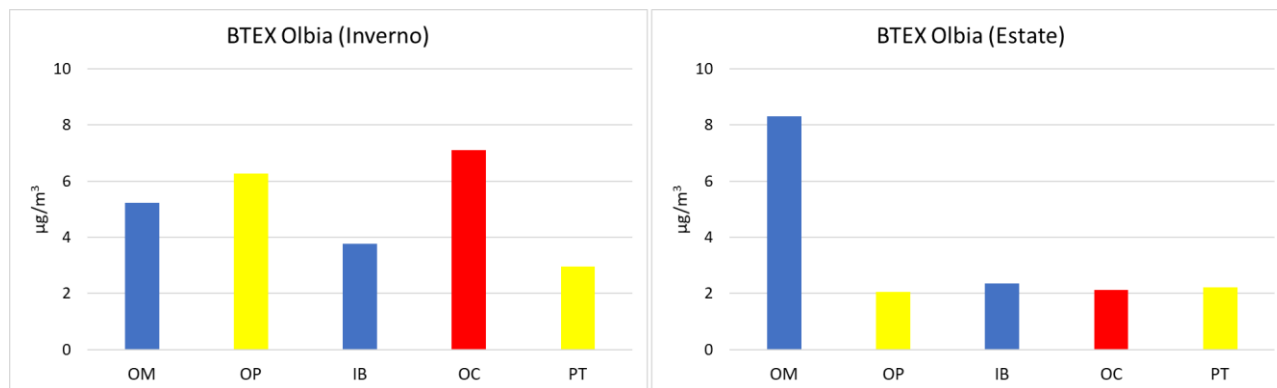


Figure 4.2.25 Concentrations de BTEX ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) aux stations d'Olbia en hiver (à gauche) et en été (à droite).

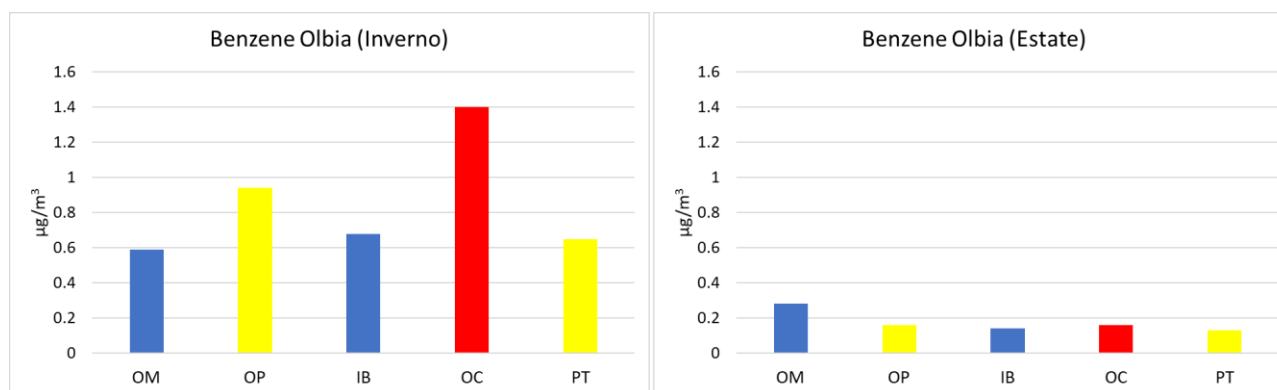


Figure 4.2.26: Concentrations de C_6H_6 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) aux stations d'Olbia en hiver (à gauche) et en été (à droite).

NO_2 : Le NO_2 des valeurs très similaires entre les deux campagnes, hiver et été, à l'exception des stations OM (hiver: $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$; été : $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$), PT (hiver: $7,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$; été: $14,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et IB (hiver: $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$; été: $20,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) où l'on observe une augmentation des valeurs en été.

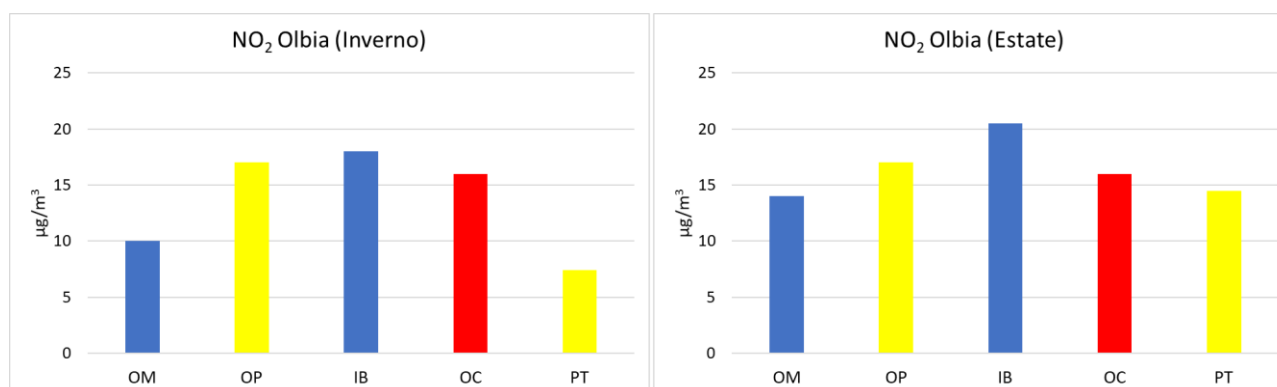


Figure 4.2.27: Concentrations de NO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) aux stations d'Olbia en hiver (à gauche) et en été (à droite).

SO_2 : Comme pour la campagne de Cagliari, le SO_2 à Olbia présente également des valeurs hivernales inférieures à la limite de détection, à l'exception de la station OM ($0,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$), tandis que lors de la

campagne estivale, les concentrations sont similaires dans quatre stations (plage de 0,2-0,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), à l'exception de la station IB, qui présente la plus forte concentration détectée de 1,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

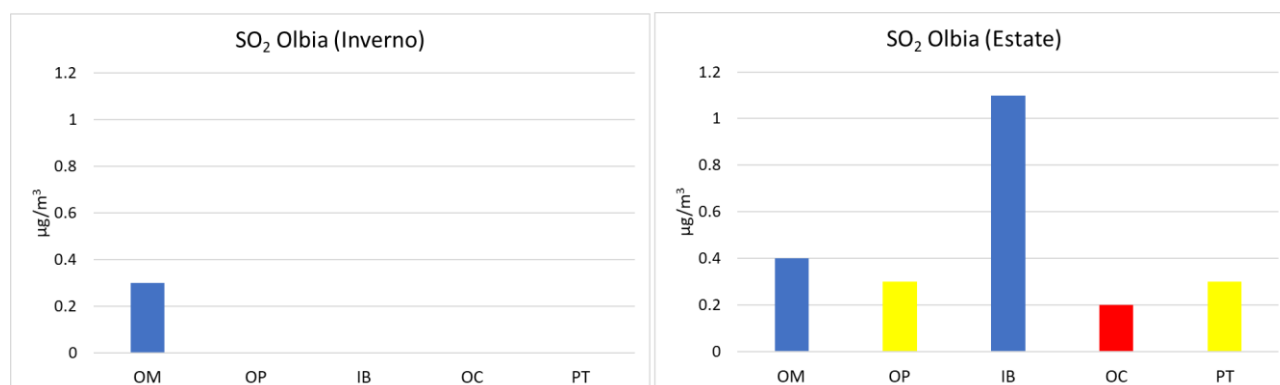


Figure 4.2.28: Concentrations de SO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) aux stations d'Olbia en hiver (à gauche) et en été (à droite).

HAP: La figure montre les HAP totaux mesurés dans les stations du port d'Olbia pendant la campagne d'hiver et d'été. En ce qui concerne la variabilité saisonnière, les périodes les plus froides ont montré les niveaux les plus élevés (de 6,25 (OM) à 18,69 (OC) ng/m^3) tandis que les périodes les plus chaudes ont montré des niveaux plus faibles (de 1,78 (OC) à 4,55 (IB) ng/m^3). Cette tendance est due à la dégradation photochimique plus importante des HAP en été, résultant d'une plus grande exposition aux rayons UV.

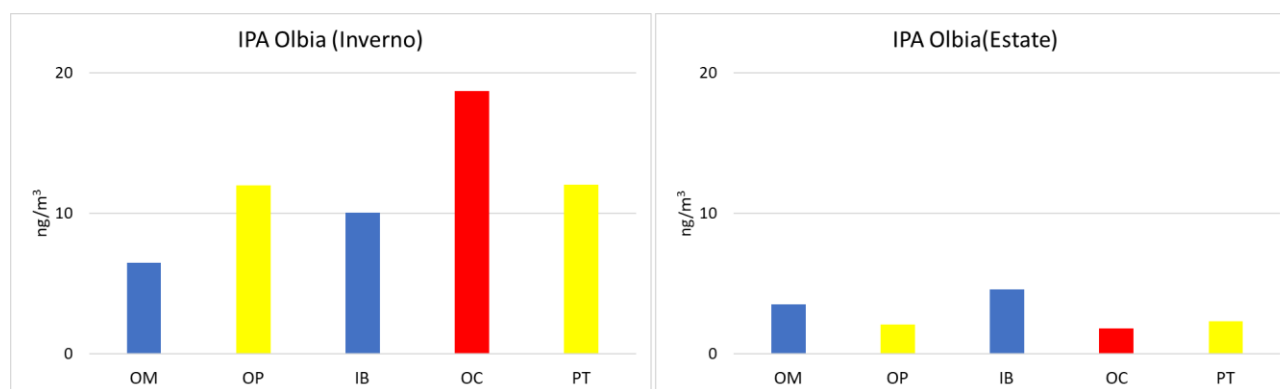


Figure 4.2.29: Concentrations de $\Sigma 15$ HAP (ng/m^3) aux stations d'Olbia en hiver (à gauche) et en été (à droite).

Comme à Cagliari, le profil des HAP était dominé par les HAP à 3 et 4 cycles, qui représentent plus de 90 % des $\Sigma 15$ HAP.

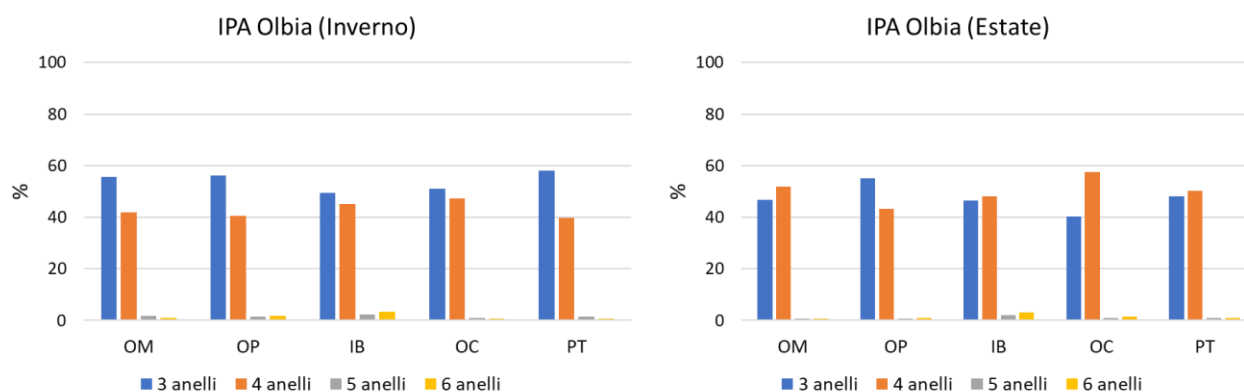


Figure 4.2.30: Composition des HAP (%) aux stations d'Olbia en hiver (à gauche) et en été (à droite).

Les HAP les plus dominants en hiver étaient le phénanthrène (37-46%), suivi du fluoranthène (19-24%) et du pyrène (17-20%), et en été, le phénanthrène (37-51%), suivi du pyrène (24-31%) et du fluoranthène (15-23%), qui se trouvent principalement dans la phase gazeuse (figure 18). Pour le benzo(a)pyrène, la valeur maximale trouvée en hiver était de 0,067 ng/m³ (IB) et de 0,026 ng/m³ (IB) en été.

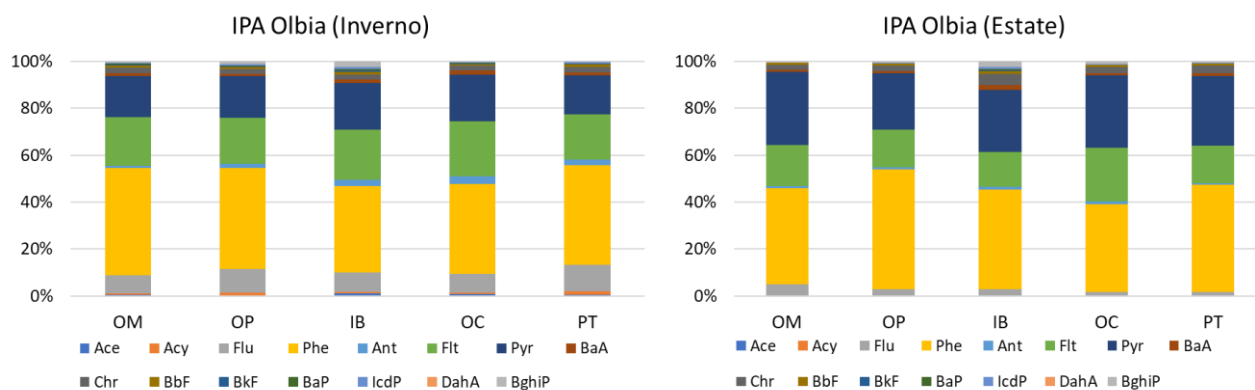


Figure 4.2.31: Composition des HAP (%) aux stations d'Olbia en hiver (à gauche) et en été (à droite).

PCB: Les résultats pour les $\Sigma 7$ PCBs (Cl3-7) sont présentés dans la figure. Les concentrations de PCB en suspension dans l'air (pg/m³) ont été détectées sur tous les sites d'échantillonnage et variaient de 4 (OP) à 11 (PT) en hiver et de 11 (OP) à 22 (OM) en été. Aucune grande différence saisonnière n'a été observée. Dans toutes les stations surveillées, les PCB dominants étaient les congénères 28 et 52.

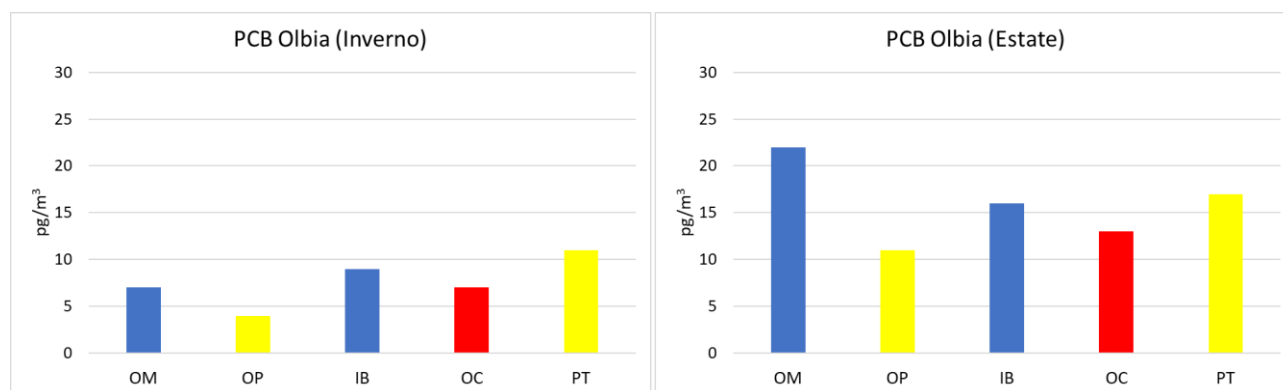


Figure 4.2.32: Concentrations de $\Sigma 7$ PCB (pg/m³) aux stations d'Olbia en hiver (à gauche) et en été (à droite).

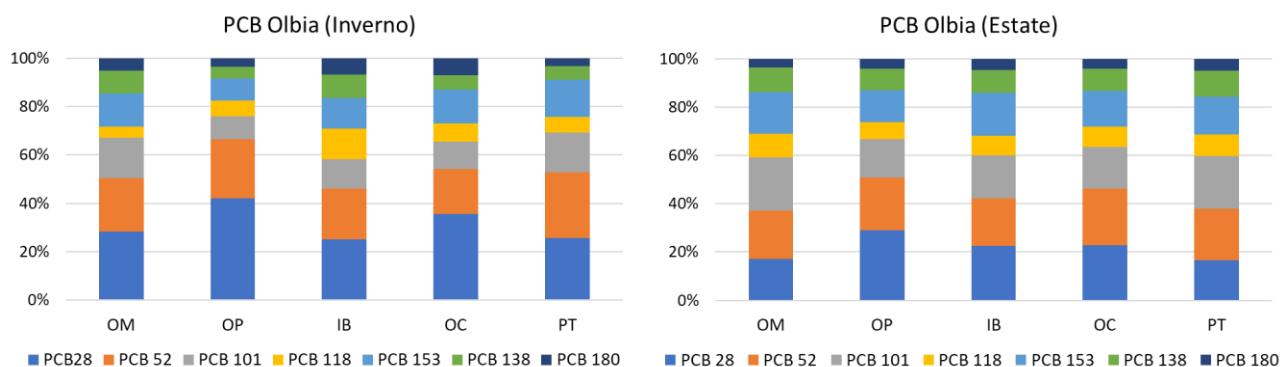


Figure 4.2.33: Composition des PCB (%) aux stations d'Olbia en hiver (à gauche) et en été (à droite).

Études de cas identifiées par l'UNICA: Focus sur des aspects particuliers (par exemple, OPC et nanoparticules)

Le traitement des données obtenues à l'aide des compteurs de particules ELPI et DiSCmini est présenté ci-dessous. Pour chaque campagne, la durée de chaque échantillonnage était d'environ 6 heures, consécutives pendant trois à quatre jours. Initialement, l'utilisation de compteurs de particules n'était envisagée que dans le port de Cagliari, puis la possibilité de les utiliser a également été évaluée dans le port d'Olbia, pour lequel une seule campagne (d'été) a été réalisée.

En particulier, l'impacteur électronique de particules ELPI, qui nécessite de l'énergie électrique, a été positionné près du véhicule mobile ARPAS sur le quai de Sabaudo à Cagliari et sur l'Isola Bianca à Olbia, tandis que l'exposition professionnelle aux nanoparticules a été simulée sur quatre sujets d'échantillonnage (deux hommes et deux femmes) pendant 60 minutes chacun, en passant par les principaux sites d'activité des quais, à l'aide d'un échantillonneur personnel portable (DiSCmini). Il n'a pas été possible d'évaluer l'exposition des employés en raison de la non-adhésion à l'étude des entreprises opérant sur le quai.

• Zone du port de Cagliari

La campagne d'hiver s'est déroulée sur trois jours en février. La figure 21 montre le nombre de particules mesurées par l'ELPI pendant cette période. On constate que les contributions les plus importantes proviennent des opérations liées aux activités portuaires, telles que le transit des camions, la circulation des véhicules et le ravitaillement d'un pétrolier. Avec le compteur de particules portable DiSCmini, il a été possible d'étudier la zone de plus près ; en fait, comme on peut le voir sur la figure 22, il y a un pic le dernier jour de l'échantillonnage, lié à l'accostage et aux manœuvres de trois navires, qui rend moins visibles toutes les autres contributions enregistrées les jours précédents.

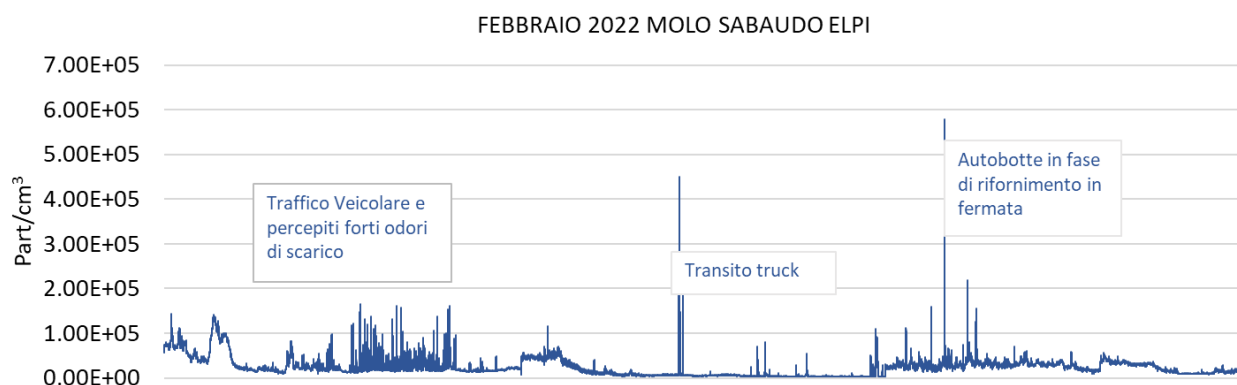


Figure 4.2.34: Variation temporelle des concentrations numériques de particules ultrafines (UFP) (Part/cm^3) mesurées par ELPI pendant la campagne hivernale dans le port de Cagliari.



Figure 4.2.35: Variation temporelle des concentrations numériques de particules ultrafines (UFP) (Part/cm^3) mesurées par le compteur personnel de particules DiSCmini pendant la campagne d'hiver dans le port de Cagliari.

La campagne d'été a eu lieu pendant quatre jours consécutifs en juin. Pendant cette période, le port de Cagliari est certainement caractérisé par un trafic maritime plus important que pendant la période hivernale. La figure montre comment les contributions les plus importantes sont apportées par l'accostage des navires et le trafic de véhicules associé aux opérations portuaires. Dans la figure, l'échantillonnage avec le compteur de particules personnel DiSCmini confirme ce qui a été enregistré par l'ELPI.

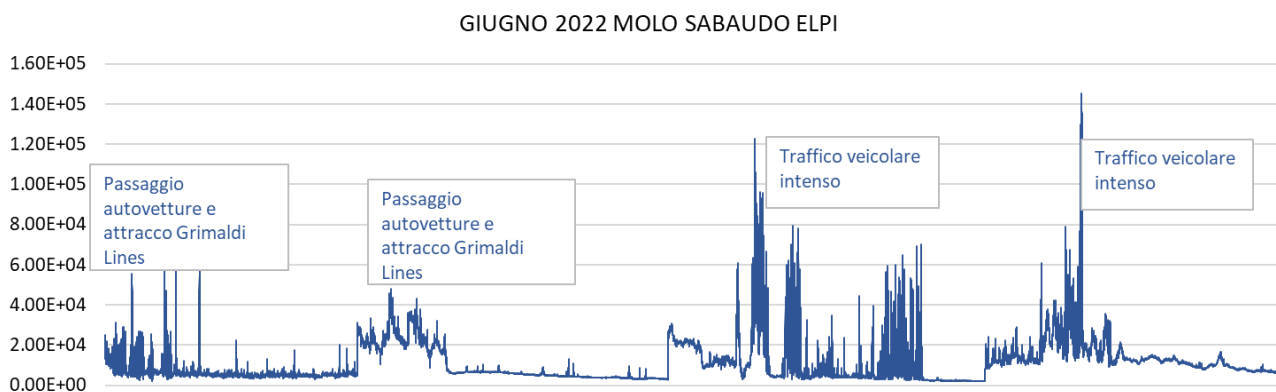


Figure 4.2.36: Variation temporelle des concentrations numériques de particules ultrafines (UFP) (Part/cm³) mesurées par ELPI pendant la campagne estivale dans le port de Cagliari .

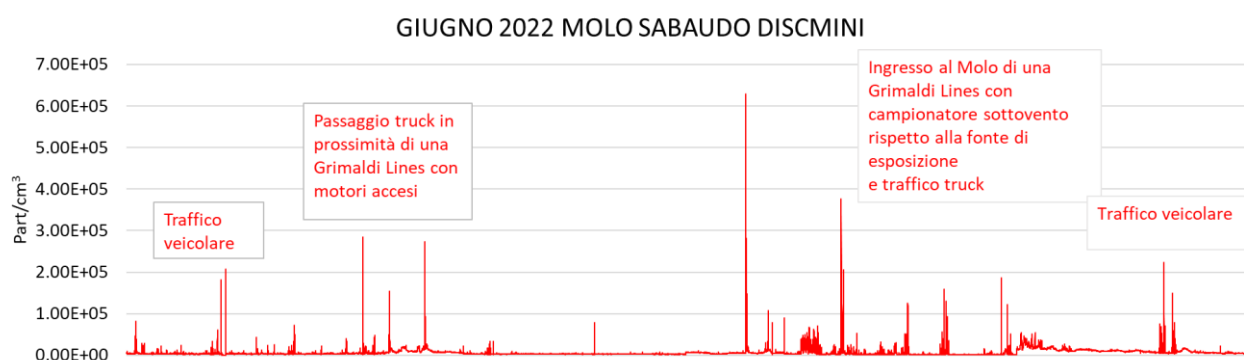


Figure 4.2.37: Variation temporelle des concentrations numériques de particules ultrafines (UFP) (Part/cm³) mesurées par le compteur personnel de particules DiSCmini pendant la campagne d'été dans le port de Cagliari.

• Sito portuale di Olbia

Dans le port d'Olbia, seule une campagne d'été de quatre jours a eu lieu en juillet. Le port d'Olbia est caractérisé par un trafic naval plus intense que celui de Cagliari, comme le montrent les figures 25 et 26 qui montrent les comptages de particules enregistrés par ELPI et DiSCmini, où l'on voit clairement la contribution des départs de ferry, des embarquements et débarquements de voitures et des opérations de roll-on. En particulier, au cours du troisième jour d'échantillonnage, il y avait un trafic maritime intense avec des gaz d'échappement clairement visibles.

LUGLIO 2022 ISOLA BIANCA ELPI

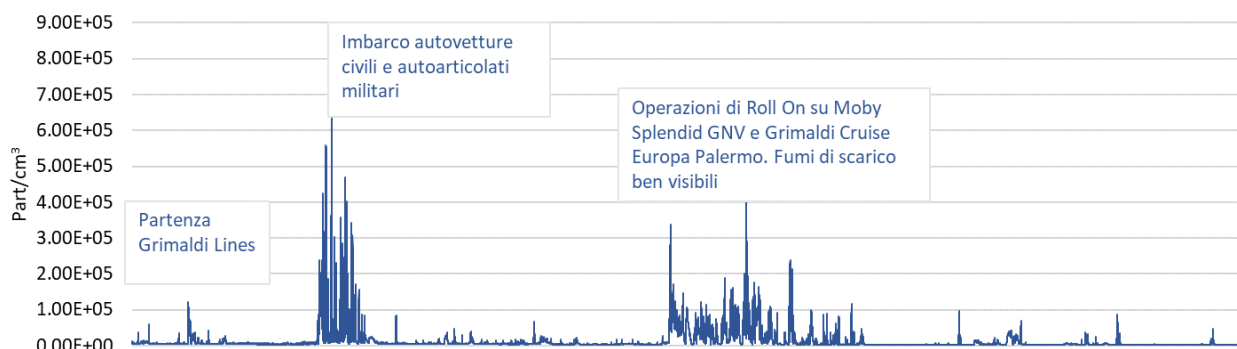


Figure 4.2.38: Variation temporelle des concentrations numériques de particules ultrafines (UFP) (Part/cm³) mesurées par ELPI pendant la campagne d'été dans le port d'Olbia

LUGLIO 2022 ISOLA BIANCA DISCMINI

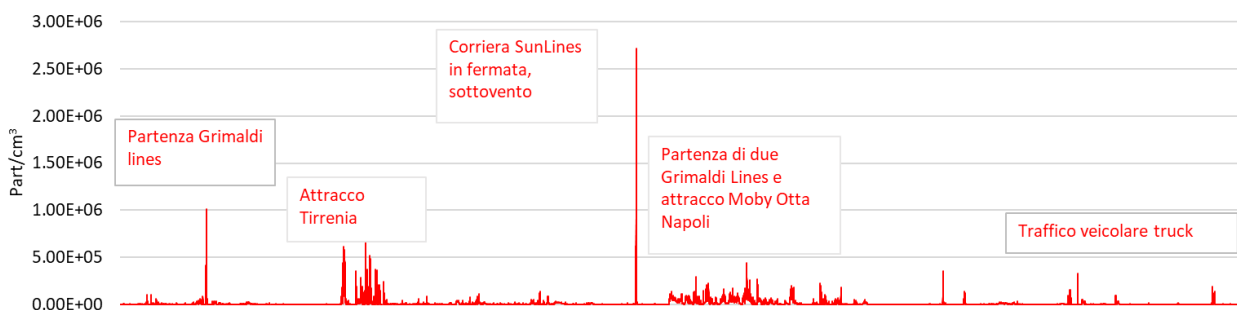


Figure 4.2.39: Variazione temporale delle concentrazioni numeriche di particelle ultrafini (UFP) (Part/cm³) misurata dal contatore di particelle personale DiSCmini durante la campagna estiva nel porto di Olbia.

Au cours des campagnes de surveillance, les valeurs relevées n'ont dépassé la valeur de précaution proposée par l'Organisation mondiale de la santé comme moyenne sur 24 heures, fixée à 10 000, que trois jours (8, 11 février et 16 juin à Cagliari). L'échantillonnage n'ayant pas été effectué sur l'ensemble de la journée, les médianes sont à comparer avec la valeur de précaution exprimée en moyenne horaire fixée à 20 000 ; cette valeur a été dépassée 2 jours (8 et 11 février).

4.3 TOSCANE

Toutes les données élémentaires relatives aux enquêtes menées par l'ARPAT sont disponibles sur la plateforme MONI.C.A., la plateforme de suivi et de contrôle de l'Autorité du Système Portuaire de la Mer Tyrrhénienne Nord, qui acquiert et intègre des données hétérogènes provenant d'une multiplicité de sources d'information. En outre, les résultats de l'enquête réalisée sur le site du port de Portoferraio en 2021 sont inclus dans le rapport final « Campagne indicative d'enquête mobile sur la qualité de l'air à Portoferraio années 2020-2021 », disponible sur le lien : <https://www.arpat.toscana.it/documentazione/report/campagna-indicativa-di-rilevamento-della-qualita-dellaria-con-mezzo-mobile-a-portoferraio-anni-2020-2021>. Les résultats du suivi des polluants gazeux pour ce site portuaire sont résumés.

Polluants gazeux

Oxydes d'azote

- Sites du port de Livourne

Le suivi des stations mobiles de Fortezza Vecchia et Calata Bengasi couvre quatre périodes distinctes, d'août 2021 à mai 2022.

Tableau 4.3.1: Données sur les NO_x sur le site de Fortezza Vecchia.

NO _x Fortezza Vecchia								
Toute la période d'échantillonnage	Été		Automne		Hiver		Printemps	
	NO ₂	NO	NO ₂	NO	NO ₂	NO	NO ₂	NO
Nombre de jours d'échantillonnage valides	24	24	48	48	40	40	63	63
Nombre de valeurs horaires moyennes valides	553	553	1092	1092	911	911	1438	1438
Valeur maximale de la moyenne horaire µg/m ³	88	135	124	336	127	288	132	235
Valeur horaire moyenne au 99,8° centile µg/m ³	88	132	110	223	110	276	130	205
Moyenne période µg/m ³	22	9	21	11	29	18	27	14
Valeur maximale de la moyenne quotidienne µg/m ³	38	25	42	43	54	63	51	63

Les valeurs de NO₂ enregistrées sur le site de Fortezza Vecchia sont conformes aux limites réglementaires pour toutes les périodes d'échantillonnage, tant pour la moyenne de la période que pour les maxima horaires (Décret législatif 155/10 moyenne horaire 40 µg/m³ et moyenne horaire maximale 200 µg/m³ à ne pas dépasser plus de 18 fois). Les valeurs de NO, un paramètre pour lequel il n'existe actuellement aucune valeur limite, étaient en moyenne faibles, mais plusieurs pics horaires importants ont été enregistrés, notamment en automne et en hiver.

Tableau 4.3.2: Données sur les NO sur le site de Calata Bengasi.

NO _x Calata Bengasi								
Toute la période d'échantillonnage	Été		Automne		Hiver		Printemps	
	NO ₂	NO	NO ₂	NO	NO ₂	NO	NO ₂	NO
Nombre de jours d'échantillonnage valides	32	32	32	32	50	50	57	57
Nombre de valeurs horaires moyennes valides	731	731	722	734	1150	1151	1194	1194
Valeur maximale de la moyenne horaire µg/m ³	106	180	88	92	113	150	105	141
Valeur horaire moyenne au 99,8° centile µg/m ³	103	160	82	80	103	140	103	76
Moyenne période µg/m ³	30	8	24	9	33	13	28	8
Valeur maximale de la moyenne quotidienne µg/m ³	56	35	41	21	56	33	51	16

Les valeurs de NO₂ enregistrées sur le site de Calata Bengasi sont conformes aux limites réglementaires pour toutes les périodes d'échantillonnage, tant pour la moyenne de la période que pour les maxima horaires. Les valeurs de NO étaient modérées en moyenne avec des pics horaires plus élevés et dispersés.

Les valeurs moyennes horaires et les moyennes journalières enregistrées de NO et NO₂ sur les deux sites sont présentées dans la figure.

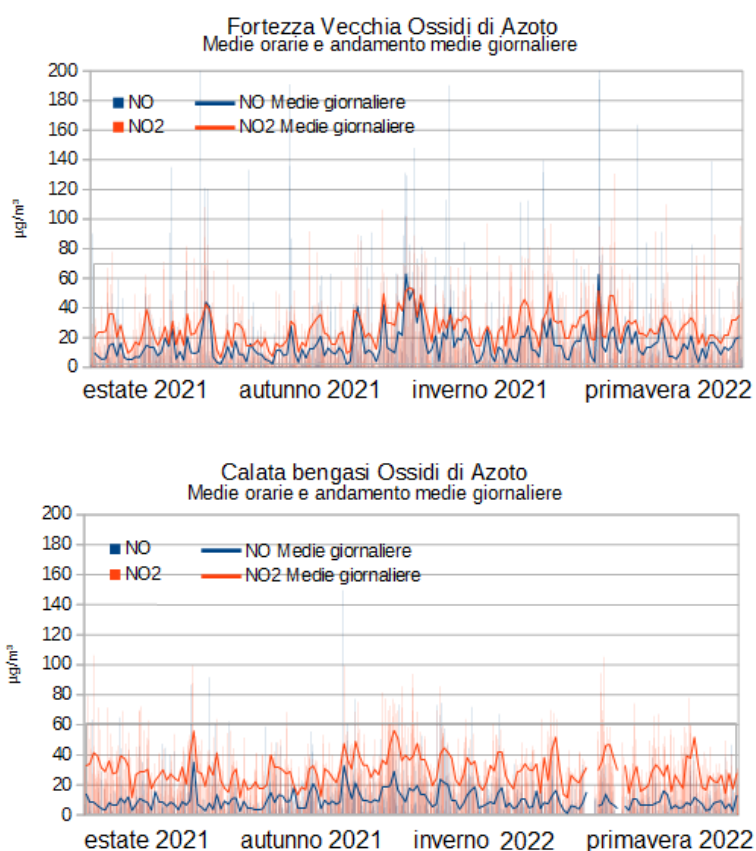


Figure 4.3.1: Tendances des concentrations moyennes horaires et journalières de NO et NO₂ sur les sites de Fortezza Vecchia et Calata Bengasi.

Comparaison avec les stations RRQA

Pour une étude plus approfondie, les concentrations de NO_x enregistrées dans la zone portuaire ont été comparées à celles enregistrées par les stations fixes de référence (RRQA).

Tableau 4.3.3: Comparaison des concentrations de NO_x des sites portuaires et des stations RRQA.

Période d'échantillonnage 01-07-2021/30-06- 2022	Comparaison avec les indicateurs des stations fixes											
	Calata Bengasi		Fortezza Vecchia		LI-Stagno (UI)		LI-La Pira (UB)		LI-Cappiello (UB)		LI-Carducci (UT)	
	NO ₂	NO	NO ₂	NO	NO ₂	NO	NO ₂	NO	NO ₂	NO	NO ₂	NO
Maximum horaire µg/m ³	113	180	132	336	85	134	114	155	96	122	151	440
99,8° centile µg/m ³	99	122	113	213	73	71	83	78	73	70	122	255
Moyenne période µg/m ³	29	10	25	14	15	3	17	4	14	4	37	19

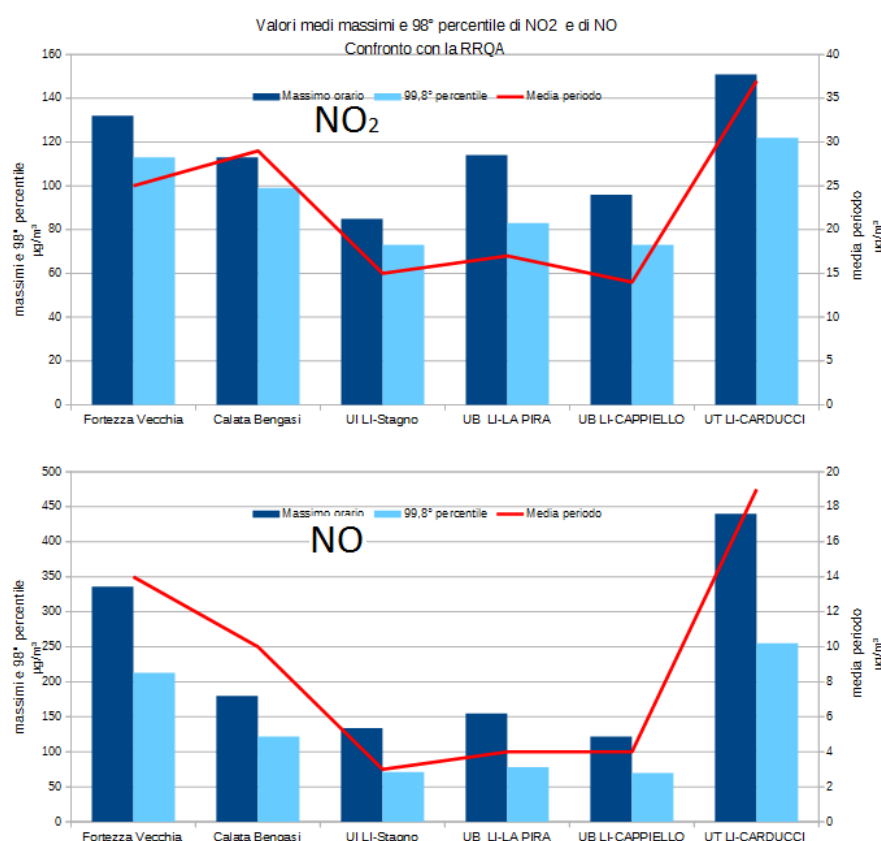


Figure 4.3.2: Comparaison des valeurs de NO_x entre les sites portuaires et les stations RRQA.

Les données montrent que les concentrations moyennes de NO_x sur les deux sites portuaires étaient nettement supérieures à celles des stations de fond urbaines. En moyenne, la concentration de NO₂ dans la zone portuaire était environ 75 % plus élevée que dans les stations de RRQA, et la concentration de NO était environ trois fois plus élevée que les valeurs de fond urbaines. Cela semble indiquer d'importantes sources de combustion à proximité des sites portuaires.

Échantillonneurs passifs

La cartographie de la zone d'intérêt au moyen d'enquêtes saisonnières avec des échantillonneurs passifs de NO₂ à dix endroits, comme décrit au chapitre 2, a conduit aux résultats décrits ci-dessous et présentés dans le graphique comme des moyennes globales pour la période d'enquête.

Tableau 4.3.4: Concentrations moyennes saisonnières et annuelles de NO₂ obtenues avec des échantillonneurs passifs.

Concentrations moyennes µg/m ³						
Site		Été	Automne	Hiver	Printemps	Année
Calambrone	UB	6	8	7	6	7
Via Enriques	UI	14	-	17	18	16
Via La Pira	UB	12	-	16	12	13
Piscina Bastia	UB	11	17	18	18	16
Palestra Gemini	UB	10	-	16	13	13
Scoglio della Regina	UB	11	15	15	13	13
Via Toti	UB	9	11	11	12	11
Calata Bengasi	UI	25	-	23	24	24
Via Marradi	UT	11	24	21	20	19
Centro Città	UT	17	27	24	21	22

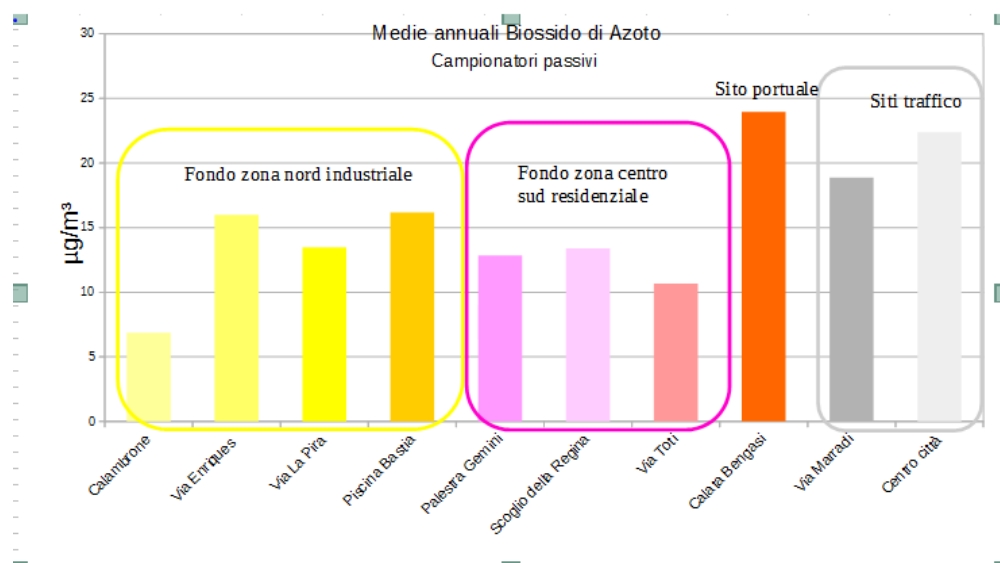


Figure 4.3.3: Concentrations moyennes annuelles de NO₂ obtenues avec des échantillonneurs passifs.

Les données montrent que sur le site de Calata Bengasi, un site portuaire, les valeurs moyennes de NO₂ étaient les plus élevées parmi les dix sites étudiés, tant par rapport à celles des zones à prédominance résidentielle que par rapport à celles des zones industrielles et des sites de trafic. La moyenne annuelle pour le site étudié était de 24 µg/m³, soit environ le double de la valeur moyenne du fond urbain (12 µg/m³). Les résultats semblent confirmer la présence de sources importantes de NO₂ près du site de Calata Bengasi.

Les résultats obtenus à partir de l'enquête avec des échantillonneurs passifs ont été intégrés aux concentrations de NO₂ enregistrées dans les intervalles de temps habituels à partir des stations continues dans la zone, confirmant une contribution des sources émissives de NO₂ dans les zones portuaires.

Tableau 4.3.5: Concentrations moyennes annuelles de NO₂ obtenues avec des échantillonneurs passifs et RRQA.

	Site	Concentrations moyennes (µg/m ³)
Échantillons passifs	Fondo industriale	13
	Fondo Residenziale	12
	Calata Bengasi	24
	Traffico (moderato)	21
Stations fixes	Fondo industriale	17
	Fondo residenziale	15
	Calata Bengasi	29
	Traffico (elevato)	41

- **Site portuaire de Portoferraio**

Le suivi de la station mobile de Portoferraio a eu lieu pendant l'été 2021 et a donné les résultats suivants.

Tableau 4.3.6: Données NO_x sur le site de Portoferraio.

NO _x Portoferraio		
Toute la période d'échantillonnage	Été	
	NO ₂	NO
Nombre de jours d'échantillonnage valides	71	71
Nombre de valeurs horaires moyennes valides	1631	1631
Valeur maximale de la moyenne horaire µg/m ³	163	496
Valeur horaire moyenne au 99,8° centile µg/m ³	133	357
Moyenne période µg/m ³	23	18
Valeur maximale de la moyenne quotidienne µg/m ³	52	98

Compte tenu de la période d'échantillonnage exclusivement estivale, la comparaison avec les limites réglementaires pour ce site est purement indicative. Les concentrations de NO₂ enregistrées ont été faibles pendant toute la période d'enquête, avec une moyenne générale d'environ 50 % de la valeur limite annuelle.

Comme pour le NO₂, les concentrations de NO étaient également faibles en moyenne. Plusieurs pics horaires moyens élevés ont été enregistrés pour ce paramètre, ce qui a caractérisé toute la période. Les valeurs moyennes horaires et journalières enregistrées de NO et NO₂ ont été reportées sur des graphiques.

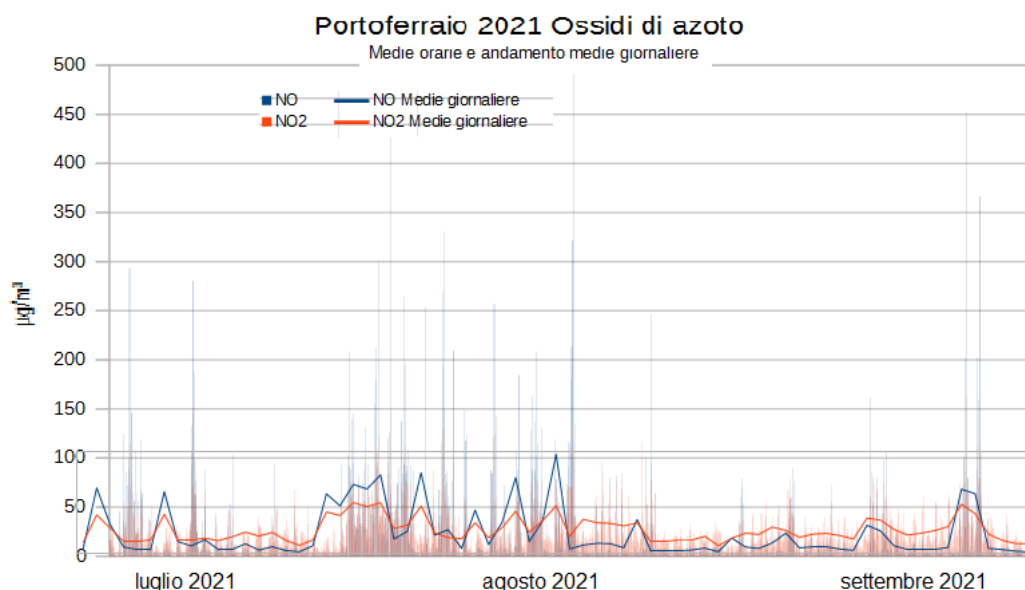


Figure 4.3.4: Tendance des concentrations moyennes horaires et journalières de NO et NO₂ sur le site de Portoferraio.

D'après l'analyse des données de suivi, nous pouvons voir que le site était caractérisé par plusieurs valeurs moyennes horaires cohérentes de NO, ce qui suggère la présence de sources de combustion discontinues à proximité du site étudié. Le phénomène s'est produit en particulier entre la fin juillet et les trois premières semaines d'août 2021, période de pointe pour le trafic touristique sur l'île.

Comparaison avec les stations RRQA

Pour une étude plus approfondie, les valeurs de concentration moyennes horaires de NO₂ et NO enregistrées sur le site du port de Portoferraio ont été comparées à celles enregistrées les jours habituels par les stations RRQA prises comme référence.

Tableau 4.3.7: Comparaison des concentrations de NO_x des sites de Portoferraio et des stations RRQA.

Toute la période d'échantillonnage 01-07-2021 / 07-07-2022	Comparaison avec les indicateurs des stations fixes									
	Portoferraio		UB Piombino		UB LI-La Pira		UB LI-Cappiello		UT LI-Carducci	
	NO ₂	NO	NO ₂	NO	NO ₂	NO	NO ₂	NO	NO ₂	NO
Maximum horaire µg/m ³	163	496	66	48	92	31	80	18	143	103
99,8° centile µg/m ³	133	357	59	20	64	13	54	13	113	51
Moyenne période µg/m ³	23	20	10	1	14	1	10	1	34	7

Il est évident que les valeurs moyennes horaires de NO₂ et NO enregistrées sur le site de l'étude sont significativement plus élevées que celles enregistrées dans les stations de fond de la province de Livourne. La moyenne globale de NO₂ est plus du double de la moyenne de fond urbaine et les valeurs maximales et 99,8° centile sont supérieures aux valeurs de la station de trafic. En ce qui concerne les valeurs de NO, tous les indicateurs sont d'un ordre de grandeur plus élevé que les valeurs de fond moyennes et significativement plus élevé que les valeurs du trafic également. Cela confirme la présence de sources de combustion importantes à proximité du site d'étude.

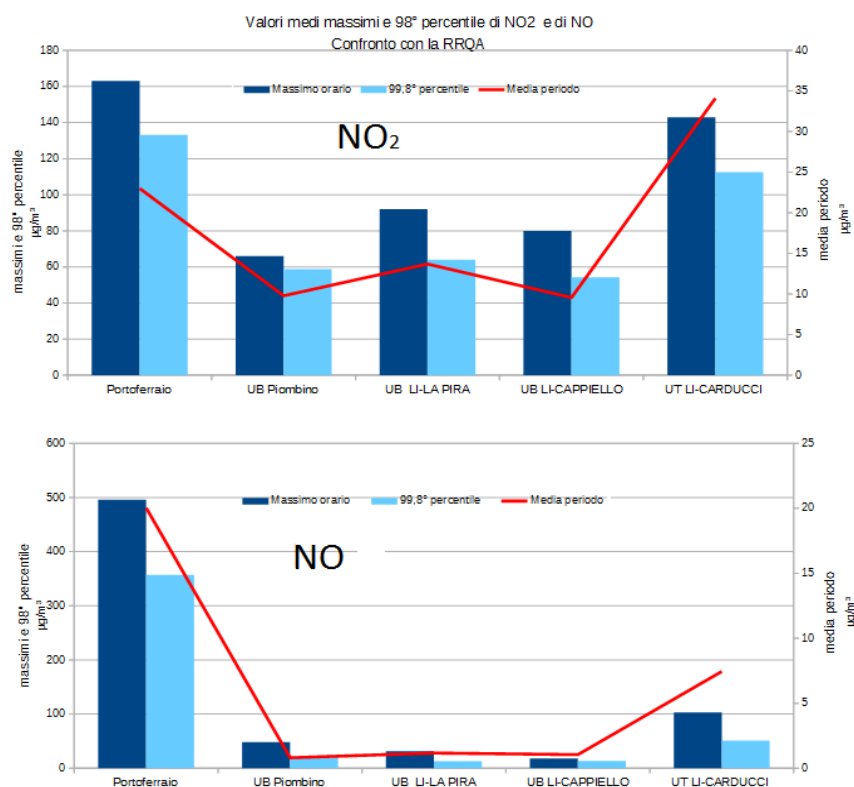


Figure 4.3.5: Comparaison des valeurs de NO_x entre le site de Portoferriai et les stations RRQA.

- Sites portuaires de Livourne et Portoferriai**

Monoxyde de carbone

Les contrôles effectués sur les sites du port de Livourne ont donné les résultats suivants.

Tableau 4.3.8: Données sur les CO sur les sites de Fortezza Vecchia Calata Bengasi.

CO Fortezza Vecchia				
Toute la période d'échantillonnage	Été	Automne	Hiver	Printemps
	CO	CO	CO	CO
Nombre de jours d'échantillonnage valides	24	48	40	63
Nombre de valeurs horaires moyennes valides	552	1112	945	1442
Valeur maximale de la moyenne horaire mg/m ³	0,6	1,4	2,5	0,6
Valeur maximale de la moyenne sur 8 heures mg/m ³	0,4	0,9	1,2	0,4
Valeur maximale de la moyenne quotidienne mg/m ³	0,4	0,5	0,7	0,3
Moyenne période mg/m ³	0,33	0,33	0,47	0,23
CO Calata Bengasi				
Toute la période d'échantillonnage	Été	Automne	Hiver	Printemps
	CO	CO	CO	CO
Nombre de jours d'échantillonnage valides	32	32	50	57
Nombre de valeurs horaires moyennes valides	731	735	1150	1194
Valeur maximale de la moyenne horaire mg/m ³	0,8	0,6	1,7	1,1
Valeur maximale de la moyenne sur 8 heures mg/m ³	0,6	0,5	1,1	0,8
Valeur maximale de la moyenne quotidienne mg/m ³	0,5	0,4	1	0,6
Moyenne période mg/m ³	0,4	0,3	0,5	0,4

Pour les deux sites du port de Livourne, les valeurs de CO enregistrées ont été très faibles, avec l'absence totale de pics de concentration significatifs. Le paramètre de la moyenne sur huit heures était bien inférieur à la limite légale (moyenne quotidienne maximale sur huit heures de 10 mg/m³) pour toute la période.

Le suivi à Portoferraio a donné les résultats suivants.

Tableau 4.3.9: Données sur les CO sur le site de Portoferraio.

CO Portoferraio	
Toute la période d'échantillonnage	Été 2021
	CO
Nombre de jours d'échantillonnage valides	34
Nombre de valeurs horaires moyennes valides	817
Valeur maximale de la moyenne horaire mg/m ³	0,7
Moyenne période µg/m ³	0,4
Valeur maximale de la moyenne quotidienne mg/m ³	0,3

Les concentrations enregistrées étaient très faibles, avec une moyenne pour toute la période de 0,3 mg/m³ et une absence totale de pics horaires.

Dioxyde de soufre

Les contrôles effectués sur les sites du port de Livourne ont donné les résultats suivants.

Tableau 4.3.10: Données sur les SO₂ sur les sites de Fortezza Vecchia Calata Bengasi.

SO ₂ Fortezza Vecchia				
Toute la période d'échantillonnage	Été	Automne	Hiver	Printemps
	SO ₂	SO ₂	SO ₂	SO ₂
Nombre de jours d'échantillonnage valides	24	48	40	63
Nombre de valeurs horaires moyennes valides	550	1040	874	1382
Valeur maximale de la moyenne horaire µg/m ³	24	49	47	24
Valeur maximale de la moyenne quotidienne µg/m ³	5	6	4	4
Moyenne période µg/m ³	2	2	1	2
SO ₂ Calata Bengasi				
Toute la période d'échantillonnage	Été	Automne	Hiver	Printemps
	SO ₂	SO ₂	SO ₂	SO ₂
Nombre de jours d'échantillonnage valides	32	32	50	57
Nombre de valeurs horaires moyennes valides	733	712	1101	1042
Valeur maximale de la moyenne horaire µg/m ³	17	17	6	22
Valeur maximale de la moyenne quotidienne µg/m ³	5	10	6	4
Moyenne période µg/m ³	3,5	5	0,2	0,6

I valori di SO₂ registrati mostrano valori medi molto bassi con la totale assenza di picchi di concentrazione significativi in entrambi i siti di monitoraggio. Le massime medie orarie e le medie giornaliere sono

ampiamente inferiori ai limiti di legge (massima media oraria $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ da non superare più di ventiquattro volte anno e la media giornaliera $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ da non superare per più di tre volte). Les valeurs de SO_2 enregistrées montrent des valeurs moyennes très faibles avec l'absence totale de pics de concentration significatifs sur les deux sites de suivi. Les moyennes maximales horaires et les moyennes journalières sont bien inférieures aux limites légales (la moyenne maximale horaire de $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ne doit pas être dépassée plus de vingt-quatre fois par an et la moyenne journalière de $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ne doit pas être dépassée plus de trois fois).

Échantillonneurs passifs

En ce qui concerne le SO_2 , la cartographie du territoire au moyen de relevés saisonniers avec des échantillonneurs passifs a fourni des valeurs moyennes de SO_2 négligeables et proches de la limite de détection de la méthode pour chaque site étudié, y compris le site portuaire de Calata Bengasi. Le suivi pour la station mobile de Portoferraio a donné les résultats suivants.

Tableau 4.3.11: Données sur les SO_2 sur le site de Portoferraio

Portoferraio	
Toute la période d'échantillonnage	Été 2021
	SO_2
Nombre de jours d'échantillonnage valides	71
Nombre de valeurs horaires moyennes valides	1704
Valeur maximale de la moyenne horaire $\mu\text{g}/\text{m}^3$	11,4
Valeur maximale de la moyenne quotidienne $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1,9
Moyenne période $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,7

Les concentrations enregistrées étaient très faibles, avec une moyenne pour toute la période de $0,7 \text{ mg}/\text{m}^3$ et une absence totale de pics horaires significatifs. La comparaison avec les données mesurées à la période habituelle par les stations du réseau régional montre que les valeurs étaient comparables à celles typiques du fond urbain.

Benzène et dérivés

Le suivi a été effectué sur les sites du port de Livourne ont donné les résultats suivants.

Tableau 4.3.12: Données C_6H_6 sur le site Fortezza Vecchia.

C_6H_6 Fortezza Vecchia					
Toute la période d'échantillonnage	Été	Automne	Hiver	Printemps	Total
Nombre de jours d'échantillonnage valides	23	48	38	63	172
Nombre de valeurs horaires moyennes valides	576	1097	799	1424	3896
Moyenne période $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,2	0,4	0,6	0,4	0,4
Valeur maximale de la moyenne horaire $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1,5	5,7	4,7	6,5	6,5
Valeur maximale de la moyenne quotidienne $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,3	1,5	1,6	1,3	1,6
Toluene Fortezza Vecchia					
Toute la période d'échantillonnage	Été	Automne	Hiver	Printemps	Total
Nombre de jours d'échantillonnage valides	23	48	38	63	172
Nombre de valeurs horaires moyennes valides	576	1097	799	1424	3896
Moyenne période $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1,3	3,2	3,2	1,3	2,3
Valeur maximale de la moyenne horaire $\mu\text{g}/\text{m}^3$	11,5	123,7	25,8	28,4	123,7
Valeur maximale de la moyenne quotidienne $\mu\text{g}/\text{m}^3$	2,7	13,5	10,6	4,2	13,5

Etilbenzene Fortezza Vecchia					
Toute la période d'échantillonnage	Été	Automne	Hiver	Printemps	Total
Nombre de jours d'échantillonnage valides	23	48	38	63	172
Nombre de valeurs horaires moyennes valides	576	1097	799	1424	3896
Moyenne période $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,2	0,5	0,5	0,4	0,4
Valeur maximale de la moyenne horaire $\mu\text{g}/\text{m}^3$	5,4	16,9	5,1	10,8	16,9
Valeur maximale de la moyenne quotidienne $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,9	3,3	1,6	1,4	3,3
o,p-Xilene Fortezza Vecchia					
Toute la période d'échantillonnage	Été	Automne	Hiver	Printemps	Total
Nombre de jours d'échantillonnage valides	23	48	38	63	172
Nombre de valeurs horaires moyennes valides	576	1097	799	1424	3896
Moyenne période $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1,3	2,9	2,5	0,9	1,9
Valeur maximale de la moyenne horaire $\mu\text{g}/\text{m}^3$	15,1	50,1	18,3	21,1	50,1
Valeur maximale de la moyenne quotidienne $\mu\text{g}/\text{m}^3$	3,3	11,4	7,0	2,8	11,4
m-Xilene Fortezza Vecchia					
Toute la période d'échantillonnage	Été	Automne	Hiver	Printemps	Total
Nombre de jours d'échantillonnage valides	23	48	38	63	172
Nombre de valeurs horaires moyennes valides	576	1097	799	1424	3896
Moyenne période $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,3	0,5	0,6	0,2	0,4
Valeur maximale de la moyenne horaire $\mu\text{g}/\text{m}^3$	7,5	8,4	6,7	17,7	17,7
Valeur maximale de la moyenne quotidienne $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1,2	2,2	2,1	1,8	2,2

Tableau 4.3.13: Données C_6H_6 sur le site Calata Bengasi.

C_6H_6 Calata Bengasi					
Toute la période d'échantillonnage	Été	Automne	Hiver	Printemps	Total
Nombre de jours d'échantillonnage valides	31	32	50	57	170
Nombre de valeurs horaires moyennes valides	767	768	1200	1368	4103
Moyenne période $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,4	0,3	1,0	0,6	0,6
Valeur maximale de la moyenne horaire $\mu\text{g}/\text{m}^3$	9,0	3,3	6,6	3,9	9,0
Valeur maximale de la moyenne quotidienne $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1,0	0,9	2,4	1,5	2,4
Toluene Calata Bengasi					
Toute la période d'échantillonnage	Été	Automne	Hiver	Printemps	Total
Nombre de jours d'échantillonnage valides	31	32	50	57	170
Nombre de valeurs horaires moyennes valides	767	768	1200	1368	4103
Moyenne période $\mu\text{g}/\text{m}^3$	3,6	3,0	2,9	1,8	2,8
Valeur maximale de la moyenne horaire $\mu\text{g}/\text{m}^3$	55,6	29,3	31,2	28,4	55,6
Valeur maximale de la moyenne quotidienne $\mu\text{g}/\text{m}^3$	11,7	7,5	9,1	10,1	11,7
Etilbenzene Calata Bengasi					
Toute la période d'échantillonnage	Été	Automne	Hiver	Printemps	Total
Nombre de jours d'échantillonnage valides	31	32	50	57	170
Nombre de valeurs horaires moyennes valides	767	768	1200	1368	4103
Moyenne période $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,6	0,7	0,8	0,6	0,7
Valeur maximale de la moyenne horaire $\mu\text{g}/\text{m}^3$	6,2	14,7	20,3	4,1	20,3
Valeur maximale de la moyenne quotidienne $\mu\text{g}/\text{m}^3$	2,4	2,5	4,3	2,7	4,3

o,p-Xilene Calata Bengasi					
Toute la période d'échantillonnage	Été	Automne	Hiver	Printemps	Total
Nombre de jours d'échantillonnage valides	31	32	50	57	170
Nombre de valeurs horaires moyennes valides	767	768	1200	1368	4103
Moyenne période $\mu\text{g}/\text{m}^3$	2,5	3,4	0,7	0,5	1,8
Valeur maximale de la moyenne horaire $\mu\text{g}/\text{m}^3$	21,8	49,5	41,8	15,5	49,5
Valeur maximale de la moyenne quotidienne $\mu\text{g}/\text{m}^3$	4,7	9,1	8,9	2,0	9,1
m-Xilene Calata Bengasi					
Toute la période d'échantillonnage	Été	Automne	Hiver	Printemps	Total
Nombre de jours d'échantillonnage valides	31	32	50	57	170
Nombre de valeurs horaires moyennes valides	767	768	1200	1368	4103
Moyenne période $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,6	0,9	0,5	0,3	0,6
Valeur maximale de la moyenne horaire $\mu\text{g}/\text{m}^3$	7,9	16,7	27,6	3,6	27,6
Valeur maximale de la moyenne quotidienne $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1,4	2,7	3,8	1,1	3,8

Les concentrations de C_6H_6 étaient inférieures à la valeur limite réglementaire ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle) tout au long de la période d'enquête, sans concentration horaire moyenne significative. De même, les concentrations de dérivés de C_6H_6 étaient également faibles en moyenne et sans pics significatifs.

La figure montre les graphiques des moyennes horaires de C_6H_6 et de ses dérivés tout au long de la période considérée sur les sites portuaires.

Andamento medie orarie Benzene e derivati

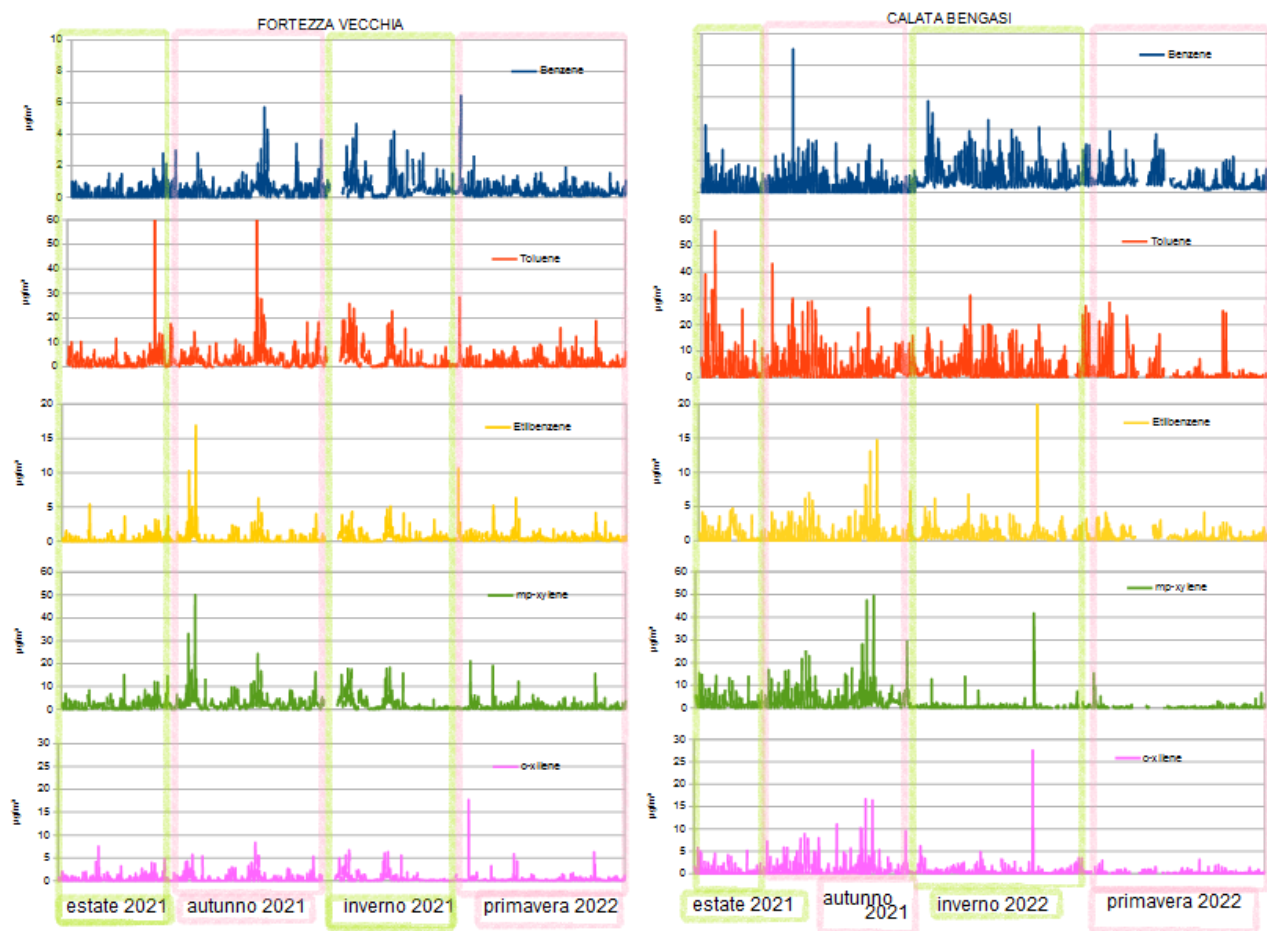


Figure 4.3.6: Tendances des moyennes horaires de C_6H_6 et des dérivés sur les sites de Fortezza Vecchia et Calata Bengasi.

Les résultats concernant le C₆H₆ et le toluène ont été comparés aux valeurs de suivi obtenues sur le site de fond de la station RRQA de Livourne.

Tableau 4.3.14: Comparaison des données des sites portuaires et de la station RRQA.

Toute la période d'enquête	Benzène			Toluène		
	Fortezza Vecchia	Calata Bengasi	LI-La Pira	Fortezza Vecchia	Calata Bengasi	LI-La Pira
Moyenne période µg/m ³	0,4	0,6	0,8	2,3	2,8	3,7
Valeur maximale de la moyenne horaire µg/m ³	6,5	9,0	7,3	123,7	55,6	56,4
Valeur maximale de la moyenne quotidienne µg/m ³	1,6	2,4	3,4	13,5	11,7	16,8

Les données du tableau montrent que les valeurs moyennes des sites portuaires étaient inférieures à celles du site de fond urbain pour le C₆H₆ et le toluène.

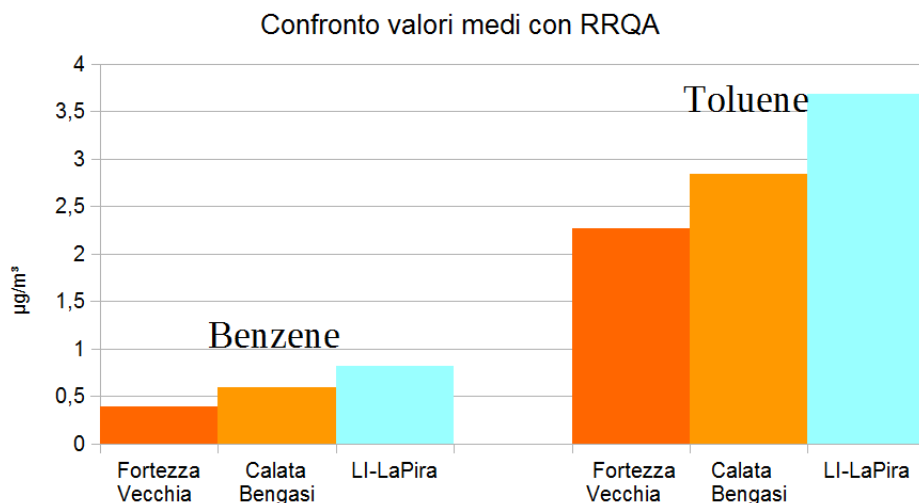


Figure 4.3.7: Comparaison des valeurs moyennes des sites portuaires avec la station de fond urbaine RRQA.

Particules

Pour les sites portuaires de Fortezza Vecchia et Calata Bengasi, l'étude des concentrations de particules dans la zone portuaire a été divisée en quatre campagnes saisonnières de juillet 2021 à juin 2022, tandis que pour le site de Portoferraio (île d'Elbe), elle a été réalisée avec une seule campagne entre août et septembre 2021 :

- les concentrations journalières de PM10 et PM2.5 ont été déterminées en utilisant la méthode UNI EN 12341 ;
- les métaux lourds ont été déterminés sur des échantillons de PM10 provenant de Fortezza Vecchia et Calata Bengasi en utilisant la méthode UNI EN 14902 : Arsenic, Cadmium, Nickel, Plomb et Vanadium ;
- sept congénères d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ont été déterminés sur des échantillons de PM10 provenant de Portoferraio en utilisant la méthode UNI EN 15549 : Benzo(a)anthracène, Benzo(a)pyrène, Benzo(b)fluoranthène, Benzo(k)fluoranthène, Benzo(j)fluoranthène, Dibenzo(a,h)anthracène, Indeno(1,2,3-cd)pyrène.

• Sites du port de Livourne

Le traitement des données pour l'ensemble de la période d'enquête sur le site portuaire de Fortezza Vecchia a fourni les résultats suivants pour les PM10 et les PM2.5.

Tableau 4.3.15: Données sur les PM10 et PM2.5 sur le site de Fortezza Vecchia.

Fortezza Vecchia	PM10	PM2.5
Nombre de valeurs moyennes valides	84	83
Valeur maximale de la moyenne quotidienne	77 µg/m ³	37 µg/m ³
90,4° centile	53 µg/m ³	-
Moyenne période	28 µg/m ³	13 µg/m ³

Pour ce type d'enquêtes discontinues, la réglementation actuelle fixe deux limites pour les PM10 : la moyenne annuelle de 40 µg/m³ et le 90,4° centile de la valeur moyenne journalière de 50 µg/m³, tandis que pour les PM2.5, la moyenne annuelle de 25 µg/m³ est la limite.

Les moyennes de PM10 et de PM2.5 étaient pleinement conformes à la réglementation en vigueur, se situant respectivement à 70 % et 50 % de la valeur limite, tandis que le 90,4° centile des moyennes quotidiennes de PM10 a dépassé la référence de 6 %. Certains indicateurs pour les quatre périodes d'enquête sont présentés dans le tableau.

Tableau 4.3.16: Données saisonnières sur les PM10 et PM2.5 sur le site de Fortezza Vecchia.

	Fortezza Vecchia							
	Été		Automne		Hiver		Printemps	
	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5
nombre de données	22	22	17	17	20	19	25	25
Moyenne	22	9	29	12	27	14	35	15
Minimum	13	3	15	8	7	3	10	5
25° centile	17	6	23	9	10	4	23	11
50° centile	20	10	27	11	17	9	30	12
75° centile	25	11	34	14	42	28	37	19
Maximum	37	17	53	22	71	37	77	30

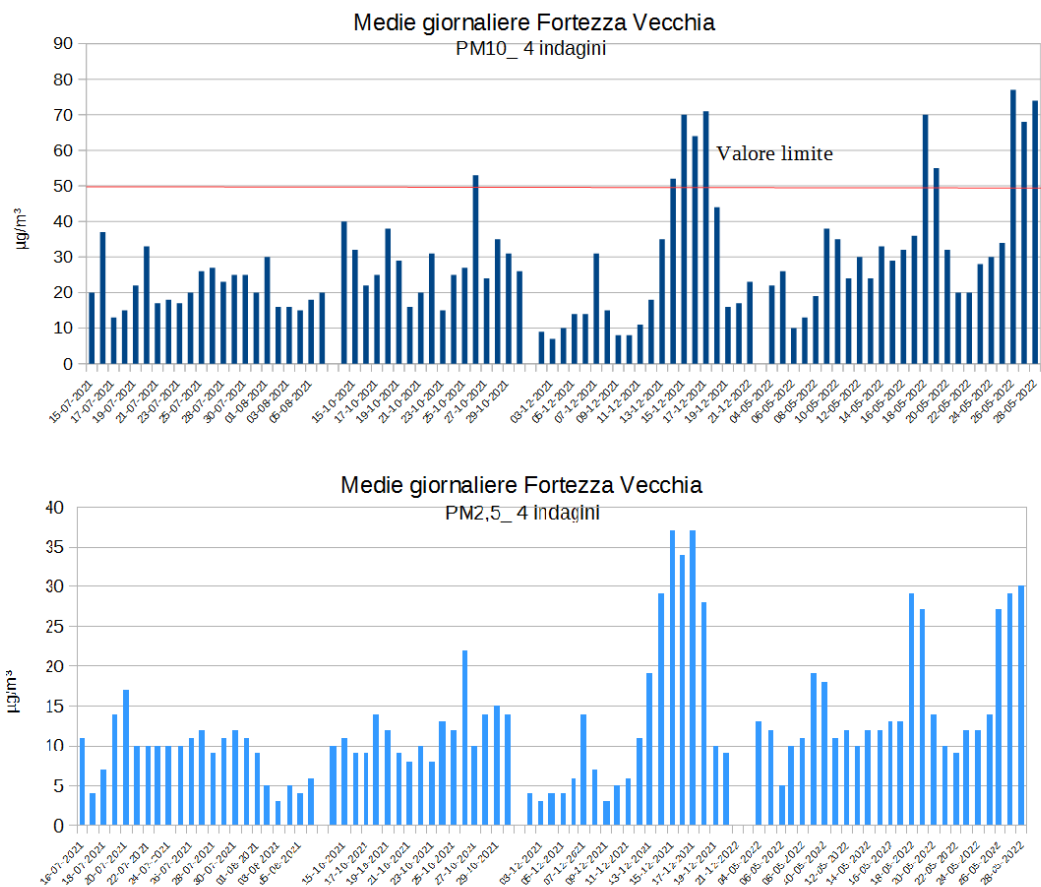


Figure 4.3.8: Moyennes quotidiennes de PM10 et PM2.5 sur le site de Fortezza Vecchia.

Comme on peut le voir sur le graphique, la tendance des données moyennes journalières de PM10 et PM2.5 enregistrées sur le site portuaire montre quelques épisodes caractérisés par des concentrations élevées supérieures à la valeur de référence pour les PM10, en particulier en hiver et au printemps.

La présence d'un trafic routier induit, résultant des activités portuaires touristiques et commerciales impliquant le déplacement de véhicules lourds, ainsi que la présence d'un sol non pavé sur le site de la station, semblent avoir contribué aux concentrations élevées de PM10. Sur les dix valeurs supérieures à la moyenne, cinq d'entre elles ont été mesurées au printemps, dans une période où toutes les stations de la côte ont enregistré une augmentation des moyennes journalières.

Le pourcentage de PM2.5 dans les PM10 était d'environ 45 %, inférieur à la moyenne des stations RRQA prises comme référence, ce qui semble confirmer l'hypothèse de sources primaires proches du site.

Tableau 4.3.17: Fraction PM2.5 dans PM10 sur le site de Fortezza Vecchia.

Fortezza Vecchia % PM2.5/PM10					
Période	Été	Automne	Hiver	Printemps	Total
Moyenne	44	42	50	45	45
Minimum	19	25	29	35	19
Maximum	64	56	64	77	77

Le traitement des données pour l'ensemble de la période d'enquête sur le site portuaire de Calata Bengasi a fourni les résultats suivants pour les PM10 et les PM2.5.

Tableau 4.3.18: Données sur les PM10 et PM2.5 sur le site de Calata Bengasi.

Calata Bengasi	PM10	PM2.5
Nombre de valeurs moyennes valides	96	94
Valeur maximale de la moyenne quotidienne	45 µg/m ³	24 µg/m ³
90,4° centile	29 µg/m ³	-
Moyenne période	20 µg/m ³	10 µg/m ³

Les limites légales ont été respectées tant pour les PM10 que pour les PM2.5, la valeur moyenne journalière des PM10 étant égale à 50 % de la valeur limite, la moyenne des PM2.5 étant égale à 40 % de la valeur limite et le 90,4° centile des PM10 étant égal à environ 60 % de la valeur limite. Sur le site de Calata Bengasi, la valeur moyenne sur la période de suivi était de 40 % de la valeur limite. Certains indicateurs pour les quatre périodes d'enquête sont présentés dans le tableau.

Tableau 4.3.19: Données saisonnières sur les PM10 et PM2.5 sur le site de Calata Bengasi.

	Calata Bengasi							
	Été		Automne		Hiver		Printemps	
	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5
nombre de données	21	21	20	19	20	20	35	34
Moyenne	20	10	15	7	23	12	21	11
Minimum	8	5	8	3	13	5	5	2
25° centile	15	7	13	6	16	7	16	8
50° centile	19	9	15	7	22	13	21	12
75° centile	23	14	19	9	29	16	23	14
Maximum	38	16	23	14	45	23	43	24

Toutes les concentrations moyennes journalières de PM10 enregistrées sur le site de Calata Bengasi étaient inférieures à la valeur de 50 µg/m³, avec une variabilité saisonnière limitée et des valeurs moyennes assez homogènes au cours des différentes saisons

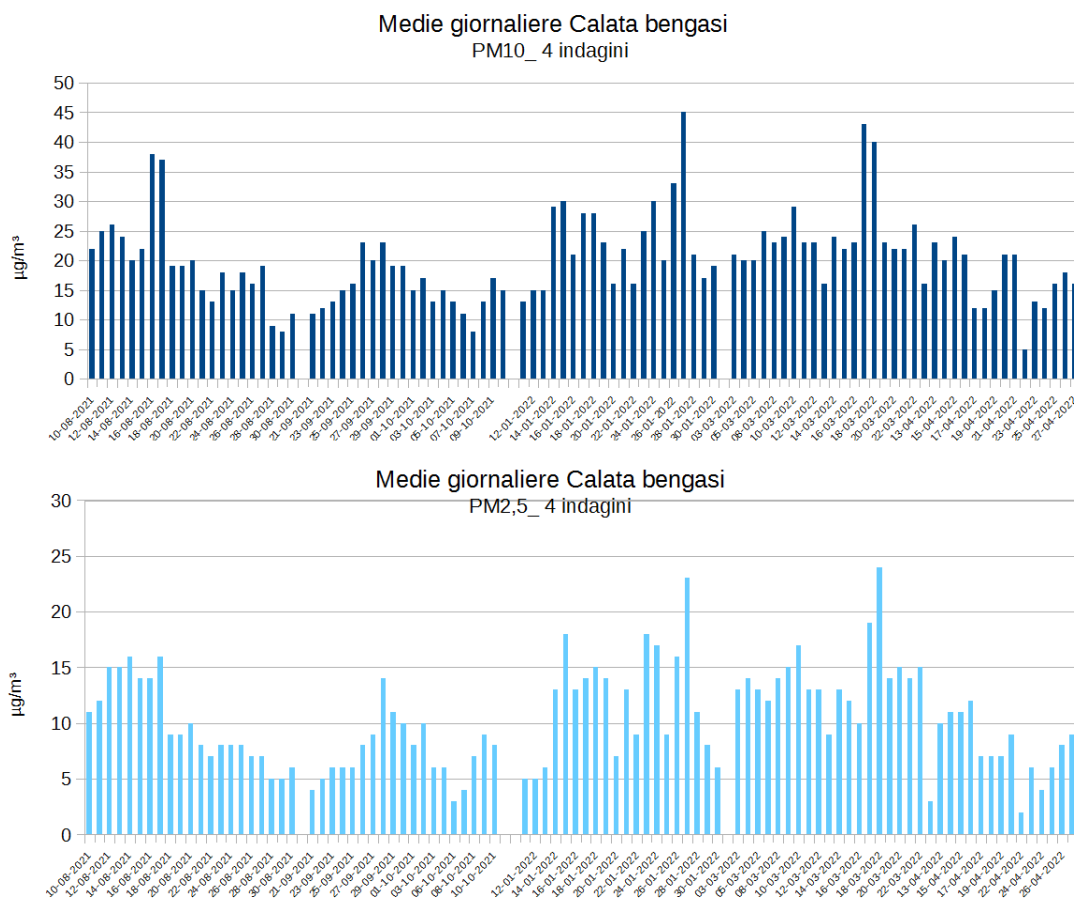


Figure 4.3.9: Moyennes quotidiennes de PM10 et PM2.5 sur le site de Calata Bengasi.

Le graphique de la figure montre que toutes les concentrations moyennes quotidiennes enregistrées sur le site de Calata Bengasi étaient faibles, avec une variabilité saisonnière limitée des valeurs moyennes, comme cela a été observé pour les PM10.

Tableau 4.3.20: Frazione PM2.5 nel PM10 nel sito di Calata Bengasi.

Calata Bengasi % PM2.5/PM10					
Enquête	Été	Automne	Hiver	Printemps	Total
Moyenne	52	47	50	53	51
Minimum	37	27	32	19	19
Maximum	80	61	72	70	80

Une étude du pourcentage de PM2.5 dans les PM10 montre qu'en moyenne, le pourcentage était proche de 50 % pour toutes les saisons, avec le pourcentage le plus élevé au printemps et le plus faible en automne. Le pourcentage de la fraction PM2.5 en PM10 est égal à celui enregistré au cours de l'année par les stations du réseau régional dans la municipalité de Livourne.

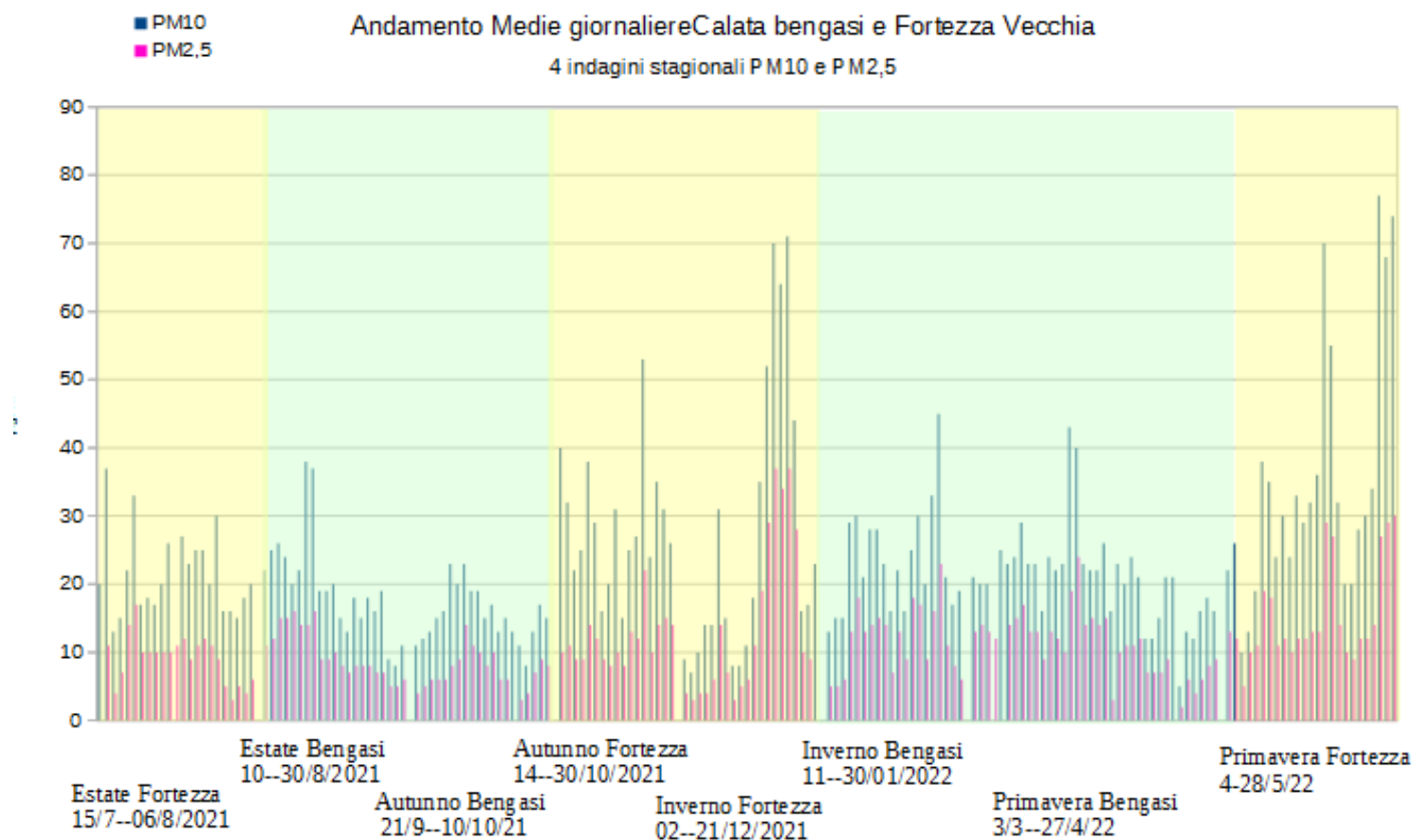


Figure 4.3.10: Tendances des moyennes journalières des PM10 et PM2.5 pour les deux sites portuaires de Livourne, sur toute la période d'échantillonnage

Comparaison avec les stations RRQA

Pour avoir une indication de la contribution possible des activités portuaires sur les concentrations de PM, une comparaison a été faite entre les deux sites portuaires avec les valeurs enregistrées pendant la même période par les stations fixes du RRQA.

Le traitement des données pour l'ensemble de la période d'enquête sur le site portuaire de Fortezza Vecchia e Calata Bengasi a fourni les résultats suivants pour les PM10 et les PM2.5.

Tableau 4.3.21: Comparaison des PM10 et PM2.5 du site portuaire de Fortezza Vecchia avec les stations RRQA.

	Concentrations sur toute la période de suivi (µg/m³)									
	Fortezza Vecchia		LI-Stagno (UI)		LI-La Pira (UB)		LI- Capiello (UB)		LI-Carducci (UT)	
	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5
moyenne pour la période	28	13	21	11	19	-	17	8	23	11
valeur maximale de la moyenne quotidienne	7	3	9	5	6	-	5	3	11	3
valeur maximale de la moyenne quotidienne	77	37	41	31	45	-	36	19	47	29

Sur le site de Fortezza Vecchia, la valeur moyenne des PM10 était significativement plus élevée que la valeur moyenne du fond urbain de la ville, et était également plus élevée que la moyenne enregistrée par le site du fond industriel et le site du trafic. La tendance des valeurs moyennes journalières montre également que plusieurs pics de concentration ont été détectés à Fortezza Vecchia les jours où les stations RRQA ne les ont pas enregistrés. La valeur moyenne des PM2.5 sur le site de Fortezza Vecchia était également nettement supérieure à la valeur moyenne du fond urbain de la ville, d'environ 60 %, et elle est également supérieure aux moyennes du site industriel et du trafic.

Tableau 4.3.22: Comparaison des PM10 et PM2.5 du site portuaire de Calata Bengasi avec les stations RRQA.

	Concentrations sur toute la période de suivi (µg/m³)									
	Calata Bengasi		LI-Stagno (UI)		LI-La Pira (UB)		LI- Capiello (UB)		LI-Carducci (UT)	
	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5
moyenne pour la période	20	10	20	12	19	-	17	9	22	12
valeur maximale de la moyenne quotidienne	5	2	5	3	3	-	5	2	9	4
valeur maximale de la moyenne quotidienne	45	24	58	43	49	-	39	17	47	31

Les valeurs moyennes des PM10 et PM2.5 sur le site de Calata Bengasi étaient légèrement supérieures aux valeurs moyennes du fond urbain, d'environ 10 %.

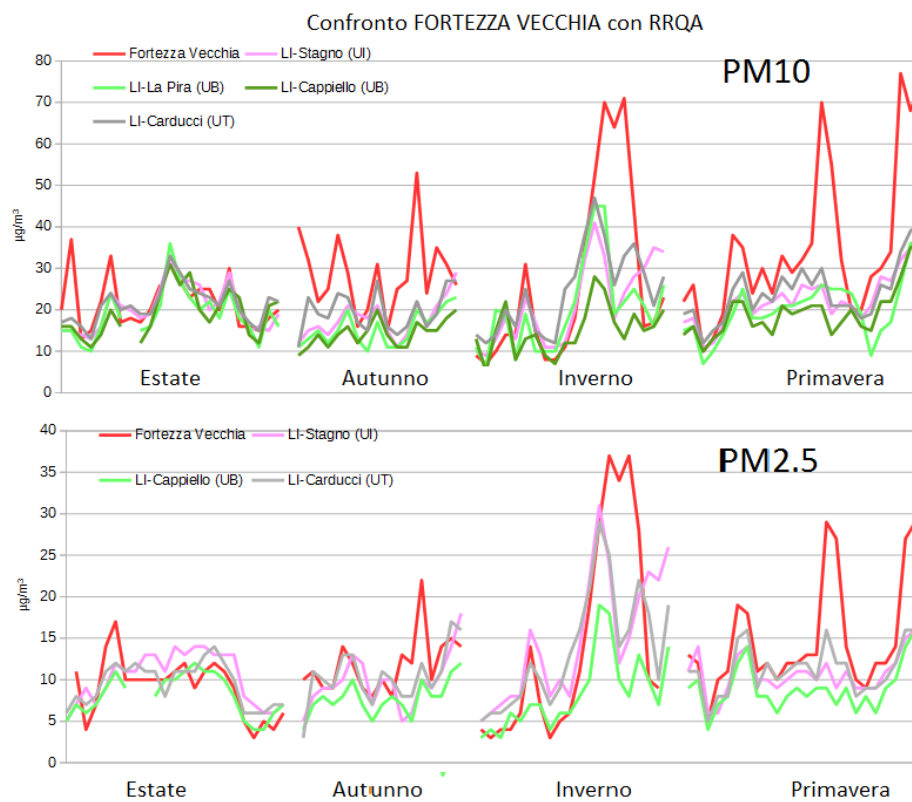


Figure 4.3.11: Comparaison des PM10 et PM2.5 entre le site de Fortezza Vecchia et les sites RRQA.

Confronto CALATA BENGASI con RRQA

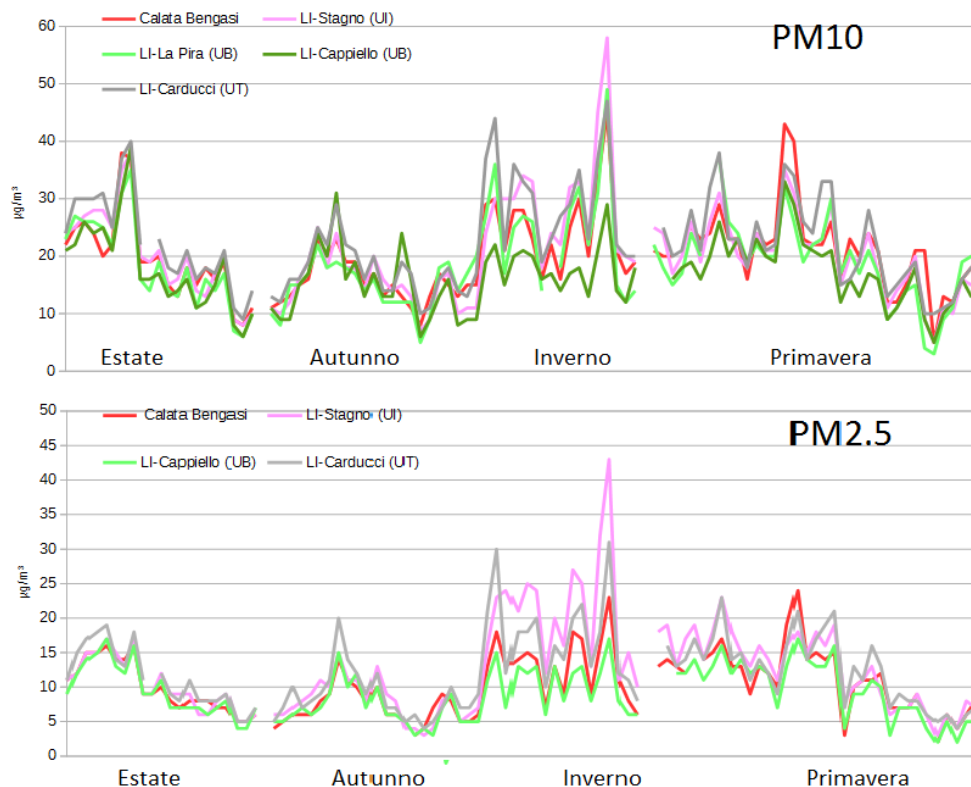


Figure 4.3.12: Comparaison des PM10 et PM2.5 entre le site de Calata Bengasi et les sites RRQA.

Métaux lourds sur PM10 : Sites de Fortezza Vecchia et Calata Bengasi

Des analyses de métaux lourds ont été effectuées sur des échantillons de PM10 provenant des deux sites portuaires de Fortezza Vecchia et Calata Bengasi : Arsenic, Cadmium, Nickel, Plomb et Vanadium. Les concentrations saisonnières et la moyenne annuelle globale pour les deux sites étudiés sont indiquées ci-dessous.

Tableau 4.3.23: Concentrations moyennes en ng/m³ des cinq métaux sur les deux sites étudiés.

Valeurs moyennes des métaux lourds ng/m ³					
Fortezza Vecchia	Arsenic	Cadmium	Nickel	Plomb	Vanadium
Été	0,4	0,1	5,9	1,8	4,8
Automne	0,4	0,1	3,2	3,9	3,6
Hiver	0,7	1,1	3,1	5,3	2,8
Printemps	0,5	0,1	5,0	3,3	7,6
Moyenne annuelle	0,5	0,4	4,3	3,6	4,7
Calata Bengasi	Arsenic	Cadmium	Nickel	Plomb	Vanadium
Été	0,3	0,1	4,0	1,4	6,0
Automne	0,3	0,1	1,5	2,1	2,1
Hiver	0,4	0,1	2,6	5,1	4,0
Printemps	0,4	0,1	2,6	4,0	3,7
Moyenne annuelle	0,4	0,1	2,7	3,2	3,9

Comme le montrent les données du tableau, les concentrations moyennes de chacun des cinq métaux analysés sont assez faibles pour les deux sites, avec des moyennes globales plus élevées sur le site de Fortezza Vecchia que sur celui de Calata Bengasi. Pour chacun des métaux, les concentrations moyennes étaient inférieures aux valeurs cibles (As, Cd et Ni respectivement 6,0 ng/m³, 5,0 ng/m³ et 20,0 ng/m³) et à la valeur limite (pour le Pb 500 ng/m³).

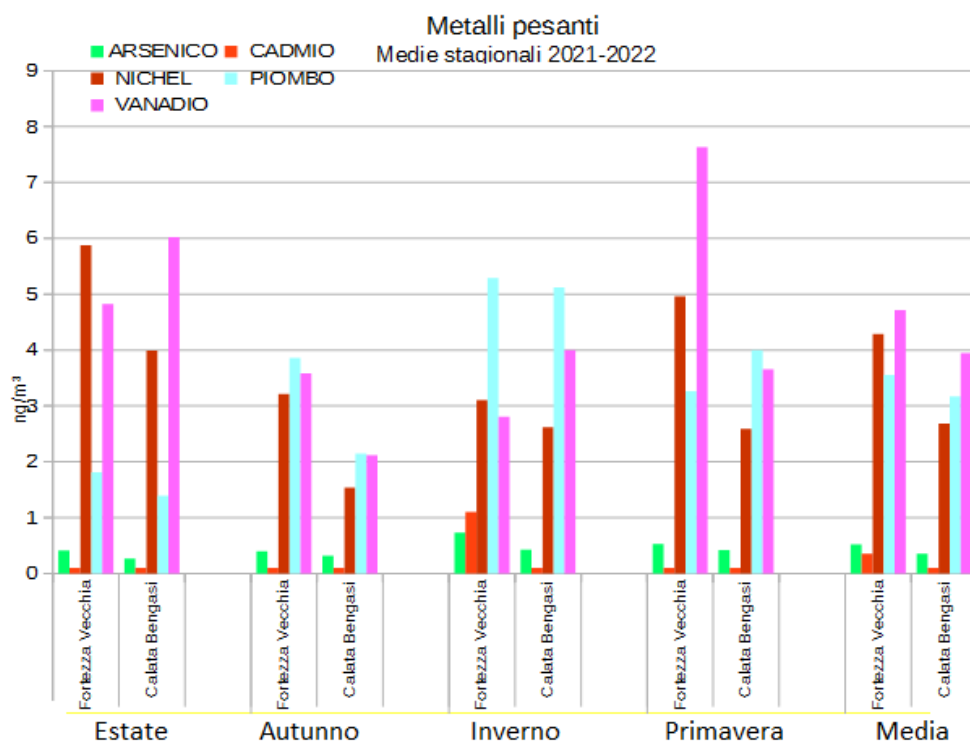


Figure 4.3.13: Andamento stagionale metalli pesanti.

Pour évaluer quelle pourrait être la contribution du port pour chacun des cinq métaux sur les sites étudiés, une comparaison a été faite avec les concentrations relevées dans les mêmes intervalles de temps à la station de fond urbaine de LI-La Pira appartenant à la RRQA.

Tableau 4.3.24: Concentrations moyennes en ng/m³ des cinq métaux sur les différents sites étudiés.

Arsenic	Valeurs moyennes saisonnières ng/m ³		
	Fortezza Vecchia	Calata Bengasi	Li - La Pira (RRQA)
Été	0,4	0,3	0,3
Automne	0,4	0,3	0,4
Hiver	0,7	0,4	0,4
Printemps	0,5	0,4	0,4
Moyenne saisons	0,5	0,4	0,4
Cadmium	Valeurs moyennes saisonnières ng/m ³		
	Fortezza Vecchia	Calata Bengasi	Li - La Pira (RRQA)
Été	0,1	0,1	0,1
Automne	0,1	0,1	0,2
Hiver	1,1	0,1	0,1
Printemps	0,1	0,1	0,1
Moyenne saisons	0,4	0,1	0,1

Nickel	Valeurs moyennes saisonnières ng/m³		
	Fortezza Vecchia	Calata Bengasi	Li - La Pira (RRQA)
Été	5,9	4,0	2,6
Automne	3,2	1,5	0,9
Hiver	3,1	2,6	1,2
Printemps	5,0	2,6	1,8
Moyenne saisons	4,3	2,7	1,6
Plomb	Valeurs moyennes saisonnières ng/m³		
	Fortezza Vecchia	Calata Bengasi	Li - La Pira (RRQA)
Été	1,8	1,4	1,8
Automne	3,9	2,1	3,0
Hiver	5,3	5,1	4,1
Printemps	3,3	4,0	3,0
Moyenne saisons	3,6	3,2	3,0
Vanadium	Valeurs moyennes saisonnières ng/m³		
	Fortezza Vecchia	Calata Bengasi	Li - La Pira (RRQA)
Été	4,8	6,0	3,4
Automne	3,6	2,1	1,2
Hiver	2,8	4,0	0,9
Printemps	7,6	3,7	2,1
Moyenne saisons	4,7	3,9	1,9

D'après les données rapportées, on peut constater que:

- As: des concentrations moyennes légèrement plus élevées ont été enregistrées sur le site de Fortezza Vecchia que sur le site de Calata Bengasi et le fond urbain ;
- Cd: les concentrations étaient pour tous les sites proches de la limite de détection instrumentale, à l'exception d'un échantillon de la période hivernale sur le site de Fortezza Vecchia, qui a influencé la moyenne du site ;
- Pb: les concentrations enregistrées sont faibles et similaires pour les sites portuaires et le site de fond, avec des valeurs moyennes globales légèrement supérieures sur le site de Fortezza Vecchia;
- Ni et V: pour ces deux métaux, qui sont des traceurs de la combustion d'huiles lourdes, les concentrations enregistrées sur les deux sites portuaires étaient significativement plus élevées à chaque saison que les valeurs mesurées sur le site de fond urbain.

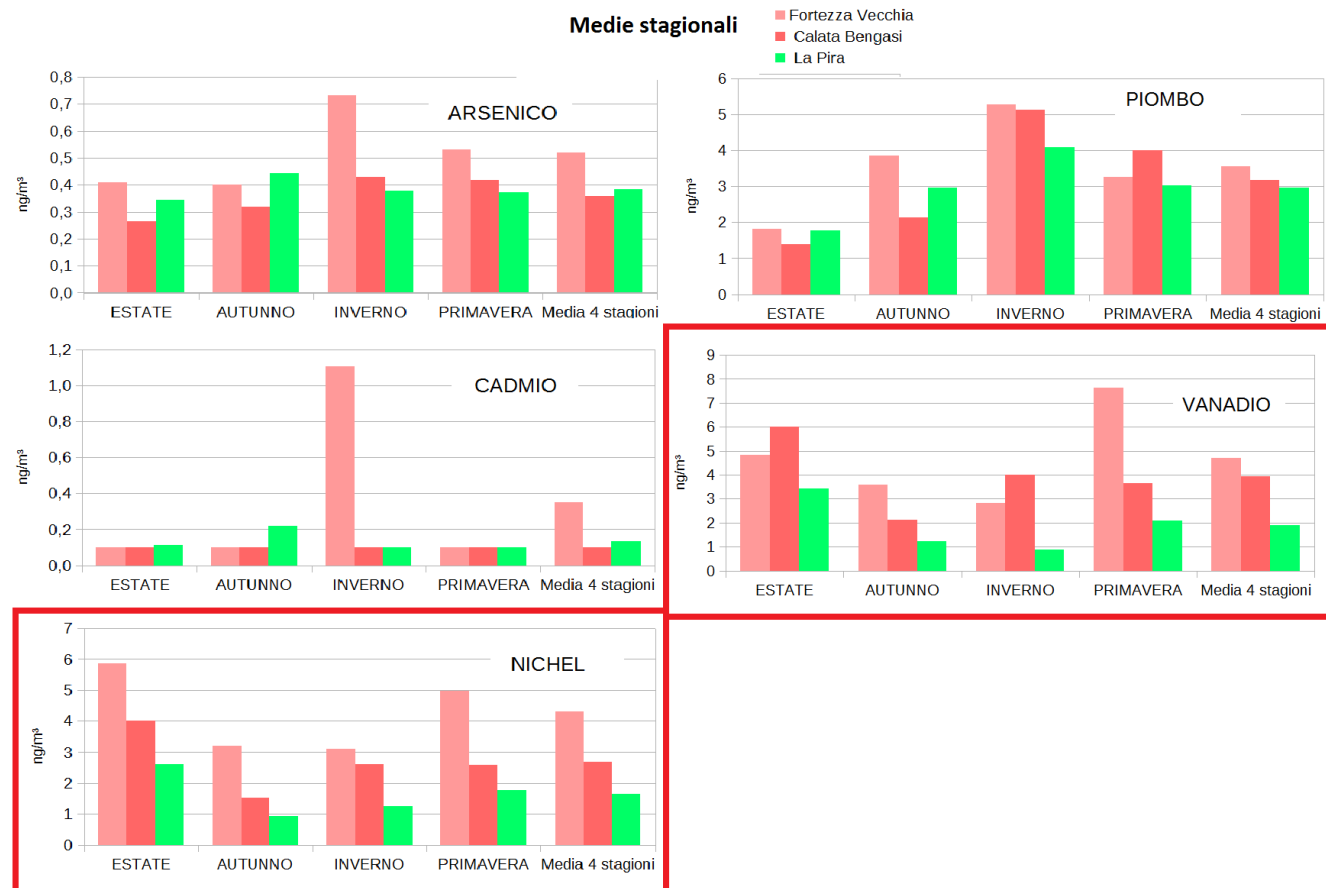


Figure 4.3.14: Concentrations moyennes en ng/m³ des cinq métaux sur les différents sites étudiés.

- **Site portuaire de Portoferraio**

Letraitement des données pour l'ensemble de la période d'enquête, qui s'est déroulée entre juillet et septembre 2021 sur le site portuaire de Portoferraio (île d'Elbe), a donné les résultats PM suivants.

Tableau 4.3.25: Données sur les PM10 et PM2.5 sur le site de Portoferraio.

Portoferraio	PM10	PM2.5
Nombre de valeurs moyennes valides	60	60
Valeur maximale de la moyenne quotidienne	45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
90,4° centile	30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-
Moyenne période	19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	9,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Compte tenu de la période d'échantillonnage exclusivement estivale, la comparaison avec les limites réglementaires pour ce site n'est qu'indicative. Les valeurs journalières moyennes enregistrées ont été faibles pendant toute la période d'enquête, la moyenne générale des PM10 se situant à environ 50 % de la valeur limite annuelle, la moyenne des PM2.5 à environ 40 % de la limite et le centile 90,4° des PM10 à 60 % de la valeur limite.

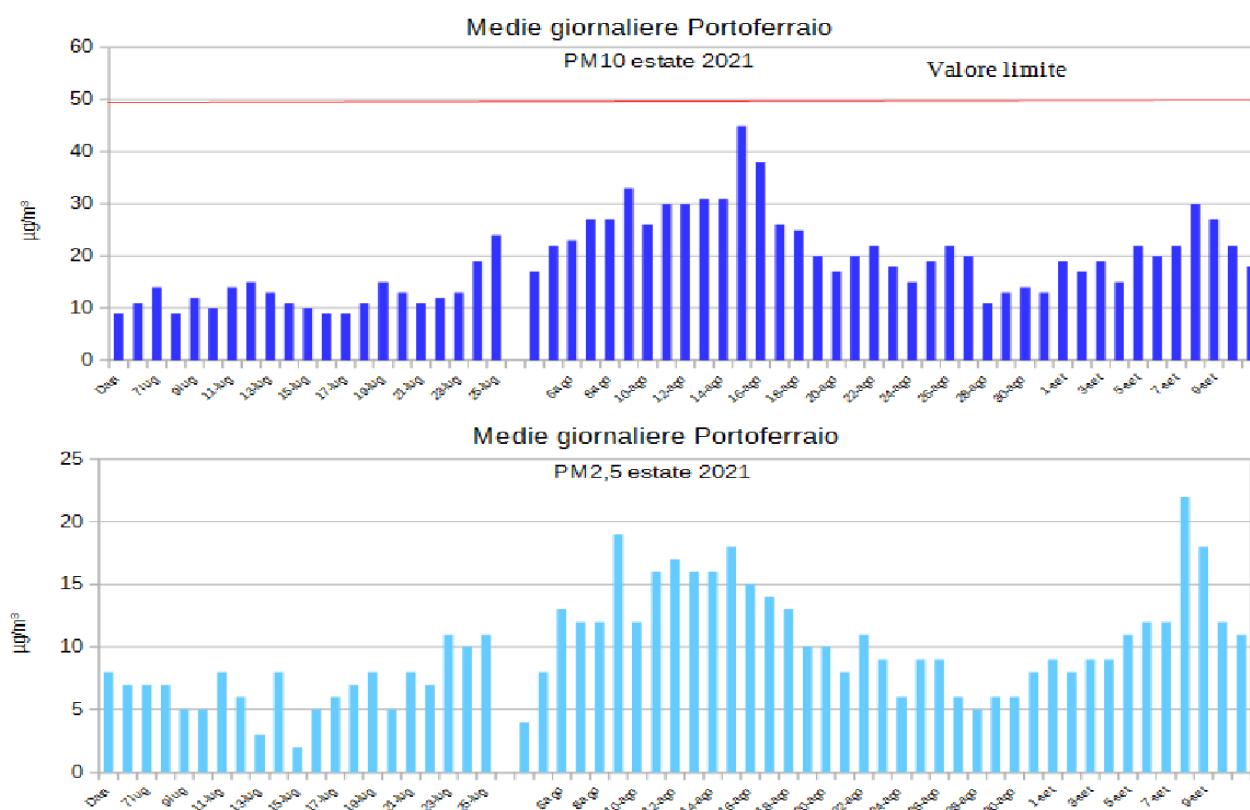


Figure 4.3.15: Moyennes quotidiennes de PM10 et PM2.5 sur le site de Portoferraio.

Tableau 4.3.26: Fraction PM2.5 dans PM10 sur le site de Portoferraio.

Portoferraio % PM2.5/PM10	
Période	Été 2021
Moyenne	52
Minimum	20
Maximum	89

De l'étude des pourcentages de PM2.5 dans PM10, on constate qu'en moyenne le pourcentage était proche de 50 % sur toute la période, égal à celui enregistré sur la même période par les stations RRQA de référence.

Comparaison avec les stations RRQA

Pour obtenir des indications sur la contribution possible des activités portuaires sur les concentrations de PM sur le site, une comparaison a été faite avec les valeurs enregistrées pendant la même période par les stations de la municipalité de Livourne et la station de fond urbaine de la municipalité de Piombino.

Le traitement des données pour l'ensemble de la période d'enquête sur le site portuaire de Fortezza Vecchia a fourni les résultats suivants pour les PM10 et les PM2.5.

Tableau 4.3.27: Comparaison des PM10 et PM2.5 du site portuaire de Portoferraio avec les stations RRQA.

	Concentrations sur toute la période de suivi (µg/m³)									
	Portoferraio		Piombino (UB)		LI-La Pira (UB)		LI- Cappelio (UB)		LI-Carducci (UT)	
	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5
moyenne pour la période	19	10	20	-	17	-	17	10	21	9
valeur maximale de la moyenne quotidienne	9	2	9	-	6	-	6	5	9	4
valeur maximale de la moyenne quotidienne	45	22	42	-	36	-	39	19	40	17

Les concentrations moyennes de PM10 et PM2.5 sur le site étaient très similaires aux valeurs de fond des stations RRQA prises comme référence, les valeurs maximales journalières étant légèrement supérieures pour les deux fractions.

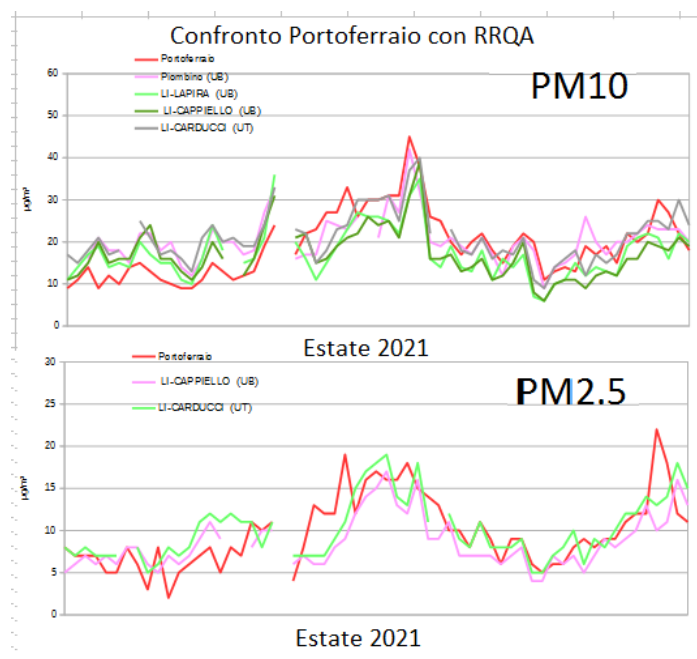


Figure 4.3.16: Comparaison des PM10 et PM2.5 entre le site de Portoferraio et les sites RRQA.

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques sur les PM10 à Portoferraio

Les sept congénères d'hydrocarbures aromatiques polycycliques ont été recherchés dans les échantillons de PM10 du site de Portoferraio. Les résultats obtenus sont présentés ci-dessous.

Tableau 4.3.28: Concentrations des sept congénères de HAP dans les PM10 à Portoferraio (ng/m³).

Site	Période 6 juillet/12 septembre						
	Concentrations moyennes (ng/m³)						
	B(a)A	B(a)P	B(b)F	B(k)F	B(j)F	DB(a,h)A	InP
Portoferraio	0,07	0,05	0,19	0,05	0,06	0,01	0,09

La législation actuelle indique une concentration moyenne annuelle de 1 ng/m³ comme valeur cible pour le benzo(a)pyrène. La valeur moyenne de la période, 0,05 ng/m³, n'est pas du tout représentative pour la comparaison avec la valeur normative car elle est représentative de la période estivale, qui est caractérisée par des valeurs de HAP nettement plus faibles que les autres périodes de l'année. Afin d'obtenir des indications sur le site de Portoferraio, la valeur moyenne du Benzo(a)pyrène a été comparée avec la station de fond urbaine LI-La Pira à Livourne, la station de fond urbaine Piombino (la station la plus proche du site d'investigation parmi les stations RRQA) et la station de trafic urbaine Florence (la station de référence régionale RRQA pour les HAP) en considérant la même période d'investigation. Les tendances du benzo(a)pyrène pour différentes stations sont présentées dans la figure.

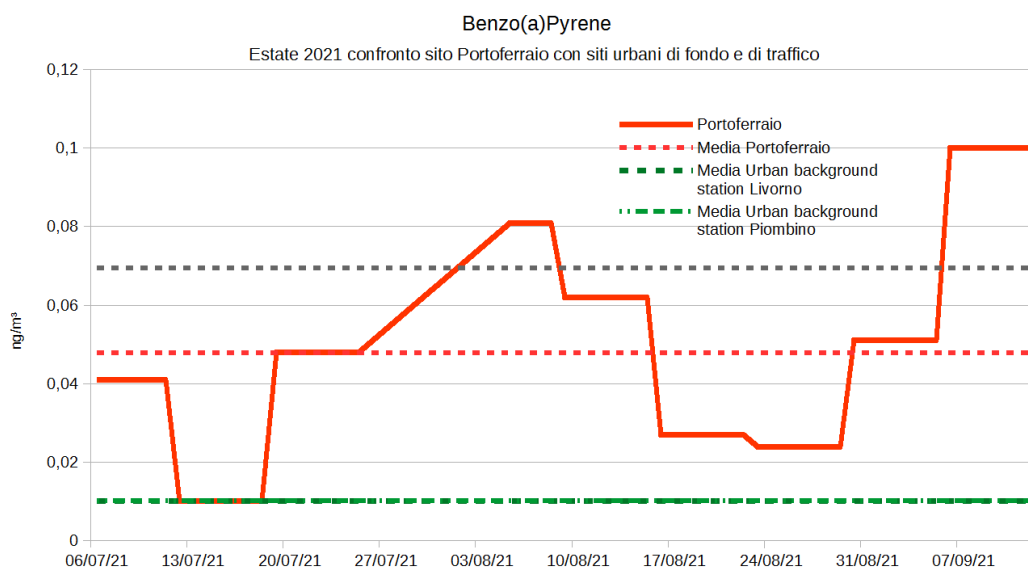


Figure 4.3.17: Tendence des concentrations de Benzo(a)pyrène sur le site de Portoferraio et certaines stations RRQA.

Les concentrations de B(a)P sur le site de Portoferraio étaient cinq fois supérieures à celles des stations de fond de Livourne et de Piombino.

Les concentrations moyennes pour les sept congénères sont indiquées, en comparant le site de Portoferraio avec la station de fond urbaine LI-La Pira à Livourne, la station de fond urbaine de Piombino (la plus proche du site d'étude parmi les stations RRQA) et la station de trafic urbaine RRQA de Florence, qui est la référence régionale pour les HAP.

Tableau 4.3.29: Concentrations de Benzo(a)pyrène sur le site de Portoferraio et certaines stations RRQA.

Site	Période 6 juillet/12 septembre						
	Concentrations moyennes (ng/m ³)						
	B(a)A	B(a)P	B(b)F	B(k)F	B(j)F	DB(a,h)A	InP
Portoferraio	0,07	0,05	0,19	0,05	0,06	0,01	0,09
UB Piombino	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
UB Livorno	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
UT Firenze	0,09	0,07	0,10	0,05	0,01	0,01	0,08

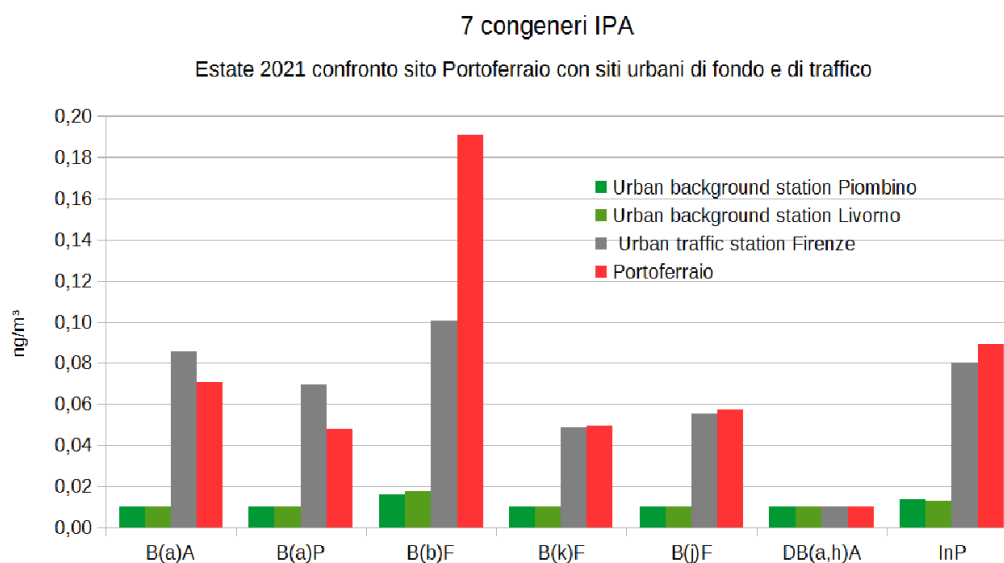


Figure 4.3.18: Comparaison entre le site de Portoferraio et certains sites urbains de la RRQA.

Les données rapportées montrent que sur le site étudié, les concentrations des sept congénères étaient significativement plus élevées que celles enregistrées pendant la période habituelle par les stations de fond de Livourne et Piombino, avec des valeurs moyennes similaires à celles du site du trafic RR, ce qui indique des sources de combustion proches du site d'échantillonnage.

4.4 RÉGIONE PACA

Ce chapitre rend compte des résultats obtenus lors de ce projet par Atmosud au port de Toulon.

Afin d'optimiser la surveillance des polluants au niveau du port de Toulon, la cabine initialement placée sur le toit de la DDTM83 a été déplacée à l'entrée du terminal ferry TCA le 15/06/2021. Les moyennes et maxima des concentrations en NO₂, PM2.5 et SO₂ mesurées par cette cabine et par les stations fixes de Toulon Foch, Toulon Claret et la Seyne-Brégaillon lors des campagnes 2020 et 2021 sont résumées dans le **Erreur. L'origine riferimento non è stata trovata..** Les niveaux des concentrations enregistrées par les stations fixes sont comparables d'une année à l'autre, mais les concentrations en NO₂ et PM2.5 enregistrées par la cabine mobile sont bien plus importantes en 2021. Ceci confirme que le déplacement de la cabine a permis d'améliorer la captation des polluants émis par les navires.

Les paramètres surveillés sont les polluants soumis à la réglementation française et faisant l'objet de recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Seuls les dépassements des moyennes horaires et journalières sont étudiés, la durée de la campagne ne permettant pas de calculer des moyennes annuelles.

Tableau 4.4.1: Comparaison des concentrations en NO₂, PM2.5 et SO₂ mesurées lors des campagnes estivales 2020 et 2021, au niveau de la cabine mobile du port de Toulon et des stations fixes de Toulon Foch, Toulon Claret et la Seyne-Brégaillon².

Période	Substance	Paramètre	Toulon Foch	Toulon Claret	La Seyne	Mobile DDTM 83
Dal 01/07 al 09/09 2020	NO ₂	Concentration moyenne (µg/m ³)	32	18	12	17
		Concentration maximale horaire (µg/m ³)	105	110	92	82
		Concentration maximale journalière (µg/m ³)	48	31	23	31
	PM2.5	Concentration moyenne (µg/m ³)	-	6	-	7
		Concentration maximale horaire (µg/m ³)	-	24	-	21
		Concentration maximale journalière (µg/m ³)	-	14	-	14
	SO ₂	Concentration moyenne (µg/m ³)	-	-	-	3
		Concentration maximale horaire (µg/m ³)	-	-	-	19
		Concentration maximale journalière (µg/m ³)	-	-	-	5
Période	Substance	Paramètre	Toulon Foch	Toulon Claret	La Seyne	Mobile DDTM 83
Dal 15/06 al 30/09 2021	NO ₂	Concentration moyenne (µg/m ³)	30	17	13	30
		Concentration maximale horaire (µg/m ³)	105	82	87	121
		Concentration maximale journalière (µg/m ³)	49	36	29	61

²Tableau extrait du rapport Atmosud Bilan de la qualité de l'air « Rade de Toulon » sur la période estivale 2021 : <https://www.atmosud.org/publications/bilan-de-la-qualite-de-lair-rade-de-toulon-sur-la-période-estivale-2021>

	PM2.5	Concentration moyenne (µg/m³)	-	6	-	9
		Concentration maximale horaire (µg/m³)	-	28	-	51
		Concentration maximale journalière (µg/m³)	-	20	-	21
	SO₂	Concentration moyenne (µg/m³)	-	-	-	2
		Concentration maximale horaire (µg/m³)	-	-	-	21
		Concentration maximale journalière (µg/m³)	-	-	-	6

Pour certaines espèces, l'OMS définit une ligne directrice (LD), qui correspond à une valeur cible en deçà de laquelle on considère que les effets de la pollution de l'air sur la santé sont admissibles. En moyenne horaire, seule une espèce est concernée par une LD OMS, à savoir NO₂. Aucun dépassement horaire n'est observé au niveau des trois cabines

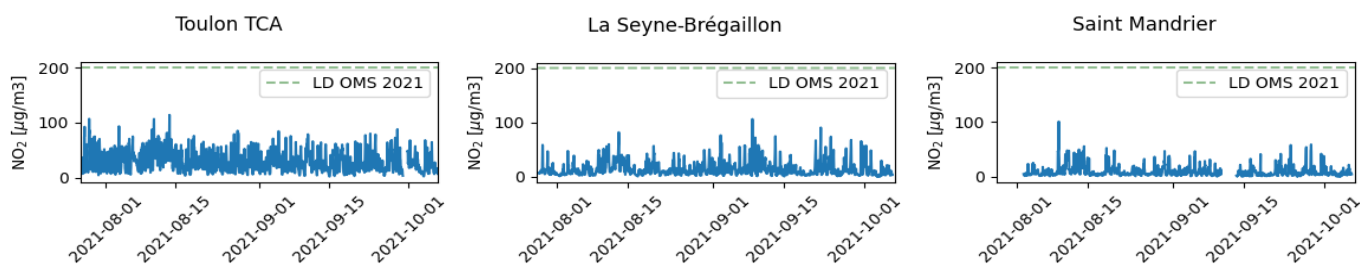


Figure 4.4.1: Recherche de dépassements des lignes directrices (LD) horaires de l'OMS (2021) pour les concentrations en NO₂.

En moyenne journalière, il existe une LD s'appliquant aux PM2.5 et à SO₂, outre celle s'appliquant à NO₂. D'après la figure suivantes les concentrations en SO₂ restent bien inférieures à la limite fixée par l'OMS. Des dépassements sont observables pour NO₂ et les PM2.5. Toutefois, les dépassements en PM2.5 concernent majoritairement la période du 12 au 17 août. Cette période semble être marquée par un épisode de pollution exceptionnel à l'échelle de la ville, probablement en lien avec la météo, et qui s'observe également sur les données des microcapteurs (voir section suivante). En dehors de cette période, il existe quelques faibles dépassements en PM2.5, essentiellement à la Seyne-Brégaillon. Pour NO₂, on n'observe pas de dépassement de la LD à Saint Mandrier, quelques faibles dépassements à la Seyne-Brégaillon, mais des dépassements très réguliers à Toulon TCA, avec des concentrations qui approchent régulièrement le double de la LD OMS.

Il est important de faire remarquer ici que les niveaux moyens enregistrés à Toulon TCA sont comparables à ce qui est enregistré à la station Toulon Foch, qui est une station de type « trafic » (30000 à 50000 passages de véhicules par jour), avec des maxima ponctuels plus importants. Les niveaux moyens enregistrés à la Seyne-Brégaillon et Saint Mandrier sont comparables à ce que l'on enregistre à la station Toulon Claret, qui est une station de type « urbain » (environ 3000 passages de véhicules par jour), avec là encore des maxima ponctuels plus importants. La pollution automobile, qui génère également des élévations de concentrations en PM et oxydes d'azote, est une problématique importante de la ville de Toulon. Dans le cas de la cabine Toulon TCA, les deux types de pollution, marine et automobile, viennent s'entrecroiser. Notamment, chaque embarquement et débarquement de ferry engendre le passage de 500 voitures qui longent le linéaire de quai, ce qui complexifie l'estimation de la contribution des navires à la pollution globale dans la rade.

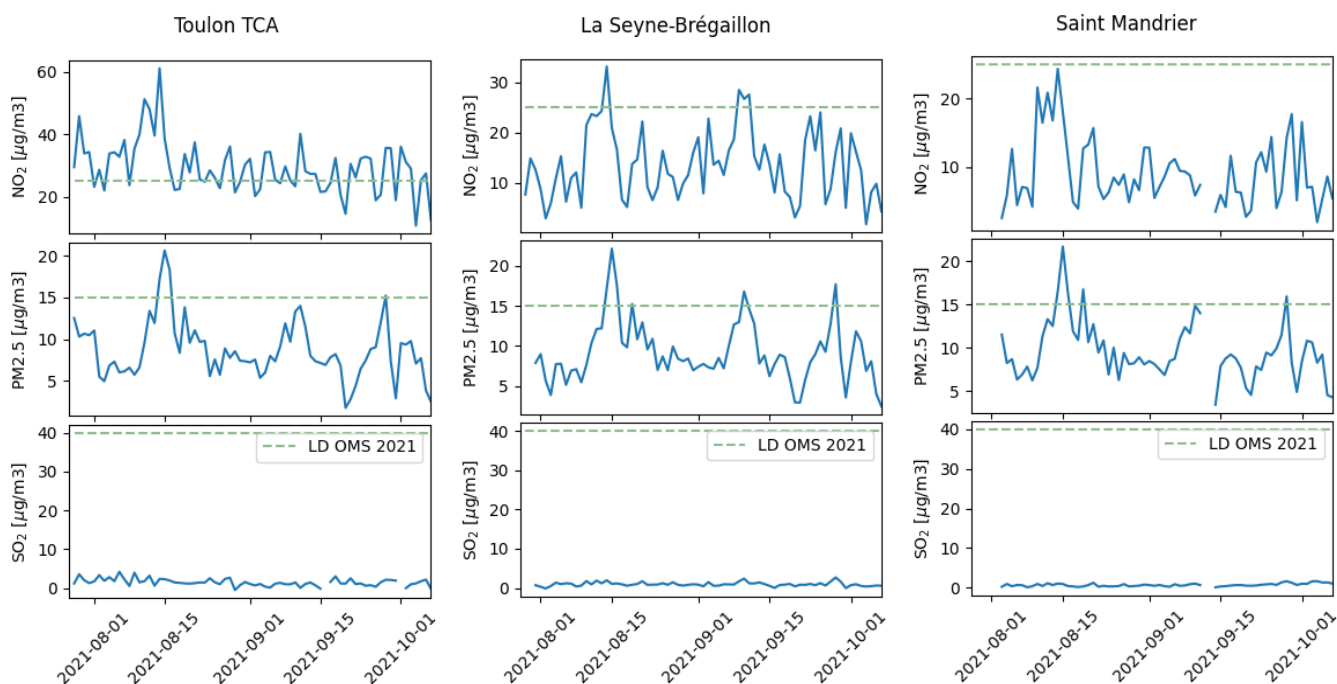


Figure 4.4.2: Recherche de dépassements des lignes directrices (LD) journalières de l'OMS (2021) pour les concentrations en NO_2 , $\text{PM}_{2.5}$ et SO_2 .

Concentrations en oxydes d'azote

La figure présente les concentrations en NO_2 et NO mesurées par les microcapteurs du dispositif Aer Nostrum (bleu), comparées aux données de concentration mesurées par la cabine Toulon TCA (rouge) et par les stations fixes du réseau de mesure Toulon Claret (vert) et Toulon Foch (gris), en moyenne journalière, sur la période de fonctionnement complète des microcapteurs. On constate que les concentrations en NO_2 mesurées par les microcapteurs sont comparables aux mesures de référence. A l'inverse, les concentrations en NO mesurées par les microcapteurs montrent un écart par rapport aux références qui varie d'un capteur à l'autre, avec des valeurs anormalement hautes pour le microcapteur situé avenue de Lattre de Tassigny. Contrairement aux données de NO_2 , l'hétérogénéité des écarts observés entre données des microcapteurs et données de référence pour les concentrations en NO proscrire une analyse des données de NO sans traitement de normalisation.

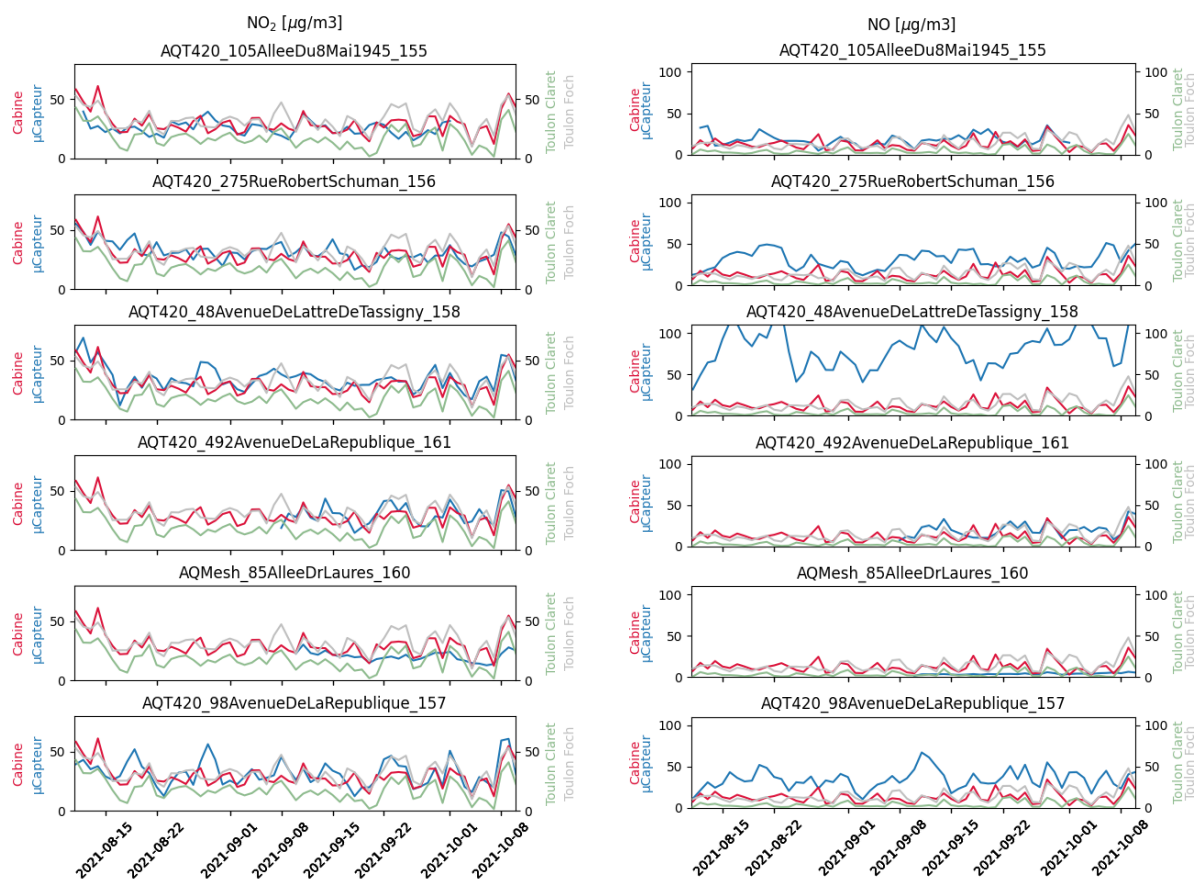


Figure 4.4.3: Profils de concentrations journaliers en NO_2 (gauche) et NO (droite) des microcapteurs (bleu), de la cabine AtmoSud Toulon TCA (rouge), des stations fixes Toulon Claret (vert) et Toulon Foch (gris).

Les figures présentent les cartes des roses de pollution des maxima de concentration en NO_2 , tracées en utilisant les données du matin et de l'après-midi respectivement. On observe l'après-midi une augmentation des maxima de concentration mesurés par la cabine et par le microcapteur le plus proche (Av. Maréchal de Lattre de Tassigny), avec une origine préférentielle en direction du terminal ferry. Le second microcapteur le plus proche (498 Av. de la République) indique également une légère hausse des concentrations depuis cette même provenance.

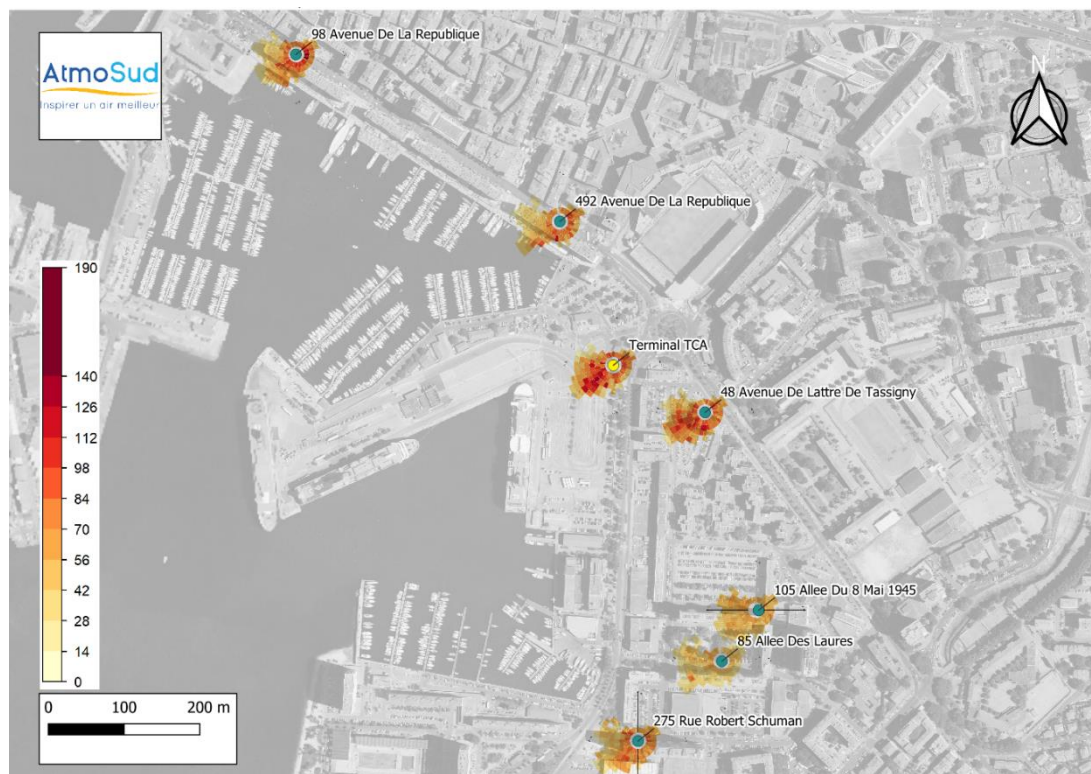


Figure 4.4.4: Carte des roses de pollution des maxima de concentrations en NO₂ enregistrés par la cabine TCA et les microcapteurs avant 13h (TU.).

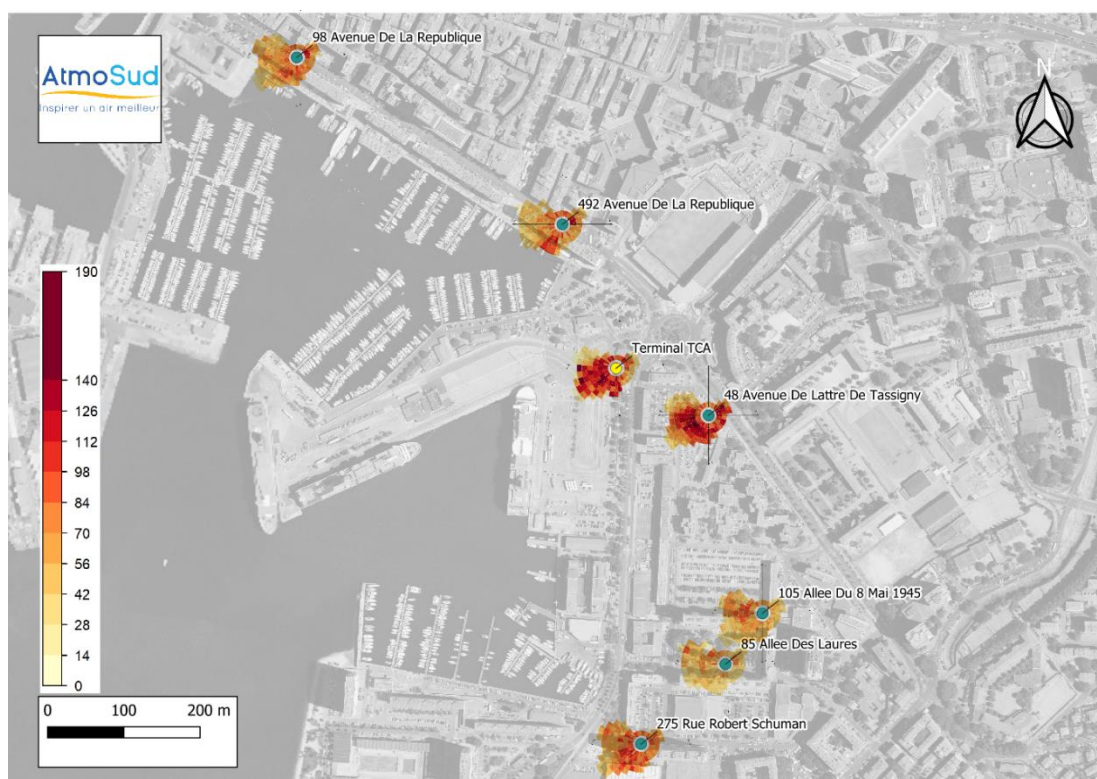


Figure 4.4.5: Carte des roses de pollution des maxima de concentrations en NO₂ enregistrés par la cabine TCA et les microcapteurs après 13h (TU).



Figure 4.4.6: Carte des roses de pollution normalisées des maxima de concentrations en NO enregistrés par la cabine TCA et les microcapteurs avant 13h (TU).



Figure 4.4.7: Carte des roses de pollution normalisées des maxima de concentrations en NO enregistrés par la cabine TCA et les microcapteurs après 13h (TU).

Les figures présentent les cartes des roses de pollution des maxima de concentration en NO, en distinguant de la même façon les données du matin et les données de l'après-midi. Ces roses de pollution sont normalisées de manière à s'affranchir des écarts moyens observés d'un microcapteur à l'autre, pour ne se concentrer que sur la variabilité des signaux enregistrés. Alors que le matin les maxima de concentration se trouvent être équirépartis autour des capteurs et en champ proche (apportés par des vents faibles), on constate qu'ils se décalent l'après-midi du côté du terminal ferry en champ lointain (apportés par des vents modérés à élevés), en particulier au niveau de la cabine, du 492 Av. de la République et des microcapteurs les plus au sud.

Concentrations en particules

La figure présente les moyennes journalières des concentrations en PM10 et PM2.5 mesurées par les microcapteurs (bleu), par la cabine Toulon TCA (rouge), par les stations Toulon Foch (gris) et Toulon Claret (vert). Ce même type de figures montrait, pour NO₂, une homogénéité des concentrations mesurées quel que soit l'emplacement considéré, et pour NO, des écarts entre mesures des microcapteurs et mesures de référence variant selon le microcapteur considéré. On observe ici un écart entre concentrations mesurées par les microcapteurs et concentrations de référence, comparable d'un microcapteur à l'autre. Cet écart est plus prononcé pour les PM2.5 que pour les PM10.

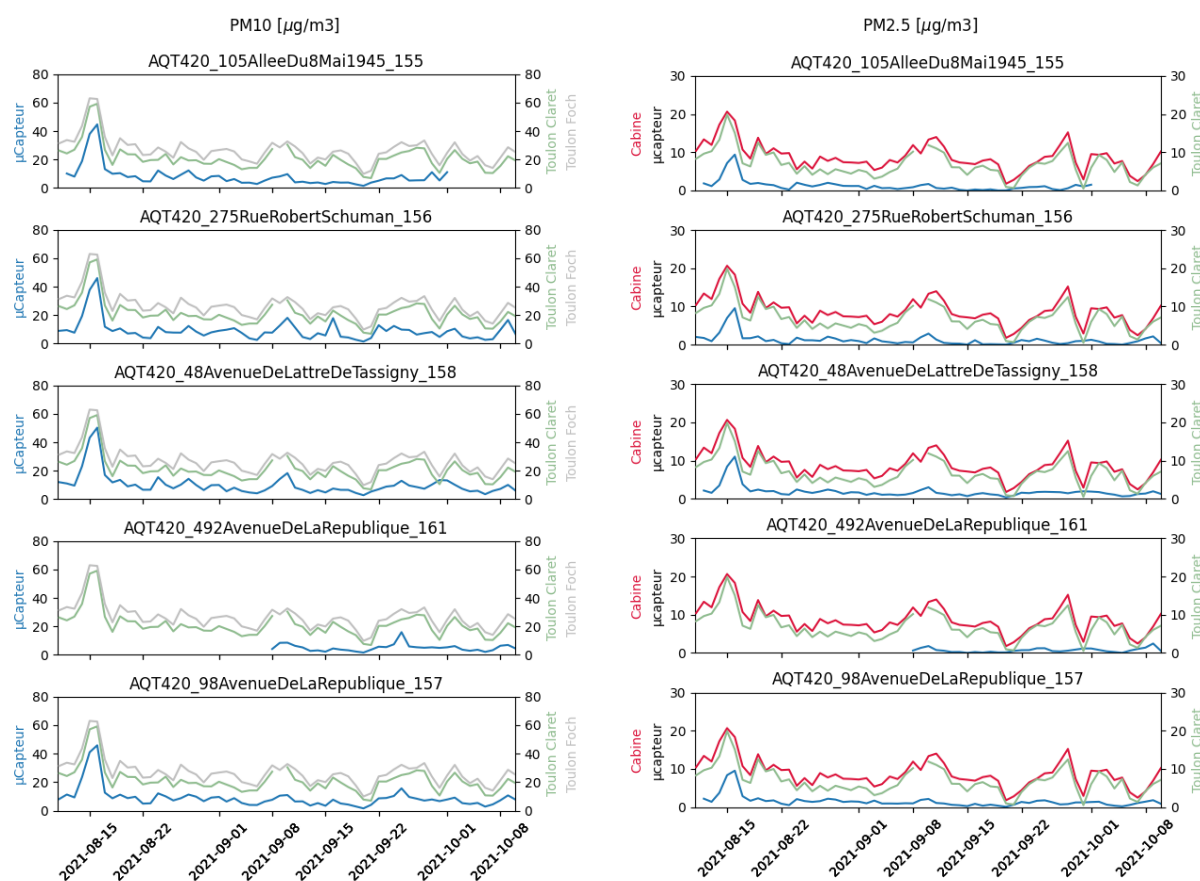


Figure 4.4.8: Profils de concentrations journalières en PM10 (gauche) et PM2.5 (droite). Les courbes bleu désignent les données des microcapteurs, les courbes rouges les données de la cabine, les courbes vertes et grises les données des stations Toulon Claret et Toulon Foch respectivement.

Afin d'analyser les concentrations en PM mesurées par les microcapteurs et d'incorporer dans cette analyse les concentrations de référence, une solution consiste à corriger l'écart moyen observable sur ces figures, cet écart étant essentiellement de nature métrologique. Celui-ci peut être estimé en calculant la différence moyenne entre concentration mesurée par le microcapteur et concentration mesurée par la référence sur une fenêtre glissante. En ajoutant cette différence, variant au cours du temps, à la concentration mesurée par le microcapteur, on obtient un profil de concentration dont la valeur moyenne est identique à celle de la référence, mais dont la variabilité reste celle du microcapteur. La figure présente les concentrations en PM10 et PM2.5 réhaussées (courbes oranges) en calculant l'écart moyen entre la concentration brute telle que mesurée par le microcapteur (courbe bleue) et la concentration mesurée par la référence (courbe verte) sur une fenêtre glissante de 4 jours. La longueur de la fenêtre glissante détermine la finesse temporelle de la correction. Plus cette fenêtre est longue, plus la correction se rapproche d'un offset constant. Plus elle est courte, plus la courbe des concentrations réhaussées tend vers la courbe de la référence.

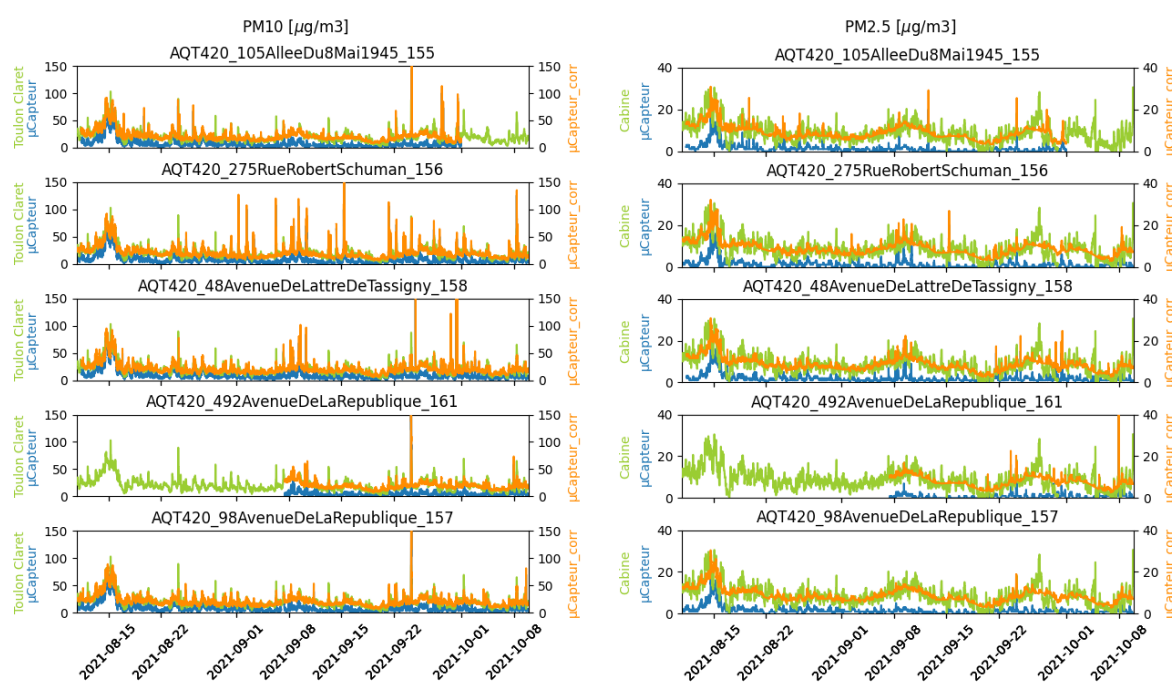


Figure 4.4.9: Comparaison entre concentrations brutes mesurées par les microcapteurs (lignes bleues), concentrations mesurées par la référence (lignes vertes) et concentrations mesurées par les microcapteurs réhaussées au niveau de la référence (lignes oranges), pour les PM10 et PM2.5.

Il est important de préciser que le calcul de cet écart moyen ne peut pas systématiquement être assimilé à une correction. Ceci reviendrait à considérer que tous les microcapteurs ont un niveau d'exposition moyen comparable à celui de la référence. Si la pollution aux particules est homogène à l'échelle d'un quartier, il peut tout de même exister des différences en particulier dans la direction verticale. Dans cet exemple, les microcapteurs sont installés à des altitudes très différentes ; on ne peut pas faire l'hypothèse que les niveaux d'exposition moyens de la station (3m de hauteur) et du microcapteur le plus haut (14^{ème} étage) sont comparables. A l'inverse, pour un jeu de microcapteurs situés dans un environnement proche et à une altitude comparable, cette méthode pourrait être assimilée à une correction de l'écart métrologique.

Dans le cas présent, le calcul de l'écart moyen entre microcapteurs et cabine permet d'harmoniser les niveaux des concentrations enregistrées, de façon à pouvoir représenter les roses de pollution de la cabine et des microcapteurs sur une même carte, sans chercher à les comparer en valeur absolue, et à se concentrer sur l'origine spatiale des pics de concentration détectés. Les roses de pollution représentées en figure montrent ainsi que les maxima des concentrations en PM2.5 sont équirépartis

autour de la cabine et des microcapteurs le matin. Les roses de pollution présentées en figure indiquent que les maxima de concentration se décalent en direction du Sud-Ouest, et sont apportées par des vents plus forts l'après-midi. Ces observations sont en accord avec celles effectuées sur les données des NO_x .



Figure 4.4.10: Carte des roses de pollution harmonisées des maxima de concentrations en $\text{PM}_{2.5}$ enregistrés par la cabine TCA et les microcapteurs avant 13h (TU).

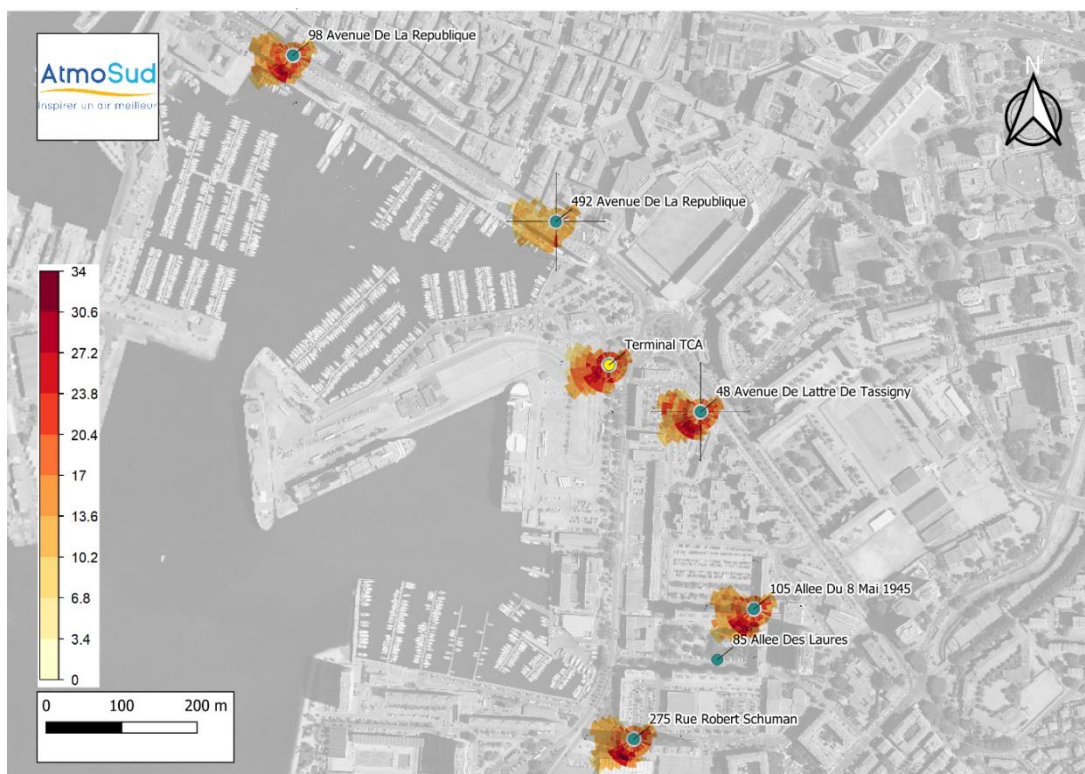


Figure 4.4.11: Carte des roses de pollution harmonisées des maxima de concentrations en PM_{2.5} enregistrés par la cabine TCA et les microcapteurs après 13h (TU).

Données météo

Outre des données de concentration, les cabines mobiles de Toulon TCA et Brégaillon ont permis de recueillir des données météo, notamment des données de vitesse et direction des vents. Les roses des vents calculées à partir de ces données et de celles enregistrées par la station Météo-France située à Saint Mandrier sont visibles en figure.

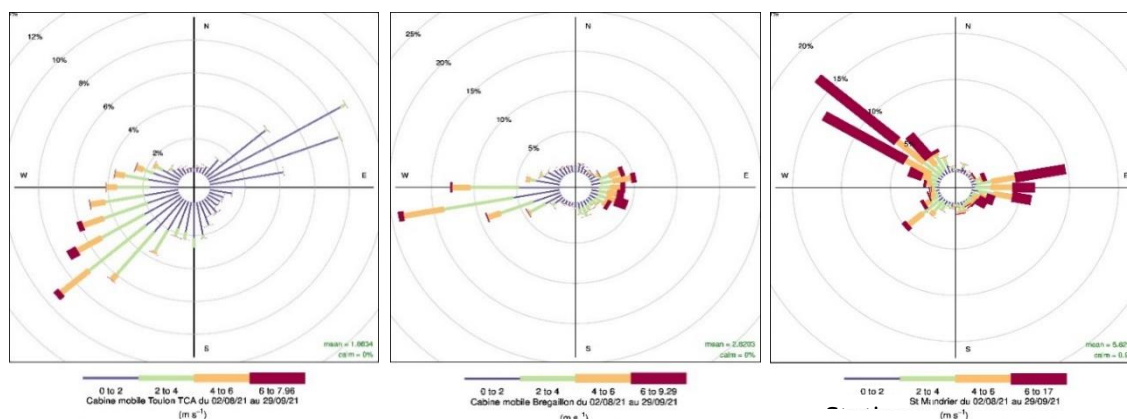


Figure 4.4.12: Fréquence de comptage des vitesses et directions des vents en pourcentage.

Au niveau de la cabine Toulon TCA, on distingue principalement deux régimes de vent, un premier régime de secteur Nord-Est, caractérisé par des vitesses faibles, qui amène les polluants en provenance de la ville, tandis qu'un second régime, de secteur Sud-Ouest, amène les polluants en provenance des navires, avec une puissance moyenne à élevée. A Brégaillon, les vents soufflent principalement en provenance

de l'Ouest, c'est-à-dire de la ville. A Saint Mandrier, on enregistre des vents de vitesse élevée, en provenance du large et de la rade de Toulon, de secteur Est et Nord-Ouest respectivement.

Dati di traffico navale

Le port de Toulon accueille principalement des ferries transportant des passagers tandis que le port de

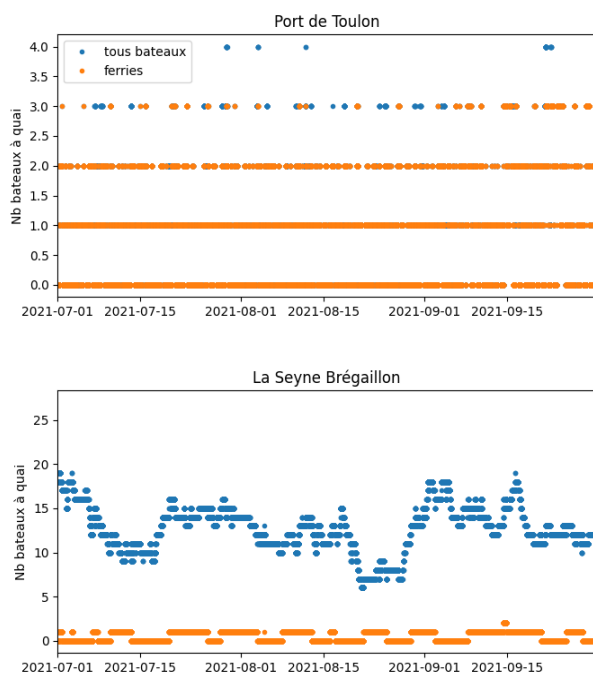


Figure 4.4.13: Nombre total de navires à quai (bleu) incluant les ferries à quai (orange) dans les ports de Toulon et la Seyne-Brégaillon entre le 01/07/21 et le 30/09/21. La résolution temporelle du comptage des navires est de 5 minutes..

la Seyne-Brégaillon accueille principalement le transport de marchandises. Un relevé précis du trafic des navires a été fourni par la capitainerie des ports.

La figure présente le comptage des navires à quai par tranche de 5 minutes effectué pour chacun des deux ports, en distinguant les ferries du nombre total de navires. La figure présente le nombre de passages par jour des navires entrant ou quittant la rade de Toulon-La Seyne-Brégaillon. On observe que le nombre de navires à quai est beaucoup plus important à la Seyne Brégaillon qu'à Toulon, cependant ce sont essentiellement des mouvements de ferries que l'on enregistre au niveau de Saint Mandrier. D'après ces graphes, les navires restent plus longtemps en stationnement à la Seyne Brégaillon, tandis que le ballet des ferries est très actif à Toulon proprement dit. Sur les 714 escales enregistrées entre le 01/08/21 et le 30/09/21, 86% sont des escales de ferries qui, pour 97%, se font à Toulon. C'est donc essentiellement sur le port de Toulon que va se concentrer notre analyse.

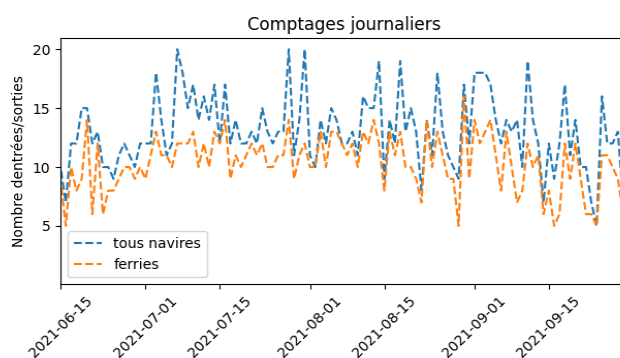


Figure 4.4.14 : A Saint Mandrier, nombre de passages par jour des navires entrant ou sortant de la rade (bleu), incluant les ferries (orange).

4.5 CORSE

Stations météo

De manière générale, les stations météo (température, humidité, vitesse et direction du vent) se doivent d'être positionnées à des endroits stratégiques dégagés afin d'être le moins possible parasitées par des éléments locaux (mur, effet venturi entre deux bâtiments, réflexion thermique d'un toit, etc.).

Les données météo étaient au préalable issues des instruments sur les stations fixes. Les informations de vitesse (VV) et de direction du vent (DV) étaient notamment impactées par le paysage urbain bloquant certains axes venteux, et le nombre insuffisant de mesures ne permettait pas d'avoir une représentativité assez précise.

A titre d'exemple, la station de Canetto sur la période estivale 2021 a été influencée par un vent principalement Nord-Est, pouvant aussi s'expliquer par la présence de bâtiments bloquant tout vent de Sud et d'Ouest.

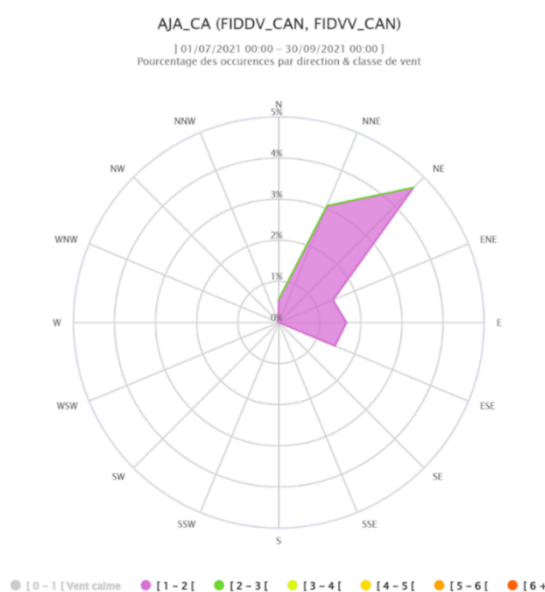
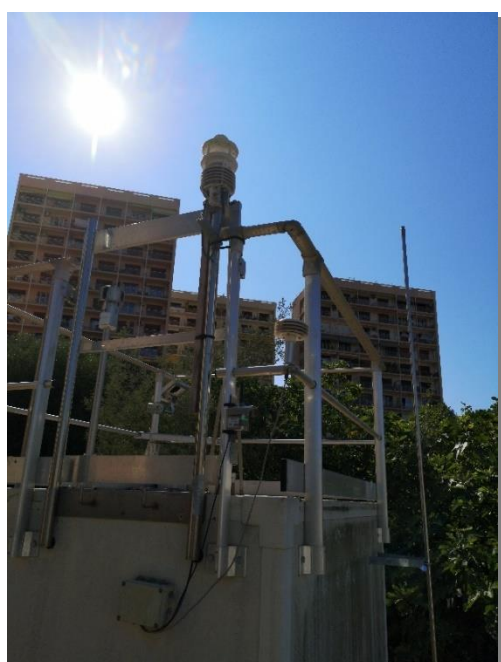


Figure 4.5.1: Station Météo sur Canetto, présence de bâtiments à l'ouest. Rose des vents sur Canetto - Période Estivale 2021.

Face à ce constat, il a été décidé de rajouter deux stations météo supplémentaires par ville, placées au et plus proche du port, de manière à obtenir une définition plus précise de la dispersion possible des panaches des navires.

Les données recueillies sur cette même période montrent une répartition nettement différente des profils éoliens à proximité des ports:

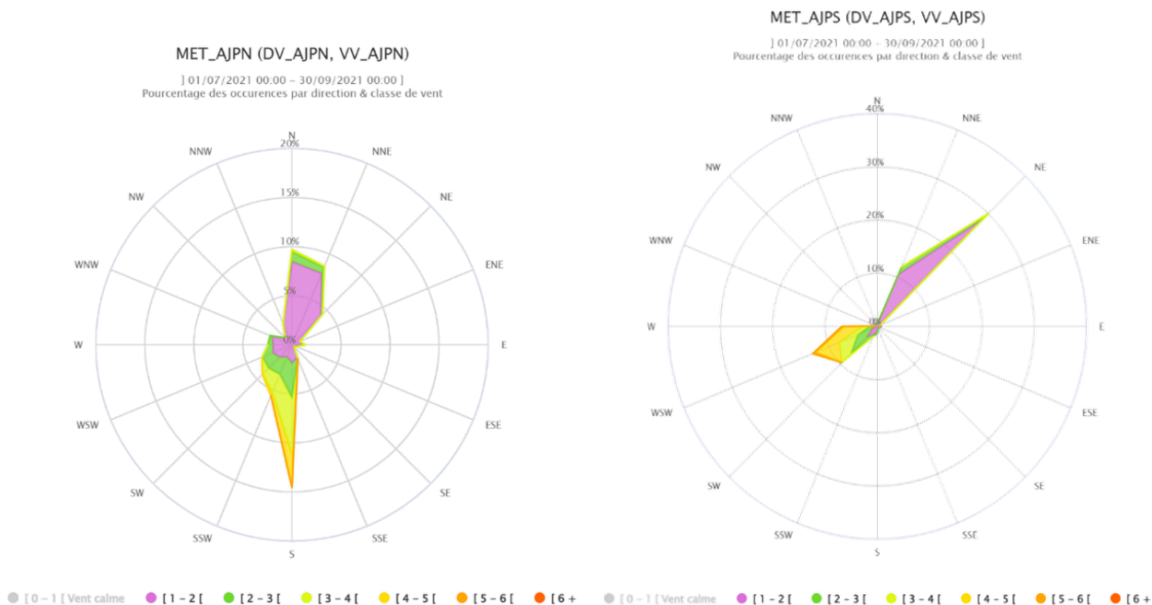


Figure 4.5.2: R Rose des vents sur Ajaccio (Port Nord - Local des Accès et Port Sud - Capitainerie Sud) – Période estivale 2021.

On peut observer une tendance assez prononcée d'une composante Nord / Sud du vent sur la station météo « Port Nord », située au plus proche des navires en stationnement, et donc caractéristique de la potentielle dispersion des panaches de navires. La station plus au sud «Port Sud» tend à montrer une composante légèrement plus prononcée Sud-Ouest / Nord-Est, montrant alors que le vent s'enroule en entrée de Golfe d'Ajaccio, suivant un régime de brise de terre/mer avec le relief au nord.



Figure 4.5.3: Rose des vents sur Ajaccio – Taille arbitraire.



Figure 4.5.4: Panache d'un navire sur Ajaccio suivant la composante de vent principale Nord / Sud.

Sur Bastia, le régime principal de vent s'oriente dans un axe Est/Ouest, passant par le port. Cela est principalement dû au relief local et notamment de la brise de mer, phénomène apparaissant le jour lorsque la terre absorbe plus rapidement que la mer la chaleur émise par le soleil, réchauffant l'air au-dessus qui s'élève alors par convection, créant une zone de basse pression au niveau des terres, entraînant la création d'un vent venant de la mer. A l'inverse, la nuit, le phénomène s'inverse car la terre se refroidit plus vite que l'eau et c'est une brise de terre qui se crée.



Figure 4.5.5: Rose des vents Bastia – Taille arbitraire.

En récupérant les roses des vents entre 6h et 18h TU, puis entre 18h et 6h TU sur toute la période estivale 2021, on peut faire apparaître ces brises de mer et de terre:

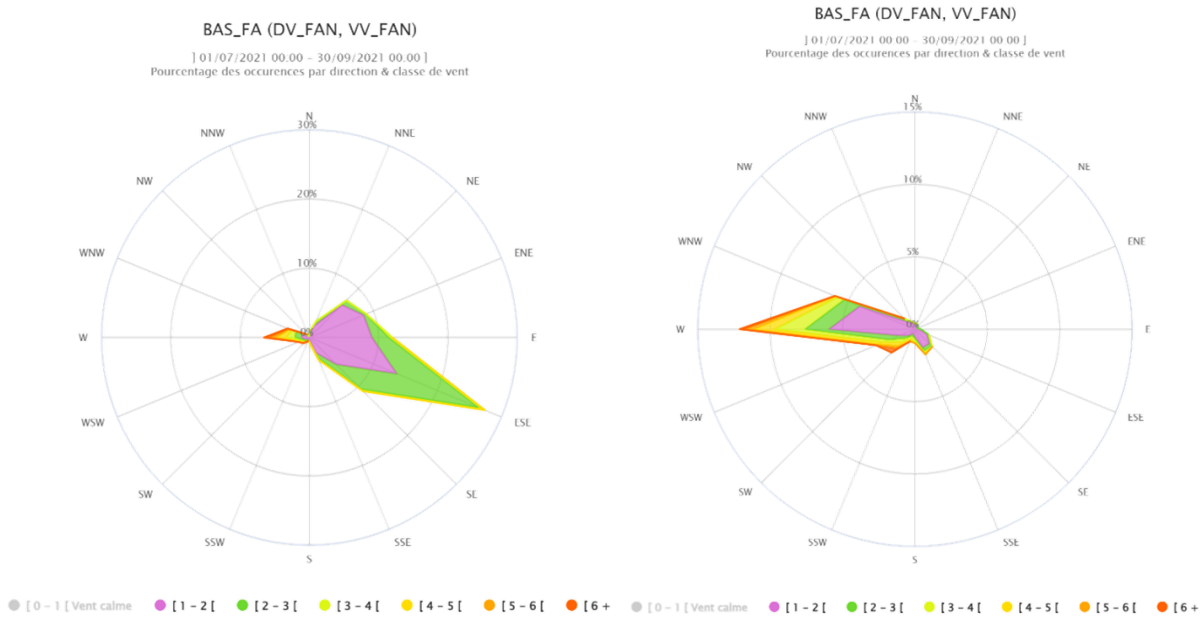


Figure 4.5.6: Rose des vents la journée. Rose des vents la nuit. Station du Fango.

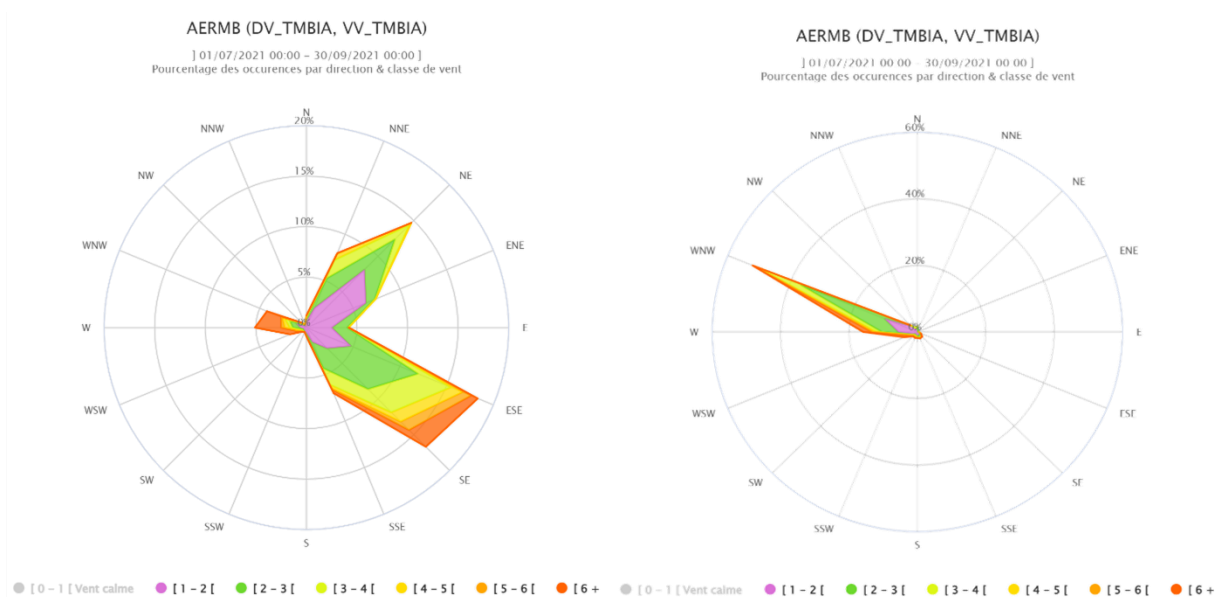


Figure 4.5.7: Rose des vents la journée. Rose des vents la nuit. Toit Mairie Bastia.

A noter que les navires restent généralement à quai la journée, la brise de mer pourrait avoir une incidence notable sur l'impact de la dispersion des panaches de navires.

Données maritimes

Pour compléter les mesures de concentration ainsi que celles météo, il faut les associer aux données maritimes, notamment celles concernant les horaires des escales ainsi que le type de navire accostant. Avec le soutien de la CCI, nous avons pu établir la liste des ferries présents sur les ports d'Ajaccio et Bastia avec une résolution de 5 minutes. Ces informations sont particulièrement importantes quand il s'agit d'identifier des potentielles sources de pollution lors de pics sur certaines stations, ainsi qu'établir les possibilités de raccordement électrique à quai en fonction des durées des escales qui concerneront en priorité les ferries pour des raisons techniques et logistiques.

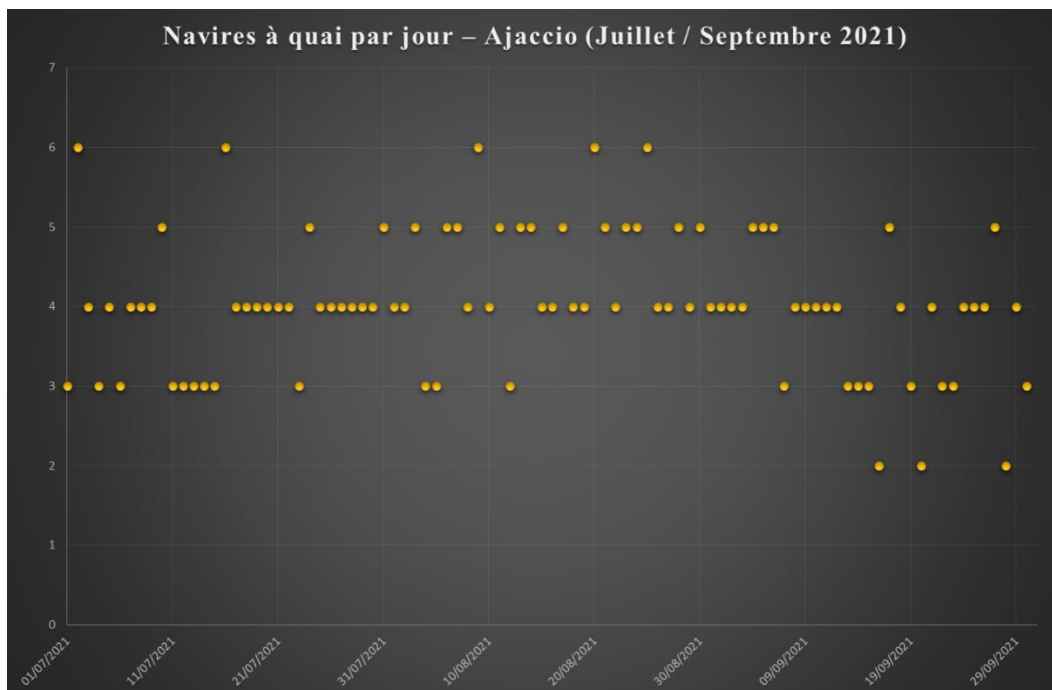


Figure 4.5.8: Navires à quai sur Ajaccio – Été 2021 – Données CCI – Pas de temps horaire.

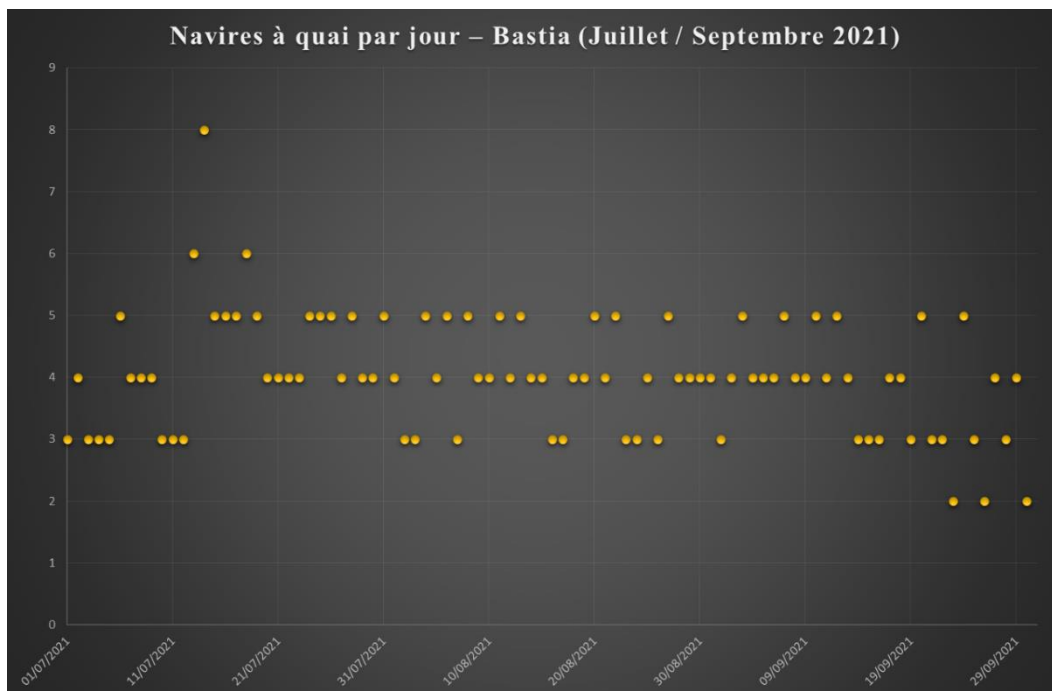


Figure 4.5.9: Navires à quai sur Bastia – Été 2021 – Données CCI2B – Pas de temps horaire.

Lors des calculs des impacts, le type de navire sera pris en compte. Les émissions dépendent du carburant, de la taille du navire, de la durée de l'escale, etc.

Paramètres surveillés

Les paramètres surveillés sont les polluants soumis à la réglementation française et faisant l'objet de recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Seuls les dépassements des moyennes horaires et journalières sont étudiés.

Afin de réaliser les comparaisons, seules les données des stations fixes et mobiles seront prises en compte pour cette analyse, les mesures des micro-capteurs n'étant pas suffisamment fiables pour les exploiter telles quelles. Sur toute la période estivale, les mesures suivantes ont été récupérées.

Tableau 4.5.1: Valeurs des polluants principaux sur Ajaccio – Période estivale 2021.

AJACCIO					
Période	Substance	Paramètre	Canetto	Abbatucci	Sampiero
Du 01/07/21 au 30/09/21	NO ₂	Concentration moyenne totale (µg/m ³)	12	29.7	-
		Concentration maximale horaire (µg/m ³)	93.6	342	-
		Moyenne concentration maximale horaire (µg/m ³)	46.7	99.1	-
		Concentration maximale journalière (µg/m ³)	32.9	58.7	-
	PM2.5	Concentration moyenne totale (µg/m ³)	9.7	11.7	10.5
		Concentration maximale horaire (µg/m ³)	114.6	117.3	107.9
		Moyenne concentration maximale horaire (µg/m ³)	15.6	37.7	18.1
		Concentration maximale journalière (µg/m ³)	37.5	38.9	36.3
	SO ₂	Concentration moyenne totale (µg/m ³)	1.8	0.5	-
		Concentration maximale horaire (µg/m ³)	22	13.4	-
		Moyenne concentration maximale horaire (µg/m ³)	5.6	2.4	-
		Concentration maximale journalière (µg/m ³)	4.28	1.35	-

On peut notifier certains dépassements très fréquents pour la station Abbatucci, imputés principalement aux travaux réalisés à proximité. Les valeurs de certaines maximales sur les PM peuvent être expliquées par les épisodes de pollution Saharienne et ne sont pas liées au trafic maritime ou routier. Ces données seront disponibles en détail sur la plate-forme MONICA, et détaillés dans l'Annexe 3 – QualitairCorse de ce rapport.

Tableau 4.5.2: Valeurs des principaux polluants sur Bastia – Période estivale 2021.

BASTIA							
Période	Substance	Parametro	Fango	Giraud	ODT	Toit Mairie	Pylône 3
Du 01/07/21 au 30/09/21	NO ₂	Concentration moyenne totale (µg/m ³)	13.9	8.6	38.1	-	-
		Concentration maximale horaire (µg/m ³)	157.1	159	407,1	-	-
		Moyenne concentration maximale horaire (µg/m ³)	56.6	40.8	122.7	-	-
		Concentration maximale journalière (µg/m ³)	38.2	25.6	56.9	-	-

PM2.5	Concentration moyenne totale ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	-	8.3	9.0	8.9	8.0
	Concentration maximale horaire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	-	68	66.8	71	30.2
	Moyenne concentration maximale horaire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	-	13.4	16.0	15.7	12.4
	Concentration maximale journalière ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	-	22.8	23.7	25.1	17.1
SO₂	Concentration moyenne totale ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.9	0.5	-	-	3.1
	Concentration maximale horaire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24.3	56.6	-	-	37.3
	Moyenne concentration maximale horaire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	4.5	3.7	-	-	9.1
	Concentration maximale journalière ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2.2	2.4	-	-	8.3

Per alcune specie, l'OMS ha definito dal 2021 una nuova linea guida che corrisponde a un valore target al di sotto del quale gli effetti dell'inquinamento atmosferico sulla salute sono considerati ammissibili. Può essere definita sia come media oraria che come media giornaliera.

Tableau 4.5.3: Lignes directrices définies par l'OMS pour les polluants principaux – OMS.

Polluant	Durée retenue pour le calcul des moyennes	Seuil de référence ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
PM2.5	Année	5
	24h	15
NO₂	Année	10
	24h	25
	1h	200
SO₂	24h	40
	10 min	500

NO₂

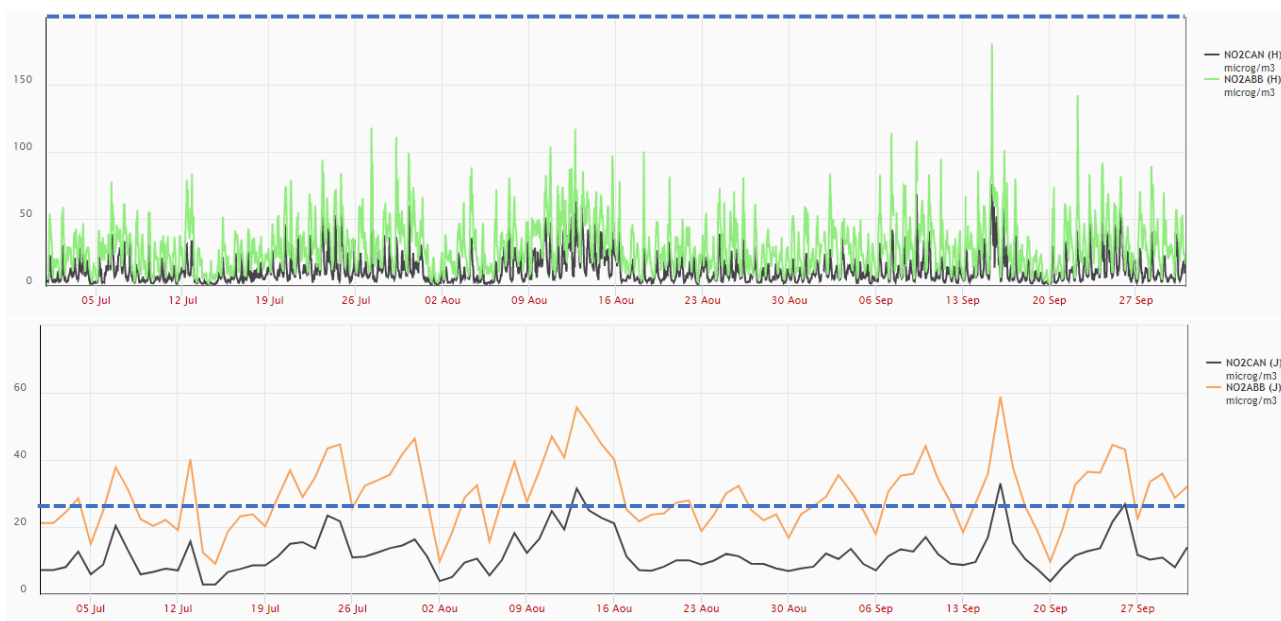


Figure 4.5.10: Valeurs NO₂ (Moyenne horaire et journalière) sur Ajaccio avec ligne directrice OMS – 2021.

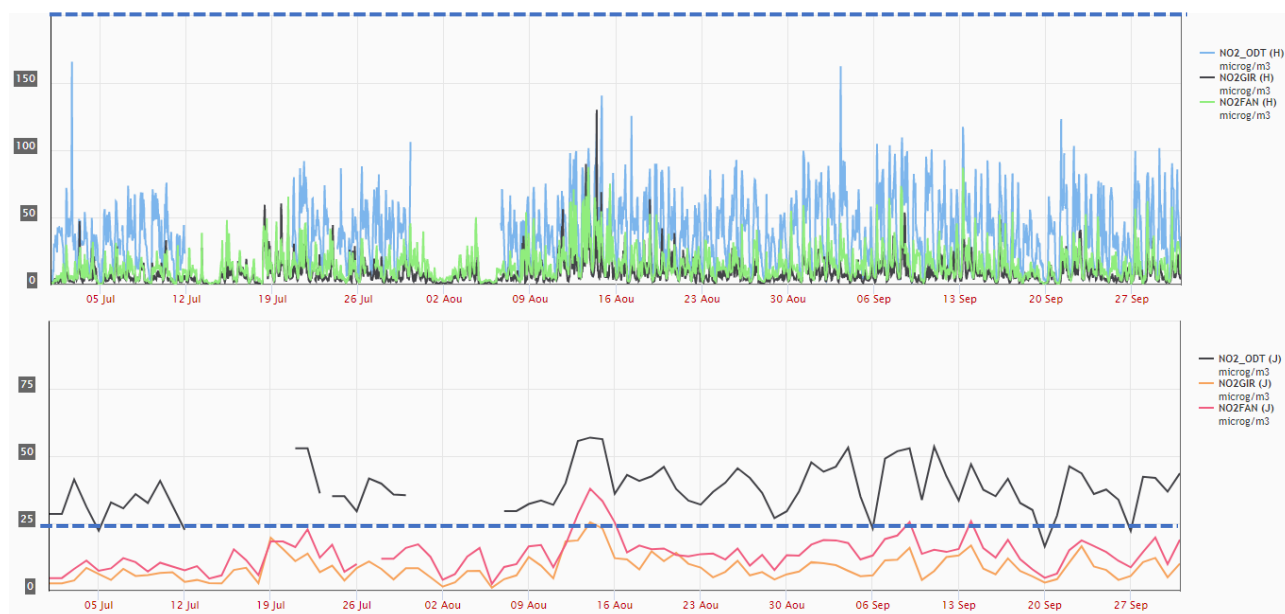


Figure 4.5.11: Valeurs NO₂ (Moyenne horaire et journalière) sur Bastia avec ligne directrice OMS – 2021.

Plusieurs dépassements journaliers sont à noter en 2021, dus à la caractéristique « trafic » de certaines stations (dont ABB- Abbatucci et ODT – Office du Tourisme).

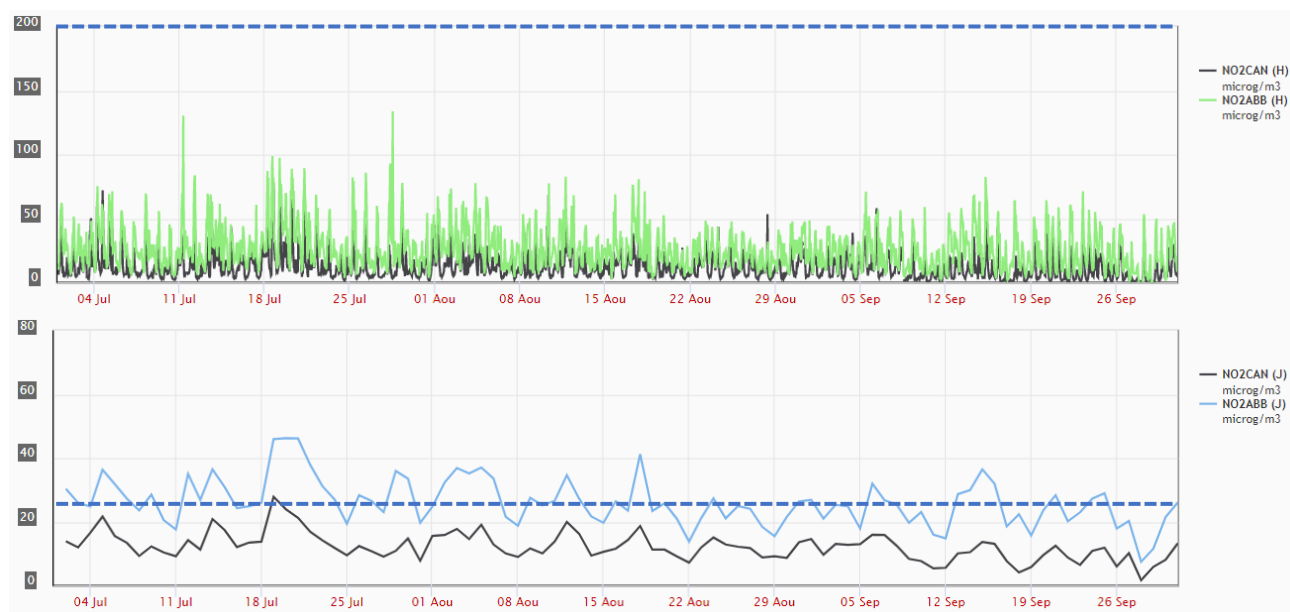


Figure 4.5.12: Valeurs NO₂ (Moyenne horaire et journalière) sur Ajaccio avec ligne directrice OMS – 2022.

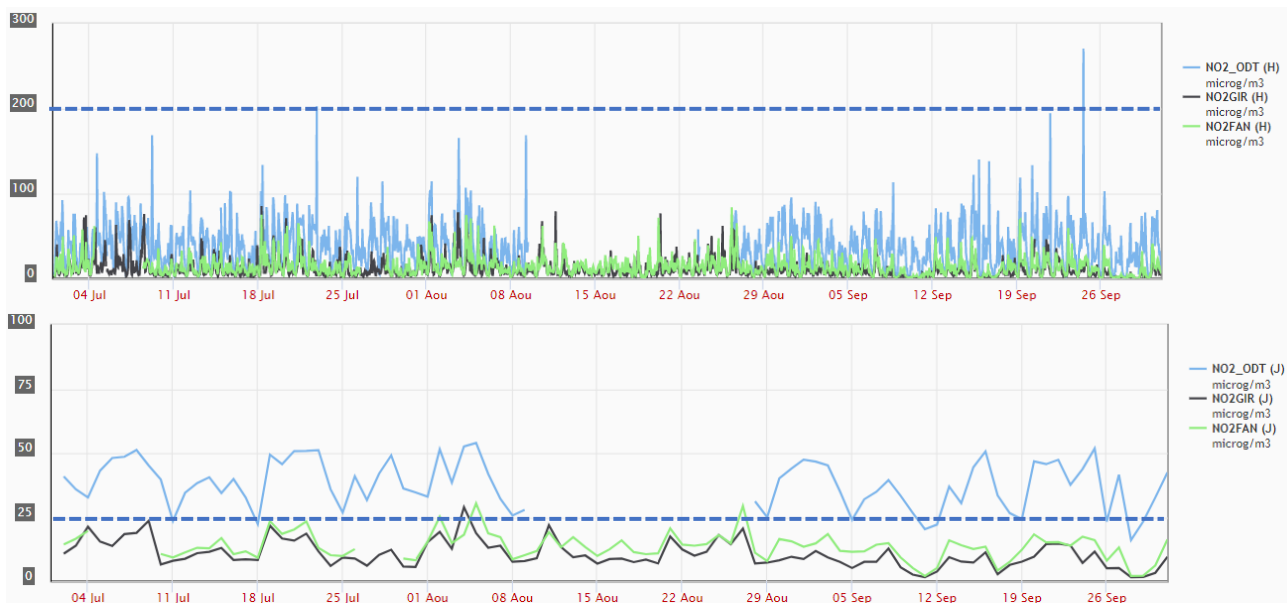


Figure 4.5.13: Valeurs NO₂ (Moyenne horaire et journalière) sur Bastia avec ligne directrice OMS – 2022.

Le constat se retrouve en 2022 pour les stations trafic, de manière plus ou moins soutenue. L'étude cherchera à identifier les différentes sources de pollution, et principalement celles issues du maritime en se basant sur les stations urbaines, moins impactées par le trafic routier.

SO₂

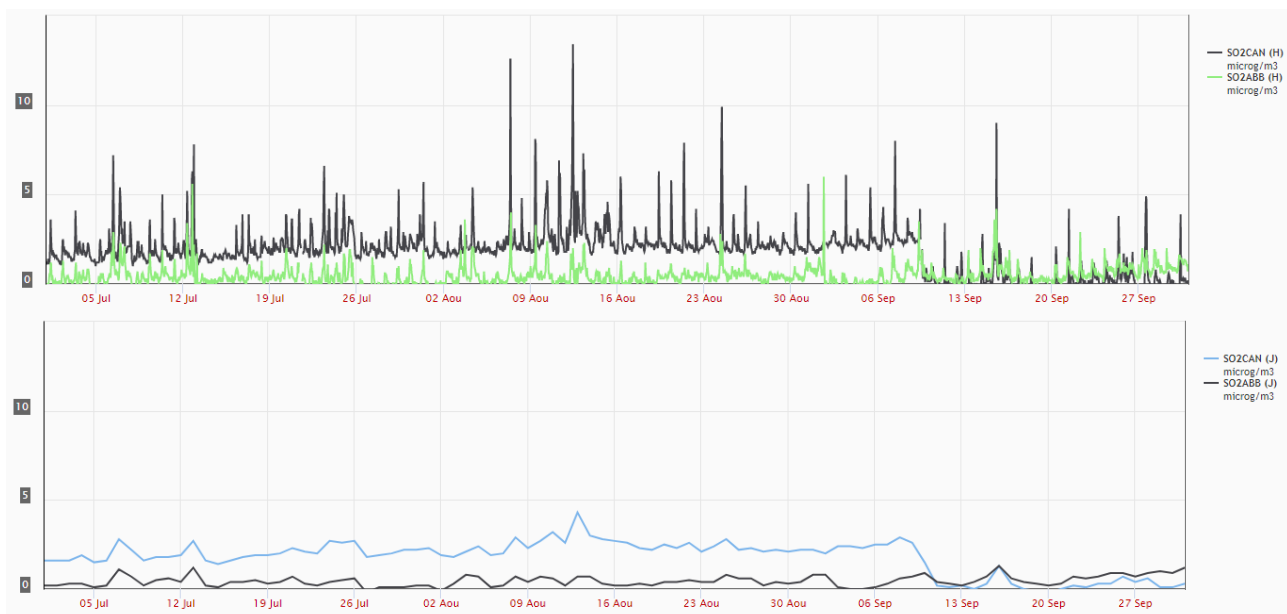


Figure 4.5.14: Valeurs SO₂ (Moyenne horaire et journalière) sur Ajaccio, en dessous des lignes directrices OMS – 2021.

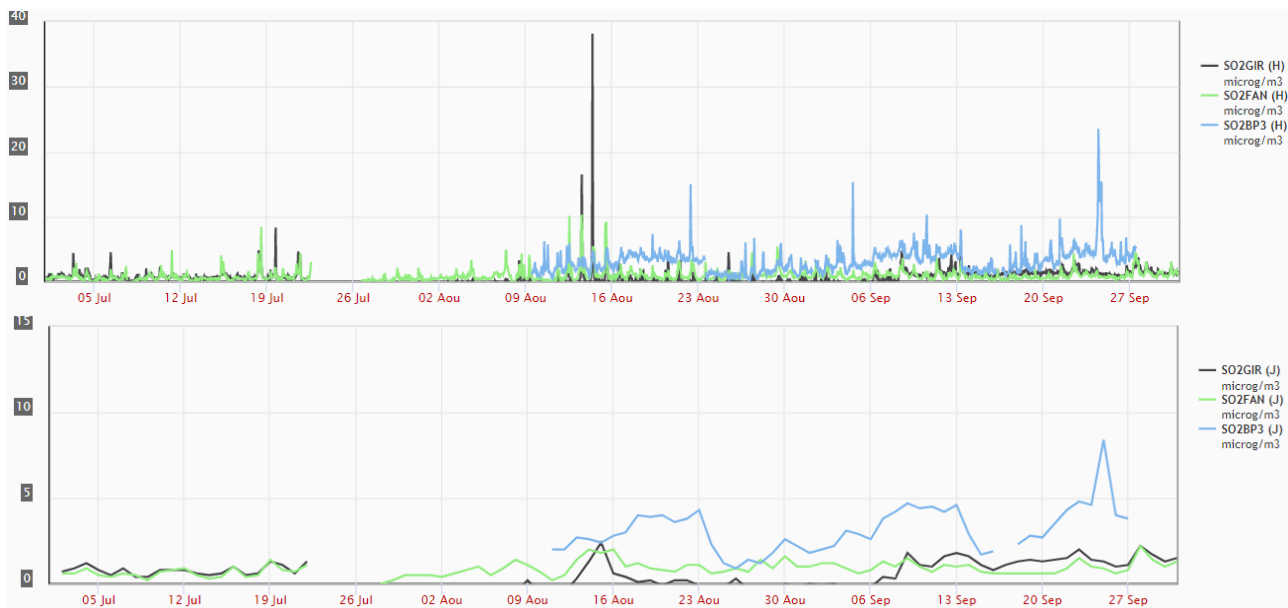


Figure 4.5.15: Valeurs SO_2 (Moyenne horaire et journalière) sur Bastia, en dessous des lignes directrices OMS – 2021.

Aucun dépassement n'est à noter en 2021 concernant le SO_2 , l'étude devra se concentrer sur les pics identifiés comme ceux venant du maritime (corrélation présence de navires et direction du vent). Sur Bastia, certaines stations enregistrent en revanche des pics relativement importants par rapport au «bruit de fond». Cela est perçu comme un marqueur de pollution maritime ponctuel.

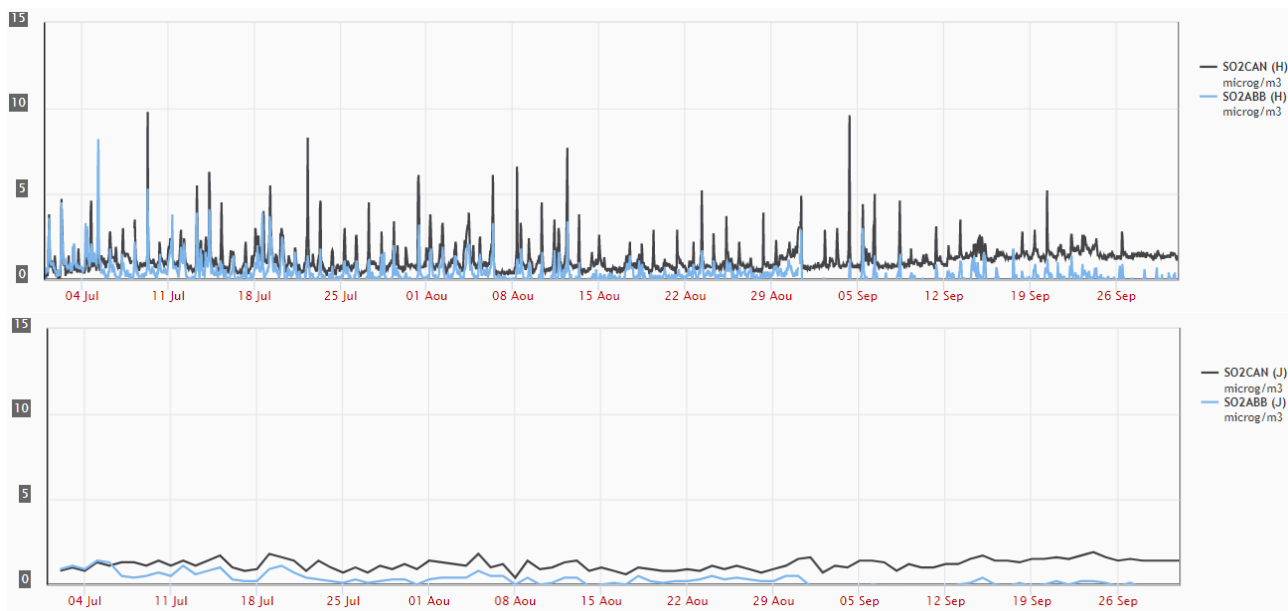


Figure 4.5.16: Valeurs SO_2 (Moyenne horaire et journalière) sur Ajaccio, en dessous des lignes directrices OMS – 2022.

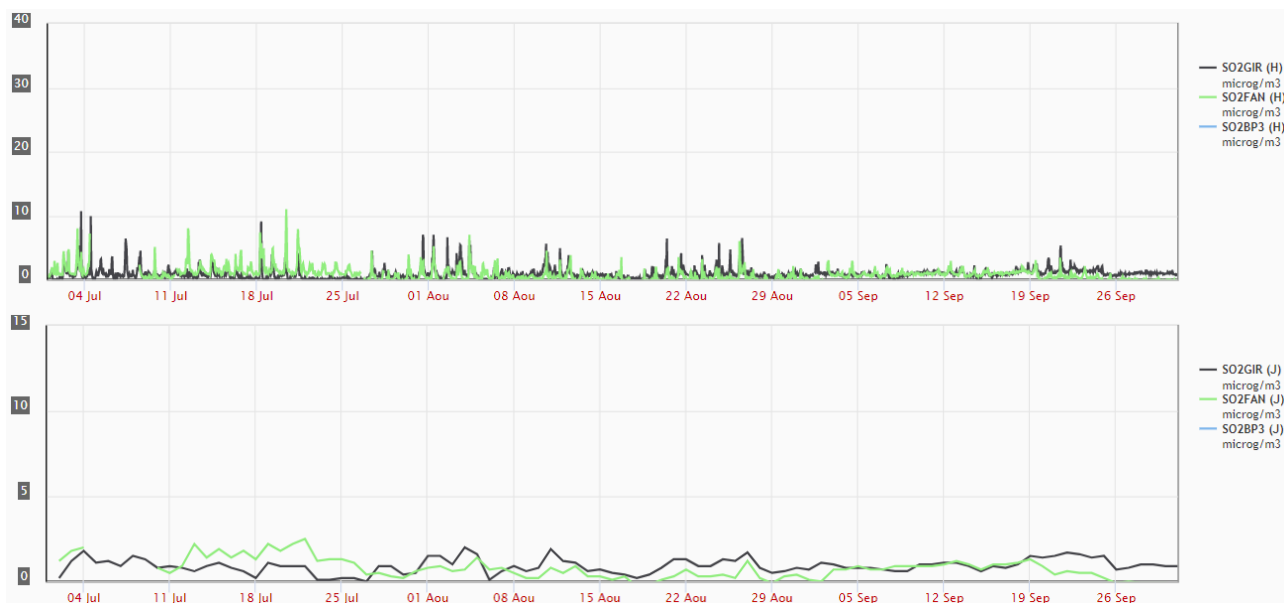


Figure 4.5.17: Valeurs SO₂ (Moyenne horaire et journalière) sur Bastia, en dessous des lignes directrices OMS – 2022.

On peut observer des pics remarquables également en 2022. La station SO₂ BP3 n'étant plus installée, aucune donnée est disponible pour cet emplacement proche du port qui a pu montrer des résultats assez intéressants en 2021.

PM_{2.5}

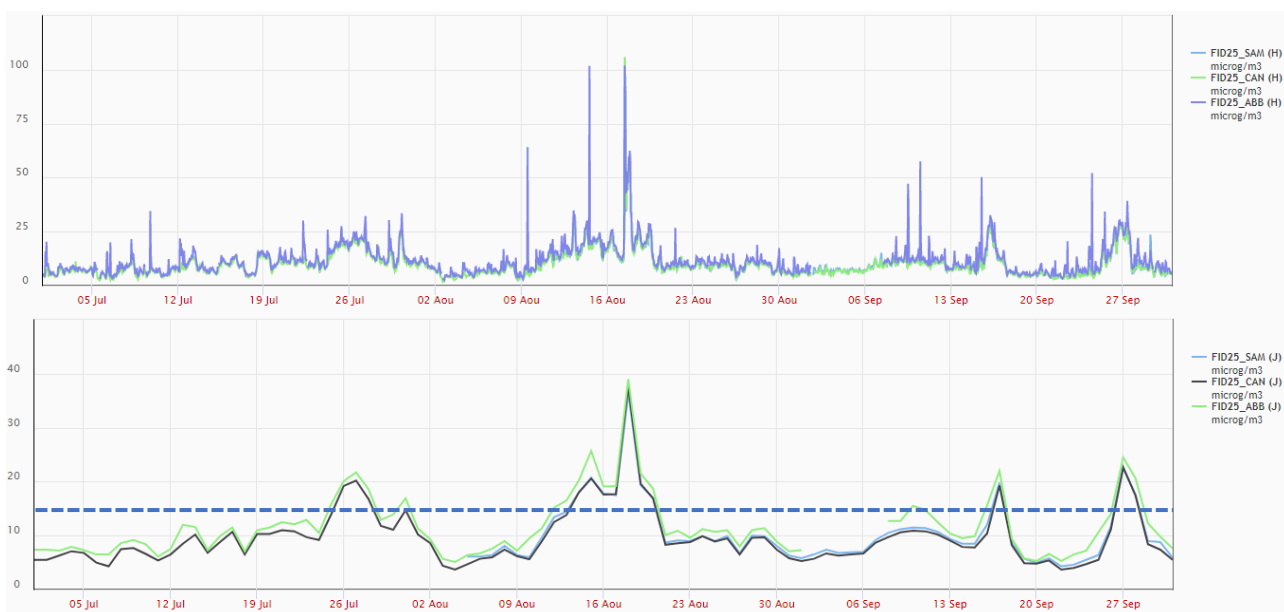


Figure 4.5.18: Valeurs PM_{2.5} (Moyenne horaire et journalière) sur Ajaccio avec ligne directrice OMS – 2021.

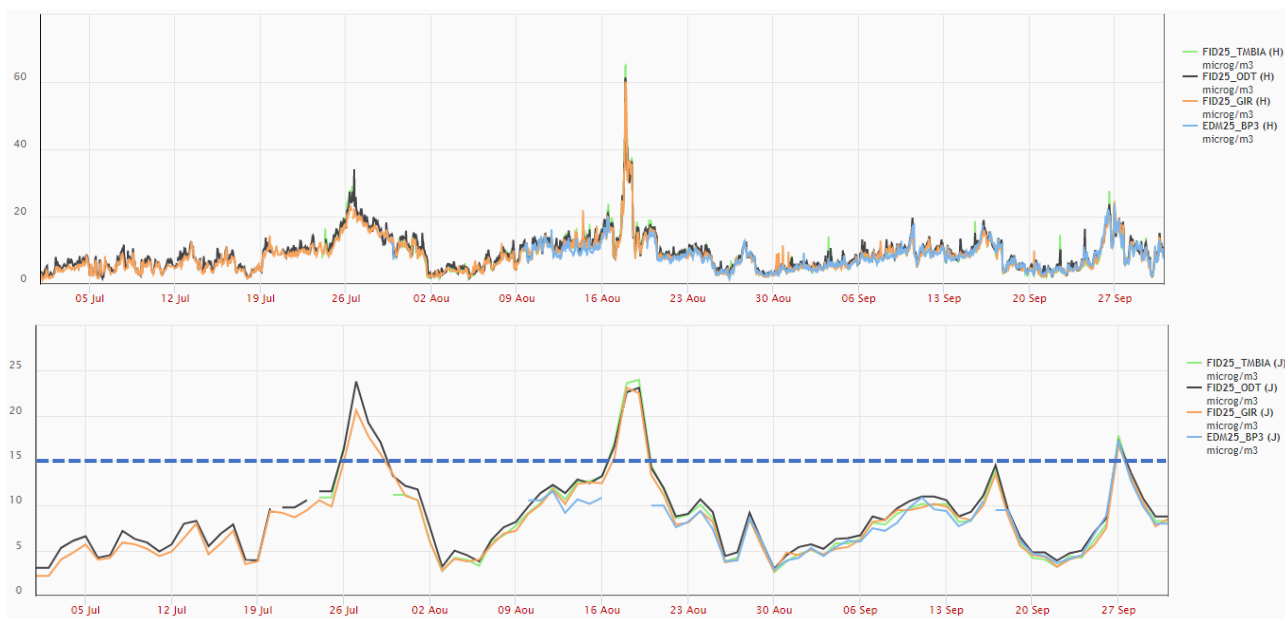


Figure 4.5.19: Valeurs $PM_{2.5}$ (Moyenne horaire et journalière) sur Bastia avec ligne directrice OMS – 2021.

Les dépassements observés sur les moyennes horaires (fin juillet et mi-août) correspondent à des épisodes pollution provenant du Sahara et des incendies du Var en 2021. Les autres pics moins prononcés sont également issus d'épisodes de pollution moins forts mais de même origine.

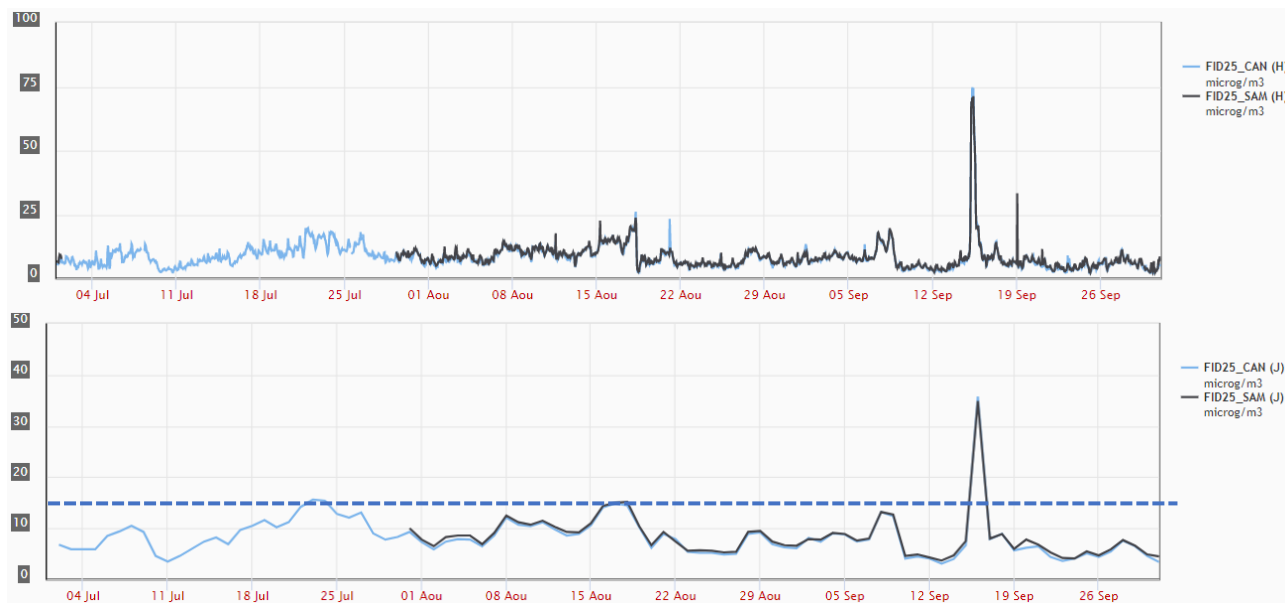


Figure 4.5.20: Valeurs $PM_{2.5}$ (Moyenne horaire et journalière) sur Ajaccio avec ligne directrice OMS – 2022.

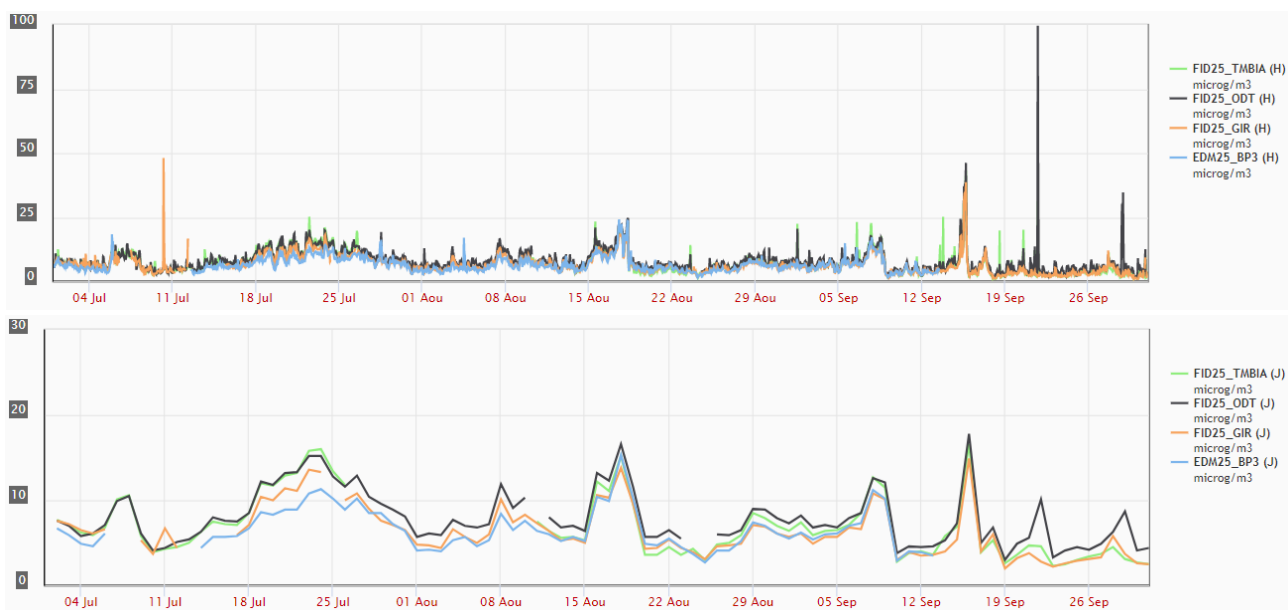


Figure 4.5.21: Valeurs PM2.5 (Moyenne horaire et journalière) sur Bastia avec ligne directrice OMS – 2022.

Des épisodes de pollution se retrouvent également dans les mesures ci-dessus (mi-septembre notamment).

Analisi delle misurazioni CPT

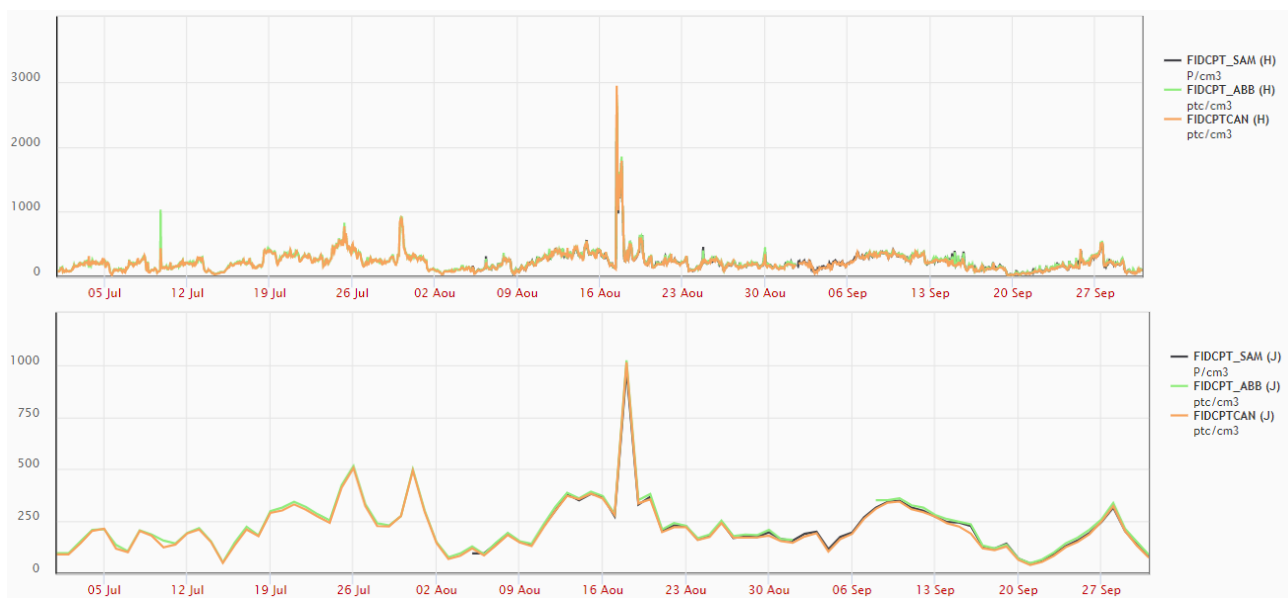


Figure 4.5.22: Valeurs CPT (Moyenne horaire et journalière) sur Ajaccio – 2021.

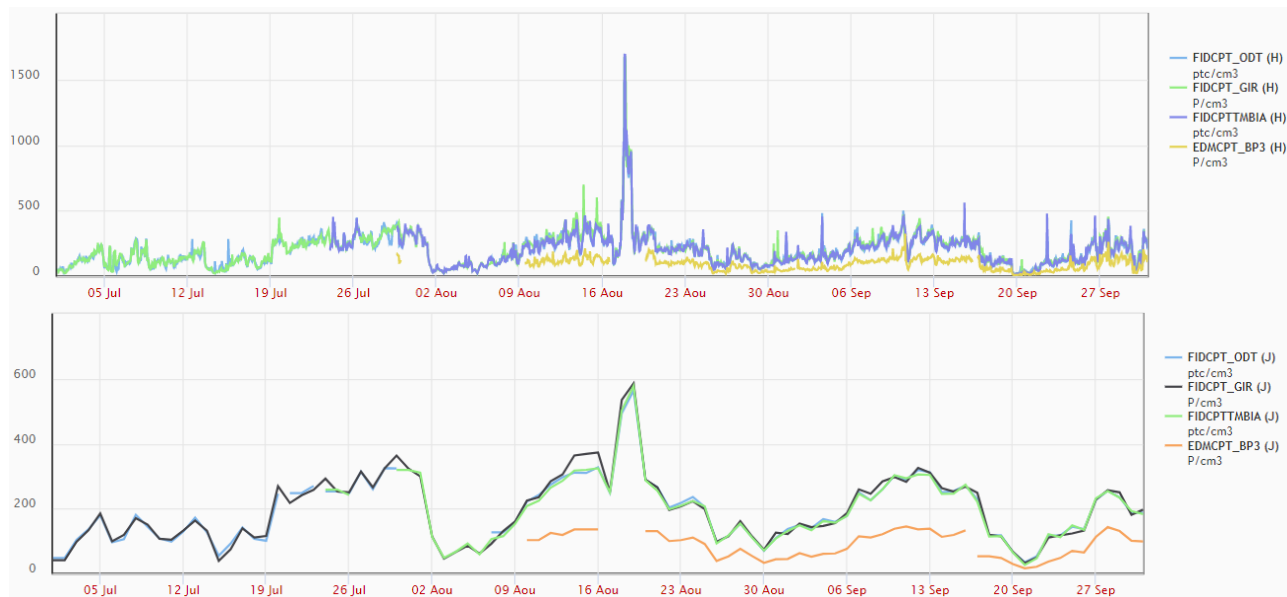


Figure 4.5.23: Valeurs CPT (Moyenne horaire et journalière) sur Bastia – 2021.

Un paramètre important à surveiller concerne le comptage de particules qui permet d'approfondir les connaissances, notamment lorsqu'il s'agit de suivre les particules ultra fines. Aucune norme n'est pour l'instant définie étant donné l'ajout récent de cette méthode analytique. Les mêmes épisodes de pollution généralisée sur la Corse sont identifiables sur ces courbes.



Figure 4.5.24: Valeurs CPT (Moyenne horaire et journalière) sur Ajaccio – 2022.

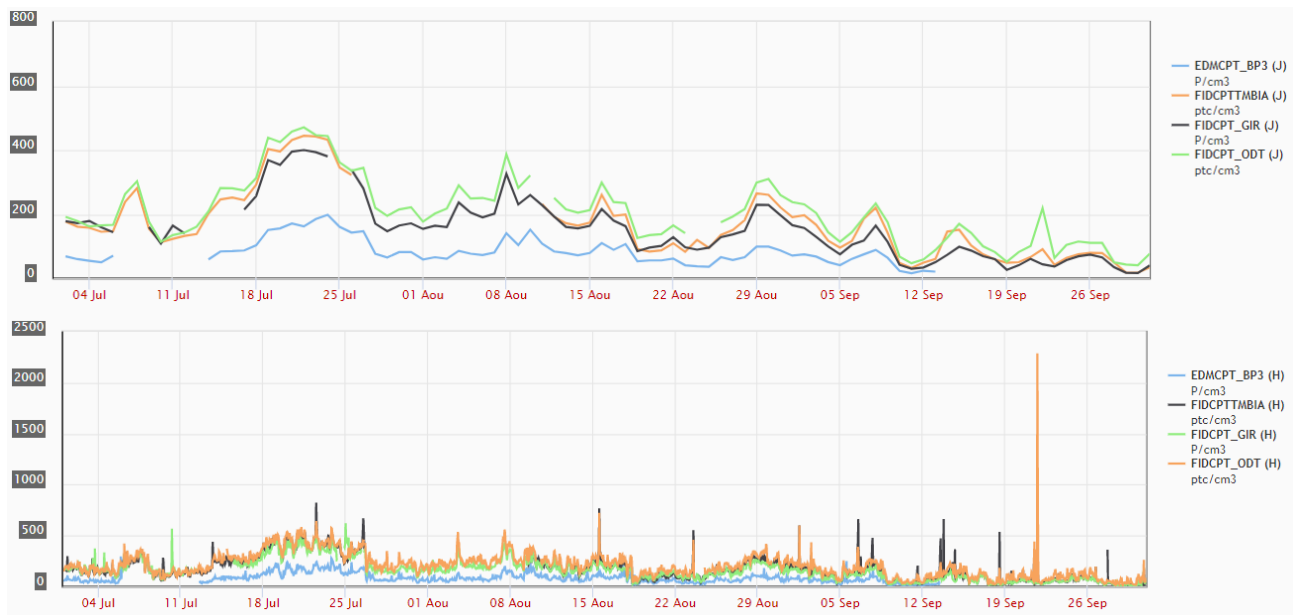
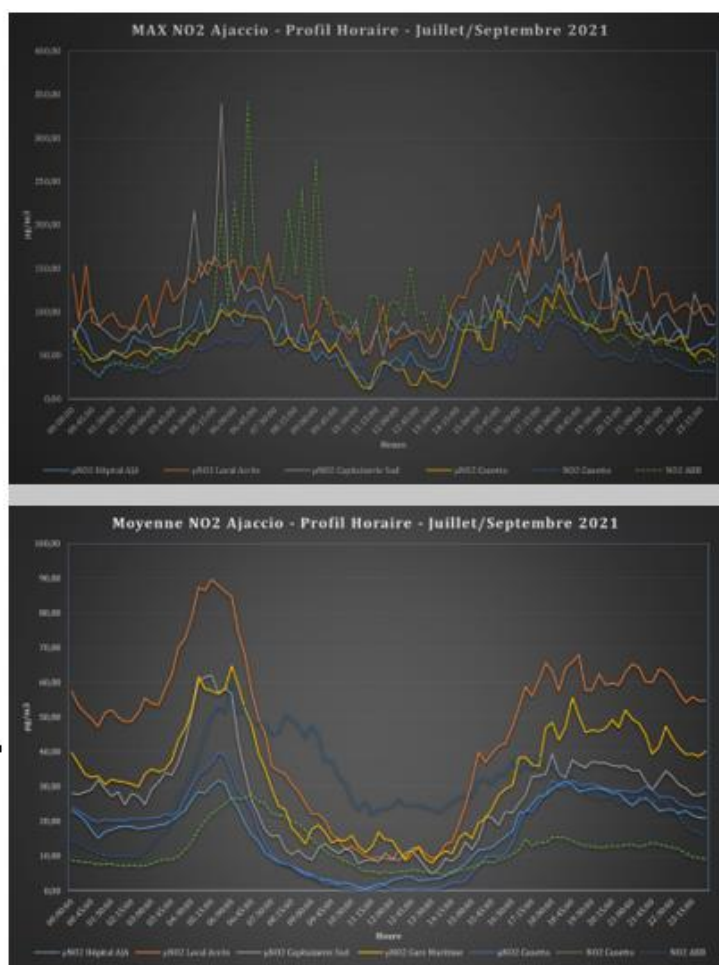


Figure 4.5.25: Valeurs CPT (Moyenne horaire et journalière) sur Bastia – 2022.

Profils journaliers

Afin d'identifier les heures auxquelles des pics de pollution surviennent (trafic, maritime, autre), il peut être intéressant de tracer les profils journaliers des polluants principaux sur toute la période étudiée. La tendance qui s'en dégage permet de comprendre à quel moment de la journée la pollution est plus grande, et ainsi chercher des corrélations entre les différents paramètres pour en comprendre la cause. Pour tracer ces profils, tous les instruments de mesures ont été pris en compte, micro-capteurs inclus. En effet, cet axe de recherche ne vise pas à établir des courbes de valeurs exactes mais plutôt d'identifier des tendances établies, répétées sur tous les points de mesure. Les valeurs brutes obtenues sont donc à nuancer en fonction de certains éléments (calibration/validation des micro-capteurs imprécise, travaux temporaires localisés à côté de certains points de mesure, etc.)



Les profils horaires de NO₂ sur Ajaccio montrent une activité plus poussée le matin et le soir, correspondant à un profil relativement classique de pollution trafic et maritime. En effet, les pics correspondent aux heures d'activités maximales pendant lesquelles la population s'active (trajet domicile-travail) et inversement le soir. Cela coïncide également avec les horaires d'arrivées et de départs des liaisons maritimes.

En moyenne, les pics semblent être assez importants sur les heures concernées. Evidemment, les valeurs des micro-capteurs (en lignes continues sur le graphique) sont à nuancer.

Figure 4.5.26: Profil horaire des valeurs moyennes et maximales en NO₂ sur Ajaccio durant la période estivale 2021.

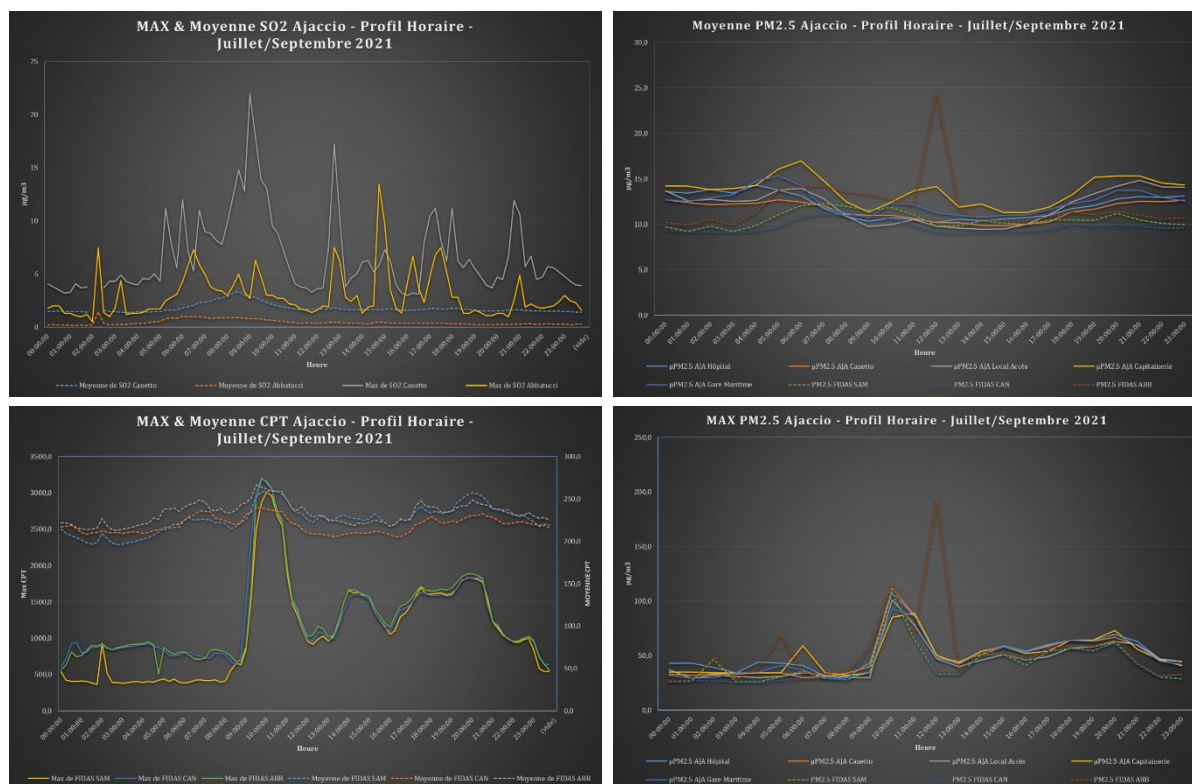


Figure 4.5.27: Profils horaires SO₂, PM_{2.5} et CPT sur Ajaccio durant la période estivale 2021.

Il est plus difficile d'observer de réelle tendance en revanche sur les polluants SO₂ et PM. Le SO₂ étant principalement identifié comme un marqueur de la pollution maritime (étant le seul secteur suffisamment émissif en soufre comparativement), il est considéré comme dépendant de la présence de navires au port ou dans la rade, couplé avec une direction de vent propice au transfert du panache sur la station en question. Le profil horaire est donc plus disparate.

Concernant les PM, il s'agit d'un polluant régulièrement affecté par des épisodes de grande ampleur (DUST / Sable Saharien), qui ont affecté à 6 reprises la Corse durant la période estivale 2021:

Tableau 4.5.4: Dates épisodes de pollution particules fines.

Date	Causa
25 – 28 juillet 2021	Poussière du Sahara (Dust)
11 – 18 août 2021	Poussière du Sahara (Dust) + Incendie du Var
15 – 16 septembre 2021	Poussière du Sahara (Dust)
25 – 27 septembre 2021	Poussière du Sahara (Dust)

De plus, d'importants travaux étaient réalisés au même moment à proximité de la station fixe Abbatucci (ABB), ce qui se traduit sur le graphique par d'importants pics aux alentours de midi (UTC).

NO₂ – micro-capteurs et stations fixes

Les données mesurées pour le NO₂ sur la période estivale 2021 sont tracées dans les graphes ci-dessous. Les mesures des stations fixes sont représentées par des pointillés. A noter que la station Canetto est sous influence urbaine, et celle d'Abbatucci de trafic. En moyenne journalière, les mesures varient autour de 20-30 µg/m³ à +/-10 µg/m³. On peut observer que les mesures au local accès et à la gare maritime donnent une tendance plus élevée avec un décalage progressif vers des valeurs plus hautes en septembre (jusqu'à un pic très important au niveau de la gare maritime). Ces valeurs peuvent être écartées, différant beaucoup trop du lot complet, et ne correspondant à aucune réalité sur terrain. Les problèmes ont été nombreux quant à la calibration des micro-capteurs Agriscope pour le NO₂, ce qui avait été mis en évidence lors des essais de reproductibilité effectués juste avant pose sur site.

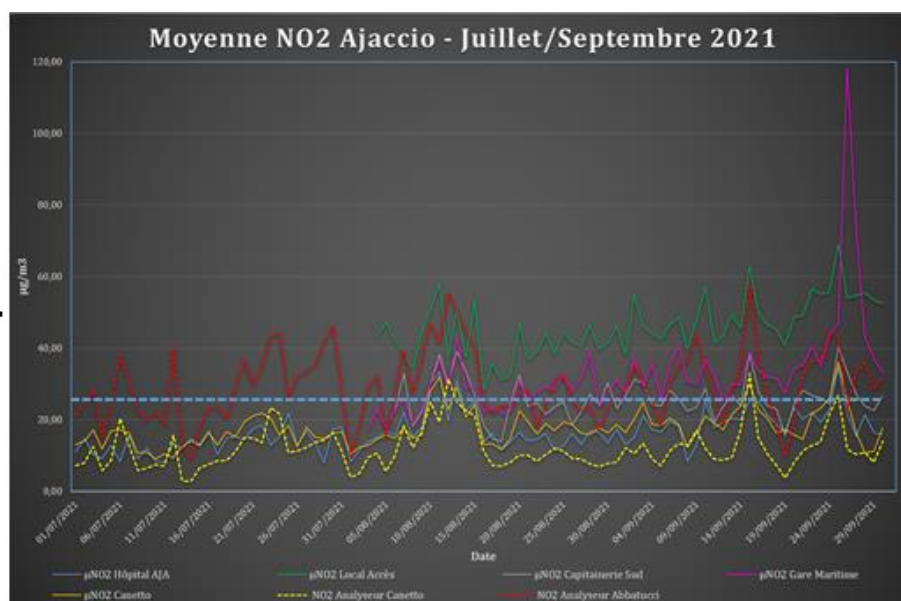


Figure 4.5.28: Mesures Moyenne journalières NO₂ Ajaccio – Période Estivale 2021 – Micro-capteurs (µNO₂) et analyseurs (NO₂).

Seules les données des stations fixes sont calibrées et validées, pouvant donc mener à une vraie comparaison avec la ligne directrice fixée par l'OMS (en pointillé bleu sur le graphe). A noter toutefois que les 5 micro-capteurs NO₂ présents sur Ajaccio tendent à montrer que cette valeur est très souvent atteinte pour une moyenne journalière.

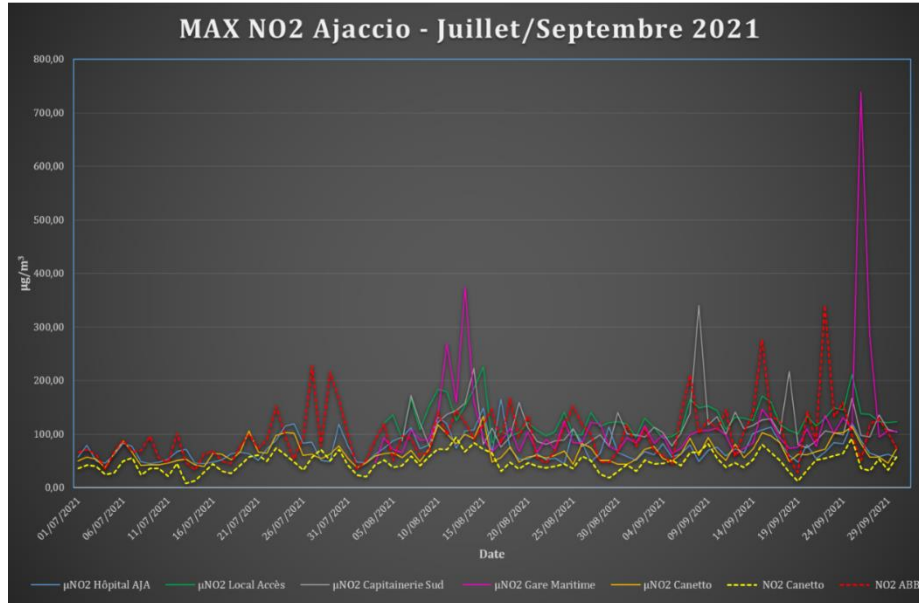


Figure 4.5.29: Mesures Max journaliers NO₂ Ajaccio – Période Estivale 2021 – Micro-capteurs (µNO₂) et analyseurs (NO₂).

Les problèmes d'ajustement des micro-capteurs sont particulièrement mis en évidence en traçant les maximaux journaliers des valeurs NO₂. En effet, on peut voir sur le graphe précédent que le comportement du capteur situé à la gare maritime est particulièrement réactif aux montées de NO₂. Toutefois, le site étant nouveau, il est impossible d'acter avec certitude de combien varie la valeur réelle du résultat obtenu. Ces valeurs maximales surévaluées mènent alors à des calculs de moyenne biaisés, et ne peuvent alors pas être pris en compte en l'état vis-à-vis des performances exigées pour la mesurer. Les tendances de pollution semblent être à peu près cohérentes, à quelques exceptions près, correspondant alors au but principal de ces micro-capteurs, à savoir être capables de quantifier la dispersion de polluants à travers la ville, et identifier les potentielles sources de pollution.

Les mesures des micro-capteurs NO₂ ne seront prises en compte qu'à titre d'indication lors de la modélisation, leur pertinence ayant trop souvent été mise en doute lors de l'étude.

Sur Bastia, six micro-capteurs NO₂ ont été positionnés, et les résultats sont assez pertinents pour la première saison estivale (les capteurs ont malheureusement mal vécus la proximité avec le milieu marin, et n'ont pas pu transmettre suffisamment de données fiables pour la saison 2022).

Ce qu'il en ressort, c'est qu'en moyenne, les résultats des moyennes journalières sont en dessous de la ligne directrice définie par l'OMS. La station temporaire ODT tend à montrer des dépassements très fréquents étant donné sa proximité trafic très prononcée. Aucune des autres mesures ne semble montrer une telle fréquence de dépassement, hormis les micro-capteurs placés au niveau du toit du collège Simon et du pylône 7 bis dans le port. Si les résultats sont interprétés tels quels, les valeurs sont relativement élevées et la position en hauteur de ces capteurs peut être un indice d'une potentielle pollution maritime (~ hauteur des cheminées de navires). Toutefois, il a été précisé plus haut que les capteurs Agriscope n'ont pas montré de très bonnes capacités à répéter une mesure commune, et ces mesures sont donc à traiter avec parcimonie.

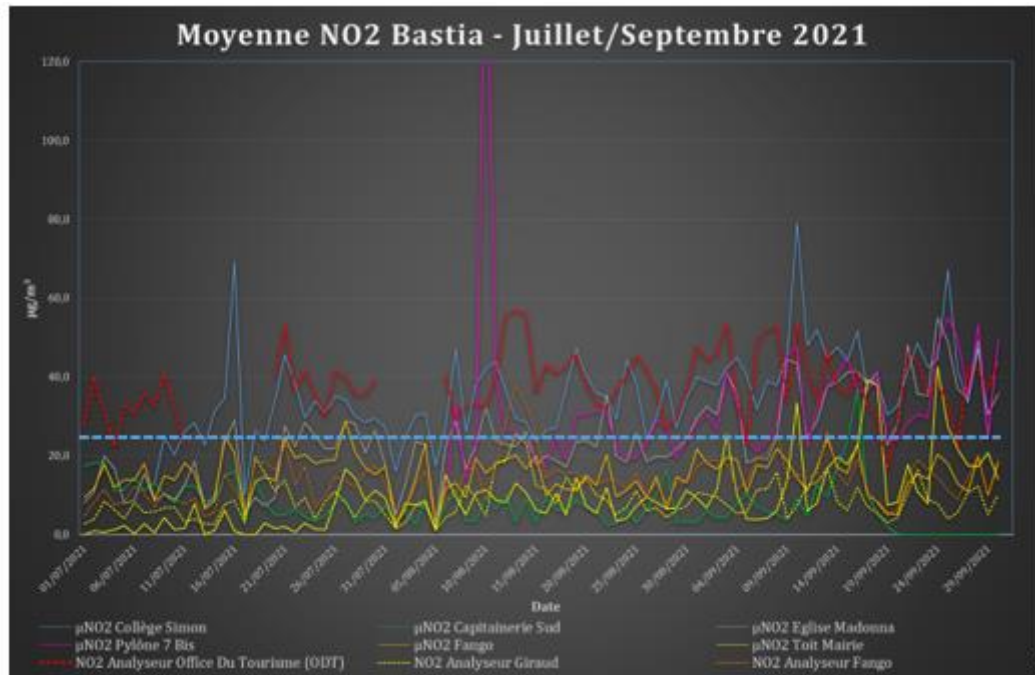


Figure 4.5.30: Mesures moyennes journalières PM2.5 Bastia – Période Estivale 2021 – Micro-capteurs (μNO_2) et analyseurs (NO_2).

Un très bon exemple apparaît d'ailleurs aux alentours du 10 août avec une moyenne au niveau du pylône 7 bis de plus de $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ qui ne sont reprise par aucun autre capteur même de ceux à proximité (Eglise Madonna, Toit Mairie).

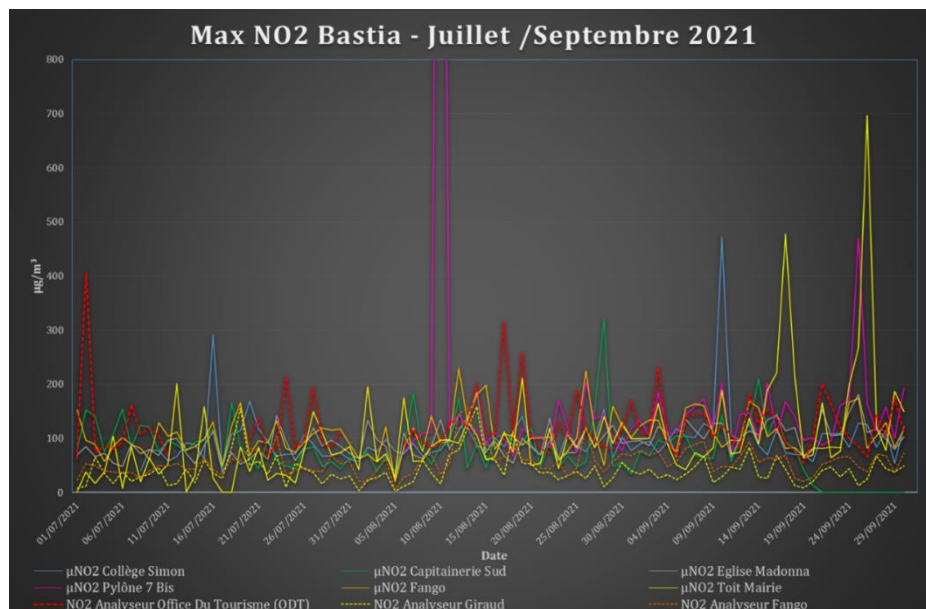


Figure 4.5.31: Mesures Max journaliers NO_2 Bastia – Période Estivale 2021 – Micro-capteurs (μNO_2) et analyseurs (NO_2).

Cela se retrouve également dans la mesure des maxima, avec un pic à plus de $2500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ne représentant aucunement la réalité sur terrain. La station ODT présente toutefois une certaine tendance aux valeurs hautes sur Bastia. Mais tous les emplacements choisis pour l'étude ne sont pas autant sensibles à la pollution issue du trafic.

Certains pics à hauteur conséquente $\sim 20\text{m}$ (Collège Simon, Toit Mairie, Pylône 7 bis) sont intéressants et peuvent se révéler pertinents si liés à des mesures de SO_2 corrélées. La suite de l'étude permettra de clarifier ces points.

Concentration en particules fines

La même méthode a été suivie afin de comparer les mesures des micro-capteurs à celles des stations fixes et mobiles. La pollution aux particules fines est principalement due au trafic (routier, maritime, industriel), mais aussi à tout ce qui relève de l'écobuage ou des incendies, les fumées engendrées par la combustion de végétaux (ou autre) étant une source importante de pollution. Les pics mesurés durant la période estivale 2021 sont des conséquences de différents épisodes de pollution sahariens / éruptions volcaniques et incendies (cf. Profils journaliers).

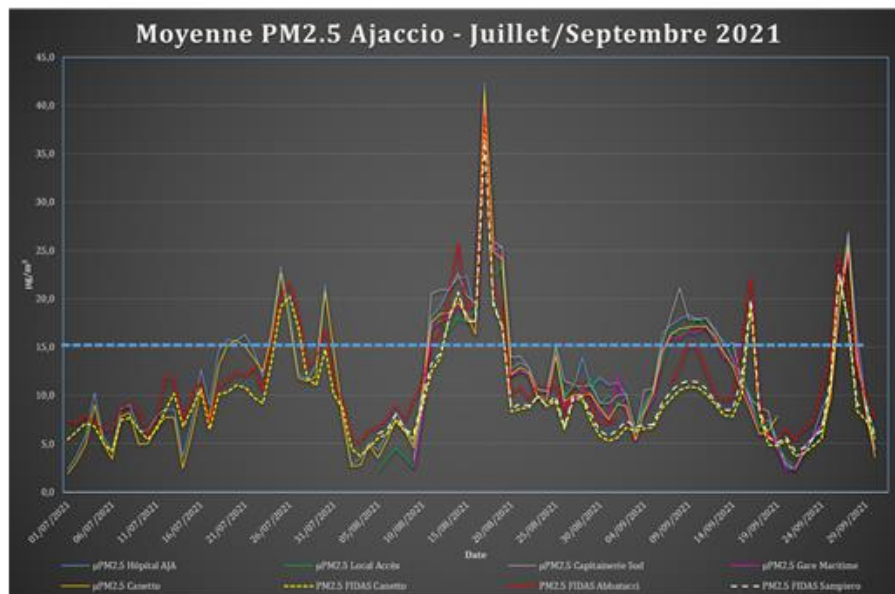


Figure 4.5.32: Mesures moyennes journalières PM2.5 Ajaccio – Période Estivale 2021 – Micro-capteurs (μ PM2.5) et analyseurs (PM2.5).

De manière générale, les micro-capteurs réagissent plutôt bien à suivre les tendances de pollutions généraux, avec le défaut de surévaluer de temps à autre les valeurs de certains pics. L'intérêt de ces micro-capteurs se révèle particulièrement lors des épisodes de pollution, le transfert progressif est visible individuellement sur chaque capteur au fur et à mesure de la dispersion de l'épisode.

La limite fixée par l'OMS en moyenne journalière a été quelques fois dépassée, principalement lors des épisodes de pollutions aux particules sahariennes. Seul un dépassement début septembre ne semble pas être corrélé à un épisode particulier, rendant l'étude de recherche de sources intéressante.

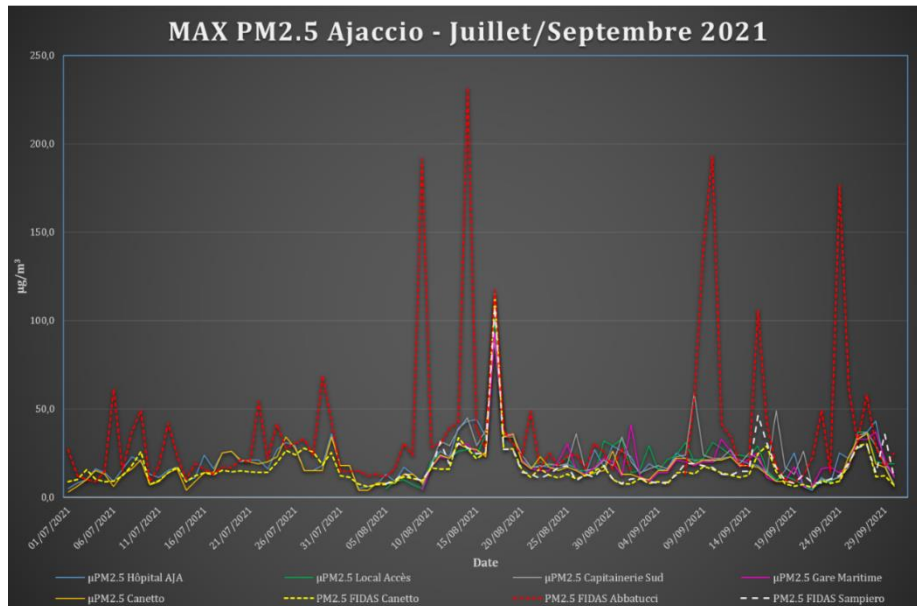


Figure 4.5.33: Mesures Max journaliers PM_{2.5} Ajaccio – Période Estivale 2021 – Micro-capteurs (µPM_{2.5}) et analyseurs (PM_{2.5}).

Per quanto riguarda lo studio dei massimi ottenuti in questo periodo, è necessario notare diversi. Concernant l'étude des maximaux obtenus durant cette période, plusieurs éléments sont à relever. On peut observer que durant l'épisode Dust + Incendie du Var aux alentours de mi-août 2021, toutes les mesures se sont accordées sur cette pollution généralisée à toute la ville. Cela prouve la capacité des micro-capteurs de retranscrire avec suffisamment de précision la réalité.

Deuxièmement, les valeurs les plus élevées proviennent de la station fixe Abbatucci, étant à proximité de travaux durant toute la saison, rendant les mesures difficilement exploitables pour l'étude AER NOSTRUM. Ces résultats peuvent être également observés en isolant les valeurs week-end/jours ouvrés, confirmant l'incidence des travaux sur les mesures. La station de Canetto et celle du parking Sampiero seront considérées comme étant plus pertinentes dans la recherche de sources de pollutions issues du maritime dans la suite de ce rapport.

Airly a su proposer un produit suffisamment réactif aux différentes variations de pollution en particules fines (PM_{2.5}), malgré quelques défauts à suivre les tendances des particules plus grossières (>PM₁₀, non représentées sur ce graphe), problème inhérent à la technologie optique des micro-capteurs.

Les valeurs PM_{2.5} seront prises en compte lors de la modélisation, ayant prouvé une certaine fidélité de la réalité sur terrain.

A l'instar d'Ajaccio, les mesures sur Bastia sont cohérentes et à l'exception des particularités locales des sites, les micro-capteurs ont su suivre les tendances générales sur la ville. Les épisodes DUST de fin juillet, mi-août et mi-septembre apparaissent sur les graphes suivants. Une tendance à surévaluer les particules PM_{2.5} est à noter durant ces épisodes. En PM₁₀, comme évoqué précédemment, la technologie ne permet pas d'apprécier correctement les variations des particules plus grossières.

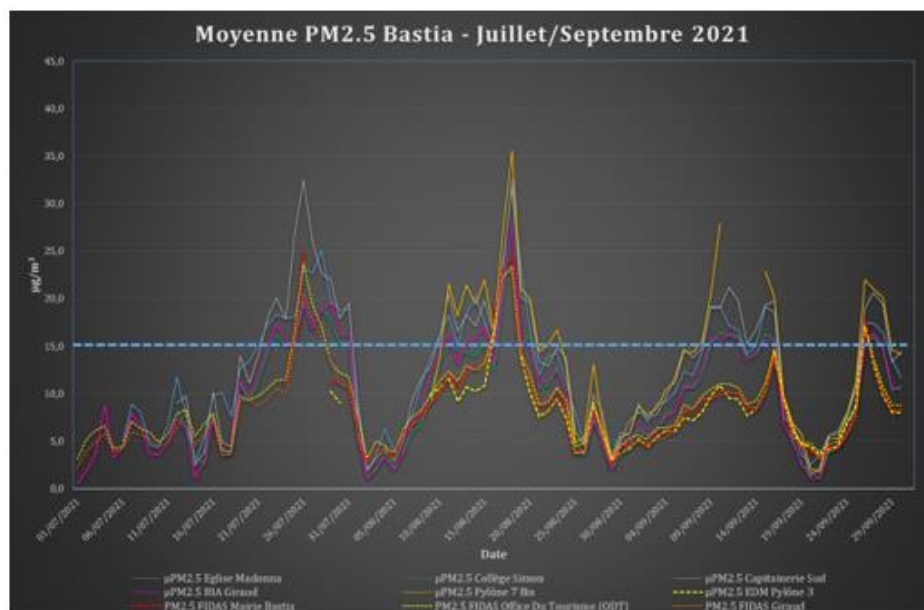


Figure 4.5.34: Mesures moyennes journalières PM_{2.5} Bastia – Période Estivale 2021 – Micro-capteurs (µPM_{2.5}) et analyseurs (PM_{2.5}).

Les dépassements de la ligne directrice OMS sont tous liés à des épisodes de pollution généralisés, et ne sont pas associés à une contribution exclusive du secteur maritime. Les stations fixes et mobiles n'ont toutefois pas dépassé cette ligne lors de l'épisode mi-septembre, tandis que tous les micro-capteurs s'accordaient à le faire.

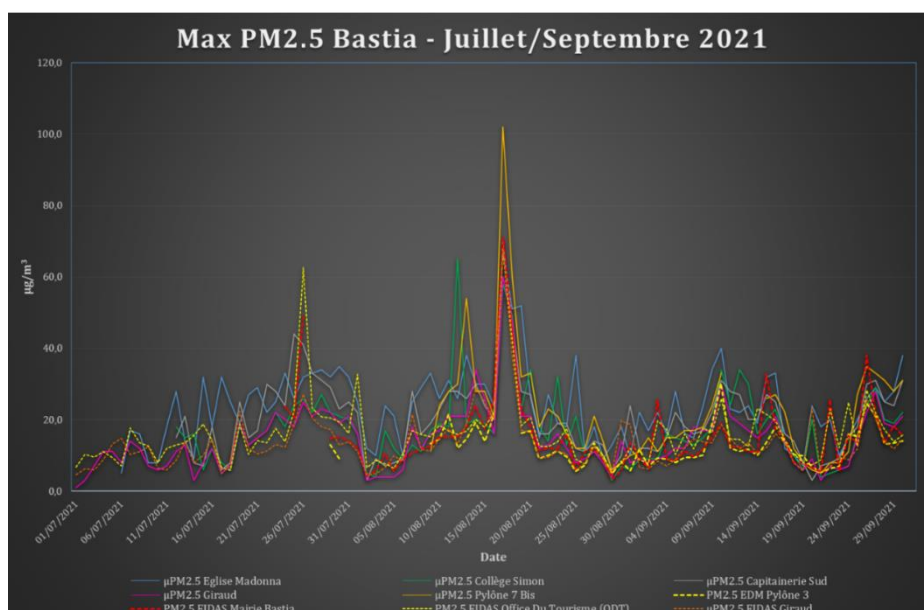


Figure 4.5.35: Mesures Max journaliers PM_{2.5} Bastia – Période Estivale 2021 – Micro-capteurs (µPM_{2.5}) et analyseurs (PM_{2.5}).

Parmi les micro-capteurs, celui situé « Eglise Madonna » semble faire état de mesures plus élevées que les autres. Il fait partie de ces capteurs situés le plus à proximité des navires à quai, et dans le régime de vent principal. Il témoigne d'une influence particulièrement importante de la part du maritime dans la pollution aux particules fines, avec parfois des valeurs plus hautes de 50% hors épisodes de pollution saharienne. La station FIDAS sur le toit de la mairie n'enregistre toutefois pas les mêmes dynamiques malgré une proximité géographique et similaire en hauteur avec ce capteur « Eglise Madonna ».

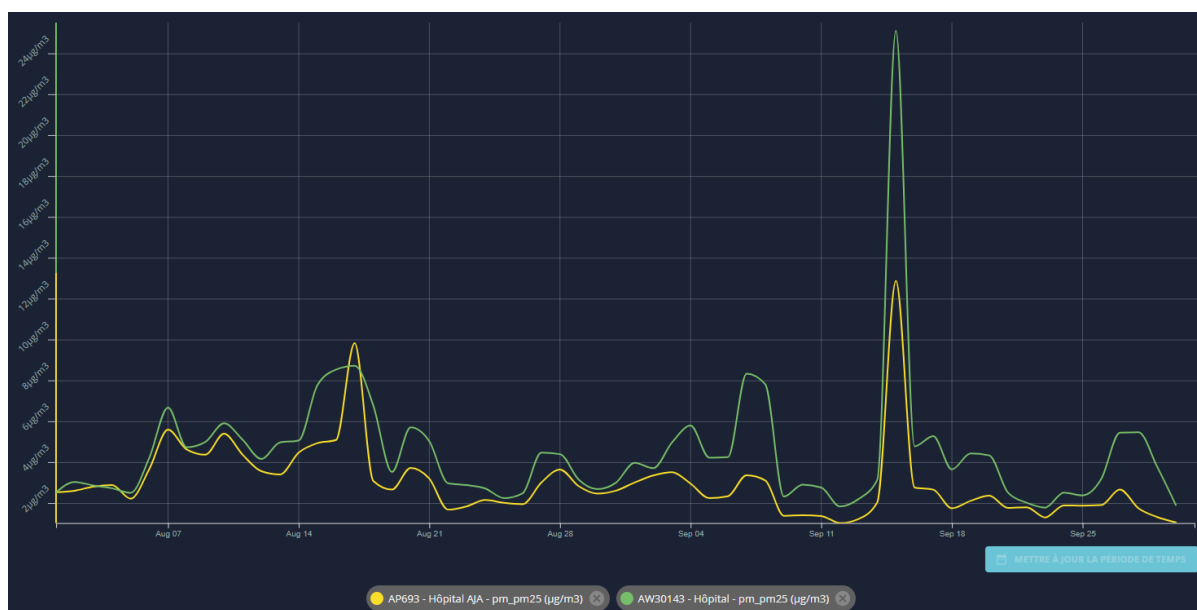
Les résultats peuvent être nuancés par le fait que ce capteur n'avait pas obtenu les meilleurs résultats par rapport aux autres capteurs Airly lors des tests de reproductibilité, sans toutefois présenter de mauvaises statistiques:

Tableau 4.5.5: Données régression linéaire pour μ Capteur PM (évaluation sur les PM2.5) – Capteur placé ensuite au niveau d'Eglise Madonna.

ID	ID lieu	Pente	R ²	Ordonnée Origine
5993	80752	1,22	0,82	-0,93

Transfert pollution extérieure/intérieure – Etude période estivale 2022

Un pan particulièrement intéressant de l'étude s'est orienté vers l'étude du transfert de la pollution extérieure vers l'intérieur. C'est dans le cadre d'un partenariat avec le fournisseur Ellona que nous avons pu étudier l'impact de ce transfert extérieur / intérieur. Pour ce faire, 4 micro-capteurs extérieurs (WT1) et 4 micro-capteurs intérieurs (POD2) ont été répartis à 4 emplacements différents sur Ajaccio et Bastia. On peut voir dans les graphes suivants que les concentrations en PM2.5 se suivent avec un décalage plus ou moins prononcé d'août à septembre 2022.



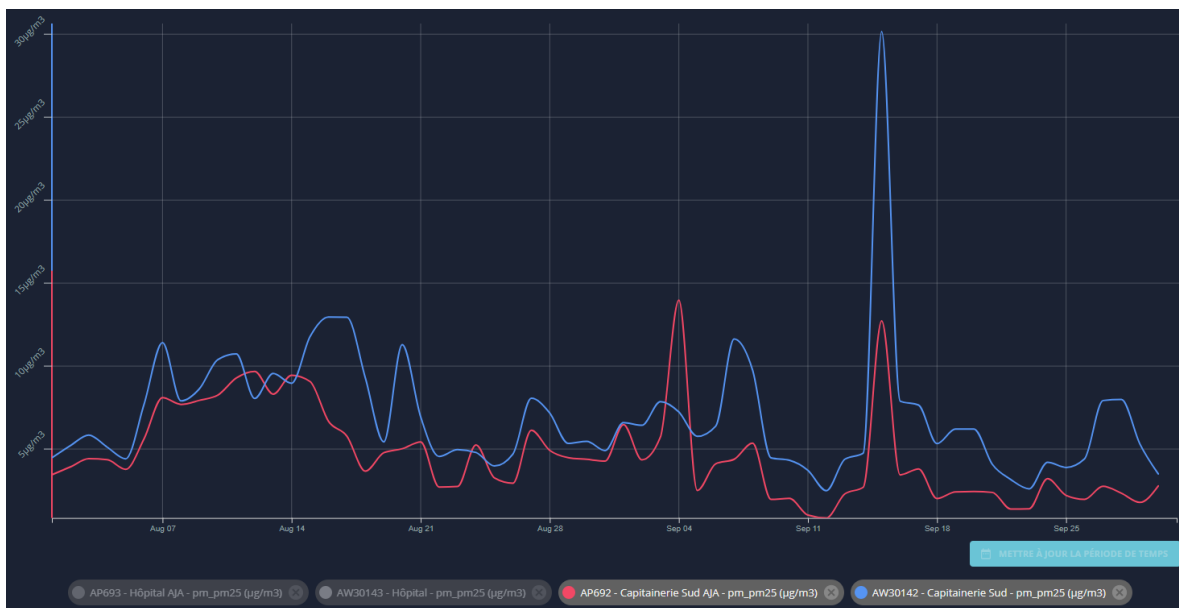


Figure 4.5.36: Concentration en PM2.5 en extérieur (AW) et intérieur (AP) sur Ajaccio (Hôpital AJA – courbe du haut / Capitainerie Sud – courbe du bas).

Un pic de concentration peut être observé sur la période aux alentours de mi-septembre 2022. En effet, un épisode de pollution aux particules désertiques s'est déclaré du 15 au 17 septembre 2022, entraînant des dépassements de seuils réglementaires en particules fines. En étudiant cette période, on peut voir sur les courbes ci-dessous que le transfert se fait de manière atténuée lors d'épisodes, et la pollution se disperse légèrement moins vite qu'en air extérieur dû au renouvellement plus difficile de l'air en environnement clos.

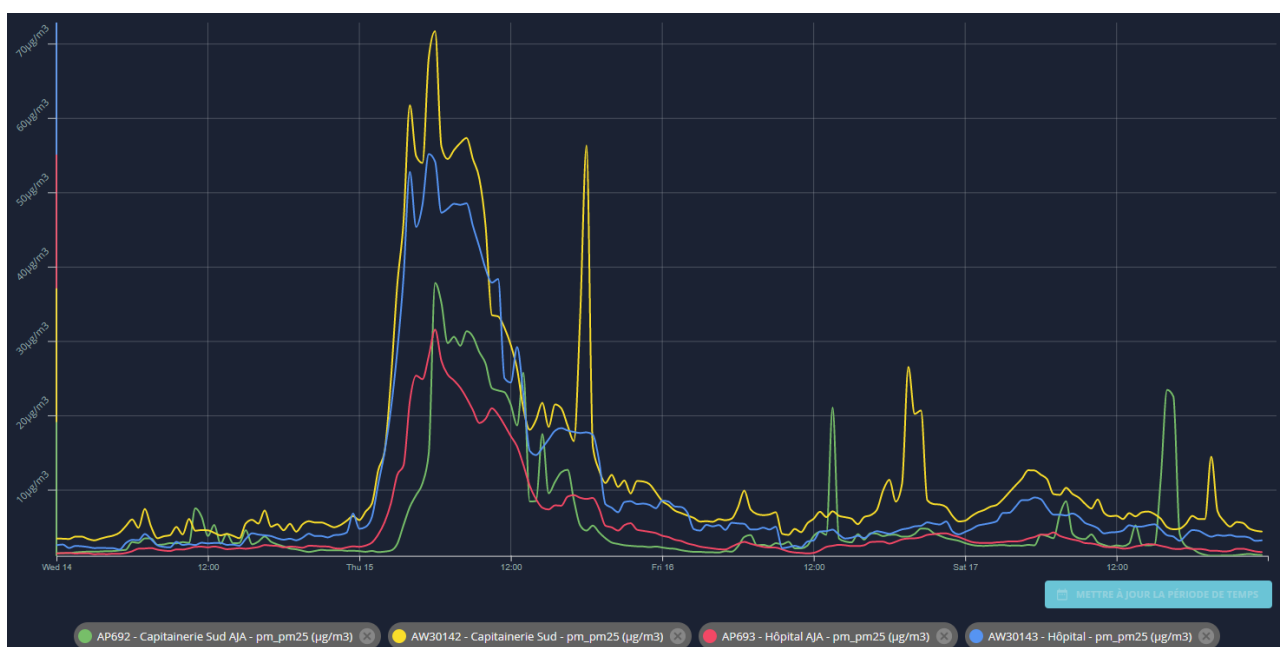


Figure 4.5.37: Transfert de concentrations en PM2.5 sur Ajaccio entre l'air extérieur (AW30142 & AW 30143) vers l'air intérieur (AP692 & AP693).

Quelques pics de la part des capteurs intérieurs sont à noter, probablement liés à des événements locaux.

L'étude ne s'est en revanche pas poursuivie concernant le transfert de pollution du NO₂ et SO₂, les résultats n'étant pas exploitables tels quels, notamment concernant les ordres de grandeur des valeurs obtenues (ajustées après coup à partir de fin août):

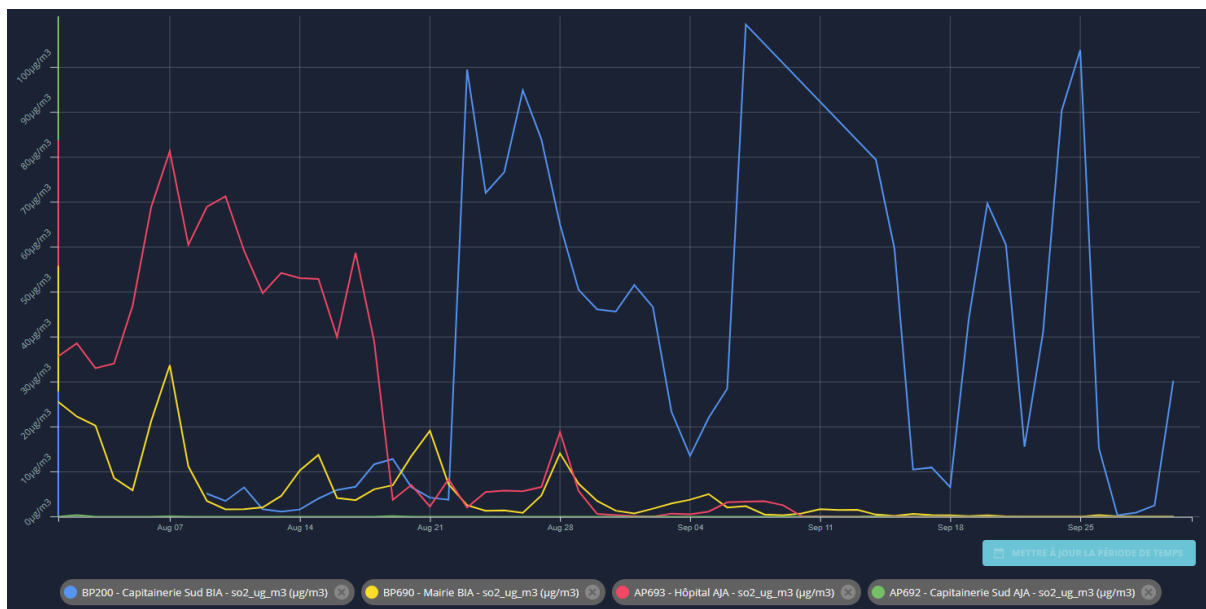


Figure 4.5.38: Concentrations SO₂ en intérieur mesurées par Ellona (Ajaccio & Bastia) - Août/Septembre 2022.

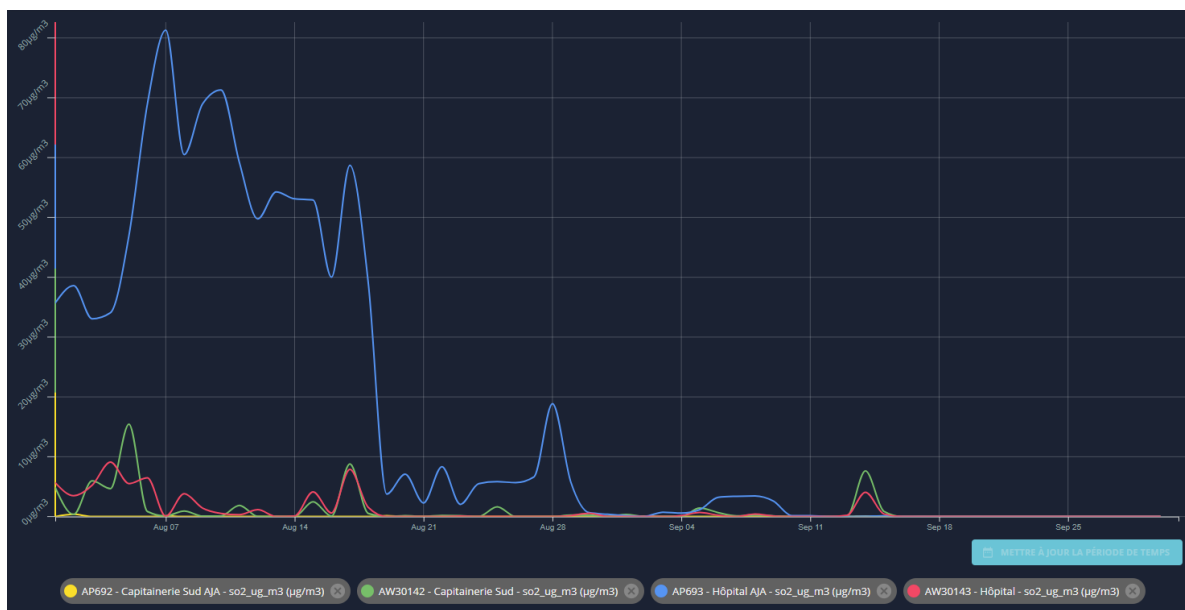


Figure 4.5.39: Transfert concentrations en SO₂ obtenues sur Ajaccio (mesures Ellona en intérieur et extérieur) - Août/Septembre 2022.

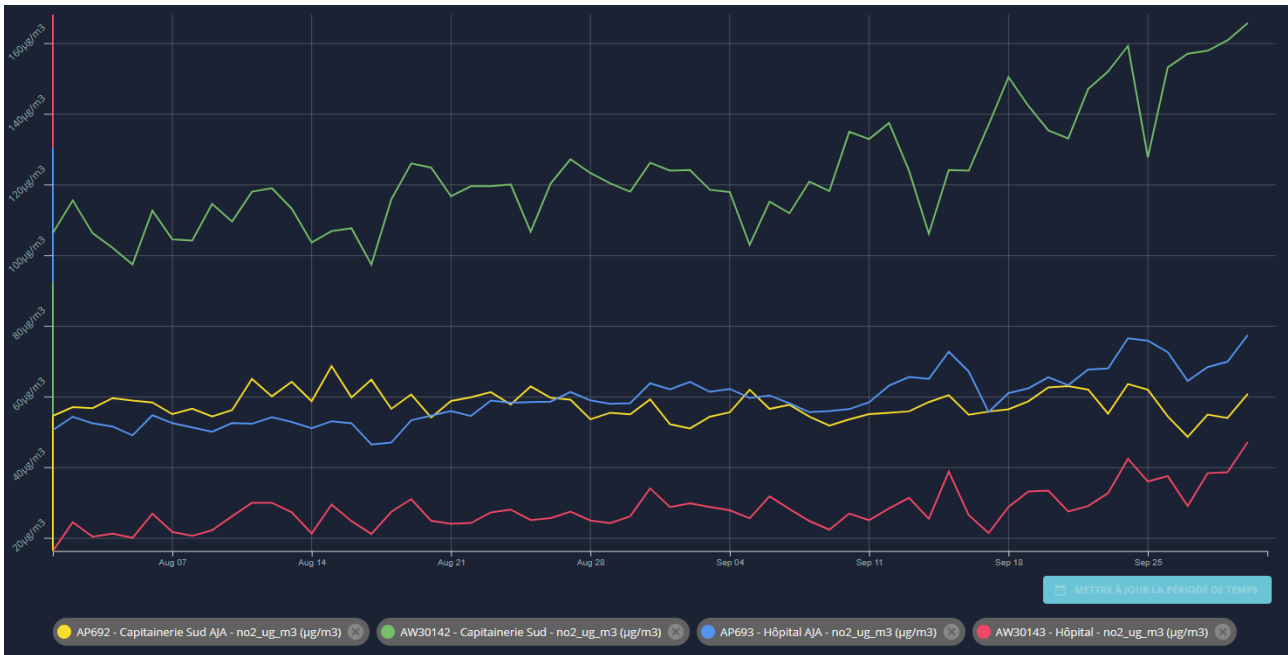


Figure 4.5.40: Transfert concentrations en NO_2 obtenues sur Ajaccio (mesures Ellona en intérieur et extérieur) - Août/Septembre 2022.

Les concentrations en NO_2 sur Ajaccio ne semblent pas retranscrire la réalité du terrain, et la différence entre les concentrations dans l'air extérieur ont une différence de l'ordre de la centaine de $\mu\text{g}/\text{m}^3$, attestant d'un problème d'offset et de coefficient. Le temps manquant à l'étude dans le cadre du projet AER NOSTRUM, il n'a pas été jugé pertinent de garder ces mesures de polluants gazeux par la suite.

5. Source apportement

Table de figure

Figure 5.1.1: Roses des vents obtenues à partir de l'analyse des observations auprès de la station mobile.	155
Figure 5.1.2: Contenu des éléments mesurés dans les PM10 lors des deux campagnes.	157
Figure 5.1.3: Bilan de masse des PM10 dans les deux saisons à San Teodoro-Largo San Francesco da Paola.	158
Figure 5.1.4: Bilan de masse des PM10 dans les deux saisons à Corso Firenze.	158
Figure 5.1.5: Évolution temporelle de la source associée aux émissions des navires au printemps 2022.	160
Figure 5.2.1: Tendances des valeurs moyennes des métaux et BaP dans le site portuaire de Cagliari.	161
Figure 5.2.2: Tendances des valeurs moyennes des métaux et BaP dans le site portuaire d'Olbia.	162
Figure 5.3.1: BoxPlots obtenus avec les valeurs moyennes par minute NO ₂ , NO, SO ₂ pour les sites de Fortezza Vecchia et Calata Bengasi.	165
Figure 5.3.2: PolarPlots saisonniers obtenus avec les valeurs moyennes par minute NO ₂ , NO, SO ₂ pour Fortezza Vecchia.	166
Figure 5.3.3: PolarPlots saisonniers obtenus avec les valeurs moyennes par minute NO ₂ , NO, SO ₂ pour Calata Bengasi.	167
Figure 5.3.4: Identification des postes d'amarrage, site de Fortezza Vecchia.	168
Figure 5.3.5: Identification des postes d'amarrage, site de Calata Bengasi.	168
Figure 5.3.6: BoxPlots obtenus avec les valeurs moyennes par minute PM1, PM2.5, PM10 pour les sites de Fortezza Vecchia et Calata Bengasi.	170
Figure 5.3.7: Comparaison des sites de Fortezza Vecchia et Calata Bengasi : BoxPlots obtenus à partir du traitement global de toutes les enquêtes.	171
Figure 5.3.8: Courbes de fractionnement cumulatif des particules: comparaison entre les sites de Fortezza Vecchia et Calata Bengasi.	172
Figure 5.3.9: Profils temporels des comptages lors d'une journée typique pour les sites de Fortezza Vecchia et Calata Bengasi.	172
Figure 5.3.10: Profils temporels des fractions massiques des PM10, PM2.5 et PM1 au cours d'une journée typique pour les sites de Fortezza Vecchia et Calata Bengasi.	173
Figure 5.3.11: PolarPlots obtenus avec les valeurs moyennes par minute PM10, PM2.5, PM1 pour Fortezza Vecchia.	173
Figure 5.3.12: PolarPlots obtenus avec les valeurs moyennes par minute PM10, PM2.5, PM1 pour Calata Bengasi.	174
Figure 5.3.13: Distributions moyennes par campagne.	175
Figure 5.3.14: BoxPlot des distributions saisonnières.	175
Figure 5.3.15: Moyennes horaires saisonnières.	176
Figure 5.3.16: Moyennes journalières par campagne.	177
Figure 5.3.17: Nombre d'accostages par zone et par période.	178
Figure 5.3.18: Trafic par type de navire année 2022 Port de Livourne et zone de suivi Calata Bengasi.	178
Figure 5.3.19: Nombre d'accostages par type de navire en mois de campagne.	179
Figure 5.3.20: Localisation des accostages.	179
Figure 5.3.21: Nombre d'accostages par quai en mois de campagne.	179
Figure 5.3.22: Nombre d'accostages et vents dominants Automne.	180
Figure 5.3.23: Nombre d'accostages et vents dominants Hiver.	180
Figure 5.3.24: Nombre d'accostages et vents dominants Printemps.	181
Figure 5.3.25: Nombre d'accostages et vents dominants Été.	181
Figure 5.3.26: Cas type automne 2021.	183
Figure 5.4.1: Concentrations horaires en NO ₂ , NO _x , SO ₂ et PM2.5 (lignes bleues) mesurées à la cabine Toulon TCA entre le 12/07/21 et le 03/08/21, comparées au nombre de navires à quai (points oranges) lorsque les vents ont une direction comprise entre 200° et 260°. Les données de présence des navires ont une précision temporelle de 5 minutes.	184
Figure 5.4.2: Roses de pollution des maximas des concentrations en NO, NO ₂ , NO _x , SO ₂ , black carbon et nombre de particules fines mesurées à la cabine Toulon TCA entre le 02/08/21 et le 29/09/21.	185
Figure 5.4.3: Navires présents et concentrations mesurées sur le port de Toulon pour la journée du 26/08/21.	186
Figure 5.4.4: Navires présents et concentrations mesurées par la cabine Toulon TCA sur la période de fonctionnement de l'analyseur de métaux, du 02/08/21 au 16/08/21.	187

Figure 5.4.5: Profils statistiques journaliers des concentrations en NO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ , nombre de particules et black carbon mesurées au terminal Toulon TCA entre le 15/06/21 et le 30/09/2021. Les concentrations en gaz à effet de serre CO et CO ₂ ont été acquises entre le 25/08/21 et le 17/09/21. Les concentrations en métaux ont été enregistrées entre le 02/08/2021 et le 16/08/2021.	188
Figure 5.4.6: Répartition horaire du nombre de départs et d'arrivées de navires à Toulon entre le 15/06/21 et le 30/09/21.	189
Figure 5.4.7: Concentrations quart-horaires en (a) NO _x et (b) SO ₂ en µg.m ⁻³ du 11/06/21 au 25/10/21. Le trait pointillé rouge représente le seuil en deçà duquel les concentrations sont considérées comme étant dans le « bruit de fond ». Les symboles oranges identifient les pics. La figure (c) compare les profils de concentration en NO _x (bleu) et SO ₂ (orange). Les points rouges identifient les pics de NO _x et SO ₂ corrélés.	189
Figure 5.4.8: Histogrammes des concentrations maximales enregistrées au cours des épisodes de panache identifiés, pour NO, NO ₂ , NO _x , SO ₂ , black carbon et nombre de particules.	190
Figure 5.5.1: Rose des pollutions du NO ₂ et SO ₂ sur la station de Canetto, météo Canetto.	191
Figure 5.5.2: Corrélation Moyenne NO ₂ /SO ₂ et nombre (nb) de navires à quai – Ajaccio, 2021.	192
Figure 5.5.3: Corrélation Moyenne NO ₂ /SO ₂ et nombre (nb) de navires à quai – Bastia, 2021.	192
Figure 5.5.4: Journée particulière du 24 août 2021 – Ajaccio.	197
Figure 5.5.5: Journée particulière du 24 septembre 2021 - Bastia.	198

Table de tableaux

Tableau 5.1.1: Echantillons de PM10 collectés à Corso Firenze. La quatrième colonne, « A ± S.D. », indique la valeur moyenne ± l'écart-type sur la période de mesure. La dernière colonne indique le nombre de jours pendant lesquels la valeur limite de 50 µg/m ³ pour la concentration journalière de PM10 a été dépassée.	154
Tableau 5.1.2: Echantillons de PM10 collectés à San Teodoro. La quatrième colonne, « A ± S.D. », indique la valeur moyenne ± l'écart-type sur la période de mesure. La dernière colonne indique le nombre de jours pendant lesquels la valeur limite de 50 µg/m ³ pour la concentration journalière de PM10 a été dépassée.	154
Tableau 5.1.3: Cumul des précipitations et température moyenne obtenus à Gênes.	155
Tableau 5.1.4: Concentration moyenne des composants (A) et écart-type (S.D.) des PM10 collectées sur les sites de Corso Firenze et San Teodoro (ng/m ³).	156
Tableau 5.2.1: Zone de Cagliari - Concentrations d'As, de Cd, de Hg, de Ni, de Pb et de BaP dans la fraction PM10.	161
Tableau 5.2.2: Zone d'Olbia - Concentrations d'As, de Cd, de Hg, de Ni, de Pb et de BaP dans la fraction PM10	162
Tableau 5.3.1: Nombre de données élémentaires utilisées pour le traitement des polluants gazeux NO ₂ , NO, SO ₂	164
Tableau 5.3.2: Valeurs minimales, maximales et centiles des polluants gazeux NO ₂ , NO, SO ₂	164
Tableau 5.3.3: Comparaison des sites de Fortezza Vecchia et Calata Bengasi : Valeurs minimales, 25° centile, 50° centile, 75° centile et 98° centile.	171
Tableau 5.3.4: Périodes d'échantillonnage avec Nanoscan.	174
Tableau 5.5.1: Tableau des valeurs moyennes NO ₂ et SO ₂ , nombre de navires à quai par jour, et pourcentage de vent soufflant dans les différentes directions (Est/Sud-Est, etc.) avec vitesse du vent du 11/08 au 18/09 2021 – Ajaccio période estivale 2021, 6h/18h TU.	193
Tableau 5.5.2: Tableau des valeurs max NO ₂ et SO ₂ , nombre de navires à quai par jour, et pourcentage de vent soufflant dans les différentes directions (Est/Sud-Est, etc.) avec vitesse du vent du 11/08 au 18/09 2021 - Ajaccio période estivale 2021, 6h/18h TU.	194
Tableau 5.5.3 Tableau des valeurs moyennes NO ₂ et SO ₂ , nombre de navires à quai par jour, et pourcentage de vent soufflant dans les différentes directions (Est/Sud-Est, etc.) avec vitesse du vent du 18/08 au 27/09 2021 – Bastia période estivale 2021, 6h/18h TU.	195
Tableau 5.5.4: Tableau des valeurs max NO ₂ et SO ₂ , nombre de navires à quai par jour, et pourcentage de vent soufflant dans les différentes directions (Est/Sud-Est, etc.) avec vitesse du vent du 18/08 au 27/09 2021 – Bastia période estivale 2021, 6h/18h TU.	195
Tableau 5.5.5: Plage de mesure des instruments pour le comptage de particules.	199

5.1. LIGURIE

Dans le cadre d'Aer Nostrum, une étude d'analyse de la « répartition des sources » a été réalisée, c'est-à-dire une évaluation quantitative de l'apport de chaque « source » à la concentration totale de PM10 à l'aide du modèle récepteur appelé « Positive Matrix Factorization » (PMF). Afin d'identifier les sources, c'est-à-dire de faire correspondre les « facteurs » que la PMF identifie comme des groupes d'éléments/composés ayant des évolutions temporelles corrélées, les « traceurs » sont pris en compte, c'est-à-dire des éléments connus pour être (ou supposés être) caractéristiques d'un processus d'émission donné, naturel et/ou anthropique. Le choix des éléments à considérer comme traceurs d'une source donnée est basé sur la littérature disponible sur le sujet et sur l'expérience acquise lors d'études similaires menées sur d'autres sites depuis 2003 jusqu'à présent. L'analyse réalisée a été appliquée au jeu de données obtenu à partir de l'analyse de la composition des échantillons de PM10 collectés au cours de deux campagnes de mesure menées en été 2021 et au printemps 2022. Le choix de réaliser ces campagnes de mesure a été fait pour inclure les deux périodes les plus significatives du point de vue météo-climatique et du volume du trafic de passagers dans la zone portuaire de Gênes. Il a également été décidé de réaliser l'étude non seulement sur le site de Largo San Francesco da Paola à San Teodoro, qui est plus directement exposé aux impacts du port dans des conditions de brise de mer, mais aussi sur le site de Corso Firenze, qui a déjà fait l'objet d'études de répartition des sources dans le cadre de divers projets maritimes européens (APICE, CAIMANS). Nous présentons ci-dessous les données relatives à la composition et à la concentration des particules atmosphériques, obtenues à partir de l'analyse des échantillons collectés sur le territoire. Le traitement des mesures permet d'évaluer l'incertitude et/ou la distribution statistique de la donnée (valeur moyenne et écart-type).

Corso Firenze

Soixante-quatorze échantillons journaliers (échantillonnage sur 24 heures à partir de minuit) de PM10 collectés au cours des deux campagnes (été 2021 et printemps 2022) ont été analysés, soit environ trois mois d'échantillonnage au total. La synthèse des déterminations gravimétriques est présentée dans le tableau.

Tableau 5.1.1: Echantillons de PM10 collectés à Corso Firenze. La quatrième colonne, « A ± S.D. », indique la valeur moyenne ± l'écart-type sur la période de mesure. La dernière colonne indique le nombre de jours pendant lesquels la valeur limite de 50 µg/m³ pour la concentration journalière de PM10 a été dépassée.

PM10				
Saison	Période	n. échantil	A ± S.D. (µg/m³)	N. > limite
Été 2021	12/08/2021 → 16/09/2021	36	25 ± 10	1
Printemps 2022	06/04/2022 → 25/05/2022	38	22 ± 7	0

Largo San Francesco da Paola (San Teodoro)

Le même nombre d'échantillons a été analysé lors des deux campagnes réalisées. La synthèse des déterminations gravimétriques est présentée dans le tableau.

Tableau 5.1.2: Echantillons de PM10 collectés à San Teodoro. La quatrième colonne, « A ± S.D. », indique la valeur moyenne ± l'écart-type sur la période de mesure. La dernière colonne indique le nombre de jours pendant lesquels la valeur limite de 50 µg/m³ pour la concentration journalière de PM10 a été dépassée.

PM10				
Saison	Période	n. échantil	A ± S.D. (µg/m³)	N. > limite
Été 2021	12/08/2021 → 16/09/2021	36	20 ± 9	0
Printemps 2022	06/04/2022 → 25/05/2022	38	16 ± 6	0

Analyse des conditions météorologiques

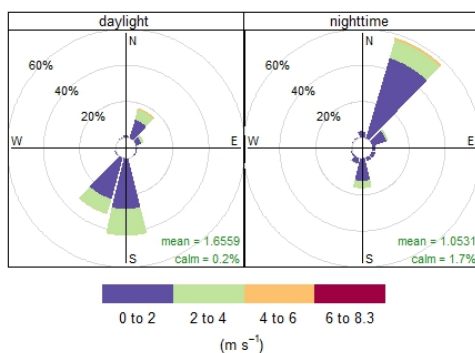
Avant de procéder à l'analyse au moyen du modèle récepteur, on a considéré les conditions météorologiques pendant les deux campagnes de mesure, auprès de la station mobile située à San Teodoro. Le tableau montre le cumul de précipitations obtenu en additionnant les précipitations des différents jours et les températures moyennes obtenues pendant la période considérée.

Tableau 5.1.3: Cumul des précipitations et température moyenne obtenus à Gênes.

Saison	Période	Précipitation (mm)	Température (°C)
Été 2021	12/08/2021 → 16/09/2021	5	25
Printemps 2022	06/04/2022 → 25/05/2022	2	17

Les graphiques montrent les roses des vents, réparties en jour/nuit, avec la direction dominante et la vitesse moyenne, obtenues lors des deux campagnes réalisées. On constate que, pendant la journée, la direction dominante du vent sur le site de San Teodoro est celle du secteur sud.

Rose dei venti Mezzo Mobile, prima campagna



Rose dei venti Mezzo Mobile, seconda campagna

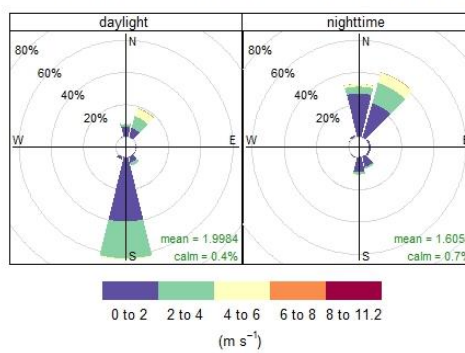


Figure 5.1.1: Roses des vents obtenues à partir de l'analyse des observations auprès de la station mobile.

Analyse des PM10

L'analyse de la composition des particules atmosphériques est la première étape de la caractérisation des sources ; la stratégie d'échantillonnage a été mise en œuvre afin produire des informations sur la composition élémentaire et ionique au moyen de la technique ED-XRF (Energy Dispersive X Ray Fluorescence) et de la chromatographie ionique (IC) respectivement, et sur la fraction carbonée des PM10, au moyen d'une analyse thermo-optique. Il a été décidé d'utiliser des filtres en fibre de quartz : ce sont les seuls qui peuvent supporter les températures requises pour l'analyse thermo-optique de la fraction carbonée (> 800 °C). Cependant, ces filtres sont caractérisés par une énorme teneur en Si qui empêche la détection des éléments légers. Un autre problème lié à l'utilisation de filtres en quartz est la possibilité, décrite à plusieurs reprises dans la littérature, que ce matériau absorbe des composés organiques gazeux pendant la phase d'échantillonnage, dont la masse s'ajoute à celle des particules, produisant des artefacts positifs qui peuvent être quantitativement importants. Pour contrôler ce phénomène, on a évalué le « blanc de terrain », qui n'est pas échantillonné tout en restant exposé aux mêmes conditions atmosphériques que les autres échantillons pendant toute la période. Les blancs de terrain ont été analysés selon la même procédure que les autres échantillons et soustraits des valeurs des composants individuels des PM10. Il s'agit donc à nouveau d'un redressement moyen, dont l'incertitude est néanmoins prise en compte dans l'évaluation de l'exactitude globale.

Le tableau montre les valeurs moyennes et les écarts types des concentrations des composants des PM10 détectés à Corso Firenze et San Teodoro respectivement. La deuxième colonne indique la limite de détection (MDL) : lorsque la concentration détectable sur un échantillon était inférieure à la limite de

détection (MDL), on lui a attribué une valeur indicative égale à la moitié de cette limite (MDL/2). Les éléments/composés dont les concentrations étaient fréquemment inférieures à la MDL peuvent être identifiés dans les deux tableaux car ils présentent une concentration moyenne proche (ou dans certains cas inférieure) de la MDL.

Tableau 5.1.4: Concentration moyenne des composants (A) et écart-type (S.D.) des PM10 collectées sur les sites de Corso Firenze et San Teodoro (ng/m³).

E	MDL (ng/m ³)	CORSO FIRENZE		SAN TEODORO	
		Été 2021	Printemps 2022	Été 2021	Printemps 2022
		A ± S.D. (ng/m ³)	A ± S.D. (ng/m ³)	A ± S.D. (ng/m ³)	A ± S.D. (ng/m ³)
Al	5	316 ± 341	199 ± 166	275 ± 358	182 ± 177
Ti	2	38 ± 34	28 ± 17	26 ± 33	17 ± 11
V	1	6 ± 7	5 ± 5	10 ± 17	18 ± 23
Cr	1	7 ± 6	6 ± 6	3 ± 4	7 ± 6
Mn	2	11 ± 6	7 ± 6	8 ± 4	7 ± 3
Fe	2	646 ± 331	527 ± 238	436 ± 306	327 ± 170
Ni	1	6 ± 5	7 ± 5	11 ± 10	22 ± 18
Cu	1	16 ± 5	15 ± 6	9 ± 4	8 ± 4
Zn	1	22 ± 16	23 ± 13	17 ± 12	19 ± 17
Sr	2	5 ± 3	3 ± 4	4 ± 3	4 ± 4
Zr	4	5 ± 3	2 ± 1	3 ± 2	2 ± 1
Pb	3	14 ± 17	7 ± 5	6 ± 6	6 ± 6
Cl ⁻	21	150 ± 317	634 ± 1510	85 ± 255	408 ± 1065
SO ₄ ²⁻	35	2128 ± 1242	1894 ± 976	2409 ± 1407	2407 ± 1456
NO ₃ ⁻	35	858 ± 680	1332 ± 679	565 ± 496	922 ± 525
NH ₄ ⁺	21	127 ± 220	135 ± 207	291 ± 364	373 ± 401
Na ⁺	1	487 ± 466	831 ± 1002	483 ± 494	699 ± 790
K ⁺	1	42 ± 34	71 ± 34	47 ± 71	76 ± 39
Mg ²⁺	1	390 ± 200	348 ± 178	70 ± 73	111 ± 81
Ca ²⁺	1	1275 ± 552	864 ± 465	421 ± 210	329 ± 208
OC	35	2743 ± 897	2396 ± 907	2503 ± 1178	2365 ± 1051
EC	35	780 ± 371	836 ± 408	730 ± 407	905 ± 509
Levoglucozano	7	72 ± 29	32 ± 13	71 ± 69	38 ± 29

La figure montre la composition moyenne des analytes mesurés dans les PM10 lors des deux campagnes sur les deux sites retenus. Les données montrent que les concentrations relatives des composants identifiés sont assez homogènes sur les deux sites. Les concentrations de sulfates sont légèrement plus élevées à San Teodoro tandis que celles des métaux, des ions calcium et des nitrates sont plus élevées à Corso Firenze. En moyenne, les espèces chimiques analysées représentent environ 60 % des PM10 mesurées, conformément à ce qui est indiqué dans la littérature (Cesari et al., 2016 ; Perrone et al., 2012).

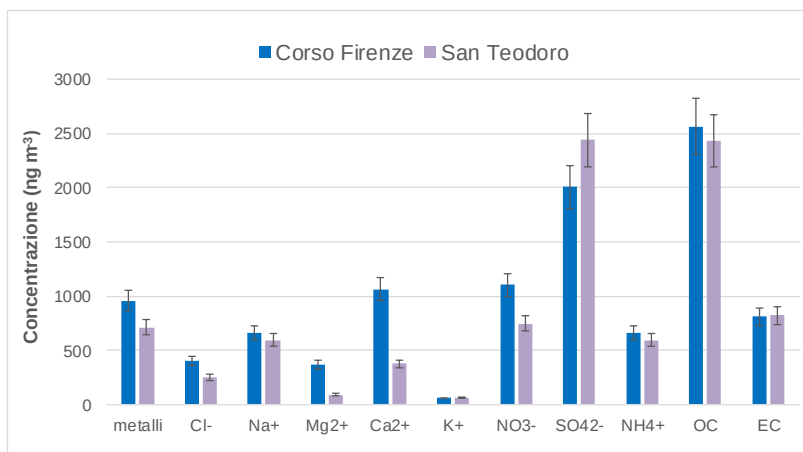


Figure 5.1.2: Contenu des éléments mesurés dans les PM10 lors des deux campagnes.

En milieu urbain, la fraction carbonée et les composés secondaires inorganiques (sulfates, nitrates et ammonium) représentent une part importante des PM10. Un pourcentage élevé d'ions Ca^{2+} et Mg^{2+} peut également être observé sur le site de Corso Firenze, car la zone piétonne entourant la station de mesure n'est pas bitumée et est recouverte d'un matériau mixte stabilisé à forte teneur en calcaire.

Bilan chimique et bilan de masse

Les résultats issus des analyses chimiques ont été utilisés pour estimer les principales macro-sources de PM10. Cela a permis de reconstituer la masse mesurée et d'obtenir une première estimation de la composition moyenne et de l'apport des principales sources de PM10 en accord avec ce qui a été signalé dans la littérature concernant le bilan de masse (Perrino et al., 2009., Bove et al., 2016).

Les données relatives aux ions Potassium, Ammonium, Nitrate et Sulfate sont celles mesurées par chromatographie ionique.

Les valeurs de Sulfate non marin, nss-SO_4^{2-} ont été obtenues en soustrayant le composant de sulfates présent dans l'eau de mer du composant total de sulfates (Bove et al., 2016) ; avec les ions nitrate et ammonium, ils constituent l'aérosol secondaire inorganique, formé de SO_x , NO_x et NH_3 :

$$\text{SIA} = \text{nss-SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$$

L'apport du Sel marin (sea salt) a été calculé en utilisant les données de composition moyenne de l'eau de mer (Bove et al., 2016).

L'apport Crustal (mineral dust) a été calculé en additionnant la concentration des éléments généralement associés à la poussière minérale et en supposant qu'ils existent sous forme d'oxydes = $1.15 \cdot (1.89 \text{ Al} + 2.14 \text{ Si} + 1.67 \text{ Ti} + 1.4 \text{ Ca}^{2+} + 1.2 \text{ K}^+ + 1.36 \text{ Fe})$ avec la concentration de carbonates calculée à partir du calcium et du magnésium comme $(1.5 \text{ Ca}^{2+} + 2.5 \text{ Mg}^{2+})$. Comme le Ca n'est disponible que dans la fraction soluble, il a été inclus à la fois comme oxyde et comme carbonate. Le facteur 1,15 prend en compte la conversion de l'oxygène en oxyde mais aussi la part des oxydes de Mg et de Na qui ne sont pas inclus dans la formule mais font partie du crustal et ont été mesurés dans la fraction soluble comme ions (Marcazzan et al., 2001 ; Perrino et al., 2014). L'absence de valeurs de concentration de Si mesurées, en raison de la forte teneur en silicium de la matrice de la membrane filtrante pourrait avoir entraîné une sous-estimation de l'apport crustal calculé comme dans la formule ci-dessus.

L'apport de l'aérosol primaire anthropique (PPA), dénommé Emissions des véhicules, est obtenu comme suit : $\text{PAA} = \text{EC} + \text{OC}_{\text{prim}}$ (Perrino et al., 2009) car on considère qu'il est constitué de carbone élémentaire provenant directement des émissions de combustion, plus une partie de carbone organique primaire estimée comme $\text{OC}_{\text{prim}} = \text{EC} \cdot 1.1$ (Viidanoja et al., 2002); cette dernière tient compte des composés organiques qui se condensent à partir des effluents gazeux et recouvrent la surface des particules de carbone élémentaire (Castro et al., 1999).

L'apport de l'Aérosol organique (OM), dont la plupart est d'origine secondaire, a été obtenu en multipliant le carbone organique non primaire OC par un facteur de conversion, qui estime le poids organique moléculaire moyen par unité de carbone de l'aérosol atmosphérique. Ce dernier dépend de la composition de l'aérosol (par exemple, les aérosols âgés présentent un poids moléculaire organique par unité de carbone plus élevé que les particules fraîchement émises) et varie en fonction du site d'échantillonnage : 2,1 pour l'aérosol non urbain et 1,6 pour l'aérosol urbain (Turpin et Lim, 2001) ; nous avons utilisé ici 1,8 car il s'agit de sites de fond urbains.

Les figures ci-dessous montrent de manière analogue les apports des principales macro-sources de PM10 décrites ci-dessus, lors des deux campagnes considérées sur les deux sites :

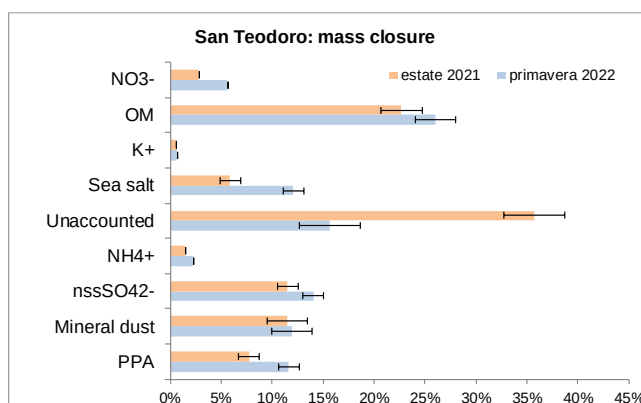


Figure 5.1.3: Bilan de masse des PM10 dans les deux saisons à San Teodoro-Largo San Francesco da Paola.

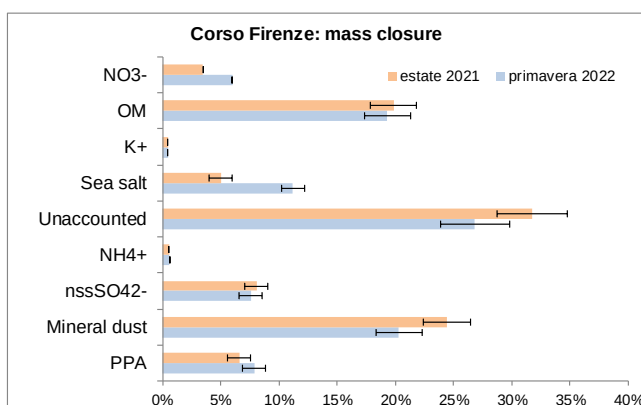


Figure 5.1.4: Bilan de masse des PM10 dans les deux saisons à Corso Firenze.

La comparaison des deux sites montre une situation assez similaire et homogène, avec toutefois quelques différences locales ; elle montre également que :

- L'apport de l'aérosol organique est le plus important sur le site de San Teodoro, tandis que l'apport crustal est majoritaire à Corso Firenze ;
- Le sel marin est plus important au printemps ;
- L'apport de l'aérosol secondaire inorganique est légèrement plus élevé à San Teodoro ;
- L'apport non expliqué est plus faible au printemps lorsque les phénomènes photochimiques et la volatilisation des éléments mesurés sont réduits.

Identification et caractérisation des sources

L'analyse de la répartition des sources (*source apportionment*), c'est-à-dire l'évaluation quantitative de l'apport de chaque « source » à la concentration totale des PM₁₀, a été réalisée au moyen du modèle récepteur dénommé « *Positive Matrix Factorization* » (Paatero et Tapper, 1994 ; Paatero, 1997), qui est aujourd'hui l'instrument de référence pour ce type d'évaluation (Bove et al., 2014. ; Belis et al., 2015).

Le but de cette activité est d'évaluer l'apport des différentes sources aux PM₁₀ relevées sur les deux sites. Un ensemble plus large de données réparties sur plusieurs saisons et conditions météorologiques permet de mieux étudier les caractéristiques des émissions et l'impact des principales sources dans la zone urbaine de Gênes. La topographie caractéristique de la zone d'étude entraîne inévitablement un mélange des émissions des différentes sources, anthropiques et naturelles, surtout en période de stabilité atmosphérique.

L'analyse au moyen du logiciel EPA PMF 5.0 (Paatero, 2010) a été appliquée à l'ensemble des données obtenues à partir de l'analyse de la composition de tous les échantillons de PM₁₀ obtenus. Dans cette étude, les paramètres de la signification statistique ont été respectés (Thurston et Spengler, 1985) et, en outre, les critères suivants ont été retenus/adoptés (il s'agit d'aspects techniques qui ne seront pas commentés) :

- Les concentrations et les incertitudes des variables d'entrée ont été intégrées conformément au critère signal/bruit (Paatero et Hopke, 2003) ;
- La masse gravimétrique des PM₁₀ a été intégrée dans l'ensemble de données d'entrée et traitée comme une « variable faible », en augmentant l'erreur de 400 %.

Le jeu de données d'entrée du modèle PMF a été préparé pour chaque site en considérant toutes les données collectées comme pouvant être référées au même jeu de données. Cette approche est souvent utilisée dans les applications des techniques PMF où sont agrégées les données provenant d'échantillons de particules de différentes tailles (Amato et al., 2009 ; Contini et al., 2014) ou de particules collectées sur différents sites ou à différentes saisons (Pandolfi et al., 2011 ; Contini et al., 2012 ; Cesari et al., 2016). L'objectif est d'augmenter la signification statistique de l'analyse, tout en supposant des profils de sources essentiellement stables sur les périodes d'observation.

Sur les deux sites, les sources communes de PM₁₀ suivantes (facteurs, dans la terminologie PMF, traceurs indiqués entre parenthèses) ont été identifiées : « Aérosol marin » (Na⁺, Cl⁻), « Sol » (Al, Ti, Mn, Ca), « Trafic urbain » (EC, OC, Cu, Zn), « Émissions des navires » (V, Ni), « Combustion de biomasse » (Levoglucosan, OC, K), deux sources secondaires : « Sulfates » (SO₄²⁻, NH₄⁺) et « Nitrates » (NO₃⁻, Na⁺) et une source nommée « Resuspension locale » (Ca²⁺, Mg²⁺, Pb) pour le site de Corso Firenze.

La PMF, comme tout modèle récepteur, est un instrument « descriptif » qui vise à réduire la complexité de la composition des particules atmosphériques à la somme discrète de quelques facteurs d'émission appelés sources. Cet exercice, inévitablement approximatif, nécessite une série de vérifications basées sur des comparaisons avec les profils d'émission des sources naturelles, souvent connus a priori de façon assez précise, et avec les données disponibles dans la littérature provenant d'études antérieures.

La source dénommée « *Émissions des navires* » tracée par V et Ni est associée à la combustion d'huiles lourdes du trafic maritime (Cesari et al., 2014 ; Gregoris et al., 2015). Dans cette étude, le rapport est légèrement inférieur à la moyenne de la ville relativement à d'autres sites de Gênes, comme cela a été constaté dans des études des années passées, $\langle V/Ni \rangle = 2,7 \pm 0,7$ (Mazzei et al., 2008 ; Bove et al., 2014 ; Cesari et al., 2016). Le rapport de concentration moyen $\langle V/Ni \rangle$ est égal au rapport mesuré et plus proche du rapport en littérature dans le jeu de données de Largo San Francesco da Paola - San Teodoro, où l'apport est plus élevé que celui de Corso Firenze. L'évolution temporelle de la source caractérisée par la combustion d'huiles lourdes liée aux « *Émissions des navires* » montre une augmentation du trafic naval, en particulier au printemps de l'année 2022, après une diminution au cours des années de pandémie. La source montre également une augmentation pendant les jours du week-end de Pâques (voir figure ci-dessous), confirmant ainsi ce qui a été constaté plus haut pour les NO₂ dans l'étude de cas rapportée aux paragraphes précédents sur le site de San Teodoro- Largo San Francesco da Paola.

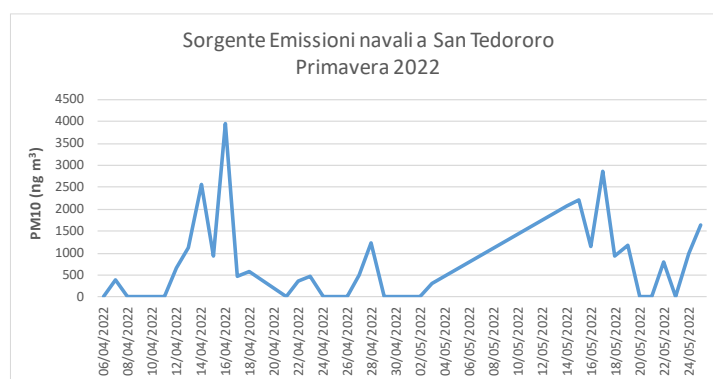


Figure 5.1.5. Évolution temporelle de la source associée aux émissions des navires au printemps 2022.

5.2. SARDAIGNE

• Zone du port de Cagliari

ARPAS

Le tableau suivant montre les valeurs moyennes de chaque métal et du benzo(a)pyrène, contrôlées dans le port de Cagliari pendant la période de mesure du 04/10/2021 au 31/08/2022, par rapport aux données disponibles dans les stations de la zone urbaine.

Tableau 5.2.1: Zone de Cagliari - Concentrations d'As, de Cd, de Hg, de Ni, de Pb et de BaP dans la fraction PM10.

PORT DE CAGLIARI	As ng/m ³	Cd ng/m ³	Hg ng/m ³	Ni ng/m ³	Pb ng/m ³	BaP ng/m ³
LABCAG	0,273	0,093	0,063	1,548	4,012	0,143
CENCA1	0,236	0,057	0,062	1,110	2,679	0,169
CENMO1	0,234	0,098	0,062	1,196	3,325	0,423
CENQU1^(*)	0,296	0,147	0,061	1,278	4,100	0,248
(*) = mesure indicative						

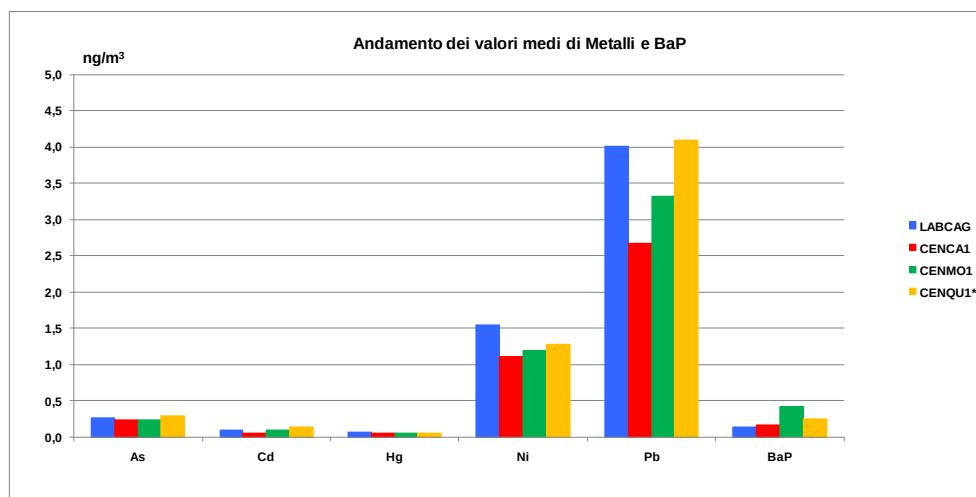


Figure 5.2.1: Tendence des valeurs moyennes des métaux et BaP dans le site portuaire de Cagliari.

En général, au Port de Cagliari, les concentrations de métaux et de BaP dans la fraction PM10 sont comparables à celles mesurées par les stations urbaines situées dans la zone, avec des valeurs moyennes très basses, bien en deçà des valeurs cibles prescrites par la réglementation.

UNICA

Le monitoring effectué à Cagliari a montré quelques différences entre les deux campagnes: en hiver, la direction du vent est prédominante à partir du quadrant IV (ONO-NO) avec des températures moyennes de 12 °C, tandis qu'en été, elle provient du quadrant II (SSE-SE) avec des températures moyennes de 28 °C. Toutes les stations sont situées sous le vent de ces directions dominantes, et comme la zone portuaire est orientée ONW-SSE, en hiver le vent a probablement tendance à pousser les contaminants hors de cette zone, vers la mer, mais en même temps il transporte les contaminants des routes adjacentes à la zone portuaire et de la zone industrielle proche, qui sont principalement de nature véhiculaire. Ce fait pourrait expliquer les concentrations plus élevées de BTEX détectées aux stations MS et MP. En été, avec des vents provenant du quadrant II et un trafic maritime beaucoup plus important qu'en période hivernale, des concentrations plus élevées de contaminants tels que NO₂ et SO₂ sont enregistrées.

• Zone du port d'Olbia

Le tableau suivant montre les valeurs moyennes de chaque métal et du benzo(a)pyrène, contrôlées dans le port d'Olbia pendant la période de mesure du 29/10/2021 au 31/08/2022, par rapport aux données disponibles dans les stations de la zone urbaine.

Tableau 5.2.2: Zone d'Olbia - Concentrations d'As, de Cd, de Hg, de Ni, de Pb et de BaP dans la fraction PM10

PORT D'OLBIA	As ng/m ³	Cd ng/m ³	Hg ng/m ³	Ni ng/m ³	Pb ng/m ³	BaP ng/m ³
LABOLB	0,197	0,030	0,061	2,250	1,494	0,161
CENS10^(*)	0,200	0,046	0,061	1,338	1,428	0,152
CEOLB1^(*)	0,237	0,054	0,061	2,140	2,138	0,197
(*) = mesure indicative						

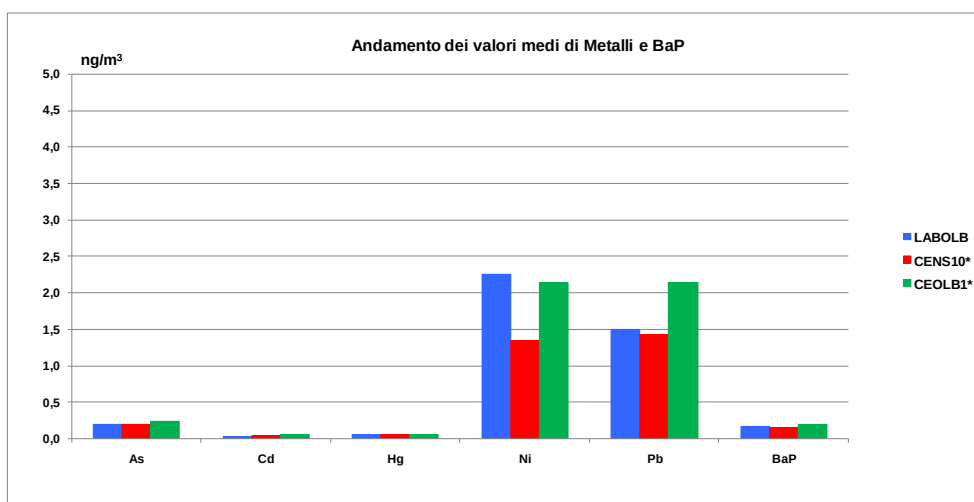


Figure 5.2.2: Tendance des valeurs moyennes des métaux et BaP dans le site portuaire d'Olbia.

En général, au port d'Olbia, les concentrations de métaux et de BaP dans la fraction PM10 sont comparables à celles mesurées par les stations urbaines situées dans la zone, avec des valeurs moyennes résolument basses, bien en deçà des valeurs cibles prescrites par la réglementation.

UNICA

Le port d'Olbia a un trafic maritime commercial et de passagers nettement supérieur à celui de Cagliari, qui augmente considérablement en été. En hiver, la direction du vent est celle du quadrant III (OSO-SSO) avec des températures moyennes de 11 °C, tandis qu'en été, ce sont les vents du quadrant I (ENE) qui prédominent et la température moyenne est de 26 °C. Les valeurs de BTEX et de benzène enregistrées en hiver sont plus élevées dans toutes les stations, avec des maximums à OP et OC, et probablement, étant sous le vent de la direction ESE, sont influencées par différents types de contamination, à la fois véhiculaire et autre; en été, lorsque la direction du vent dominant est ENE, elles sont toutes deux plus faibles, à l'exception de la seule station OM, où le BTEX montre la plus forte concentration détectée; probablement la position particulière de cette station mérite une considération plus approfondie. Les concentrations de NO₂, dans les deux campagnes hiver-été, ne montrent pas de variations significatives des paramètres échantillonnés dans les stations situées à l'extérieur de la zone portuaire, mais montrent au contraire une augmentation des valeurs dans les stations situées à l'intérieur du bassin portuaire et à proximité des quais des navires, sous le vent de la direction ENE; les valeurs de dioxyde de soufre de la campagne d'hiver sont également inférieures au seuil de détection, mais augmentent en été, la concentration la plus élevée étant détectée au cours des deux campagnes à la station IB (située sur un quai où accostent la plupart des navires à passagers). Les HAP présentent des concentrations plus

élevées en hiver et plus faibles en été, tandis que la tendance pour les PCB est similaire pour les deux saisons.

5.3. TOSCANE

Identification des sources possibles de NO₂, NO et SO₂

Afin d'identifier les sources possibles de pollution, les données minute pour les paramètres NO₂, NO, SO₂, PM10, PM2.5 et PM1 ont été analysées et corrélées avec les données d'intensité et de direction du vent fournies par la station du site <https://www.mareografico.it>.

L'analyse de la distribution des valeurs élémentaires des polluants gazeux a fourni les résultats résumés dans les tableaux suivants pour les sites de Fortezza Vecchia et Calata Bengasi.

Tableau 5.3.1: Nombre de données élémentaires utilisées pour le traitement des polluants gazeux NO₂, NO, SO₂.

Nombre de données élémentaires				
Site	Estate	Autunno	Inverno	Primavera
Fortezza Vecchia	27359	72000	70345	47523
Calata Bengasi	40319	51830	71952	84890

Tableau 5.3.2: Valeurs minimales, maximales et centiles des polluants gazeux NO₂, NO, SO₂.

	Fortezza Vecchia											
	NO ₂ µg/m ³				NO µg/m ³				SO ₂ µg/m ³			
	Été	Automne	Hiver	Printemps	Été	Automne	Hiver	Printemps	Été	Automne	Hiver	Printemps
Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25° centile	6	8	12	10	1	1	0	0	1	1	1	1
50° centile	13	13	24	19	2	1	2	2	2	1	2	1
75° centile	26	26	41	40	7	5	14	10	3	2	4	2
98° centile	88	86	89	118	84	121	177	166	9	10	21	7
Maximum	520	870	751	1070	807	1216	1113	1118	144	477	479	1139

	Fortezza Vecchia											
	NO ₂ µg/m ³				NO µg/m ³				SO ₂ µg/m ³			
	Été	Automne	Hiver	Printemps	Été	Automne	Hiver	Printemps	Été	Automne	Hiver	Printemps
Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25° centile	6	8	12	10	1	1	0	0	1	1	1	1
50° centile	13	13	24	19	2	1	2	2	2	1	2	1
75° centile	26	26	41	40	7	5	14	10	3	2	4	2
98° centile	88	86	89	118	84	121	177	166	9	10	21	7
Maximum	520	870	751	1070	807	1216	1113	1118	144	477	479	1139

	Calata Bengasi											
	NO ₂ µg/m ³				NO µg/m ³				SO ₂ µg/m ³			
	Été	Automne	Hiver	Printemps	Été	Automne	Hiver	Printemps	Été	Automne	Hiver	Printemps
Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25° centile	13	10	17	13	1	0	1	0	2	4	0	0
50° centile	23	20	28	23	2	2	5	2	3	4	1	1
75° centile	38	34	44	38	7	8	14	8	4	5	2	1
98° centile	93	80	85	83	50	65	84	57	9	13	7	5
Maximum	267	347	522	846	913	1104	1029	531	26	42	71	83

Malgré quelques valeurs maximales cohérentes pour les NO_x et le SO₂, les 98° centiles montrent que plus de 98 % des valeurs élémentaires étaient définitivement contenues sur les deux sites.

L'analyse de la distribution dans les quatre quartiles montre également que pour les NO_x, les 75° centiles étaient toujours inférieurs à 50 µg/m³ pour le NO₂, et à 15 µg/m³ pour le NO, tandis que pour le SO₂, 75 % des données étaient inférieures à 5 µg/m³. Les trois premiers quartiles des valeurs élémentaires sont donc représentés par des concentrations très faibles ou négligeables avec des valeurs minimales nulles.

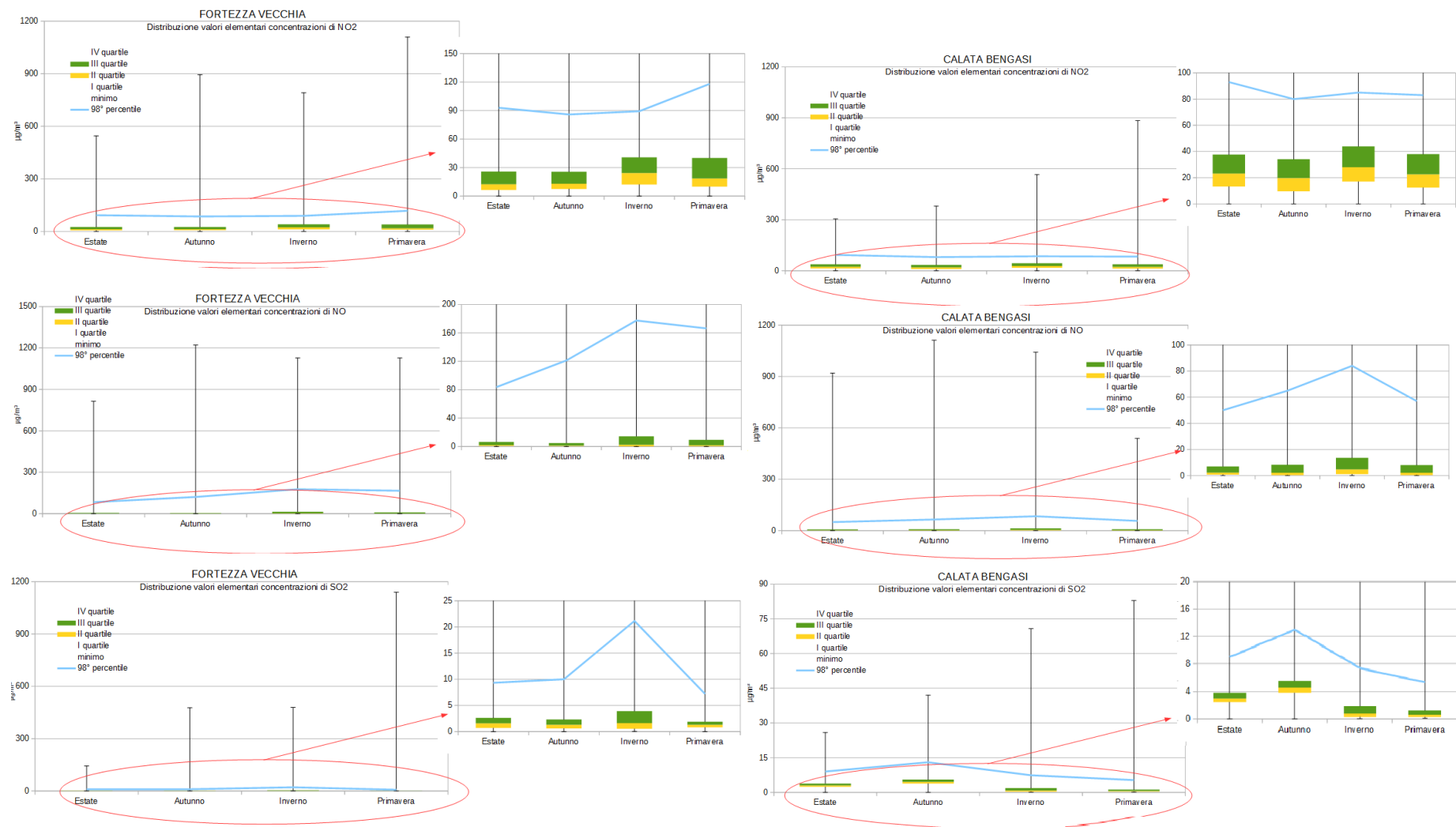


Figure 5.3.1: BoxPlots obtenus avec les valeurs moyennes par minute NO₂, NO, SO₂ pour les sites de Fortezza Vecchia et Calata Bengasi.

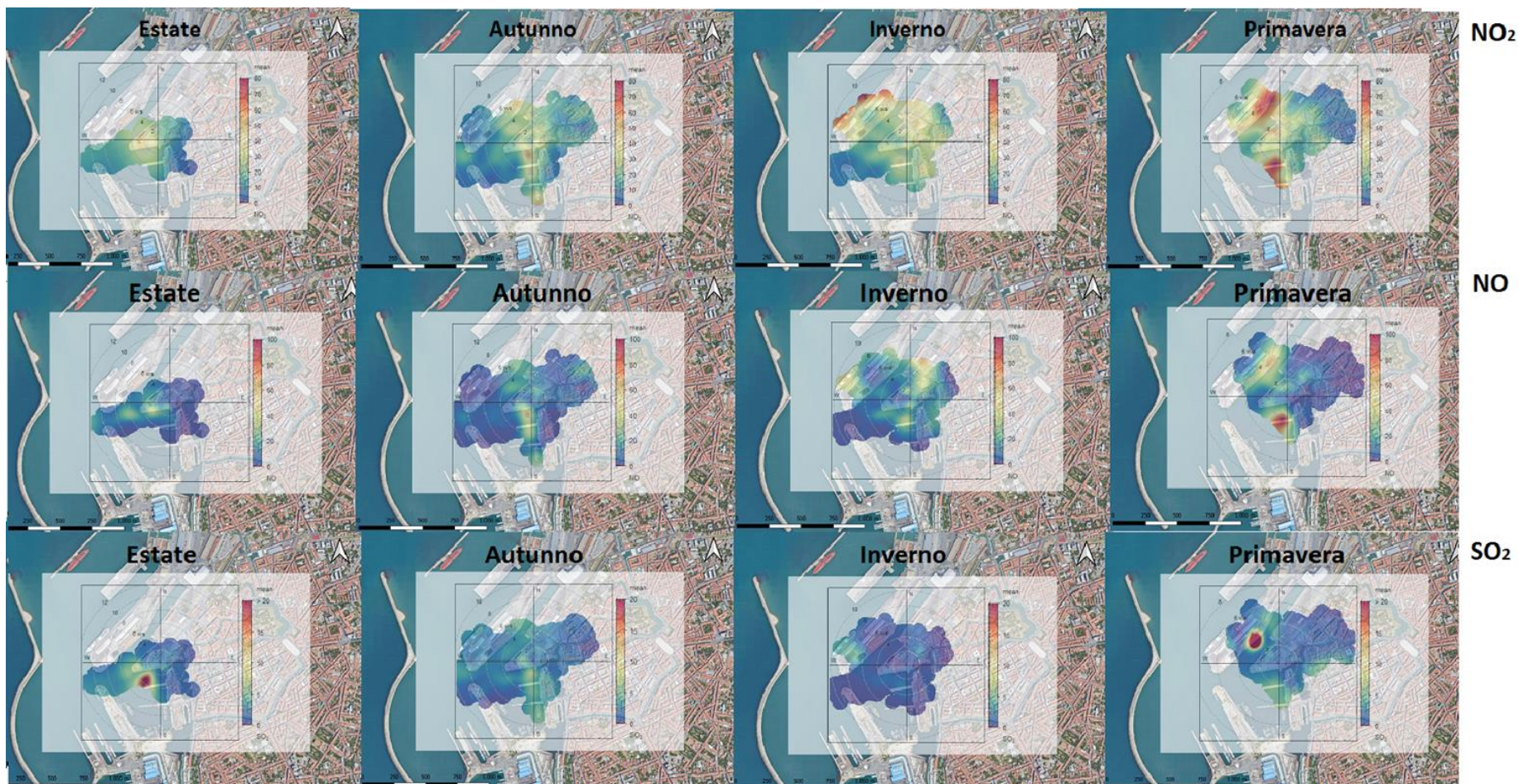


Figure 5.3.2: PolarPlots saisonniers obtenus avec les valeurs moyennes par minute NO_2 , NO , SO_2 pour Fortezza Vecchia.

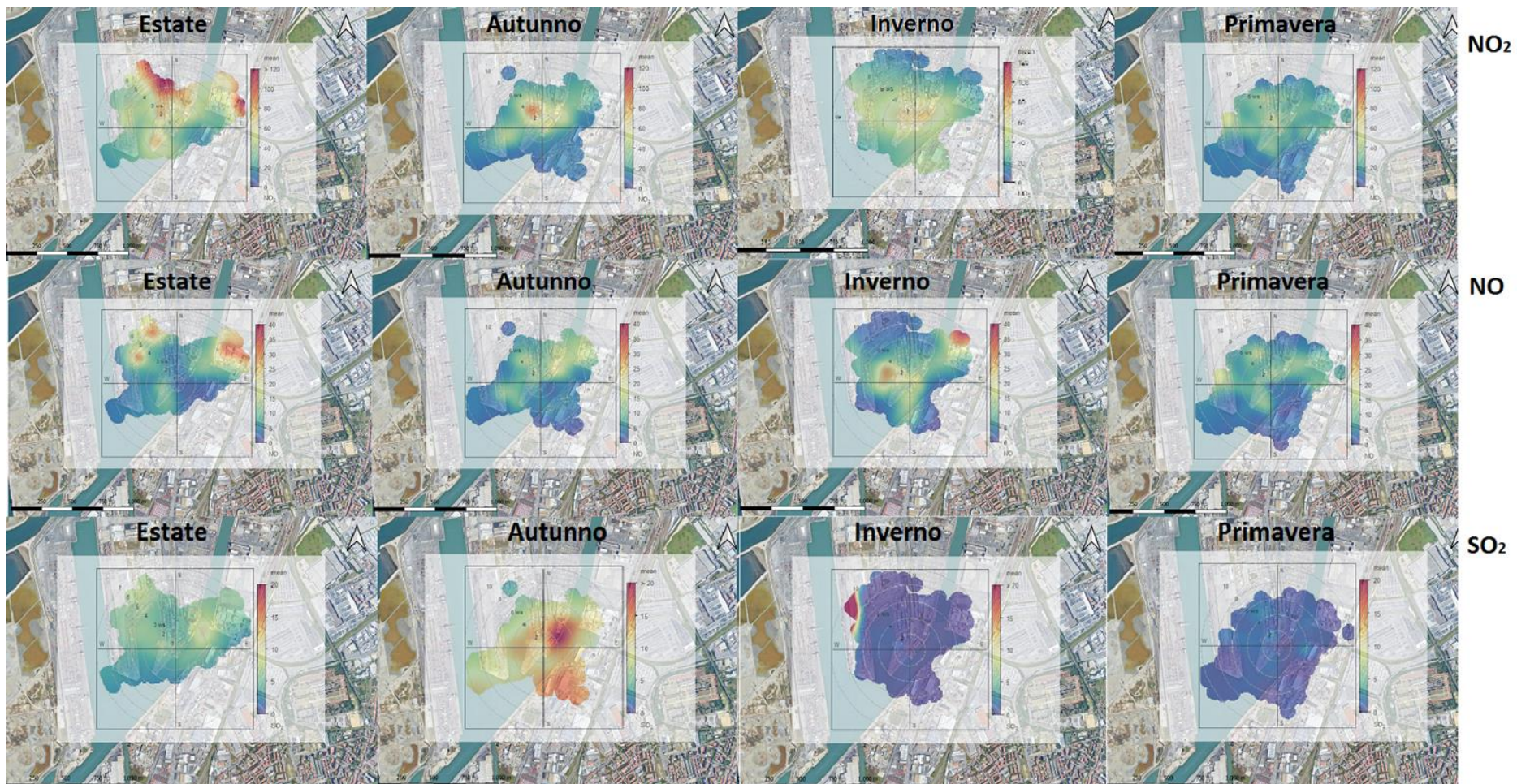
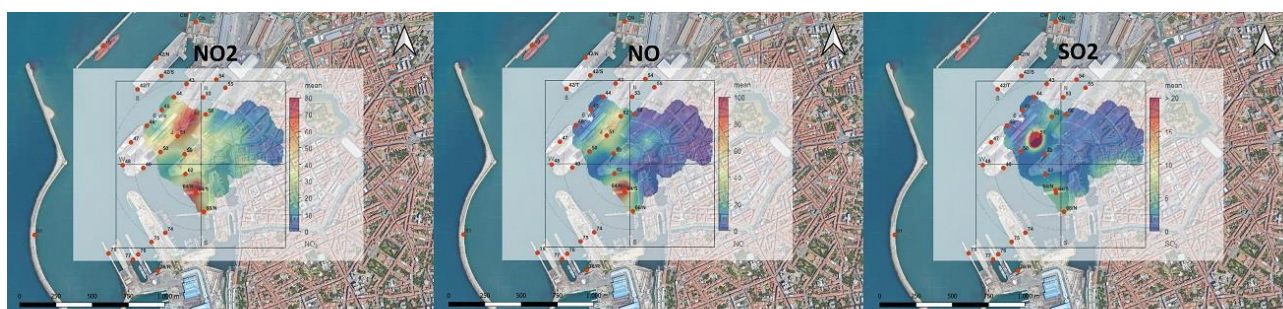


Figure 5.3.3: PolarPlots saisonniers obtenus avec les valeurs moyennes par minute NO_2 , NO , SO_2 pour Calata Bengasi.

En corrélant les valeurs moyennes par minute avec les données météorologiques, on a obtenu des graphiques PolarPlot qui, représentés sur une carte, décrivent les directions de vent préférentielles pour lesquelles les valeurs les plus élevées de polluants gazeux ont été enregistrées (orange-rouge). N'oubliez pas que les données les plus élevées, de couleur orange-rouge, représentent une très petite partie de la période d'échantillonnage et donc des événements isolés.

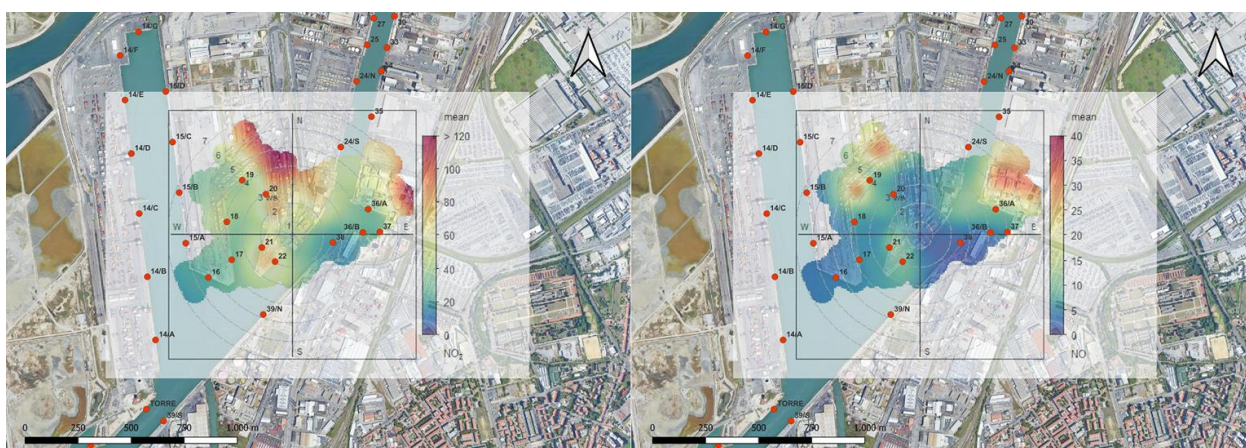
Sur le site de Fortezza Vecchia, les concentrations les plus élevées de NO₂, NO et SO₂ ont été enregistrées avec un vent provenant des quais les plus proches du site, c'est-à-dire aux points d'accostage, de manutention et de départ des ferries, qui sont situés respectivement au N/NO et au S du site d'échantillonnage. Les graphiques PolarPlot pour la période du printemps sont présentés à titre d'exemple, avec les points d'amarrage près du site identifiés.



FORTEZZA VECCHIA PRIMAVERA

Figure 5.3.4: Identification des postes d'amarrage, site de Fortezza Vecchia.

De même que ce qui a été observé pour le site de Fortezza Vecchia, sur le site de Calata Bengasi, les concentrations les plus élevées de NO₂, NO et SO ont également été enregistrées avec un vent provenant des directions dans lesquelles se trouvent les canaux proches du site qui accueillent les points d'amarrage, de manutention et de départ des navires marchands et commerciaux, dans les directions W/NW et N/NE, ainsi que de la direction S où a lieu la manutention des navires les plus proches du site. Les graphiques PolarPlot des NO_x pour la période du printemps sont présentés à titre d'exemple, avec les points d'amarrage près du site identifiés.



CALATA BENGASI PRIMAVERA

Figure 5.3.5: Identification des postes d'amarrage, site de Calata Bengasi.

L'analyse des valeurs élémentaires semble donc indiquer que sur les deux sites d'enquête, les valeurs de concentration les plus élevées de polluants gazeux ont été produites par des sources portuaires proches des sites d'échantillonnage.

Identification des sources possibles de PM1, PM2.5 et PM10.

L'OPC, Optical Particle Counter, si basa su un principio di misura ottico ed il dato misurato è il numero di particelle. La massa delle tre frazioni PM10, PM2.5 e PM1 viene calcolata dallo strumento in base alle distribuzioni dei conteggi nelle classi granulometriche e, per quanto riguarda lo strumento utilizzato (Grimm 11A) non è presente una certificazione di conformità alla norma EN 12341. I dati dell'OPC sono trattati come dati grezzi e non subiscono processi di validazione. I dati a livello giornaliero sono confrontati, ove possibile, con il metodo di riferimento come indicato nel capitolo 3.

En ce qui concerne les fractions de matière particulaire, l'analyse de la distribution des valeurs élémentaires a fourni les résultats résumés ci-dessous pour les sites de Fortezza Vecchia et Calata Bengasi.

Deux enquêtes ont été menées sur le site de Fortezza Vecchia et trois enquêtes sur le site de Calata Bengasi avec le compteur optique de particules (OPC). Les graphiques BoxPlot montrent la valeur maximale, la valeur minimale et la zone entre le 25° et le 75° centile, décrivant les distributions des données PM10, PM2.5 et PM1 minute pour chaque campagne.

Pour toutes les distributions, on remarque que 75 % des données moyennes par minute sont inférieures à 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Sur le site de Fortezza Vecchia, les valeurs maximales sont beaucoup plus élevées pour toutes les fractions que sur le site de Calata Bengasi. Le nombre total de particules montre également des valeurs maximales plus élevées à Fortezza Vecchia et des valeurs moyennes comparables sur les deux sites.

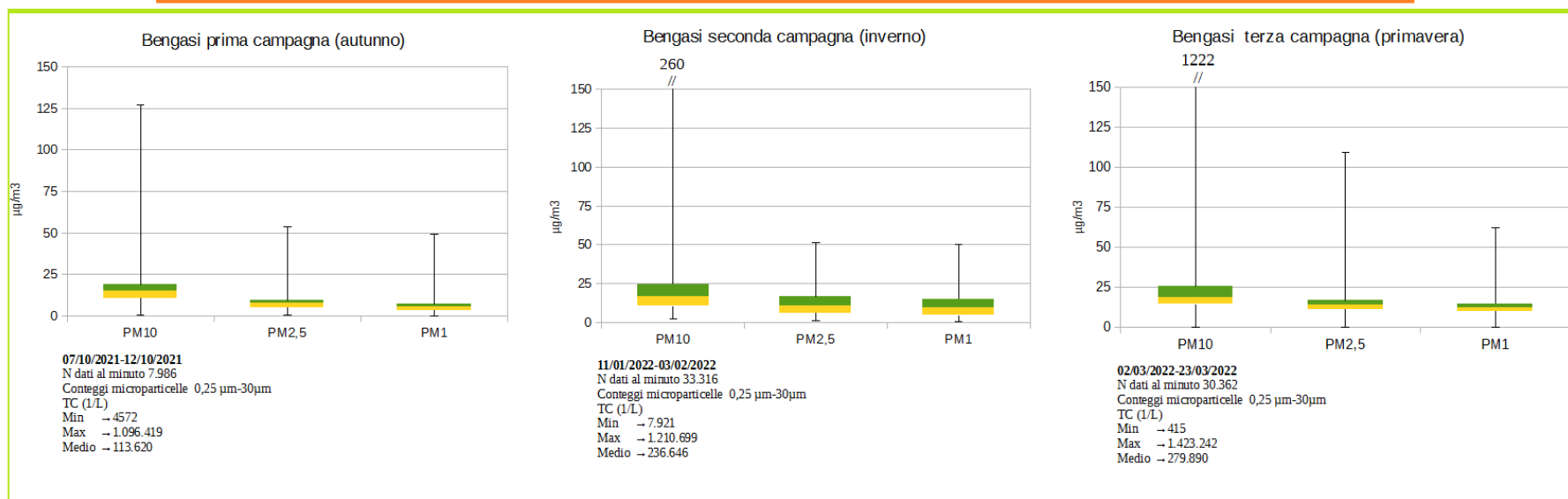
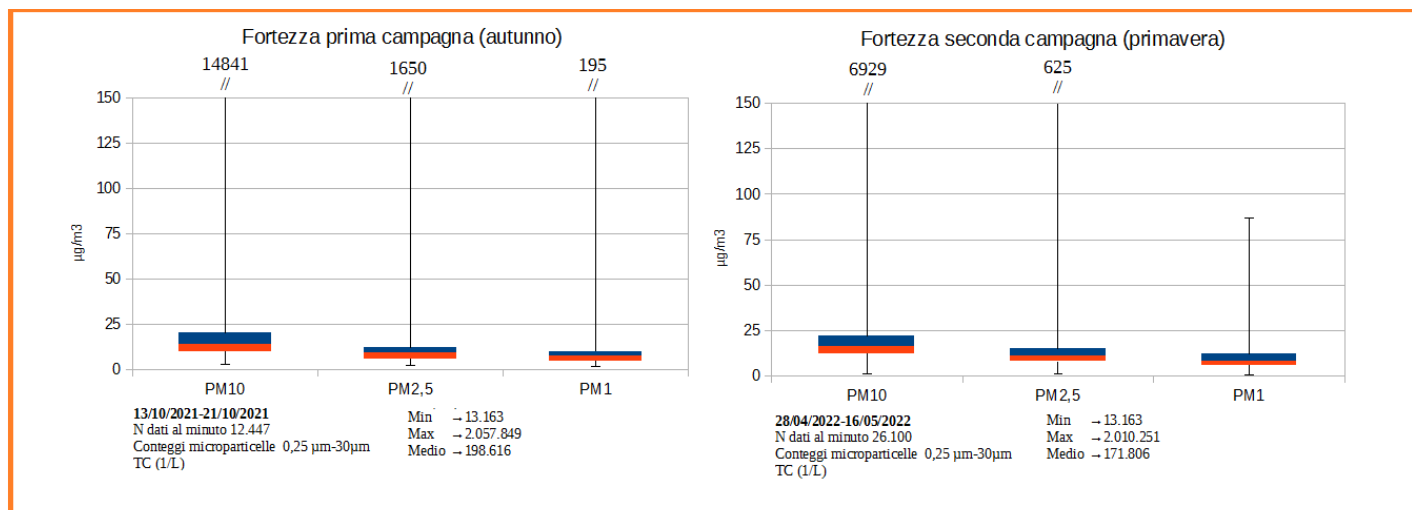


Figure 5.3.6: BoxPlots obtenus avec les valeurs moyennes par minute PM1, PM2.5, PM10 pour les sites de Fortezza Vecchia et Calata Bengasi.

Un graphique BoxPlot résumant l'ensemble des données mesurées sur chaque site est présenté. Dans ce graphique, le 98° centile a été utilisé au lieu de la valeur maximale pour mieux mettre en évidence les différences entre les distributions, en laissant de côté les valeurs extrêmes.

Comme on peut le constater, les distributions sont très similaires et, pour toutes les fractions, les données sont décalées vers des médianes légèrement plus élevées sur le site de Calata Bengasi. Sur le site de Calata Bengasi, l'écart interquartile est plus grand, c'est-à-dire que la variabilité des données autour de la médiane est plus importante, et pour les PM10 uniquement, les « segments supérieurs/inférieurs » sont nettement plus élevés sur le site de Fortezza Vecchia.

Tableau 5.3.3: Comparaison des sites de Fortezza Vecchia et Calata Bengasi : Valeurs minimales, 25° centile, 50° centile, 75° centile et 98° centile.

	PM10		PM2.5		PM1	
	Fortezza Vecchia	Calata Bengasi	Fortezza Vecchia	Calata Bengasi	Fortezza Vecchia	Calata Bengasi
Minimum	1	0	1	0	1	0
25° centile	12	12	7	8	6	7
Médiane	16	17	10	12	8	10
75° centile	22	24	14	16	11	14
98° centile	181	60	31	29	20	26

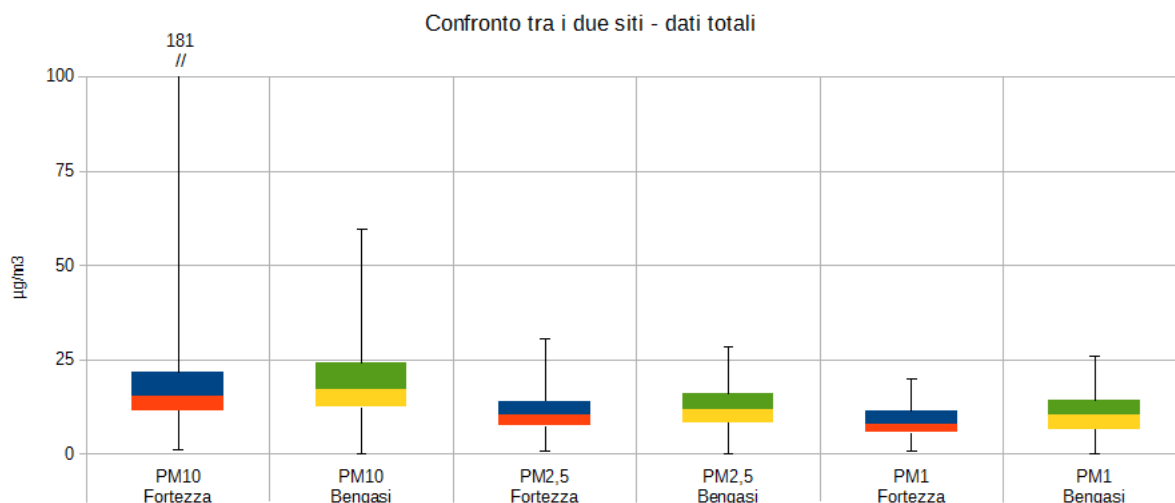


Figure 5.3.7: Comparaison des sites de Fortezza Vecchia et Calata Bengasi : BoxPlots obtenus à partir du traitement global de toutes les enquêtes.

Le graphique suivant montre les courbes cumulatives de la fraction des particules inférieures à une certaine valeur. Comme on peut le voir, pour les comptages comme pour les masses, le site de Fortezza Vecchia présente des valeurs maximales plus élevées que Calata Bengasi, mais jusqu'à une fraction de 90 % des données, les comptages à Calata Bengasi sont plus élevés que ceux de Fortezza Vecchia.

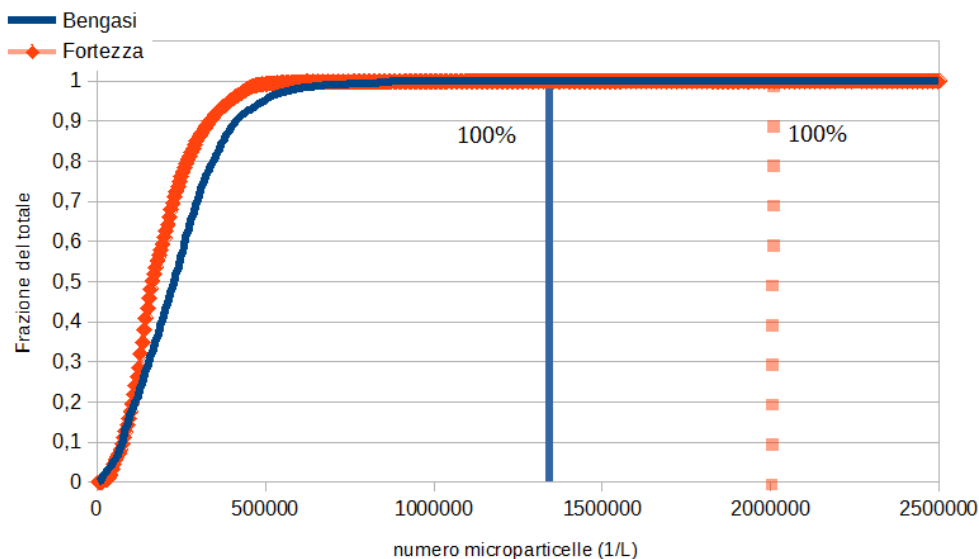


Figure 5.3.8: Courbes de fractionnement cumulatif des particules: comparaison entre les sites de Fortezza Vecchia et Calata Bengasi.

Les graphiques suivants montrent les profils horaires des comptages et des trois fractions de masse (PM₁₀, PM_{2.5} et PM₁) en tant que jours moyens du total des jours d'échantillonnage sur les deux sites. Les comptages et la masse présentent un minimum aux moments où le rayonnement et le mélange atmosphérique sont les plus importants, tandis que le reste du profil temporel est assez irrégulier, en particulier pour les PM₁₀ sur le site de Fortezza Vecchia. Un profil irrégulier est compatible avec la prévalence de la source portuaire (et du trafic induit), car les heures de départ et d'arrivée par bateau et par route, surtout en ce qui concerne le transport commercial, ne sont pas nécessairement reproductibles au cours d'une journée.

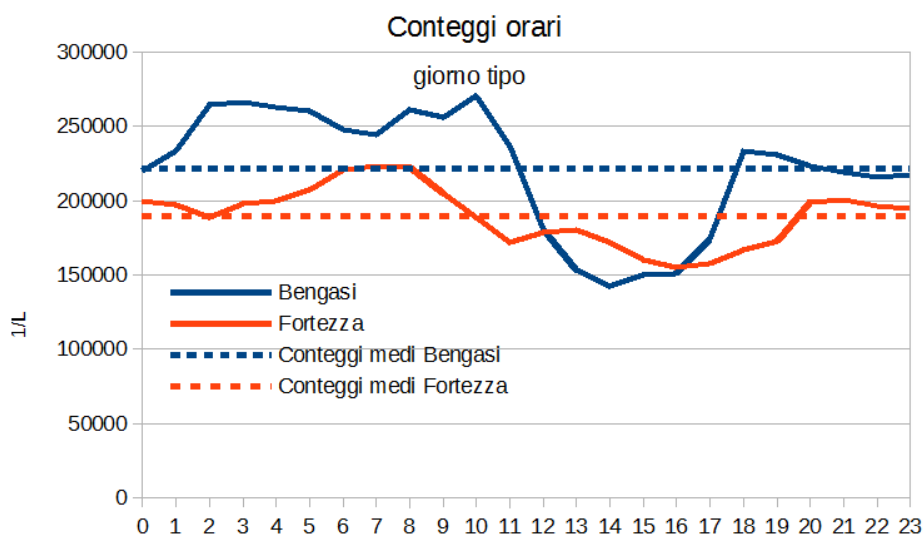


Figure 5.3.9: Profils temporels des comptages lors d'une journée typique pour les sites de Fortezza Vecchia et Calata Bengasi.

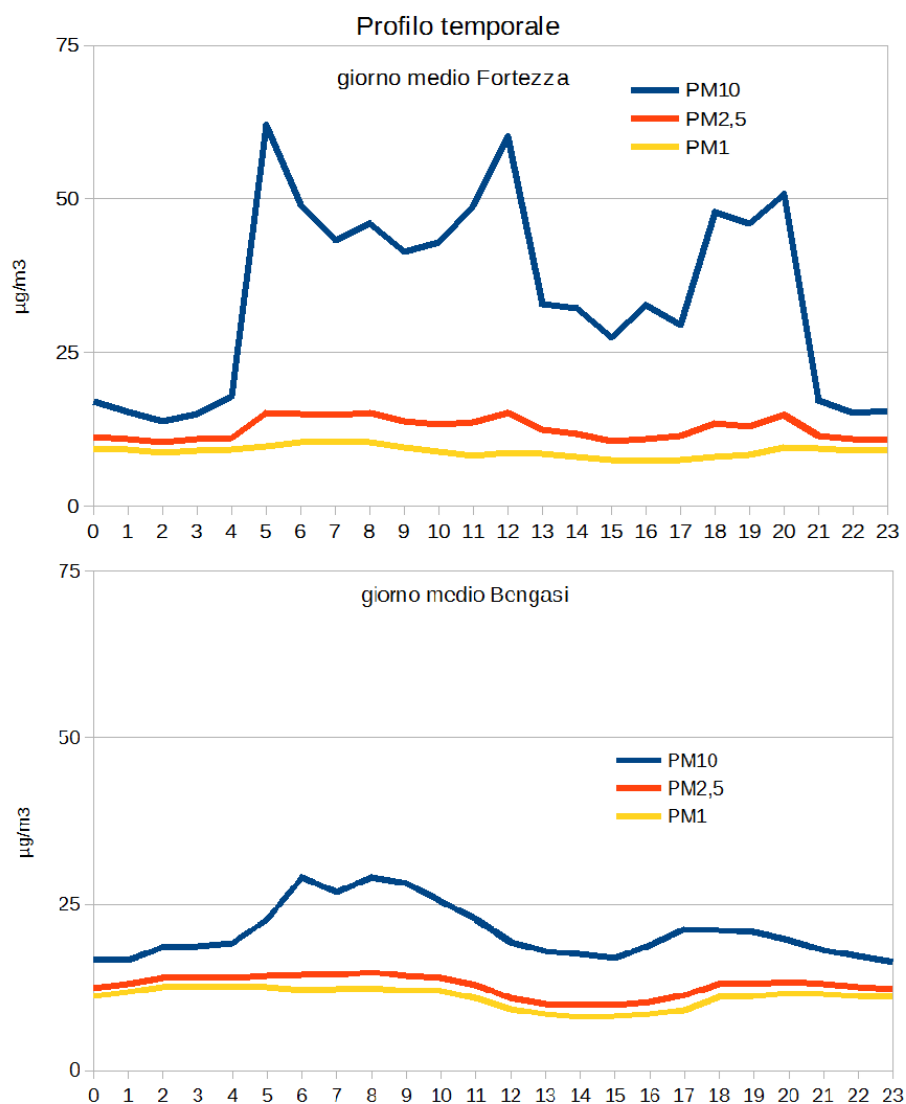


Figure 5.3.10: Profils temporels des fractions massiques des PM10, PM2.5 et PM1 au cours d'une journée typique pour les sites de Fortezza Vecchia et Calata Bengasi.



Figure 5.3.11: PolarPlots obtenus avec les valeurs moyennes par minute PM10, PM2.5, PM1 pour Fortezza Vecchia.

En ce qui concerne le site de Fortezza Vecchia, pour les deux périodes d'échantillonnage, trois zones présentant des concentrations moyennes plus élevées ont été identifiées dans le PolarPlot PM10:

- une zone avec des vents entre 4 et 6 m/s dans le quadrant N-O avec le maximum vers le N;
- une zone située dans le même quadrant mais beaucoup plus localisée dans la direction 320°N et une intensité de vent d'environ 2 m/s;
- une troisième zone, avec des concentrations plus faibles, dans une direction NE vers la ville.

En revanche, pour PM1, les valeurs moyennes les plus élevées sont plus clairement orientées vers la zone de trafic maritime et les quais.

Les PM2.5 se situent entre les PM10 et les PM1. Toutes ces considérations, similaires à ce qui a également été observé pour le site de Calata Bengasi rapporté ci-dessous, semblent suggérer une influence différente des sources sur les trois classes de PM. En particulier, les PM10 semblent être plus indicatives du trafic induit par le transport de marchandises et de passagers, avec une importante composante de soulèvement se produisant à des vitesses de vent élevées. En revanche, les composants les plus fins, notamment PM1, semblent avoir des niveaux plus élevés vers les espaces de manœuvre et de stationnement des navires.

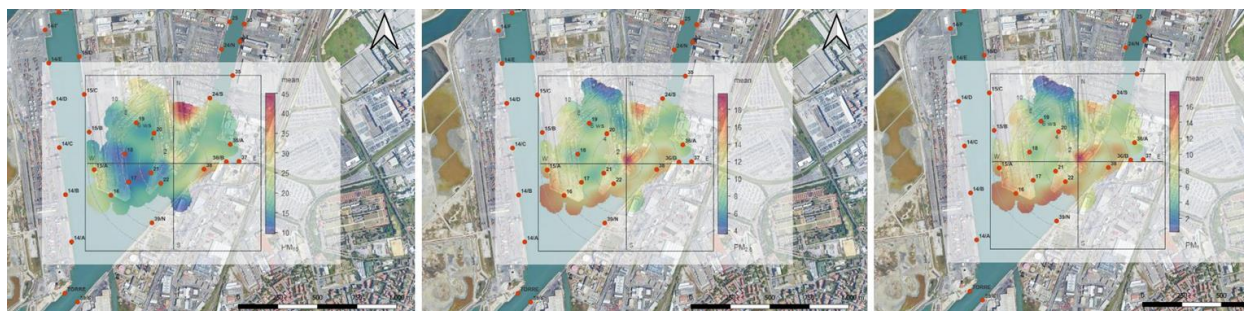


Figure 5.3.12: PolarPlots obtenus avec les valeurs moyennes par minute PM10, PM2.5, PM1 pour Calata Bengasi.

Pour le site de Calata Bengasi, les PolarPlots collectent des données pour toute la période d'échantillonnage. Il existe une différence entre la fraction PM10 et les fractions plus fines PM2.5 et PM1. Pour les PM10, la direction d'origine des vents avec les moyennes minutes les plus pertinentes est autour de l'axe N, en direction des chantiers de transport routier (plutôt que vers les zones de transit maritime) avec des vents moyens-hauts d'environ 6 m/s.

Pour les PM2.5 et les PM1 dans la même zone, une tache de couleur moins intense est identifiée. Les moyennes minute les plus élevées pour ces fractions se produisent à des forces de vent faibles et dans l'arc sud-ouest en direction du canal d'entrée de la zone portuaire industrielle.

Suivi des nanoparticules avec le Nanoscan

Avec l'instrument Nanoscan TSI 3910, acheté avec les fonds du projet, quatre campagnes ont été réalisées, une pour chaque saison, toutes sur le site de Calata Bengasi.

Les périodes d'échantillonnage ont été les suivantes à partir de l'automne 2021:

Tableau 5.3.4: Périodes d'échantillonnage avec Nanoscan.

Automne	05/10/2021	15/10/2021
Hiver	11/01/2022	22/01/2022
Printemps	11-15/04/2022	20-24/04/2022
Été	06/06/2022	17/06/2022

La figure suivante montre les distributions moyennes pour chaque campagne dans les 13 classes de taille lues par l'outil.

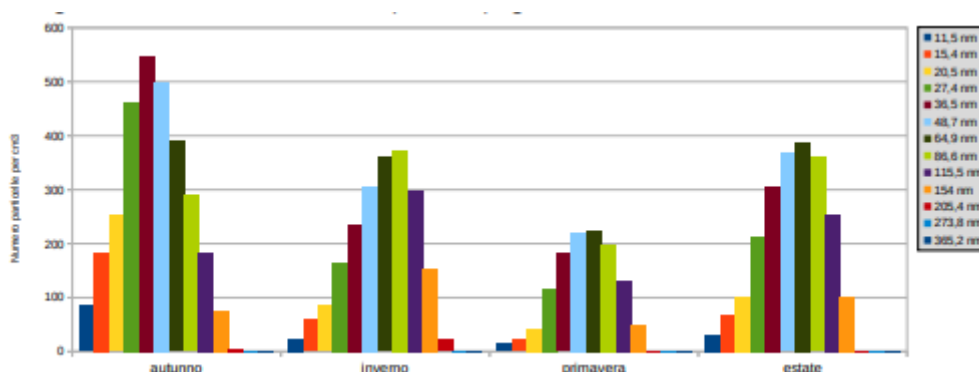


Figure 5.3.13: Distributions moyennes par campagne.

Les valeurs les plus élevées ont été trouvées en automne et les plus faibles au printemps, comme le montre également le graphique BoxPlot du nombre total de nanoparticules.

La comparaison des distributions montre une plus grande abondance des classes les plus basses en automne avec un maximum pour le diamètre de 36,5 nm, alors que dans les autres saisons, la classe avec les plus grands comptes moyens est celle de 64,9 (printemps/été) et 86,6 (hiver).

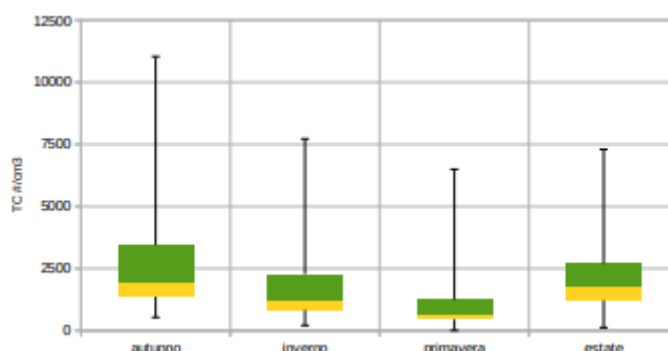


Figure 5.3.14: BoxPlot des distributions saisonnières.

Valeurs et tendances de l'OMS dans le moyennes horaires et journalières

En ce qui concerne les moyennes horaires et journalières, aucune des campagnes réalisées n'a atteint les valeurs indiquées par l'OMS comme valeurs de référence comparables au niveau de fond urbain. Elles sont égales à 20 000 comptes/cm³ en moyenne horaire et à 10 000 comptes/cm³ en moyenne journalière pour toutes les particules de 10 nm et plus, sans limite supérieure. L'instrument utilisé lit dans une gamme allant de 10 nm à 365 nm et doit inclure les classes les plus nombreuses ; cependant, les comptes totaux de l'instrument sont une estimation par défaut.

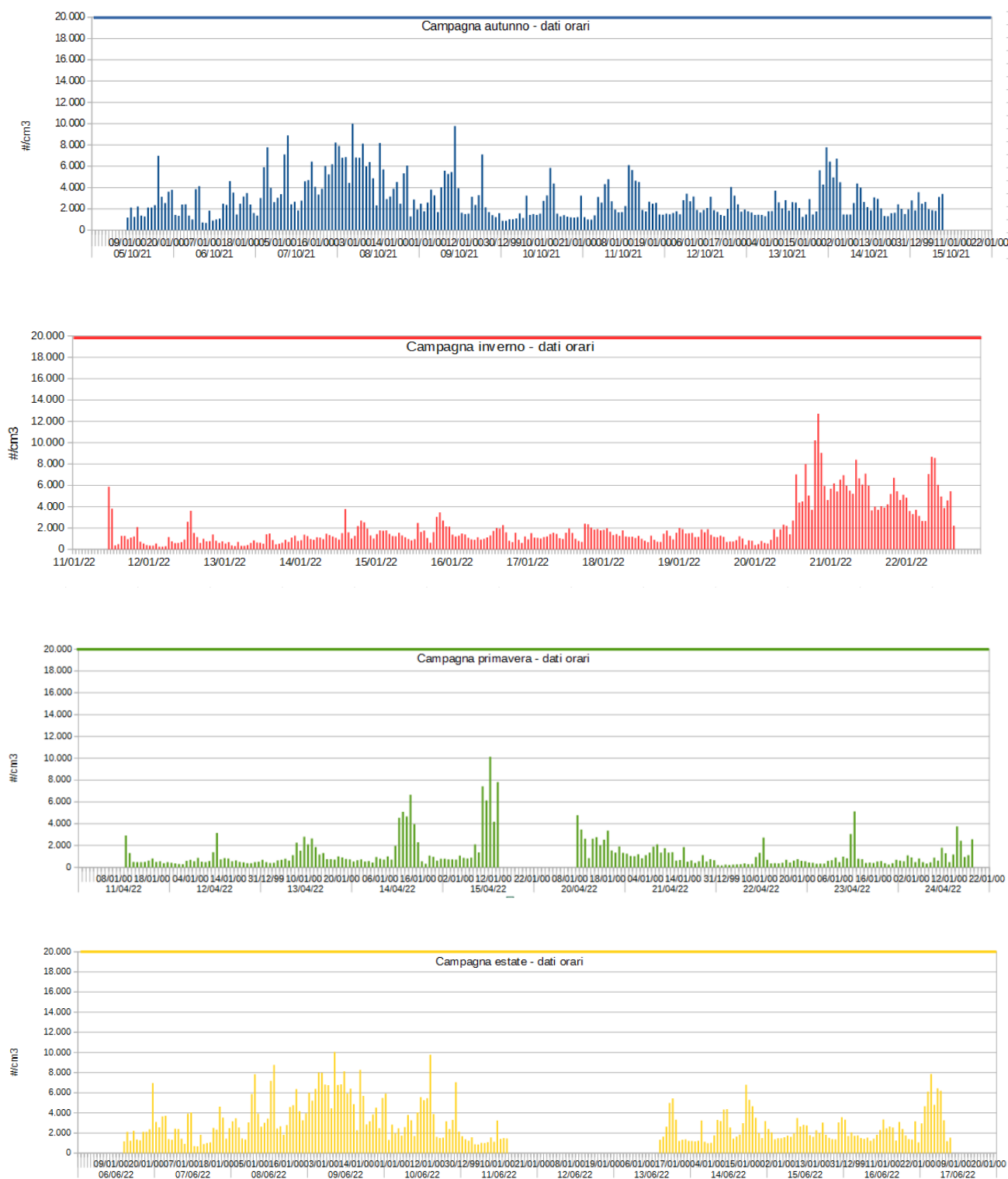


Figure 5.3.15: Moyennes horaires saisonnières.

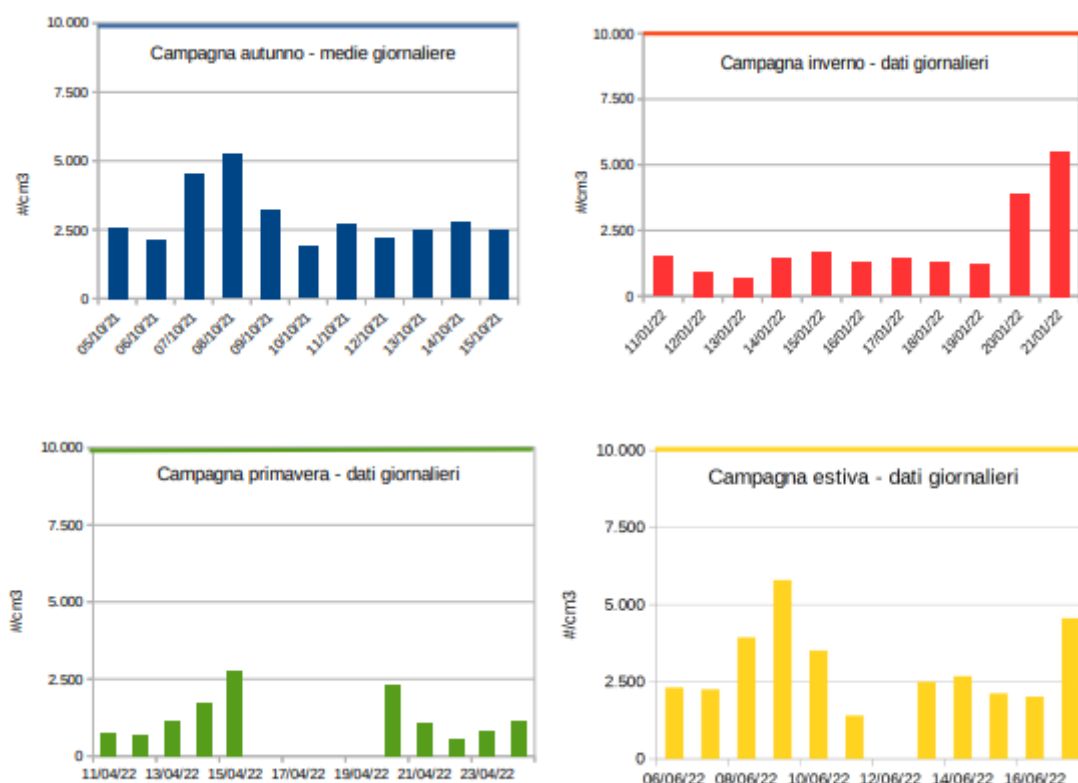


Figure 5.3.16: Moyennes journalières par campagne.

Analyse des données Moni.C.A.

Les données sur le trafic maritime extraites de la base de données Moni.C.A. sont analysées ci-dessous. En particulier, on utilise des analyses statistiques mensuelles, relatives aux mois où les campagnes ont été réalisées, qui montrent les différences entre les volumes de trafic maritime qui ont affecté la zone de suivi pendant les différentes périodes. L'autorité portuaire a également fourni des données sur les appels portuaires individuels pour les jours où le suivi était actif ; ces données ont été utilisées pour l'analyse des études de cas.

Tabella 5.3.1: Accostages mensuels par zone et par période.

Mois	Octobre	Janvier	Avril	Juin
Total des accostages Livourne	498	383	460	565
Accostages zone de suivi (Calata Bengasi)	292	213	237	266
Accostages zone et période de suivi	102	92	86	104

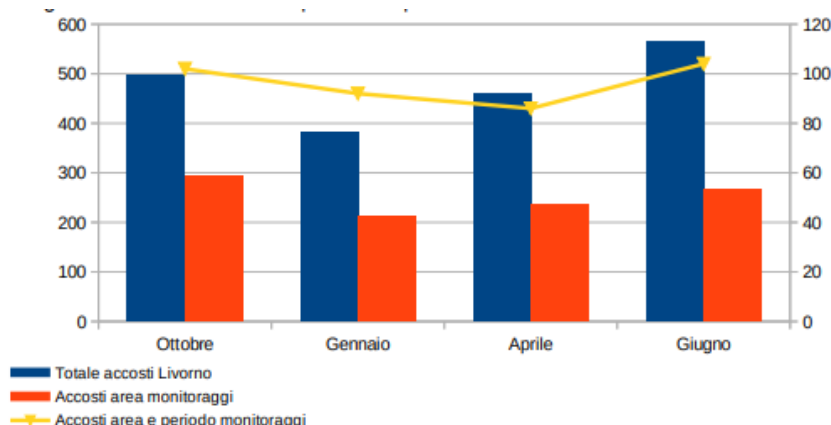


Figure 5.3.17: Nombre d'accostages par zone et par période.

Pour l'ensemble du port, on constate une augmentation du volume de trafic lors de la campagne de juin, principalement portée par les flux touristiques. Comme on peut le constater, la zone industrielle du port, qui a fait l'objet d'un suivi, est moins affectée par la variabilité saisonnière des accostages, car elle est peu touchée par le trafic des ferries.

Dans les périodes de campagne (ligne jaune), une baisse du nombre des accostages peut clairement être observée pour la campagne de printemps et, bien que dans une moindre mesure, pour la campagne d'hiver. Ceci est cohérent avec les niveaux mesurés qui sont plus faibles pour ces deux campagnes.

Les catégories de navires qui affectent le plus la zone surveillée sont celles dédiées au transport de marchandises et de combustibles, comme le montrent les graphiques suivants qui montrent la répartition des accostages par type de navire. Dans la zone de suivi, le pourcentage de fret roulier est nettement plus élevé, tout comme celui des conteneurs, dont les débarquements de la zone représentent la totalité des débarquements du port. Les navires à passagers sont presque totalement absents. Les produits pétroliers/produits chimiques et le fret roulier dans cette zone représentent 75 % des arrivées de cette catégorie de navires dans l'ensemble du port. Dans la zone de suivi, cependant, l'incidence du transport de passagers et du fret roulier est plus faible.



Figure 5.3.18: Trafic par type de navire année 2022 Port de Livourne et zone de suivi Calata Bengasi.

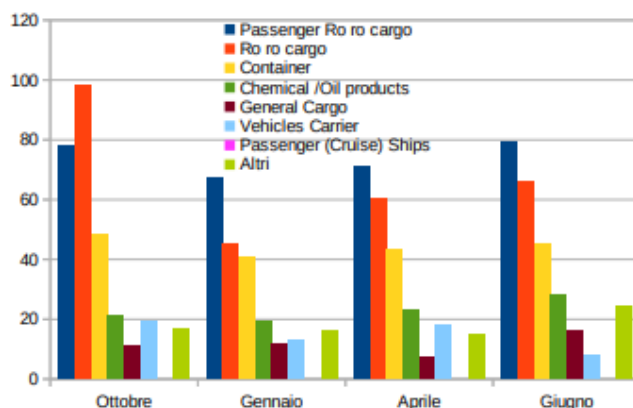


Figure 5.3.19: Nombre d'accostages par type de navire en mois de campagne.

Au cours des mois des différentes campagnes, les catégories de navires qui ont débarqué dans la zone correspondaient en moyenne au profil annuel, avec un pourcentage nettement plus élevé de cargos en octobre.

Avec quelques différences quantitatives entre un mois et l'autre, les quais ayant le plus grand nombre d'accostages sont le quai 14/E dans la direction NW (304°N) du point de suivi et à environ 1 km à vol d'oiseau, et le quai 24/N à une distance d'environ 700 m dans la direction NNE (17°N). En octobre, on observe une contribution importante et nettement supérieure à la moyenne des accostages au quai 24/S, qui se trouve à seulement 400 m du site de suivi dans une direction NNE (20°N). En octobre, les accostages des quais 18-20 22 étaient également supérieures à la moyenne.



Figure 5.3.20: Localisation des accostages.

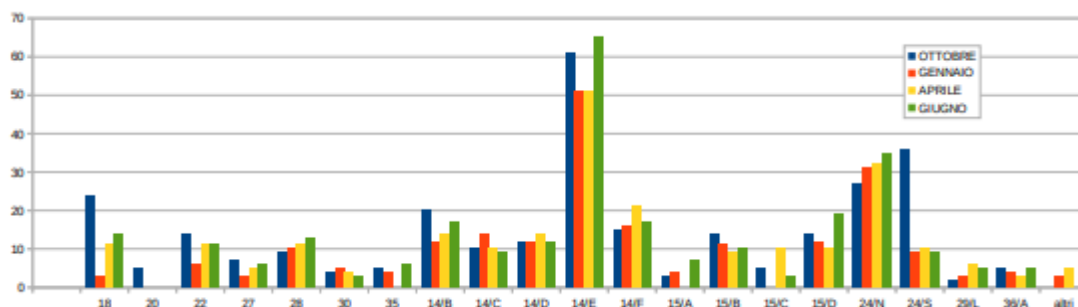


Figure 5.3.21: Nombre d'accostages par quai en mois de campagne.

La figure suivante montre les positions des amarrages par rapport au point de contrôle (point jaune sur la figure). Les cercles au-dessus de chaque quai ont un diamètre variable, pour chaque campagne, en fonction du nombre d'accostages du mois. Il est ainsi facile d'identifier les zones de plus grand mouvement au cours de la période en question. En parallèle, la rose des vents, issue de la station marégraphique ISPRa pour la seule période d'échantillonnage et pour chaque saison, est présentée afin de montrer les directions des vents dominants par rapport aux principales pressions de la zone portuaire. Cependant, il faut se rappeler que la période d'échantillonnage pour chaque saison dure 10-15 jours alors que les données des accostages portent sur le mois entier.

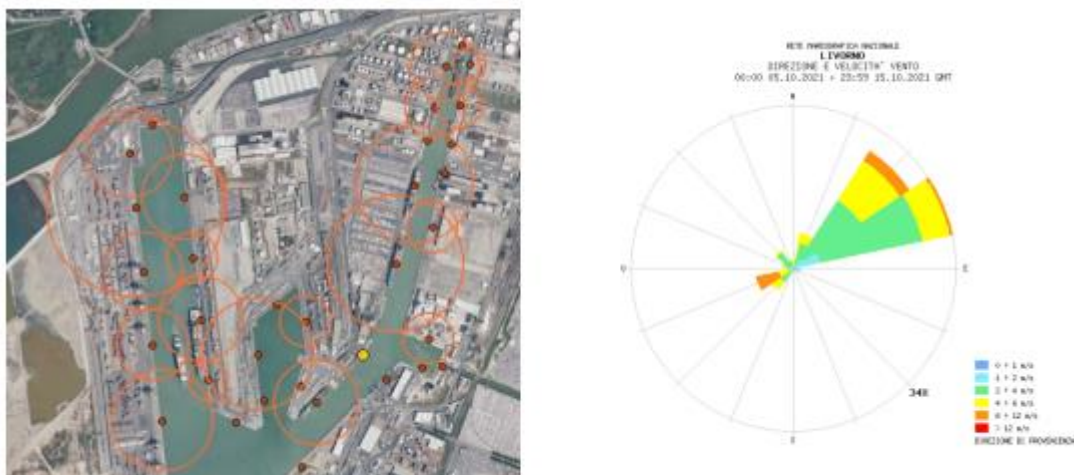


Figure 5.3.22: Nombre d'accostages et vents dominants Automne.

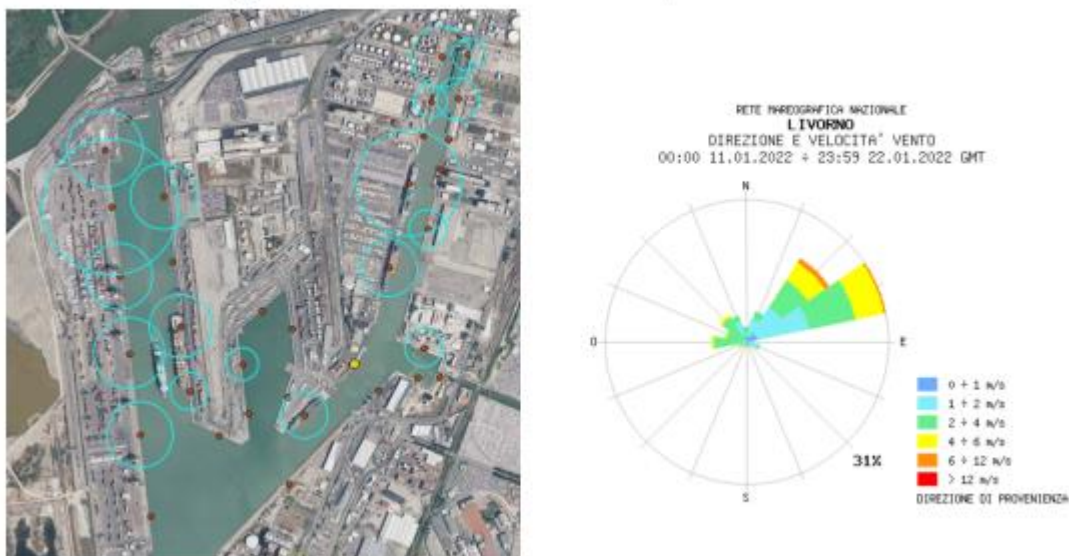


Figure 5.3.23: Nombre d'accostages et vents dominants Hiver.

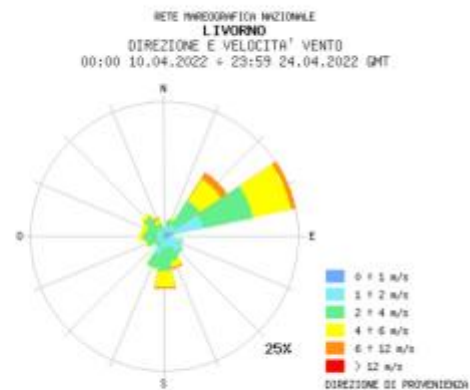


Figure 5.3.24: Nombre d'accostages et vents dominants Printemps.

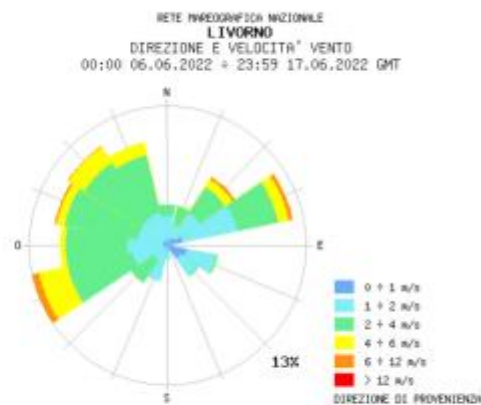


Figure 5.3.25: Nombre d'accostages et vents dominants Été.

Comme on peut le constater pendant les périodes d'hiver, de printemps et d'automne, les vents dominants étaient de direction est et nord-est. Dans ce secteur, le quai 24/N, située plus au nord de la direction des vents dominants, est l'une des plus fréquentées par les navires. Ceci est cohérent avec le fait que de plus faibles concentrations de nanoparticules ont été enregistrées en avril et en janvier. En octobre, même avec les mêmes vents dominants, une activité beaucoup plus importante a été enregistrée au quai 24/S, qui est situé à seulement 400 m du point de suivi, ce qui peut avoir affecté de manière significative les niveaux mesurés. Par rapport au printemps et surtout à l'hiver, d'autres quais proches ont également connu un trafic plus important en octobre, à savoir le quai 22 et le quai 18. Pendant la campagne d'été, en revanche, les vents des secteurs nord-ouest et sud-ouest étaient fréquents, ainsi que ceux du nord-est, ce qui a pu apporter des contributions d'amarrages plus éloignés, par exemple le 14/D, qui était l'un des accostages les plus actifs de tout le port.

Cas type

Parmi tous les graphiques journaliers des comptages minutes moyens par classe granulométrique, présentés en Annexe 4 - ARPAT, une journée de la campagne d'automne a été examinée en détail, prise comme cas d'étude.

Le 10 octobre 2021 était un dimanche et moins de passages navals ont été enregistrés dans la zone qui nous intéresse. Pour cette raison, la journée est intéressante en tant qu'étude de cas car les pics de concentration numérique de nanoparticules sont peu nombreux et isolés et aucun niveau de fond significatif n'est enregistré.

Dans la figure de la page suivante, ils sont représentés de haut en bas :

- graphique des arrêts du navire et de la direction du vent. Pour chaque quai où un stationnement a pu être identifié à partir des données d'arrivée et de départ, une ligne droite a été tracée pour la durée du stationnement dans la direction en °N du quai par rapport au site de suivi.
- Afin d'identifier les arrêts, seuls les navires arrivant et partant le jour en question ont été pris en compte, lesquels, partant après quelques heures, ont vraisemblablement gardé leurs moteurs en marche.
- graphique des arrivées, départs et manœuvres
- graphique dN/Dlog(DP) sur le nombre de nanoparticules pour les classes de taille de 10 à 154 nm
- graphique des données minute de NO, NO₂ et SO₂
- graphique des données PM10, PM2.5 et PM1 minute (données OPC)

Des pics isolés peuvent être observés dans le traçage des nanoparticules en raison de valeurs de fond très faibles et constantes, qui correspondent à des pics dans les données minute des gaz et des particules. À partir de 12h40, le vent tourne du NE au NW et s'établit dans une direction telle que le site de suivi se trouve sous le vent de deux navires stationnaires. Dans la période suivante, de 14 heures à 16 heures, on observe une augmentation du nombre de particules ainsi qu'une variation plus importante et, en moyenne, supérieure au bruit de fond pour les données des minutes de PM2.5, PM1 et PM10.

Ce jour-là, il a donc été possible d'identifier quelques moments où la source portuaire, entendue au sens strict comme le passage des navires, a eu une influence directe sur les données minutes des polluants considérés

10 ottobre

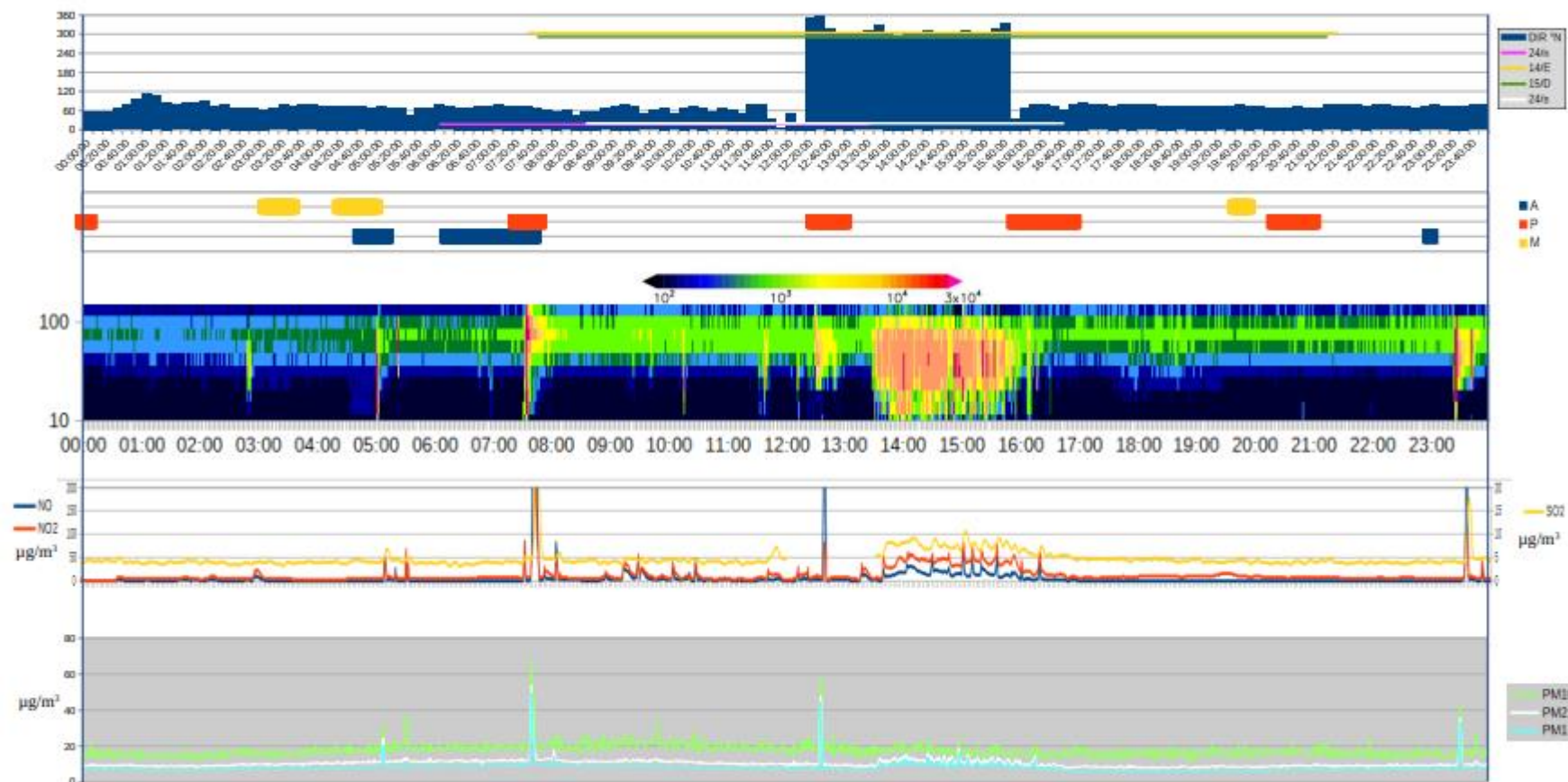


Figure 5.3.26: Cas type automne 2021..

5.4. REGIONE PACA

Dans cette section, l'objectif est de réfléchir à la détermination des sources à l'origine des augmentations de concentration enregistrées par la cabine Toulon TCA. Les épisodes les plus clairement imputables à la présence des navires sont identifiés de façon à extraire les maxima de concentration atteints lors des épisodes de panache, pour les espèces caractéristiques de la pollution maritime.

Relation entre présence des navires et hausses de concentrations

La figure présente les concentrations en NO_x , SO_2 et $\text{PM}_{2.5}$ enregistrées à la cabine Toulon TCA, comparées au nombre de navires à quai lorsque les vents soufflent dans une direction apte à amener les polluants des navires vers la cabine, *i.e.* lorsqu'ils soufflent dans une direction comprise entre 200° et 260° . Ceci constitue une première approche de recherche de l'origine des hausses de concentration. Sur la période extraite, on observe bien une corrélation entre les augmentations de concentration des espèces représentées et la présence de navires. Réciproquement, lorsque les vents ne soufflent pas dans la direction idoine, ou lorsqu'il n'y a pas de navire à quai, les concentrations mesurées restent à un niveau modéré (zone surlignée en violet).



Figure 5.4.1: Concentrations horaires en NO_2 , NO_x , SO_2 et $\text{PM}_{2.5}$ (lignes bleues) mesurées à la cabine Toulon TCA entre le 12/07/21 et le 03/08/21, comparées au nombre de navires à quai (points oranges) lorsque les vents ont une direction comprise entre 200° et 260° . Les données de présence des navires ont une précision temporelle de 5 minutes

Pour compléter cette analyse, les roses de pollution des maxima des concentrations en NO , NO_2 , NO_x , SO_2 , black carbon et nombre de particules fines mesurées par la cabine Toulon TCA entre le 02/08/21 et le 29/09/21 sont représentées en figure. Pour toutes ces espèces, on observe une origine prédominante de la pollution en provenance du terminal ferry.

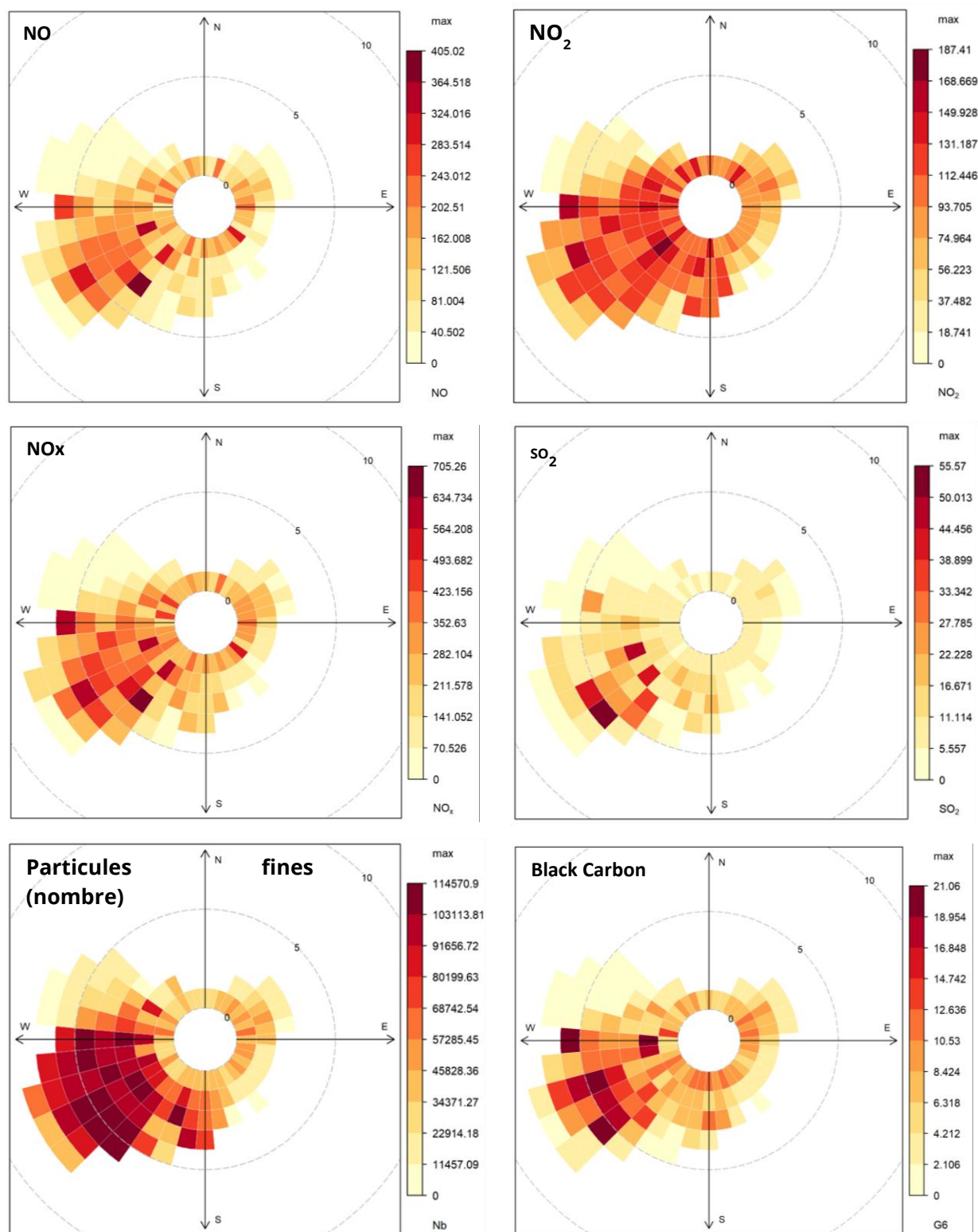


Figure 5.4.2: Roses de pollution des maximas des concentrations en NO, NO₂, NO_x, SO₂, black carbon et nombre de particules fines mesurées à la cabine Toulon TCA entre le 02/08/21 et le 29/09/21.

Analyse des profils journaliers

Un exemple de profil de concentration journalier est présenté en figure pour la journée du 26/08/21. Les concentrations représentées ont une résolution temporelle de 5s pour les gaz à effet de serre CO, CO₂ et CH₄, 10s pour NO, NO₂, NO_x, O₃, SO₂, nombre de particules, vitesse et direction du vent, 1 min pour le black carbon, 1h pour les PM_{2.5} et fraction « fossile fuel » reconstituée des PM₁₀. Le cadran du haut représente les navires présents à quai. Dans le cadran du bas, le nombre total de navires à quai est figuré par un indicateur qui renseigne également sur les caractéristiques du vent, de manière à recouper les deux types de données : la taille du symbole indique la vitesse du vent, la couleur du symbole indique la direction du vent. Les régimes de vent « Nord-Est », « Sud large », « Sud-Ouest » et « Nord large » représentent respectivement les directions 40°-90°, 90°-200°, 200°-260° et 260°-40°. Ainsi, la probabilité que la cabine Toulon TCA soit sur le trajet d'un panache est forte lorsque ce symbole est rouge et de grande taille

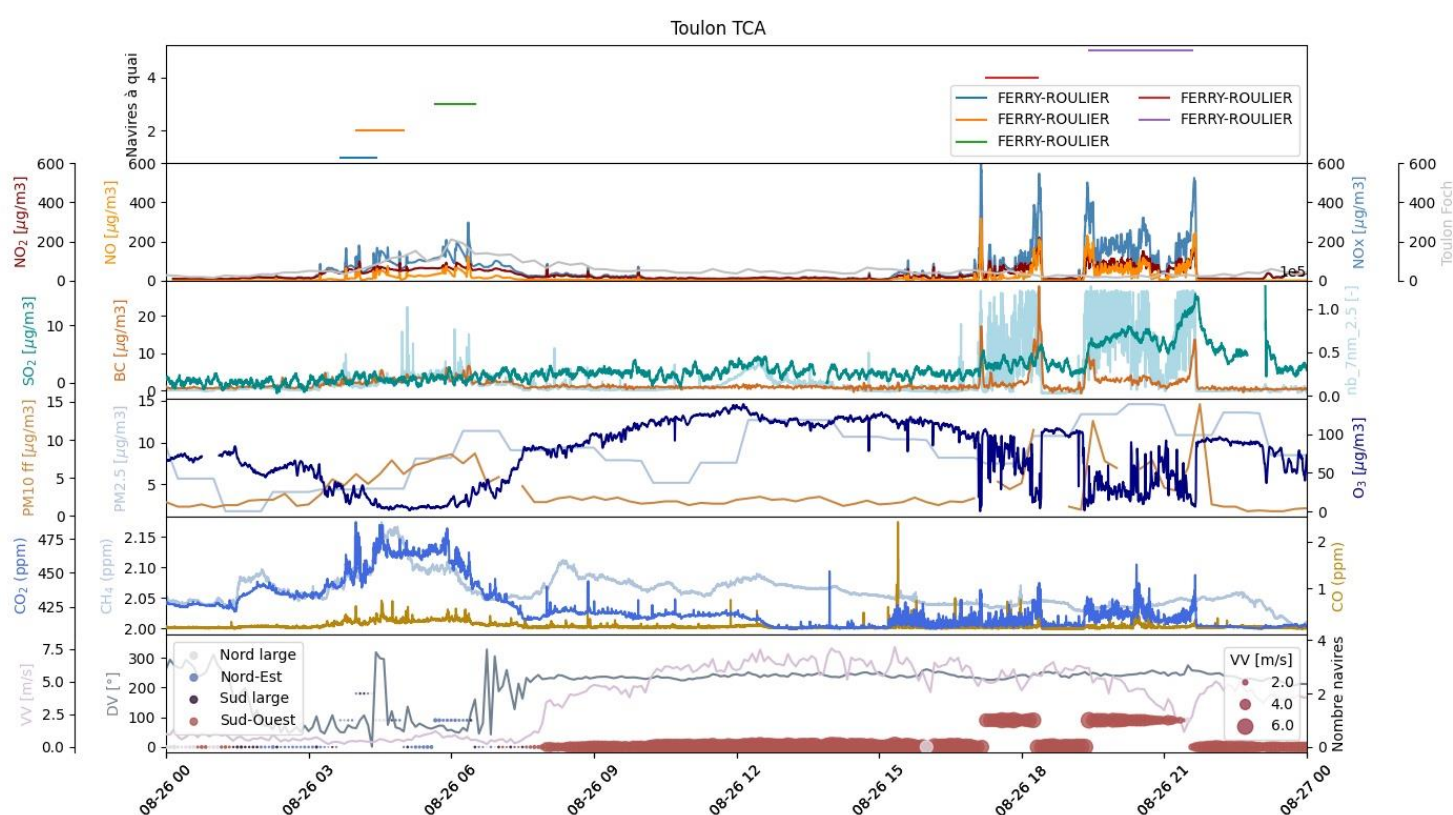


Figure 5.4.3: Navires présents et concentrations mesurées sur le port de Toulon pour la journée du 26/08/21.

Pour comparer la pollution mesurée au niveau de la cabine à la pollution du cœur de la ville et sous l'influence du trafic automobile, les concentrations quart-horaires en NO_x mesurées par la station Toulon Foch sont représentées au côté des concentrations en NO_x mesurées par la cabine Toulon TCA.

Sur la figure, on observe que les bateaux situés à quai le matin sont sous l'influence d'une brise faible, de secteur Nord-Est. Les concentrations en NO_x mesurées par la cabine Toulon TCA sont comparables aux concentrations en NO_x mesurées par la station Toulon Foch. Les différences de variabilité du signal sont dues aux différences de résolution temporelle des deux grandeurs. L'équivalence des niveaux relevés indique que la cabine est sous l'influence de la pollution due au trafic automobile le matin.

L'après-midi, on observe un changement drastique de régime de vent, qui passe en flux de Sud-Ouest, avec une intensité beaucoup plus forte. Les concentrations en NO_x enregistrées par la cabine sont bien supérieures à celles enregistrées par la station Toulon Foch. Les oxydes d'azote détectés sont amenés depuis les navires, et non plus depuis la ville. Parallèlement, on observe des hausses concomitantes des

concentrations en SO_2 , CO_2 , black carbon et nombre de particules, corrélées à une diminution de la concentration en O_3 .

En complément des données présentées en figure, il faut signaler que du 02/08/21 au 16/08/21, l'analyseur de métaux a permis d'enregistrer quelques données d'intérêt particulier pour la problématique maritime. Alors que les NO_x et particules peuvent être émis par d'autres types de sources, le rapport de concentration nickel vs. vanadium donne une information caractéristique des émissions navales. L'analyseur n'a pas permis de recueillir des données de concentration en vanadium, toutefois des données de concentration en nickel ont été acquises sur une courte période. Une vue globale des données enregistrées par la cabine AtmoSud sur la période de fonctionnement de l'analyseur de métaux est fournie en figure. Certaines hausses ponctuelles des concentrations en nickel voire en plomb sont corrélées à des augmentations de concentration en SO_2 qui, dans ce contexte, ne peut être que d'origine maritime (pas d'activité industrielle proche). Les concentrations en fer sont liées à l'activité de chargement et déchargement des navires.

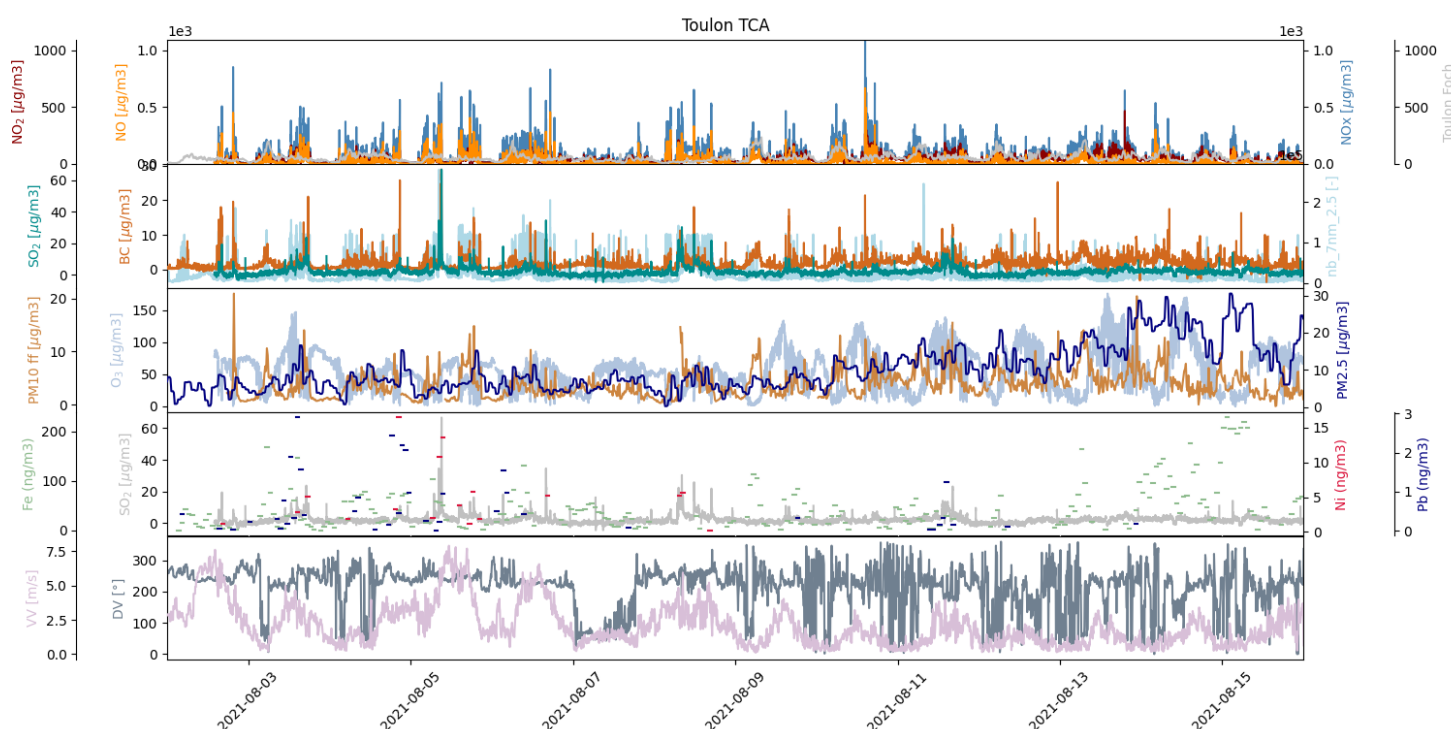


Figure 5.4.4: Navires présents et concentrations mesurées par la cabine Toulon TCA sur la période de fonctionnement de l'analyseur de métaux, du 02/08/21 au 16/08/21.

Une compilation statistique journalière des concentrations enregistrées au terminal Toulon TCA est disponible en figure. Sur ces graphes, on observe bien deux périodes d'augmentation des niveaux de concentration, le matin et en fin d'après-midi, en lien avec les pics de trafic maritime et de trafic automobile. Le profil de concentration en O_3 varie en symétrie inverse de NO_2 . L'augmentation de la concentration en NO_2 est plus marquée l'après-midi. SO_2 , seul marqueur proprement maritime, montre bien une hausse plus importante l'après-midi.

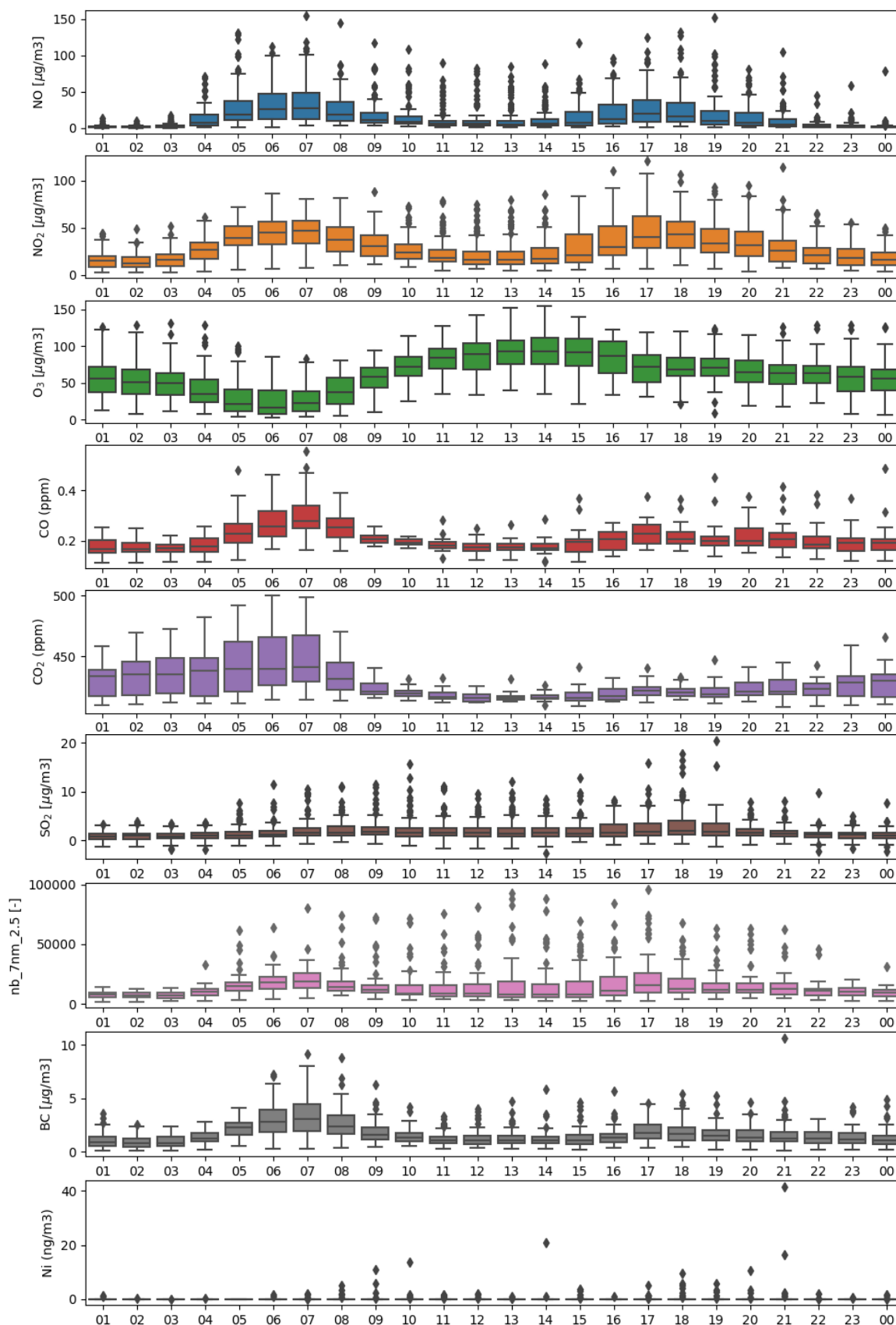


Figure 5.4.5: Profils statistiques journaliers des concentrations en NO, NO₂, O₃, SO₂, nombre de particules et black carbon mesurées au terminal Toulon TCA entre le 15/06/21 et le 30/09/2021. Les concentrations en gaz à effet de serre CO et CO₂ ont été acquises entre le 25/08/21 et le 17/09/21. Les concentrations en métaux ont été enregistrées entre le 02/08/2021 et le 16/08/2021.

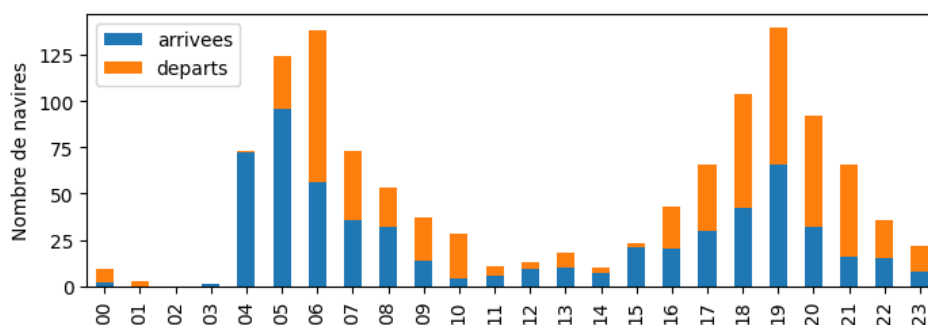


Figure 5.4.6: Répartition horaire du nombre de départs et d'arrivées de navires à Toulon entre le 15/06/21 et le 30/09/21.

Détection des penaches

Pour identifier les augmentations de concentration dont l'origine est maritime, on peut rechercher les pics de concentration corrélés temporellement, pour les espèces identifiées ci-avant comme marqueurs de la pollution maritime. Un exemple de corrélation des pics de NO_x et SO_2 est visible en figure. Les pics de NO_x et SO_2 sont identifiés en figure respectivement. Sont considérés comme des pics les hausses de concentration situées au-delà d'un seuil fixé à la moyenne du jeu de données pour les NO_x , et à la moyenne du jeu de données augmentée de l'écart-type pour SO_2 , de manière à filtrer les concentrations de fond. Sur sur le troisième graphique de la figure, les points rouges repèrent l'emplacement des pics de NO_x et SO_2 corrélés.



Figure 5.4.7: Concentrations quart-horaires en (a) NO_x et (b) SO_2 en $\mu\text{g.m}^{-3}$ du 11/06/21 au 25/10/21. Le trait pointillé rouge représente le seuil en deçà duquel les concentrations sont considérées comme étant dans le « bruit de fond ». Les symboles oranges identifient les pics. La figure (c) compare les profils de concentration en NO_x (bleu) et SO_2 (orange). Les points rouges identifient les pics de NO_x et SO_2 corrélés.

Toutefois, les données quart-horaires présentées en figure ne sont pas assez fines pour être utilisées dans le cadre d'une détection automatique de panaches, la durée typique d'un phénomène de panache étant de l'ordre de quelques minutes, et inférieure au quart d'heure. Comme indiqué dans le tableau, des données ont été acquises à une résolution temporelle beaucoup plus faible. Cependant, la diminution de la résolution en temps fait émerger un problème de décalage entre les mesures des différentes espèces, qui découle des différences de temps de réponse des analyseurs. Ce décalage n'est pas constant dans le temps et ne peut pas être résolu en estimant un simple offset temporel. Sur un échantillon de 3 jours de données, on a pu observer un décalage allant jusqu'à 4 minutes pour SO_2 , ce qui n'est pas négligeable.

Le développement d'un algorithme de détection automatique des panaches reposant sur la synchronisation de l'ensemble du jeu de données dépasse le cadre de cette étude. Le travail d'identification des panaches a donc été effectué sur la base de l'observation visuelle des profils de concentration. En se concentrant sur des phénomènes à dynamique rapide, réunissant les mêmes augmentations de concentrations que celles observées en figure, lorsque le vent souffle en provenance du Sud-Ouest et en présence de navires, il est possible d'identifier, de manière non exhaustive, une liste d'environ 80 panaches de navires nettement visibles sur la période allant du 02/08/21 au 02/10/21.

La figure présente les histogrammes des concentrations maximales enregistrées à chaque épisode de panache identifié, pour les espèces apparaissant comme caractéristiques de la pollution maritime sur cette campagne. Concernant le nombre de particules fines, on observe une fréquence d'occurrence remarquablement élevée pour les valeurs de l'ordre de $1.2 \cdot 10^5$. L'existence de concentrations dépassant cette valeur écarte un éventuel effet de saturation de l'appareil. On peut émettre l'hypothèse que pour un même type de navire et à distance fixe de la cabine, c'est toujours la même quantité de particules qui se trouve être émise et captée par la cabine.

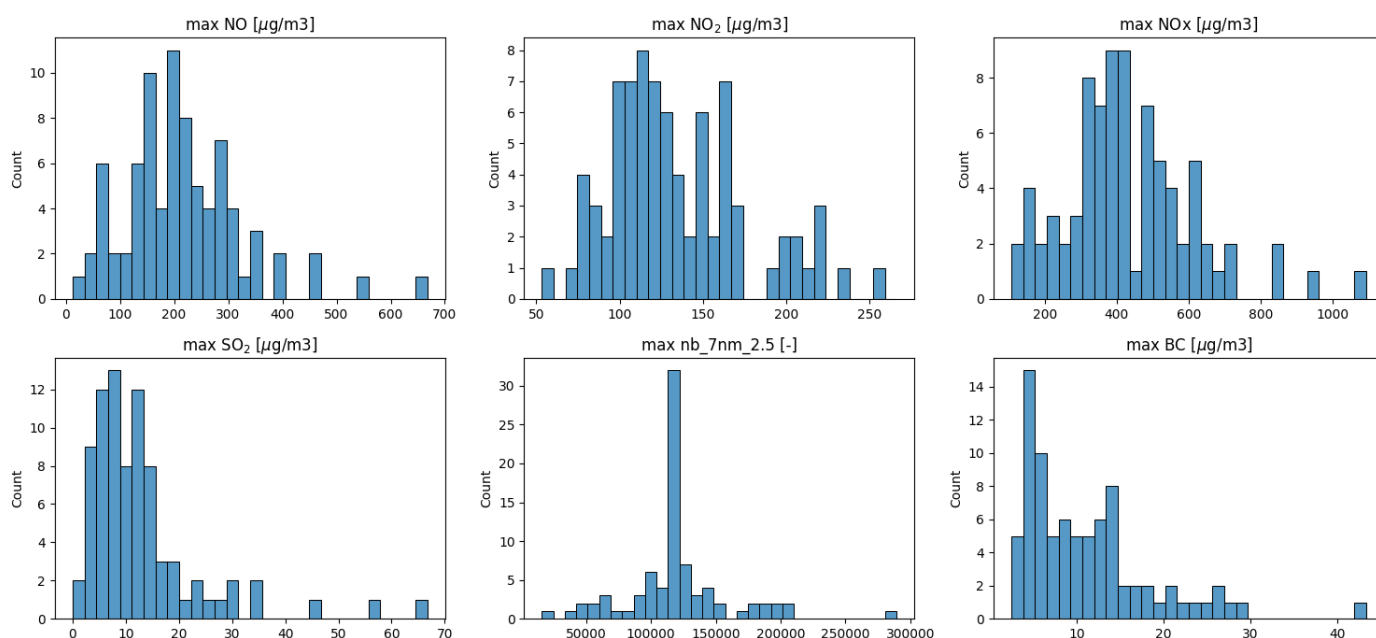


Figure 5.4.8: Histogrammes des concentrations maximales enregistrées au cours des épisodes de panache identifiés, pour NO, NO₂, NO_x, SO₂, black carbon et nombre de particules..

5.5. CORSE

Rose de pollutions des stations fixes

Un premier axe de recherche vise à vérifier les roses de pollution des stations fixes et mobiles en comparaison avec la station météo la plus proche. Cela permet de confirmer les axes de vent les plus propices à disperser les polluants principaux depuis les navires.

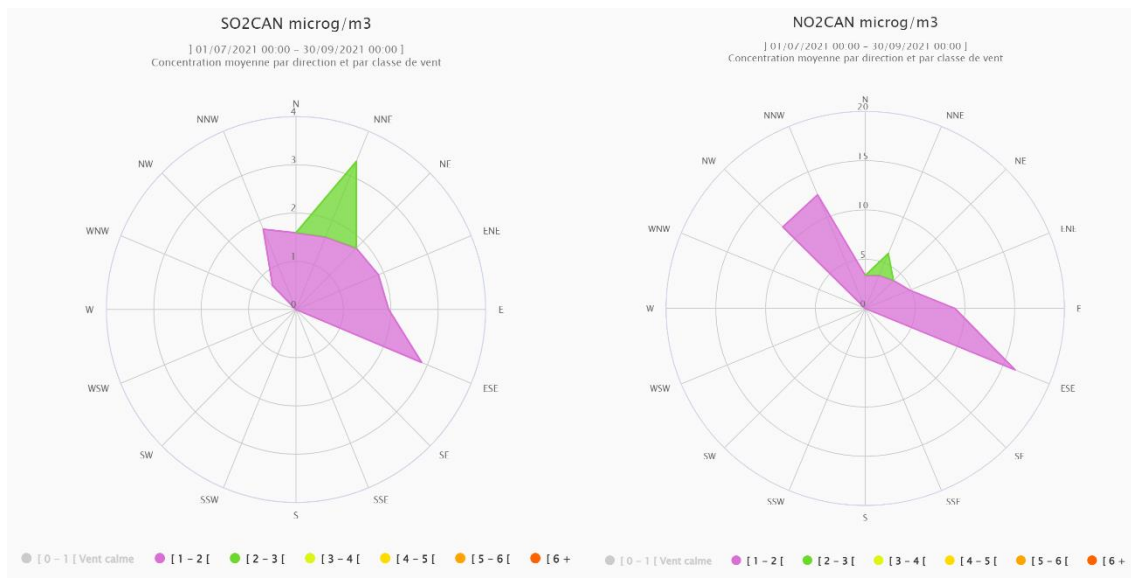


Figure 5.5.1: Rose des pollutions du NO₂ et SO₂ sur la station de Canetto, météo Canetto.

Comme évoqué précédemment, la station Canetto est enclavée en site urbain, la rose des vents indique une composante Est, correspond à l'axe avec le trafic routier, et le port. Un marqueur de la pollution maritime étant le SO₂, il est intéressant de vérifier des corrélations avec des pics de NO₂, voire de PM_{2.5} ou de comptage de particules.

Au vu des emplacements des stations fixes et mobiles, il est supposé qu'une composante principalement est / nord-est du vent mènerait à des mesures plus marquées provenant du secteur maritime.

Sachant cela, pour identifier un épisode de pollution imputable au maritime, il faut:

- Corrélation pic SO₂/NO₂;
- Présence de navires à quai;
- Vent favorable dans la direction de la station fixe/mobile concernée.

Pour Ajaccio, vent favorable pour les stations du réseau: Entre 45° et 135°.

Pour Bastia, vent favorable pour les stations du réseau: Entre 45° et 135°.

Relation entre présence des navires et hausses des concentrations en journée

La présence de navires à quai concerne généralement la journée de manière générale. Afin de caractériser au mieux l'étude et de viser à identifier des épisodes de pollution liées au maritime, il peut être intéressant de se concentrer uniquement sur les valeurs mesurées durant la journée, à savoir de 6h TU à 18h TU. En effet, selon les données des escales fournies par la CCI un navire (ferry, croisière, autre), reste généralement à quai uniquement la journée en arrivant le matin et repartant le soir pour les escales les plus longues.

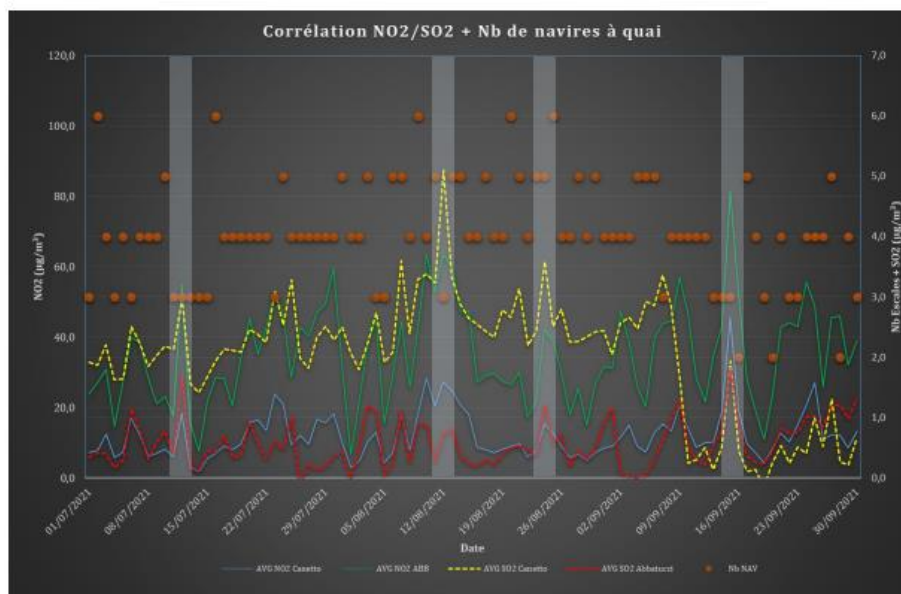


Figure 5.5.2: Corrélation Moyenne NO_2/SO_2 et nombre (nb) de navires à quai – Ajaccio, 2021.

Une première visualisation des données sur Ajaccio ne montre pas une corrélation exacte entre le nombre de navires et les pics NO_2/SO_2 corrélés (visualisées sur la courbe avec les *bandes grises*). Le pic du 12/08/2021 n'enregistre que 3 navires à quai sur toute la journée, alors que celui du 24/08/2021 en compte jusqu'à 5.

Cela montre que le lien n'est pas systématique entre présence de navires à quai et pollution sur la ville. Toute la clef de l'étude revient à lier ces informations avec les informations météo qui permettront d'identifier les dispersions des panaches vers les stations de mesure.

A noter en revanche que la disposition géographique des stations et les directions principales de vent sur Ajaccio ne permettent pas de mettre plus en évidence l'impact direct de cette pollution maritime à chaque épisode identifié.

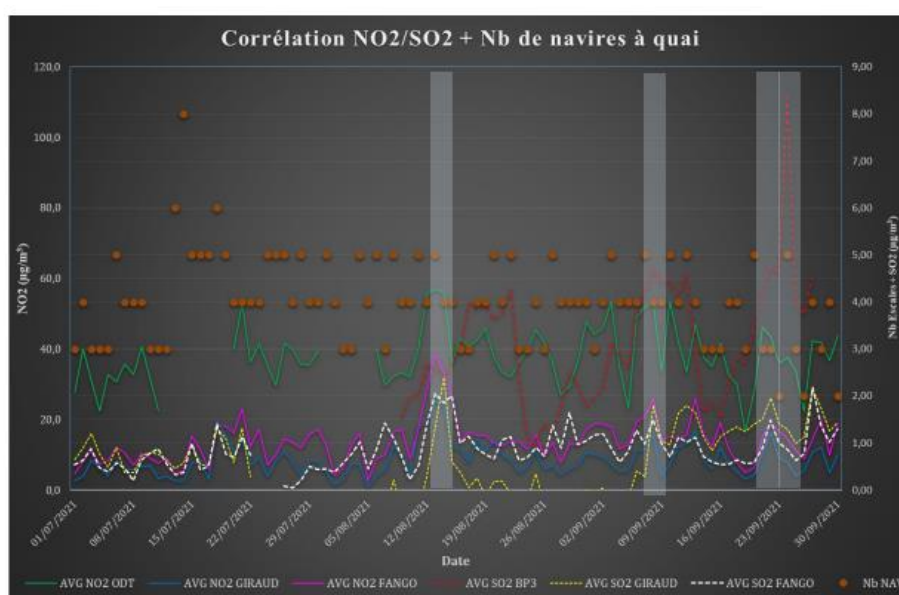


Figure 5.5.3: Corrélation Moyenne NO_2/SO_2 et nombre (nb) de navires à quai – Bastia, 2021.

Les résultats sur Bastia semblent tendre vers la même conclusion, les pics du 22/23 septembre ne comptent que 3 escales au maximum, la période de mi-juillet, malgré un nombre important de navires n'est pas révélatrice d'une hausse particulière de la pollution. Certaines journées sont toutefois intéressantes à étudier, notamment fin septembre.

Bastia dispose de stations orientées dans direction du vent la plus favorable à la mesure de la dispersion des panaches de navires, les niveaux moyens enregistrés sont donc légèrement plus hauts. Cela se voit notamment au niveau de la station mobile du pylône 3 (BP3 – Bastia Pylône 3), situé au plus proche du port à proximité immédiate des navires et dans l'axe principal venteux, d'où la moyenne plus importante en SO₂. Les stations plus éloignées (Giraud et Fango) sont plus ou moins des mesures de fond sur ce polluant, et témoignent d'une dispersion plus éloignée du panache.

Recherche de journée spécifique

Pour trouver des épisodes de pollution maritimes, il faut alors identifier des journées parmi lesquelles les trois critères sont réunis (Pic SO₂/NO₂/ Navires à quai / Vent favorable). Une fois celles-ci identifiées, il suffit de regarder les autres polluants pour connaître l'impact général. Afin de poursuivre l'étude, il serait possible aussi d'identifier des épisodes selon un autre critère de pic (CPT, PM 2.5, etc.). Mais le fait que le SO₂ et le NO₂ sont tous les deux des gaz, leur dispersion est assez similaire.

En reprenant les mesures réduites à la journée (6h18h TU), des tableaux ont pu être sortis permettant de voir plus directement les pics corrélés en fonction de critères définis par Qualitair Corse.

Tableau 5.5.1: Tableau des valeurs moyennes NO₂ et SO₂, nombre de navires à quai par jour, et pourcentage de vent soufflant dans les différentes directions (Est/Sud-Est, etc.) avec vitesse du vent du 11/08 au 18/09 2021 – Ajaccio période estivale 2021, 6h/18h TU.

	Micro-Capteurs					Stations Fixes				Ecales	Direction Vent E			Direction Vent E/SE			Direction Vent E/SE/S			Vitesse du Vent (~m/s)		
Date	AVG Hôpital AJA	AVG Local Accès	AVG Capitainerie Sud	AVG Gare Maritime	AVG Canetto	AVG NO2 Canetto	AVG NO2 ABB	AVG SO2 Canetto	AVG SO2 ABB	Nb NAV	PN	PS	CAN	PN	PS	CAN	PN	PS	CAN	PN	PS	CAN
11/08/2021	23,16	46,58	28,07	37,11	18,66	20,46	52,78	3,23	0,27	5			51%			67%			71%			0,82
12/08/2021	10,77	27,06	24,32	22,24	10,08	27,43	63,54	5,10	0,72	3						44%			44%			0,60
13/08/2021	22,26	40,91	37,46	30,67	15,50	24,56	59,50	3,32	0,82	5						82%			82%			0,76
14/08/2021	21,77	39,99	42,62	26,49	16,98	20,74	47,19	2,88	0,38	5						75%			77%			0,73
15/08/2021	15,40	46,16	20,32	21,16	11,43	18,11	47,51	2,65	0,24	4						69%			71%			0,77
16/08/2021	8,87	16,55	12,11	16,23	4,71	8,73	27,10	2,54	0,20	4						68%			68%			0,85
17/08/2021	9,45	25,98	9,11	20,49	5,06	8,03	29,09	2,43	0,30	5	0%		14%	0%		39%	0%		39%	3,18		0,88
18/08/2021	5,94	25,18	8,04	18,72	6,25	7,19	29,77	2,33	0,24	4	12%		29%	12%		73%	20%		73%	2,86		0,98
19/08/2021	5,14	14,90	8,53	15,93	5,42	8,11	27,33	2,79	0,40	4	10%		29%	18%		49%	24%		49%	2,73		0,96
20/08/2021	6,59	19,92	9,48	21,32	8,64	8,96	26,47	2,66	0,49	6	8%			19%	8%	54%	20%		54%	2,65		0,77
21/08/2021	1,69	14,22	9,16	15,70	3,46	9,65	30,10	3,13	0,54	5	2%		27%	6%		51%	24%		51%	2,73		0,88
22/08/2021	5,16	20,17	12,85	19,57	4,16	6,00	17,26	2,19	0,47	4	6%		25%	10%		46%	24%		46%	2,22		0,81
23/08/2021	6,76	24,28	7,12	18,30	6,23	7,43	21,94	2,44	0,37	5	12%		14%	14%		63%	20%		63%	2,92		0,86
24/08/2021	7,06	18,40	12,33	28,09	8,99	15,32	42,04	3,59	1,22	5	12%		24%	22%		59%	39%		59%	2,06		0,73
25/08/2021	16,92	33,65	22,86	26,42	14,29	12,51	38,81	2,51	0,56	6	20%		21%	29%		40%	39%		40%	1,61		0,69
26/08/2021	6,23	21,62	7,17	16,29	8,68	8,86	29,56	2,80	0,72	4	4%	0%	21%	6%	0%	33%	27%	0%	33%	1,55	2,82	0,85
27/08/2021	4,40	13,69	10,92	15,89	4,56	5,79	17,91	2,25	0,19	4	6%	2%	7%	8%	10%	13%	14%	14%	13%	1,78	3,53	0,93
28/08/2021	7,58	25,70	13,78	24,40	8,06	6,89	25,40	2,26	0,44	5	0%	2%	39%	6%	6%	74%	18%	8%	74%	3,29	3,14	0,98
29/08/2021	6,35	14,66	6,27	9,25	4,26	5,00	15,03	2,34	0,32	4	8%	0%	17%	18%	12%	61%	22%	14%	61%	2,29	2,98	0,93
30/08/2021	5,54	22,41	11,36	17,67	6,85	7,23	26,42	2,42	0,50	5	2%	0%	10%	6%	4%	37%	12%	8%	37%	2,24	2,86	0,90
31/08/2021	9,35	29,29	11,69	22,69	9,97	8,48	31,64	2,44	0,91	4	4%	0%	33%	6%	4%	50%	27%	6%	50%	2,12	3,37	0,81
01/09/2021	3,05	15,59	10,42	17,97	4,44	9,06	31,23	2,05	1,17	4	16%	0%	30%	35%	9%	49%	51%	9%	49%	2,27	2,69	0,97
02/09/2021	8,90	43,45	26,03	35,20	12,10	11,51	47,26	2,57	0,10	4	0%	2%	10%	4%	20%	17%	8%	20%	17%	2,08	2,41	0,73
03/09/2021	13,61	26,63	23,38	19,38	12,49	14,97	38,93	2,66	0,02	4	8%	2%	38%	14%	8%	57%	53%	16%	57%	1,73	1,76	0,67
04/09/2021	7,48	25,72	11,08	26,40	8,88	8,99	25,95	2,47	0,00	5	6%	4%	16%	8%	18%	31%	14%	18%	31%	2,12	2,57	0,80
05/09/2021	4,86	20,50	9,27	15,87	7,81	7,32	20,27	2,92	0,06	5	10%	0%	29%	14%	18%	35%	33%	24%	35%	1,67	1,73	0,76
06/09/2021	11,99	34,03	13,01	24,35	11,35	13,00	39,78	2,85	0,29	5	6%	4%	61%	6%	26%	80%	35%	26%	80%	3,18	2,52	0,70
07/09/2021	13,46	37,45	17,92	33,43	13,33	15,24	43,96	3,36	0,62	3	6%		34%	10%		51%	29%		51%	2,18		0,70
08/09/2021	5,75	23,68	13,60	23,42	4,36	13,26	44,40	2,87	0,96	4	2%		23%	8%		48%	20%		48%	2,33		0,66
09/09/2021	9,75	35,19	18,81	22,16	11,99	20,44	57,08	1,63	1,28	4	14%		26%	27%		42%	41%		42%	1,37		0,44
10/09/2021	18,67	42,91	18,78	33,25	14,68	14,06	46,71	0,24	0,50	4	4%		23%	12%		32%	20%		32%	1,71		0,74
11/09/2021	9,65	23,99	9,41	27,08	9,93	8,62	28,40	0,30	0,30	4	6%		21%	16%		56%	22%		56%	2,16		0,81
12/09/2021	9,82	27,01	16,87	17,07	9,84	10,10	21,56	0,51	0,21	4	14%		22%	29%		53%	43%		53%	2,19		0,82
13/09/2021	9,29	30,00	17,52	21,15	11,81	10,14	34,90	0,13	0,54	3	6%		30%	12%		43%	33%		43%	1,90		0,89
14/09/2021	17,28	30,35	9,98	21,77	17,17	19,01	43,07	0,50	0,77	3	10%		52%	18%		75%	31%		75%	2,59		0,69
15/09/2021	44,64	79,20	41,36	50,86	41,92	45,56	81,46	1,94	1,82	3	10%		30%	29%		35%	55%		35%	1,12		0,35
16/09/2021	21,45	40,59	26,01	31,58	23,14	19,38	52,01	0,45	0,85	2	14%		13%	27%		40%	33%		40%	1,29		0,53
17/09/2021	13,20	29,33	16,92	22,74	11,42	9,73	27,77	0,10	0,37	5	2%		25%	6%		35%	18%		35%	1,98		0,79
18/09/2021	7,26	25,72	11,38	23,41	7,73	7,03	18,84	0,13	0,26	4	8%		10%	14%		27%	20%		27%	2,06		0,79

Pour définir quelles journées sont jugées comme « particulières », il peut être intéressant de filtrer les journées avec les max des moyennes de SO₂ et choisir celles avec le plus de vent dans la bonne direction. Une autre option est d'identifier les pics brusques comme celui du 15/09 avec une valeur de SO₂ relativement faible, mais avec une pente très forte.

Le même processus peut être répété en récupérant les valeurs maximales en journée.

Tableau 5.5.2: Tableau des valeurs max NO₂ et SO₂, nombre de navires à quai par jour, et pourcentage de vent soufflant dans les différentes directions (Est/Sud-Est, etc.) avec vitesse du vent du 11/08 au 18/09 2021 - Ajaccio période estivale 2021, 6h/18h TU.

	Micro-Capteurs					Stations Fixes				Escal	Direction Vent E			Direction Vent E/SE			Direction Vent E/SE/S			Vitesse du Vent (~m/s)		
Étiquettes de lignes	Max de Hôpital AJA	Max de Local Accès	Max de Capitainerie Sud	Max de Gare Maritime	Max de Canetto	Max de NO2 Canetto	Max de NO2 ABB	MAX SO2 Canetto	MAX SO2 ABB	Nb NAV	PN	PS	CAN	PN	PS	CAN	PN	PS	CAN	PN	PS	CAN
11/08/2021	119,15	179,62	118,09	268,65	100,73	54,90	97,80	11,00	1,10	5			51%			67%			71%			0,82
12/08/2021	53,33	125,09	120,28	159,72	55,59	93,60	144,20	17,90	2,20	3			29%			44%			44%			0,60
13/08/2021	105,62	153,65	147,72	134,56	99,83	52,70	123,10	7,50	2,40	5			63%			82%			82%			0,76
14/08/2021	107,89	185,00	223,14	160,68	91,05	83,80	78,90	4,00	0,90	5			56%			75%			77%			0,73
15/08/2021	148,20	224,48	74,02	91,66	132,69	71,90	116,60	4,30	1,10	4			69%			71%			71%			0,77
16/08/2021	65,14	53,29	111,50	61,79	47,95	65,30	146,60	12,00	2,10	4			26%			68%			68%			0,85
17/08/2021	58,18	72,46	76,07	85,15	30,19	30,20	82,70	3,50	1,30	5	0%		14%	0%	39%	0%		39%	3,18			0,88
18/08/2021	59,23	68,00	56,76	57,28	58,90	47,00	166,80	3,50	1,50	4	12%		29%	12%	73%	20%		73%	2,86			0,98
19/08/2021	46,78	69,53	65,83	44,34	37,52	34,40	95,10	7,20	1,90	4	10%		29%	18%	49%	24%		49%	2,73			0,96
20/08/2021	28,54	86,19	56,46	89,35	35,08	46,10	134,30	6,30	1,60	6	8%		19%	8%	54%	20%		54%	2,65			0,77
21/08/2021	13,68	60,83	49,29	45,56	26,81	39,50	56,80	9,80	1,20	5	2%		27%	6%	51%	24%		51%	2,73			0,88
22/08/2021	35,18	68,09	74,39	90,20	40,10	36,40	45,30	6,30	1,10	4	6%		25%	10%	46%	24%		46%	2,22			0,81
23/08/2021	38,74	75,12	60,43	72,18	33,38	32,60	69,90	4,10	1,00	5	12%		14%	14%	63%	20%		63%	2,92			0,86
24/08/2021	40,53	70,26	70,77	124,36	39,47	44,00	112,90	13,10	5,80	5	12%		24%	22%	59%	39%		59%	2,06			0,73
25/08/2021	109,18	98,20	110,05	70,42	43,39	35,50	151,40	4,70	1,10	6	20%		21%	29%	40%	39%		40%	1,61			0,69
26/08/2021	37,63	90,31	50,78	73,86	51,66	48,60	117,30	6,90	1,90	4	4%	0%	21%	6%	0%	33%	27%	0%	33%	1,55	2,82	0,85
27/08/2021	24,98	83,12	86,84	69,02	33,42	30,00	67,20	4,50	0,80	4	6%	2%	7%	8%	10%	13%	14%	14%	13%	1,78	3,53	0,93
28/08/2021	30,60	79,33	62,73	86,84	40,93	22,30	48,00	3,00	1,00	5	0%	2%	39%	6%	6%	74%	18%	8%	74%	3,29	3,14	0,98
29/08/2021	60,29	67,58	69,99	48,30	31,63	15,10	47,10	3,90	0,80	4	8%	0%	17%	18%	12%	61%	22%	14%	61%	2,29	2,98	0,93
30/08/2021	49,61	95,04	140,45	57,65	34,43	30,90	68,00	4,60	1,60	5	2%	0%	10%	6%	4%	37%	12%	8%	37%	2,24	2,86	0,90
31/08/2021	43,54	78,68	75,26	72,65	39,22	43,10	117,60	7,30	1,70	4	4%	0%	33%	6%	4%	50%	27%	6%	50%	2,12	3,37	0,81
01/09/2021	15,26	72,36	56,47	65,04	36,00	19,20	77,60	2,60	13,40	4	16%	0%	30%	35%	9%	49%	51%	9%	49%	2,27	2,69	0,97
02/09/2021	67,70	129,89	94,67	115,04	54,49	51,50	110,80	3,10	0,60	4	0%	2%	10%	4%	20%	17%	8%	20%	17%	2,08	2,41	0,73
03/09/2021	56,07	109,80	113,25	82,76	74,01	44,40	68,90	10,50	0,80	4	8%	2%	38%	14%	8%	57%	53%	16%	57%	1,73	1,76	0,67
04/09/2021	56,43	92,70	68,08	83,12	53,12	45,50	59,20	3,40	0,60	5	6%	4%	16%	8%	18%	31%	14%	18%	31%	2,12	2,57	0,80
05/09/2021	54,05	95,67	62,85	63,40	48,58	51,30	43,70	6,00	0,50	5	10%	0%	29%	14%	18%	35%	33%	24%	35%	1,67	1,73	0,76
06/09/2021	58,20	102,56	103,09	71,50	53,86	40,70	137,70	4,90	1,20	5	6%	4%	61%	6%	26%	80%	35%	26%	80%	3,18	2,52	0,73
07/09/2021	79,81	113,00	87,91	98,51	92,33	65,50	211,30	10,70	1,60	3	6%		34%	10%	51%	29%		51%	2,18			0,70
08/09/2021	48,39	149,52	59,07	91,16	51,09	65,70	101,40	5,90	2,20	4	2%		23%	8%	48%	20%		48%	2,33			0,66
09/09/2021	58,23	152,04	117,50	106,75	93,69	82,70	125,70	5,50	5,90	4	14%		26%	27%	42%	41%		42%	1,37			0,44
10/09/2021	70,80	143,30	133,09	111,28	66,21	54,50	108,50	1,50	1,40	4	4%		23%	12%	32%	20%		32%	1,71			0,74
11/09/2021	54,95	82,34	43,93	98,69	51,34	38,00	60,00	6,00	0,80	4	6%		21%	16%	56%	22%		56%	2,69			0,81
12/09/2021	72,28	131,47	140,68	61,56	80,74	46,50	58,10	2,90	1,00	4	14%		22%	29%	53%	43%		53%	2,16			0,82
13/09/2021	65,29	115,01	110,29	73,24	54,91	34,60	104,00	1,50	5,20	3	6%		30%	12%	43%	33%		43%	1,90			0,89
14/09/2021	100,26	125,54	65,15	77,97	71,32	52,80	138,70	3,80	2,40	3	10%		52%	18%	75%	31%		75%	2,59			0,69
15/09/2021	107,77	171,54	118,17	146,55	102,77	80,10	275,80	17,20	7,50	3	10%		30%	29%	35%	55%		35%	1,12			0,35
16/09/2021	112,77	159,87	128,77	124,51	96,03	66,40	133,60	2,30	3,00	2	14%		13%	27%	40%	33%		40%	1,29			0,53
17/09/2021	83,87	118,67	100,46	78,01	83,67	50,10	84,40	1,10	1,80	5	2%		25%	6%	35%	18%		35%	1,98			0,79
18/09/2021	59,84	95,98	52,05	71,94	37,09	29,60	54,10	2,20	0,90	4	8%		10%	14%	27%	20%		27%	2,06			0,79

En appliquant un filtre sur les données SO₂, on peut identifier plus facilement les journées particulières intéressantes. Les journées qui ressortent sont celles du 24/08/2021 (pic Max SO₂ Canetto et Abbattu, 5 escales, vent favorable à 12%), du 01/09/2021 (pic SO₂ Abbattu, 4 escales, vent favorable à 16%) et du 15/09/2021 (pic SO₂ Canetto et Abbattu, 3 escales, vent favorable à 10%).

A des fins de comparaisons avec une journée chargée en escales mais sans trop d'impact apparent, la journée du 28/08/2021 (aucun pic important, 5 escales, très peu de vent d'est) est prise en compte.

De la même manière sur Bastia, en isolant les données mesurées sur la période de temps 6h/18h TU, des tendances plus imputables au trafic maritime apparaissent. Encore une fois, le marqueur SO₂ est utilisé pour mettre en évidence des épisodes ponctuels liés aux navires.

En comparant ces données aux informations météo et aux escales présentes, des journées particulières se dessinent, soit au niveau des moyennes journalières, soit en étudiant le maximum de certains polluants.

Tableau 5.5.3 Tableau des valeurs moyennes NO₂ et SO₂, nombre de navires à quai par jour, et pourcentage de vent soufflant dans les différentes directions (Est/Sud-Est, etc.) avec vitesse du vent du 18/08 au 27/09 2021 – Bastia période estivale 2021, 6h/18h TU.

Micro-Capteurs													Stations fixes						Escalés par jour	Direction du VENT																		
AVG Collège Simon		AVG Capitainerie Sud		AVG Eglise Madonna		AVG Pylône 7 Bis		AVG Fango		AVG Toit Mairie		AVG NO2 ODT		AVG NO2 GIRAUD		AVG NO2 FANGO		AVG SO2 Pylône 3		AVG SO2 GIRAUD		AVG SO2 FANGO		NEE/SEE				NE/SE				NE/S						
Date																										BP7	TMBI A	BP3	FANG O	BP7	TMBI A	BP3	FANG O	BP7	TMBI A	BP3	FANG O	
18/08/2021	27.3	6.0	17.9	15.7	7.8	5.4	39.8	17.2	18.9	4.10	0.70	1.17	4	16%	8%	35%	51%	10%	82%	53%	10%	84%					16%	8%	35%	51%	10%	82%	53%	10%	84%			
19/08/2021	52.2	8.2	19.8	35.5	10.1	7.7	52.9	13.7	15.6	4.10	0.06	0.97	4	14%	22%	49%	57%	27%	90%	63%	27%	90%					14%	22%	49%	57%	27%	90%	63%	27%	90%			
20/08/2021	35.8	9.6	22.9	32.1	10.0	5.1	51.0	19.6	15.5	3.80	0.86	1.00	5	51%	27%	67%	92%	43%	96%	94%	45%	98%					51%	27%	67%	92%	43%	96%	94%	45%	98%			
21/08/2021	26.9	4.8	18.8	31.6	9.7	3.0	42.3	11.2	13.9	4.24	0.69	1.59	4	20%	37%	37%	51%	53%	63%	69%	65%	73%					20%	37%	37%	51%	53%	63%	69%	65%	73%			
22/08/2021	29.6	3.3	43.0	31.4	21.4	17.0	41.8	11.4	18.3	5.18	0.25	1.78	5	0%	4%	8%	8%	4%	43%	33%	4%	45%					0%	4%	8%	8%	4%	43%	33%	4%	45%			
23/08/2021	24.7	1.0	19.9	28.8	11.1	2.9	48.4	6.4	18.8	2.64	-0.27	0.95	3	14%	8%	10%	31%	14%	57%	33%	14%	57%					14%	8%	10%	31%	14%	57%	33%	14%	57%			
24/08/2021	51.8	8.1	20.2	23.4	17.7	7.1	54.2	8.2	13.7	1.14	0.09	1.00	3	21%	4%	6%	58%	16%	45%	10%	79%	49%	76%	33%		21%	4%	6%	2%	58%	16%	45%	10%	79%	49%	76%	33%	
25/08/2021	29.7	2.1	19.7	20.8	13.3	6.8	49.4	13.0	16.7	0.78	0.82	1.22	4	10%	24%	8%	29%	24%	41%	18%	47%	27%	41%	57%	47%	10%	24%	8%	29%	24%	41%	18%	47%	27%	41%	57%	47%	
26/08/2021	18.4	8.0	17.8	33.7	8.4	15.4	53.8	6.3	12.1	1.44	-0.20	0.83	3	0%	0%	0%	0%	0%	2%	6%	2%	24%	8%		0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	6%	2%	24%	8%			
27/08/2021	29.0	7.9	24.6	35.3	18.2	12.0	50.5	9.1	18.2	1.82	0.27	1.92	5	45%	51%	27%	39%	73%	71%	47%	80%	73%	88%	53%	88%	45%	51%	27%	39%	73%	71%	47%	80%	73%	88%	53%	88%	
28/08/2021	44.7	25.8	15.9	31.2	6.5	5.8	28.9	4.6	7.1	1.96	-0.36	0.94	4	63%	8%	45%	41%	69%	55%	71%	71%	73%	71%	86%	71%	63%	8%	45%	41%	69%	55%	71%	71%	73%	71%	86%	71%	
29/08/2021	14.9	1.2	21.3	18.0	17.8	10.0	42.5	6.5	16.1	3.22	0.28	2.41	4	2%	14%	6%	41%	4%	57%	10%	76%	6%	57%	12%	76%	2%	14%	6%	41%	4%	57%	10%	76%	6%	57%	12%	76%	
30/08/2021	20.2	1.6	17.7	19.7	13.6	15.4	51.8	6.6	16.0	2.72	-0.10	1.21	4	18%	29%	14%	69%	43%	78%	30%	92%	43%	82%	32%	92%	18%	29%	14%	69%	43%	78%	30%	92%	43%	82%	32%	92%	
31/08/2021	34.2	2.5	31.6	27.6	28.5	13.1	49.4	14.6	23.1	2.31	0.41	1.43	4	43%	31%	22%	45%	65%	55%	51%	71%	65%	76%	53%	84%	43%	31%	22%	45%	65%	55%	51%	71%	65%	76%	53%	84%	
01/09/2021	25.1	3.4	31.0	26.3	18.6	7.3	44.7	10.5	22.9	2.48	0.12	1.60	3	59%	35%	47%	49%	76%	71%	82%	76%	90%	92%	88%	92%	59%	35%	47%	49%	76%	71%	82%	76%	90%	92%	88%	92%	
02/09/2021	38.2	5.6	37.5	33.4	23.5	18.0	44.2	10.8	22.7	2.77	0.30	1.70	4	37%	14%	41%	59%	53%	67%	71%	76%	90%	88%	94%	37%	14%	41%	59%	53%	67%	71%	76%	90%	88%	94%			
03/09/2021	33.5	5.3	43.2	42.2	22.3	38.2	7.6	8.2	22.7	3.92	-0.24	1.17	5	10%	10%	14%	10%	14%	18%	16%	31%	14%	20%	16%	33%	10%	10%	14%	10%	14%	18%	16%	31%	14%	20%	16%	33%	
04/09/2021	31.5	4.6	31.8	31.8	14.8	11.7	45.4	6.4	12.4	3.82	-0.38	0.80	4	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	39%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	39%	0%	0%	
05/09/2021	44.9	18.3	17.6	30.2	9.3	4.3	29.1	4.9	11.2	2.76	0.00	1.04	4	18%	16%	16%	57%	37%	78%	29%	80%	43%	84%	31%	90%	18%	16%	16%	57%	37%	78%	29%	80%	43%	84%	31%	90%	
06/09/2021	27.5	11.7	17.1	25.5	13.8	4.4	47.5	14.3	22.4	4.26	0.70	1.64	4	71%	2%	63%	70%	76%	78%	96%	85%	96%	100%	96%	96%	71%	2%	63%	70%	76%	78%	96%	85%	96%	100%	96%	96%	
07/09/2021	36.5	3.9	17.6	25.0	20.8	3.0	73.2	15.3	27.3	4.31	0.49	1.15	5	0%	6%	31%	39%	0%	65%	69%	65%	100%	88%	96%	0%	6%	31%	39%	0%	65%	69%	65%	100%	88%	96%	0%	6%	
08/09/2021	35.1	4.1	33.2	34.5	24.7	7.6	79.8	21.8	30.4	3.38	2.69	2.04	4	0%	6%	0%	45%	55%	10%	88%	59%	10%	88%	59%	10%	6%	0%	45%	55%	10%	88%	59%	10%	88%	59%	10%		
09/09/2021	33.0	1.2	44.8	41.2	15.1	14.7	43.3	5.0	20.5	3.27	1.12	1.34	4	10%	2%	29%	39%	6%	84%	41%	8%	86%			10%	2%	29%	39%	6%	84%	41%	8%	86%					
10/09/2021	37.4	11.6	45.2	46.9	17.1	49.1	78.2	9.4	20.0	3.44	1.00	0.92	5	27%	22%	43%	57%	51%	84%	88%	53%	92%			27%	22%	43%	57%	51%	84%	88%	53%	92%					
11/09/2021	36.8	1.1	18.1	22.1	12.0	2.8	57.5	16.7	18.2	4.58	2.14	1.67	4	0%	0%	20%	29%	51%	96%	69%	96%	96%	96%			0%	0%	20%	29%	51%	96%	69%	96%	96%	96%			
12/09/2021	49.4	15.6	23.5	31.3	14.0	5.7	40.8	15.3	15.4	4.69	2.09	1.19	5	0%	0%	0%	20%	29%	51%	96%	69%	96%	96%			0%	0%	0%	20%	29%	51%	96%	69%	96%	96%	96%		
13/09/2021	39.9	9.6	39.0	48.8	28.8	21.1	43.0	21.0	32.7	2.83	2.02	1.55	4	7%	0%	16%	4%	93%	22%	80%	37%	100%	88%	98%	88%	7%	0%	16%	4%	93%	22%	80%	37%	100%	88%	98%	88%	
14/09/2021	35.4	4.4	34.1	40.1	19.8	25.1	52.5	9.2	17.3	1.86	1.19	0.84	3	39%	14%	50%	12%	63%	65%	71%	47%	76%	80%	100%	80%	39%	14%	50%	12%	63%	65%	71%	47%	76%	80%	100%	80%	
15/09/2021	42.8	23.2	43.7	56.6	16.4	25.8	48.7	8.6	13.2	2.04	0.89	0.70	3	37%	10%	22%	6%	71%	29%	84%	43%	92%	88%	94%	73%	37%	10%	22%	6%	71%	29%	84%	43%	92%	88%	94%	73%	
16/09/2021	36.5	48.7	50.1	46.3	33.3	38.1	54.2	15.1	23.7	1.84	1.14	0.63	3	41%	8%	14%	22%	86%	47%	86%	53%	94%	88%	88%		41%	8%	14%	22%	86%	47%	86%	53%	94%	88%	88%		
17/09/2021	36.1	7.2	52.1	50.1	14.3	64.9	41.8	9.3	14.7	2.85	1.31	0.69	4	20%	16%	20%	12%	33%	24%	35%	24%	35%	33%	80%	33%	20%	16%	20%	12%	33%	24%	35%	24%	35%	33%	80%	33%	
18/09/2021	35.5	4.8	49.0	44.4	9.1	58.1	37.5	5.4	8.0	3.25	1.50	0.79	4	24%	6%	24%	6%	33%	27%	59%	29%	51%	55%	80%	53%	24%	6%	24%	6%	33%	27%	59%	29%	51%	55%	80%	53%	
19/09/2021	18.0	2.3	17.3	15.4	2.6	7.7	23.8	2.9	5.5	3.00	1.24	0.64	3	10%	18%	4%	31%	20%	29%	16%	67%	20%	29%	24%	67%	10%	18%	4%	31%	20%	29%	16%	67%	20%	29%	24%	67%	
20/09/2021	30.6	0.3	27.0	28.2	5.6	10.7	44.0	6.9	9.7	4.02	1.49	0.70	5	16%	20%	14%	43%	29%	59%	18%	76%	29%	63%	18%	80%	16%	20%	14%	43%	29%	59%	18%	76%	29%	63%	18%	80%	
21/09/2021	39.4	0.0	57.0	36.2	16.4	23.2	47.7	16.8	22.8	5.10	1.79	1.18	3	57%	8%	51%	39%	61%	49%	65%	73%	67%	71%	69%	82%	57%	8%	51%	39%	61%	49%	65%	73%	67%	71%	69%	82%	
22/09/2021	41.4	0.0	30.3	24.5	14.4	8.6	43.6	18.4	24.1	5.31	2.28	2.02	3	39%	0%	10%	88%	39%	12%	71%	96%	96%	98%	100%		39%	0%	10%	88%	39%	12%	71%	96%	96%	98%	100%		
23/09/2021	29.3	0.0	27.8	28.6	12.8	7.6	48.4	9.4	18.8	4.88	1.39	1.18	2	67%	6%	35%	61%	73%	71%	69%	78%	73%	76%	90%	82%	67%	6%	35%	61%	73%	71%	69%	78%	73%	76%	90%	82%	
24/09/2021	37.2	0.0	70.5	39.2	22.8	47.5	44.9	9.4	15.6	14.39	1.39	0.93	5	22%	18%	24%	27%	35%	37%	37%	45%	37%	45%	41%	51%	22%	18%	24%	27%	35%	37%	37%	45%	37%	45%	41%	51%	
25/09/2021	73.5	0.0	92.1	48.6	24.2	29.7	48.6	9.7	15.6	4.42	0.93	0.72	3	8%	37%	8%	29%	43%	47%	12%	47%	45%	47%	24%	49%	8%	37%	8%	29%	43%	47%	12%	47%	45%	47%	24%	49%	
26/09/2021	32.7	0.0	34.9	48.3	11.9	12.6	29.9	6.8	10.5	3.94	1.00	0.80	2	0%	12%	0%	31%	8%	31%	2%	67%	8%	31%	8%	67%	0%	12%	0%	31%	8%	31%	2%	67%	8%	31%	8%	67%	
27/09/2021	29.0	0.0	37.0	32.3	12.3	24.1	49.2	15.8	21.3	4.94	2.66	3.25	4	55%	8%	35%	33%	57%	65%	61%	69%	57%	65%	69%	69%	55%	8%	35%	33%	57%	65%	61%	69%	57%	65%	69%	69%	

A des fins de comparaisons avec une journée chargée en escales mais sans trop d'impact apparent, la journée du 11/08/2021 (aucun pic de SO₂ important, une forte activité en NO₂, 5 escales, très peu de vent d'est) est prise en compte. Toutefois, il s'agit d'un début d'épisode de pollution aux particules sahariennes.

Tableau 5.5.4: Tableau des valeurs max NO₂ et SO₂, nombre de navires à quai par jour, et pourcentage de vent soufflant dans les différentes directions (Est/Sud-Est, etc.) avec vitesse du vent du 18/08 au 27/09 2021 – Bastia période estivale 2021, 6h/18h TU.

Micro-Capteurs											Stations fixes						Escalés par jour	Direction du VENT											
Date	Max de Collège Simon	Max de Capitainerie Sud	Max de App. JC	Max de Pylône 7 Bis	Max de FANGO	Max de Toit Mairie	Max de NO2 ODT	Max de NO2 GIRAUD	Max de NO2 FANGO	Max de SO2 Pylône 3	Max de SO2 GIRAUD	Max de SO2 FANGO	NEE/SEE					NE/SE				NE/S							
													BP7	TMBI A	BP3	FANG O		BP7	TMBI A	BP3	FANG O	BP7	TMBI A	BP3	FANG O				
18/08/2021	111.6	87.2	53.7	58.6	103.5	74.6	104.8	113.1	85.3	6.0	5.4	3.0	4	16%	8%	35%	51%	10%	82%	53%	10%	84%	60%	84%	60%				
19/08/2021	140.3	89.1	94.6	113.9	84.0	88.7	118.3	53.6	60.2	9.2	1.7	2.9	4	14%	22%	49%	57%	27%	90%	63%	27%	90%	67%	47%	40%				
20/08/2021	88.0	120.7	83.7	98.2	62.7	49.8	103.6	53.4	60.0	6.4	7.9	2.6	5	51%	27%	67%	92%	43%	96%	94%	45%	98%	94%	45%	98%				
21/08/2021	69.5	46.0	64.8	102.7	65.1	43.6	81.5	36.1	28.3	7.7	6.0	5.9	4	20%	37%	37%	51%	53%	63%	69%	65%	73%	69%	65%	73%				
22/08/2021	96.0	94.3	137.3	77.4	103.0	119.2	72.0	33.2	44.1	18.5	2.5	5.0	5	0%	4%	8%	8%	4%	43%	33%	4%	45%	33%	4%	45%				
23/08/2021	56.7	18.4	52.1	171.1	59.1	36.0	130.5	23.5	56.3	7.9	1.1	4.4	3	14%	8%	10%	31%	14%	57%	33%	14%	57%	33%	14%	57%				
24/08/2021	112.6	67.5	73.5	94.6	77.5	105.9	99.4	30.5	29.3	2.1	1.7	2.2	3	21%	4%	6%	2%	58%	16%	45%	10%	79%	49%	76%	33%				
25/08/2021	81.3	46.8	69.4	73.4	99.7	82.1	119.5	39.1	44.8	1.9	7.2	2.3	4	10%	24%	8%	29%	24%	41%	18%	47%	27%	41%	57%	47%				
26/08/2021	57.8	55.8	116.9	202.8	233.9	119.5	113.6	24.0	121.8	5.8	2.2	2.7	3	0%	0%	0%	2%	0%	2%	6%	2%	2%	24%	8%	2%				
27/08/2021	82.7	67.0	83.8	131.8	111.2	82.0	95.3	48.6	58.9	11.9	6.0	9.3	5	45%	51%	27%	39%	73%	71%	47%	80%	73%	88%	53%	88%				
28/08/2021	133.8	319.6	50.1	141.7	49.6	59.3	79.9	10.4	25.7	10.8	0.3	3.5	4	63%	8%	45%	41%	69%	55%	71%	71%	73%	71%	86%	71%				
29/08/2021	49.8	47.1	133.7	103.1	159.7	90.1	80.3	27.0	56.8	9.3	2.3	8.9	4	2%	14%	6%	41%	4%	57%	10%	76%	6%	57%	12%	76%				
30/08/2021	94.8	18.3	90.7	77.5	133.1	129.0	120.6	23.3	71.6	7.1	0.6	3.1	4	18%	29%	14%	69%	43%	78%	30%	92%	43%	82%	32%	92%				
31/08/2021	77.8	33.1	60.3	118.5	101.6	99.1	169.5	39.7	63.6	4.9	2.2	7.1	4	43%	31%	22%	45%	65%	55%	51%	71%	65%	76%	53%	44%				
01/09/2021	69.2	75.8	95.3	99.9	122.6	98.7	111.6	34.1	77.4	6.9	2.9	7.1	4	59%	35%	47%	49%	76%	71%	82%	76%	90%	92%	88%	92%				
02/09/2021	95.0	68.3	87.0	105.0	134.1	99.2	107.5	29.7	68.2	5.2	2.4	4.6	4	37%	14%	41%	41%	59%	53%	67%	71%	76%	90%	80%	94%				
03/09/2021	73.2	96.8	122.4	184.5	99.3	164.2	232.4	26.6	74.9	9.4	0.4	3.8	5	10%	10%	14%	10%	14%	18%	16%	31%	14%	20%	16%	33%				
04/09/2021	60.8	40.3	108.8	89.1	89.1	76.4	92.9	33.3	46.8	22.8	0.4	3.6	4	0%	0%	0%	6%	0%	0%	31%	0%	4%	2%	39%	0%				
05/09/2021	118.0	104.3	65.5	109.7	57.0	51.4	67.9	20.6	57.4	4.0	0.8	2.0	4	0%	0%	4%	0%	22%	0%	8%	0%	71%	0%	8%	0%				
06/09/2021	103.8	104.0	135.6	144.9	138.1	41.4	140.8	32.3	81.7	5.9	5.5	3.2	4	18%	16%	57%	37%	78%	29%	80%	43%	84%	51%	90%	43%				
07/09/2021	90.0	54.8	107.7	92.7	163.1	51.5	143.3	48.5	88.8	6.0	4.0	1.7	5	71%	2%	63%	70%	76%	85%	96%	96%	100%	96%	100%	96%				
08/09/2021	136.9	54.3	99.0	173.0	160.9	60.1	146.9	67.8	94.8	7.6	5.8	6.8	4	0%	6%	31%	0%	65%	68%	61%	100%	100%	83%	86%	100%				
09/09/2021	59.2	131.1	126.9	120.4	109.7	83.0	83.3	18.9	39.4	10.4	1.6	5.9	4	0%	0%	45%	0%	55%	10%	88%	50%	100%	92%	86%	100%				
10/09/2021	471.4	149.2	138.5	162.1	83.1	188.6	133.7	29.0	48.4	15.8	1.7	4.1	5	1%	27%	2%	29%	39%	6%	84%	41%	8%	86%	41%	8%				
11/09/2021	107.1	197.7	57.7	71.5	72.5	36.3	106.0	47.1	47.2	7.0	4.1	5.2	4	0%	0%	20%	29%	39%	6%	84%	41%	8%	86%	41%	8%				
12/09/2021	137.9	137.1	113.7	105.8	166.6	137.6	182.5	86.0	93.3	8.1	6.4	2.5	5	0%	20%	29%	39%	6%	84%	41%	8%	86%	41%	8%					
13/09/2021	81.7	86.1	87.5	76.5	87.5	80.5	80.5	46.1	66.1	3.0	2.0	7.6	4.1	7%	0%	16%	4%	93%	22%	80%	37%	100%	98%	98%					
14/09/2021	68.0	34.3	104.0	202.1	156.7	89.7	127.0	28.3	53.5	3.3	1.7	2.4	3	39%	14%	50%	12%	63%	65%	71%	47%	76%	80%	100%	80%				
15/09/2021	69.4	105.0	149.5	232.1	102.7	169.2	98.7	25.9	43.9	7.1	1.7	3.6	3	37%	10%	22%	6%	71%	29%	84%	43%	92%	88%	43%	73%				
16/09/2021	115.5	146.1	142.7	91.4	117.8	221.5	106.3	69.3	61.4	2.8	2.4	3.4	3	41%	8%	14%	22%	86%	47%	86%	53%	94%	98%	98%	88%				
17/09/2021	73.6	64.9	114.1	167.3	81.7	477.6	90.7	43.4	69.3	7.0	1.8	2.6	4	20%	16%	20%	12%	33%	24%	35%	24%	35%	33%	80%	33%				
18/09/2021	68.7	48.4	120.1	109.0	82.2	214.2	65.0	12.8	26.2	8.5	2.2	1.3	4	24%	6%	24%	6%	33%	27%	59%	29%	51%	55%	80%	88%				
19/09/2021	47.6	41.7	63.1	96.9	67.1	64.1	55.1	8.8	20.6	7.5	1.7	3.6	3	10%	18%	4%	31%	20%	16%	67%	20%	29%	24%	67%	20%				
20/09/2021	52.0	12.7	65.6	100.2	81.0	69.6	98.8	20.2	24.6	8.2	2.4	2.2	5	16%	20%	14%	43%	29%	59%	18%	76%	25%	63%	18%	80%				
21/09/2021	108.9	0.0	153.2	87.6	81.6	166.0	169.9	40.9	52.5	25.8	3.7	3.8	3	57%	8%	51%	39%	61%	49%	65%	73%	67%	71%	69%	82%				
22/09/2021	107.4	0.0	100.5	95.5	83.6	64.2	161.1	44.7	50.0	7.7	4.1	6.5	3	39%	0%	10%	88%	39%	12%	71%	96%	96%	98%	100%	98%				
23/09/2021	64.1	0.0	81.3	161.3	82.8	76.5	120.9	28.5	64.9	6.9	2.5	2.2	2	67%	6%	35%	61%	73%	71%	69%	78%	73%	76%	90%	82%				
24/09/2021	83.5	0.0	148.2	169.3	166.4	197.7	99.0	43.9	66.2	17.3	2.2	2.0	5	22%	18%	24%	27%	35%	37%	37%	45%	41%	51%	51%	51%				
25/09/2021	127.9	0.0	180.5	88.3	174.1	217.9	86.3	12.6	47.3	7.2	1.7	2.4	3	8%	37%	8%	29%	43%	47%	12%	47%	45%	47%	24%	49%				
26/09/2021	64.7	0.0	110.7	164.1	81.4	144.9	66.1	24.3	37.5	9.0	2.9	1.8	2	0%	12%	0%	31%	8%	31%	2%	67%	8%	31%	8%	67%				
27/09/2021	83.2	0.0	118.0	112.5	104.6	108.8	145.0	67.0	20.1	6.5	4.3	5.3	4	55%	8%	35%	33%	57%	65%	61%	69%	57%	65%	69%	69%				

En appliquant un filtre sur les données SO₂, on peut identifier plus rapidement les journées particulières intéressantes. Les journées qui ressortent sont celles du 27/08/2021 (pic Max SO₂ Pylône 3 et Fango, 5 escales, vent favorable à 40%), du 21/09/2021 (pic SO₂ très important Pylône 3, très fortes valeurs NO₂ au niveau des stations/micro-capteurs dans une zone précise, 3 escales, vent favorable à 40%), du 24/09/2021 (moyennes importantes sur des endroits localisés, 5 escales, et un vent à 20%), et du 27/09/2021 (pic SO₂ en moyenne, épisode de pollution éruption Canaries, 4 escales, vent favorable à 40%).

Détection des penaches – Journées particulières

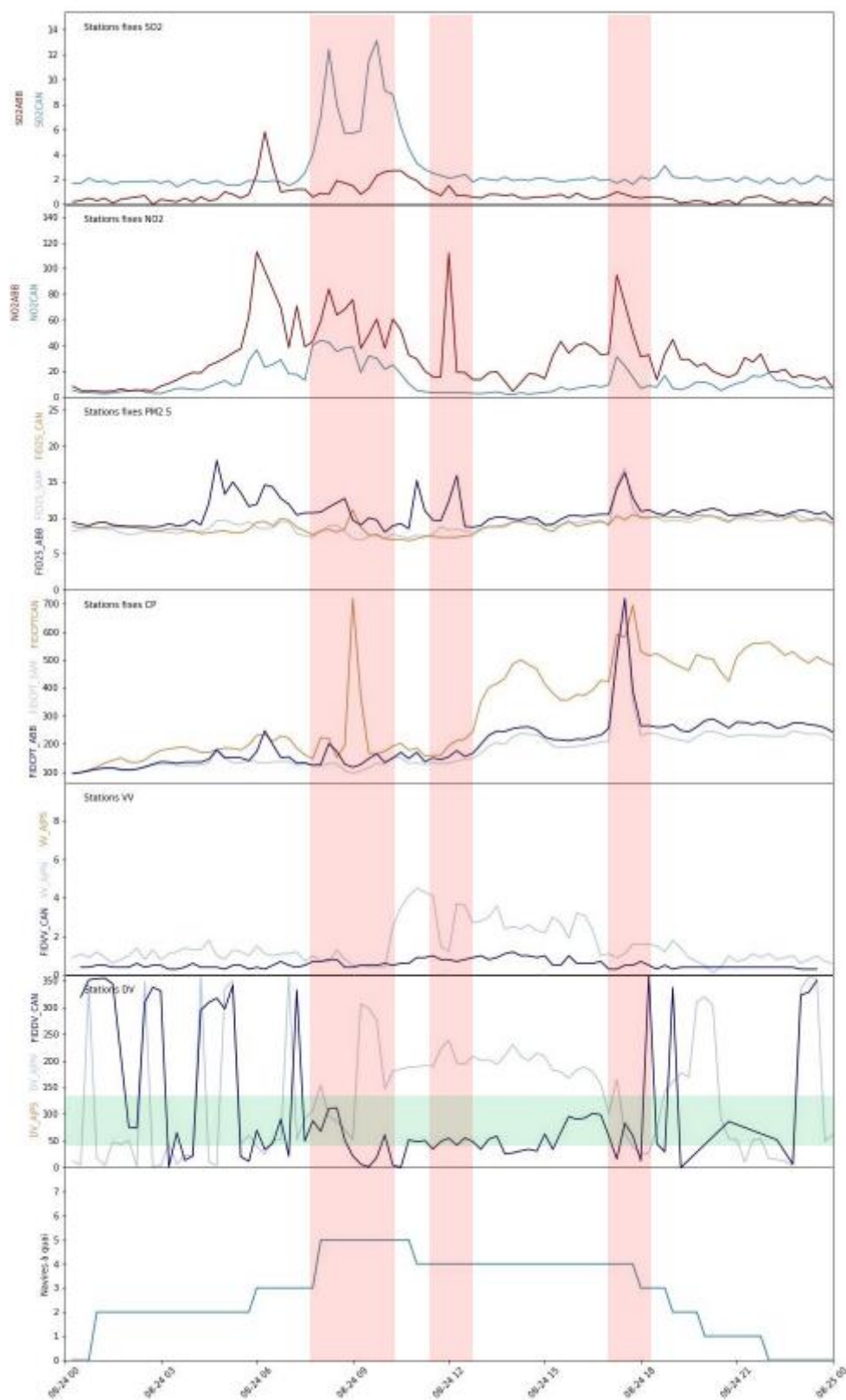


Figure 5.5.4: Journée particulière du 24 août 2021 – Ajaccio.

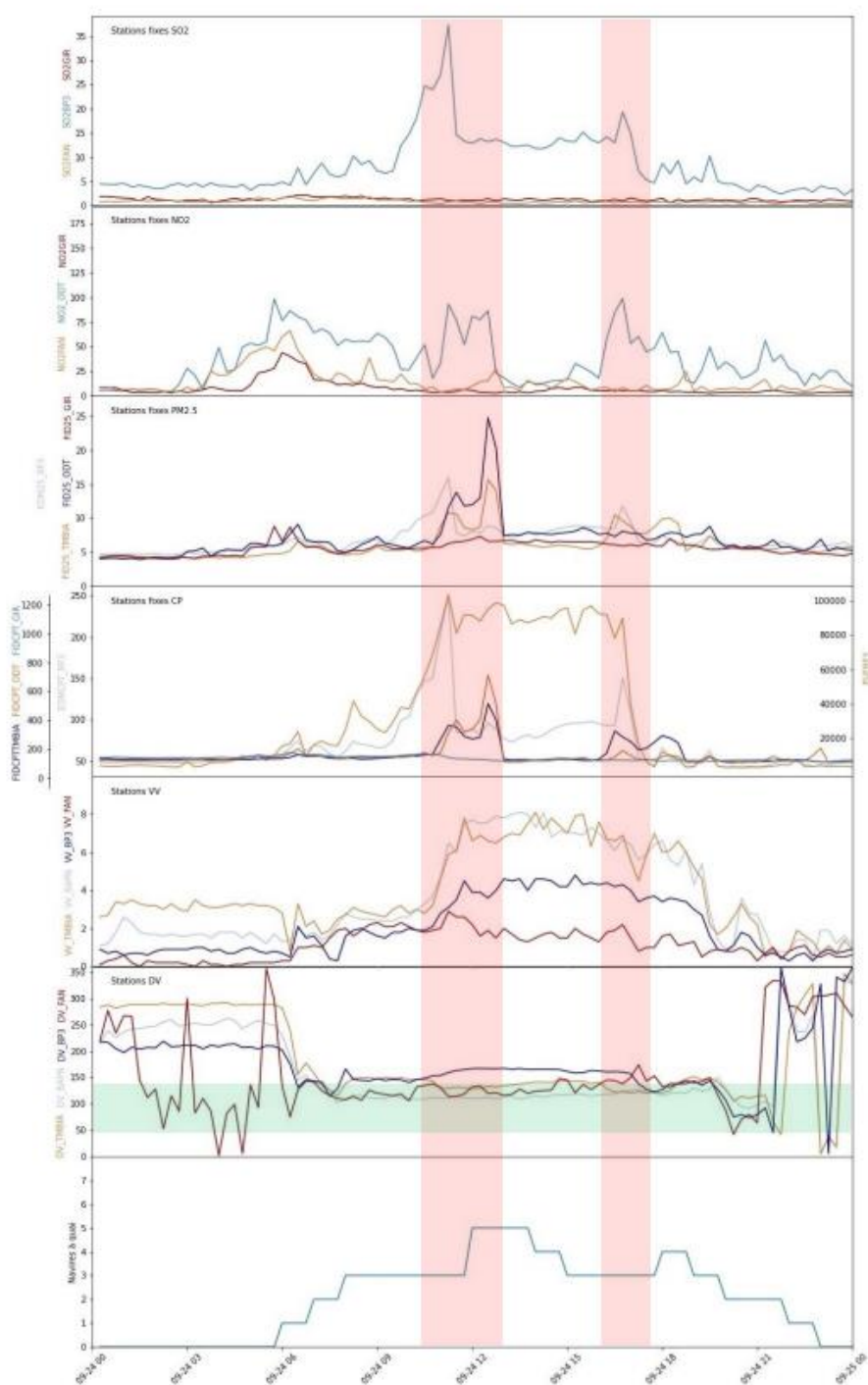


Figure 5.5.5: Journée particulière du 24 septembre 2021 - Bastia

Sur les graphiques précédents, les pics de SO_2 corrélés sont identifiés via les bandes rouges. La plage d'axe de vent favorable élargie aux mesures est symbolisée par des bandes vertes. Dans ces cas-là, l'arrivée ou le départ d'un navire peut être noté, corrélé à un vent de Nord-Est pour Ajaccio, et de Sud-Est pour Bastia, correspondants aux directions de vents propices à la dispersion des polluants vers les stations du réseau.

Il est particulièrement intéressant de suivre l'évolution des mesures du comptage de particules, notamment des plus fines mesuré par la station temporaire au pylône 3 (PUF - $7\text{nm} / 1\mu\text{m}$). En effet, dans quasiment tous les cas de pics SO_2 identifiables à des panaches de navires, il s'en suit une augmentation significative du nombre de particules de très petite taille.

Pour rappel, la gamme de mesures des instruments de comptage de particules est la suivante:

Tableau 5.5.5: Plage de mesure des instruments pour le comptage de particules

Instrument	Plage de mesure
FIDAS (FIDCPT)	[180nm – 18µm]
EDM	[250nm – 32µm]
CPC (PUF)	[7nm – 1µm]

Il s'agit là des cas les plus visuels pour Ajaccio et Bastia, avec des pics de polluants possiblement liés à la présence de navires à quai, étant donné les axes de vent de ces jours particuliers. Il est intéressant de remarquer également qu'à conditions de vent égales, les mesures sur Bastia ne semblent pas faire état de nouveaux pics lors du départ de deux navires aux alentours de 14h TU, avec toutefois des moyennes assez élevées sur le SO₂ et les Particules Ultra Fines (PUF).

La modélisation permettra de confirmer si la hausse de pollution est liée aux panaches des navires ou imputables à d'autres sources, avec les micro-capteurs qui viendront compléter la résolution spatiale des mesures (car ces courbes sont celles des stations fixes et temporaires).

6. Conclusion

Dans le cadre du projet AerNostrum, chaque partenaire a rapporté les résultats obtenus dans les zones portuaires des cinq régions géographiques faisant partie de la coopération transfrontalière du projet. Les résultats ont été obtenus en exploitant les méthodologies conventionnelles de surveillance de la qualité de l'air, et en intégrant les résultats avec ceux dérivés de l'utilisation d'instruments alternatifs, avec lesquels il a été possible d'augmenter à la fois la résolution spatiale et temporelle des connaissances, et de vérifier quelles étaient les meilleures façons de les utiliser pour optimiser la fiabilité de ces outils.

Le résumé des résultats de surveillance qui caractérisent le plus chaque port à l'étude est présenté ci-dessous.

• Zone du port de Gênes (Ligurie)

La campagne d'échantillonnage déployée dans le port de Gênes pendant le projet reposait sur deux catégories d'instruments. D'une part, des instruments fixes, qui ont permis l'acquisition de données solides, et d'autre part, des instruments non conventionnels (intelligents), affectés par plusieurs problèmes.

En ce qui concerne les instruments non conventionnels, en résumé, il convient de noter que pour le NO₂, pour lequel un seul type de capteur intelligent a été utilisé, une excellente précision mais une mauvaise exactitude ont été constatées : en détail, les huit capteurs installés dans le cadre du projet, ont montré des évolutions et des valeurs en excellent accord les uns avec les autres mais avec des valeurs moyennes différentes par rapport aux instruments certifiés, probablement en raison des conditions météorologiques et environnementales. Pour les particules, deux types de capteurs ont été utilisés : tous deux reproduisent mieux les particules les plus fines, alors que pour les PM₁₀, ils présentent les mêmes limites principales que la plupart des systèmes optiques intelligents pour la détermination des particules, probablement en raison du volume d'échantillonnage limité qui est « analysé » par le système de mesure ; on remarque également que les deux types d'instruments intelligents étaient en accord l'un avec l'autre. En ce qui concerne les deux campagnes expérimentales réalisées à l'été 2021 et au printemps 2022, l'échantillonnage des PM₁₀ a permis d'obtenir une image complète de la composition incluant les composants organiques, ioniques et élémentaires des particules carbonées (OC et EC). Les données obtenues montrent des concentrations non négligeables de PM₁₀ et de certains de ses composants (notamment secondaires, OC et EC) et permettent de construire une base de données suffisamment importante pour une analyse statistique au moyen d'un modèle récepteur.

Les résultats de l'analyse PMF sur les données des PM₁₀ collectées sur les sites de Corso Firenze et San Teodoro ont montré la présence de 5 sources primaires, 2 sources secondaires de PM₁₀ et une source purement locale de resuspension crustale (poussière minérale).

La concentration moyenne de PM₁₀ s'est avérée être d'environ 21 µg/m³ avec une répartition des sources qui voit les sources anthropiques (*Sulfates secondaires, Nitrates secondaires, Émissions des navires, Trafic, Combustion de biomasse, Sol*) contribuer pour plus de 80 % à cette valeur.

L'apport primaire aux PM₁₀ de la source associée à la combustion d'huiles lourdes liée aux *Émissions des navires* se situe en moyenne entre environ 5% (Corso Firenze) et 10% (San Teodoro) pendant les campagnes menées dans le cadre du Projet.

• Zone des ports de Cagliari et Olbia (Sardaigne)

L'étude a décrit l'état de la qualité de l'air dans les ports de Cagliari et d'Olbia. Il décrit l'état initial de l'environnement (phase ante-operam) qui est fondamental pour les futurs projets de développement et pour le suivi de l'évolution de la planification portuaire, dans les phases opérationnelles et finales (post-operam) des différents projets et pour le suivi des indicateurs utiles à la planification portuaire.

- L'analyse des données montre une criticité pour le paramètre NO₂, un problème commun aux deux ports, mettant en évidence des pics horaires et journaliers résolument élevés, en particulier pour le port d'Olbia, de l'ordre de grandeur typique des stations de trafic urbain, partageant souvent leur tendance saisonnière.
- Les valeurs de SO₂ sont également significatives, avec l'apparition de valeurs de pointe par rapport aux valeurs de fond mesurées par les stations de référence urbaines. En outre, le port d'Olbia présente des mesures de SO₂ particulièrement élevées, caractérisées par une forte directionnalité et corrélation par rapport aux zones affectées par les activités portuaires.
- En revanche, la situation en ce qui concerne les PM₁₀ est plus contenue, une circonstance positive qui est particulièrement évidente dans la zone d'Olbia. En effet, dans les deux ports sardes, les valeurs mesurées et les dépassements relatifs sont plus faibles que dans les stations urbaines, qui sont évidemment affectées par des contributions importantes et prévalentes d'autres sources d'émission.
- Dans le port de Cagliari, les PM_{2.5} présentent une tendance intermédiaire entre les stations de fond et les stations de trafic, tandis qu'à Olbia elles sont plus contenues et similaires aux valeurs de fond habituelles.
- De même, les moyennes de benzène sont contenues et en ligne avec les stations urbaines de référence.
- Des valeurs élevées de PM ont été trouvées pendant deux jours de la campagne d'hiver à la jetée de Cagliari, avec l'utilisation de compteurs de particules.
- En ce qui concerne les métaux (As, Cd, Hg, Ni et Pb) et le benzo(a)pyrène (BaP), les valeurs sont généralement contenues, sans différences significatives entre la zone portuaire et les zones urbaines, avec toutefois des valeurs de fond moyennes plus élevées dans la zone de Cagliari par rapport à Olbia.

UNICA a évalué la concentration de polluants dans les ports de Cagliari et d'Olbia en utilisant un échantillonnage passif, mettant en évidence les différences saisonnières et spatiales. Afin d'effectuer une comparaison avec l'instrumentation conventionnelle lorsque cela était possible, des échantillonneurs passifs ont été positionnés dans les stations mobiles et fixes de l'ARPAS: à Cagliari, il n'y avait qu'une seule station, correspondant au point MS, tandis qu'à Olbia, il y avait trois stations, IB, OP et OC.

Une comparaison des données recueillies:

- a révélé une corrélation significative uniquement pour le benzène ($R^2 = 0,8034$) et pour les HAP $\Sigma 6$ ($R^2 = 0,9201$).
- En revanche, aucune corrélation n'a été trouvée entre les deux techniques pour le NO₂ et le SO₂, bien que pour le NO₂ il y ait eu une forte concordance pour la plupart des données mesurées avec les deux méthodes.

Bien que le nombre d'échantillons examinés soit limité et la période d'investigation restreinte, les données acquises permettent d'affirmer que l'utilisation d'échantillonneurs passifs constitue un complément valable aux instruments continus utilisés dans la surveillance environnementale, permettant d'élargir les connaissances sur la distribution spatio-temporelle des contaminants.

Enfin, en ce qui concerne l'utilisation de compteurs de particules, des valeurs élevées ont été relevées pendant deux jours de la campagne d'hiver sur le quai de Cagliari. Il est nécessaire de poursuivre la surveillance afin de produire des données utiles pour générer des modèles de dispersion et des informations utiles pour un réaménagement de la zone qui tienne compte et atténue les effets négatifs potentiels sur la santé des citoyens et des travailleurs employés dans la zone, également sur la base des nouvelles technologies récemment introduites (RoRo Cargo hybride).

L'intégration de ces résultats avec les données du trafic maritime est en cours.

• Zone du Port de Livourne et Portoferraio (Toscane)

L'utilisation d'instruments non conventionnels, d'échantillonneurs passifs, de OPC et de compteurs de nanoparticules a permis d'améliorer les connaissances sur la résolution spatiale et temporelle des niveaux de concentration de gaz et de particules.

Les données obtenues par les échantillonneurs passifs et l'OPC ont été comparées aux données obtenues par les instruments prévus par le décret législatif 155/10.

L'enquête a permis de caractériser les trois sites pour chacun des polluants étudiés, ce qui a donné les résultats suivants:

- Les polluants qui diffèrent des données mesurées dans les stations de suivi continue de la ville de Livourne, bien que respectant les limites réglementaires lorsqu'elles sont présentes, sont les suivants: oxydes d'azote et particules
- Le suivi a révélé que la concentration moyenne annuelle des deux oxydes d'azote (NO et NO₂) enregistrée sur les sites portuaires est plus élevée que celle enregistrée dans les stations urbaines de fond.
- Le suivi indique donc la présence d'importantes sources de combustion portuaires près des sites de Fortezza Vecchia, Calata Bengasi et Portoferraio.
- La corrélation des données moyennes par minute de NO_x avec les données météorologiques, effectuée pour les deux sites de Livourne, a confirmé que les concentrations les plus élevées d'oxydes d'azote ont été enregistrées en conjonction avec des conditions de vent provenant de la direction des postes d'amarrage voisins, et que le passage du navire affecte considérablement les concentrations instantanées de NO et de NO₂.
- Sur les trois sites, le suivi a montré que les valeurs de SO₂, CO et C₆H₆ et dérivés des zones portuaires étudiées respectent largement les limites imposées par la législation en vigueur, sont particulièrement faibles et ne présentent pas d'heures de pointe.
- Le site de Fortezza Vecchia s'est distingué par des valeurs journalières et moyennes de PM₁₀ élevées, non seulement par rapport aux deux autres sites portuaires, mais aussi par rapport aux stations de RRQA prises comme référence, dépassant de plus de 50 % le fond urbain moyen et de plus de 20 % le site de trafic. La valeur moyenne des PM_{2.5} pour le site de Fortezza Vecchia est également supérieure à la fois à la valeur de fond (plus de 60 %) et à la valeur moyenne pour le trafic urbain.
- Les concentrations moyennes de PM₁₀ et PM_{2.5} sur les sites de Calata Bengasi et Portoferraio n'étaient pas significativement différentes de celles des stations RRQA prises comme référence ;
- La corrélation des données de PM par minute avec les données météorologiques, effectuée pour les deux sites de Livourne, semble suggérer une influence différente des sources sur les trois classes de PM.
- En particulier, les PM₁₀ semblent être plus indicatives du trafic induit par les activités portuaires avec une composante de soulèvement se produisant à des vitesses de vent élevées. Les composants les plus fins, en particulier les PM₁, semblent plutôt avoir des niveaux plus élevés vers les zones de manutention des navires.
- Sur le site de Fortezza Vecchia, les moyennes globales d'As, de Cd et de Pb étaient légèrement supérieures à celles du site de Calata Bengasi et du fond urbain, qui étaient très proches les uns des autres.
- Pour le Ni et le V, traceurs de la combustion d'huile lourde, les concentrations enregistrées sur les deux sites portuaires étaient significativement plus élevées que les valeurs trouvées sur le site de fond urbain, indiquant une contribution claire de la combustion d'huile.
- La concentration moyenne de B(a)P sur le site de Portoferraio était très faible, comme prévu étant donné la période d'échantillonnage exclusivement estivale. Cependant, la moyenne générale est au moins cinq fois supérieure à celle des stations de fond RRQA prises comme référence, avec des valeurs comparables à celles du site de trafic RR, ce qui suggère la présence de sources de combustion importantes à proximité du site.

L'utilisation des instruments non conventionnels OCP et Nanoscan, achetés dans le cadre du projet, fonctionnant en mode « continu » grâce à une armoire spécialement construite et contrôlée à distance, a permis de réaliser des enquêtes saisonnières avec une résolution temporelle très élevée (enregistrement des données à la minute en moyenne), et une durée considérable (en moyenne 2 semaines pour l'OPC et 10 jours pour le Nanoscan). Les données renvoyées, subdivisées en classes de taille de particules allant des nanoparticules à la fraction PM₁₀, ont permis d'approfondir la compréhension de la distribution des particules, de leur origine et de leur provenance, permettant ainsi d'émettre des hypothèses sur les sources.

En particulier, l'utilisation de cette instrumentation, associée à des données à la minute de polluants gazeux, a permis d'établir des corrélations entre les passages et stationnements des navires et la détection des polluants eux-mêmes.

En conclusion, en dehors de cas particuliers, le passage ou l'arrêt des navires, lorsqu'il a un effet direct sur les données de suivi, est souvent reconnaissable dans les moyennes à la minute. Des niveaux de fond élevés ou la présence de plusieurs sources simultanées à différentes distances brouillent les signaux et il n'est pas toujours possible d'identifier clairement la contribution spécifique des navires.

• Zone du port de Toulon (Région Paca)

Le dispositif déployé au cours de la campagne réalisée à Toulon en 2021 a reposé sur deux catégories d'instruments. D'une part, des cabines dotées d'instruments de mesure précis ont permis d'acquérir des données robustes, grâce auxquelles il a été possible de caractériser la composition des panaches.

- Plusieurs espèces ressortent comme de bons marqueurs de la pollution maritime dans cette campagne, à savoir les NO_x, le SO₂, le black carbon et le nombre de particules fines.

D'autre part, des microcapteurs ont été déployés chez des riverains volontaires, habitant à des hauteurs différentes, permettant de densifier le nombre de points de mesure. Bien que pénalisées par une incertitude non négligeable, les données des microcapteurs fournissent une information semi-quantitative, qui vient compléter les données acquises grâce aux cabines, en améliorant la caractérisation spatiale de la pollution. Ceci est d'autant plus utile dans des environnements complexes tels qu'une rade circulaire qui peut donner lieu à des micro-phénomènes météorologiques. L'analyse des données des microcapteurs, avec un traitement spécifique pour les PM, permet d'observer la dynamique de pollution propre à la rade de Toulon, plutôt de type urbain le matin sous l'effet de la brise de terre, puis passant sous l'influence des navires en deuxième partie de journée, sous l'action de la rotation des vents.

Les données de concentration enregistrées par les cabines ont été comparées aux lignes directrices définies par l'OMS.

- Aucun dépassement n'est observé pour SO₂.
- Quelques dépassements sont observés pour les PM_{2.5} de manière ponctuelle.
- De fréquents dépassements sont enregistrés pour NO₂, en particulier à la cabine Toulon TCA, qui est à la fois sous l'influence des navires et du trafic automobile.

Par ailleurs, les données de la cabine ont permis d'identifier un certain nombre de panaches. Les plus nets d'entre eux seront modélisés par la suite dans le cadre du livrable T2.3.1, pour évaluer les performances du modèle de simulation de panaches par comparaison aux données réelles. Les données des microcapteurs pourront fournir des indications supplémentaires sur la dispersion des panaches, y compris dans la direction verticale. La modélisation d'un scénario « de base », reproduisant le plus fidèlement possible des données réelles, permettra enfin de scénariser des solutions de réduction des émissions maritimes (livrable T3.3).

- **Zone des ports d'Ajaccio et de Bastia (Corse)**

L'étude a permis de démontrer qu'il n'y avait pas une corrélation systématique entre une présence de navires à quai et une augmentation des polluants principaux sur les zones de mesure. De manière générale, selon les mesures des analyseurs de référence, les dépassements des lignes directrices de l'OMS sont rares et concernent principalement les moyennes journalières sur des sites « trafic », ne pouvant donc pas être directement attribuables au maritime (cf. courbes moyennes horaires et journalières). L'impact des navires est généralement très ponctuel, notamment au moment des manœuvres d'arrivée et de départ, et une étude plus poussée en résolution temporelle permettrait d'approfondir les connaissances sur celui-ci. Un nombre de navires à quai plus ou moins important ne semble pas a priori impacter de manière significative les zones de la ville pour lesquelles des stations de mesure sont présentes.

Une part importante du programme AER NOSTRUM porte notamment sur l'identification de la pollution maritime par rapport aux autres sources émissives : en se basant sur des pics corrélés de NO₂ et SO₂, il est possible d'attester une origine maritime d'une pollution localisée dans le temps et l'espace si et seulement si les conditions météorologiques orientent et diffusent les panaches des navires vers les appareils de mesure.

Il serait alors intéressant de poursuivre l'étude en se basant sur d'autres corrélations de polluants par rapport aux conditions météo. De plus, ce bilan des mesures s'inscrivant dans l'axe T1 du projet AER NOSTRUM alimente un logiciel de modélisation 3D (axe T2) qui permettra de quantifier plus en détail l'impact des navires sur la ville.

D'autre part, l'impact sur les habitants dépend principalement de leur emplacement par rapport à la rose des vents d'Ajaccio et de Bastia :

- D'axe Nord/Sud à Ajaccio, les principales personnes impactées par la pollution causée par les navires se situeraient au Nord du port, dans le quartier des Cannes et Salines, et une prochaine étude hors cadre AER NOSTRUM pourrait venir appuyer ces conclusions.
- D'axe Est/Ouest à Bastia, la quasi-totalité des habitants à l'Ouest du port sont concernés, notamment l'après-midi quand la brise de mer se met en place.

L'impact de cette pollution maritime n'est donc pas systématique sur la ville – ou à défaut une partie – car elle dépend principalement des conditions météo et du type de navire présent à quai (carburant utilisé, système de dépollution à bord, vétusté du navire...).

En identifiant les moments pendant lesquelles des pics récurrents interviennent, il serait également possible d'identifier quel type de navire est à l'origine d'une pollution plus importante, permettant alors de réguler les prochaines escales dans le cadre d'une charte environnementale.