



Rapport d'étude

Spatialisation des niveaux de PM10 et d'ammoniac à Saint-Malo

Campagne de mesure septembre 2024 et février 2025

V2 du 28/05/2026

Avertissements

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

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

Conditions de diffusions

Air Breizh est l'organisme agréé de surveillance de la qualité de l'air dans la région Bretagne, au titre de l'article L221-3 du Code de l'environnement, précisé par l'arrêté du 3 août 2025 pris par le Ministère de l'Environnement portant renouvellement de l'agrément de l'association.

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

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

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

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

Organisation interne – contrôle qualité

Projet :

Analyse des niveaux de PM10 à Saint-Malo

Version - date	Auteur	Validation	
V2 du 28/05/2026	Modification mineure partie VIII.	R. Falhun (Ingénieure d'études)	O. Cesbron
V1 du 08/12/2025	Création document		G. Lefeuvre (Directeur d'Air Breizh)

SOMMAIRE

I. Contexte.....	8
II. Introduction	9
III. Zone d'étude.....	10
IV. Polluants étudiés	12
IV1. Les particules (PM).....	12
IV2. L'ammoniac.....	14
IV3. La réglementation.....	14
a) Les particules fines (PM10 et PM2,5).....	14
b) L'ammoniac	15
V. Matériel et méthode de mesure	16
V1. Techniques de mesure.....	16
a) Mesure de particules.....	16
b) Prélèvement de PM10 sur filtre : mesure intégrée sur une journée	16
c) Mesure de l'ammoniac.....	17
V2. Sites de mesure.....	17
a) Station de mesure réglementaire 'Rocabey'	17
b) Site temporaire 'Police'	19
c) Site temporaire 'Vélodrome'	19
d) Site temporaire des 'Ormeaux'	20
V3. Dates des campagnes de mesure	21
V4. Synthèse du protocole	22
VI. Conditions météorologiques	23
VI1. Direction et vitesse de vent	23
VI2. Pluviométrie et température.....	25
VI3. Représentativité des périodes de mesure retenues	26
VII. Méthode d'interprétation des résultats.....	28
VII1. Méthodologie d'interprétation des données	28
VII2. Contrôle qualité des mesures automatiques	29
VIII. Résultats - Analyse de l'historique des données PM10 à Rocabey	30
VIII1. Moyenne pluriannuelle des PM10 de 2020 à 2024.....	30
VIII2. Evolution pluriannuelle des PM10 de 2020 à 2024	31

VIII3.	Evolution saisonnière des PM10 de 2020 à 2024	31
VIII4.	Evolution mensuelle des PM10 de 2020 à 2024.....	32
VIII5.	Comparaison des profils moyens journaliers des PM10 de 2020 à 2024.....	34
IX.	Résultats - Comparaison aux seuils de référence	35
IX1.	Mesure des PM10	35
a)	Résultats des sites de l'étude	35
b)	Résultats des stations du réseau de surveillance (lors des campagnes de mesure).....	39
c)	Synthèse de l'analyse des données de mesure PM10	40
IX2.	Mesure des PM2.5	42
a)	Résultats des sites de l'étude	42
b)	Résultats des stations du réseau de surveillance (lors des campagnes de mesure).....	45
c)	Synthèse de l'analyse des données de mesure PM2.5	46
X.	Influence des niveaux de PM10	48
X1.	Ratio PM2.5/PM10.....	48
X2.	Roses de pollution PM10	50
XI.	Résultats – Analyse de la composition chimique des particules	53
XI1.	Protocole de sélection des filtres à analyser	53
XI2.	Traitement bilan de masse	54
XI3.	Résultats des analyses	54
a)	Composition moyenne	55
b)	Campagne estivale.....	56
c)	Campagne hivernale	57
XI4.	Analyse par constituant	59
a)	Carbone élémentaire (EC) / Matière organique (OM)	61
b)	Sels marins.....	62
c)	Composés inorganiques	63
d)	Poussières minérales	65
XII.	Résultats des mesures d'ammoniac	67
a)	Statistiques	67
b)	Variation journalière et horaire.....	69
XIII.	Lien particules – ammoniac	75
XIV.	Analyse journalière	77
XV.	Synthèse des réponses aux différents questionnements	81
XVI.	Conclusion.....	84
	Références	92

XVII. Annexes	93
XVII1. Présentation d'Air Breizh	93
a) Présentation générale	93
b) Missions	94
c) Un observatoire régional de la qualité de l'air	94
XVII2. Résultats de l'étude ZAC Houssaye /CDG : état initial de la qualité de l'air.....	94
XVII3. Lien ammoniac et particules.....	102
XVII4. Episode de pollution PM durant la campagne estivale	103
XVII5. Lecture d'une rose de pollution.....	106
XVII6. Roses de pollution PM10 – campagne estivale	106
XVII7. Roses de pollution PM2,5	108
XVII8. Sélection des filtres pour la spéciation chimique PM10.....	111
XVII9. PM10 reconstituées	114
XVII10. Ratio OC/EC.....	115
XVII11. Evolution journalière de la composition chimique des PM10.....	116
XVII12. Fiches journalières	120

Liste des figures

Figure 1: Secteurs identifiés.....	10
Figure 2 : Comparaison des tailles de particules PM10 et PM2,5 (Source U.S EPA)	12
Figure 3 : Fractions chimiques des particules.....	13
Figure 4 : Localisation de la station Rocabey à Saint-Malo	18
Figure 5 : Localisation du site Police et implantation du camion laboratoire	19
Figure 6 : Localisation du site Vélodrome et implantation du camion laboratoire.....	20
Figure 7 : Localisation du site Ormeaux et implantation de la remorque laboratoire.....	21
Figure 8 : Vue aérienne et photos des différents points de mesure	22
Figure 9 : Comparaison des conditions de vents à la station Météo France – Dinard pendant la campagne estivale à la normale mensuelle (septembre).....	24
Figure 10 : Comparaison des conditions de vents à la station Météo France – Dinard pendant la campagne hivernale à la normale mensuelle (février)	24
Figure 11 : Evolution des températures journalières moyennes et des cumuls de précipitations, campagne estivale (à gauche) et hivernale (à droite)	26
Figure 12 : Historique 2020 – 2025 des moyennes mensuelles PM10 et PM2,5 à la station Rocabey	27
Figure 13 : Evolution des concentrations moyennes annuelles de 2020 à 2024 en PM10 à Brest, Rennes, Saint-Malo, Saint-Brieuc (stations urbaines de fond).....	31
Figure 14 : Evolution saisonnière des concentrations moyennes 2020 - 2024 en PM10 à Brest, Rennes, Saint-Malo, Saint-Brieuc (stations urbaines de fond).....	32

Figure 15 : Evolution des moyennes mensuelles 2020 – 2024 des concentrations en PM10 à Brest, Rennes, Saint-Malo et Saint-Brieuc	33
Figure 16 : Evolution des moyennes mensuelles PM10 (2020-2024) des 4 stations en base 100 (la base 100 étant fixée pour la moyenne 2020 – 2024 de janvier à Rocabey)	33
Figure 17 : Profil moyen journalier PM10 2020- 2024 à Rennes, St-Malo, Brest et St-Brieuc	34
Figure 18 : Box plot des concentrations en PM10 mesurées pendant les campagnes (données horaires)	37
Figure 19 : Evolution journalière des concentrations en PM10 pendant la campagne estivale ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	38
Figure 20 : Evolution journalière des concentrations en PM10 pendant la campagne hivernale ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	38
Figure 21 : Synthèse des moyennes annuelles PM10 estimées pendant la campagne	41
Figure 22 : Box plot des concentrations en PM2,5 mesurées pendant les campagnes (données horaires)	44
Figure 23 : Evolution journalière des concentrations en PM2,5 pendant la campagne estivale ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	45
Figure 24 : Evolution journalière des concentrations en PM2,5 pendant la campagne hivernale ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	45
Figure 25 : Synthèse des moyennes annuelles PM2,5 estimées pendant la campagne	47
Figure 26 : Ratios PM2,5/PM10 moyens durant cette étude pour les 4 sites de Saint-Malo et les stations urbaines de Brest et Rennes	48
Figure 27 : Variation journalière des ratios PM2,5/PM10, campagne estivale (à gauche) et campagne hivernale (à droite)	49
Figure 28 : Roses de pollution PM10 campagne estivale corrigées	50
Figure 29 : Roses de pollution PM10 campagne hivernale	51
Figure 30 : Composition chimique moyenne (campagne estivale et hivernale) des 4 sites malouins	55
Figure 31 : Composition chimique moyenne des filtres analysés - campagne estivale	56
Figure 32 : Composition chimique moyenne des PM10 - campagne hivernale	58
Figure 33 : Evolution des concentrations moyennes journalières du carbone élémentaire (EC) et de la matière organique (OM) pendant la campagne estivale (gauche) et hivernale (droite)	61
Figure 34 : Evolution des concentrations moyennes journalières des sels marins pendant la campagne estivale (gauche) et hivernale (droite)	63
Figure 35 : Evolution des concentrations journalières en composés inorganiques secondaires lors de la campagne estivale (droite) et hivernale (gauche)	64
Figure 36 : Evolution des concentrations moyennes journalières en poussières minérales pendant la campagne estivale (gauche) et hivernale (droite)	65
Figure 37 : Box plot des concentrations en NH_3 mesurées ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) pendant les campagnes (données horaires)	68
Figure 38 : Variation journalière des concentrations en ammoniac campagne estivale (gauche) et campagne hivernale (droite)	69
Figure 39 : Profils journaliers moyens en ammoniac - campagne estivale	71
Figure 40 : Profils journaliers moyens en ammoniac - campagne hivernale	72

Figure 41 : Roses de pollution de l'ammoniac lors de la campagne estivale	73
Figure 42 : Roses de pollution de l'ammoniac lors de la campagne hivernale.....	74
Figure 43 : Evolution des concentrations journalières en ammonium dans les PM10 (NH ₄ ⁺) et en ammoniac – campagne estivale.....	76
Figure 44 : Evolution des concentrations journalières en ammonium dans les PM10 (NH ₄ ⁺) et en ammoniac – campagne hivernale	76

Liste des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des valeurs guides et réglementaires des particules fines.....	14
Tableau 2 : Synthèse du protocole de mesure	22
Tableau 3 : Synthèse météorologique (campagne estivale) et normales de septembre à la station Dinard.....	25
Tableau 4 : Synthèse météorologique (campagne hivernale) et normales de février à la station Dinard.....	25
Tableau 5 : Taux de couverture (Tc) des analyseurs (données horaires), pour les deux campagnes de mesure	29
Tableau 6 : Comparaison des moyennes pluriannuelle PM10 2020 – 2024 des stations urbaines de fond de Saint-Malo, Brest, Rennes et Saint-Brieuc avec les seuils de référence	30
Tableau 7 : Synthèse statistique des mesures en PM10 (µg/m ³).....	35
Tableau 8 : Statistiques des mesures PM10 aux stations urbaines de fond de Brest et Rennes lors de l'étude	39
Tableau 9 : Synthèse statistique des mesures en PM2,5 (µg/m ³).....	42
Tableau 10 : Statistiques des mesures PM2,5 aux stations urbaines de fond de Brest et Rennes lors de l'étude	46
Tableau 11 : Concentration moyenne (campagne estivale et hivernale) des différents constituants pour les 4 sites	55
Tableau 12 : Concentration moyenne des différents constituants pour les 4 sites – campagne estivale	57
Tableau 13 : Concentration moyenne des différents constituants pour les 4 sites – campagne hivernale	58
Tableau 14 : Synthèse statistique des mesures en NH ₃ (µg/m ³).....	67

I. CONTEXTE

La **particularité de Saint-Malo** vis-à-vis des niveaux de **particules atmosphériques** a été identifiée depuis plusieurs années. En effet, plusieurs campagnes de mesures des particules atmosphériques ont été menées à Saint-Malo de 2006 à 2019.

Les **mesures réglementaires en PM10** au niveau de la station Rocabey ont débuté en **juin 2018**. Les moyennes annuelles observées sont, chaque année, **supérieures à celles des autres villes bretonnes**. Même si ces **niveaux restent inférieurs au seuil réglementaire de 40 µg/m³ en moyenne annuelle**, ils **dépassent en revanche la valeur recommandée par l'OMS (15 µg/m³)**. Une nouvelle directive européenne a été publiée en novembre 2024 ; le seuil annuel a été fixé à 20 µg/m³ (seuil visé en 2030). Cette valeur a déjà été dépassée dans le passé (en 2021 et 2022) au niveau de la station Rocabey et pourrait l'être à nouveau.

Une **étude menée en 2019** sur l'analyse des données d'un an de mesure PM10 (juin 2018 à juin 2019) à Rocabey (Air Breizh, 2020) a déjà mis en évidence la spécificité de Saint-Malo par rapport aux mesures PM10 (niveaux supérieurs et pics récurrents).

En **juillet 2020**, afin de compléter la mesure PM10, un analyseur PM2,5 a été installé au niveau de la station Rocabey. Ces nouvelles données de mesure ont notamment fait l'objet d'un traitement dans l'étude menée en 2022 sur la caractérisation chimique des PM2,5 (Air Breizh, 2023). Cette étude conclue sur des niveaux de PM2,5, à la station Rocabey de Saint-Malo, proches de ceux mesurés sur des stations de même typologie à Rennes ou à Saint-Brieuc.

Les données collectées sur les particules depuis quelques années à Saint-Malo permettent de constater que les écarts observés entre les niveaux à la station Rocabey et les autres stations du réseau de surveillance breton, sont le plus souvent liés à une augmentation de la fraction dite « grossière » des particules (2,5 à 10 µm) qui compose les PM10.

Parallèlement à ces mesures, les premières investigations menées sur l'**ammoniac** en Bretagne en 2020 (Air Breizh, 2021), ont mis en évidence des **niveaux plus élevés à Saint-Malo avec une variation spatiale marquée pour ce territoire**. Dans la continuité de ces premiers résultats, l'installation provisoire d'un analyseur en continu d'ammoniac, de novembre 2021 à février 2023, a permis de mieux comprendre la variation temporelle des niveaux mesurés à la station Rocabey (Air Breizh, 2023), (Air Breizh, juillet 2024). En 2024, l'Agglomération de Saint-Malo a financé l'installation pérenne d'un analyseur d'ammoniac au niveau de la station réglementaire de Rocabey (Air Breizh, février 2025).

II. INTRODUCTION

Dans ce contexte, cette nouvelle étude, financée par la ville de Saint-Malo et l'agglomération, porte sur la spatialisation des niveaux de PM10 et d'ammoniac. L'équipement, en simultané, de plusieurs sites de mesure va permettre d'améliorer les connaissances sur la variabilité des niveaux à l'échelle de la ville et ainsi caractériser la représentativité des mesures effectuées à Rocabey à l'échelle de la ville de Saint-Malo.

Cette étude vise à répondre à plusieurs questions :

- Quelle est la **représentativité des mesures PM10** de la station Rocabey ? Les concentrations en PM10 mesurées à Rocabey sont-elles homogènes dans la ville de Saint-Malo ?
- Les niveaux en PM10 mesurés à Saint-Malo Rocabey présentent-ils la même **évolution temporelle** (saison, mensuel) que les autres stations du réseau régional ?
- Les **différents quartiers de Saint-Malo** sont-ils soumis aux **mêmes influences** ? Quelles sont les influences de la zone industrielle et des installations portuaires sur les niveaux de PM10 des quartiers limitrophes ?
- Quelles sont les **sources possibles** expliquant l'augmentation de la fraction dite grossière des PM10 (comprise entre 2,5 à 10 µm) ?
- Quelle est la **représentativité des mesures d'ammoniac** de la station Rocabey ?

Deux campagnes de mesures de la qualité de l'air ont été menées en septembre 2024 et février 2025.

Par ailleurs, les résultats des prélèvements PM10, réalisés selon un protocole identique, dans le cadre de l'état initial de la qualité de l'air avant aménagement des zones d'activités de la Houssaye et du Général de Gaulle à Saint-Malo, sont présentés en annexe (XVII2) et comparés à ceux de la présente étude permettant ainsi d'enrichir l'analyse des variabilités spatiales des niveaux.

III. ZONE D'ETUDE

Saint-Malo est une ville portuaire située en Bretagne dans le département de l'Ille-et-Vilaine, sur la côte Nord-Ouest de la France. Connue pour ses remparts historiques et son riche patrimoine maritime, elle est également un lieu touristique important ce qui influence ses dynamiques urbaines et environnementales.

L'économie locale repose principalement sur le tourisme, la pêche, et les activités portuaires. Le port de Saint-Malo, bien que moins industriel que d'autres grands ports, voit un trafic important de navires, notamment des ferries et des bateaux de croisière, contribuant aux émissions de polluants comme les oxydes d'azote (NOx) et les particules fines (PM). En plus de la zone portuaire, la zone industrielle sud (ZI) concentre des activités émettrices de particules fines et aussi d'ammoniac.

Afin d'analyser les variations spatiales au niveau de la commune et d'évaluer la représentativité des mesures de la station péri-urbaine Rocabey, 3 secteurs ont été identifiés, en concertation avec la ville de Saint-Malo et l'agglomération, pour répondre aux différents questionnements. Il s'agit des zones identifiées dans la Figure 1 :

- **St-Servan (A)** : secteur sujet à des plaintes de la population proche de la criée. Ce secteur se trouve au Sud des installations portuaires (exposé par vents de Nord fréquents durant le printemps/été).
- **Zone portuaire (B)** : secteur situé sous l'influence du port par vents de Sud-Ouest (octobre à décembre).
- **Paramé (C)** : secteur présentant un niveau topographique environ 20 mètres au-dessus du centre-ville. Il s'agit du site le plus éloigné des sources d'émissions suspectées (port 2500 m et ZI 1800 m). Il se trouve sous les vents de la ZI par vents de Sud-Ouest (vents dominants)

Zone portuaire : trafic de ferries, trafic de marchandises (chargement/déchargement), activité de construction/réparation navale, pêche, plaisance et activités industrielles



Site ZAC Houssaye

Zone industrielle sud : activités industrielles

Site ZAC De Gaulle

Figure 1: Secteurs identifiés

En complément de cette étude, les données acquises dans le cadre des campagnes ZAC De Gaulle et Houssaye réalisées en 2024 sont également exploitées (Air Breizh, septembre 2024) et présentées en annexe. Trois points de mesures ont été instrumentés (Station Rocabey et les sites ZAC De Gaulle et ZAC Houssaye – cf. Figure 1) durant cette campagne menée du 22 mars au 18 avril puis du 16 mai au 14 juin 2024.

IV. POLLUANTS ETUDIÉS

Cette partie est consacrée au descriptif des polluants étudiés durant cette campagne.

IV1. Les particules (PM)

Les particules atmosphériques sont un mélange de composés solides et/ou liquides, en suspension dans un milieu gazeux. Ces polluants particulaires sont parfois désignés sous le nom d'aérosols. Elles sont constituées d'une très grande variété de composés organiques et inorganiques. Les particules en suspension sont désignées par l'abréviation PM pour « Particulate Matter ».

Granulométrie des particules :

Les particules fines sont classées en fonction de leur diamètre aérodynamique, c'est notamment par la taille que sont définis les seuils réglementaires. L'ensemble des particules dont le diamètre est inférieur à 10 micromètres (μm) sont appelées PM₁₀. De la même manière, les PM_{2,5} désignent les particules dont le diamètre est inférieur à 2,5 μm . La figure ci-après illustre les PM en les comparant avec le diamètre d'un cheveu (50-70 μm) en parallèle d'un grain de sable (90 μm).

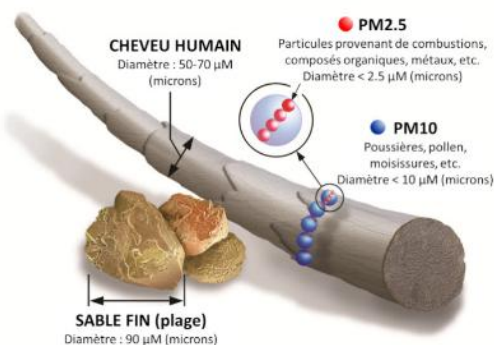


Figure 2 : Comparaison des tailles de particules PM₁₀ et PM_{2,5} (Source U.S EPA)

Origine et composition des particules

Les particules peuvent aussi bien être d'origine **naturelle** que d'origine **anthropique**. Les particules naturelles proviennent des éruptions volcaniques, du transport par le vent de poussières minérales, des embruns marins, ou encore de la végétation. Les sources anthropiques sont la combustion d'hydrocarbures, de biomasse, l'agriculture, l'industrie.

Il faut distinguer deux catégories de particules selon leur **processus de formation** :

- les **particules primaires** émises directement dans l'atmosphère par différents mécanismes : par action mécanique du vent sur le sable, le sol ou la roche, par des processus de combustion tels que les feux de forêts, les incinérateurs, par des processus biologiques conduisant à l'émission de pollens, par des activités industrielles ou encore par usure de matériaux tels que les pneus, les freins, le revêtement des routes.
- les **particules secondaires** formées dans l'atmosphère par des réactions physico-chimiques à partir de précurseurs gazeux tels que le dioxyde soufre (SO_2), les oxydes d'azote (NO_x), l'ammoniac (NH_3), les composés organiques volatils (COV).

La composition des particules varie fortement en fonction de la source d'émission mais également selon les processus physico-chimiques auxquels les particules sont soumises au cours du transport. Elles sont composées d'un **mélange d'espèces minérales et d'espèces organiques** :

❖ Particules carbonées :

- **matière organique (OM)**, constituée de carbone et de nombreux hétéroatomes (H, O, N...). C'est une matrice complexe regroupant une multitude de composés appartenant aux grandes familles de la chimie organique (alcanes, acides carboxyliques, alcools, cétones, esters, hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), dioxines...). Elle est à la fois d'origine primaire (anthropique : combustion dont le trafic routier, ou naturelle : pollens, débris végétaux, bactéries...) et secondaire (condensation et nucléation de COV : formation aérosols organiques secondaires (AOS)). Les contributions anthropiques et naturelles au sein de la matière organique sont nombreuses et différentes selon la période de l'année.

La matière organique n'est pas mesurée sur filtres, elle est estimée en multipliant les concentrations en carbone organique (**OC**) par un facteur de conversion issu de la littérature scientifique (cf XVII9).

- **carbone élémentaire (EC)** a une structure quasi-exclusivement d'atomes de carbone qui s'apparente à celle du graphite pur. Il est produit par la combustion incomplète de combustibles d'origine fossile et de la biomasse (ex : chauffage au bois et trafic routier).

❖ Particules minérales :

- **Ions inorganiques** (les ions nitrate, sulfate, carbonate, chlorure, ammonium...) **primaires** sont émis directement dans l'atmosphère comme par exemple les **sels marins** constitués de chlorure de sodium (NaCl) ou encore la composante minérale (aluminium, fer, silicium, calcium...) avec les poussières d'origine terrigène issues de l'érosion des sols, des poussières désertiques (**poussières crustales**) ou d'origine anthropique (processus d'abrasion).

Quant aux **ions inorganiques secondaires**, les 3 espèces majoritaires (**ammonium - NH_4^+** , **nitrate - NO_3^-** , **sulfates non marins - nssSO_4^{2-}**) sont formés à partir de précurseurs gazeux (ex : NH_3 , NO_x , SO_2). Ces ions se trouvent principalement dans l'atmosphère sous forme de nitrate et sulfate d'ammonium (NH_4NO_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$).

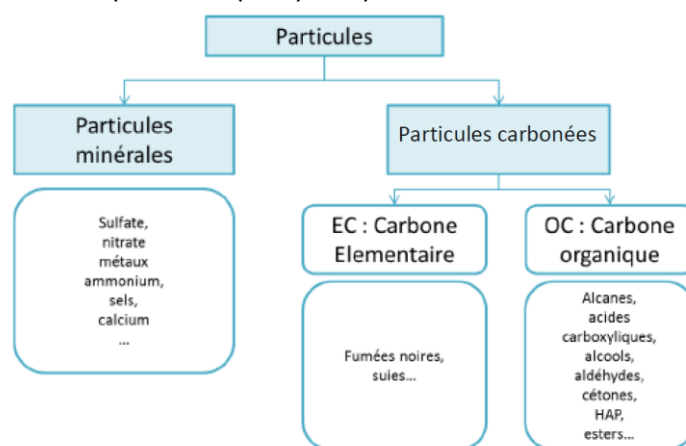


Figure 3 : Fractions chimiques des particules

IV2. L'ammoniac

L'ammoniac est un composé chimique présent naturellement dans l'atmosphère. En condition ambiante, ce gaz se caractérise par une absence de couleur et une odeur piquante, qui dans le cas de concentration élevée peut provoquer des irritations sévères des voies respiratoires et des yeux. L'ammoniac est également hydrosoluble, ce qui signifie qu'il peut se dissoudre dans l'eau et former de l'ammonium (NH_4^+), ce qui en fait un composé très réactif dans les milieux aqueux tels que l'atmosphère. En conséquence, l'ammoniac réagit facilement avec les acides atmosphériques pour former des aérosols inorganiques secondaires (nitrate et sulfate d'ammonium). (cf. annexe XVII3). Son temps de résidence dans l'atmosphère est estimé à quelques heures seulement. La volatilisation de l'ammoniac est favorisée par des températures élevées.

IV3. La réglementation

a) Les particules fines (PM10 et PM2,5)

Les valeurs limites sont issues du code de l'environnement (article R221-1)¹ et les recommandations OMS sont extraites des nouvelles lignes directrices de l'OMS relatives à la qualité de l'air (révisées en 2021)². Les seuils visés en 2030 inscrites dans la nouvelle directive européenne validée le 23 octobre 2024 sont également renseignées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 : Synthèse des valeurs guides et réglementaires des particules fines

		Valeurs limites	Recommandations OMS 2021	Nouvelle directive européenne (seuils visés en 2030)
PM10	Moyenne annuelle	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Moyenne journalière	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ A ne pas dépasser plus de 35 fois par an	45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ A ne pas dépasser plus de 3 à 4 fois par an	45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ A ne pas dépasser plus de 18 fois par an
PM2,5	Moyenne annuelle	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Moyenne journalière	-	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ A ne pas dépasser plus de 3 à 4 fois par an	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ A ne pas dépasser plus de 18 fois par an

¹ Article R221-1 du code de l'environnement qui transpose les directives européennes 2008/50/CE et 2004/107/CE

² Résumé d'orientation (OMS 2021) : Lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air

b) L'ammoniac

L'ammoniac n'est pas réglementé, **il n'existe pas de seuil ni de valeur limite réglementaire dans l'air ambiant** au même titre que d'autres polluants surveillés tels que les particules fines (article R-221-1 du Code de l'Environnement).

En revanche, il dispose de **valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP)** dans l'air des lieux de travail (Article R.4412-149 du Code du travail) (INRS):

- valeur limite de moyenne exposition (VME), exposition pendant 8h : 7 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,
- valeur limite de courte durée (VLCT), exposition pendant 15 min : 14 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Ces VLEP ne seront pas considérées dans la suite de ce rapport puisque les mesures ci-dessous sont réalisées en air ambiant et non dans un contexte d'exposition professionnelle qui nécessite un protocole spécifique.

En 2018, l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) a publié un rapport pour le choix et la sélection de **valeurs toxicologiques de référence (VTR)**. Une VTR est un indice toxicologique permettant de qualifier ou de quantifier un risque pour la santé humaine. Elle établit le lien entre une exposition à une substance toxique et le risque d'occurrence d'un effet sanitaire indésirable. Ainsi l'Anses a validé 3 VTR pour une exposition au NH_3 par inhalation (ANSES, 2018) :

- pour une exposition aiguë sur une durée de 24h : 5 900 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,
- pour une exposition subchronique de 15 à 364 jours : 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (US EPA 2016),
- pour une exposition chronique à partir de 365 jours : 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (US EPA 2016).

Pour la **protection de la végétation et des écosystèmes**, les niveaux critiques de concentration en ammoniac, de la Commission Economique des Nations Unies pour l'Europe (CEE-ONU), sont respectivement de 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et 3 de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle pour la protection des lichens/bryophytes et des végétaux supérieurs en conditions réelles.

Afin de prendre en compte d'éventuels pics d'émissions élevés pendant les périodes d'épandage de fumier (notamment au printemps), un niveau critique mensuel de 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a été retenu provisoirement pour la protection des végétaux (AFNOR, 2020).

Le **seuil olfactif** de détection de l'ammoniac est très variable : d'environ 0,03 à 37,5 mg/m^3 (ANSES, 2021).

S'il n'existe pas pour l'ammoniac de valeurs limites ou de seuils dans l'air ambiant à respecter en Europe, la réduction de sa concentration dans l'air reste pertinente puisqu'il participe à la formation des particules fines qui disposent d'une valeur limite à respecter.

L'ammoniac est réglementé au niveau européen en termes d'émissions : un objectif de baisse de 13% a été fixé d'ici 2030 dans la Directive NEC 2 (2016-2284).

V. MATERIEL ET METHODE DE MESURE

Dans cette partie est présenté le dispositif de mesure mis en place dans le cadre de cette étude. Ainsi, sont présentées les techniques de mesure utilisées pour les différents polluants, les points de mesure et la période concernée par les 2 campagnes de mesure.

V1. Techniques de mesure

a) Mesure de particules

Deux équipements ont été utilisés pour la mesure des particules fines. Ils sont tous les deux jugés conformes sur le plan technique pour la surveillance réglementaire de la qualité de l'air³.

BAM1020

Le BAM est un analyseur de particules capable de les prélever sur une bande filtrante (à un débit d'1 m³/h) puis d'en mesurer leur masse au moyen d'une source interne de rayonnement de type bêta. Le principe de fonctionnement d'un analyseur de particules de type BAM 1020, consiste à déterminer grâce à une jauge bêta la quantité d'énergie absorbée par un échantillon exposé à la source radioactive à partir de laquelle est déduite la concentration en particules. La mesure consiste à calculer la différence d'absorption entre le filtre vierge et le filtre exposé en fin de période. Cet analyseur est homologué par le LCSQA pour la surveillance réglementaire des PM10 et des PM2,5 en France. Deux analyseurs sont installés dans la station Rocabey, l'un équipé d'une tête PM10 et l'autre d'une tête PM2.5.

Fidas 200

Le Fidas 200 est un analyseur optique certifié techniquement par le LCSQA pour le suivi réglementaire en continu et en temps réel des fractions PM10 et PM2,5. Il mesure l'intensité de la lumière diffusée par les particules à 90° d'un faisceau incident issu d'une source de mesure polychromatique. Cette technologie permet d'assurer la mesure conjointe de différentes fractions des particules. Un analyseur a été installé dans chacune des stations mobiles durant les deux campagnes de mesure.

b) Prélèvement de PM10 sur filtre : mesure intégrée sur une journée

Les particules PM10 sont collectées sur des filtres à quartz (150 mm de diamètre, Pall Tissu Qz filters) en utilisant un "High Volume Sampler" (HVS, Digital DA80) à un débit de 30 m³/h. L'analyse chimique de ces prélèvements permet de connaître la composition au jour le jour des particules PM10. Le recours à ces prélèvements actifs est la méthode de prélèvement recommandée par le LCSQA pour la caractérisation chimique des particules (également utilisée dans le cadre de caractérisation chimique des particules CARA ou en encore MERA au niveau de la station rurale de Kergoff (22)).

³ <https://www.lcsqa.org/fr/conformite-technique-appareils-mesure>

L'analyse de composition chimique a été réalisée par le LASAIR (Laboratoire d'Analyses pour la Surveillance de l'Air Interrégional) implanté au sein d'Airparif (AASQA en Ile-de-France).

Les prélèvements quotidiens (de minuit à minuit) ont été réalisés pendant toute la durée des 2 campagnes.

Les espèces analysées par le laboratoire sont les suivantes :

- Les **aérosols carbonés** : Carbone élémentaire (EC) et Carbone organique (OC)
- Les **aérosols inorganiques** : Chlorures (Cl⁻), Nitrates (NO₃⁻), Sulfates (SO₄²⁻), Sodium, (Na⁺), Magnésium (Mg²⁺), Ammonium (NH₄⁺), Calcium (Ca²⁺), Potassium (K⁺)

c) Mesure de l'ammoniac

L'analyseur G2103 de Picarro est un analyseur automatique basé sur la spectrométrie d'absorption dans le proche infrarouge. Il permet d'effectuer des mesures d'ammoniac en continu (à l'échelle quart horaire). La limite de détection de cet analyseur est inférieure à 0,02 µg/m³.

L'ammoniac n'étant pas un polluant réglementé, il n'existe pas d'appareil approuvé type par le LCSQA pour la surveillance dans l'air ambiant. Le Picarro est toutefois l'appareil le plus répandu pour cette mesure au sein des AASQAs.

V2. Sites de mesure

En complément de la station péri-urbaine de fond Rocabey (intégrée au dispositif réglementaire), 3 autres points de mesure ont été équipés simultanément. La recherche des sites de mesure au niveau des 3 secteurs identifiés (cf. partie III) a été menée en concertation avec la ville et l'agglomération de Saint-Malo. Pour cela, différents critères ont été considérés au sein des 3 zones afin de déterminer l'implantation des sites de mesure :

- Choix d'une configuration dite 'de fond' à savoir éloignée des sources d'émissions à proximité immédiate du point de mesure afin d'assurer la comparaison des niveaux à la station,
- Proximité d'habitations, l'objectif de la mesure étant la surveillance de l'exposition de la population,
- Faisabilité technique (raccordement électrique, accès, sécurité des équipements, ...).

Pour chacun des sites de mesure, les densités de population dans un rayon d'un kilomètre ont été calculées à partir des données « MAJIC » population 2021.

a) Station de mesure réglementaire 'Rocabey'

La station Rocabey, station péri-urbaine de fond, a été mise en service en juin 2018, à la suite de la fermeture de la station Courtoisville. La station se trouve dans le cimetière de Rocabey, le long de l'avenue de 47^{ème} régiment d'infanterie. Elle se trouve dans la partie Nord de la ville. Le site est séparé de la grande plage du sillon par des quartiers résidentiels dont les constructions sont de faibles

hauteurs. La densité de population dans un rayon d'un kilomètre autour de la station est de 2948 hab/km² (MAJIC 2021).

La station est équipée des analyseurs de particules PM10, PM2,5, d'oxydes d'azote, d'ozone et d'ammoniac.

Pendant la durée des 2 campagnes de mesure, un préleveur a été installé afin de réaliser les prélèvements de PM10 pour l'analyse de la composition chimique.

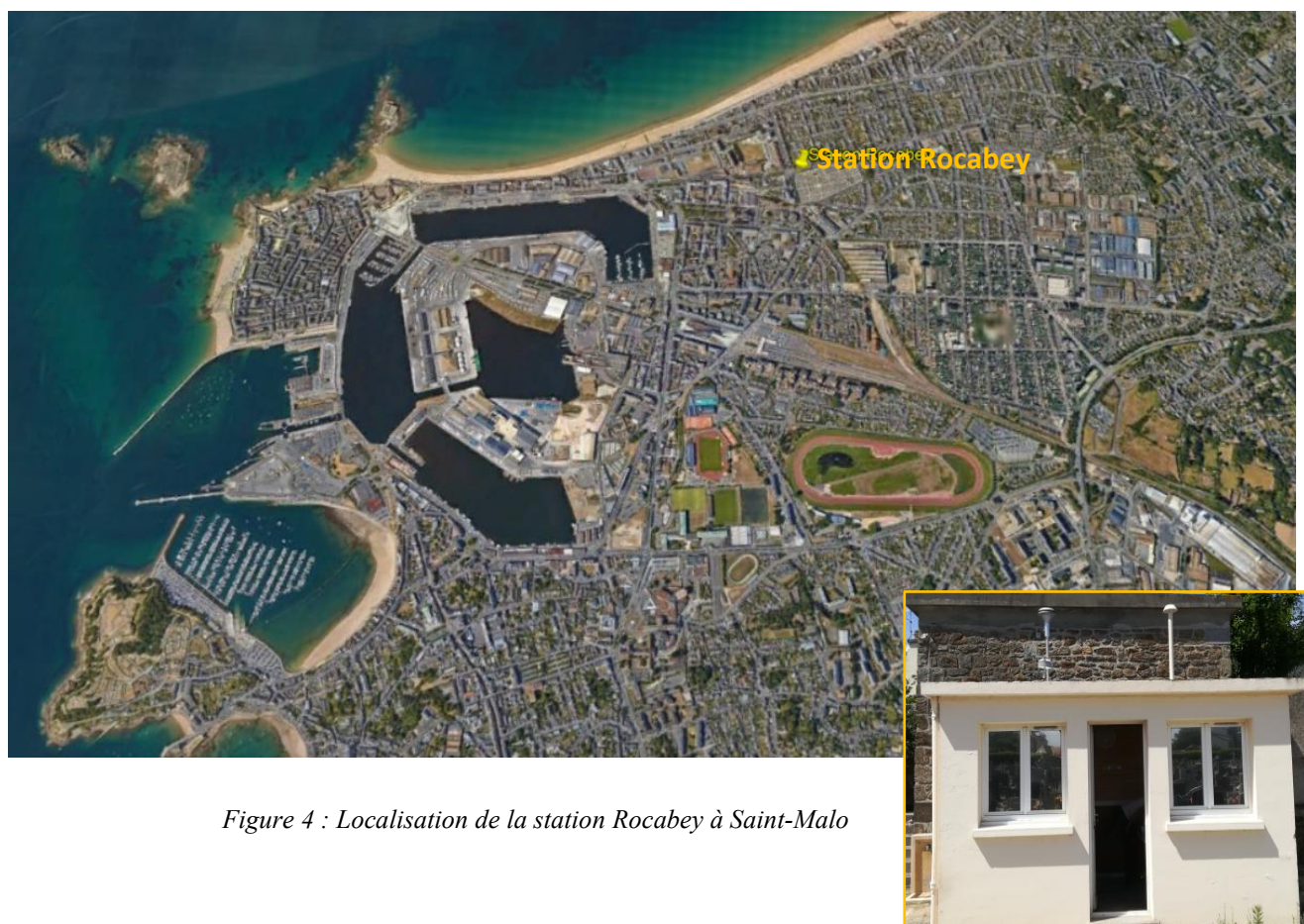


Figure 4 : Localisation de la station Rocabey à Saint-Malo

b) Site temporaire 'Police'

Dans le secteur de la **zone portuaire**, ce point de mesure est situé au niveau du parking de la police municipale de St-Malo. Il est situé sous l'influence des activités portuaires par vents d'ouest/sud-ouest. Il se trouve à environ 900 mètres au sud-ouest de la station Rocabey et à environ 100 m des premières habitations. La densité de population autour de ce point de mesure est de 2382 hab/km² (MAJIC 2021).

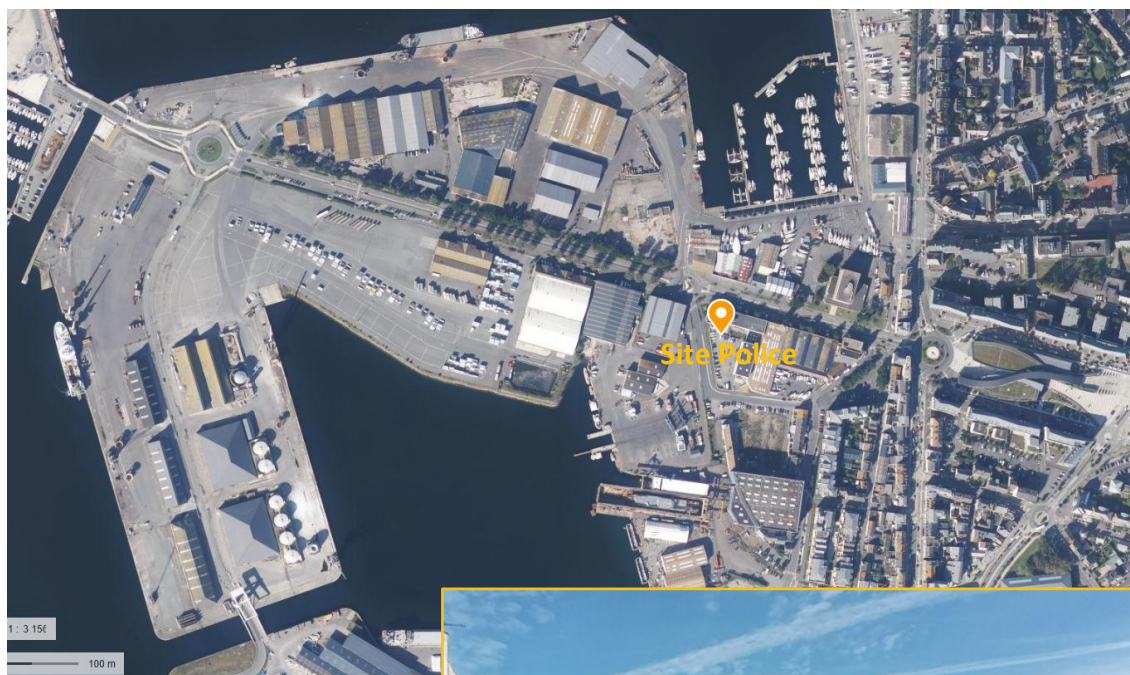


Figure 5 : Localisation du site Police et implantation du camion laboratoire

c) Site temporaire 'Vélodrome'

Le site Vélodrome est localisé au nord du quartier de **St-Servan**. Il se trouve à 1,6 km environ au sud/sud-ouest de la station réglementaire Rocabey. Les activités portuaires peuvent influencer les mesures par vents de nord-ouest. Les premières habitations se trouvent à une cinquantaine de

mètres du camion laboratoire. Ce site est le plus densément peuplé puisque la densité de population est de 4224 hab/km² (MAJIC 2021).



Figure 6 : Localisation du site Vélodrome et implantation du camion laboratoire

d) Site temporaire des 'Ormeaux'

Dans le **secteur Paramé**, le site Ormeaux est localisé à proximité du Cimetière des Ormeaux. Ce point de mesure est le plus éloigné de la station Rocabey puisqu'il se trouve à environ 1,9 km au sud-est de la station urbaine malouine. La zone industrielle (ZI) se situe à environ 800 m au sud-ouest ; ainsi, les activités de la ZI peuvent influencer les mesures par vents de sud-ouest. Le site est implanté dans un environnement moins urbanisé que les autres points de la campagne (surfaces agricoles au sud-est). En effet, la densité de population autour de ce point est de 1337 hab/km² (MAJIC 2021). Toutefois les premières habitations sont situées à environ 100 m à l'est de la remorque. A noter que ce site se trouve à un niveau topographique de l'ordre de 25 m, soit une 20^{aine} de mètres au-dessus du centre urbain de Saint-Malo (lieu-dit de la Montagne St Joseph).



Figure 7 : Localisation du site Ormeaux et implantation de la remorque laboratoire

V3. Dates des campagnes de mesure

Deux campagnes de mesure de 4 semaines ont été effectuées, à des saisons différentes, recouvrant 14 % de l'année. Au total, 8 semaines ont fait l'objet de mesure, ce qui correspond au taux de couverture temporelle minimale pour la détermination d'une moyenne annuelle (moyenne des 2 campagnes) selon les Directives Européennes 2008/50/CE et 2004/107/CE.

Les analyseurs des sites fixes (camion laboratoire ou station Rocabey) ont mesuré en continu les **concentrations des particules** (PM10, PM2,5) et les **concentrations d'ammoniac** (NH₃) sur toute la durée des campagnes estivales et hivernales. Les dates de chacune de ces campagnes sont les suivantes :

- Campagne estivale : du 30/08 au 26/09/2024
- Campagne hivernale : du 23/01 au 20/02/2025

Les **prélèvements sur filtres des particules PM10** pour l'analyse de la composition chimique des particules PM10 ont été réalisés quotidiennement pendant toute la durée des campagnes.

V4. Synthèse du protocole

Le Tableau 2 ainsi que la Figure 8 récapitulent le protocole de mesure mis en place dans le cadre de cette étude de spatialisation.

Tableau 2 : Synthèse du protocole de mesure

	Densité de population (dans un rayon de 1 km autour du point de mesure) – hab/km ²	Campagne estivale (C1) 30/08 – 26/09/2024	Campagne hivernale (C2) 23/01 – 20/02/2025
Station Rocabey	2948	Mesure en continu PM10, PM2,5 et NH₃ Prélèvements sur filtre PM10 puis analyse en laboratoire (EC/OC et ions majeurs)	
Site Vélodrome	4224		
Site Police	2382		
Site Ormeaux	1337		



Figure 8 : Vue aérienne et photos des différents points de mesure

VI. CONDITIONS METEOROLOGIQUES

Les conditions météorologiques, en particulier les vents, jouent un rôle important dans la dispersion ou l'accumulation des polluants.

Les données météorologiques présentées dans le chapitre suivant et dans l'ensemble du rapport, sont tirées des mesures de la station Météo France de Dinard (code Météo France 35228001), station la plus proche des points de mesure.

VI1. Direction et vitesse de vent

Les conditions de **direction** et **vitesse du vent** pendant une période sont souvent représentées par des roses de vent. Celle-ci permet de visualiser sur une période donnée :

- le pourcentage de vent pour chaque direction, ainsi plus la pâle est de grande taille plus les vents venant de cette direction ont été nombreux pendant la période,
- les vitesses de vent venant de chaque direction et leur occurrence : la couleur de chaque pâle indique la classe de vitesse et sa grandeur, le pourcentage de vent avec cette vitesse.

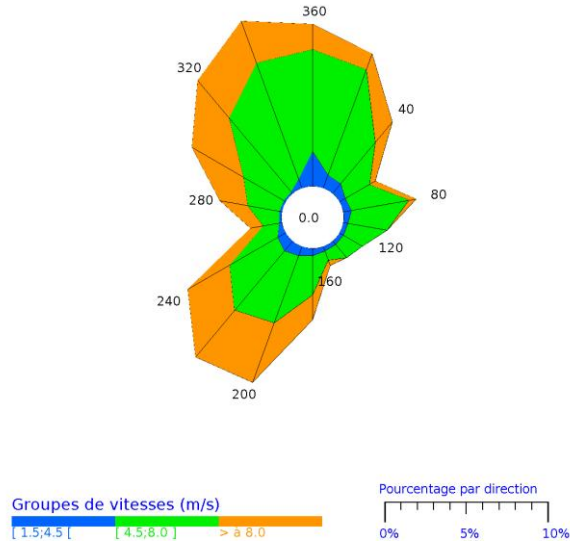
Ainsi, plus la pale est grande, plus les vents en provenance de cette direction sont fréquents (direction majoritaire) et au sein de cette pale, si la couleur est rouge (ou orange pour la normale des vents), plus les vents sont forts.

Les Figure 9 et Figure 10 présentent les conditions de vents relevées pendant les campagnes de mesure hivernale et estivale. Ces roses des vents sont comparées aux normales mensuelles entre 1991 et 2020 respectivement pour les mois de septembre et février.

Pendant la campagne **estivale**, les vents étaient épars, avec des **provenances majoritaires du nord-est** (40 - 80°) et de **l'ouest/sud-ouest** (260 - 240 °). On remarque peu de vents forts (> 8m/s) sur la période de mesure, hormis en provenance de la partie sud-ouest (240 °). Le profil de la rose des vents sur la période de la campagne estivale se rapproche de la normale du mois de septembre pour les vents majoritaires. Cependant, les vents provenant du nord-ouest ont été peu fréquents par rapport à la normale.

Pendant la campagne **hivernale**, les conditions de vents sont différentes de celles rencontrées pendant la campagne estivale, avec des **vents dominants issus d'un large secteur sud et est**. Les vents forts (> 8m/s) sur la période de mesure, sont plus fréquemment mesurés et notamment en provenance de sud/sud-ouest (210 – 190 °). Le profil de la rose des vents sur la période de la campagne hivernale **diffère de la normale du mois de février** avec très peu de vents nord-ouest et du nord.

Normale de rose des vents mensuelle (septembre) à la station Météo France - Dinard (période 1991 – 2020)



Rose des vents 30/08 – 27/09/2024 (Station Météo France – Dinard)

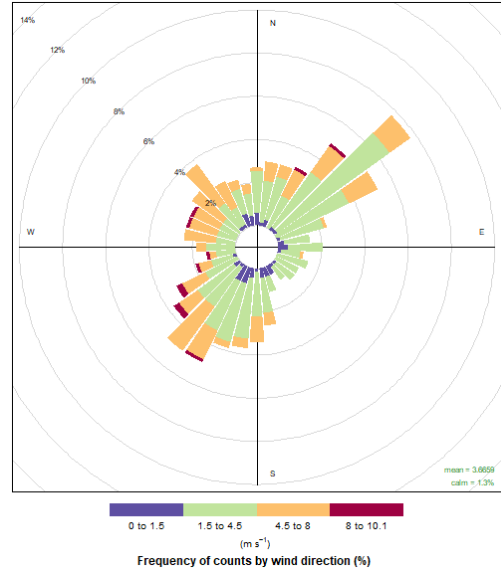
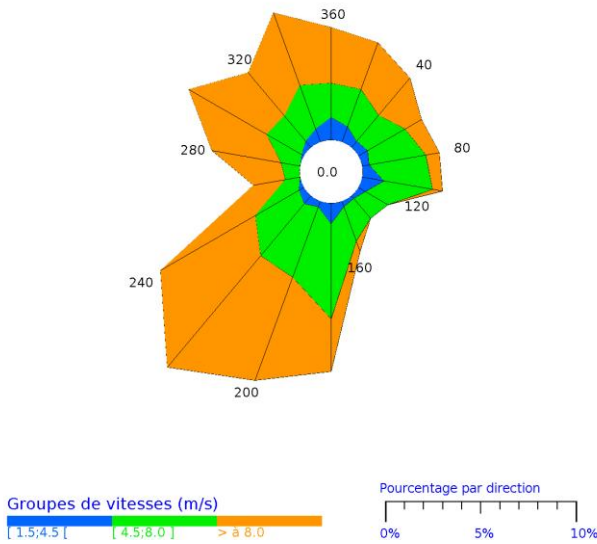


Figure 9 : Comparaison des conditions de vents à la station Météo France – Dinard pendant la campagne estivale à la normale mensuelle (septembre)

Normale de rose des vents mensuelle (février) à la station Météo France - Dinard (période 1991 – 2020)



Rose des vents 23/01 – 20/02/2025 (Station Météo France – Dinard)

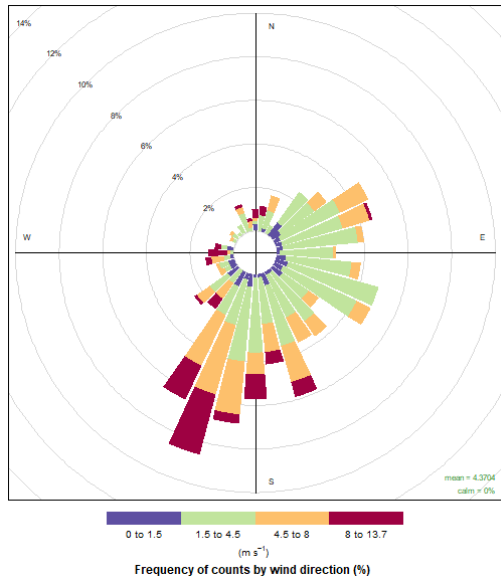


Figure 10 : Comparaison des conditions de vents à la station Météo France – Dinard pendant la campagne hivernale à la normale mensuelle (février)

VI2. Pluviométrie et température

La **température** est un paramètre influent sur les teneurs en polluants atmosphériques. Un écart thermique important entre la nuit et le jour, associé à des températures froides, favorise les phénomènes d'inversion thermique qui contribuent à l'accumulation des polluants (phénomène rencontré couramment au printemps). De plus les températures ont un impact sur certaines activités émettrices ; le chauffage résidentiel par exemple est dépendant des températures.

Quant aux **précipitations**, elles sont favorables à un lessivage de l'atmosphère, permettant une diminution des concentrations en polluants.

Les Tableau 3 et Tableau 4 permettent de comparer, les conditions de température et de précipitation rencontrées pendant les 2 campagnes de mesures, aux normales météorologiques (période 1991 – 2020) à la station Météo France Dinard. Pour la comparaison aux normales, le mois de septembre est considéré pour la campagne estivale et le mois de février pour la campagne hivernale.

Les **températures observées** pendant les 2 campagnes sont **proches des normales** avec des écarts relatifs inférieurs à 10%. Notons une température moyenne pendant la campagne hivernale qui est inférieure de 0,7 °C par rapport à la normale de février. La différence de température moyenne observée entre les campagnes été/hiver est de 10°C ce qui est cohérent avec les différentes saisons considérées. Le suivi des températures moyennes journalières met en avant des variations marquées pendant la campagne d'hiver, avec des températures comprises entre 13 et 2°C, alors que durant la campagne d'été, les moyennes journalières vont de 12 à 20°C.

Les **cumuls de précipitations** enregistrés pendant chacune des campagnes **sont supérieurs au cumul des 2 normales mensuelles** considérées, avec des écarts relatifs de +52% et +38% respectivement pour la campagne estivale et la campagne hivernale. A noter que lors de la campagne hivernale, 2 périodes sèches (sans pluie) de 6 jours consécutifs sont constatés, début février puis à partir du 15 février 2025. Lors de la campagne estivale, la période avec le moins de précipitation est observée du 14 septembre au 20 septembre 2024.

Tableau 3 : Synthèse météorologique (campagne estivale) et normales de septembre à la station Dinard

	Normale du mois de septembre (période 1991 – 2020)	Campagne estivale (du 30/08 au 26/09/2024)
Température moyenne (°C)	16	16
Cumul des précipitations (mm)	60,2	91,6

Tableau 4 : Synthèse météorologique (campagne hivernale) et normales de février à la station Dinard

	Normale du mois de février (période 1991 – 2020)	Campagne hivernale (du 23/01 au 20/02/2025)
Température moyenne (°C)	6,7	6
Cumul des précipitations (mm)	56	77,1

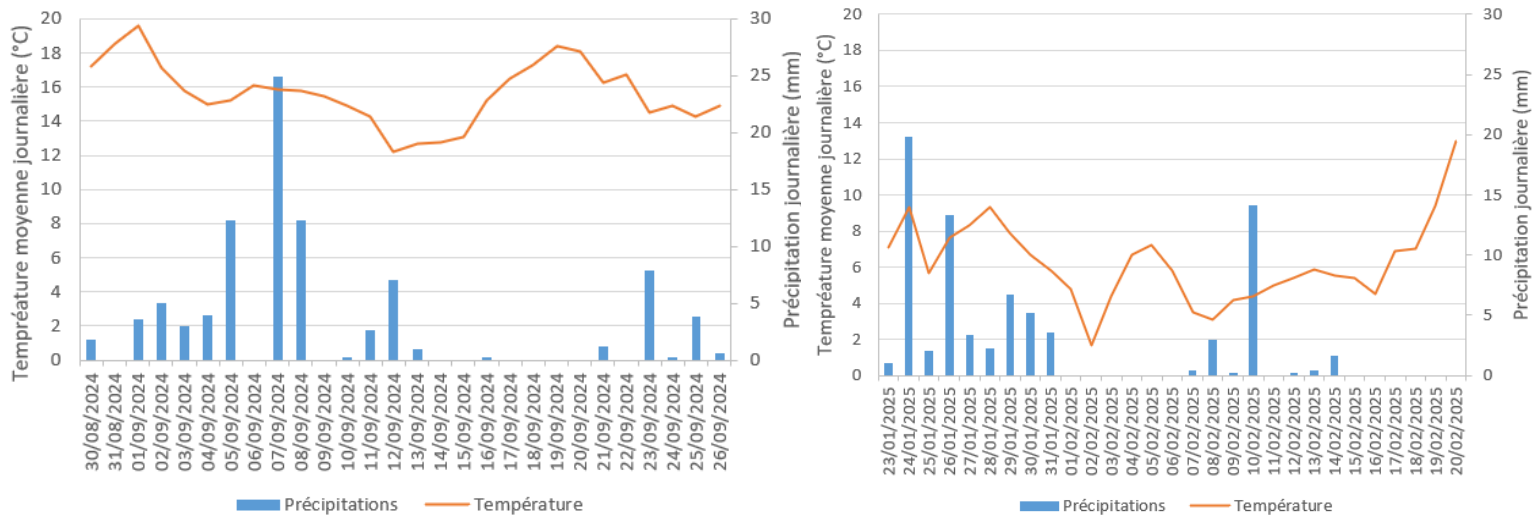


Figure 11 : Evolution des températures journalières moyennes et des cumuls de précipitations, campagne estivale (à gauche) et hivernale (à droite)

Les conditions de vent rencontrés pendant les deux campagnes sont différentes des normales des mois de septembre et février. En effet, durant la campagne estivale, les vents dominants sont issus du nord-est et du sud-ouest avec peu de vent du nord-ouest par rapport à la dominance de ce secteur pour la normale de septembre. Pour la campagne hivernale, ce sont les secteurs nord et nord-ouest qui sont quasi-absents par comparaison à la normale de février.

Les conditions de température sont cohérentes avec celles observées lors des normales mensuelles avec une campagne hivernale qui présente tout de même une moyenne inférieure à la normale de février (écart relatif de -10%).

Les cumuls des précipitations durant les deux campagnes ont été plus importants que les normales mensuelles. Pour rappel, les précipitations contribuent à la diminution des concentrations en polluants ; celles-ci pourraient donc être sous-estimées par rapport à des conditions normales.

VI3. Représentativité des périodes de mesure retenues

Afin de situer les périodes retenues pendant ces campagnes par rapport aux niveaux moyens rencontrés à la station Rocabey depuis le début des mesures particules en 2020, les moyennes mensuelles de 2020 à 2024 sont présentées dans la Figure 12.

Pour rappel, les périodes de campagne sont les suivantes :

- campagne estivale : du 30/08/2024 au 26/09/2024
- campagne hivernale : du 23/01/2025 au 20/02/2025

Les mesures sont réalisées à des saisons distinctes afin de considérer les différents niveaux rencontrés en fonction des conditions météorologiques. En effet, les niveaux en particules fines (PM10 et PM2,5) sont plus importants en hiver/printemps qu'en été du fait d'émissions plus élevées (avec le chauffage notamment) et de conditions météorologiques moins dispersives. De ce fait la moyenne 2020-2024 mensuelle la plus forte est atteinte en mars pour les PM10 et en janvier et février pour les PM2,5. A l'inverse, les plus faibles concentrations moyennes mensuelles de 2020 à

2024 en particules sont observées en juillet/août. De 2020 à 2024, des variations significatives entre les moyennes mensuelles PM10 et PM2,5 sont constatées durant les mois d'hiver/printemps. Par exemple, 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ d'écart entre les concentrations moyennes de PM10 de mars 2024 et mars 2022. Cette différence est de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM2,5. La différence entre les moyennes mensuelles maximale et minimale, sur la période 2020-2024, est de l'ordre de 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM10 et PM2,5. La concentration en PM10 en septembre 2024 (campagne estivale) est égale à la moyenne 2020-2024 alors que celle de février 2025 (campagne hivernale) présente un écart de -6% par rapport à la moyenne de l'historique 2020-2024.

Les concentrations moyennes mensuelles PM2,5 de septembre 2024 et février 2025 sont toutes les deux supérieures aux moyennes 2020-2024, avec des écarts relatifs respectifs de +24% et de +19%. **Ainsi le niveau annuel en PM10, calculé à partir des moyennes des deux campagnes (cf. I), est potentiellement sous-estimé en raison de la campagne hivernale puisque le niveau mesuré en PM10 est plus faible que dans le passé. A l'inverse, le niveau annuel en PM2,5 (calculé à partir des moyennes des deux périodes étudiées) peut être surestimé en raison de niveaux supérieurs à l'historique lors des deux campagnes.**

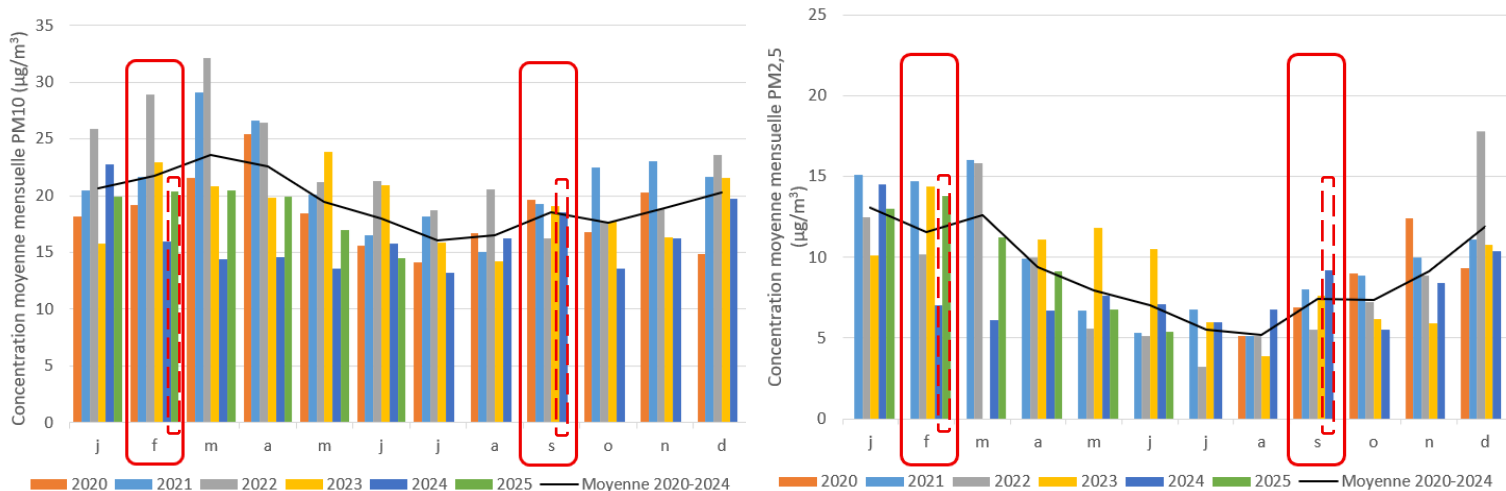


Figure 12 : Historique 2020 – 2025 des moyennes mensuelles PM10 et PM2,5 à la station Rocabey

Zoom sur les épisodes de pollution aux particules

A noter que durant la **campagne estivale**, le **19 septembre 2024**, les départements du Finistère et des Côtes d'Armor ont été concernés par un **épisode de pollution aux PM10**. Cet épisode PM10 a touché plusieurs départements des côtes de la Manche (cf. annexe XVII4).

Pendant les 2 campagnes le département d'Ille-et-Vilaine a été concerné par des déclenchements de la procédure préfectorale (unique pour ce seul département français) d'un dépassement du seuil journalier information/recommandation, fixé à 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (en moyenne journalière) **pour les PM2,5**, les **19, 20 septembre 2024** et les **2, 3, 16, 17 et 18 février 2025**.

VII. METHODE D'INTERPRETATION DES RESULTATS

L'objectif de cette partie est de présenter la manière dont les données vont être présentées dans ce rapport dans l'objectif de pouvoir apporter des réponses aux questions posées dans le contexte de cette étude.

VII1. Méthodologie d'interprétation des données

Etude de l'évolution temporelle des mesures PM10 à la station Rocabey

Dans un premier temps, une analyse de l'historique (2020-2024) des mesures en particules à la station Rocabey va être réalisée afin d'identifier les éventuelles particularités saisonnières propres à Saint-Malo. L'évolution temporelle (mensuelle, saisonnière) constatée à la station malouine va être comparée à celle d'autres stations de typologie similaire du réseau de surveillance régional (cf. annexe XVII1). Ainsi, les stations considérées dans cette analyse sont :

- la station urbaine de fond Balzac à Saint-Brieuc,
- la station urbaine de fond Thabor (et Pays-Bas) à Rennes,
- la station urbaine de fond Macé à Brest.

Analyse de la variation spatiale des mesures PM10/PM2,5 au niveau de la ville de Saint-Malo

L'étude de la représentativité des mesures PM10 et PM2,5 à la station Rocabey va être menée en comparant les résultats entre les différents points de mesure de la campagne. Les différents seuils de référence (seuils réglementaires et valeurs recommandées par l'OMS – cf. Tableau 1) seront considérés afin de les comparer avec les moyennes des 2 campagnes (moyenne annuelle estimée) entre les 4 points de mesure à Saint-Malo. De plus, la comparaison entre les résultats respectifs des deux campagnes et de leur variation journalière va être réalisée ce qui permettra d'identifier d'éventuelles influences spécifiques pour chacun des points de mesure.

Etude des influences des différents quartiers

En complément de l'étude des variations spatiales, l'analyse des variations du ratio PM2,5/PM10 va permettre, dans un premier temps, de caractériser de potentielle source d'influence de la fraction grossière des PM10 sur chacun des points de mesure. Ensuite, les roses de pollution PM10 par site, de chacune des campagnes, seront présentées afin de mettre en avant et d'identifier les secteurs d'influence de chacun des sites. A titre indicatif les roses de pollution PM2,5 sont présentées en annexe (XVII7).

Exploitation des résultats de la composition chimique des PM10

Pour commencer, le protocole de sélection des filtres analysés est présenté avant de préciser le traitement des résultats d'analyse via le bilan des masses. L'objectif de cette partie est de pouvoir identifier la présence de composés permettant d'expliquer les spécificités remarquées sur les sites de mesures. L'analyse des variations journalières des compositions chimiques pour les 4 sites concernés par des prélèvements PM10 va permettre d'expliquer les différences de concentrations massiques PM10 si elles existent. Enfin, l'analyse par composant chimique va être réalisée afin de mieux comprendre les variations d'influence.

Analyse des mesures en ammoniac

Le suivi en continu des niveaux d'ammoniac pour les 4 sites de mesure de l'étude va être exploité via les calculs statistiques et l'analyse des évolutions spatio-temporelles. Les mesures réalisées au niveau de la station rurale nationale Kergoff (en centre Bretagne) seront également présentées afin de pouvoir comparer les données entre elles. Les roses de pollution NH₃ pour chacun des sites lors des 2 campagnes vont être présentées. L'objectif de cette analyse est de caractériser les différentes influences pour chacun des sites. L'étude des jours spécifiques va être menée afin de chercher à mettre en avant le lien particules fines et le précurseur gazeux, ammoniac, à l'aide des données de composition chimique des PM10.

VII.2. Contrôle qualité des mesures automatiques

Dans le cadre de la surveillance réglementaire, **le taux de couverture des analyseurs** sur une période donnée doit être supérieur à 90% pour permettre une bonne représentativité et l'exploitation des données (Arrêté du 16 avril 2021⁴).

Les taux de couverture des appareils de mesure en continu des 4 points de mesure sont présentés dans le Tableau 5.

Le taux de couverture, pour chacun des paramètres mesurés, est calculé avec la formule suivante :

$$\text{Taux de couverture (tc \%)} = \frac{\text{nb de données analyseur}}{\text{nb total de données durant la période}} \times 100$$

Tableau 5 : Taux de couverture (Tc) des analyseurs (données horaires), pour les deux campagnes de mesure

	Station Rocabey			Site Ormeaux			Site Police			Site Vélodrome		
	PM10	PM2,5	NH ₃	PM10	PM2,5	NH ₃	PM10	PM2,5	NH ₃	PM10	PM2,5	NH ₃
Tc % (campagne estivale)	100	100	100	98	98	98	98	98	98	98	98	98
Tc % (campagne hivernale)	89	91	91	98	98	98	98	98	98	96	96	97

La mesure en continu PM10 à la station Rocabey présente un taux de couverture de 89% durant la campagne hivernale en raison de mise en défaut de l'analyseur BAM et l'absence de données le 29/01 et du 18/02 au 20/02/2025.

Les taux de couverture des autres analyseurs sont tous supérieurs à 90%, ce qui est satisfaisant pour l'exploitation des données de mesure. Cette différence de taux de couverture entre les sites ne remet pas en cause la représentativité des données et ainsi, la comparaison entre les sites reste pertinente.

⁴ Arrêté du 16 avril 2021 relatif au dispositif national de surveillance de la qualité de l'air ambiant

VIII. RESULTATS - ANALYSE DE L'HISTORIQUE DES DONNEES PM10 A ROCABEY

Cette partie porte sur la **comparaison de l'historique 2020-2024 des concentrations en PM10 à la station Rocabey par rapport aux niveaux rencontrés pour 3 autres stations réglementaires de typologie similaire (urbaine de fond) situées à :**

- Rennes (station Pays-Bas de 2020 à 2022 puis station Thabor de 2023 à 2024), ville bretonne la plus peuplée
- Saint-Brieuc (station Balzac), nombre d'habitant proche de Saint-Malo et en proximité du littoral de la Manche
- Brest (station Macé), plus peuplée que Saint-Malo en proximité littoral.

Ainsi l'objectif est d'étudier l'évolution temporelle (saisonnaire, mensuelle) des niveaux en PM10 mesurés à la station Rocabey au regard des variations des autres stations de même typologie du réseau de surveillance (cf. annexe XVII1).

VIII1. Moyenne pluriannuelle des PM10 de 2020 à 2024

A titre d'information, les **moyennes pluriannuelles PM10** sont calculées pour les 4 stations du réseau de surveillance breton sur la période 2020-2024 (Tableau 6). La moyenne la plus élevée est atteinte à la station Rocabey avec $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et les 3 autres stations se suivent avec 16, 15 et $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne pluriannuelle de 2020-2024, respectivement aux stations urbaines de fond de Brest (Macé), Rennes puis Saint-Brieuc (Balzac). Ainsi, un écart relatif maximal de +35% est observé entre les moyennes pluriannuelles 2020-2024 à la station Rocabey et la station Balzac soit $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ d'écart. Aucune moyenne pluriannuelle 2020- 2024 ne dépasse la valeur limite de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Les stations de Brest (Macé) et de Saint-Malo (Rocabey) dépassent la recommandation OMS 2021, fixée à $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ alors que la station urbaine de Rennes atteint cette valeur et celle de Saint-Brieuc reste en dessous. Quant au seuil de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, visé en 2030 dans le cadre de la nouvelle directive (2024), il n'est dépassé sur aucune des stations en moyenne 2020-2024.

Tableau 6 : Comparaison des moyennes pluriannuelle PM10 2020 – 2024 des stations urbaines de fond de Saint-Malo, Brest, Rennes et Saint-Brieuc avec les seuils de référence

PM10	Station Rocabey	Station Brest Macé	Station Rennes	Station St Brieuc Balzac
Moyenne pluriannuelle 2020-2024 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	19	16	15	14
Valeur limite moyenne annuelle	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$			
Recommandation OMS 2021 moyenne annuelle	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$			
Nouvelle directive européenne (seuil visé en 2030 en moyenne annuelle)	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$			

VIII.2. Evolution pluriannuelle des PM10 de 2020 à 2024

La Figure 13 présente les **variations annuelles des concentrations PM10 au niveau des 4 stations** du réseau de surveillance breton considérées dans cette partie. Ainsi la variabilité interannuelle est constatée pour l'ensemble des stations du réseau avec une année 2022 qui présente les niveaux PM10 les plus élevés pour les stations de Saint-Malo ($23 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et de Brest ($19 \mu\text{g}/\text{m}^3$). A l'inverse, les plus faibles concentrations moyennes sont mesurées en 2024. Les stations de Rennes et Saint-Brieuc présentent des concentrations égales et donc des évolutions similaires. Les écarts de ces dernières stations par rapport à la station de Saint-Malo sont compris entre -20% et -30%. La station de Brest est celle qui présente les plus faibles écarts relatifs avec la station de Saint-Malo (de -6% en 2020 à -24% en 2021). Notons que la variabilité interannuelle est plus marquée au niveau des stations de Saint-Malo et de Brest.

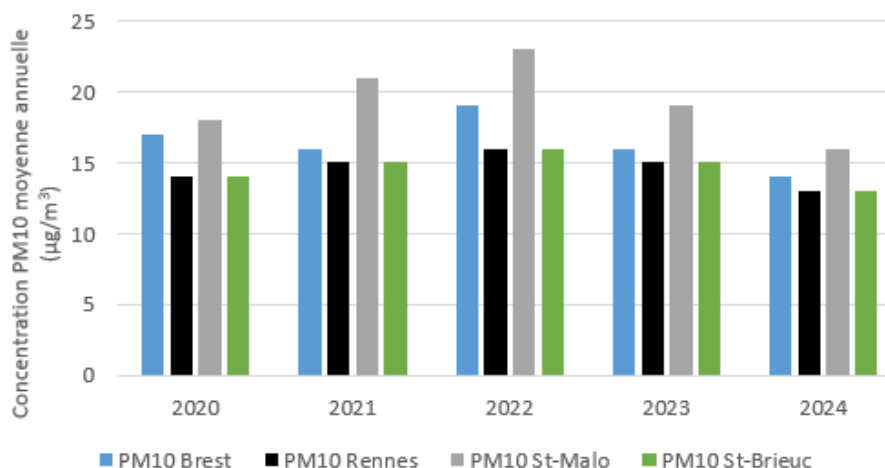


Figure 13 : Evolution des concentrations moyennes annuelles de 2020 à 2024 en PM10 à Brest, Rennes, Saint-Malo, Saint-Brieuc (stations urbaines de fond)

VIII.3. Evolution saisonnière des PM10 de 2020 à 2024

La **variation saisonnière des concentrations moyennes en PM10** pour les 4 stations est tracée dans la Figure 14. L'évolution saisonnière suit la même tendance à la station Rocabey de Saint-Malo par rapport aux 3 autres stations du réseau de mesure breton. **L'été présente les plus faibles concentrations en PM10** alors que **l'hiver et le printemps sont les saisons avec les moyennes les plus élevées**.

Bien que les évolutions soient similaires, au fil des saisons, la moyenne enregistrée sur la période 2020-2024 est toujours supérieure à la station Rocabey en comparaison aux 3 autres stations de mesure réglementaire. A noter que les plus forts écarts relatifs à la station Rocabey pour chacune des saisons sont compris entre +35% (à l'été par rapport aux stations de Rennes soit $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et +39% (au printemps par rapport à la station de Rennes soit $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

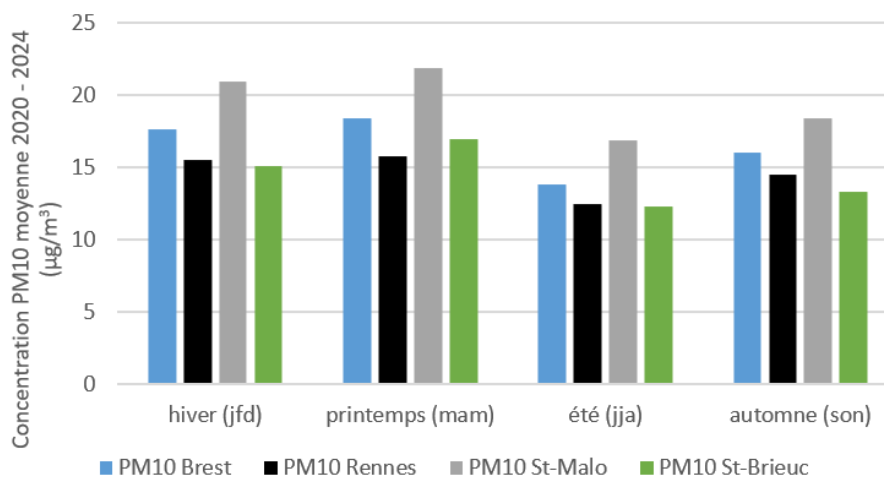


Figure 14 : Evolution saisonnière des concentrations moyennes 2020 - 2024 en PM10 à Brest, Rennes, Saint-Malo, Saint-Brieuc (stations urbaines de fond)

VIII.4. Evolution mensuelle des PM10 de 2020 à 2024

La Figure 15 présente les **variations des moyennes mensuelles 2020-2024** pour les 4 stations réglementaires de Saint-Malo (station Rocabey), de Rennes (station Pays-Bas puis Thabor), de Brest (station Macé) et de Saint-Brieuc (station Balzac).

Tout au long de l'année, les **moyennes mensuelles en PM10 enregistrées**, sur la période 2020-2024, au niveau de la **station Rocabey sont supérieures à celles observées pour les autres stations urbaines** considérées. Elles sont comprises entre 16 et 24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à Saint-Malo alors qu'elles varient de 11 à 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ aux stations de Rennes et St-Brieuc et de 13 et 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au niveau de la station brestoise. Pour toutes les stations, les **moyennes mensuelles** maximales sont atteintes au **mois de mars**.

Les écarts entre la station malouine et la station brestoise sont relativement stables compris entre 13% (+ 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en novembre et 25% (+3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en août alors que les écarts avec St-Brieuc et Rennes présentent de plus fortes variations. En effet, l'écart relatif le plus élevé, de 56%, est constaté avec la station rennaise en mai (+ 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à la station Rocabey).

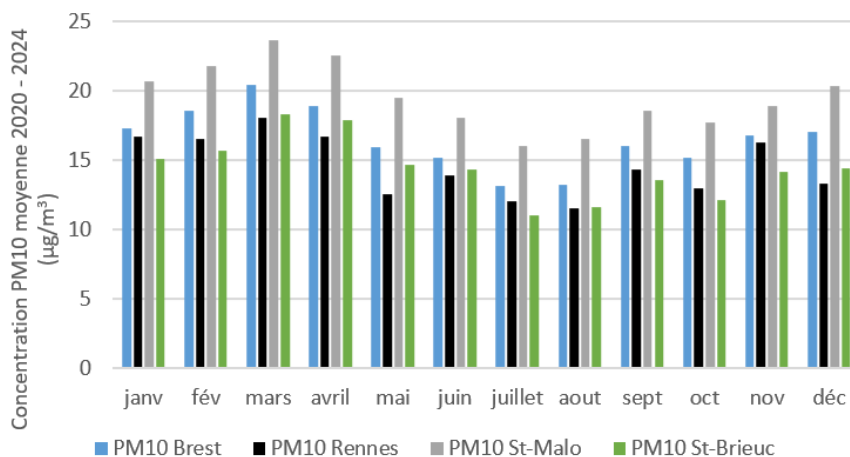


Figure 15 : Evolution des moyennes mensuelles 2020 – 2024 des concentrations en PM10 à Brest, Rennes, Saint-Malo et Saint-Brieuc

La Figure 16 présente l'évolution des moyennes mensuelles des concentrations sur la période 2020 – 2024 exprimées en base 100 avec comme référence la moyenne 2020 – 2024 du mois de janvier à la station Rocabey. Cette représentation met en avant des variations mensuelles proches entre les 4 sites avec des niveaux supérieurs pour tous les mois de l'année à la station Rocabey de Saint-Malo. Le plus fort écart enregistré en mai et en décembre entre la station malouine et la station de Rennes est lié à une baisse plus marquée de la moyenne mensuelle au niveau de la station rennaise.

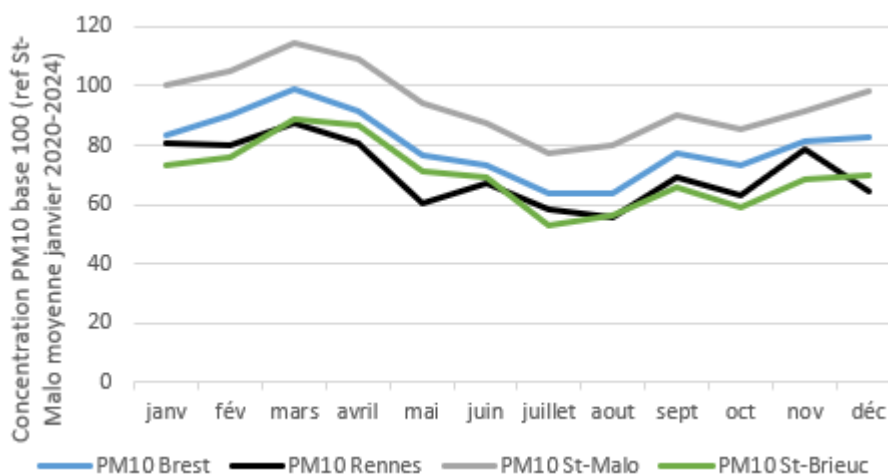


Figure 16 : Evolution des moyennes mensuelles PM10 (2020-2024) des 4 stations en base 100 (la base 100 étant fixée pour la moyenne 2020 – 2024 de janvier à Rocabey)

VIII.5. Comparaison des profils moyens journaliers des PM10 de 2020 à 2024

Les **profils moyens journaliers sur la période 2020-2024** sont tracés pour les 4 stations urbaines de Rennes, St-Brieuc, Brest et Saint-Malo dans la Figure 17. Bien que les concentrations en PM10 présentent des évolutions similaires avec deux augmentations (une dans la matinée et une autre en soirée moins marquée), les moyennes enregistrées au niveau de la station Rocabey à Saint-Malo sont supérieures, tout au long de la journée, à celles mesurées au niveau des autres villes considérées.

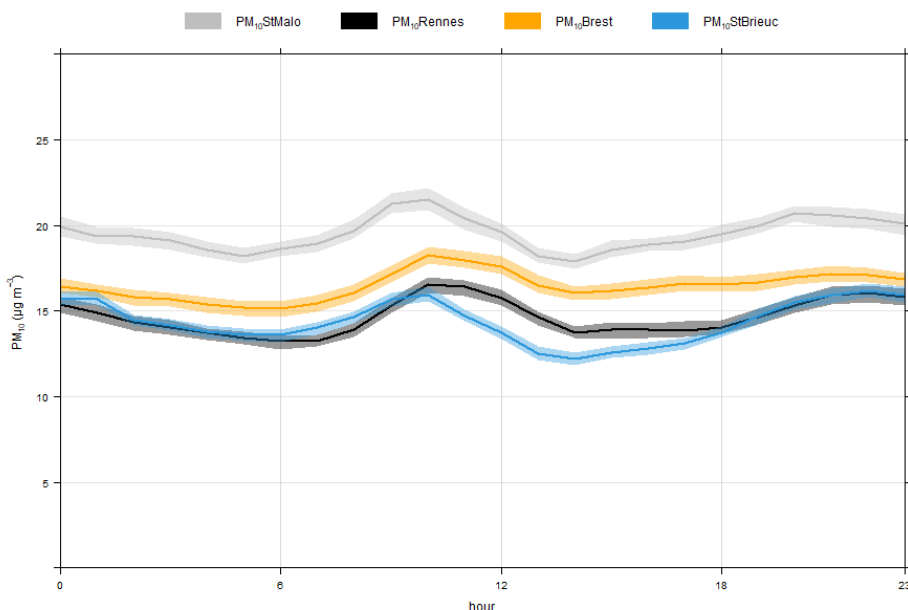


Figure 17 : Profil moyen journalier PM10 2020- 2024 à Rennes, St-Malo, Brest et St-Brieuc

Les niveaux en PM10 mesurés à Saint-Malo Rocabey présentent-ils la même **évolution temporelle** (saisonniers, mensuelle) que les autres stations du réseau régional ?

L'analyse de l'historique des mesures réglementaires en PM10 de 2020 à 2024 à la station Rocabey à Saint-Malo comparé aux autres stations urbaines de Rennes, Saint-Brieuc et Brest permet de mettre en avant des évolutions horaires, mensuelles et saisonnières similaires en termes de variation. La tendance est similaire avec un niveau maximum en PM10 observé en hiver/printemps (pendant le mois de mars notamment) et un minimum atteint durant l'été (juillet – août).

Toutefois, il est à noter que les concentrations en PM10 à la station malouine sont constamment supérieures à celles mesurées au niveau des autres stations urbains de fond de Rennes, Saint-Brieuc et Brest. Les moyennes pluriannuelles 2020 – 2024 illustrent ce propos ; elle est de $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à la station malouine alors que celles de Brest, Rennes et Saint-Brieuc sont comprises entre 16 et $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La variabilité interannuelle est plus marquée au niveau des stations de Brest et de Saint-Malo.

IX. RESULTATS - COMPARAISON AUX SEUILS DE REFERENCE

Dans cette partie, les résultats PM10 et PM2,5, obtenus pendant les 2 campagnes estivale et hivernale sont analysés afin de comparer les différents points de mesure entre eux et au regard des différents seuils de référence (réglementaires et recommandations OMS).

IX1. Mesure des PM10

a) Résultats des sites de l'étude

Le Tableau 7 ci-dessous présente une synthèse statistique des mesures en PM10 réalisées sur les quatre sites pendant les deux campagnes. Les maximums journaliers et les moyennes annuelles estimées (moyennes des deux campagnes) sont comparés aux seuils de référence.

Tableau 7 : Synthèse statistique des mesures en PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Concentrations PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Campagne estivale				Campagne hivernale			
	PM10 Ormeaux	PM10 Police	PM10 Vélodrome	PM10 Rocabey	PM10 Ormeaux	PM10 Police	PM10 Vélodrome	PM10 Rocabey
Données horaires								
1 ^{er} quartile	5,8	8,7	8,1	10,4	8,9	11,9	10,4	12,0
Médiane	9,0	12,9	12,5	15,5	14,0	18,2	17,1	18,6
Moyenne	11,3	16,1	15,9	18,8	15,4	19,7	18,7	19,3
3 ^{ème} quartile	12,8	18,7	17,8	22,8	21,2	26,0	25,8	25,2
Maximum horaire (date)	41,3 (19/09/24)	56,4 (19/09/24)	58,1 (20/09/24)	76,6 (15/09/24)	42,9 (17/02/25)	71,5 (09/02/25)	66,6 (09/02/25)	55,0 (28/01/25)
Données journalières								
Recommandation OMS	45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en <u>moyenne journalière</u>							
CE 2030	45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en <u>moyenne journalière</u>							
Valeur limite	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en <u>moyenne journalière</u>							
Maximum journalier (date)	37 (19/09/24)	50 (19/09/24)	50 (19/09/24)	48 (19/09/24)	34 (17/02/25)	40 (17/02/25)	40 (17/02/25)	36 (17/02/25)
Données moyennes annuelles								
	PM10 Ormeaux	PM10 Police	PM10 Vélodrome	PM10 Rocabey				
Recommandation OMS	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en <u>moyenne annuelle</u>							
CE 2030	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en <u>moyenne annuelle</u>							
Valeur limite	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en <u>moyenne annuelle</u>							
Moyenne annuelle estimée (C1 – C2)	13	18	17	19				

- Comparaison aux seuils de référence

Au vu des résultats de ce tableau, la **valeur limite journalière de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** a été atteinte lors de la campagne estivale en septembre 2024 (pour le site Police et Vélodrome) mais n'a pas été dépassée (épisode de pollution PM10 sur d'autres départements de la région). Toutefois, le seuil fixé à 45

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ par la commission européenne à atteindre en 2030 (égal à la recommandation OMS) a été dépassé pour tous les points de mesure sauf pour le site Ormeaux durant la campagne estivale. **Aucun dépassement des valeurs de référence en moyenne journalière n'a été observé lors de la campagne hivernale.**

En ce qui concerne, les **moyennes annuelles estimées** sur les 4 points de mesure de l'étude, **seul le site Ormeaux ne dépasse aucun seuil**. En effet, les 3 autres dépassent la valeur guide de l'OMS puisqu'ils sont compris entre $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (site Vélodrome) et **$19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (station Rocabey)**. La valeur limite réglementaire actuelle de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ainsi que la valeur seuil de la commission européenne ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sont respectées.

- Comparaison des moyennes annuelles estimées

L'écart relatif maximal entre les moyennes annuelles estimées en PM10 est de +42% (soit $5,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) entre la station Rocabey et le site Ormeaux. L'écart relatif entre la station réglementaire et les deux autres sites de l'étude sont de 7% (soit $1,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et 10% (soit $1,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) respectivement pour le site Police et le site Vélodrome. Les 3 sites localisés au cœur de Saint-Malo, les sites Vélodrome, Police et la station Rocabey présentent une moyenne annuelle de $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

D'autre part, la moyenne pluriannuelle 2020 – 2024, au niveau de la station Rocabey est de $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ce qui est cohérent avec l'estimation faite dans le cadre de cette étude. La sous-estimation évoquée dans le cadre l'analyse de la période de mesure (cf. VI3) ne semble pas se confirmer.

- Comparaison saisonnière

Les **moyennes et les médianes (calculées à partir des données horaires) en période hivernale sont supérieures à celles de la campagne estivale**. En effet, les **écarts relatifs entre les moyennes hivernale et estivale** sont de 3%, 17%, 22% et 36% respectivement à la station Rocabey, pour le site Vélodrome, Police et Ormeaux.

Ainsi, il y a peu de différence entre les moyennes des 2 périodes au niveau de la station Rocabey ($0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Par comparaison à l'historique 2020 – 2024 ; l'écart relatif entre les moyennes de février et septembre est de 17% (soit $3,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Ce constat confirme **une plus faible variation saisonnière au niveau de la station Rocabey durant cette étude** contrairement aux **3 autres sites** (3 à $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ d'augmentation en période hivernale).

La différence entre la moyenne et la médiane (caractérise le niveau de fond) est la plus faible au niveau de la station Rocabey en période hivernale ($0,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ce qui signifie **moins de valeurs atypiques en hiver à la station Rocabey** et ce qui explique les niveaux similaires avec les sites Vélodrome et Police lors de la campagne hivernale.

- Comparaison intersites par campagne

Le site Ormeaux est celui qui présente, indépendamment des saisons, les niveaux en PM10 les plus faibles des points de mesure considérés.

En période estivale, les **concentrations moyenne et médiane les plus élevées sont enregistrées à Rocabey avec un écart de 2 à $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ par rapport aux sites Police et Vélodrome.**

Lors de la **campagne hivernale**, seul $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ d'écart est observé entre les moyennes des sites Police ($19,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Vélodrome ($18,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et la station Rocabey ($19,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Ainsi les **résultats sont homogènes entre ces 3 points de mesure** distants au maximum de 1,6 km (distance station Rocabey – site Vélodrome) et localisés au cœur de Saint-Malo.

La Figure 18 ci-dessous présente les jeux de données horaires PM10 des sites de mesure à Saint-Malo, pour les deux campagnes, sous la forme de box plot.

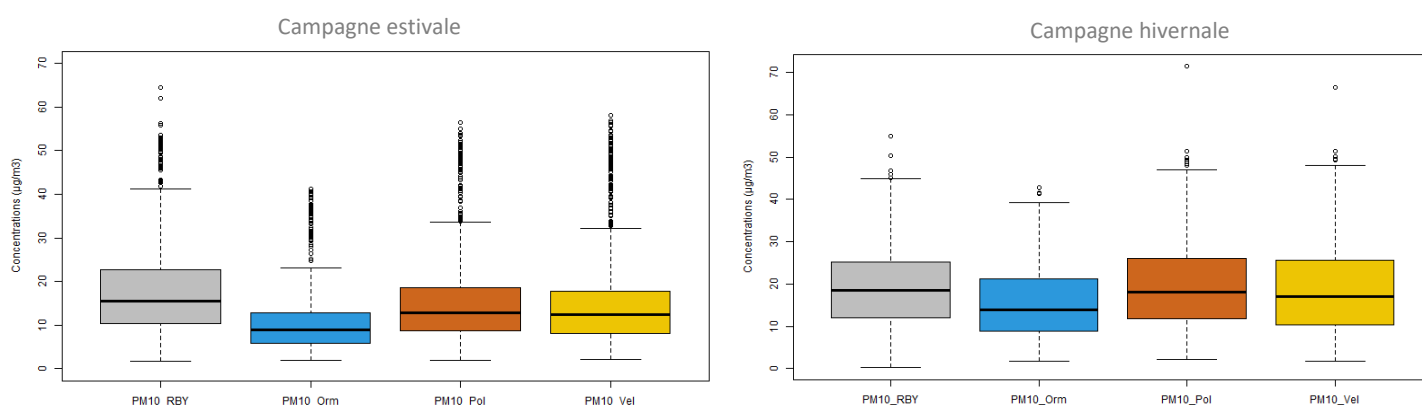


Figure 18 : Box plot des concentrations en PM10 mesurées pendant les campagnes (données horaires)

Comme évoqué précédemment les **niveaux de fond** (caractérisés par les médianes) en PM10 **sont supérieurs** pendant la **campagne hivernale par rapport à la campagne estivale**, avec des écarts relatifs compris entre 20% ($3,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et 56% ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) respectivement pour la station Rocabey et pour le site Ormeaux. Ce dernier site situé dans un environnement moins urbanisé (densité de population la plus faible des 4 sites) et plus distant du littoral est celui qui présente les plus faibles niveaux en PM10 durant les deux campagnes. A noter qu'il est aussi le plus proche de la ZI, situé 800 m au sud-ouest de ce point de mesure. Quant aux sites Police et Vélodrome, ils présentent des box plot très similaires avec un léger décalage par rapport à la station Rocabey notamment lors de la campagne estivale. L'analyse de la composition chimique va permettre d'identifier si des différences entre les composés chimiques existent entre les sites considérés et ainsi de comprendre les influences des différents quartiers.

- Comparaison intersites des niveaux journaliers : identification des journées atypiques

Les Figure 19 et Figure 20 ci-après présentent les évolutions journalières en PM10 pour les sites pendant les 2 campagnes. Lors des 2 périodes considérées, les moyennes journalières sont plus faibles au niveau du site Ormeaux. Les 3 autres points de mesure de Saint-Malo présentent des évolutions similaires avec ponctuellement des augmentations plus marquées notamment pendant la campagne estivale. En effet, à la mi-septembre 2024 (période sans pluie - Figure 11), des variations non simultanées sont constatées entre les différents points de mesure, avec par exemple :

- le 10 septembre, une augmentation de la concentration journalière en PM10 au niveau du site Police, anti-corrélée aux autres sites,
- le 11 septembre, au niveau du site Vélodrome, une augmentation ponctuelle est observée

- du 14 au 16 septembre, la station Rocabey se démarque avec des niveaux mesurés supérieurs à ceux des autres sites de la ville.

Le 19 septembre 2024, il est constaté une forte augmentation des concentrations en PM10 en cohérence avec le contexte régional (dépassement du seuil IR au niveau des départements du Finistère et des Côtes-d'Armor – cf. annexe XVII4).

Durant la campagne hivernale, les évolutions suivent globalement les mêmes tendances entre les sites avec une différence entre les niveaux pour le site Ormeaux par rapport aux 3 autres points de Saint-Malo.

Notons quelques différences d'intensités, par exemple le 25 janvier 2025, le site Police et la station Rocabey présentent une augmentation du même ordre de grandeur ($>15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) alors que le site Ormeaux et Police sont proches de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

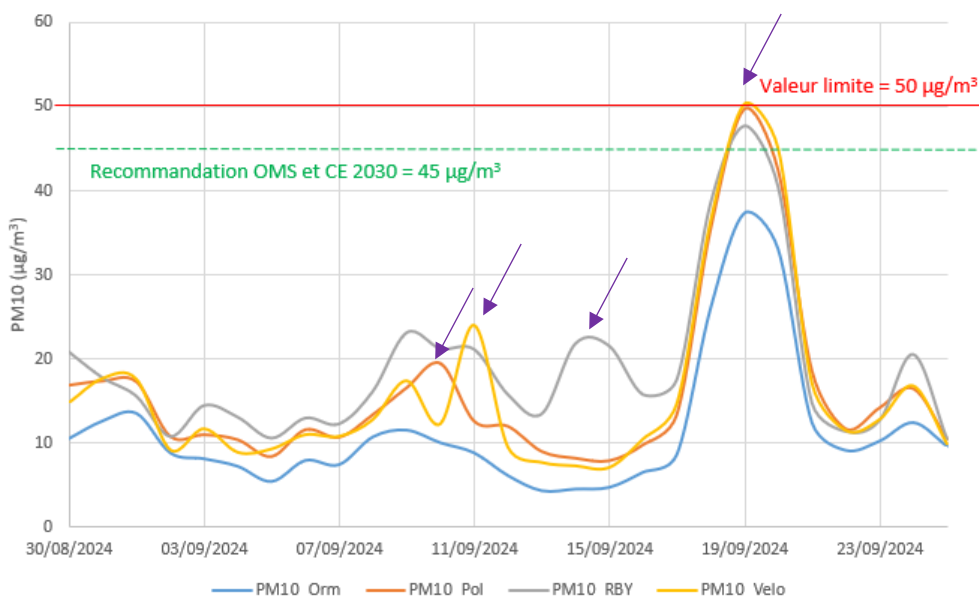


Figure 19 : Evolution journalière des concentrations en PM10 pendant la campagne estivale ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

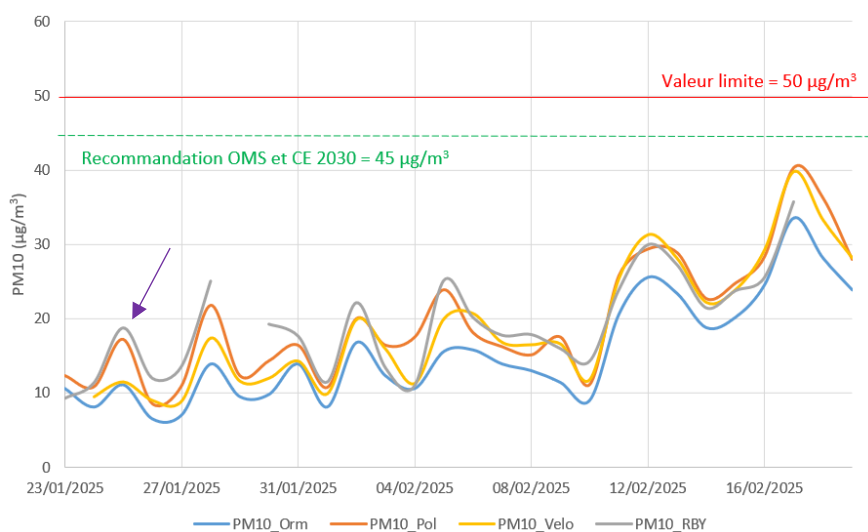


Figure 20 : Evolution journalière des concentrations en PM10 pendant la campagne hivernale ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

b) Résultats des stations du réseau de surveillance (lors des campagnes de mesure)

Les résultats des mesures au niveau des stations urbaines de Brest (station Macé) et de Rennes (station Thabor) lors des deux campagnes sont présentés dans le Tableau 8⁵.

La moyenne en période estivale est égale à 13,3 µg/m³ à Rennes et 16,6 µg/m³ à Brest. Ces **niveaux sont inférieurs respectivement de 5,5 µg/m³ et 2,2 µg/m³ par rapport à celui de la station Rocabey (18,8 µg/m³)**. La variation saisonnière est observée également au niveau des 2 stations urbaines de Brest et Rennes avec des moyennes et des médianes supérieures en période hivernale. La moyenne est supérieure de 1,8 µg/m³, en hiver à Brest par rapport à l'été, et à Rennes une différence de 4,7 µg/m³ est enregistrée entre les deux périodes.

Lors de la **campagne hivernale la moyenne à la station malouine est de 19,3 µg/m³ soit un écart d'environ 1 µg/m³ avec les stations de Brest et Rennes**

D'autre part, la valeur limite journalière de 50 µg/m³ a été dépassée au niveau de la station Brest, lors de la campagne estivale au cours de l'épisode de pollution particulière.

Les **moyennes annuelles estimées pour les stations de Brest et de Rennes** sont respectivement de 18 µg/m³ et 16 µg/m³. Ainsi la moyenne PM10 de la station de Brest est proche de celles obtenues lors de cette campagne au niveau des 3 sites, localisés au cœur de Saint-Malo, Police (18 µg/m³), Vélodrome (17 µg/m³) et la station Rocabey (19 µg/m³) soit une moyenne annuelle estimée pour ces 3 sites malouins égale à 18 µg/m³.

Tableau 8 : Statistiques des mesures PM10 aux stations urbaines de fond de Brest et Rennes lors de l'étude

Concentrations PM10 (µg/m ³)	Campagne estivale		Campagne hivernale	
	PM10 Brest	PM10 Rennes	PM10 Brest	PM10 Rennes
Données horaires				
1 ^{er} quartile	8,5	7,7	11,4	9,1
Médiane	13,3	11,7	18,0	16,4
Moyenne	16,6	13,3	18,4	18,0
3 ^{ème} quartile	18,4	16,0	24,1	24,3
Maximum horaire	66,5	51,4	58,2	64,4
Données journalières				
Maximum journalier	57	19	31	42
Données annuelles				
	PM10 Brest	PM10 Rennes		
Moyenne annuelle estimée	18	16		

⁵Les résultats de la station Balzac à Saint-Brieuc ne sont pas présentés car elle a été arrêtée en janvier 2025, avant la campagne hivernale

c) Synthèse de l'analyse des données de mesure PM10

Comparaison aux seuils de référence (réglementaire, seuil CE à atteindre en 2030 et recommandations OMS)

Durant la campagne estivale, la valeur limite de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne journalière a été atteinte sur les sites malouins (Police et Vélodrome) mais n'a pas été dépassée. D'autre part, le seuil journalier fixé à 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ par la CE à atteindre en 2030 (égal à la recommandation OMS) a été dépassé pour tous les points de mesure sauf pour le site Ormeaux.

Lors de la campagne hivernale, aucune valeur de référence en moyenne journalière n'a été dépassée.

Quant aux moyennes annuelles estimées, seul le site Ormeaux respecte les seuils, les 3 autres points de mesure (station Rocabey, sites Police et Vélodrome) dépassent la valeur guide de l'OMS. La valeur limite ainsi que la valeur seuil de la commission européenne à atteindre en 2030 sont respectées.

Comparaison saisonnière (campagne été – campagne hiver)

Les moyennes et les médianes horaires obtenues pendant la période hivernale sont supérieures à celles de la campagne estivale. Les écarts relatifs entre les moyennes hivernale et estivale sont compris entre 3% à la station Rocabey et 36 % pour le site Ormeaux. Lors de cette étude, une faible variation saisonnière est constatée à la station Rocabey en lien avec des augmentations ponctuelles plus fréquentes durant la période estivale.

En ce qui concerne les niveaux de fond, caractérisés par les médianes, ils varient entre les deux campagnes avec des écarts relatifs respectifs de 20% à 56 % pour la station Rocabey et le site Ormeaux. L'écart saisonnier à la station Rocabey est plus marqué pour la médiane que pour la moyenne.

Comparaison inter-sites

Indépendamment des saisons, le site Ormeaux présente des niveaux inférieurs selon les différentes échelles temporelles analysées (annuelle, journalière et horaire) par rapport aux 3 autres points de mesure de l'étude. La localisation de ce site sur les hauteurs de Saint-Malo, distant du littoral et dans un quartier moins urbanisé peut rapidement expliquer cette différence de concentration (environ -6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle estimée en PM10 pour le site Ormeaux par rapport à la station Rocabey). En effet, en moyenne pour les 2 campagnes, la station Rocabey présente des écarts relatifs inférieurs à 10% par rapport aux 2 autres sites de la ville.

Si globalement les différents sites de Saint-Malo présentent des évolutions journalières PM10 similaires, traduisant des influences similaires, plusieurs jours courant septembre ont été identifiés comme présentant des augmentations journalières localisées à des points spécifiques. Cela révèle des influences ponctuelles localisées à l'échelle du quartier. L'analyse de la composition chimique des PM10, pour ces jours va permettre de mieux comprendre ces variations journalières ponctuelles et locales.

Comparaison aux autres stations du réseau breton

La station Rocabey présente une moyenne plus élevée que les deux autres stations urbaines de Rennes et Brest en été ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ par rapport à la station rennaise). En revanche en période hivernale, seul environ $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ d'écart est observé entre les 3 stations urbaines.

En moyenne annuelle estimée, l'écart des stations urbaines bretonnes par rapport la moyenne PM10 des 3 sites localisés au cœur de Saint-Malo est plus important pour la station de Rennes avec -13% contre -3% pour la station urbaine de Brest.

Quelle est la **représentativité** des mesures PM10 de la station Rocabey ? Les concentrations en PM10 mesurées à Rocabey sont-elles homogènes dans la ville de Saint-Malo ?

La concentration moyenne annuelle estimée en PM10 au niveau de la station Rocabey ($19 \mu\text{g}/\text{m}^3$) présente des écarts relatifs inférieurs à 10 % par rapport à celles des sites Vélodrome ($17 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et Police ($18 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Le site Ormeaux (moyenne annuelle estimée de $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$), localisé plus en hauteur et plus distant des sources d'émissions (port, zone industrielle, quartiers résidentiels) présente logiquement des niveaux plus faibles que les 3 autres sites.

Ainsi pendant la campagne, il est constaté peu d'écart entre les sites (mis à part le site Ormeaux avec un écart de 42%). Les mesures réalisées à la station Rocabey sont représentatives du centre urbain de Saint-Malo.

Globalement, les variations journalières sont similaires ce qui permet de conclure à une homogénéité des mesures PM10 au sein de la ville de Saint-Malo. Toutefois, ponctuellement des différences de niveaux sur certains sites sont observées ce qui pourraient s'expliquer par des influences locales. L'homogénéité des mesures en PM10 est constatée en période hivernale plus qu'en période estivale.

D'autre part, la moyenne estimée de la station de Rennes a un écart de -13% par rapport à la moyenne des 3 sites localisés au cœur de Saint-Malo ($18 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Cet écart est moins marqué avec la station urbaine de Brest (-3%).

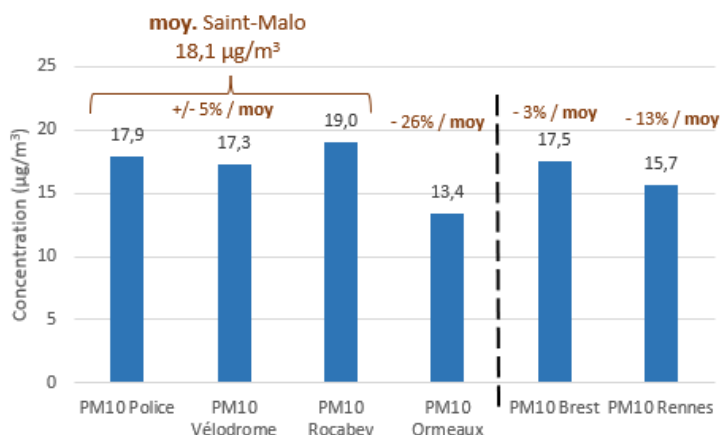


Figure 21 : Synthèse des moyennes annuelles PM10 estimées pendant la campagne

IX2. Mesure des PM2.5

a) Résultats des sites de l'étude

Le Tableau 9 ci-dessous présente une synthèse statistique des mesures en PM2,5 réalisées sur les quatre sites pendant les deux campagnes. Les maximums journaliers et les moyennes annuelles estimées (moyennes des deux campagnes) sont comparés aux seuils de référence.

Tableau 9 : Synthèse statistique des mesures en PM2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Concentrations PM2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Campagne estivale				Campagne hivernale			
	PM2,5 Ormeaux	PM2,5 Police	PM2,5 Vélodrome	PM2,5 Rocabey	PM2,5 Ormeaux	PM2,5 Police	PM2,5 Vélodrome	PM2,5 Rocabey
Données horaires								
1 ^{er} quartile	3,2	4,4	4,4	5,5	6,3	7,0	6,8	6,7
Médiane	5,2	7,1	7,2	7,7	11,1	12,1	12,9	11,2
Moyenne	7,4	9,8	9,8	9,7	12,7	14,9	15,1	13,4
3 ^{ème} quartile	8,7	11,2	11,3	11,4	18,5	21,8	22,0	19,0
Maximum horaire (date)	33,4 (21/09/24)	41,5 (20/09/24)	43,8 (20/09/24)	35,5 (19/09/24)	38,8 (17/02/25)	70,2 (09/02/25)	65,3 (09/02/25)	41,1 (17/02/25)
Données journalières								
Recommandation OMS	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en <u>moyenne journalière</u>							
CE 2030	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en <u>moyenne journalière</u>							
Maximum journalier (date)	27 (19/09/24)	34 (19/09/24)	35 (19/09/24)	28 (19/09/24)	30 (17/02/25)	35 (17/02/25)	36 (17/02/25)	31 (17/02/25)
Données annuelles								
	PM2,5 Ormeaux	PM2,5 Police	PM2,5 Vélodrome	PM2,5 Rocabey				
Recommandation OMS	5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en <u>moyenne annuelle</u>							
CE 2030	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en <u>moyenne annuelle</u>							
Valeur limite	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en <u>moyenne annuelle</u>							
Moyenne annuelle estimée (C1 – C2)	10	12	13	12				

- Comparaison aux seuils de référence

Au regard de ce tableau de résultat, la **recommandation de l'OMS** ainsi que la **valeur seuil de la commission européenne en moyenne journalière** (fixée à 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à atteindre en 2030) **ont été dépassées pour l'ensemble des sites de mesure durant les deux campagnes**. En effet, le maximum journalier le plus élevé est de 36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au niveau du site Vélodrome lors de la campagne hivernale et le maximum journalier le plus faible est de 27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au niveau du site Ormeaux durant la campagne estivale. A ce jour la réglementation en vigueur ne fixe pas de valeur limite sur ce pas de temps journalier.

Les moyennes annuelles estimées (moyennes de la campagne estivale et hivernale) au niveau des 4 points de mesure respectent la valeur limite réglementaire de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Toutefois, le seuil fixé à 10

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ par la CE à atteindre en 2030, ainsi que la recommandation OMS, sont dépassés sur l'ensemble des sites.

Notons que le seuil fixé par la CE de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (en moyenne journalière), à atteindre en 2030 et actuellement fixé en Ile-et-Vilaine comme seuil d'Information et Recommandation, est dépassé à plusieurs reprises. Lors de la campagne estivale (Figure 23) ce seuil avait été dépassé durant 2 jours (les 19 et 20 septembre durant l'épisode de pollution aux particules fines ayant touché les côtes de la Manche) de façon uniforme sur l'ensemble des sites. Lors de la campagne hivernale, 5 jours (12,13 et 16,17,18 février) au niveau des sites Police et Vélodrome contre seulement 1 jour (17 février) pour la station Rocabey et le site Ormeaux.

- Comparaison des moyennes annuelles estimées

Les moyennes annuelles estimées pour les 4 points de mesure sont comprises entre 10 (site Ormeaux) et $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (site Vélodrome) avec un écart maximal entre ces 2 sites de -24%.

La moyenne des 3 sites Vélodrome, Police et Rocabey, localisés dans le cœur urbain de Saint-Malo, est égale à $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Bien que les niveaux moyens soient proches entre les 4 sites (moins de $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de différence), l'écart est plus important avec Ormeaux (-17% par rapport à la moyenne des 3 autres sites) qui s'explique par une densité de population moins importante et un environnement moins urbanisé présentant moins de sources d'émission de PM_{2,5} (par exemple le chauffage résidentiel). Les moyennes annuelles estimées en PM_{2,5} pendant cette étude sont légèrement surestimées puisque les niveaux sont supérieurs à l'historique 2020 – 2025 lors des 2 campagnes de septembre 2024 et février 2024 (cf VI3).

- Comparaison saisonnière

Les résultats de la campagne hivernale en moyenne et en médiane sont supérieurs à ceux observés pendant la campagne estivale.

Les niveaux de fond, caractérisés par les médianes, sur les 4 points de mesure sont supérieurs pendant la campagne hivernale par rapport à la campagne estivale. Les écarts relatifs des médianes entre les 2 périodes sont respectivement de 45%, 70%, 79% et 113% pour la station Rocabey, le site Police, le site Vélodrome et le site Ormeaux. La station Rocabey présente la plus petite variation entre l'hiver et l'été. Ces **variations saisonnières sont cohérentes avec les émissions hivernales en particules fines plus nombreuses, en lien avec l'utilisation du chauffage résidentiel notamment, qui sont cumulées à des conditions météorologiques peu dispersives**. Les niveaux maximums horaires sont également plus élevés lors de la campagne hivernale pour l'ensemble des sites de mesure. Les box plot pour les sites Police et Vélodrome sont similaires avec des valeurs de quartiles très proches.

- Comparaison intersites

Contrairement au constat réalisé sur les niveaux de PM₁₀ plus faibles pour le site Ormeaux, les concentrations observées en PM_{2,5} pour ce site sont très proches des 3 autres points, surtout lors de la campagne hivernale (en lien avec l'utilisation du chauffage résidentiel). La station Rocabey enregistre des niveaux similaires, voire inférieures en période hivernale, par rapport à ceux des 2

autres sites Vélodrome et Police. Ainsi, les concentrations en PM2,5 mesurées sur les différents sites de Saint-Malo durant cette étude sont homogènes.

La Figure 22 présente les résultats des données horaires PM2,5 des 4 sites de mesure à Saint-Malo, pour les deux campagnes, sous la forme de box plot.

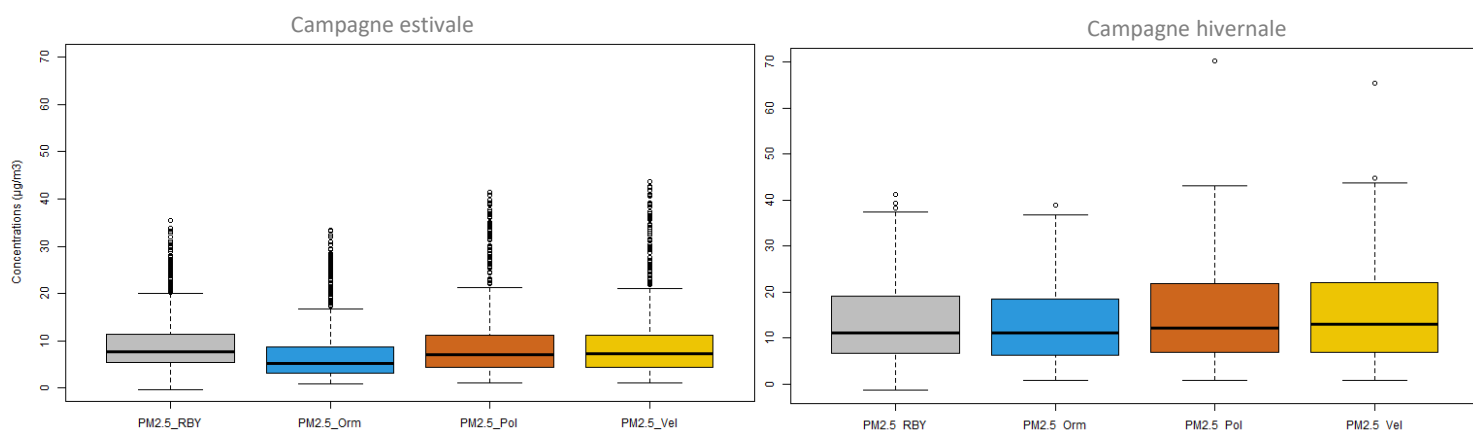


Figure 22 : Box plot des concentrations en PM2,5 mesurées pendant les campagnes (données horaires)

Les Figure 23 et Figure 24 présentent les évolutions journalières en PM2,5 pour les sites lors des 2 campagnes.

- Comparaison intersites des niveaux journaliers

L'ensemble des sites présentent des **variations temporelles similaires lors des 2 campagnes**. Ainsi, la variation spatiale des concentrations en PM2,5 au sein de la ville de Saint-Malo est très peu marquée et les **niveaux sont homogènes entre les différents quartiers**. Toutefois, lors de la campagne estivale, une augmentation ponctuelle au niveau de la station Rocabey est constatée entre le 14 et 16 septembre 2024. De même, il est constaté des niveaux légèrement supérieurs pour les sites Police et Vélodrome lors de l'épisode de pollution aux particules fines PM2,5 (dépassement du seuil information recommandation de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$) les 19 et 20 septembre 2024. Ce même constat est réalisé lors de la campagne hivernale avec des niveaux plus élevés pour ces 2 sites par rapport à la station Rocabey et au site Ormeaux.

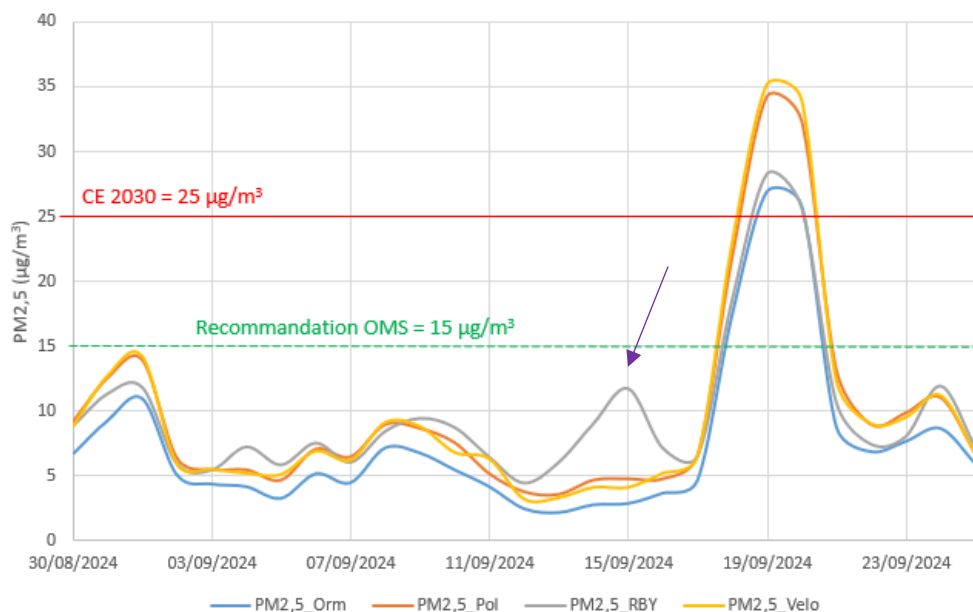


Figure 23 : Evolution journalière des concentrations en PM2,5 pendant la campagne estivale ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

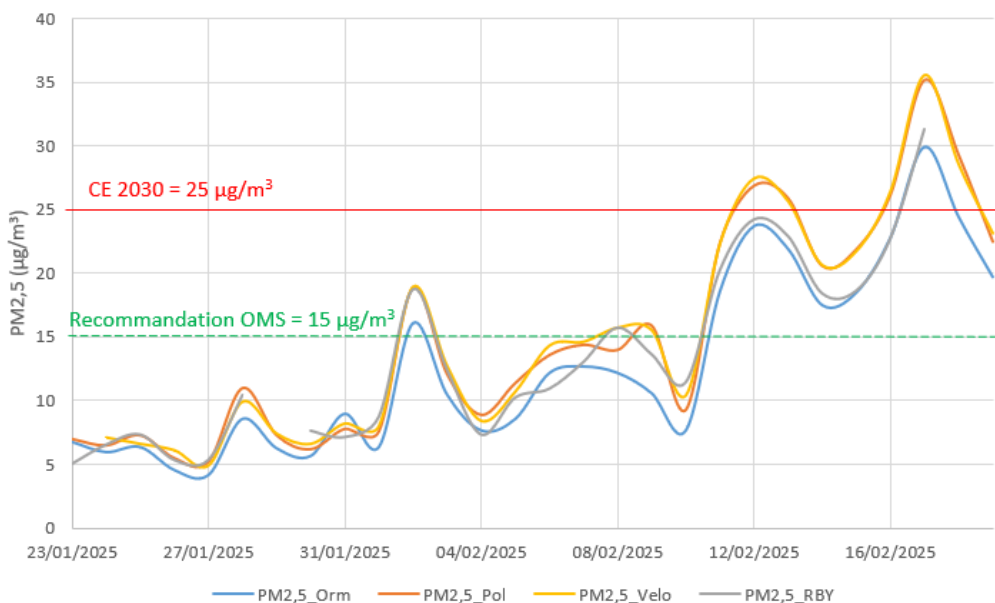


Figure 24 : Evolution journalière des concentrations en PM2,5 pendant la campagne hivernale ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

b) Résultats des stations du réseau de surveillance (lors des campagnes de mesure)

Les résultats des mesures en PM2,5 au niveau des stations urbaines de fond de Brest (station Macé) et de Rennes (station Thabor) sont présentés dans le Tableau 10. La **moyenne en période estivale** est égale à $9,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à Rennes et $10,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à Brest. Ces **niveaux sont très proches** ($\pm 0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) **par rapport à la station Rocabey ($9,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$)**. La variation saisonnière est observée également au

niveau des 2 stations urbaines de Brest et Rennes avec des moyennes et des médianes supérieures en période hivernale. La moyenne est supérieure de $1,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en hiver à Brest par rapport à l'été, et à Rennes une différence de $5,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ est enregistrée entre les deux périodes. Durant la **campagne hivernale**, la **moyenne la plus élevée** est enregistrée au niveau de la **station urbaine de Rennes** ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) soit une différence de $1,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ par rapport à la station Rocabey ($13,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$), alors qu'à Brest ($12,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) l'écart est de $-1,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ avec la station réglementaire malouine.

Tableau 10 : Statistiques des mesures PM2,5 aux stations urbaines de fond de Brest et Rennes lors de l'étude

Concentrations PM2,5($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Campagne estivale		Campagne hivernale	
	PM2,5 Brest	PM2,5 Rennes	PM2,5 Brest	PM2,5 Rennes
Données horaires				
1 ^{er} quartile	4,5	4,4	6,5	6,3
Médiane	7,2	7,4	10,5	12,8
Moyenne	10,2	9,1	12,1	15,0
3 ^{ème} quartile	11,9	11,2	15,9	21,9
Maximum horaire	42,4	35,4	42,8	57,6
Données journalières				
Maximum journalier	37	29	26	37
Moyenne annuelle estimée				
	PM2,5 Brest	PM2,5 Rennes		
Moyenne annuelle estimée	11	12		

c) Synthèse de l'analyse des données de mesure PM2.5

Comparaison aux seuils de référence (réglementaire, seuil CE à atteindre en 2030 et recommandations OMS)

En moyenne journalière, la recommandation de l'OMS ainsi que la valeur seuil de la commission européenne à atteindre en 2030 ont été dépassées pour l'ensemble des sites de mesure durant les deux campagnes.

Quant aux moyennes annuelles estimées, pour les 4 sites, elles respectent le seuil réglementaire. Toutefois, les 4 points de mesure dépassent la valeur guide de l'OMS ainsi que la valeur seuil de la commission européenne à atteindre en 2030.

A noter que les moyennes annuelles estimées PM2,5 dans le cadre de cette étude sont légèrement surestimées puisque les 2 campagnes présentent des niveaux supérieurs à l'historique 2020-2025.

Comparaison saisonnière (campagne été – campagne hiver)

Les moyennes et les médianes obtenues pendant la période hivernale sont supérieures à celles de la campagne estivale. En effet, des écarts relatifs entre les médianes hivernale et estivale sont compris entre 45% à la station Rocabey et 113 % pour le site Ormeaux. De plus, les niveaux maximums horaires en PM2,5 sont plus élevés lors de la période froide. De même, la campagne hivernale présente plus de dépassement du seuil journalier du $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, pour les PM2,5, notamment au niveau des sites Vélodrome et Police. Ces plus fortes concentrations hivernales sont

cohérentes avec les émissions du chauffage résidentiel (notamment au bois) dans des conditions météorologiques souvent peu favorables à la dispersion des polluants avec un abaissement de la hauteur de couche de mélange atmosphérique.

Comparaison inter-sites

Ponctuellement, les maximums journaliers sont plus élevés au niveau des sites Vélodrome et Police comparés au 2 autres points de mesure. Le site Ormeaux présente une moyenne PM2,5 légèrement plus faible durant la campagne estivale par rapport aux 3 autres sites avec un écart relatif d'environ -20%. Comme pour les PM10, mi-septembre 2024, une influence ponctuelle des concentrations en PM2,5 au niveau de la station Rocabey, est constatée.

De façon générale, durant cette étude, les concentrations en PM2,5 mesurées sur les différents points de mesure de la ville de Saint-Malo sont homogènes (moins de 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de différence entre le site Ormeaux et le site Vélodrome). La moyenne annuelle estimée en PM2,5 pour les 3 sites du cœur urbain de Saint-Malo (Vélodrome, Police et la station Rocabey) est de 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Le site Ormeaux, se démarque de façon moins significative par rapport aux constats réalisés pour les PM10, avec un écart de -17% par rapport à la moyenne des 3 sites du centre urbain de Saint-Malo.

Comparaison aux autres stations du réseau breton

Les niveaux en PM2,5 mesurés aux stations urbaines de fond de Brest et de Rennes sont proches de ceux observés à la station de Saint-Malo avec des écarts de +/- 0,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en période estivale. L'augmentation des niveaux en PM2,5 est également constatée en période hivernale par rapport à la période estivale avec une variation plus marquée au niveau de la station urbaine de Rennes. Pendant la campagne, la moyenne annuelle estimée des 3 sites du cœur urbain de Saint-Malo (12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) est égale à celle de la station de Rennes et un écart de -8% est observé avec la station de Brest.

Ainsi les mesures réalisées en PM2,5 au niveau de Saint-Malo ne présentent pas de spécificités locales.

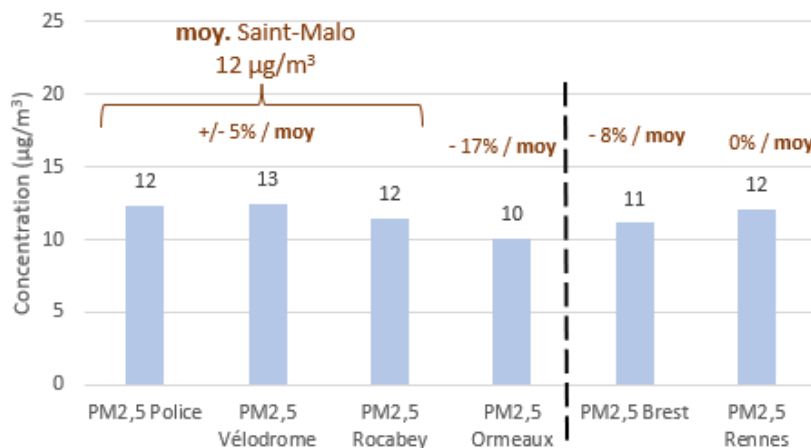


Figure 25 : Synthèse des moyennes annuelles PM2,5 estimées pendant la campagne

X. INFLUENCE DES NIVEAUX DE PM10

Dans cette partie, il s'agit d'analyser si les différents quartiers de Saint-Malo sont soumis à des influences similaires. Pour cela, les ratios PM_{2,5}/PM₁₀ vont être étudiés afin d'identifier des différences dans les répartitions des fractions massiques des particules fines entre les sites. De plus, l'analyse des roses de pollution par campagne va permettre de situer les secteurs influençant les concentrations en PM₁₀ des différents points de mesure.

X1. Ratio PM_{2,5}/PM₁₀

- Comparaison des ratios moyens PM_{2,5}/PM₁₀

Durant cette étude, la **station Rocabey présente le plus petit ratio moyen PM_{2,5}/PM₁₀** (0,6) des 4 sites de Saint-Malo cela traduit une plus faible contribution des PM_{2,5} dans les PM₁₀. Ainsi, cela confirme la contribution plus élevée de la fraction dite « grossière » des PM₁₀ (fraction des particules comprises entre 2,5 et 10 µm) (Figure 26). Un ratio PM_{2,5}/PM₁₀ similaire est observé à la station urbaine de Brest.

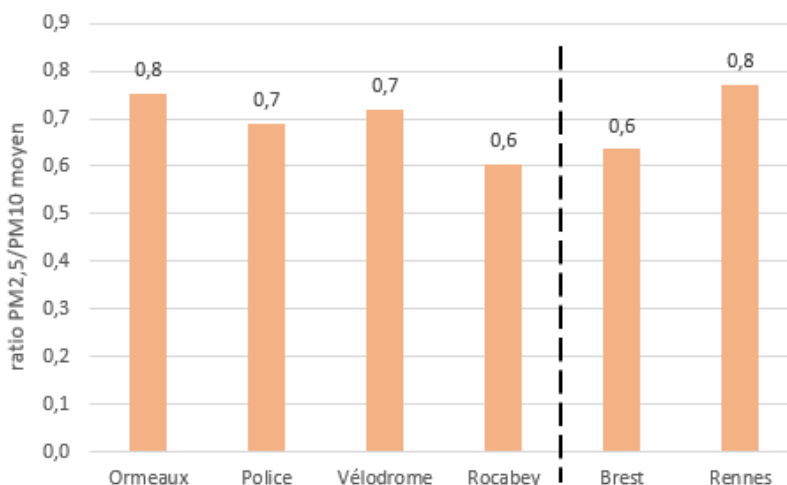


Figure 26 : Ratios PM_{2,5}/PM₁₀ moyens durant cette étude pour les 4 sites de Saint-Malo et les stations urbaines de Brest et Rennes

- Comparaison intersites des ratios journaliers

La Figure 27 présente la **variation journalière des ratios PM_{2,5}/PM₁₀** durant les 2 campagnes pour chacun des sites. Plus ce ratio est proche de 1, plus les PM₁₀ sont constituées de PM_{2,5} ce qui indique que les PM₁₀ proviennent principalement de sources anthropiques. A l'inverse plus ce ratio est faible, plus les PM₁₀ sont constituées de particules dites « grossières » c'est-à-dire comprises dans la fraction 2,5 µm à 10 µm, qui pourraient être liées à des sources naturelles, par exemple, les sels marins ou encore à des sources mixtes (naturelles et anthropiques) comme les poussières minérales. Pour l'ensemble des sites, les ratios moyens (Figure 27) sont plus élevés pendant la campagne hivernale (compris entre 0,7 et 0,8) que durant la campagne estivale (compris entre 0,5 et 0,7) ce qui

signifie que les plus fines particules ($<2,5 \mu\text{m}$) peuvent représenter entre 50% et 80% des PM10 suivant les saisons. Cela est cohérent avec les constats déjà réalisés en France (LCSQA, 2006).

La variabilité temporelle de la fraction massique de PM2,5 dans les PM10 est marquée. Pour les différents points de mesure, les évolutions journalières se suivent avec des valeurs de ratios fluctuant entre 0,3 et 0,8 pendant la période estivale et entre 0,4 et 1 pendant la période hivernale. Toutefois, la **station Rocabey présente des ratios journaliers plus faibles durant les 2 campagnes**, ce qui pourrait induire **l'influence d'une source de PM10 plus impactante au niveau de la station Rocabey**. De plus, ponctuellement pendant la campagne estivale notamment, des différences de ratio entre les différents sites sont constatés certains jours (exemple du 9 au 14 septembre 2024). Cette période a déjà été mise en avant dans la comparaison intersites (cf. partie IX1) aussi il est important d'approfondir l'analyse sur ces quelques jours.

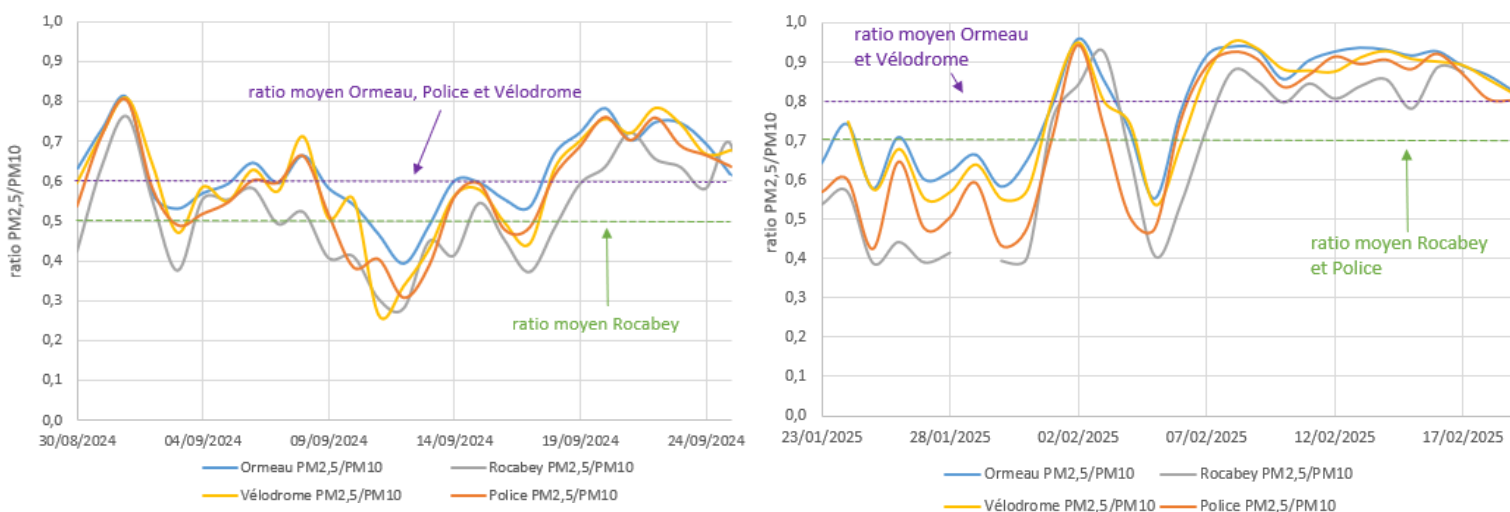


Figure 27 : Variation journalière des ratios PM2,5/PM10, campagne estivale (à gauche) et campagne hivernale (à droite)

En moyenne durant cette étude, le ratio PM2,5/PM10 de la station Rocabey (0,6) est le plus faible des 4 sites de Saint-Malo et similaire à celui enregistré au niveau de la station urbaine de Brest. La fraction dite « grossière » des particules PM10, comprises entre $2,5 \mu\text{m}$ et $10 \mu\text{m}$, est plus élevée pendant la période estivale. En effet, le ratio PM2,5/PM10 moyen est plus faible sur l'ensemble des sites lors de la campagne estivale. La variabilité temporelle de ce ratio pendant la campagne estivale est marquée avec des spécificités notamment à la mi-septembre traduisant des influences ponctuelles locales. Il est à noter que les rapports journaliers PM2,5/PM10 sont plus faibles au niveau de la station Rocabey, ce qui signifie que les niveaux de PM10 sont plus élevés.

X2. Roses de pollution PM10

La **rose de pollution** permet de localiser les différences de concentrations d'un polluant (échelle des couleurs) en fonction de la direction du vent et de la force du vent (cercles) (cf. aide pour la lecture d'une rose de pollution en annexe XVII5). Un pas de temps horaire a été exploité afin d'étudier un lien potentiel entre ces différents paramètres. Les données Météo France (vitesse et direction de vent) de la station Dinard ont été utilisées. L'analyse de ces roses de pollution est à prendre avec précautions puisque les données météorologiques sont celles observées à Dinard et non au niveau des différents points de mesure.



Figure 28 : Roses de pollution PM10 campagne estivale corrigées

La Figure 28 représente les roses de pollution de PM10 durant la campagne estivale au niveau des 4 points de mesure, sans les 3 jours (18 au 20 septembre) influencés par l'épisode de pollution particulière lié à un import de particules fines du Nord-Est de l'Europe (roses des pollutions PM10 dites 'corrigées'). Cette modification des données a été réalisée volontairement afin de s'affranchir de l'influence nord-est en PM10 liée à l'épisode de pollution. Pour information, les roses de pollution PM10 brutes, pour chacun des 4 sites, sont présentées en annexe XVII6.

Il est constaté les plus fortes concentrations en PM10 (proches de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$) pour la station Rocabey et le site Vélodrome par vent supérieur à 8 m/s de nord-ouest. Ainsi, **une influence maritime est constatée pour ces 2 sites**. Au nord-ouest du site vélodrome se situe le port, il est donc possible que des activités portuaires contribuent également à l'augmentation des concentrations en PM10 pour

ce site. Au niveau du **site Police**, les concentrations maximales sont moins fortes (environ $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et l'influence est plutôt orientée ouest, nord-ouest avec des vitesses proches de 6 m/s ce qui peut à la fois venir de la **mer ou encore du port**. A noter qu'une légère influence d'est, en provenance de la ZI, reste visible notamment au niveau du site de Vélodrome. Comme déjà constaté, les concentrations mesurées en PM10 au niveau du site Ormeaux sont plus faibles que pour les 3 autres points de mesure et la rose de pollution confirme ce constat.

La Figure 29 présente les **roses de pollution PM10 pour les différents sites durant la campagne hivernale**. La rose de pollution de Rocabey se démarque avec les plus fortes concentrations moyennes, mesurées par **vent fort** (proche de 12 m/s) d'**ouest**. Une **influence maritime** est présente pour cette station et l'analyse de la composition chimique va permettre de confirmer ce constat. Les sites Vélodrome et Police ont des roses de pollution similaires avec une influence d'ouest par vent supérieur à 10 m/s et d'est par vent de vitesse plus faible (entre 2 et 6 m/s). La rose de pollution PM10 au niveau du site Ormeaux est proche des 2 sites Vélodrome et Police avec des concentrations plus faibles. Les concentrations en PM10 issues du secteur est-sud-est sont plus élevées durant la campagne hivernale comparée à la campagne estivale pour les 4 sites de l'étude.

Ainsi à l'exception d'une influence maritime plus marquée pour la station Rocabey, les 3 autres sites présentent des roses de pollution PM10 semblables traduisant donc des influences identiques au niveau de la ville de Saint-Malo lors de la campagne hivernale. La rose de pollution de la station Rocabey et l'influence marquée d'ouest s'explique par les niveaux mesurés en PM10 lors de la journée du 28 janvier par vents forts (entre 6 et 12 m/s) d'ouest porteurs d'embruns marins.



Figure 29 : Roses de pollution PM10 campagne hivernale

Les **roses de pollution PM2,5** pour chacune des campagnes sont présentées en annexe (XVII7). Elles traduisent l'homogénéité des mesures de cette fraction des PM au niveau de la ville de Saint-Malo. En effet, les roses PM2,5 sont similaires pour l'ensemble des sites avec une influence de nord-est visible en période estivale en lien avec l'épisode de pollution de la mi-septembre 2024 et une influence d'est lors de la campagne hivernale.

A noter que les roses de pollution PM2,5 sans l'épisode de pollution particulaire interrégional (19 – 20 septembre) sont également présentées et cela permet de confirmer une homogénéité des niveaux en PM2,5 au sein de la ville de Saint-Malo avec des concentrations légèrement plus faibles pour le site Ormeaux, qui s'explique par sa localisation.

Pour l'analyse des roses de pollution PM10, le jeu de données de la campagne estivale a été traité afin de ne pas considérer l'import de PM10 issu du secteur nord-est lié à l'épisode de pollution aux particules fines de la mi-septembre. Ainsi, l'influence maritime est constatée notamment pour les 3 sites les plus proches de la côte (station Rocabey, site Police et Vélodrome). A noter que l'influence ouest-nord-ouest peut également être liée aux activités portuaires pour les sites Police et Vélodrome.

Durant la campagne hivernale, l'influence du littoral est plus particulièrement marquée par vent fort (> 8 m/s) au niveau de la station réglementaire Rocabey. Durant cette dernière, les niveaux sont plus élevés par vent issu du secteur est-sud-est pour l'ensemble des sites.

En conclusion, globalement, les différents quartiers sont donc soumis à des influences similaires avec cependant une influence maritime ponctuelle plus marquée au niveau de la station Rocabey lors de cette campagne.

XI. RESULTATS – ANALYSE DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES PARTICULES

L'analyse des résultats de la composition chimique des particules fines a été réalisée afin de chercher les sources pouvant expliquer les variations de concentrations en PM10.

Chaque campagne comptait 27 prélèvements journaliers par site soit un total de 108 filtres collectés par campagne. Une sélection de **60 filtres par campagne à analyser** a été réalisée sur la base des critères présentés ci-dessous.

Les résultats obtenus sont comparés aux résultats de l'analyse de la composition chimique PM10 réalisée dans le cadre de l'étude sur l'état initial de la qualité de des ZAC CDG et Houssaye (cf. annexe XVII2) ainsi qu'au résultats de l'étude Brest Port (Air Breizh, 2024).

XI1. Protocole de sélection des filtres à analyser

Chaque site a été équipé d'un préleveur DA80 afin de collecter les PM10 pendant une durée de 24h (de minuit à minuit). Durant chacune des campagnes, 108 prélèvements ont été planifiés, il y a eu 3 prélèvements non réalisés au niveau du site Police pendant la campagne estivale et 4 prélèvements au niveau de la station Rocabey lors de la campagne hivernale.

Au total ce sont 60 filtres (environ 15 filtres par site) par campagne qui ont été sélectionnés et envoyés au laboratoire pour analyse. Le choix des filtres pour l'analyse de la composition chimique des particules PM10 a été réalisé dans le but de répondre aux objectifs suivants :

- **Comparaison de la composition chimique moyenne des particules entre les sites** afin d'identifier les différences entre les quartiers de Saint-Malo,
- **Etudier la composition chimique journalière pour comprendre les familles de sources** qui influencent lors des variations ponctuelles de concentrations en PM10 entre les sites malouins, notamment la fraction 2,5 μm à 10 μm

Pour répondre à ces objectifs, les filtres ont été sélectionnés suivant les niveaux de particules PM10 mesurés entre les sites malouins et en comparaison avec d'autres stations du réseau breton, leur rose de pollution PM10 et les variations des concentrations journalières en ammoniac. Le détail des filtres sélectionnés est présenté en annexe (XVII8).

Ainsi durant la campagne estivale, les jours sélectionnés sont principalement concernés par des secteurs influençant de sud-sud-est, sud-ouest et ouest-nord-ouest.

Lors de la campagne hivernale, les filtres sélectionnés pour l'ensemble des sites sont concernés par niveaux en PM10 principalement influencés de secteur sud-est et sud-ouest. Le secteur nord-ouest n'a pas pu être sélectionné car le jour concerné par cette influence ne présentait pas de prélèvement au niveau de la station Rocabey.

XI2. Traitement bilan de masse

La composition des particules varie dans l'espace et dans le temps, il existe tout de même des composés dits « majoritaires » ; les **particules carbonées** (matière organique - OM et carbone élémentaire - EC), les **espèces inorganiques secondaires** (nssSO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+), les **sels de mer** et les **poussières minérales**. Ces composés peuvent être reliés à des familles de sources et permettent d'estimer l'impact de ces sources sur la masse totale de particules mesurées. Certaines de ces espèces sont directement mesurées par analyse chimique en laboratoire (EC, NO_3^- ...) et d'autres (dust - poussières minérales, sels de mer) sont calculés à partir de facteurs issus de la littérature et déjà utilisés dans des études menées par Air Breizh (Air Breizh, 2024). La somme des différents composés chimiques (mesurés et estimés) peut ensuite être comparée à la concentration massique PM10 mesurée par analyseur automatique (annexe XVII8).

$$\text{PM10 reconstituées} = [\text{EC}] + [\text{OM}] + [\text{nssSO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-] + [\text{NH}_4^+] + [\text{sels marins}] + [\text{poussières minérales}]$$

Avec

La matière organique : $[\text{OM}] = 1,75 \times [\text{OC}]$

Les ions sulfates non marins : $[\text{nssSO}_4^{2-}] = [\text{SO}_4^{2-}] - 0,251 \times [\text{Na}^+]$

Les poussières minérales = $([\text{Ca}^{2+}] - 0,039 \times [\text{Na}^+]) \times 8$

Les embruns marins : $[\text{sels marins}] = 3 \times [\text{Na}^+]$

Lorsque l'on compare la somme des espèces chimiques analysées en laboratoire à la concentration en PM10 mesurée (par analyseur), il apparaît une différence de concentration, appelée « **part non déterminée** ». Cette part peut être due :

- aux composés non analysés (exemple des métaux lourds),
- aux incertitudes sur la masse mesurée par la méthode en continu (Fidas ou BAM),
- aux incertitudes liées au choix des facteurs de conversion (exemple du facteur de 1.75 entre le carbone organique (OC) et la matière organique (OM)),
- à la quantité d'eau présente dans les particules mais non prise en compte lors de l'analyse chimique alors qu'elle est incluse dans les mesures de masse totale,
- aux composés semi-volatils mesurés par les analyseurs automatiques mais qui ne sont plus présents sur les filtres au laboratoire (comme une partie du nitrate d'ammonium).

XI3. Résultats des analyses

Les résultats de la composition chimique sont détaillés à différentes échelles (en moyenne et par campagne) dans cette partie.

a) Composition moyenne

En moyenne (Figure 30), la part indéterminée représente entre 1% (site Ormeaux) et 26% (station Rocabey) des particules PM10. La faible part indéterminée constatée au niveau du site Ormeaux peut s'expliquer du fait de la faible concentration massique en PM10. Ces pourcentages sont comparables à ceux rencontrés dans le cadre de l'étude sur la caractérisation des particules, menée en 2021, sur la zone littorale des Hauts-de-France et de la Normandie (Atmo Normandie et Atmo Hauts-de-France, 2022) où les pourcentages de masse inconnue représentent de 25% à 49 % des PM10 mesurées.

La composition chimique, pour les 4 points de mesure, moyennée sur l'ensemble des prélèvements PM10 analysés, présente des proportions semblables pour les différentes espèces chimiques (Figure 30). Ainsi, la **matière organique est le composé majoritaire sur l'ensemble des sites de la ville, devant les sels marins**. La part des ions inorganiques est proche entre les 4 points de prélèvement : 12 – 18% de nitrate, 5-7% de sulfate non marins et 6-8% d'ammonium.

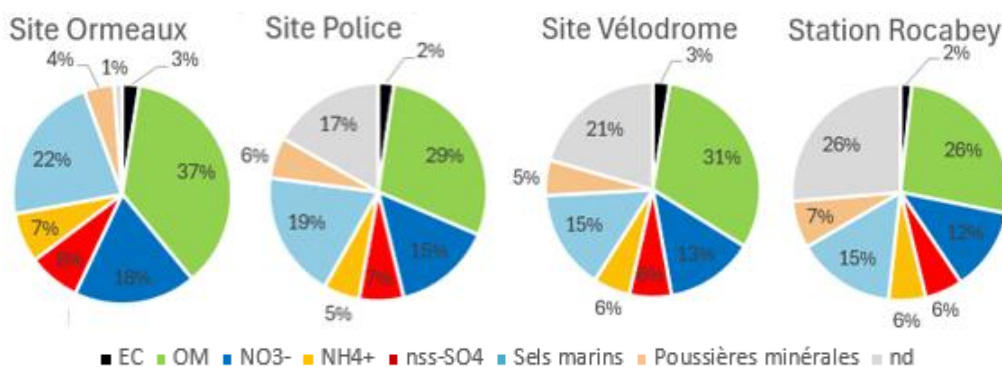


Figure 30 : Composition chimique moyenne (campagne estivale et hivernale) des 4 sites malouins

Les concentrations moyennes de l'ensemble des prélèvements réalisés et analysés durant cette étude sont présentées dans le Tableau 11. Le site Ormeaux présente les plus fortes contributions pour certaines espèces (matière organique – 37%, sels marins – 22%, nitrate – 18%, ammonium-7%) tout en présentant les plus faibles concentrations mesurées pour ces composés. Cela s'explique par une plus petite moyenne en PM10 (13 µg/m³) et ainsi une part indéterminée presque nulle.

Tableau 11 : Concentration moyenne (campagne estivale et hivernale) des différents constituants pour les 4 sites

Concentration moyenne (µg/m³)	PM10	EC	OM	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	nss-SO ₄ ²⁻	Sels marins	Poussières minérales
Site Ormeaux	13,1	0,33	4,80	2,38	1,01	0,96	2,92	0,59
Site Police	18,3	0,43	5,33	2,70	1,21	0,98	3,46	1,12
Site Vélodrome	17,2	0,44	5,40	2,31	1,09	0,96	2,59	0,92
Station Rocabey	20,1	0,34	5,32	2,50	1,13	1,11	2,97	1,43

A titre indicatif lors de la campagne menée à la station Rocabey en période hivernale sur la mesure des PM10 et leur composition chimique de 2018 à 2019 (Air Breizh, 2020), les sels de mers étaient le composé majoritaire avec 27% des PM10 (6 µg/m³). La moyenne en matière organique était de 4,7

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ (soit 22% des PM10), les espèces inorganiques (nitrate – $2,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sulfate – $0,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et ammonium – $0,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) représentaient 19% des PM10, les poussières minérales constituaient 6% des PM10 (soit $1,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et le carbone élémentaire contribuait à 2% des PM10 ($0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

b) Campagne estivale

Durant la **campagne estivale**, la part non déterminée représente jusqu'à 32 % des PM10 au niveau de la station Rocabey. La **matière organique est le composé dominant** pour tous les sites et représente de 23% (station Rocabey) à 36% des PM10 (site Ormeaux). La **proportion des sels marins est comprise entre 32% pour le site Ormeaux et 19% au niveau du site Vélo-drome**. La contribution de la matière organique et des sels est plus élevée au niveau du site Ormeaux en lien avec la concentration plus faible en PM10. Les poussières minérales sont similaires sur les 4 sites de 7 à 10% des PM10 mesurées : elles sont plus élevées à la station Rocabey.

A titre indicatif, les proportions observées lors de cette période sont proches de celles rencontrées dans le cadre de la campagne de Brest (Air Breizh, 2024), avec une part de poussières minérales plus forte comparée à celle de la station Macé. Les résultats de la spéciation chimique PM10 réalisée durant 8 jours en période estivale (juin 2023) notamment au niveau de la station Macé., montrent une part majoritaire de matière organique (31%) et la présence de sels marins (25%), de composés inorganiques (21%) et des poussières minérales (3%).

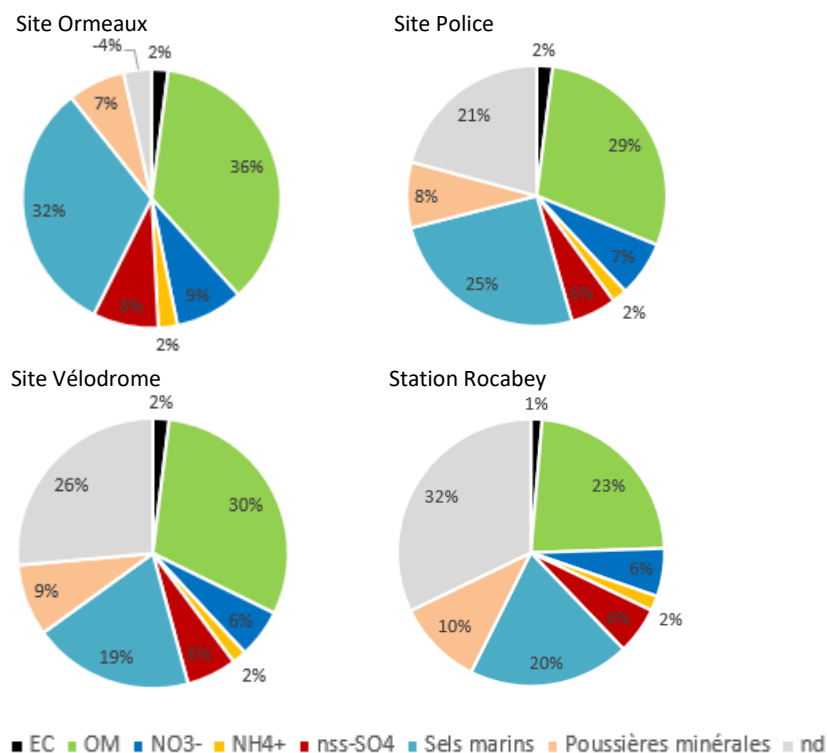


Figure 31 : Composition chimique moyenne des filtres analysés - campagne estivale

Une synthèse des concentrations moyennes journalières pour chacune des espèces est présentée ci-dessous (Tableau 12). Certains composés ont des concentrations moyennes très proches entre les sites (exemple de la matière organique avec 0,5 µg/m³ d'écart). La **station Rocabey présente 4 des plus fortes concentrations des composants majeurs (nitrates, ammonium, sulfates non marins et poussières minérales)**. Au niveau du site Police, les concentrations moyennes en carbone élémentaire (0,3 µg/m³) et en sels marins (3,8 µg/m³) sont les plus élevées des sites considérés. Notons que la concentration en carbone élémentaire reste faible en période estivale. La moyenne en sels de mer mesurée à Rocabey (3,71 µg/m³) est proche du site Police traduisant une **influence maritime similaire pour les sels de mer à Rocabey et à Police**.

Tableau 12 : Concentration moyenne des différents constituants pour les 4 sites – campagne estivale

Concentration moyenne (µg/m ³)	PM10	EC	OM	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	nss-SO ₄ ²⁻	Sels marins	Poussières minérales
Site Ormeaux	9,9	0,22	3,86	0,90	0,26	0,87	3,39	0,76
Site Police	15,0	0,30	4,37	1,03	0,28	0,85	3,80	1,22
Site Vélodrome	14,4	0,28	4,39	0,84	0,25	0,86	2,77	1,24
Station Rocabey	18,9	0,25	4,38	1,10	0,34	1,08	3,71	1,98

c) Campagne hivernale

Une **variation saisonnière est marquée** puisque lors de la campagne hivernale, les résultats par site sont différents de ceux obtenus durant la campagne estivale. En effet, **après la matière organique, le deuxième composé est le nitrate**, variant entre 19% et 23%. Les sels de mer représentent respectivement 10%, 12% à la station Rocabey, au site Vélodrome et 15 % aux sites Ormeaux et Police. **L'influence maritime moins marquée dans les concentrations en PM10 s'expliquent par peu de vent de nord-ouest durant la campagne hivernale**. Si les sulfates non marins présentent des contributions équivalentes (5 - 6%) à celles rencontrées durant la campagne estivale (6 - 8%), **l'ammonium contribue de façon bien plus significative** à hauteur de 9 – 11% des particules PM10 mesurées sur chacun des sites. Quant à la contribution des poussières minérales comprise entre 3 et 5%, elle est inférieure à celle constatée lors de la campagne estivale. A noter que les sites Police et Vélodrome ont des répartitions par espèce chimique très similaire.

Pour information, dans le cadre de la campagne de Brest (Air Breizh, 2024), la spéciation chimique PM10 réalisée durant 6 jours en période hivernale (janvier 2023) au niveau de la station urbaine de fond de Macé révèle une forte contribution des sels de mer (43%) devant la matière organique (19%) et les ions inorganiques (14%). Cela illustre, une contribution relativement faible des sels de mer à Saint-Malo, lors de cette période hivernale, en raison des conditions de vent (peu de vent porteur d'embruns marins).

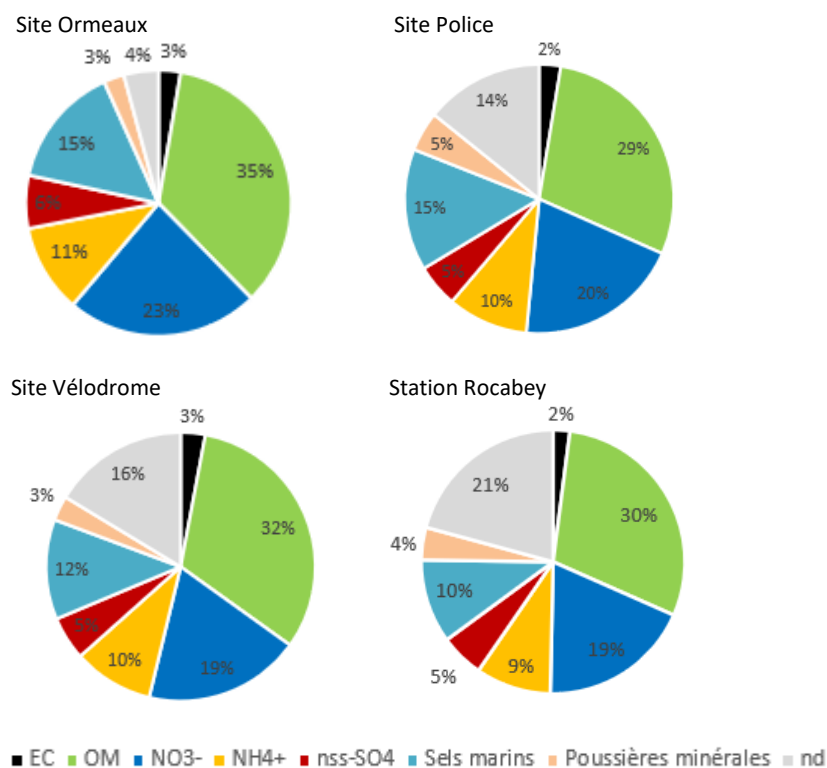


Figure 32 : Composition chimique moyenne des PM10 - campagne hivernale

Les concentrations moyennes mesurées durant la campagne hivernale sont présentées dans le Tableau 13. A l'exception des sels marins et des poussières minérales (peu de vents issus du nord-ouest), les composés ont des **concentrations moyennes supérieures durant la campagne hivernale**. C'est le **site Police** qui présente les plus fortes concentrations pour 5 des composés considérés. Le site Vélodrome est celui qui présente la plus forte concentration moyenne en carbone élémentaire ($0,59 \mu\text{g}/\text{m}^3$) proche de celle du site Police ($0,55 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Lors de la campagne chauffage bois à Rennes Métropole (Air Breizh, 2025), menée en janvier 2024, la concentration en EC était comprise entre $0,4$ et $0,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tableau 13 : Concentration moyenne des différents constituants pour les 4 sites – campagne hivernale

Concentration moyenne ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10	EC	OM	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	nss-SO ₄ ²⁻	Sels marins	Poussières minérales
Site Ormeaux	16,4	0,44	5,74	3,85	1,77	1,06	2,45	0,41
Site Police	21,4	0,55	6,22	4,26	2,08	1,10	3,13	1,02
Site Vélodrome	20,1	0,59	6,41	3,78	1,93	1,05	2,41	0,60
Station Rocabey	21,4	0,44	6,31	4,00	1,98	1,14	2,20	0,85

Composition par saison

De façon générale, la matière organique est le composé dominant dans les PM10 pour tous les sites avec des concentrations plus fortes en période hivernale.

La variation saisonnière de la composition chimique des PM10 pour les 4 sites malouins est constatée. La composition chimique durant la campagne estivale se caractérise par des proportions en sels marins plus marquées que durant la campagne hivernale (concentrations relativement proches). Les concentrations en PM10 plus élevées lors de cette période et les conditions de vent avec un secteur nord-ouest non représenté en janvier/février expliquent ce constat.

La campagne hivernale présente, elle, des composés inorganiques en plus fortes concentrations et proportions dans les PM10. Cela traduit la présence plus importante de nitrate d'ammonium et de sulfate d'ammonium en période hivernale par rapport à la période estivale (températures plus élevées favorables à la volatilisation du nitrate d'ammonium). En effet, les conditions météorologiques estivales (températures élevées) sont peu favorables à la présence du nitrate d'ammonium du fait de son caractère semi-volatile (passe en phase gazeuse). A l'inverse, le sulfate d'ammonium est stable en phase particulaire (d'où sa contribution relativement stable entre les 2 périodes). Les poussières minérales ont des contributions et des concentrations plus faibles lors de la campagne hivernale, les conditions météorologiques plus humides sont moins favorables à l'érosion éolienne.

Composition par site

Les 4 sites ont des contributions similaires pour chacun des composés chimiques dans les PM10 pour chaque campagne. Notons quelques spécificités par site.

Le site Police est celui qui présente les plus fortes concentrations en sels marins de l'étude et la contribution la plus forte durant la campagne estivale induisant une influence maritime similaire à celle de la station Rocabey.

Le site Ormeaux est celui qui présente la part non déterminée la plus faible de cette étude (2% en moyenne) et une part de matière organique la plus élevée des 4 sites (35%).

Au niveau du site Vélodrome, les plus fortes concentrations en matière organique et carbone élémentaire sont constatées en période hivernale ce qui implique une influence des phénomènes de combustion. Cela est cohérent avec l'environnement de ce site : densité de population plus élevée, axes routiers.

En période estivale, la station Rocabey est le site le plus impacté par les poussières minérales dans les PM10 en contribution et en concentration. Sur l'ensemble des 3 sites, la part indéterminée varie entre 17% et 26%. Notons également que la station Rocabey présente une faible contribution et concentration en carbone élémentaire lors des 2 campagnes ce qui indique un faible impact des sources de combustion (chauffage résidentiel et trafic routier).

XI4. Analyse par constituant

Les résultats du suivi de la composition journalière des PM10 pour chacun des sites sont présentés en annexe (XVII11) pour chacune des campagnes. Il est constaté de forte variation aussi bien en concentration qu'en contribution des différents composés. La campagne hivernale se caractérise par

des concentrations en particules PM10, fin janvier, plus faibles et fortement impactées par les sels de mers pour tous les sites. A partir de mi-février, les concentrations en particules augmentent (moyennes journalières supérieures à $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ce qui s'explique par des niveaux en matière organique et en espèces inorganiques plus élevées. Cela s'explique en partie par l'abaissement de la hauteur de la couche de mélange atmosphérique, propice à l'augmentation des concentrations des composantes majeures des PM10.

Une analyse de l'évolution des concentrations par composant est réalisée dans cette partie. Les variations journalières des différents composés sont présentées ci-dessous. L'analyse journalière va permettre de mettre en évidence des jours qui présentent des différences entre les sites. Pour cela les jours spécifiques sont traités en annexe avec des fiches qui présentent les variations horaires des concentrations en PM, NH_3 , la direction et vitesse de vent, les roses de pollution journalière PM10 et NH_3 et les concentrations/contributions des différents composés chimiques.

a) Carbone élémentaire (EC) / Matière organique (OM)

Le carbone élémentaire (EC) est directement émis dans l'atmosphère par la combustion incomplète de combustibles (bois, hydrocarbures...). La matière organique peut être émise directement sous forme particulaire par des sources naturelles ou anthropiques ou produit à partir de la réaction entre des précurseurs gazeux. Elle est calculée à partir de carbone organique (OC) mesuré par analyse en appliquant un facteur tiré de la bibliographie.

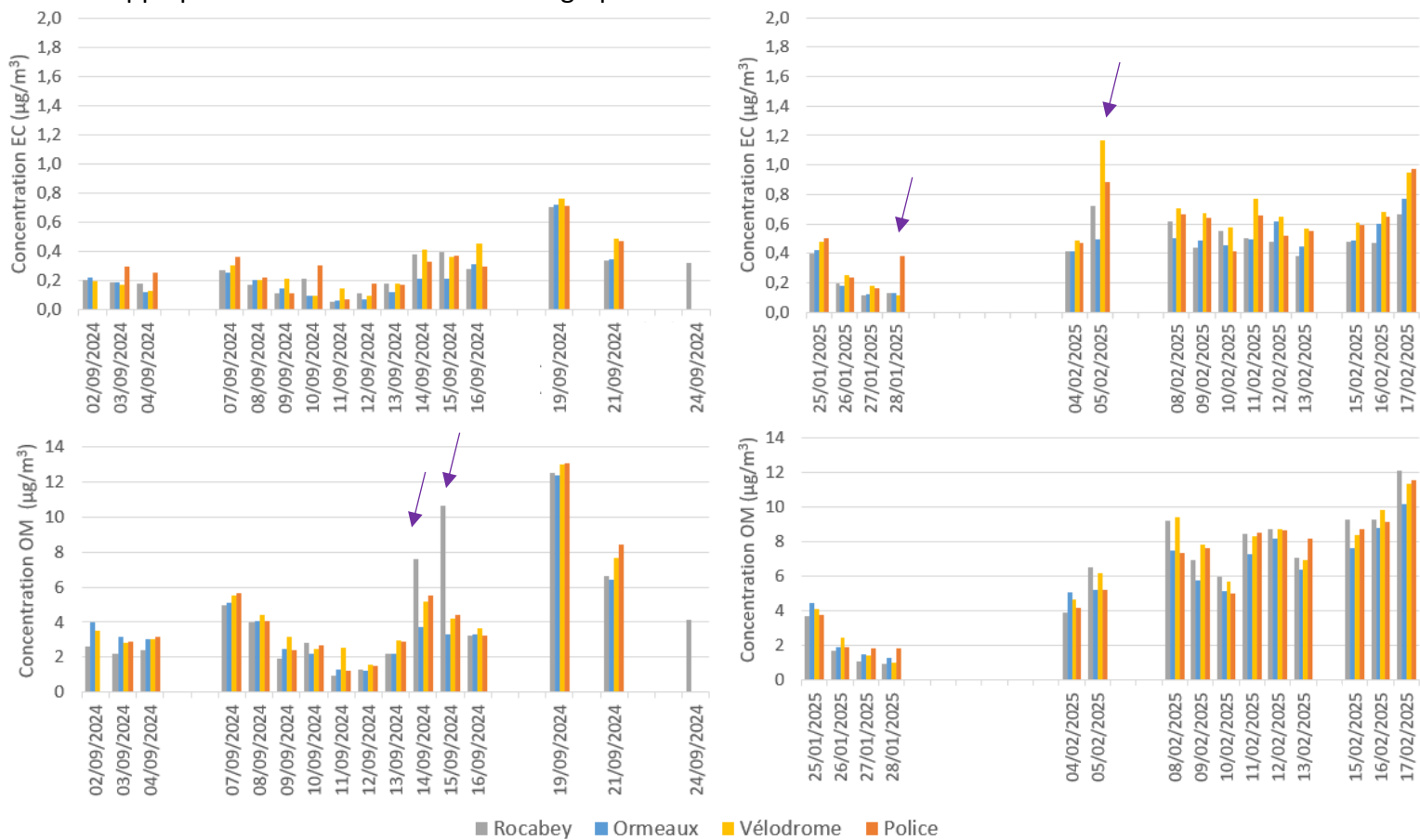


Figure 33 : Evolution des concentrations moyennes journalières du carbone élémentaire (EC) et de la matière organique (OM) pendant la campagne estivale (gauche) et hivernale (droite)

Au **niveau de la station Rocabey**, quelques jours se distinguent, notamment lors de la **campagne estivale (14 et 15 septembre)**, avec des variations marquées pour la matière organique non corrélées au carbone élémentaire. A l'inverse, le **5 février le site Vélodrome** se démarque en carbone élémentaire alors que la matière organique est proche de celles des 3 autres sites. Cela indique une influence locale au site vélodrome liée potentiellement au trafic routier par vent de sud/sud-est par exemple⁶. En effet, lors de la campagne, plusieurs jours présentent des concentrations plus fortes en EC au niveau du site Vélodrome. Notons également le 28 janvier, une concentration en carbone élémentaire proche de 0,4 µg/m³ mesurée au niveau du site Police alors que les 3 autres

⁶ Site vélodrome distant de 100 mètres environ de la rue Pierre de Coubertin et 40 mètres de la rue Laënnec.

concentrations sont de l'ordre de $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Une influence ponctuelle du trafic routier peut également expliquer cette différence intersites. La plus forte concentration en matière organique est mesurée pour les 4 sites le 19 septembre 2024, lors de l'épisode de pollution aux PM10.

- Ratio OC/EC

L'analyse du ratio OC/EC est une méthode pour évaluer le carbone organique secondaire. Les différents graphiques de corrélation sont tracés en annexe 0. Pour des stations trafic, des études ont montré des ratios OC/EC inférieurs à 2 et compris entre 2 et 9 pour des sites urbains de fond (Atmo Normandie et Atmo Hauts-de-France, 2022). Ainsi plus ce ratio est élevé, moins l'influence des phénomènes de combustion est marquée.

Lors de cette étude, le rapport OC/EC varie entre 5,2 et 9 pour les 4 sites (cf. 0). Il est plus fort pour la station Rocabey et le site Ormeaux (9 – 7,5), et plus faible (6,5 - 5,2) pour les sites Police et Vélodrome.

L'augmentation du rapport OC/EC peut être lié à l'abondance des composés organiques secondaires qui peuvent être transportées, à une contribution plus importante de la biomasse ou encore à des émissions biogéniques.

Ainsi, les ratios au niveau des sites Police et Vélodrome peuvent s'expliquer par l'influence du trafic routier et éventuellement maritime dans l'environnement proche des points de mesure. Ces 2 sites présentent ponctuellement des concentrations plus fortes en carbone élémentaire.

Le site Ormeaux peut être soumis à plus d'influence des émissions biogéniques en raison de sa localisation (zone la moins urbanisée avec la densité de population la plus faible). Pour la station Rocabey, les 14 et 15 septembre présentent des ratios élevés. Cette période a déjà été identifiée comme présentant des concentrations en PM10 et PM2,5 supérieures à Rocabey par rapport aux autres sites (partie IX1 et IX2). L'analyse de ces 2 jours est réalisée en annexe.

Les concentrations en matière organique et en carbone élémentaire sont plus élevées en fin de période hivernale. Ponctuellement, une influence trafic (routier ou maritime) semble plus marquée au niveau du site Vélodrome avec des concentrations journalières plus élevées en période hivernale (exemple du 5 février). Quant à la station Rocabey, elle présente le ration OC/EC le plus élevé ce qui traduit une faible influence des phénomènes de combustion.

b) Sels marins

Ces particules sont principalement composées de Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} et de Ca^{2+} . Elles peuvent se transformer pendant le transport, notamment sous l'effet de mélange avec les émissions anthropiques.

Les **concentrations en sels de mer sont variables au fil des jours** (Figure 34). Lors de la campagne estivale, les niveaux sont proches entre les sites. Lors des 9 et 11 septembre des vents de nord-ouest et ouest porteurs d'embruns marins peuvent expliquer les niveaux observés à la station Rocabey. L'analyse journalière spécifique de ces jours est réalisée en annexe.

Lors de la campagne hivernale, peu de variation sont constatées entre les sites malouins et d'autre part, l'influence maritime est quasi-nulle à partir du 8 février. Ces faibles concentrations s'expliquent

par une faible fréquence voire l'absence des vents issus de nord-ouest lors de la campagne hivernale. Toutefois, le site Police présente des concentrations légèrement plus élevées que les autres sites (avec environ $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ d'écart) lors de la fin du mois de janvier (par exemple le 25 par vent de sud-

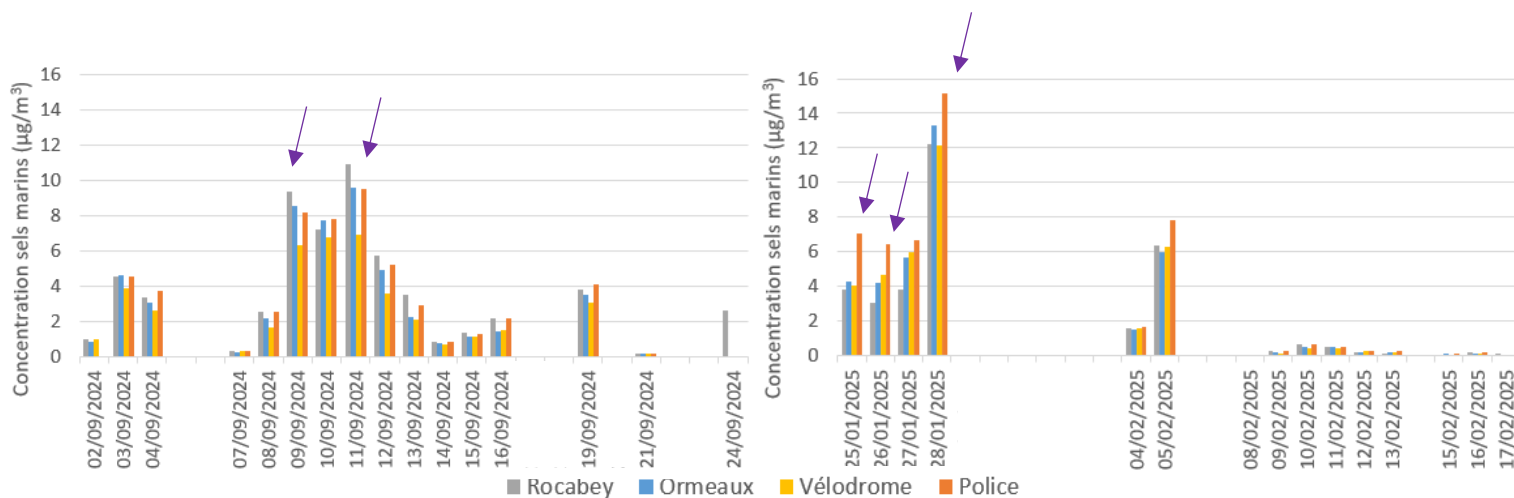


Figure 34 : Evolution des concentrations moyennes journalières des sels marins pendant la campagne estivale (gauche) et hivernale (droite)

ouest, le 26 janvier par vent de sud et par vent d'ouest le 28 janvier).

c) Composés inorganiques

Au sein des particules atmosphériques le nitrate et le sulfate sont majoritairement associés à l'ammonium respectivement sous la forme de nitrate d'ammonium (NH_4NO_3) et de sulfate d'ammonium (NH_4HSO_4 ou $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$). La formation de ces composés dépend des précurseurs gazeux (NH_3 , NO_x et SO_2) et également des conditions météorologiques. En effet, le nitrate d'ammonium est une espèce semi-volatile en équilibre entre la phase gazeuse et la phase particulaire et sa répartition entre les phases est fonction de la température et de l'humidité (LCSQA, 2020). Quant au sulfate d'ammonium, il n'est pas semi-volatile ainsi il est stable en phase particulaire et peut être transporté sur de longues distances. Les méthodes d'analyse permettent de mesurer séparément les concentrations en nitrate (NO_3^-), ammonium (NH_4^+) et sulfate (SO_4^{2-}). Le sulfate peut être d'origine marine c'est pourquoi le nss SO_4^{2-} (sulfate non marin) est considéré par la suite comme étant un composé inorganique secondaire.

La Figure 35 présente l'évolution des concentrations en espèces inorganiques secondaires mesurées dans les PM10 lors des 2 campagnes. Il est constaté des concentrations plus fortes lors de la campagne hivernale notamment à partir de la mi-février (surtout pour le nitrate et l'ammonium), période qui coïncide avec des précipitations nulles et des conditions favorables à la formation du nitrate d'ammonium. A noter que quelques variations pour les journées du 11 au 13 février 2025 sont constatées entre les sites.

Les concentrations en nitrate et en ammonium sont plus faibles durant la campagne estivale, en lien avec le caractère semi-volatile du nitrate d'ammonium. Par exemple le 14 septembre (journée déjà identifiée dans la partie VIII), la concentration en sulfates non marins au niveau de la station Rocabey est supérieure d'un facteur 6 à celles des autres sites. De plus, l'épisode de pollution particulière au niveau du littoral de la Manche est visible le 19 septembre à Saint-Malo avec des concentrations plus élevées pour les espèces inorganiques et la présence de sulfates traduit l'import de particules composées notamment de sulfate d'ammonium.

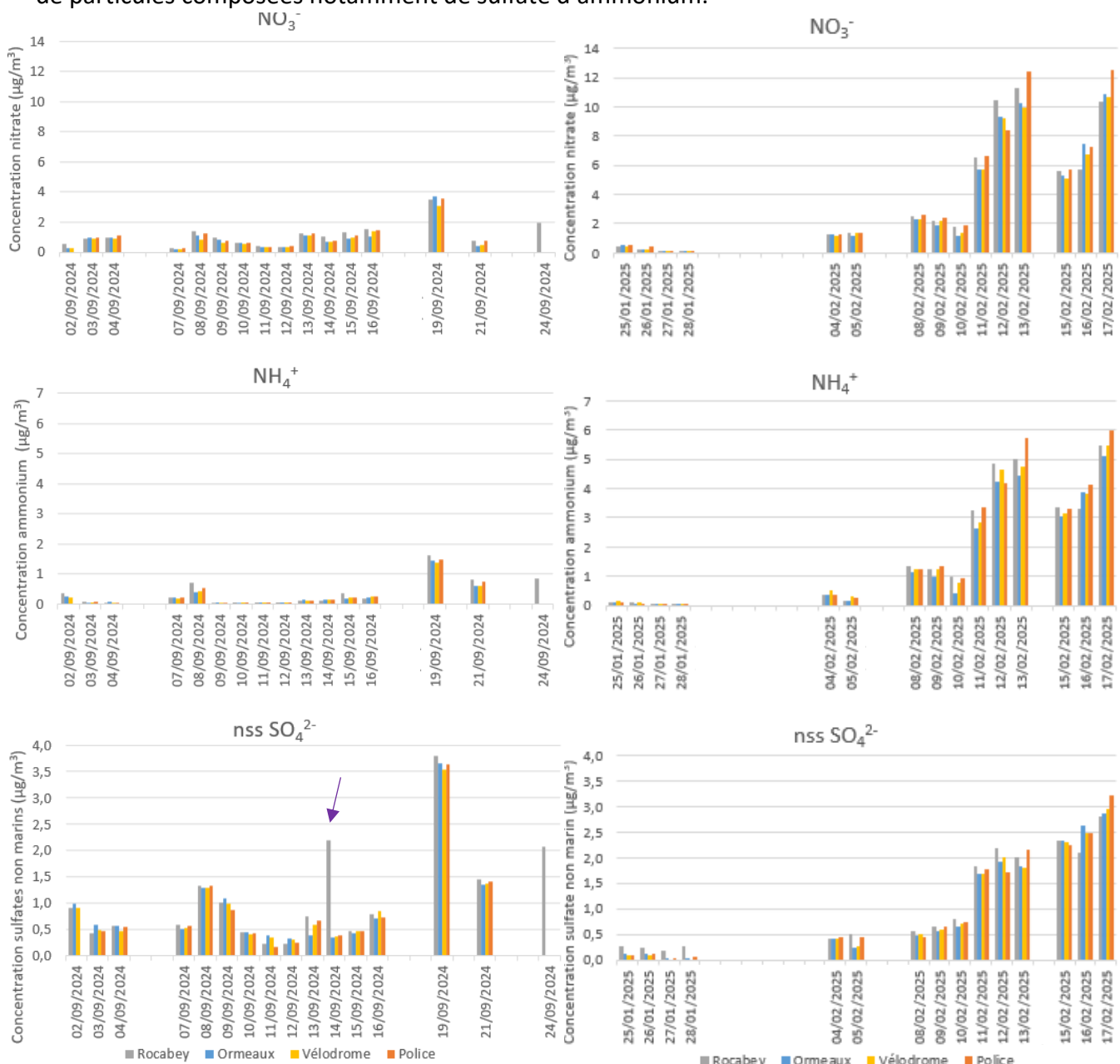


Figure 35 : Evolution des concentrations journalières en composés inorganiques secondaires lors de la campagne estivale (droite) et hivernale (gauche)

d) Poussières minérales

Les concentrations estimées en poussières minérales sont plus élevées durant la campagne estivale avec un maximum journalier atteint le 14 septembre au niveau de la station Rocabey ($11 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Sans vent issu de nord-ouest lors de cette journée, la source ne semble pas être d'origine naturelle (tels que les sables). De même, les 10 et 11 septembre sont observés les niveaux maximums en poussières minérales respectivement pour les sites Police, Vélodrome. Ainsi une influence des activités portuaires (par exemple des activités de déchargement) est probable le 10 septembre au niveau du site Police et de la station Rocabey par vents de sud-ouest. La plus forte concentration au niveau du site Vélodrome, le 11 septembre peut s'expliquer également par des activités portuaires par vent de nord-ouest (seul site concerné par la présence de poussières minérales).

Les concentrations rencontrées lors de la période hivernales sont inférieures à $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour l'ensemble des sites. Notons quelques jours avec des variations intersites comme les 4 et 5 février 2025. Le 4 février, le site Police est influencé dans l'après-midi par vent de sud-ouest. Le 5 février ce sont les 3 sites du cœur urbain qui présentent des niveaux similaires ce qui traduit des niveaux homogènes à ces 3 secteurs géographiques.

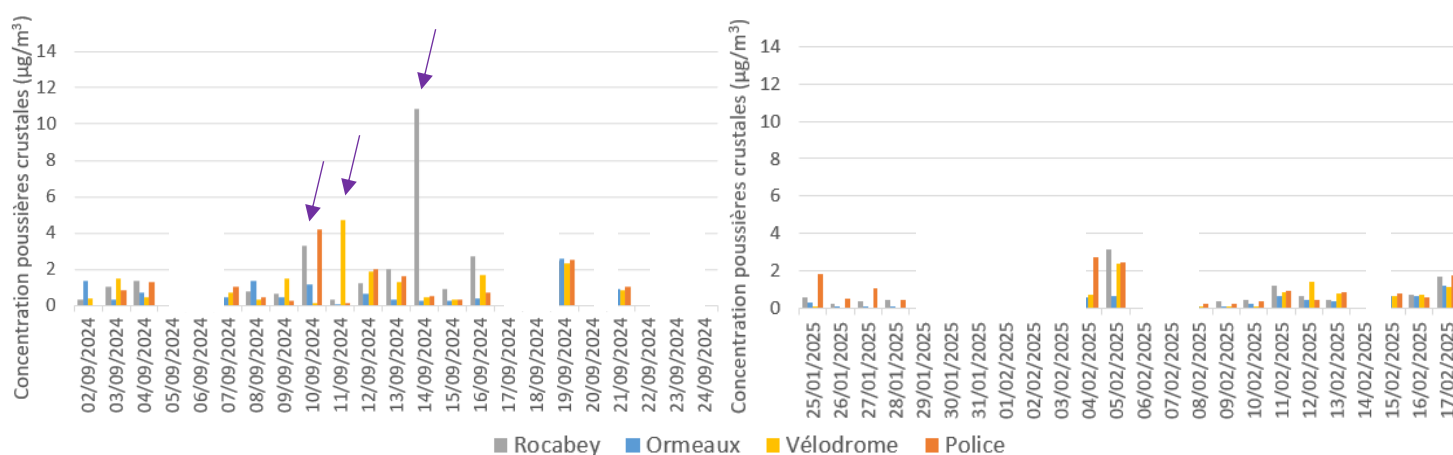


Figure 36 : Evolution des concentrations moyennes journalières en poussières minérales pendant la campagne estivale (gauche) et hivernale (droite)

Synthèse de l'analyse par constituant :

Dans l'ensemble des variations journalières similaires sont constatées, au niveau des 4 sites malouins avec les mêmes tendances saisonnières. Ce constat révèle une certaine homogénéité entre les 4 sites de cette étude pour les composés majeurs considérés.

Ainsi la matière organique et le carbone élémentaire présentent des concentrations plus élevées en période hivernale (en février) ce qui est cohérent avec la saison, en lien avec des émissions urbaines tels que le chauffage résidentiel ou encore le trafic routier (ou maritime) qui s'ajoutent à des conditions météorologiques peu dispersives. L'analyse du ratio OC/EC permet notamment de

caractériser l'influence des phénomènes de combustion au niveau des différents sites. Cela révèle que les sites Police et Vélodrome sont les plus impactés par ces phénomènes.

Les concentrations en sels marins présentent une variabilité journalière marquée avec des niveaux proches entre les 2 saisons et quasi-nuls dès le 8 février 2025. Les conditions de vents (direction et vitesse) peuvent simplement expliquer la présence d'embruns marins.

Les concentrations en espèces inorganiques (nitrate, sulfate et ammonium) sont plus élevées en saison hivernale, à partir du 8 février. A noter que les concentrations en nitrate et en ammonium, espèces présentes sous la forme de nitrate d'ammonium, sont très faibles en période estivale du fait du caractère semi-volatile de ce composé chimique.

Les poussières minérales, estimées à partir des concentrations en calcium et en sodium, sont présentes en concentration plus élevée lors de la campagne estivale. La source pour ce composé ne semble pas être naturelle (comme il est habituel de rencontrer) ce qui indique une source liée à des activités anthropiques (exemple d'activités de chargement/déchargement au niveau de la zone portuaire). Des variations non homogènes sont constatées pour certaines journées.

En effet, l'analyse de l'évolution journalière des concentrations des composants majeurs dans les PM10 permet d'identifier des différences journalières, par composé, en fonction des sites. Cela traduit des influences locales ponctuelles différentes entre les sites malouins. Ainsi des concentrations plus fortes en carbone élémentaire révèle une influence trafic pour le site Vélodrome ou encore le site Police. Pour les espèces inorganiques, seul le sulfate présente un niveau plus élevé lors de la journée du 14 septembre à la station Rocabey.

La période du 14 au 16 septembre va être analysée plus en détail en annexe. De même, pour les jours du 9 au 11 septembre 2025 qui présentent des niveaux de poussières minérales et de sels marins

XII. RESULTATS DES MESURES D'AMMONIAC

Cette partie porte sur l'exploitation des mesures en continu d'ammoniac menées en simultanément sur l'ensemble des sites durant cette étude. L'intérêt est d'améliorer les connaissances sur la variabilité spatiale des concentrations en ammoniac au niveau de la ville de Saint-Malo. Les données obtenues à Saint-Malo sont comparées aux mesures en continu réalisées au niveau de la station rurale nationale Kergoff, en centre Bretagne (22).

a) Statistiques

Les données statistiques des mesures en continu d'ammoniac sont synthétisées dans le Tableau 14. Les **niveaux de fond durant les 2 campagnes**, caractérisés par les médianes comprises entre 3 et 3,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, **sont proches entre les différents points de mesure à Saint-Malo et similaires à celui de la station rurale en centre Bretagne (Kergoff)** égal à 3,5 et 3,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivement pendant les campagnes estivale et hivernale. Quant aux **moyennes, elles sont supérieures aux niveaux de fond ce qui s'explique par des niveaux horaires ponctuellement élevés**. En effet, la moyenne maximale est mesurée à la station Rocabey (4,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et au niveau du site Police (5,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) respectivement en période estivale et en période hivernale. De plus, la **station Rocabey, indépendamment de la période, enregistre le maximum horaire le plus élevé (67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en été et 88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en hiver)**. Les **moyennes annuelles estimées en ammoniac, à Saint-Malo, sont supérieures (de 4% à 22%) à celle de la station rurale nationale Kergoff**. Le site Ormeaux enregistre la plus petite moyenne annuelle estimée en ammoniac (4,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) des 4 sites de mesures de Saint-Malo, il est le plus proche de la moyenne de la station rurale Kergoff avec seulement 4% d'écart. Cependant, le site Ormeaux présente des concentrations horaires ponctuellement élevées notamment en période estivale.

Tableau 14 : Synthèse statistique des mesures en NH_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Concentrations NH_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Campagne estivale					Campagne hivernale				
	NH_3 Ormeaux	NH_3 Police	NH_3 Vélodrome	NH_3 Rocabey	NH_3 Kergoff	NH_3 Ormeaux	NH_3 Police	NH_3 Vélodrome	NH_3 Rocabey	NH_3 Kergoff
Données horaires										
1 ^{er} quartile	1,9	2,2	2,3	2,2	2,6	2,0	2,3	2,1	1,9	2,6
Médiane	3,3	3,6	3,4	3,2	3,5	3,0	3,6	3,6	3,2	3,4
Moyenne	4,2	3,9	4,0	4,9	3,9	4,0	5,3	5,1	4,6	4,0
3 ^{ème} quartile	4,8	5,0	5,1	4,7	4,9	4,9	6,4	6,2	5,2	4,7
Maximum horaire (date)	45,1 (02/09/24)	25,1 (21/09/24)	18,4 (31/08/24)	67,0 (14/09/24)	10,0 (07/09/24)	23,7 (10/02/25)	59,1 (16/02/25)	40,3 (12/02/25)	87,9 (05/02/25)	11,5 (19/02/25)
Données journalières										
Maximum journalier (date)	11,7 (08/09/24)	8,6 (21/09/24)	9,3 (31/08/24)	19,3 (14/09/24)	6,4 (06/09/24)	9,4 (19/02/25)	16,0 (16/02/25)	18,7 (12/02/25)	17,1 (05/02/25)	8,8 (19/02/25)
Données annuelles										
Moyenne annuelle estimée	4,1	4,6	4,6	4,8	3,9					

La Figure 37 ci-dessous présente les jeux de données horaires NH_3 des sites de mesure à Saint-Malo et de la station Kergoff, pour les deux campagnes, sous la forme de box plot. La distribution des concentrations horaires présente des variations significatives au niveau de la station Rocabey et du site Ormeaux lors de la campagne estivale et pour les sites Police, Vélodrome et la station Rocabey durant la campagne hivernale. La **variation saisonnière est visible**, avec une augmentation des niveaux en période hivernale pour les **sites Police et Vélodrome**. Pour ces deux sites, les moyennes en ammoniac présentent des écarts relatifs respectivement de +36% et +28% et des maximums horaires multipliés par deux entre les périodes été-hiver. Le box plot relatif aux résultats de la station Kergoff a une répartition bien différente en l'absence de valeurs extrêmes. En effet, les maximales horaires des 4 sites malouins sont 2 à 8 fois plus élevées que celles de la station rurale lors des 2 campagnes.

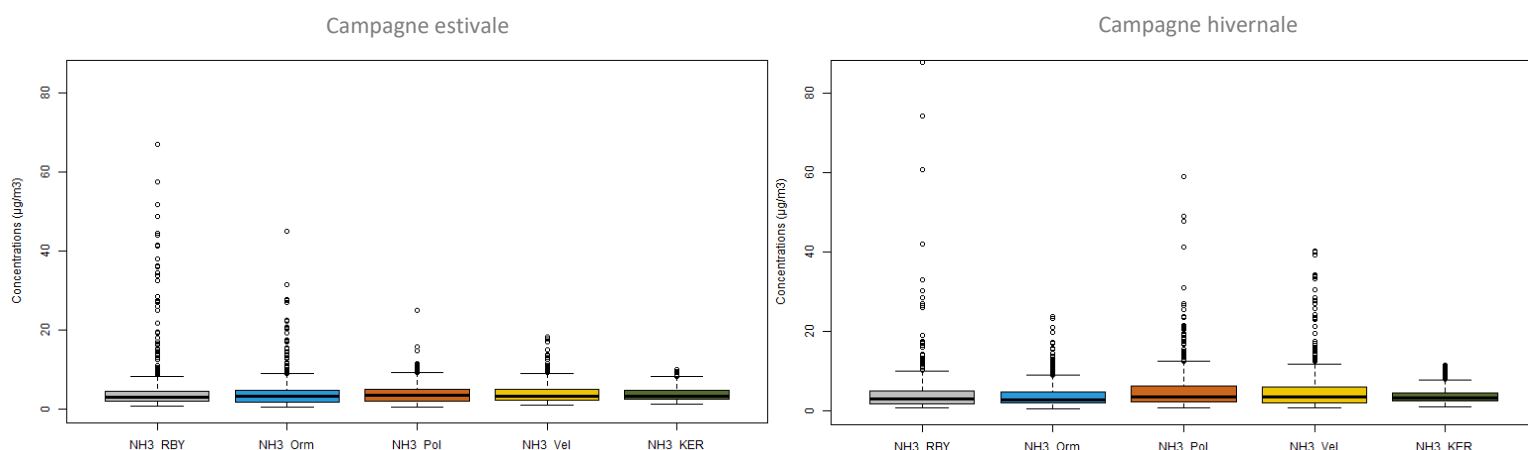


Figure 37 : Box plot des concentrations en NH_3 mesurées ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) pendant les campagnes (données horaires)

Comparaison saisonnière et intersites

Les niveaux de fond (caractérisés par les médianes) sont similaires entre les deux saisons pour l'ensemble des 4 points de mesure et proches des niveaux de fond de la station rurale nationale de centre Bretagne (station Kergoff). Quant aux moyennes en ammoniac, elles sont supérieures aux médianes pour l'ensemble des sites avec des écarts relatifs de 8% (site Police) à 53% (station Rocabey) en période estivale et de 33% (site Ormeaux) à 47% (site Police) en période hivernale. La variation saisonnière est constatée avec des concentrations moyennes plus élevées pour les sites Police (+36%) et Vélodrome (+28%), accompagnées d'une distribution des données horaires marquée pendant la campagne hivernale par rapport à la campagne estivale. La station Rocabey enregistre les plus fortes concentrations horaires en ammoniac indépendamment des saisons. Notons que les maximums horaires ne sont pas observés à des dates communes ce qui traduit des influences ponctuelles localisées.

En moyenne annuelle estimée, le site Ormeaux est celui qui présente la plus petite moyenne ($4,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) des 4 sites de Saint-Malo soit un écart relatif de -15% par rapport à la station Rocabey ($4,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Toutefois ponctuellement, lors de la campagne hivernale, de fortes concentrations horaires en ammoniac sont mesurées.

La moyenne des 4 sites à Saint-Malo, sur les 2 campagnes (4,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) est 15% plus élevée que celle de Kergoff (3,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) soit environ 0,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Cet écart s'explique par des niveaux ponctuellement élevés à Saint-Malo (concentrations maximales horaires entre 2 et 8 fois celle observée à Kergoff).

b) Variation journalière et horaire

La Figure 38 présente les variations journalières des concentrations en ammoniac mesurées au niveau des différents points durant les 2 campagnes. **Indépendamment des saisons**, il est constaté des **évolutions journalières différentes entre les sites**. En effet, ponctuellement des augmentations plus marquées sont enregistrées sur un site alors que les 3 autres restent dans le même ordre de grandeurs. Par exemple, **une certaine hétérogénéité des niveaux est constatée, notamment lors de la campagne estivale**, le 31 août 2024 une augmentation est localisée au niveau du site Vélodrome, le 2 et le 8 septembre 2024 des augmentations significatives sont enregistrées pour le site Ormeaux. Pour ces 2 jours, les roses de pollutions d'ammoniac révèlent une influence des concentrations par vent de sud-est. Les 14 et 15 septembre des concentrations supérieures à 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sont mesurées à la station Rocabey. Notons que ces dernières dates ont déjà été mises en avant dans la partie traitant des particules fines PM10 (IX1).

Lors de la **campagne hivernale**, **3 jours présentent des niveaux en ammoniac non corrélés entre les sites**. Le 5 février, la concentration journalière en ammoniac à la station Rocabey est de 17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et la rose de pollution révèle une influence de sud-ouest potentiellement en lien avec des activités portuaires dans la matinée. Le 12 février, c'est le site Vélodrome qui présente une concentration journalière d'environ 19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ avec des vents faibles (<4m/s) issus d'est/nord-est. Enfin, le site Police présente une moyenne journalière de 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, le 16 février, en raison d'une augmentation matinale des concentrations par vent faible de sud-est. **Ainsi ces différences de niveaux journaliers entre les sites traduisent une distribution ponctuelle non homogène entre les quartiers du fait d'influence variable en fonction de la source d'émission d'ammoniac et de la provenance des vents.**

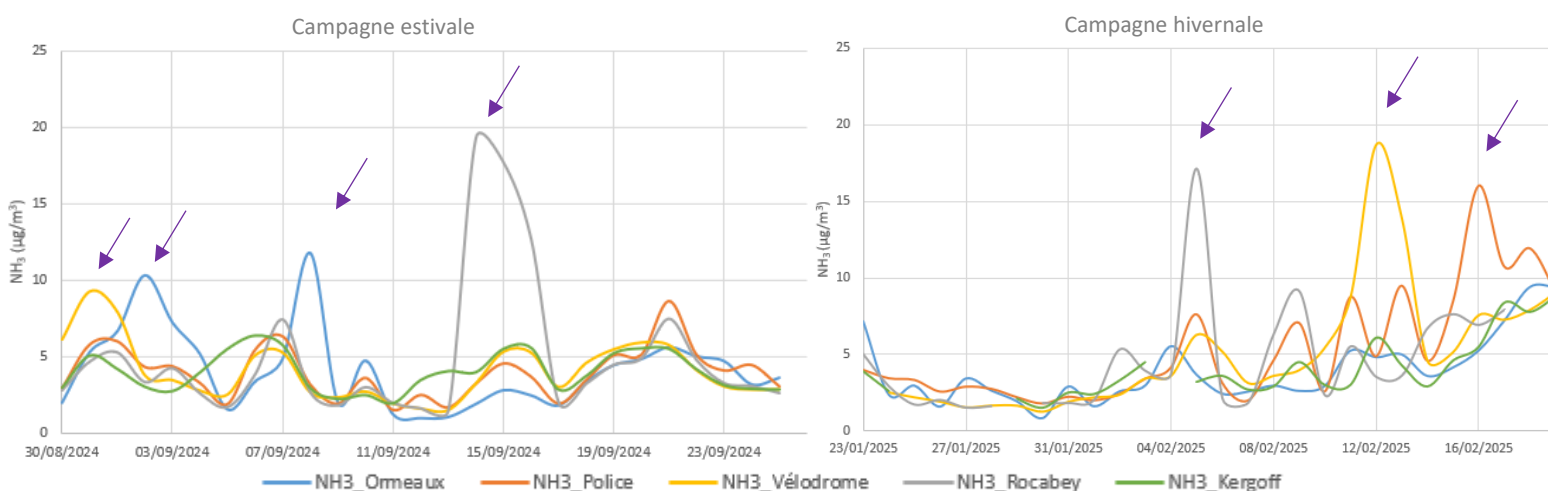


Figure 38 : Variation journalière des concentrations en ammoniac campagne estivale (gauche) et campagne hivernale (droite)

A titre indicatif, les mesures en ammoniac réalisées au niveau de la station réglementaire, urbaine de fond, à Strasbourg (Neudorf Ecoquartier Danube) présentent des moyennes journalières en NH_3 , comprises entre $2,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $6,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durant la campagne estivale et entre $1,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $5,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durant la campagne hivernale. Ces niveaux sont inférieurs à ceux observés à Saint-Malo pendant les mêmes périodes.

Les profils moyens journaliers de chacune des campagnes sont représentés dans la Figure 39 et la Figure 40. Chaque site de mesure et chaque campagne présente un profil propre.

La température est un facteur influant dans le processus de volatilisation de l'ammoniac. Il a déjà été constaté une bonne corrélation entre la température moyenne et les niveaux en ammoniac. Les concentrations les plus élevées en ammoniac sont mesurées dans l'après-midi, aux heures les plus chaudes (Air Breizh, 2025). Ce profil est observé à la station Kergoff.

Lors de la **campagne estivale**, les **profils moyens journaliers de la station Rocabey et du site Ormeaux se démarquent de celui de la station rurale national Kergoff**. Des augmentations ponctuelles sont mesurées au niveau de ces deux points de mesure ce qui confirme l'influence d'une source locale d'ammoniac, principalement nocturne, qui impacte ces 2 sites lors de la période estivale de cette étude. Les sites Vélodrome et Police présentent des profils journaliers similaires, proches de celui de la station Kergoff, ce qui indique des niveaux homogènes pour ces deux sites.

Lors de la campagne hivernale, le profil moyen du site Ormeaux est proche de celui de la station Kergoff, il est relativement linéaire tout au long de la journée. Les sites Police, Vélodrome et la station Rocabey ont des profils journaliers qui présentent des augmentations ponctuelles non corrélées. Cela traduit l'influence de sources locales anthropiques différentes affectant chacun de sites en fonction des conditions de vent ; la station Rocabey étant la plus impactée. Au niveau du site Vélodrome semble s'ajouter un impact lié au trafic, qui se traduit par les deux pics visibles aux heures de pointe des trajets domicile-travail (vers 8h et 18h) ce qui confirme l'influence du trafic routier mise en avant dans les analyses des compositions chimiques. Quant au profil du site Police, l'augmentation des concentrations est constatée aux alentours de 4 – 5h du matin.

Spatialisation des niveaux de PM10 et d'ammoniac à Saint-Malo

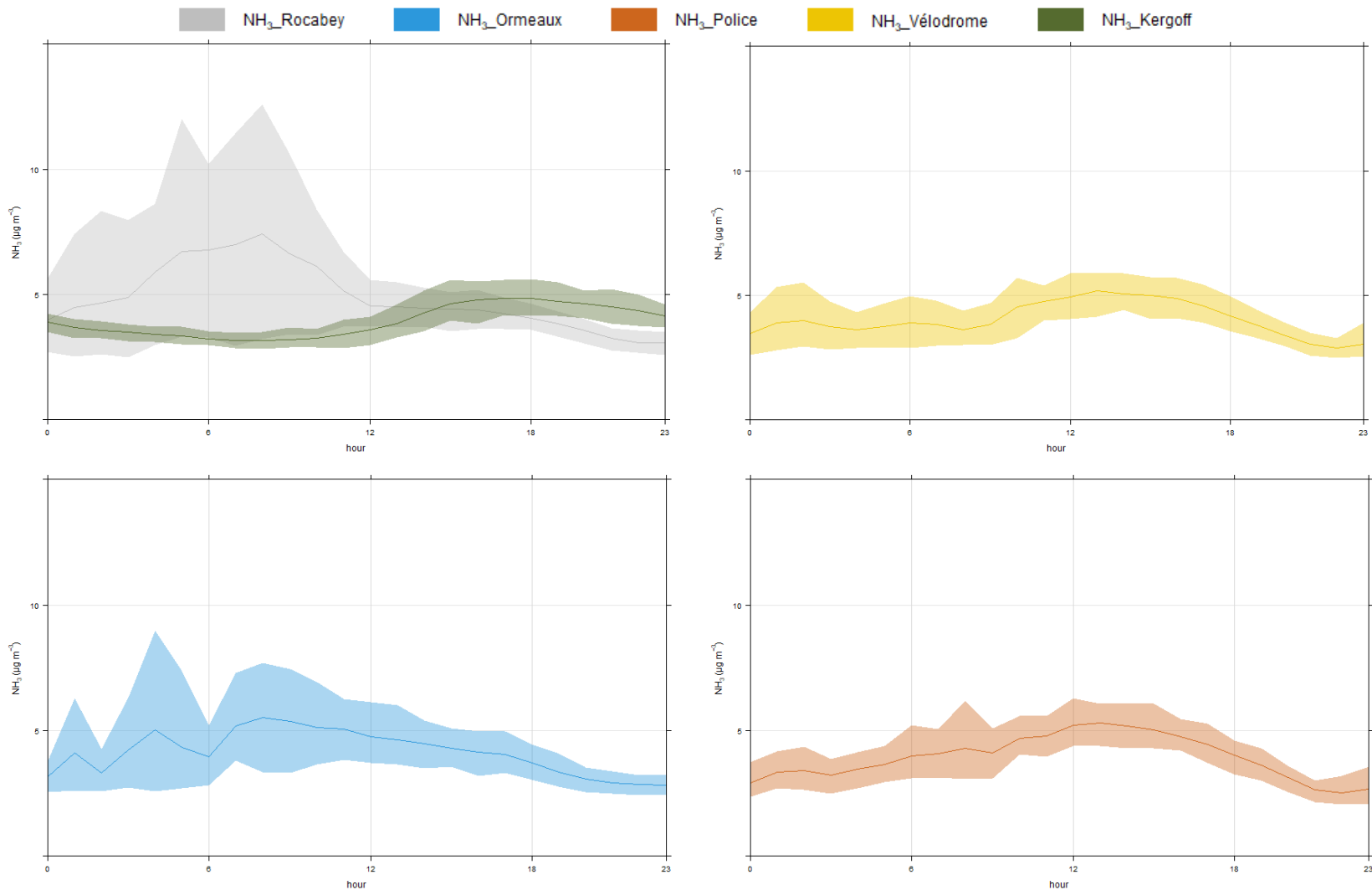


Figure 39 : Profils journaliers moyens en ammoniac - campagne estivale

Spatialisation des niveaux de PM10 et d'ammoniac à Saint-Malo

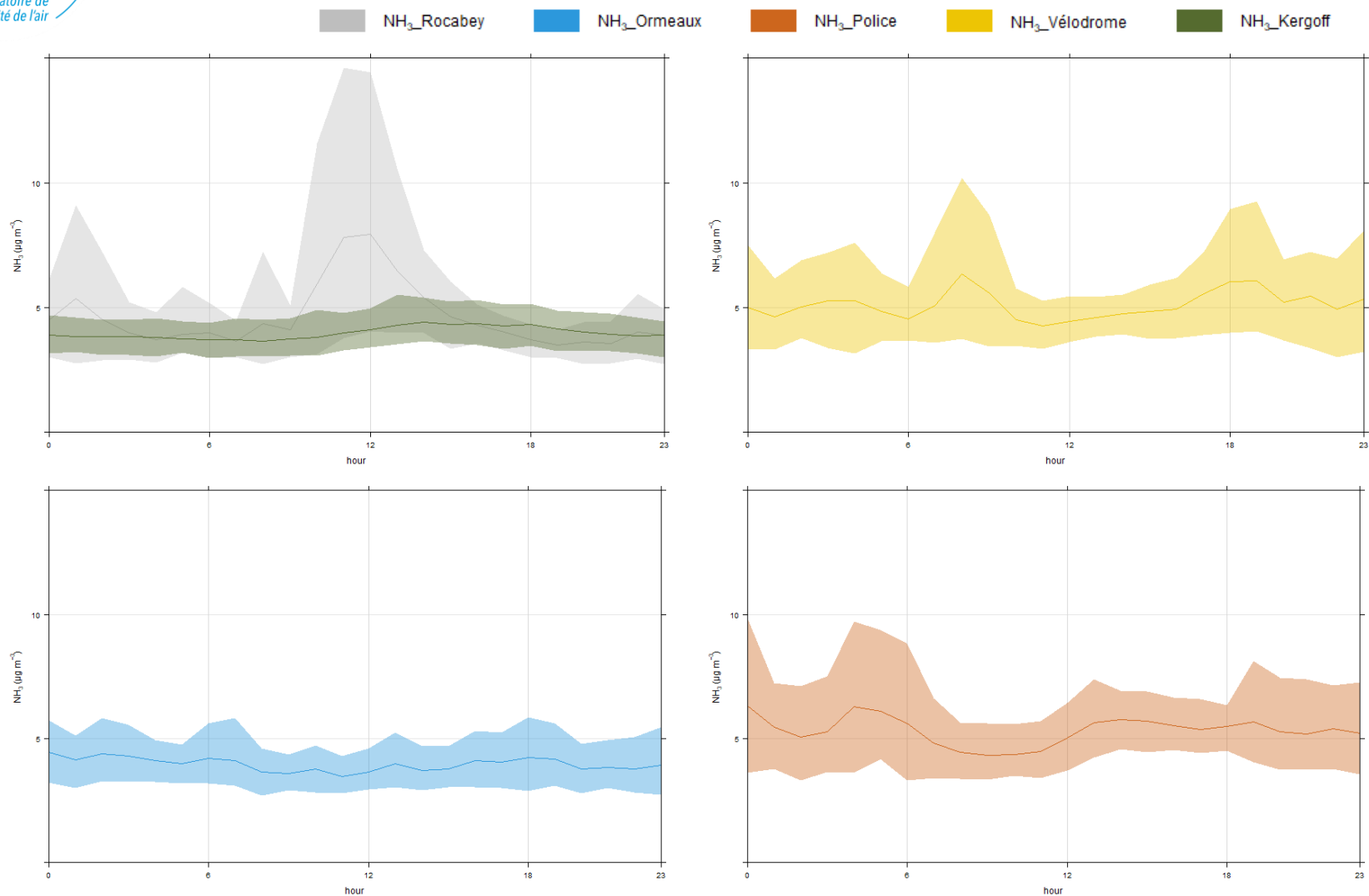


Figure 40 : Profils journaliers moyens en ammoniac - campagne hivernale

Les roses de pollution en ammoniac pour chacun des sites pour la campagne estivale et hivernale sont présentées respectivement dans la Figure 41 et Figure 42. Lors de la **campagne estivale**, le **sud-est est le secteur influent** (par vent inférieur à 4 m/s) **pour la station Rocabey** avec des moyennes en ammoniac aux alentours de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et **pour le site Police** avec des niveaux moyens plus faibles pour ce dernier. Le **site Ormeaux** est clairement influencé, lorsque les vents sont supérieurs à 5 m/s, par une **source située au sud-ouest** alors que le **site Vélodrome** est celui qui présente les moyennes les plus faibles ($6 - 7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) par influence de **secteur est**. Bien que chaque site ait un secteur d'influence spécifique, il est constaté une convergence des influences en direction de la ZI.

L'analyse des roses de pollution en ammoniac obtenues lors de la **campagne hivernale** mène à une **convergence du secteur dominant localisé en direction de la ZI**. Il est à noter une différence qui porte sur les concentrations moyennes ; cette fois plus élevées (proches de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) au niveau des sites Police et Vélodrome (en cohérence avec ce qui a été mis en avant précédemment). Une influence de sud-sud-est est visible, par vents d'environ 6 m/s, avec des niveaux plus faibles pour les sites Police et Vélodrome.

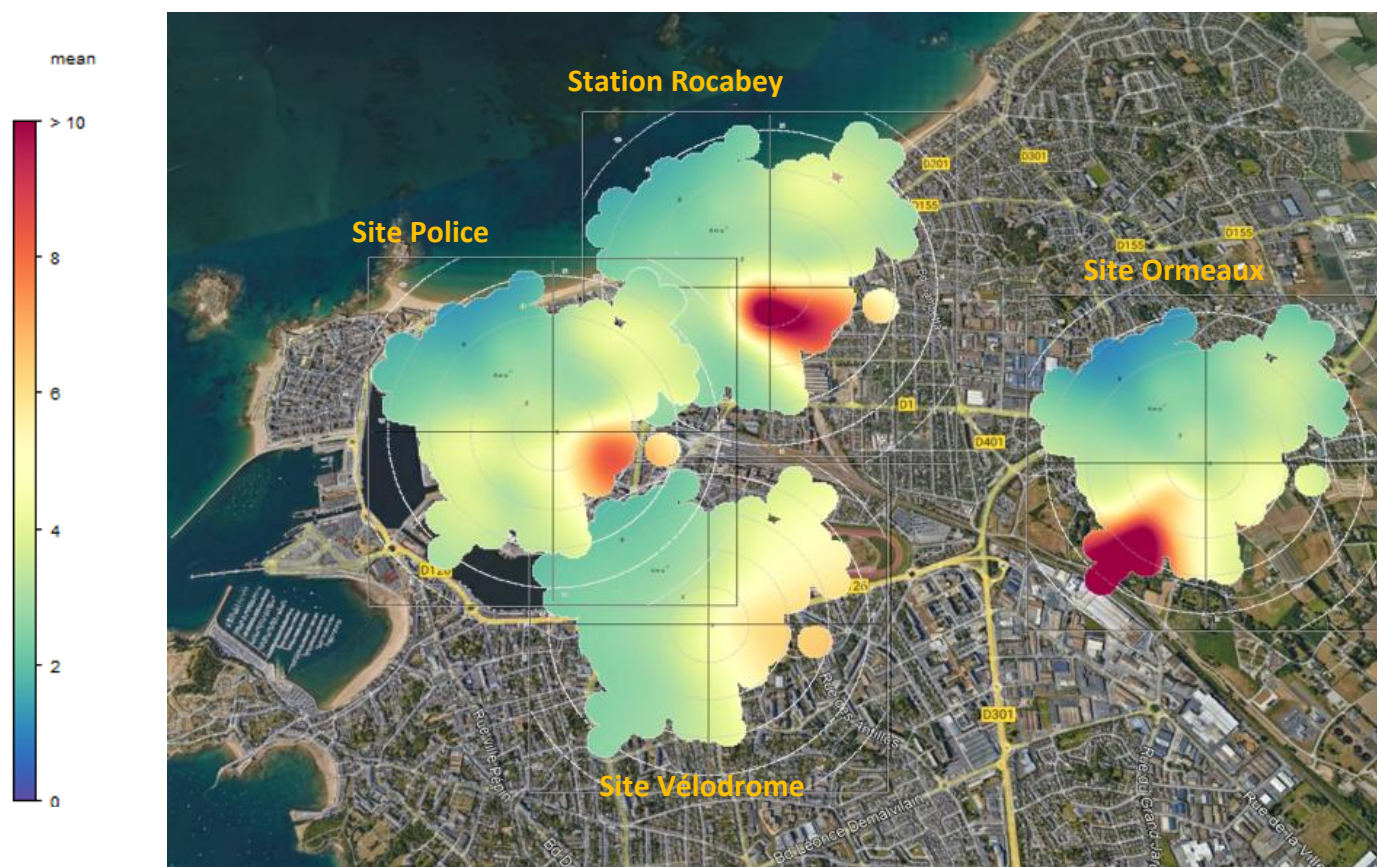


Figure 41 : Roses de pollution de l'ammoniac lors de la campagne estivale



Figure 42 : Roses de pollution de l'ammoniac lors de la campagne hivernale

Quelle est la représentativité des mesures d'ammoniac de la station Rocabey ?

Indépendamment des saisons, la station Rocabey présente les plus fortes variations horaires en ammoniac. Le profil journalier moyen est marqué par des augmentations significatives dans la nuit et la matinée (de minuit à midi). Le site Ormeaux est influencé en période estivale alors que les sites Vélodrome et Police sont influencés en période hivernale. Les variations saisonnières étant différentes pour chacun des sites cela traduit l'impact d'émissions d'ammoniac qui influencent les concentrations en ammoniac mesurées en fonction des conditions météorologiques. L'analyse des roses de pollution des 4 points de mesure met en évidence un secteur majoritaire commun aux 4 sites dans la direction de la ZI.

Depuis le début des mesures d'ammoniac au niveau de la station Rocabey, de fortes concentrations horaires (non observées pendant cette étude) ont été atteintes, par exemple $794 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en août 2022 (Air Breizh, février 2025), $348 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en mars 2025 ou encore $573 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en octobre 2025. Cet historique de mesure traduit la forte variabilité temporelle des niveaux d'ammoniac rencontrés à Saint-Malo, et non mise en avant par cette étude. Cependant, cette étude révèle des niveaux ponctuellement élevés pour les 3 autres sites (en fonction des saisons, des conditions météorologiques au moment des émissions), il est donc probable que si de telles concentrations

ont déjà été mesurées à la station Rocabey des niveaux supérieurs, si ce n'est égaux, ont pu être atteints dans d'autres quartiers de Saint-Malo.

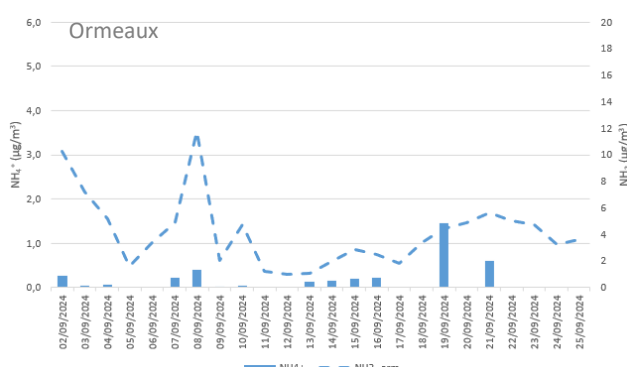
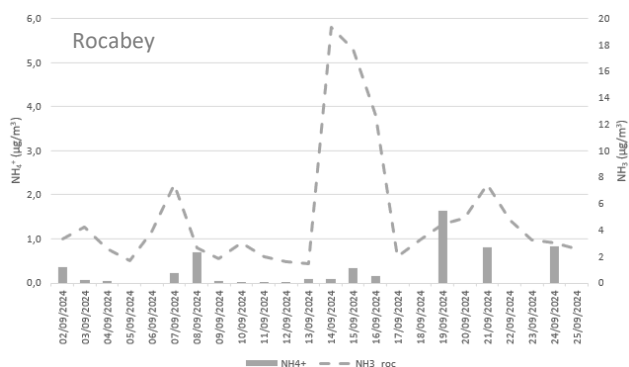
XIII. LIEN PARTICULES – AMMONIAC

Cette partie permet d'analyser le lien entre la concentration en ammonium dans les PM10 et la concentration en ammoniac (Figure 43 et Figure 44). Pour rappel, l'ammoniac est un précurseur de particules fines puisqu'il joue un rôle dans la formation de nitrate d'ammonium et de sulfate d'ammonium.

Pour rappel, l'ammonium (NH₄⁺) contribue en moyenne pendant la campagne estivale à 2% de la composition des PM10 mesurées pour les 4 sites (Figure 31). L'analyse de la variation journalière met en avant des concentrations en ammonium faibles (inférieures à 2 µg/m³) lors de cette période et bien corrélées entre les sites (Figure 43). De plus, il n'est pas établi de corrélation entre des fortes concentrations en ammoniac et une concentration élevée en ammonium dans les PM10.

En moyenne durant la **campagne hivernale, la contribution de l'ammonium dans la composition des PM10 mesurées est comprise entre 9% et 11%** avec des **concentrations moyennes qui sont 6 à 8 fois supérieures à celles de la période estivale** (cf. XI.3.c). Lors de cette période l'évolution journalière entre les sites est similaire pour le NH₄⁺. En effet, une homogénéité est constatée entre les concentrations en ammonium des différents sites (allant jusqu'à 5 – 6 µg/m³ en moyenne journalière) sans corrélation avec les concentrations en ammoniac, excepté les 11 et 12 février, pour le site Vélodrome, avec une augmentation conjointe de l'ammoniac et de l'ammonium dans les PM10. Ces 2 journées sont détaillées en annexe (cf. XIV), il est ainsi constaté une influence du secteur ZI au niveau du site Vélodrome dans les concentrations en ammoniac.

Bien que l'ammoniac soit un précurseur de particules fines, son impact dans la composition des PM mesurées, dans le cadre de cette étude, n'est pas constaté.



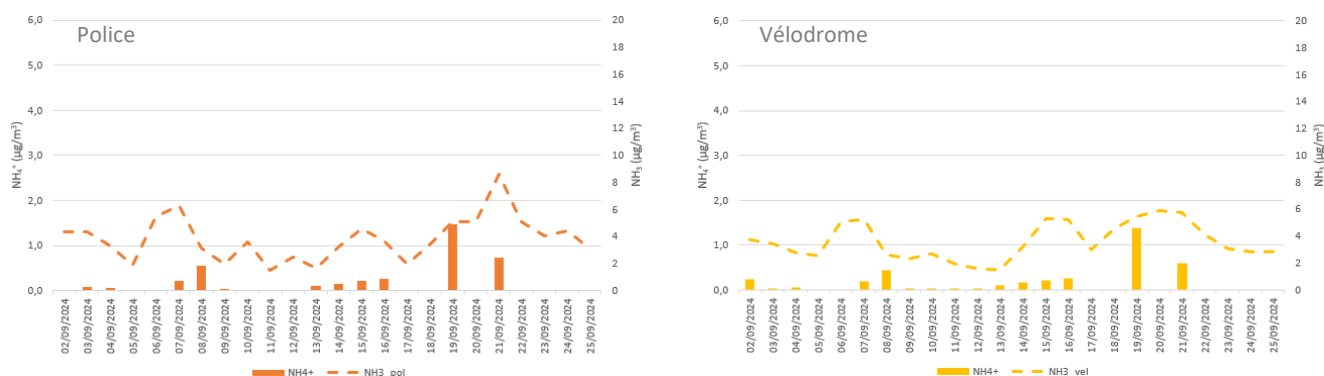


Figure 43 : Evolution des concentrations journalières en ammonium dans les PM10 (NH_4^+) et en ammoniac – campagne estivale

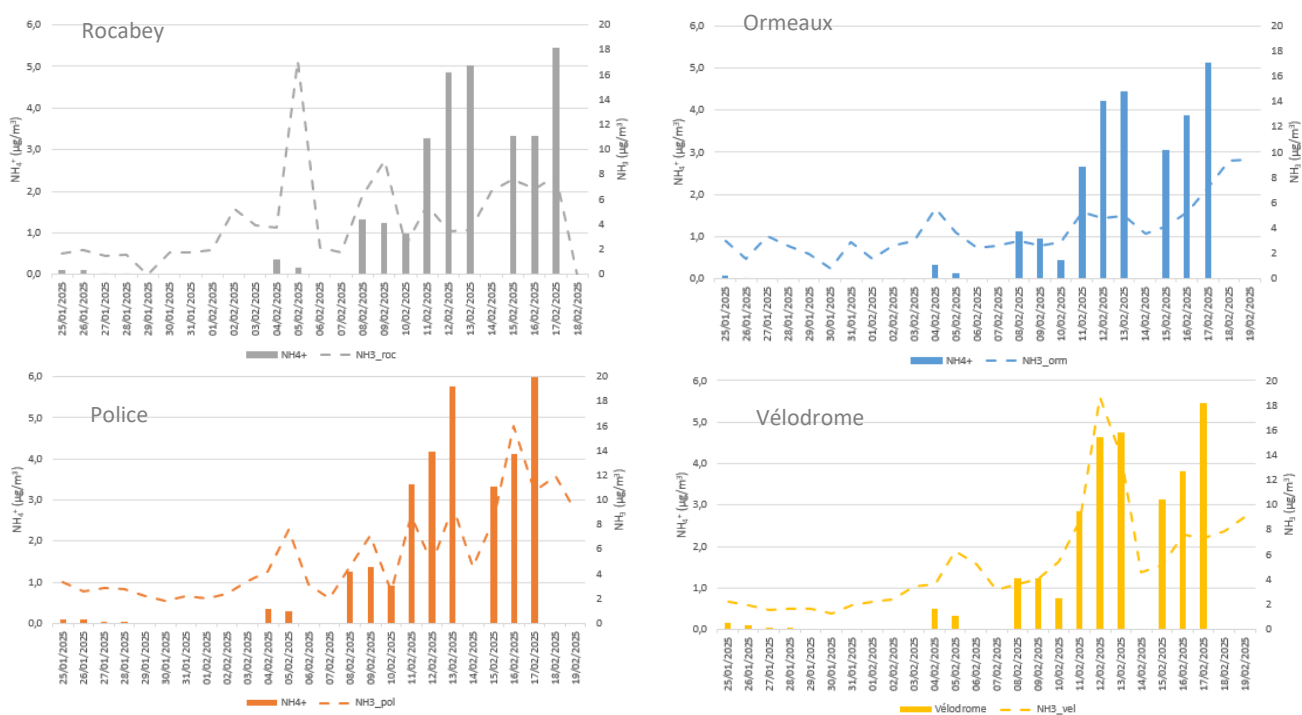


Figure 44 : Evolution des concentrations journalières en ammonium dans les PM10 (NH_4^+) et en ammoniac – campagne hivernale

XIV. ANALYSE JOURNALIERE

Cette partie présente une synthèse des différents jours faisant l'objet d'une fiche d'analyse spécifique. Pour chaque journée/période, différents graphiques sont représentés tels que la composition journalière des PM10 en concentration et contribution par site, les évolutions des concentrations horaires et les roses de pollution des polluants concernés (PM10, PM2,5 ou encore NH₃) ainsi que les variations horaires des conditions météorologiques (direction et vitesse de vent à la station Météo France Dinard).

Les jours atypiques analysés et les constats ayant mené à une analyse plus fine sont les suivants :

Campagne estivale

- 9 au 11 septembre 2024 : des variations non simultanées en PM10 entre les 3 sites du cœur urbain de Saint-Malo
- 14 au 16 septembre 2024 : des concentrations supérieures à la station Rocabey par rapport aux autres sites de la campagne (avec le maximum horaire et journalier en ammoniac le 14/09 et le maximum horaire en PM10 le 15/09)
- 19 septembre 2024 : des concentrations en PM10 proches du seuil IR journalier (fixé à 50 µg/m³) pour les différents sites de Saint-Malo

Campagne hivernale

- 25 janvier 2025 : des concentrations similaires en PM10 à la station Rocabey et au site Police
- 28 janvier 2025 : des concentrations similaires en PM10 à la station Rocabey et au site Police (avec le maximum horaire PM10 à la station Rocabey)
- 5 février 2025 : des niveaux PM10 plus élevés à la station Rocabey et au site Police (avec un maximum horaire et journalier mesuré en ammoniac à la station Rocabey)
- 8 au 9 février 2025 : des niveaux PM10 proches entre les 3 sites localisés dans le cœur urbain de Saint-Malo (avec le maximum horaire enregistré le 09/02 aux sites Police et Vélodrome)
- 11 au 12 février 2025 : le 11/02 des niveaux plus élevés en PM10 pour les sites Police et Vélodrome et le 12/02 les maxima horaire et journalier en NH₃ sont observés au site Vélodrome
- 16 au 17 février 2025 : le 16/02, les niveaux mesurés en PM supérieurs pour les sites Police et Vélodrome avec les maxima horaire et journalier en NH₃ atteints au site Police et le 17/02, les concentrations journalières maximales en PM10 et PM2,5 pour l'ensemble des sites.

Sans information sur les activités anthropiques au niveau de la zone portuaire ou encore de la ZI, l'identification des sources à partir des données de composition des PM10 sont des suppositions basées sur la provenance des vents au moment de l'augmentation des niveaux mesurés. Rappelons par ailleurs que les données météorologiques exploitées sont celles de la station Météo France de Dinard.

Synthèse des différentes influences dans les niveaux de PM10 et d'ammoniac

Les différents sites sont soumis à une **influence naturelle** avec des impacts ponctuellement plus marqués pour la station Rocabey ou encore au niveau du site Police (proximité maritime par vents de secteur ouest à nord). Cette influence maritime se traduit par la présence de sels de mer qui peuvent représenter jusqu'à plus de 70% des concentrations journalières en PM10. A noter que l'influence maritime peut également être liée à la présence de poussières minérales du fait de la mise en suspension de sable par exemple.

Les **influences anthropiques** sont multiples à l'échelle de la ville de Saint-Malo telles que les influences liées aux phénomènes de combustion avec l'impact des émissions de trafic que ce soit automobile/portuaire ou encore les émissions liées au chauffage résidentiel notamment en période hivernale. L'influence de ces phénomènes de combustion est ponctuellement plus notable au niveau des sites Police et Vélodrome lors de la campagne hivernale. L'impact de ces phénomènes de combustion est caractérisé par la présence de matière organique et de carbone élémentaire comme constaté les 8 et 9 février 2025 par exemple.

Les **influences anthropiques liées aux activités portuaires et de la ZI** sont visibles ponctuellement, à la fois dans les niveaux de PM10 et/ou de NH₃, en fonction des conditions météorologiques sur les 4 sites de la campagne. La présence de poussières minérales ou encore de matière organique peut être liée à des activités au niveau de la zone portuaire. L'influence du secteur ZI semble impacter uniquement les concentrations d'ammoniac sur les différents sites en fonction de la direction des vents.

A noter qu'il est constaté certaines nuits des augmentations corrélées des niveaux en PM10 et en ammoniac, notamment au niveau du site Rocabey par vent de sud/sud-ouest. La période du 14 au 16 septembre illustre ce propos. Des variations similaires avaient déjà été observées en septembre 2022 notamment (Air Breizh, juillet 2024) révélant potentiellement une co-émission de PM et d'ammoniac.

D'autre part, le maximum journalier en PM_{2,5} est observé le même jour (17 février 2025) pour l'ensemble des sites considérés dans cette étude, ce qui révèle une homogénéité des concentrations de cette fraction des PM au niveau de la commune. La concentration maximale journalière est mesurée en lien avec des conditions météorologiques peu dispersives et favorables à la présence d'espèces inorganiques secondaires (nitrate et sulfate d'ammonium). Il n'est pas identifié spécifiquement une influence anthropique liées à des émissions locales.

Synthèse des influences par site de mesure

Comme évoqué précédemment les 3 sites du cœur urbain de Saint-Malo présentent des niveaux similaires en particules traduisant une certaine homogénéité au sein de la ville. L'influence maritime dans les PM10, du fait de la localisation géographique de Saint-Malo, est présente pour l'ensemble des sites avec la proximité du point de mesure au littoral qui accentue l'influence potentielle des embruns marins et éventuellement du sable. De plus, ponctuellement (seulement seize jours

détaillés) selon les conditions météorologiques et les activités émettrices de polluants (particules et ammoniac), chacun des sites peut être soumis à une influence anthropique locale.

La **station Rocabey** présente une influence anthropique par vent faible d'un large secteur sud. Cette dernière est constatée avec de fortes concentrations en ammoniac associées à une augmentation des PM10 (et éventuellement des PM2,5 mi-septembre). Une influence de la zone portuaire semble visible avec des concentrations en poussières minérales qui pourraient être liées à des chargements/déchargements, stockage de matériaux. Les niveaux en ammoniac semblent être soumis à une influence anthropique ponctuellement, soit par des vents de sud-ouest ou par des vents de sud-est, entraînant probablement l'influence de la zone portuaire et de la ZI selon les conditions de vents et des activités de chacune.

Les niveaux en PM10 mesurés au **site Vélo-drome** semble être influencés par les activités anthropiques potentiellement localisées dans le secteur du port par vent de nord-ouest et qui ont été associés à la présence de poussières minérales dans les PM10. Il s'ajoute également ponctuellement les émissions issues du chauffage résidentiel et des transports avec la présence de carbone élémentaire et de matière organique du fait de la plus forte densité de population environnante. L'influence de la ZI sur les concentrations en ammoniac est observée, au niveau du site Vélo-drome, ponctuellement, par vent d'est, notamment lors de certaines journées de février 2025.

Le **site Police**, par sa proximité à la zone portuaire, présente ponctuellement une augmentation des PM10 qui peut être associée aux activités de cette zone. De plus, les émissions des activités anthropiques urbaines impactent les PM10 avec la présence ponctuelle de carbone élémentaire et de matière organique. Les niveaux en ammoniac mesurés au site police présentent ponctuellement une influence du secteur ZI, en ce qui concerne l'influence de la zone portuaire, elle n'est pas identifiée sur les mesures d'ammoniac, pour ce site, durant cette étude.

Le **site Ormeaux**, localisé dans un environnement moins urbanisé, plus en hauteur et plus distant du littoral, est moins impacté par l'influence naturelle maritime dans les niveaux de PM10 ainsi que par les sources de combustion (trafic ou encore chauffage). Une augmentation des niveaux d'ammoniac a été constatée ponctuellement lorsque les vents proviennent de la ZI ; contrairement à ce qui est observé à la station Rocabey, celle-ci n'est jamais corrélée à une augmentation des niveaux de PM10. Ce constat pourrait s'expliquer par des sources d'influence différentes sur les deux sites. Ainsi le site Ormeaux, le plus proche du secteur ZI (environ 800 m au nord-ouest) ne présente pas d'influence de ce secteur vis-à-vis des concentrations en PM10.

Les différents quartiers de Saint-Malo sont-ils soumis aux mêmes influences ? Quelles sont les influences de la zone industrielle et des installations portuaires sur la qualité de l'air des quartiers limitrophes ?

Les différents sites considérés dans l'étude présentent des compositions chimiques moyennes en PM10 similaires ce qui traduit des sources de PM10 communes au sein de la ville. L'influence

naturelle maritime est commune à l'ensemble des points considérés et ponctuellement plus marquée pour les points les plus proches du littoral (station Rocabey et site Police).

Globalement les 3 sites localisés dans le cœur urbain de Saint-Malo sont soumis à des influences communes vis-à-vis des niveaux en PM10. En effet, les niveaux en PM10 des sites Vélodrome, Police ou encore la station Rocabey semblent ponctuellement impactés par les activités de la zone portuaire (présence de poussières minérales potentiellement émises par des activités de déchargement/chargement ou encore stockage) en fonction de la direction des vents. De plus, il est constaté ponctuellement, dans la nuit, à la station Rocabey une augmentation corrélée des niveaux en PM10 et en ammoniac par vent de sud-ouest qui pourraient donc être issues d'activités portuaires. L'influence de la ZI semble être constatée ponctuellement dans les concentrations en ammoniac à la station Rocabey par vent faible de sud-est ainsi qu'au niveau des sites Police et Vélodrome en période hivernale. D'autre part, les émissions de PM10 liées aux activités urbaines comme le trafic ou encore le chauffage résidentiel influencent les sites Vélodrome et Police dans certaines conditions.

Le site Ormeaux, dans le secteur Paramé, est celui qui présente des concentrations en PM10 les plus faibles du fait de sa localisation. Cela traduit une influence légèrement différente pour ce point, moins marqué par les émissions urbaines et des installations portuaires notamment ou encore l'influence maritime. A noter tout de même que ponctuellement, par vent de sud-ouest, les niveaux en ammoniac mesurés sur ce site sont impactés par les activités en direction de la ZI (avec des augmentations horaires ponctuelles des concentrations en ammoniac).

XV. SYNTHÈSE DES RÉPONSES AUX DIFFÉRENTS QUESTIONNEMENTS

Les niveaux en PM10 mesurés à Saint-Malo Rocabey présentent-ils la même évolution temporelle (saisonnnière, mensuelle) que les autres stations du réseau régional ?

L'analyse de l'historique des mesures réglementaires en PM10 de 2020 à 2024 au niveau de la station réglementaire à Saint-Malo comparé aux autres stations urbaines de Rennes, Saint-Brieuc et Brest permet de mettre en avant **des évolutions horaires, mensuelles et saisonnières similaires en termes de variation**. La tendance est similaire avec un niveau **maximum en PM10 observé en hiver/printemps** (pendant le mois de mars notamment) et **un minimum atteint durant l'été** (juillet-août).

Cependant, les **concentrations en PM10 à la station malouine sont constamment supérieures à celles mesurées au niveau des autres stations urbaines de fond** de Rennes, Saint-Brieuc et Brest. Les moyennes pluriannuelles 2020 – 2024 illustrent ce propos puisqu'elle est de $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à la station malouine alors que celles de Brest, Rennes et Saint-Brieuc sont comprises entre 16 et $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En moyenne annuelle estimée en PM10 (dans le cadre de cette étude), l'écart des stations urbaines bretonnes par rapport à la moyenne PM10 des 3 sites localisés au cœur de Saint-Malo (Police, Vélodrome et la station Rocabey) est plus important pour la station de Rennes (Station Thabor) avec -13% contre -3% pour la station urbaine de Brest (Station Macé).

Quelle est la **représentativité** des mesures PM10 de la station Rocabey ? Les concentrations en PM10 mesurées à Rocabey sont-elles homogènes dans la ville de Saint-Malo ?

La concentration moyenne annuelle estimée en PM10 au niveau de la station Rocabey ($19 \mu\text{g}/\text{m}^3$) présente des écarts relatifs inférieurs à 10 % par rapport à celles des sites Vélodrome ($17 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et Police ($18 \mu\text{g}/\text{m}^3$). La moyenne annuelle estimée pour ces 3 sites localisés au cœur de Saint-Malo est de $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Cette dernière est proche de l'historique avec un écart de -5% par rapport à la moyenne pluriannuelle PM10 2020-2024 à la station Rocabey ($19 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Le site Ormeaux (moyenne annuelle estimée de $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$), localisé plus en hauteur et plus distant des sources d'émissions (port, zone industrielle, quartiers résidentiels) présente logiquement des niveaux plus faibles que les 3 autres sites.

Ainsi pendant la campagne, il est constaté peu d'écart entre les sites, mis à part le site Ormeaux avec un écart de 42% par rapport à Rocabey et -26% par rapport à la moyenne du cœur urbain de Saint-Malo. **Les mesures réalisées à la station Rocabey sont représentatives du centre urbain de Saint-Malo.**

Globalement, **les variations journalières sont similaires ce qui permet de conclure à une homogénéité des mesures PM10 au sein de la ville de Saint-Malo**. Toutefois, ponctuellement des différences de niveaux sur certains sites sont observées ce qui pourraient s'expliquer par des influences locales. L'homogénéité des mesures en PM10 est constatée en période hivernale plus qu'en période estivale.

Quelle est la représentativité des mesures d'ammoniac de la station Rocabey ?

La moyenne des 4 sites à Saint-Malo, lors des 2 campagnes ($4,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) est 15% plus élevée que celle de la station rurale Kergoff ($3,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) soit environ $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Les niveaux ponctuellement plus élevés à Saint-Malo (concentrations maximales horaires entre 2 et 8 fois celle observée à Kergoff) peuvent expliquer cette différence.

Indépendamment des saisons, la station Rocabey présente les plus fortes variations horaires en ammoniac. Le profil journalier moyen est marqué par des augmentations significatives dans la nuit et la matinée (environ de minuit à midi). Le site Ormeaux est influencé en période estivale alors que les sites Vélodrome et Police sont influencés en période hivernale. Les variations saisonnières étant différentes pour chacun des sites cela traduit l'impact d'émissions d'ammoniac qui influencent les niveaux d'ammoniac mesurés en fonction des conditions météorologiques. L'analyse des roses de pollution des 4 points de mesure met en évidence un secteur majoritaire commun aux 4 sites dans la direction de la ZI.

Les différents quartiers de Saint-Malo sont-ils soumis aux mêmes influences ? Quelles sont les influences de la zone industrielle et des installations portuaires sur la qualité de l'air des quartiers limitrophes ?

Les différents sites considérés dans l'étude présentent des compositions chimiques moyennes en PM10 similaires ce qui traduit des sources de PM10 communes au sein de la ville. L'influence naturelle maritime est commune à l'ensemble des points considérés et ponctuellement plus marquée pour les points les plus proches du littoral (station Rocabey et site Police).

Globalement les 3 sites localisés dans le cœur urbain de Saint-Malo sont soumis à des influences communes vis-à-vis des niveaux en PM10. En effet, les niveaux en PM10 des sites Vélodrome, Police ou encore la station Rocabey semblent ponctuellement impactés par les activités de la zone portuaire (présence de poussières minérales potentiellement émises par des activités de déchargement/chargement ou encore stockage) en fonction de la direction des vents. De plus, il est constaté ponctuellement, dans la nuit, à la station Rocabey une augmentation des niveaux en PM10 et en ammoniac par vent de sud-ouest qui pourraient donc être issues d'activités portuaires. L'influence de la ZI semble être constatée ponctuellement dans les concentrations en ammoniac à la station Rocabey par vent faible de sud-est. Cette influence est constatée pour les sites Police et Vélodrome en période hivernale. D'autre part, les sites Vélodrome et Police sont dans certaines conditions plus influencés par les émissions de PM10 liées aux activités urbaines comme le trafic ou encore le chauffage résidentiel.

Le site Ormeaux, dans le secteur Paramé, présente les plus faibles concentrations en PM10 du fait de sa localisation. Cela traduit une influence légèrement différente pour ce point, moins marqué par les émissions anthropiques (urbaines et des installations portuaires notamment) ou encore par l'influence maritime. A noter tout de même que ponctuellement, par vent de sud-ouest, les niveaux en ammoniac mesurés sur ce site sont impactés par les activités en direction de la ZI (avec des augmentations horaires ponctuelles des concentrations en ammoniac).

Il semble donc être constaté, pendant cette étude, une influence de la ZI uniquement sur les niveaux d'ammoniac de l'ensemble des sites en fonction des conditions météorologiques et une influence de la zone portuaire sur les concentrations en ammoniac et/ou en PM10 pour les 3 sites localisés dans le cœur de ville de Saint-Malo.

XVI. CONCLUSION

De nombreuses études menées sur le territoire de Saint-Malo ont déjà permis de nombreux constats sur la particularité de Saint-Malo vis-à-vis des particules fines et des niveaux en ammoniac. Cette nouvelle étude, portant sur la spatialisation des niveaux de PM10 et d'ammoniac a pour objectif d'améliorer les connaissances sur la variabilité des concentrations à l'échelle de la ville et caractériser la représentativité des mesures effectuées à la station réglementaire Rocabey.

Rappel du protocole

En complément de la station péri-urbaine de fond Rocabey, 3 points de mesure (sites Vélodrome, Police, Ormeaux), localisés dans des secteurs identifiés en concertation avec la ville et l'agglomération (St-Servan, Zone portuaire et Paramé) ont été équipés simultanément.

Deux campagnes de mesure ont été menées à différentes périodes de l'année, afin de garantir une bonne représentativité des résultats :

- Campagne estivale : du 30/08 au 26/09/2024
- Campagne hivernale : du 23/01 au 20/02/2025.

Les concentrations en particules fines (PM10 et PM2,5) et en ammoniac (NH₃) ont été mesurées en continu et des prélèvements sur filtres pour l'analyse de la composition chimique des particules PM10 ont été réalisés quotidiennement pendant toute la durée des campagnes sur les 4 sites équipés.

A noter que les conditions de vent, rencontrées lors des deux campagnes, ont été différentes des normales mensuelles (septembre et février). Lors de la campagne estivale, peu de vents de nord-ouest ont été enregistrés par rapport à la normale de septembre. En période hivernale, ce sont les secteurs nord et nord-ouest qui ont été quasi-absents. De plus, les cumuls de précipitations sont supérieurs aux normales mensuelles.

Analyse de l'historique des mesures PM10

L'historique 2020-2024 des concentrations en PM10 à la station Rocabey est comparé à différentes échelles (pluriannuelle, saisonnière, mensuelle et horaire) par rapport aux niveaux rencontrés pour trois autres stations du réseau de surveillance breton de typologie similaire (urbaine de fond) situées à Rennes, Saint-Brieuc et Brest.

La moyenne pluriannuelle PM10 2020-2024 est plus élevée pour la station Rocabey (19 µg/m³) avec un écart maximal de +35% observé par rapport à celle de la station Balzac (Saint-Brieuc) soit 5 µg/m³ de différence.

La variabilité interannuelle sur la période 2020-2024 est marquée pour tous les sites avec une année 2022 qui présente les plus fortes concentrations pour les stations de Saint-Malo (23 µg/m³) et Brest

(19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). A l'inverse, les plus faibles concentrations pour l'ensemble des stations sont mesurées en 2024.

Les moyennes PM10 aux différentes échelles saisonnière, mensuelle ainsi que les profils moyens journaliers sont supérieures au niveau de la station Rocabey. Toutefois les tendances en termes d'évolutions sont similaires entre les différents sites.

Mesure des PM10 pendant la campagne

Respect des valeurs réglementaires PM10 (journalière et annuelle) et dépassement des recommandations de l'OMS

Durant la campagne estivale, la valeur limite de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne journalière a été atteinte (pour le site Police et Vélodrome) mais n'a pas été dépassée. D'autre part, le seuil journalier fixé à 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ par la CE à atteindre en 2030 (égal à la recommandation OMS) a été dépassé pour tous les points de mesure sauf pour le site Ormeaux. Lors de la campagne hivernale, aucune valeur de référence en moyenne journalière n'a été dépassée.

Quant aux moyennes annuelles estimées (à partir des données des deux campagnes), seule la recommandation de l'OMS est dépassée au niveau de la station Rocabey, des sites Police et Vélodrome. Le site Ormeaux respecte les différents seuils. La valeur limite annuelle ainsi que la valeur seuil de la commission européenne à atteindre en 2030 sont respectées.

Des mesures PM10 à la station Rocabey représentatives du centre urbain de Saint-Malo et des niveaux PM10 plus faibles dans le secteur Paramé

La concentration moyenne annuelle estimée en PM10 au niveau de la station Rocabey (19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) présente des écarts relatifs inférieurs à 10 % par rapport à celles des 2 sites du centre urbain de Saint-Malo ; Vélodrome (17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et Police (18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). La moyenne annuelle de ces 3 points de mesure (18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) illustre la moyenne PM10 du cœur de ville de Saint-Malo.

Le site Ormeaux présente des niveaux inférieurs (aux différentes échelles annuelle, journalière et horaire) par rapport aux 3 autres points de mesure localisés dans le cœur de Saint-Malo. La localisation de ce site distant du littoral (plus en hauteur) et dans un quartier moins urbanisé (densité de population plus faible) plus éloigné des sources d'émissions (port, zone industrielle) peut expliquer cette différence de presque 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ par rapport à la moyenne PM10 du cœur de ville de Saint-Malo (13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne à Ormeaux) soit un écart relatif de -26%.

Une variation saisonnière constatée à Saint-Malo et moins marquée à la station Rocabey

Les niveaux mesurés pendant la campagne hivernale sont supérieurs à ceux de la campagne estivale. Les écarts relatifs entre les moyennes hivernale et estivale sont compris entre 3% à la station Rocabey et 36% pour le site Ormeaux. Pendant cette campagne, une faible variation saisonnière de la moyenne est constatée à la station Rocabey.

En ce qui concerne les niveaux de fond, caractérisés par les médianes, ils varient entre les deux campagnes avec des écarts relatifs respectifs de 20% à 56% pour la station Rocabey et le site Ormeaux. L'écart saisonnier à la station Rocabey est plus marqué pour le niveau de fond que pour la moyenne. Ainsi la période estivale présente une plus forte hétérogénéité des concentrations en

PM10 entre la station Rocabey et les autres sites en raison de pics ponctuels localisés au niveau de la station réglementaire.

L'augmentation des niveaux de fond en PM10 en période hivernale s'explique en partie par l'abaissement de la hauteur de la couche de mélange atmosphérique, propice à l'augmentation des concentrations des composantes majeures des PM10 qui coïncident avec les émissions anthropiques (chauffage résidentiel, activités agricoles).

La moyenne PM10 du centre urbain de Saint-Malo supérieure à celle de Rennes et proche de celle de Brest

En période estivale, la station Rocabey présente une moyenne plus élevée que les deux autres stations urbaines bretonnes (+5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ par rapport à la station rennaise). En revanche l'hiver, seul environ 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ d'écart est observé entre les 3 stations urbaines du réseau de surveillance breton. En moyenne annuelle estimée (pendant cette étude), l'écart des stations urbaines bretonnes par rapport la moyenne PM10 des 3 sites localisés au cœur de Saint-Malo (18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) est plus important pour la station de Rennes avec -13% contre -3% pour la station urbaine de Brest.

Mesure des PM2,5 pendant la campagne

Respect du seuil réglementaire annuel et dépassements des recommandations OMS

Les moyennes annuelles estimées en PM2,5 au niveau des 4 points de mesure respectent la valeur limite réglementaire de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et dépassent la recommandation OMS ainsi que le seuil de la commission européenne (fixe à 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à atteindre en 2030). A noter que les concentrations moyennes annuelles estimées dans le cadre de cette étude sont potentiellement surestimées en raison de niveaux PM2,5 supérieurs à l'historique (2020-2025) lors des deux campagnes.

La recommandation de l'OMS ainsi que la valeur seuil de la commission européenne en moyenne journalière (fixée à 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à atteindre en 2030) ont été dépassées pour l'ensemble des sites de mesure durant les deux campagnes.

Des niveaux homogènes entre les 4 sites de mesure

En moyenne pendant cette étude, les concentrations en PM2,5 mesurées sur les différents points de mesure de la ville de Saint-Malo sont homogènes avec un écart maximal de -24% pour le site Ormeaux par rapport au site Vélodrome, soit 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

La moyenne annuelle estimée en PM2,5 pour les 3 sites du cœur urbain de Saint-Malo (Vélodrome, Police et la station Rocabey) est de 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Le site Ormeaux, se démarque de façon moins significative que pour les PM10, avec un écart de -17% par rapport à la moyenne des 3 autres sites de Saint-Malo.

Pas de spécificités locales à Saint-Malo vis-à-vis des PM2,5

Les niveaux en PM2,5 mesurés aux stations urbaines de fond de Brest et de Rennes sont proches de ceux observés à la station de Saint-Malo avec des écarts de +/- 0,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en période estivale. L'augmentation des niveaux en PM2,5 est également constatée en période hivernale par rapport à

la période estivale avec une variation plus marquée au niveau de la station urbaine de Rennes. A noter que 3 jours se démarquent courant septembre au niveau de la station Rocabey avec des concentrations environ 2 fois plus fortes que les autres sites.

En moyenne annuelle estimée pendant la campagne, la moyenne PM_{2,5} des 3 sites du cœur urbain de Saint-Malo (Vélodrome, Police et Rocabey) est identique à la station de Rennes et un écart de -8% est observé pour la station de Brest.

Analyse de la composition chimique des PM10 pendant la campagne

Des compositions PM10 globalement similaires au niveau des 4 sites malouins avec les mêmes tendances saisonnières

La matière organique, composé majoritaire des PM10.

La matière organique est le composé dominant dans les PM10 pour tous les sites avec des concentrations plus fortes en période hivernale, ce qui est cohérent avec la saison (émission du chauffage résidentiel). De même, le carbone élémentaire présente des concentrations plus élevées en février.

La composition chimique durant la campagne estivale présente des concentrations en **sels marins** supérieures à celle de la campagne hivernale. Les conditions de vent avec un secteur nord-ouest non représenté en janvier/février expliquent ce constat. Dans le cadre de cette étude, la variabilité journalière est marquée et l'influence maritime est plus présente pour l'ensemble des sites en période estivale.

Des espèces inorganiques (NH₄⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻) présentent pendant la campagne hivernale.

Cela traduit la présence de nitrate d'ammonium et de sulfate d'ammonium en période hivernale. En effet, les conditions météorologiques estivales (températures élevées) sont peu favorables à la présence du nitrate d'ammonium du fait de son caractère semi-volatile. A l'inverse, le sulfate d'ammonium est stable en phase particulaire (d'où sa contribution relativement stable entre les 2 périodes).

Les **poussières minérales ont des contributions et des concentrations plus faibles lors de la campagne hivernale**. Les poussières minérales, estimées à partir des concentrations en calcium et en sodium, sont présentes en concentration plus élevée lors de la campagne estivale. A cette saison, la source majoritaire pour ce composé ne semble pas être naturelle (comme il est habituel de rencontrer) ce qui indique une source liée à des activités anthropiques (exemple d'activités de chargement/déchargement au niveau de la zone portuaire). Des variations non homogènes sont constatées pour certaines journées.

Des compositions moyennes similaires pour les 4 sites avec des spécificités par site.

Le **site Police** est celui qui présente les plus fortes concentrations en sels marins et la contribution la plus forte durant la campagne estivale induisant une influence maritime plus importante.

La **station Rocabey** est le site le plus impacté par les poussières minérales dans les PM10 en contribution et en concentration en période estivale. Notons également que la station Rocabey présente une faible contribution et concentration en carbone élémentaire lors des 2 campagnes ce qui traduit une faible influence des sources de combustion.

Au niveau du **site Vélodrome**, les plus fortes concentrations en matière organique et carbone élémentaire sont constatées en période hivernale ce qui implique une influence des phénomènes de combustion, plus marquée que pour les autres sites. Cela est cohérent avec l'environnement de ce site : densité de population plus élevée et des axes routiers à proximité.

Le **site Ormeaux**, en lien avec les plus faibles niveaux en PM10, est celui qui présente la part non déterminée la plus faible de cette étude (2% en moyenne) et une part de matière organique la plus élevée des 4 sites (35%) mais pas en concentration.

Mesure de l'ammoniac pendant la campagne

Indépendamment des saisons, les plus fortes concentrations horaires en ammoniac observée à la station Rocabey

Les niveaux de fond (caractérisés par les médianes) sont similaires entre les deux saisons pour l'ensemble des 4 points de mesure (compris entre 3 et 3,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et proches des niveaux de fond de la station rurale nationale de centre Bretagne (station Kergoff). Les moyennes en ammoniac sont supérieures aux médianes pour l'ensemble des sites avec des écarts relatifs de 8% (site Police) à 53% (station Rocabey) en période estivale et de 33% (site Ormeaux) à 47 % (site Police) en période hivernale. Ces écarts traduisent des concentrations horaires ponctuellement élevées. A noter que les maximums horaires, sur chacun des sites, ne sont pas observés à des dates communes ce qui traduit des influences ponctuelles localisées.

La variation saisonnière est constatée avec des concentrations moyennes plus élevées pour les sites Police (+36%) et Vélodrome (+28%), accompagnées d'une distribution des données horaires marquée pendant la campagne hivernale par rapport à la campagne estivale.

Les moyennes annuelles estimées en ammoniac, à Saint-Malo, sont supérieures (de 4% pour le site Ormeaux à 22% pour la station Rocabey) à celle de la station rurale nationale Kergoff.

Le site Ormeaux est celui qui présente la plus petite moyenne (4,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) des 4 sites de Saint-Malo soit un écart relatif de -15% par rapport à la station Rocabey (4,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Toutefois ponctuellement, lors de la campagne hivernale, de fortes concentrations horaires en ammoniac sont mesurées sur ce site.

Influence de sources locales anthropiques affectant chacun de sites en fonction des conditions de vent

Les profils moyens journaliers de chacun des sites présentent des augmentations ponctuelles à des heures qui varient en fonction des saisons. Le site Ormeaux est influencé en période estivale alors que les sites Police et Vélodrome sont impactés en hiver et la station Rocabey présente un profil atypique quelle que soit la saison.

Les roses de pollution NH₃ sont différentes pour chacun des points de mesure avec des concentrations variables selon les sites et en fonction des saisons. Cependant, indépendamment des saisons, les 4 roses de pollution mènent à une convergence du secteur dominant en direction de la ZI.

Des données dans le cadre de cette étude qui n'atteignent pas les concentrations rencontrées dans l'historique

Depuis le début des mesures d'ammoniac au niveau de la station Rocabey, de fortes concentrations horaires en ammoniac supérieures à 300 µg/m³ (août 2022, mars 2025, octobre 2025) ont déjà été mesurées. Cet historique traduit la forte variabilité temporelle des niveaux d'ammoniac rencontrés à Saint-Malo, et non mise en avant par cette étude. Cependant, les constats révèlent des niveaux ponctuellement élevés pour les 3 autres sites Police, Vélodrome et Ormeaux (en fonction des saisons, des conditions météorologiques au moment des émissions), il est donc probable que si de telles concentrations ont déjà été mesurées à la station Rocabey des niveaux supérieurs, si ce n'est égaux, ont pu être atteints dans d'autres quartiers de Saint-Malo.

Analyse de la composition chimique journalière des PM10

L'analyse des données sur une base journalière permet d'étudier la contribution de chacun des composés sur un pas de temps journalier ; échelle temporelle qui correspond également à une valeur limite réglementaire pour les PM10. Il est ainsi possible avec l'étude des roses de pollution de caractériser les sources et les influences des niveaux de PM10.

Une influence naturelle commune

L'influence maritime se traduit par la présence de sels de mer qui peuvent représenter jusqu'à plus de 70% des concentrations journalières en PM10. Les embruns marins (par vent de ouest à nord) sont ponctuellement plus marqués pour la station Rocabey ou encore au niveau du site Police (du fait de la proximité au littoral).

Les influences anthropiques sont multiples à l'échelle de la ville de Saint-Malo, aux sources urbaines 'habituelles' (trafic, chauffage résidentiel notamment) s'ajoutent les émissions des activités portuaires ou de la zone industrielle.

Des influences locales ponctuelles par site

La **station Rocabey** présente une influence anthropique par vent faible d'un large secteur sud. Une influence de la zone portuaire semble visible avec des concentrations en poussières minérales qui pourraient être liées à des chargements/déchargements, stockage de matériaux. Les niveaux en ammoniac semblent être soumis à une influence anthropique ponctuellement, soit par des vents de sud-ouest ou par des vents de sud-est, entraînant probablement l'influence de la zone portuaire et de la ZI selon les conditions de vents et des activités de chacune.

Le site Vélodrome semble être influencé dans les concentrations en PM10 par les activités anthropiques potentiellement localisées dans le secteur du port par vent de nord-ouest et qui ont

sont liées à la présence de poussières minérales dans les PM10. Il s'ajoute également ponctuellement les émissions issues du chauffage résidentiel et des transports avec la présence de carbone élémentaire et de matière organique du fait de la densité de population environnante. Lors de la campagne hivernale, les concentrations en ammoniac semblent être impactées par le secteur ZI de façon ponctuelle.

La **site Police**, par sa proximité à la zone portuaire, présente ponctuellement une augmentation des PM10 qui peut être associée aux activités de cette zone. De plus, les émissions des activités anthropiques urbaines impactent les PM10 avec la présence ponctuelle de carbone élémentaire et de matière organique. En période hivernale, le secteur ZI influence, certains jours, les concentrations en ammoniac.

Le **site Ormeaux**, localisé dans un environnement moins urbanisé, plus en hauteur et plus distant du littoral, est moins impacté par l'influence naturelle maritime dans les niveaux de PM10 ainsi que par activités urbaines (trafic ou encore chauffage résidentiel). L'influence de la ZI sur les niveaux d'ammoniac a été constatée par vent de sud-ouest cependant les niveaux de PM10 pour ce site ne semble pas influencés par cette zone d'activités.

Limites

Exploitation des données Météo France et non des données météorologiques aux points de mesure

Les données météorologiques considérées dans cette étude et exploitées, notamment la direction et les vitesses de vent, sont celles mesurées au niveau de la station Météo France localisée à Dinard. Ainsi des conditions de vent légèrement différentes peuvent être présentes au niveau de la commune de Saint-Malo ce qui peut rendre quelques explications de ce rapport approximatives.

Deux équipements conformes pour la mesure des particules fines

Les mesures PM10 en continu sont issues d'un analyseur BAM à la station Rocabey et d'analyseurs Fidas pour les 3 autres sites de mesure (Police, Vélodrome et Ormeaux) dans le cadre de cette étude. Il s'agit de méthodes de mesure différentes qui sont malgré tout approuvées par le LCSQA pour la mesure réglementaire des particules fines dans l'air ambiant. L'inter-comparaison de ces 2 méthodes de mesure a déjà été réalisée par Air Breizh, notamment au niveau de la station Macé à Brest. Les corrélations BAM/Fidas étaient satisfaisantes ($R^2 > 0.9$) avec un écart de l'ordre de 10% entre les moyennes des deux appareils sur la période de l'essai (environ 3 mois du 25/01 au 20/04).

Une part indéterminée significative qui explique parfois la différence de masse entre les sites

La comparaison de la somme des espèces chimiques analysées en laboratoire à la concentration en PM10 mesurée (par analyseur) met en avant une différence de concentration.

Différentes explications sont possibles :

- aux composés non analysés (exemple des métaux lourds),
- aux incertitudes sur la masse mesurée par la méthode en continu (Fidas ou BAM),

- aux incertitudes liées au choix des facteur de conversion (exemple du facteur de 1.75 entre le carbone organique (OC) et la matière organique (OM) ou encore de la formule pour estimer les poussières minérales),
- à la quantité d'eau présente dans les particules (exemple des sels marins) mais non prise en compte lors de l'analyse chimique alors qu'elle incluse dans les mesures de masse totale,
- aux composés semi-volatils mesurés par les analyseurs automatiques mais qui ne sont plus présents sur les filtres au laboratoire (comme une partie du nitrate d'ammonium).

Un manque de données sur les activités

Sans connaissance sur les activités potentielles (des zones portuaires ou encore ZI), la caractérisation de la composition chimique ne permet pas de définir avec précisions les sources.

L'identification de secteurs d'émissions potentiels via la corrélation des concentrations aux données météo, la connaissance des activités aurait permis de confirmer ou non les sources suspectées.

Perspectives

La création de la ZAR « zone à risques – hors agglomération » applicable au 1er janvier 2027 impliquera la création d'une 2^{ème} station de mesure réglementaire à Saint-Malo. Il s'agira d'une nouvelle opportunité pour continuer à améliorer les connaissances sur la qualité de l'air à Saint-Malo et mieux comprendre les variations des concentrations en PM liées aux émissions locales multiples. Dans le cadre de l'évaluation préliminaire plusieurs polluants vont être mesurés dont les métaux lourds, le benzène, les HAP (par prélèvement - données manuelles) et également le SO₂, le CO (par analyseur - données automatiques).

L'amélioration des connaissances sur les activités émettrices à l'échelle de Saint-Malo (activités portuaires et zone industrielle) ainsi que sur les substances émises localement, mèneraient à affiner l'analyse menée sur la composition des PM10 et sur la localisation des influences potentielles constatées.

Références

- AFNOR. (2020). *Norme NF EN 17346, Air ambiant – Méthode normalisée pour la détermination de la concentration en ammoniac au moyen d'échantillonneurs par diffusion.* .
- Air Breizh. (2020). *Niveaux de concentrations et composition des particules PM10 à Saint-Malo.*
- Air Breizh. (2021). *Campagne de mesure de l'ammoniac en Bretagne.*
- Air Breizh. (2023). *Campagne de caractérisation chimique des PM2,5 et suivi de l'ammoniac.*
- Air Breizh. (2024). *Port de Brest, Campagne de mesure de la qualité de l'air dans le port et ses environs.*
- Air Breizh. (2025). *Bilan des mesures d'ammoniac et de particules fines PM10 sur le territoire pilote, ABAA- Life 2021.*
- Air Breizh. (2025). *Étude de l'impact du chauffage au bois sur la qualité de l'air à Rennes Métropole - Campagne de mesure.*
- Air Breizh. (février 2025). *Exploitation des mesures en continu d'ammoniac dans l'air ambiant à la station Rocabey (juin 2024 - décembre 2024).*
- Air Breizh. (janvier 2024). *Port de Brest (29) - Campagnes de mesure de la qualité de l'air dans le port et ses environs .*
- Air Breizh. (juillet 2024). *Exploitation et valorisation des mesures en continu d'ammoniac dans l'air ambiant à la station Rocabey (Novembre 2021 – Février 2023).*
- Air Breizh. (septembre 2024). *Etat initial de la qualité de l'air – Zones d'Aménagement Concerté de Gaulle et Housaye à Saint-Malo.*
- ANSES. (2018). *Élaboration de VTR aiguë, subchronique et chronique par voie respiratoire pour l'ammoniac.*
- ANSES. (2021). *Valeurs guides de qualité de l'air intérieur : l'ammoniac.*
- Atmo Normandie et Atmo Hauts-de-France. (2022). *Caractérisation des particules sur la zone littorale des Hauts-de-France et de la Normandie, N°01/2021/SZH/VO.*
- Atmo Normandie, Atmo Hauts-de-France. (2022). *Rapport d'étude n°2400.001, Caractérisation des particules sur la zone littorale des Hauts-de-France et de la Normandie.*
- INRS. (s.d.). *Fiche toxicologique n°16, Ammoniac et solutions aqueuses.*
- J.-E. Petit, O. F. (2017). A user-friendly tool for comprehensive evaluation of the geographical origins of atmospheric pollution: wind and trajectory analyses. *Environmental Modelling and Software*, 183-187.
- LCSQA. (2006). *Analyse statistique des données de PM2,5 en milieux urbain et périurbain.*
- LCSQA. (2020). *Evolution sur le long terme de la composition chimique des PM2,5.*

XVII. ANNEXES

XVII.1. Présentation d'Air Breizh

a) Présentation générale

La surveillance de la qualité de l'air est assurée en France par des associations régionales, constituant le dispositif national représenté par la Fédération ATMO France.

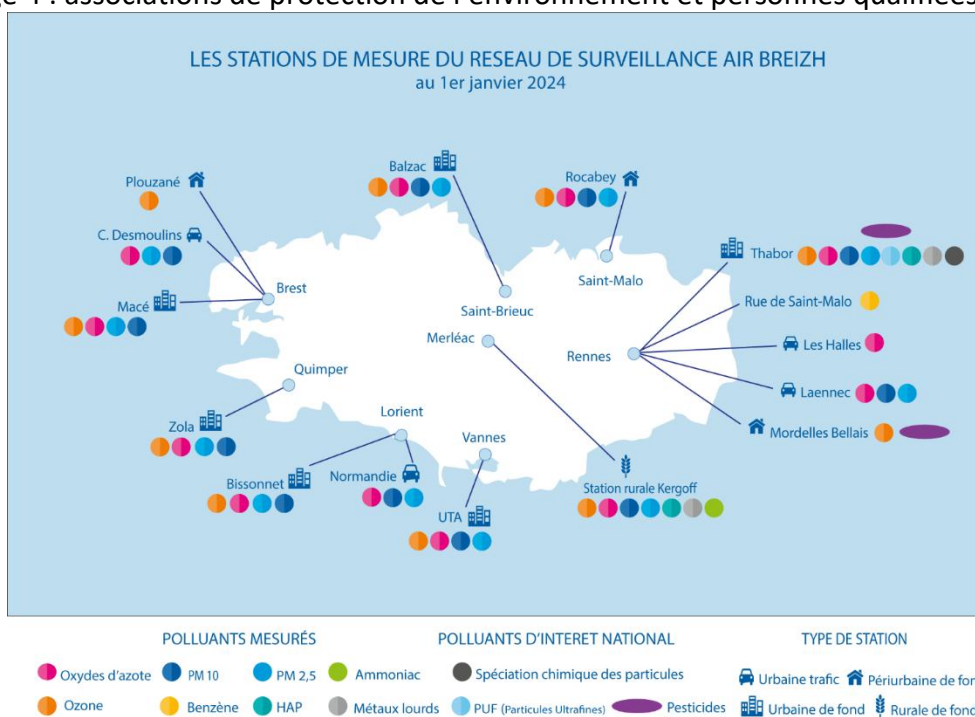
Ces organismes, agréés par le Ministère de la Transition écologique et solidaire, ont pour missions de base, la mise en œuvre de la surveillance et de l'information sur la qualité de l'air, la diffusion des résultats et des prévisions, et la transmission immédiate au Préfet et au public, des informations relatives aux dépassements ou prévisions de dépassements des seuils de recommandation et d'information du public et des seuils d'alerte.

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

Le réseau de mesure s'est régulièrement développé et dispose en 2024, de 14 stations de mesure (cf carte ci-dessous), réparties sur le territoire breton, ainsi que d'un laboratoire mobile, de cabines et de différents préleveurs, pour la réalisation de campagnes de mesure ponctuelles.

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

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



b) Missions

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

c) Un observatoire régional de la qualité de l'air

La surveillance de la qualité de l'air pour les polluants réglementés est assurée via **des stations de mesures réparties au niveau des grandes agglomérations bretonnes**. Ce dispositif comptant une quarantaine d'analyseurs en continu, est complété par d'autres outils comme **l'inventaire spatialisé des émissions** et **la modélisation**, qui permettent d'assurer une meilleure couverture spatiale de notre région.

XVII2. Résultats de l'étude ZAC Houssaye /CDG : état initial de la qualité de l'air

Les **informations ci-dessous** sont issues du rapport sur l'Etat initial de la qualité de l'air dans le cadre de la création de deux Zones d'Aménagement Concerté (dites ZAC) du Général de Gaulle (CDG) et de la Houssaye.

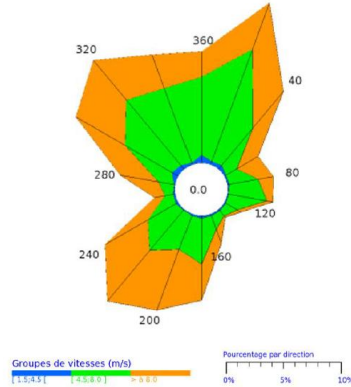
Trois points de mesures ont été considérés : ZAC de la Houssaye (au niveau de l'arrêt de bus Croix Désilles) ; ZAC Charles De Gaulle - CDG (sur un parking de la zone d'activité) et la station urbaine de fond Rocabey (intégrée au dispositif réglementaire)

Les polluants mesurés dans le cadre de cette étude sont le dioxyde d'azote (NO₂), les particules fines PM10 et PM2,5 et l'ammoniac (NH₃). Au niveau de la station Rocabey et du site CDG, des prélèvements PM10 sur filtre ont élégamment été réalisés pour l'analyse de la composition chimique en laboratoire.

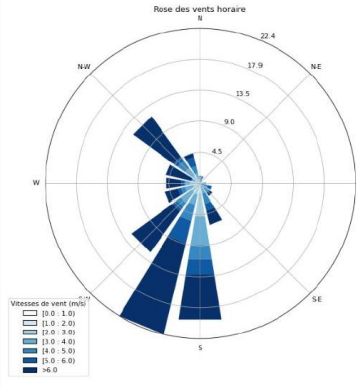
Pour rappel, les périodes de campagne sont les suivantes :

- Campagne hivernale : du **22/03/2024 au 18/04/2024**
- Campagne estivale : du **16/05/2024 au 14/06/2024**

Campagne hivernale

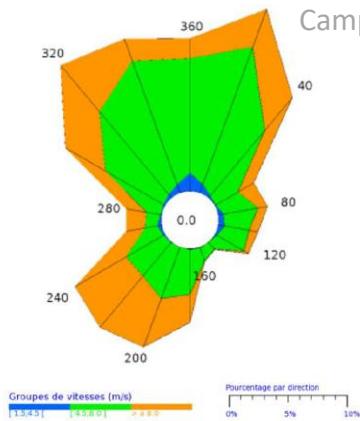


Rose des vents – station Météo France Dinard - normale mensuelle 1991-2020 (mars)

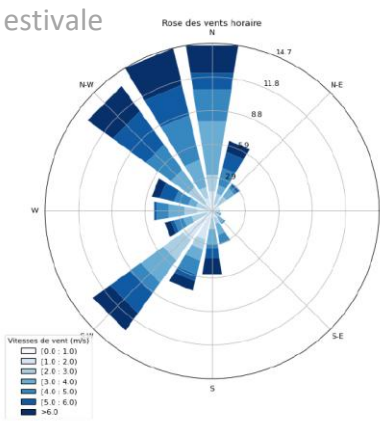


Rose des vents campagne hivernale (22/03 au 18/04/2024) – station Météo France Dinard

Campagne estivale



Rose des vents – station Météo France Dinard - normale mensuelle 1991-2020 (mai)



Rose des vents campagne estivale (16/05 au 14/06/2024) – station Météo France Dinard

Les conditions de vents rencontrées (cf roses de vent ci-dessus) pendant cette campagne sont assez proches des normales saisonnières excepté une absence de vents de Nord pendant la période hivernale retenue. Les conditions de température sont cohérentes avec les normales météorologiques pour les deux campagnes de mesure, la campagne hivernale présente quelques variations par rapport à la campagne estivale où les températures sont plus stables. Les précipitations ont été plus faibles pendant la campagne estivale par rapport aux normales.

➤ Mesure des particules fines (PM10, PM2,5)

Ci-dessous les résultats PM10 et PM2,5 durant l'étude ZAC Houssaye /CDG menée en 2024

Tableau 16 : Synthèse statistique des mesures en PM10(µg/m³).

PM10	Rocabey – UF*		ZAC CDG (G1/G2)		ZAC de la Houssaye (H1/H2)	
	hivernale	estivale	hivernale	estivale	hivernale	estivale
Données horaires						
1 ^{er} quartile	8,7	9,4	7,2	7,7	7,0	7,1
Médiane	13,4	13,7	10,8	10,2	10,7	9,1
Moyenne	15,0	15,1	11,2	11,7	11,2	10,8
3 ^{ème} quartile	20,0	20,0	14,5	14,0	14,6	13,2
Maximum horaire	44,3	43,3	45,7	39,2	52,8	66,1
Données journalières						
Valeur guide OMS	45 µg/m³ en <u>moyenne journalière</u>					
CE 2030	45 µg/m³ en <u>moyenne journalière</u>					
Valeur limite	50 µg/m³ en <u>moyenne journalière</u>					
Maximum journalier	12	29	17	29	19	25
Données moyennes annuelles						
Valeur guide OMS	15 µg/m³ en <u>moyenne annuelle</u>					
CE 2030	20 µg/m³ en <u>moyenne annuelle</u>					
Valeur limite	40 µg/m³ en <u>moyenne annuelle</u>					
Moyenne annuelle estimée	15		11		11	

* UF : station réglementaire Urbaine de Fond

Tableau 15 : Synthèse statistique des mesures en PM2,5 (µg/m³).

PM2,5	Rocabey – UF*		ZAC CDG (G1/G2)		ZAC de la Houssaye (H1/H2)	
	hivernale	estivale	hivernale	estivale	hivernale	estivale
Données horaires						
1 ^{er} quartile	3,3	4,0	4,0	4,2	3,7	3,9
Médiane	5,3	6,2	6,0	5,6	5,7	5,1
Moyenne	5,6	6,8	6,0	6,9	5,7	6,3
3 ^{ème} quartile	7,5	9,1	7,7	7,9	7,2	7,3
Maximum horaire	19,9	28,3	15,5	30,2	46,7	25,8
Données journalières						
Valeur guide OMS	15 µg/m³ en <u>moyenne journalière</u>					
CE 2030	25 µg/m³ en <u>moyenne journalière</u>					
Maximum journalier	9	15	9	20	10	18
Données moyennes annuelles						
Valeur guide OMS	5 µg/m³ en <u>moyenne annuelle</u>					
CE 2030	10 µg/m³ en <u>moyenne annuelle</u>					
Valeur limite	25 µg/m³ en <u>moyenne annuelle</u>					
Moyenne annuelle estimée	6		6		6	

* UF : station réglementaire Urbaine de Fond

Les concentrations moyennes et médianes observées à la station Rocabey sont supérieures à celles des 2 autres points. La moyenne en PM10 à Rocabey est 1,3 à 1,4 fois plus élevée que celles mesurées sur le point CDG et Houssaye.

Aucune variation saisonnière n'est constatée puisque les niveaux sont relativement stables entre les 2 campagnes, une moyenne identique à la station Rocabey, +0,5 µg/m³ au point CDG et -0,4 µg/m³ au point Houssaye entre la campagne hivernale et estivale. Pour l'ensemble des points les concentrations maximales journalières sont supérieures lors de la campagne estivale.

Au niveau de la ZAC De Gaulle pendant la campagne hivernale, le point de mesure a donc été très peu sous l'influence des émissions situées au Nord de la zone et notamment les rejets des installations de l'usine TIMAC.

De plus, la période de mesure dite « hivernale » a été tardive (mars/avril 24). Les mesures enregistrées à Rocabey pendant cette période sont plus proches des niveaux enregistrés habituellement en période estivale. De ce fait, il est possible que les niveaux annuels estimés à partir des deux campagnes soient sous-estimés.

Comparaison avec l'étude « spatialisation » du présent rapport

Les niveaux mesurés durant l'état initial sont inférieurs à ceux observés durant l'étude « spatialisation ».

En effet, les moyennes annuelles estimées durant l'état initial de la qualité de l'air (en 2024) sont égales à 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au niveau de la station Rocabey, 11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le site ZAC de la Houssaye et ZAC CDG alors que celles observées lors de l'étude « spatialisation » sont comprises entre 17 (site Vélodrome) et 19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (station Rocabey) pour les sites localisés dans le cœur de Saint-Malo. Ainsi **un écart de -21% est mesuré entre la moyenne annuelle estimée au niveau de la station Rocabey lors de l'état initial par rapport à l'étude spatialisation.**

Pour les PM2,5, les moyennes annuelles estimées en PM2,5 dans l'étude de l'état initial sont égales à 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les 3 sites, elles sont 2 fois inférieures aux concentrations mesurées au niveau des sites Police (12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Vélodrome (13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et de la station Rocabey (12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) durant l'étude spatialisation.

A noter que les moyennes annuelles estimées pendant l'état initial 2024 sont faibles au regard de l'historique des données.

➤ Résultats de la composition chimique des PM10

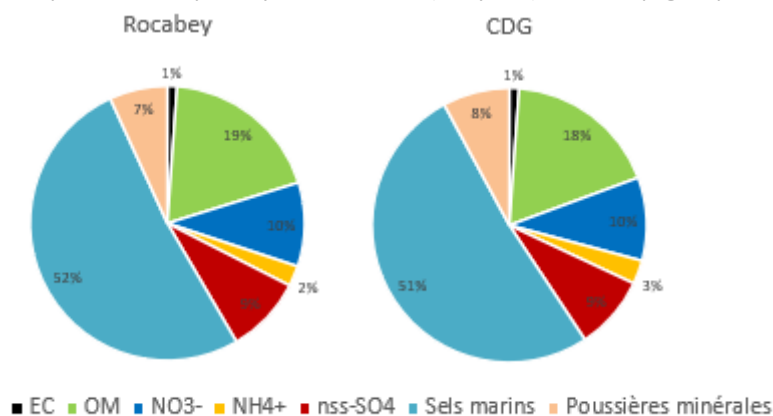
Ci-dessous les **résultats de la composition chimique PM10** des 10 filtres analysés pendant chacune des campagnes.

	Jour choisi	Secteur de vent dominant	PM10 Site CDG($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10 Station Rocabey ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Campagne hivernale	24/03/2024	NO	15,6	22,3
	25/03/2024	SSE	11,0	15,6
	28/03/2024	SO-S	13,1	17,1
	06/04/2024	SO	11,1	14,0
	07/04/2024	SO	13,2	16,5
	09/04/2024	NO à SO	14,4	23,8
	11/04/2024	SO	13,4	17,6
	15/04/2024	NO et SO	15,0	23,8
	16/04/2024	NO	17,1	25,9
	17/04/2024	NO	14,6	23,3
Campagne estivale	19/05/2024	N	13,9	12,5
	20/05/2024	NE	28,6	28,7
	21/05/2024	NO à NE	19,8	20,9
	22/05/2024	NE	13,9	17,4
	26/05/2024	SO	7,4	11,9
	27/05/2024	SO	9,1	14,6
	31/05/2024	NO	14,6	21,8

	01/06/2024	N et NE	19,1	22,7
	02/06/2024	N et NE	12,3	16,2
	10/06/2024	O et NO	12,7	18,6

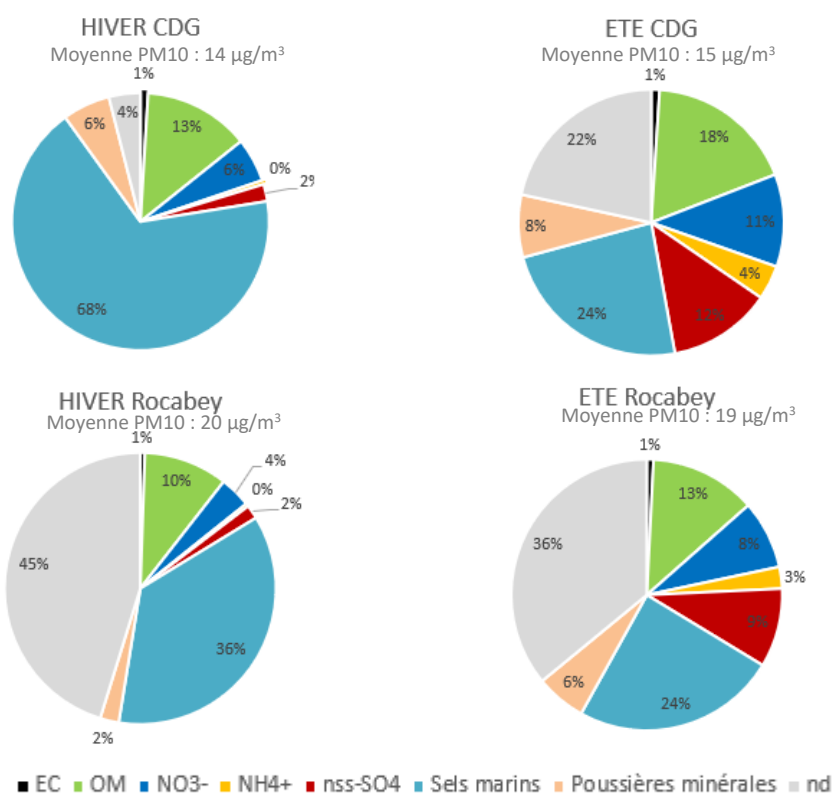
L'analyse globale de la composition chimique des PM10 analysée en laboratoire (sans considérer la part non déterminée ni la masse de PM10 mesurée via l'analyseur en continu) est réalisée en comparant les compositions moyennes pour les 2 campagnes au niveau de chacun des sites (graphiques ci-dessous). Ainsi, la **composition chimique entre les 2 sites est similaire** avec les sels marins proches de 50 % des PM10 analysées, la matière organique quasi 19%, les composés inorganiques (nitrate, sulfate et ammonium) aux environs de 20% et enfin les poussières minérales. Pour information, en moyenne dans cette étude, la part de la masse indéterminée représente respectivement 41% et 13% des PM10 mesurées au niveau de la station Rocabey et au niveau du site CDG.

Composition chimique moyenne des PM10 (analysées) des 2 campagnes par site



La variation saisonnière vis-à-vis de la composition moyenne des espèces majeures durant chacune des campagnes pour les 2 sites. **La part non déterminée est plus forte au niveau de la station Rocabey lors des 2 campagnes** (respectivement 45 % et 41% en été et en hiver contre 4% et 22 % pour le site CDG). Après la part indéterminée, **les sels marins sont l'espèce majoritaire durant les deux campagnes** pour les 2 points étudiés. La **variation saisonnière porte sur la présence d'espèces inorganiques** (nitrate, sulfate et ammonium) durant la campagne estivale avec des contributions plus importantes au point CDG.

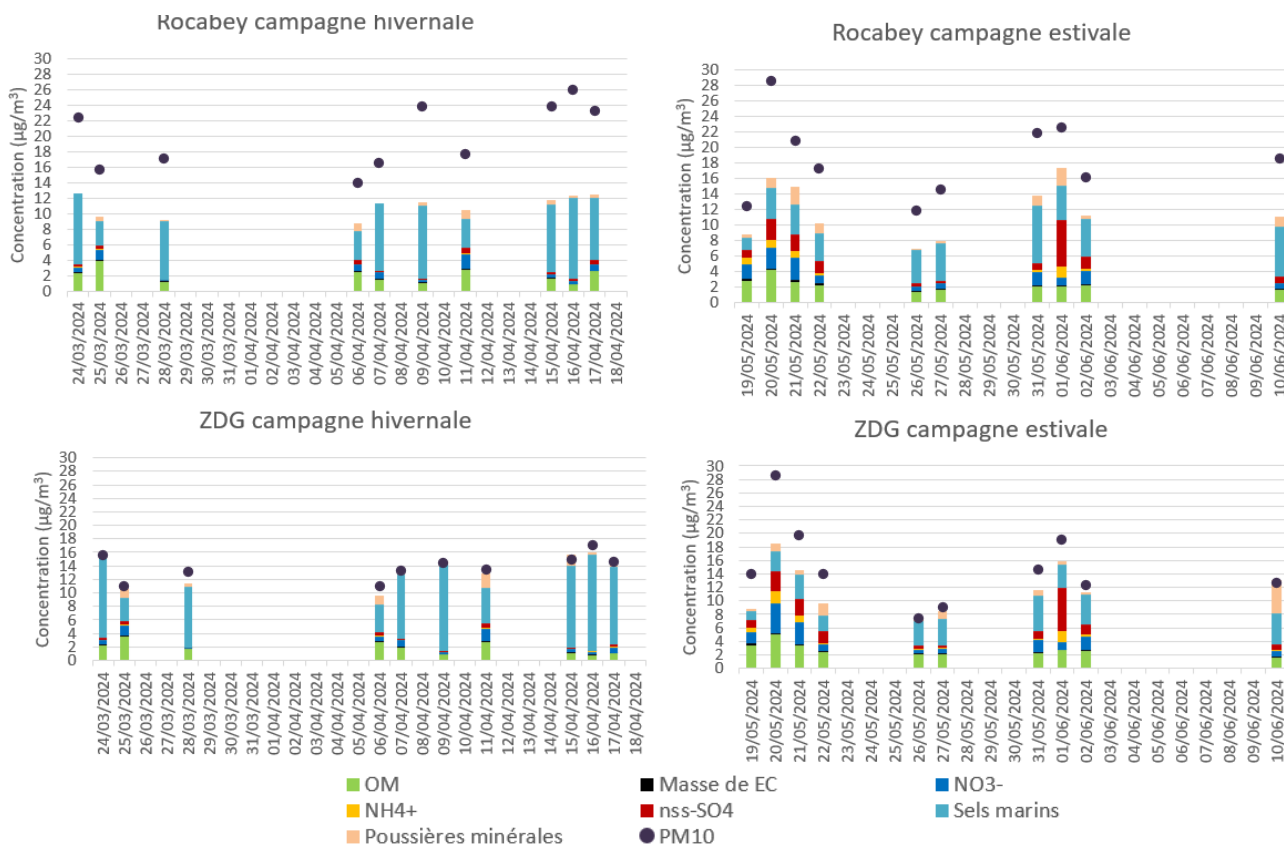
Composition chimique moyenne des PM10 mesurées par campagne et par site



Les compositions chimiques journalières sont représentées pour chacune des campagnes dans la figure ci-dessous (campagne hivernale à gauche et campagne estivale à droite). La variation journalière de la composition chimique des PM10 présente des évolutions similaires lors de la campagne hivernale avec une dominance des sels marins pour l'ensemble des jours de cette période hivernale alors que peu de vents sont issus du nord-ouest. Notons que **chaque jour les concentrations massiques moyennes journalières en PM10 sont systématiquement supérieures à celles du point CDG** avec des écarts relatifs allant de 31% à 66% soit des différences de 4 µg/m³ à 9,5 µg/m³.

En période estivale par rapport à la **campagne hivernale**, il est constaté des **concentrations plus élevées en matière organique, en sulfate (non marins), en nitrate et en ammonium**. De plus, lors de la campagne estivale quelques jours se distinguent entre les sites, avec des concentrations en poussières minérales plus fortes au niveau de la station Rocabey les 21/05, 31/05 et 01/06 avec des

vents dominants de nord-ouest. Le 10/06 c'est au point CDG que plus de poussières minérales sont enregistrées.



Pour conclure, les différences de concentrations en PM10 entre la station Rocabey et le point CDG s'explique par une part indéterminée plus importante au niveau de la station réglementaire. En effet, la mesure des composés chimiques ne révèle pas cette différence de niveaux PM10 puisque les compositions chimiques sont similaires si on ne considère pas cette différence PM10 reconstituées – PM10 mesurées. Notons une variation saisonnière au niveau des 2 sites avec des sels marins majoritaires en période hivernale et des espèces inorganiques présent en période estivale.

Comparaison avec l'étude « spatialisation »

Les constats réalisés dans le cadre de l'étude « spatialisation » du présent rapport, c'est-à-dire des sels marins en contribution plus fortes lors de la campagne estivale et des espèces inorganiques lors de la campagne hivernale, sont à l'inverse de ceux réalisés dans le cadre de l'état initial. En effet, l'état initial présente des sels marins plus importants (en contribution) durant la période dite hivernale (mars/avril) et les ions inorganiques majoritaires lors de la période estivale (mai/juin). Notons également des contributions en matière organique plus faibles dans le cadre de l'état initial. Les conditions de vent, différentes entre ces 2 études, expliquent ces constats puisque aucun vent de secteur nord-ouest n'est observé lors de la campagne hivernale spatialisation (potentiellement

porteurs de sels marins). Bien que les 2 périodes estivale et hivernale soient considérées dans chacune des études, les mois analysés sont tout de même bien distincts ce qui peut

➤ Résultats de la mesure en ammoniac

Ci-dessous les résultats des mesures en ammoniac réalisées durant la campagne au point ZAC CDG et ZAC de la Houssaye. Les **concentrations mesurées pendant l'étude 2024 sont très proches de ceux réalisés au niveau de la station rurale nationale de fond Kergoff** (en centre Bretagne). De plus, **aucune saisonnalité n'est constatée puisque les variations sont faibles entre les 2 périodes**. Les concentrations moyennes en NH₃, en période hivernale, sont comprises entre 2,6 µg/m³ (ZAC CDG) et 3,1 µg/m³ (station Kergoff) (soit 0,5 µg/m³) et entre 2,4 µg/m³ (ZAC de la Houssaye) et 3,1 µg/m³ (station Kergoff) (soit 0,7 µg/m³) lors de la campagne estivale. A noter aucune variation saisonnière au niveau de la station rurale nationale Kergoff.

Tableau 14 : Synthèse statistique des mesures en NH₃ (µg/m³).

NH ₃	ZAC CDG (G1/G2)		ZAC de la Houssaye (H1/H2)		Kergoff (RF*)	
	hivernale	estivale	hivernale	estivale	hivernale	estivale
Données horaires						
1 ^{er} quartile	1,5	1,7	1,3	1,2	1,6	2,3
Médiane	2,1	2,4	2,2	2,1	2,5	2,9
Moyenne	2,6	2,8	3,0	2,4	3,1	3,1
3 ^{ème} quartile	3,1	3,5	3,6	3,4	3,7	3,8
Maximum horaire	8,9	10,7	16,6	7,5	13,4	7,6
Données journalières						
Maximum journalier	5,5	6,4	9,7	5,1	8,8	4,8

* RF : station réglementaire Rurale de Fond

Comparaison avec l'étude « spatialisation »

Les **niveaux observés en ammoniac durant l'état initial sont inférieurs à ceux enregistrés durant l'étude dite « spatialisation »** (du présent rapport)

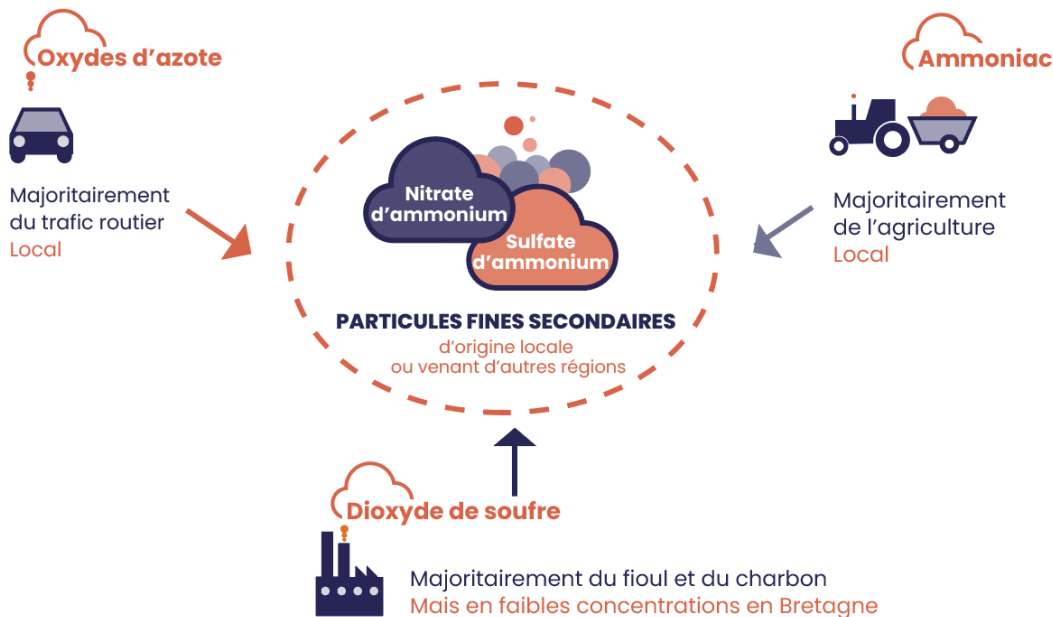
Les données observées durant l'état initial de la qualité de l'air ZAC CDG et Houssaye en moyenne par campagne sont comprises entre 2,4 µg/m³ (ZAC Houssaye - été) et 3,1 µg/m³ (station Kergoff – hiver et été). Lors de **l'étude « spatialisation », les concentrations moyennes par campagne vont de 3,9 µg/m³ (site Police et station Kergoff – été) à 5,3 µg/m³ (site Police – hiver) soit des niveaux 1,6 à 1,7 fois plus élevés que lors de l'état initial.**

De plus, peu de variations horaires (0 - 17 µg/m³) sont constatées lors de l'état initial contre des variations horaires allant de 0 à 88 µg/m³ au niveau de la station Rocabey lors de la campagne hivernale « spatialisation ». Ainsi, **les influences locales en ammoniac et spécifiques à la commune de Saint-Malo ne sont pas observées lors de l'état initial de la qualité de l'air.**

XVII3. Lien ammoniac et particules

L'ammoniac (Air Breizh, 2025) réagit avec d'autres espèces (oxydes d'azote - NOx et dioxyde de soufre – SO₂) présentes dans l'air pour former du **sulfate d'ammonium**, (NH₄)₂SO₄, puis du **nitrate d'ammonium**, NH₄NO₃. Le dioxyde de soufre forme du sulfate, lequel réagit avec l'ammoniac pour donner du sulfate d'ammonium. Ce dernier est un **composé stable dont la formation est favorisée par un ensoleillement fort**.

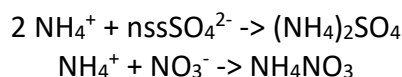
OXYDES D'AZOTE, AMMONIAC ET DIOXYDE DE SOUFRE FORMENT, EN SE COMBINANT, DES PARTICULES FINES



Source : à partir du schéma élaboré par Airparif

L'excédent d'ammoniac réagit ensuite avec le nitrate, produit à partir des oxydes d'azote, pour former du nitrate d'ammonium. La **formation du nitrate d'ammonium est un équilibre qui dépend des conditions météorologiques**. Une humidité importante (>60-70%) favorise la forme particulaire tandis que des températures hautes défavorisent sa formation. Au-dessus de 30°C, il n'est quasiment plus produit.

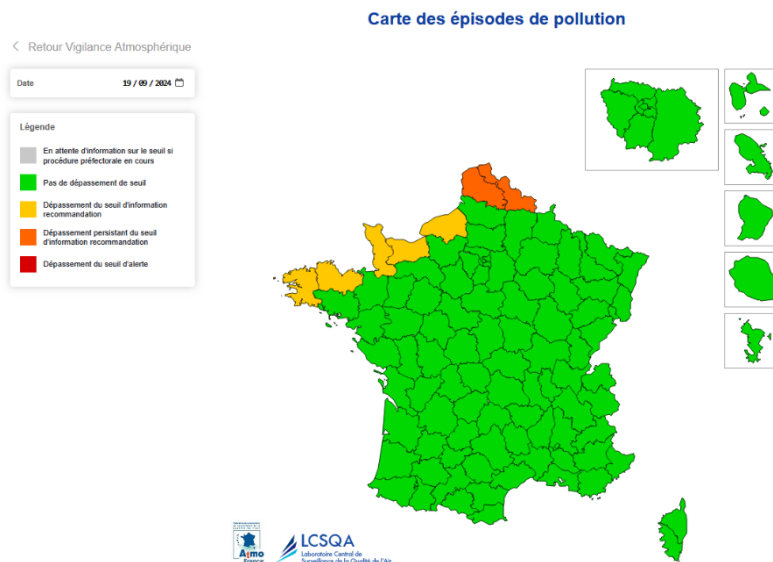
Ces composés se forment à partir des équations suivantes :



XVII4. Episode de pollution PM durant la campagne estivale

Ci-dessous est présentée la **carte des épisodes de pollution aux PM10 pour la journée du 19 septembre 2024**. (Source : LCSQA) ainsi que l'évolution des concentrations horaires en PM10 et PM2,5 au niveau des 4 points de mesure de Saint-Malo.

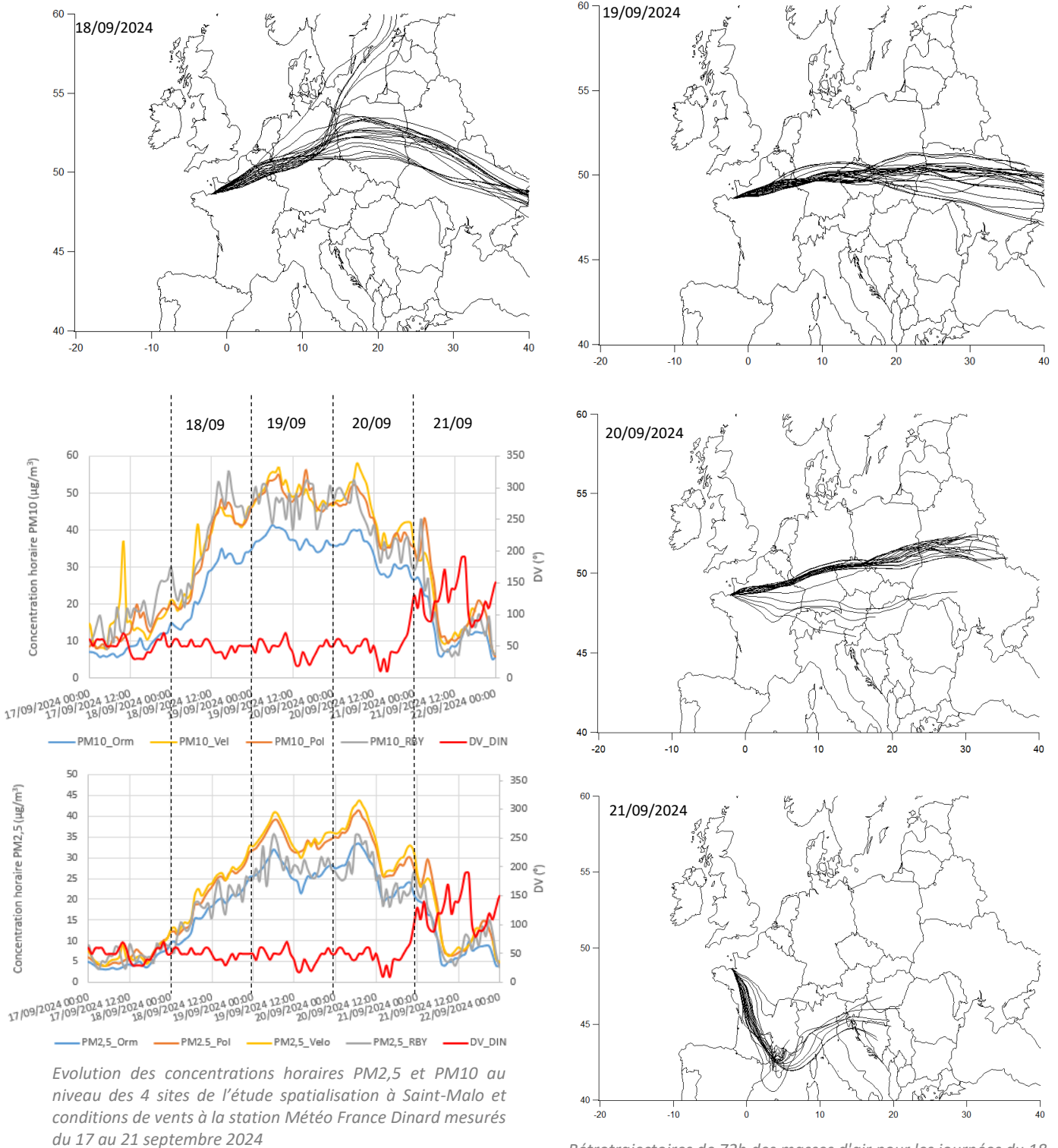
En plus des 2 départements bretons (Finistère et Côtes-d'Armor), des **départements de la Normandie** (Manche, Calvados et Seine-Maritime) ainsi que **des Hauts-de-France** (Pas de Calais et Nord) ont été concernés par cet épisode de pollution aux PM10 national. Cet **épisode est interrégional puisqu'il concerne plusieurs départements du littoral de la mer de la Manche**. Il est **lié à l'arrivée de masse d'air chargée en particules provenant du Nord-Est de l'Europe** qui s'ajoute aux émissions locales dans des conditions météorologiques peu dispersives.



L'Ille-et-Vilaine n'a pas été concerné par le dépassement du seuil information/Recommandation (IR) fixé à 50 µg/m³ (en moyenne journalière) pour les PM10. Cependant le seuil IR de 25 µg/m³ fixé uniquement dans ce département français pour les PM2,5 a été dépassé les 19 et 20 septembre 2024. En effet, les niveaux en PM2,5 ont augmenté à partir du 18 septembre avec des vents de nord-est (chargés en PM) et ont baissé dans la nuit du 20 au 21 septembre 2024 avec le changement des conditions de vent (secteur sud-est). La baisse des concentrations en PM10 est également constatée en lien avec l'évolution de la provenance des masses d'air. Les rétrotrajectoires⁷ confirment cette analyse puisque du 18 au 20 septembre, les masses d'air proviennent du nord-est et de l'est de l'Europe puis le 21 septembre, l'origine des masses d'air change avec une provenance du sud au sud-est de la France voire le nord de l'Italie.

⁷ Les rétrotrajectoires de 72h représentent le chemin parcouru par les polluants dans les 72 heures précédant leur arrivée sur le site où ils ont été mesurés. Cette représentation aide à détecter les différents lieux de départ des polluants mesurés. Les rétrotrajectoires complètent les informations des conditions de vent pour les sources lointaines

Spatialisation des niveaux de PM10 et d'ammoniac à Saint-Malo



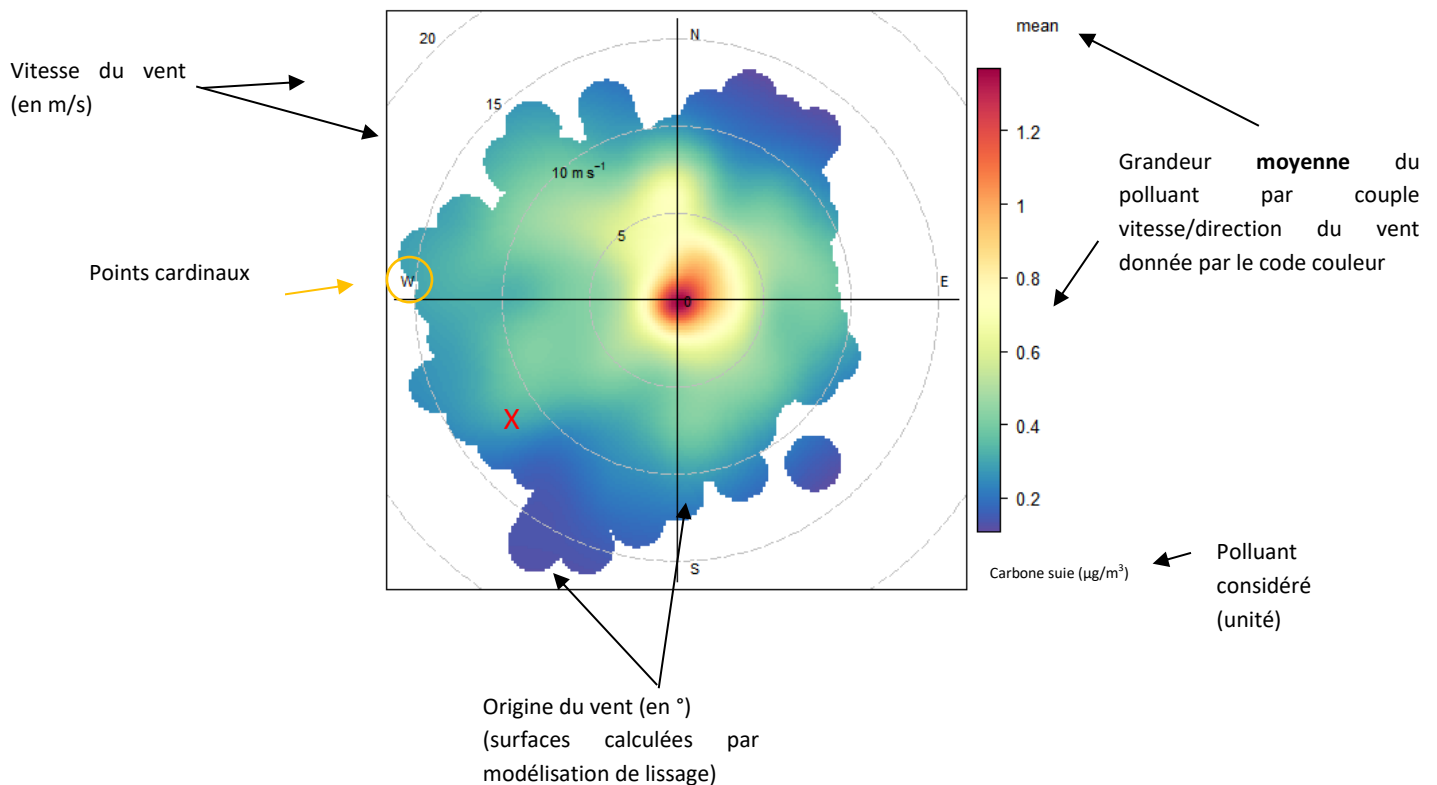
Rétrotrajectoires de 72h des masses d'air pour les journées du 18 au 21 septembre 2024 réalisées avec Hysplit (J.-E. Petit, 2017)

Le tableau ci-dessous fait la synthèse des **concentrations journalières en PM10 et PM2,5** observées les 19 et 20 septembre 2024 au niveau des 4 points de mesure de la campagne et des stations urbaines de fond du réseau de surveillance breton. Les **concentrations en rouge** sont celles qui ont donné lieu à un **déclenchement d'une procédure préfectorale** pour épisode de pollution lié à un dépassement de seuil IR pour les PM10 dans les départements du Finistère et des Côtes-d'Armor et pour les PM2,5 dans le département de l'Ille-et-Vilaine (seul département français ayant fixé un seuil IR pour ce polluant).

Moyenne journalière	Ville (département)	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		PM2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
		19/09/2024	20/09/2024	19/09/2024	20/09/2024
Station Rocabey	Saint-Malo (35)	48	41	28	26
Site Ormeaux		37	33	27	26
Site Vélodrome		50	45	35	34
Site Police		50	43	34	32
Station Thabor	Rennes (35)	-	-	29	23
Station Balzac	Saint-Brieuc (22)	51	40	26	23
Station Macé	Brest (29)	57	50	37	37

XVII5. Lecture d'une rose de pollution

Les roses de pollution sont réalisées grâce au package Openair du logiciel R.



Exemple de lecture X : Concentration moyenne en carbone suie de 0,2 – 0,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (cf échelle de couleur) pour des vents de Sud-Ouest à une vitesse d'environ 8 – 9 m/s.

XVII6. Roses de pollution PM10 – campagne estivale

Ci-dessous sont présentées les roses de pollution PM10 observées durant la campagne estivale sans que les journées concernées par l'épisode de pollution particulaire régionale voire nationale soient retirées du jeu de données ; ce sont donc les **roses de pollution PM10 « brutes »** sans correction du jeu de données lors de la campagne estivale.

Ainsi, sur ces roses de pollution PM10, **l'influence de nord-est par vent d'environ 6 m/s est clairement visible**. Cela traduit l'influence de l'épisode de pollution aux particules fines PM10 constaté sur plusieurs départements du littoral de la Manche à la mi-septembre.



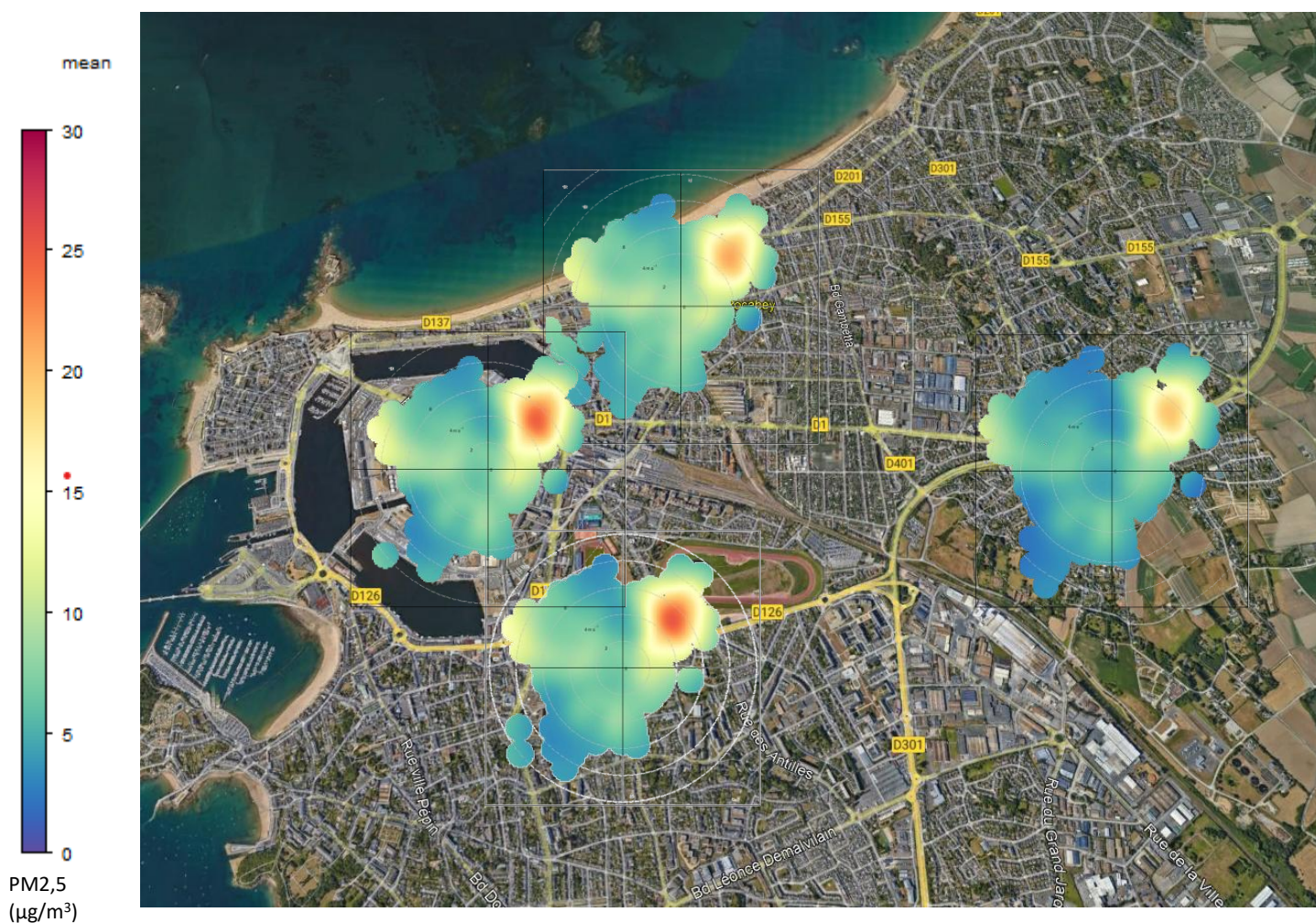
Roses de pollution PM10 brutes de la campagne estivale

XVII7. Roses de pollution PM2,5

A titre indicatif, les roses de pollution PM2,5 par campagne sont présentées ci-dessous avec pour la campagne estivale les roses brutes et les roses dites 'corrigées' sans les données du 18 au 20 septembre 2024 (sans l'épisode de pollution de septembre 2025).

Campagne estivale – roses brutes

L'influence des vents d'environ 6m/s, issus du secteur nord-est, est constatée pour l'ensemble des points de mesure en lien avec l'épisode de pollution (19 et 20 septembre). Notons l'influence urbaine visible sur les sites localisés au cœur de Saint-Malo (Police, Vélodrome et Rocabey) avec des roses présentant des concentrations moyennes légèrement plus élevées. Un impact des vents forts (> 8 m/s) de nord-ouest est constaté sur les 4 sites (moins marqué pour le site Ormeaux plus distant du bord de mer). Les **roses similaires sur l'ensemble des sites mettent en avant une homogénéité des mesures PM2,5 à l'échelle de Saint-Malo.**



Roses de pollution PM2,5 brutes de la campagne estivale

Campagne estivale – roses ‘corrigées’

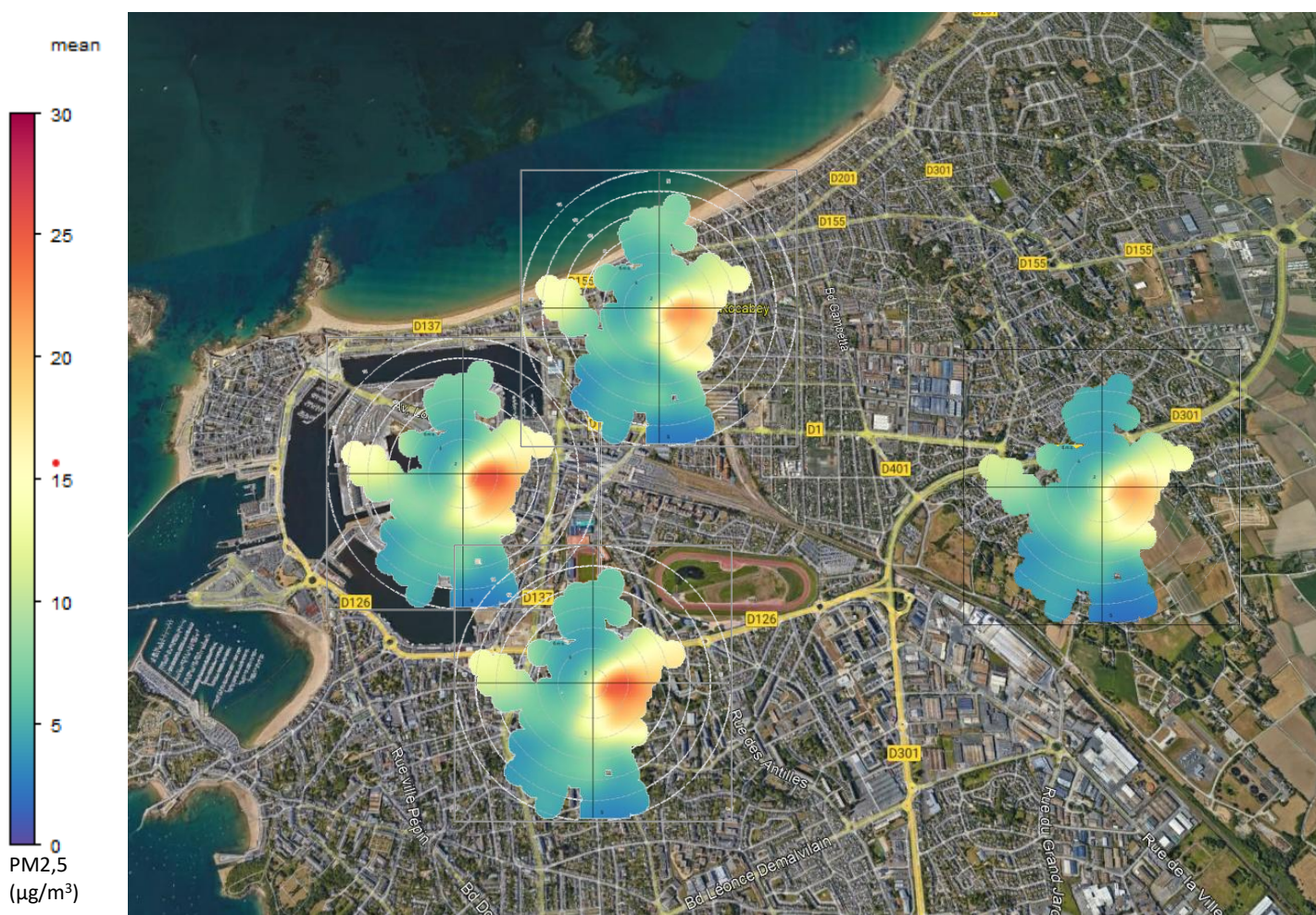
Les roses de pollution PM2,5 ‘corrigées’ (sans l’épisode de pollution de septembre 2024) présentées ci-dessous sont similaires pour l’ensemble des points de mesure. Ainsi l’influence de nord-est (liée à l’épisode de pollution de PM) constatées sur les roses brutes n’est plus présent. A noter une influence de nord-ouest pour les 4 sites de mesure mettant en avant l’influence maritime. Des concentrations plus faibles sont observées au niveau du site Ormeaux par rapport aux 3 autres sites du cœur de ville de Saint-Malo. L’influence des activités urbaines émettrices de PM2,5 est moins marquée pour ce site, plus en retrait de centre-ville.



Roses de pollution PM2,5 dites ‘corrigées’ de la campagne estivale (sans épisode de pollution PM)

Campagne hivernale

Les roses de pollution PM2,5 sont similaires pour les 4 points de mesure. Une influence de secteur est, par vents inférieurs à 4m/s, est visible pour les niveaux de PM2,5 les plus élevés. Les sites Police et Vélodrome semblent plus impactés avec des concentrations moyennes PM2,5 supérieures à celles des 2 autres sites.



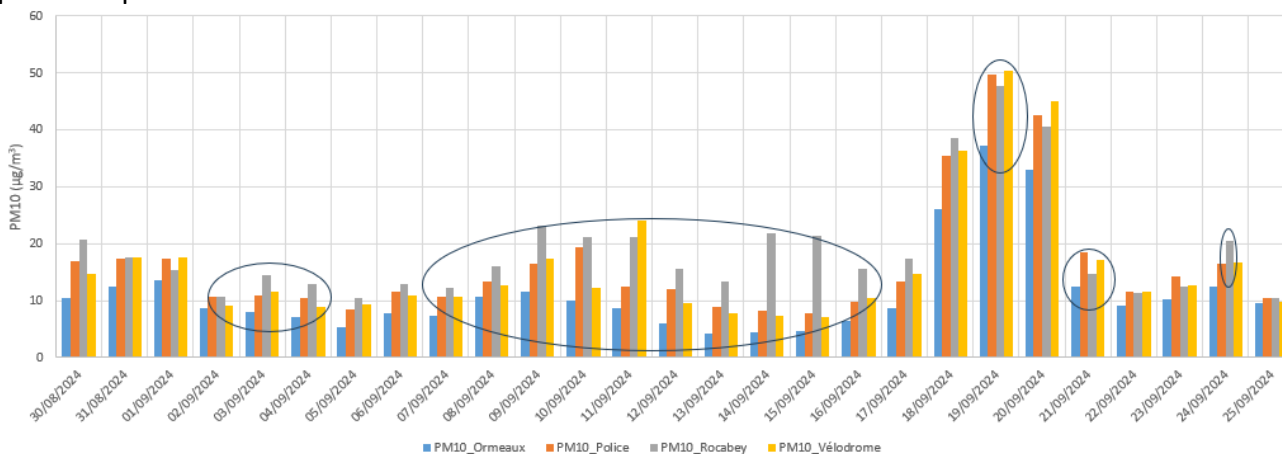
Roses de pollution PM2,5 de la campagne hivernale

XVII8. Sélection des filtres pour la spéciation chimique PM10

Caractéristiques des filtres choisis pour la spéciation chimique des PM10 – campagne estivale

Campagne estivale	Secteur de vent dominant	PM10 Site Ormeaux (µg/m³)	PM10 Site Police (µg/m³)	PM10 Site Vélodrome (µg/m³)	PM10 Station Rocabey (µg/m³)
02/09/2024	NO	8,8	11,0	9,2	10,7
03/09/2024	NNO	8,1	10,4	11,7	14,4
04/09/2024	SO à E	7,2	10,7	8,9	13
07/09/2024	SO et ONO	7,4	13,4	10,8	12,2
08/09/2024	NO	10,7	16,6	12,8	16,1
09/09/2024	SO	11,5	19,5	17,4	23,1
10/09/2024	NO	10,0	12,6	12,3	21,2
11/09/2024	NO	8,8	12,0	24,0	21,1
12/09/2024	N	6,1	9,0	9,5	15,7
13/09/2024	E large	4,3	8,2	7,7	13,4
14/09/2024	SO	4,5	7,9	7,3	21,8
15/09/2024	NE et SO	4,7	9,8	7,1	21,5
16/09/2024	NE	6,5	49,8	10,5	15,7
19/09/2024	SE	37,3	18,6	50,3	47,8
21/09/2024	NO	12,4	11,0	17,1	14,7
24/09/2024	NNO	-	-	-	20,5

Ci-dessous la répartition des prélèvements sélectionnés durant la campagne (jours entourés en noirs). Le prélèvement du 02/09/2024 du site Police n'est pas analysé en raison d'un prélèvement invalidé pour dysfonctionnement du préleveur. Le 19/09/2024 a volontairement été choisi afin d'analyser la composition chimique des PM10 lors d'une journée concernée par l'épisode de pollution particulaire.



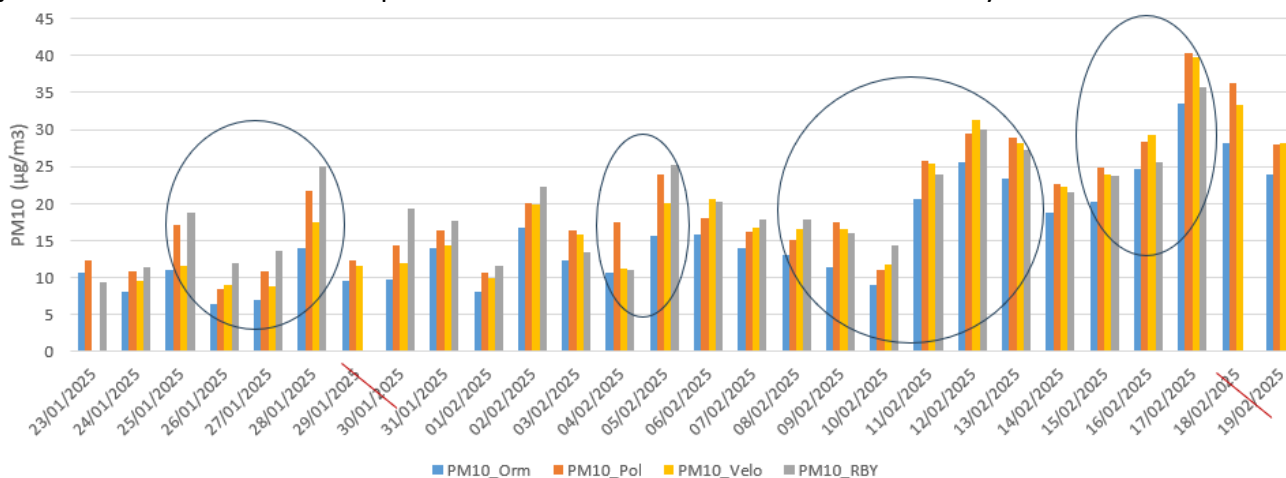
Le tableau suivant synthétise le nombre de filtres analysés en fonction de l'influence des vents sur les niveaux PM10 lors de la campagne estivale (traitement des roses journalières de PM10 par site)

Influence PM10	Site Ormeaux	Site Police	Site Vélodrome	Station Rocabey
nord nord est	1	1	1	2
sud sud-Est	2	2	3	5
sud-ouest	6	5	4	3
ouest nord-ouest	3	4	5	5
est	0	1	1	0
sans direction	3	1	1	1

Caractéristiques des filtres choisis pour la spéciation chimique des PM10 – campagne hivernale

Campagne hivernale	Exposition PM10	PM10 Site Ormeaux (µg/m³)	PM10 Site Police (µg/m³)	PM10 Site Vélodrome (µg/m³)	PM10 Station Rocabey (µg/m³)
25/01/2025	NE et S	11,1	17,2	11,5	18,8
26/01/2025	S et SE	6,5	8,5	9	12
27/01/2025	SO	7	10,9	8,9	13,6
28/01/2025	O	13,9	21,8	17,4	25,1
04/02/2025	SSE et SO	10,6	17,5	11,3	11
05/02/2025	NE et SO	15,6	23,9	20	25,2
08/02/2025	SO	13	15,1	16,5	17,9
09/02/2025	E	11,4	17,5	16,6	16
10/02/2025	NE	9	11,1	11,8	14,3
11/02/2025	SE	20,6	25,8	25,4	23,9
12/02/2025	ENE	25,6	29,4	31,3	30
13/02/2025	ESE	23,4	28,9	28,1	27,3
15/02/2025	SE	20,2	24,8	23,9	23,8
16/02/2025	E	24,6	28,4	29,3	25,6
17/02/2025	SE	33,6	40,4	39,8	35,8

Ci-dessous la répartition des prélèvements choisis (entourés en noir). Les prélèvements des 29-30 janvier et 18-19 février n'ont pas été réalisés au niveau de la station Rocabey.



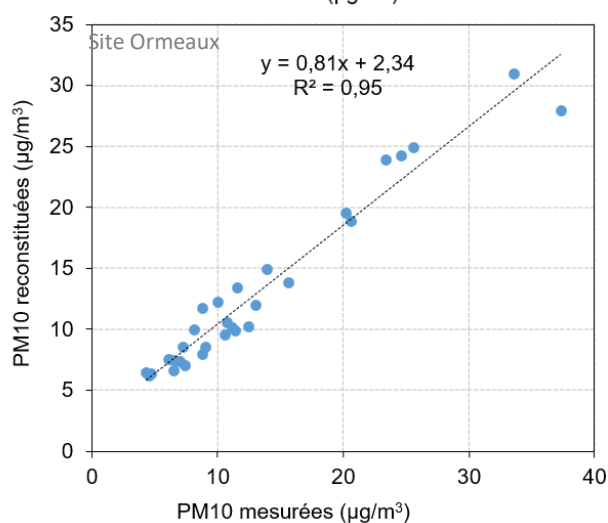
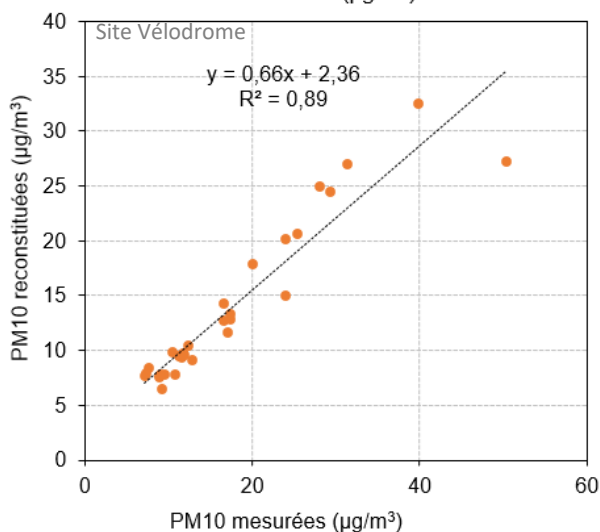
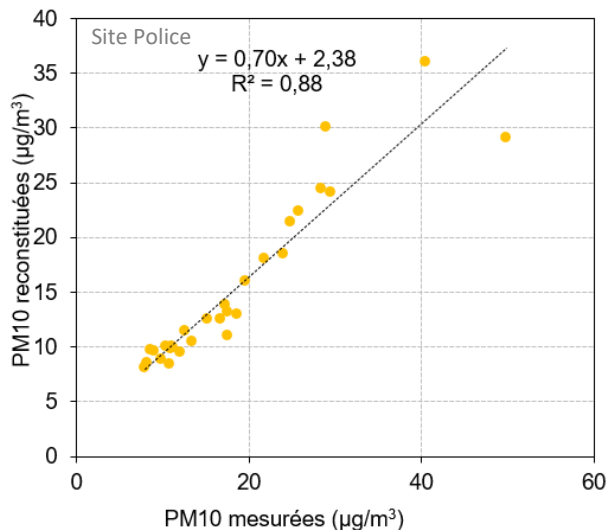
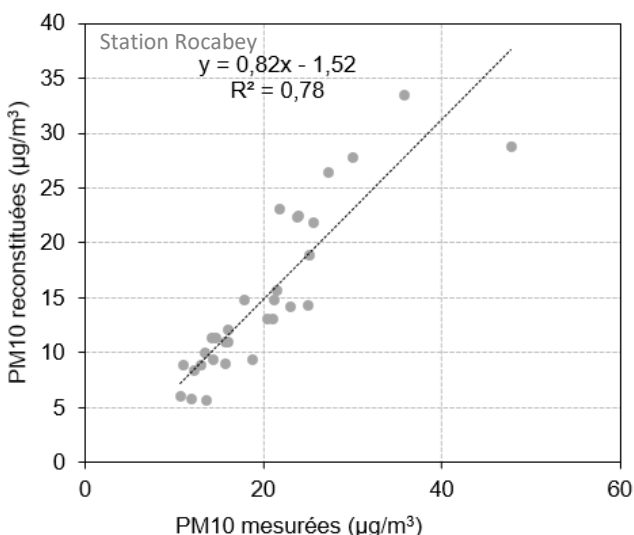
Le tableau suivant synthétise le nombre de filtres analysés en fonction de l'influence des vents sur les niveaux PM10 lors de la campagne hivernale (traitement des roses journalières de PM10 par site).

Influence PM10	Site Ormeaux	Site Police	Site Vélodrome	Station Rocabey
nord nord est	1		1	3
sud-est	5	5	5	5
sud-ouest	3	5	4	3
nord-ouest	-	-	-	-
est	3	3	3	3
sud	1	1	1	1
sans direction	2	1	1	

XVII9. PM10 reconstituées

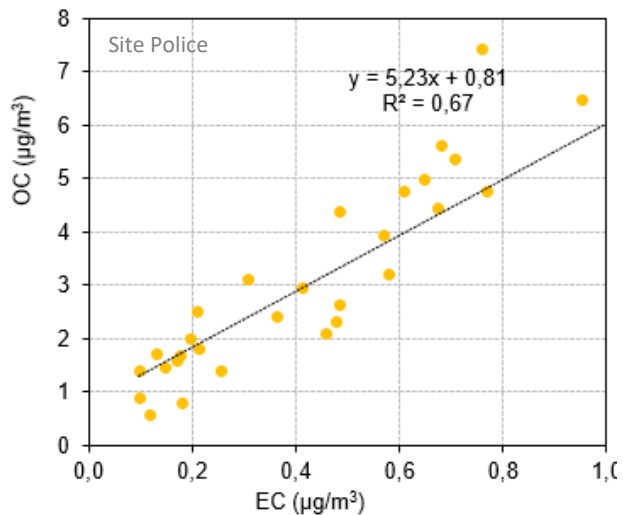
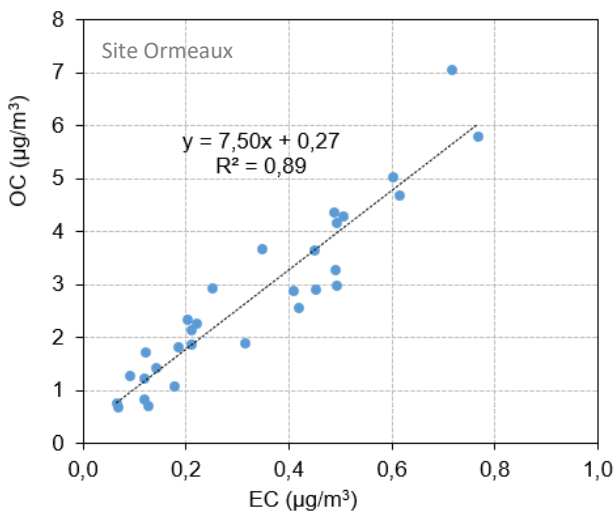
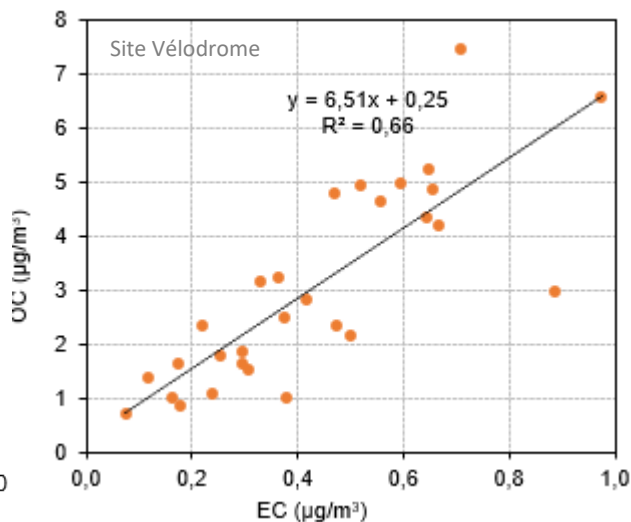
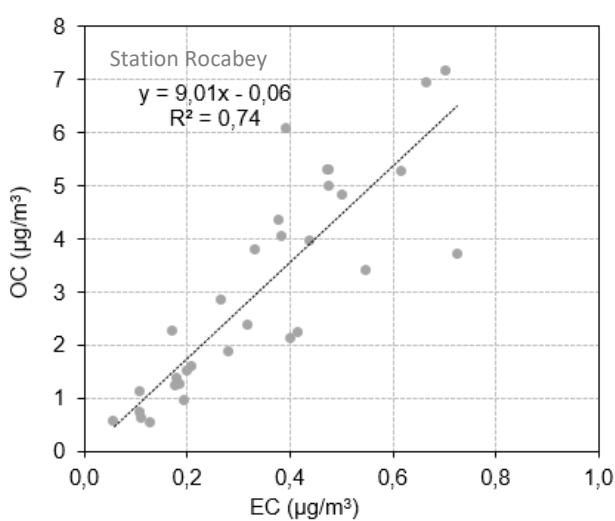
Les **résultats des analyses chimiques** sont validés en vérifiant la balance ionique (bilan des charges électriques des anions et des cations analysés) et la neutralisation de l'ammonium (corrélation des concentrations en ions ammonium avec les ions nitrates et les ions sulfates non marins – nss SO_4^{2-}) pour les différents prélèvements.

Enfin, la somme « **PM10 reconstituées** » peut être comparées à la **concentration totale massique mesurée par l'analyseur en continu**. La méthode du bouclage chimique a déjà été utilisée par Air Breizh dans plusieurs études (Brest, Saint-Malo). Ci-dessous sont présentés les graphiques des corrélations entre les PM10 mesurées et les différents constituants chimiques mesurés ou estimés (PM10 reconstituées).



XVII10. Ratio OC/EC

Les graphiques ci-après représentent les corrélations entre les concentrations en carbone organique (OC) et en carbone élémentaire (EC) lors des deux campagnes de mesure (estivale et hivernale) pour chacun des sites.



XVII11. Evolution journalière de la composition chimique des PM10

Campagne estivale

Les résultats de la composition chimique journalière des PM10 pour chacun des sites en concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) et en contribution (%) sont présentés dans le graphique ci-dessous. Des concentrations (et des contributions) plus élevées en poussières minérales sont constatées au niveau du site Police et de la station Roacey (10/09/2024), du site Vélodrome (11/09/2024) et de la station Rocabey (14/09/2024). A noter que les 14 et 15 septembre, la matière organique est présente en concentration plus élevée dans les PM10 au niveau de la station Rocabey.

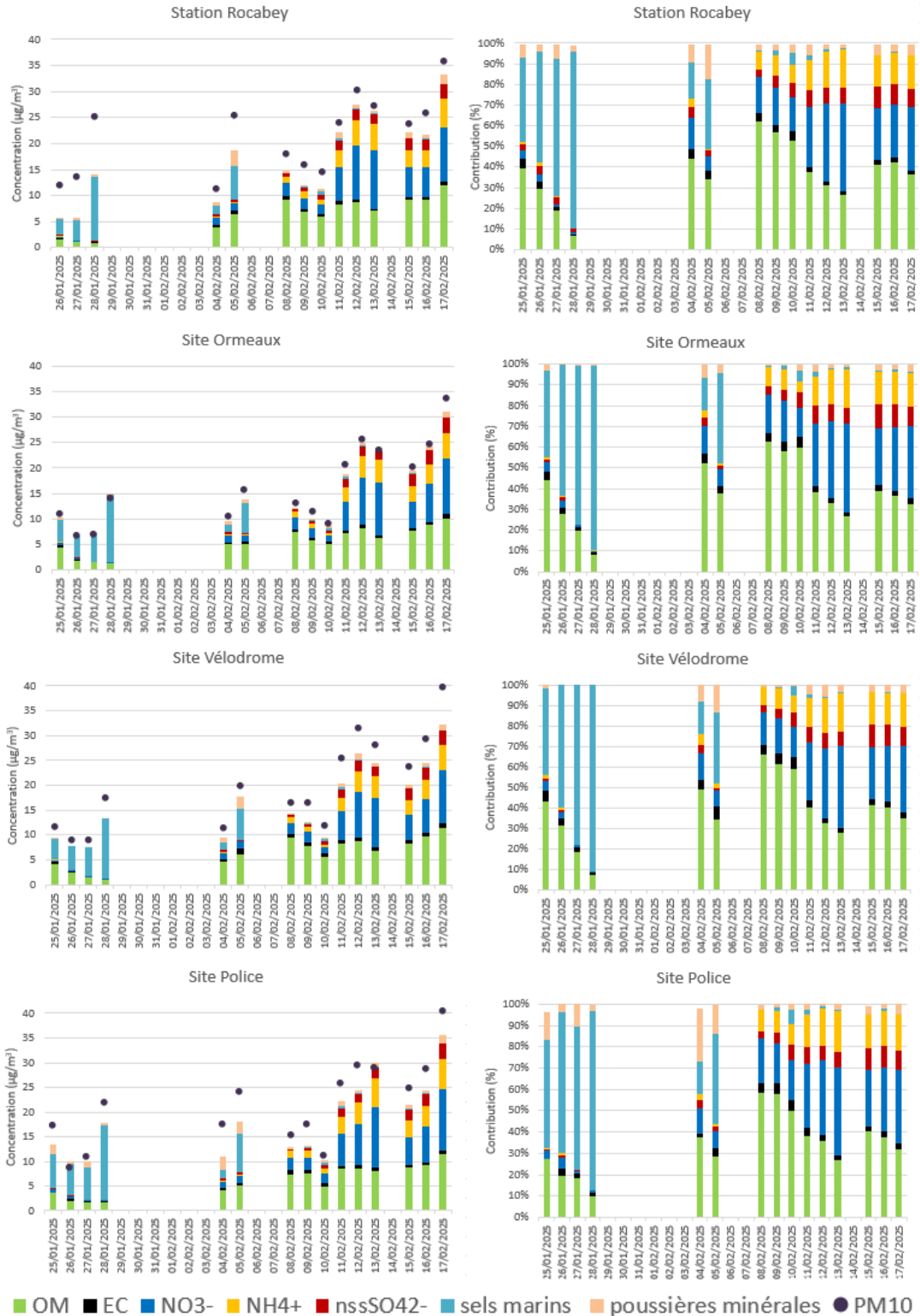


Résultats de la composition chimique des PM10 en concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (à gauche) et en contribution (%) (à droite) des prélèvements sélectionnés pendant la campagne estivale

Campagne hivernale

La figure ci-dessous représente les résultats de la composition chimique journalière des PM10 pour chacun des sites en concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) et en contribution (%). Pour l'ensemble des points de prélèvement, un **changement de composition des PM10 est constaté au fil de la campagne hivernale**. Lors des derniers jours de janvier (début de la campagne hivernale), les PM10 sont majoritairement composés de sels de mer (30 - 40%). A partir du 11 février, fin de la campagne hivernale, les concentrations journalières en PM10 sont plus élevées (supérieures à $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) avec des contributions en matière organique et en espèces inorganiques secondaires (nitrate, ammonium et sulfate) supérieures à 30 % pour la totalité des sites.

Spatialisation des niveaux de PM10 et d'ammoniac à Saint-Malo



Résultats de la composition chimique des PM10 en concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (à gauche) et en contribution (%) (à droite) des prélèvements sélectionnés pendant la campagne hivernale

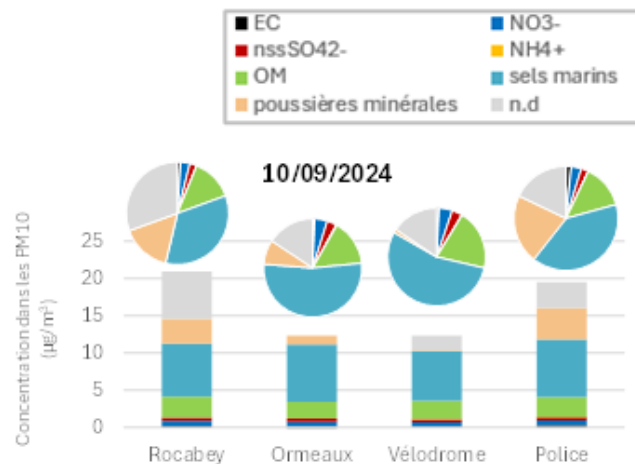
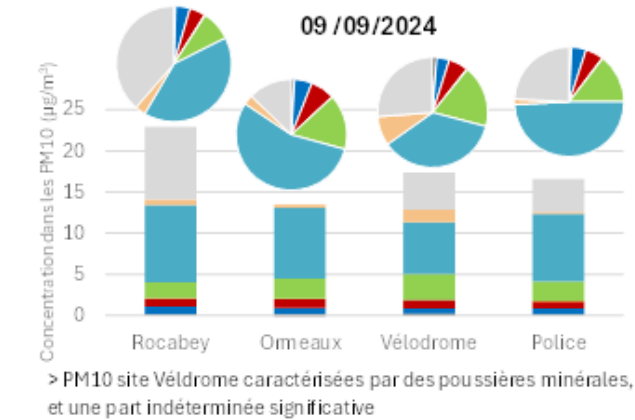
XVII12. Fiches journalières

L'analyse de **16 journées 'atypiques'** est réalisée par la suite sur un pas de journalier qui correspond à celui de la valeur limite réglementaire en moyenne journalière. Ainsi, un zoom sur les compositions chimiques journalières (en concentration et contribution) des différents sites est effectué avec en parallèle les variations des concentrations en PM10 (éventuellement PM2,5) et en ammoniac tout en considérant également le suivi des conditions de vent au niveau de la station Météo France de Dinard. Enfin, certaines roses de pollution sont présentées afin de tenter d'identifier les secteurs d'influence.

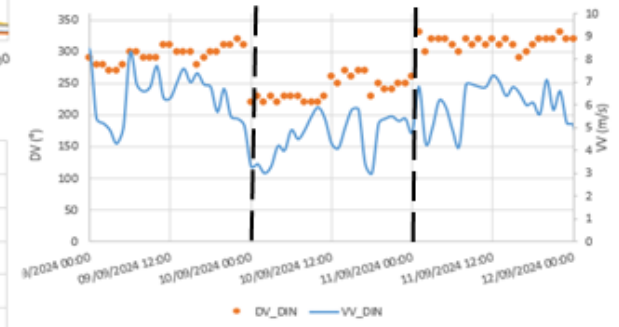
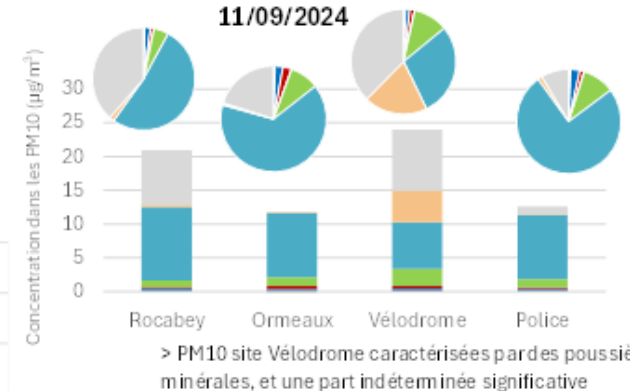
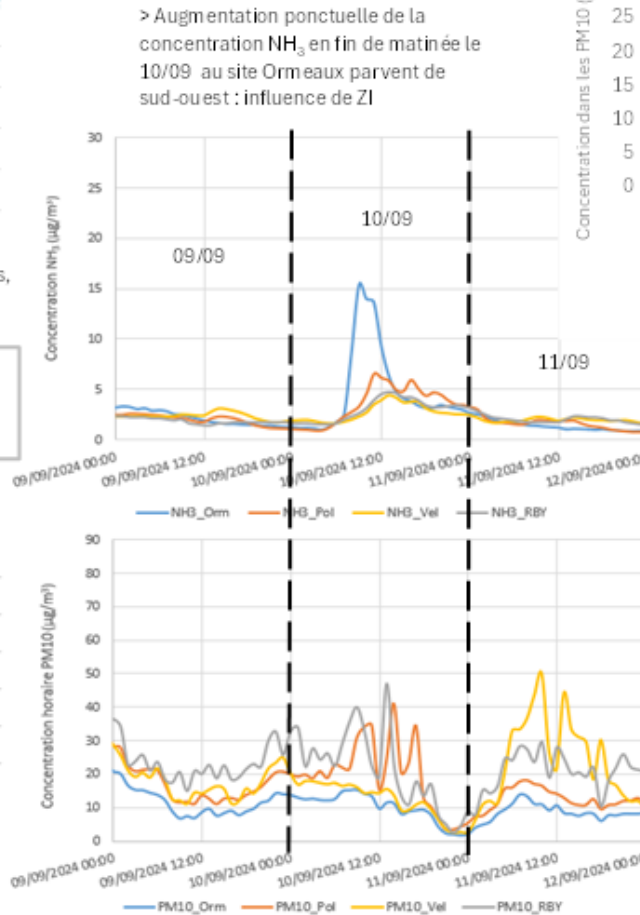
09-11/09/2024

Constat : Des variations non simultanées des concentrations PM10 entre les 3 sites localisés au cœur de Saint-Malo

le 09/09 : 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à la station Rocabey; le 10/09 : 21 et 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivement à la station Rocabey et au site Police, le 11/09 : 21 et 24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivement à la station Rocabey et au site Police



> PM10 à la station Rocabey et au site Police caractérisées par la présence de poussières minérales et une part indéterminée significative



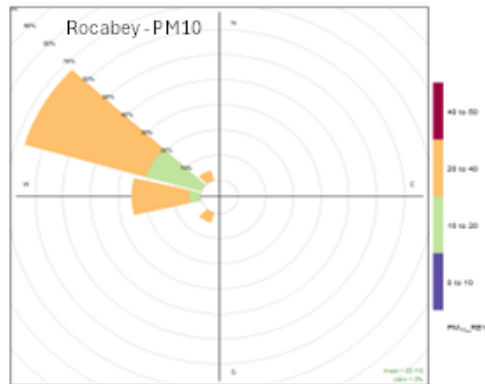
Spatialisation des niveaux de PM10 et d'ammoniac à Saint-Malo

Roses de pollution
journalières

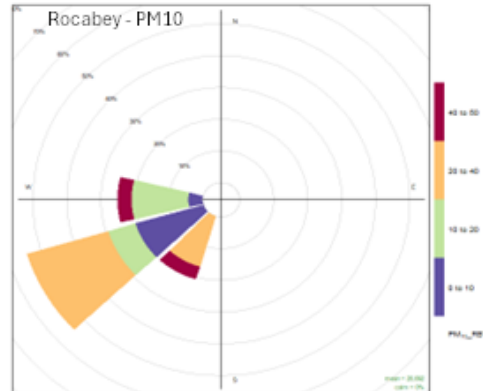
09/09/2024

10/09/2024

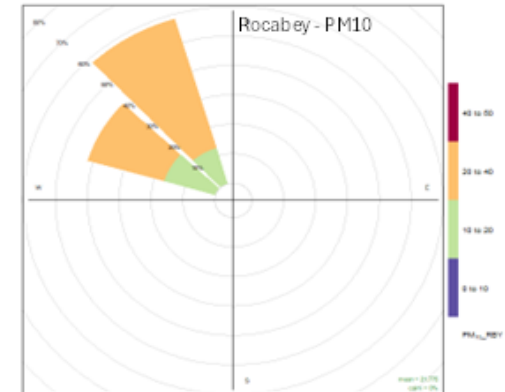
11/09/2024



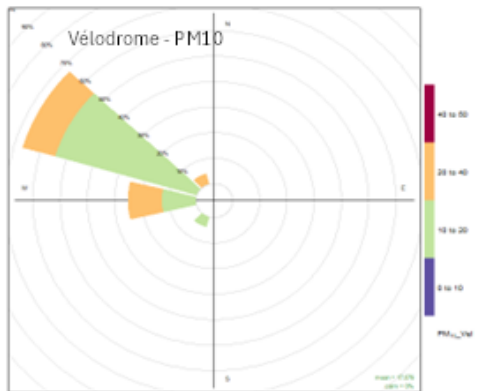
Frequency of counts by wind direction (%)



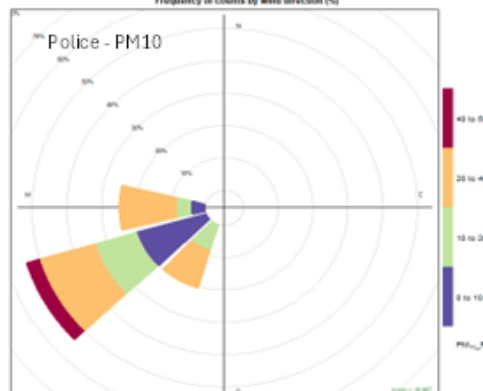
Frequency of counts by wind direction (%)



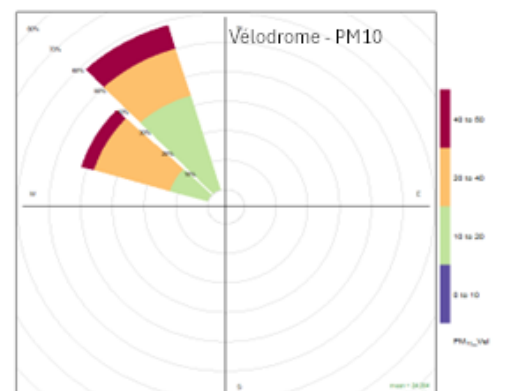
Frequency of counts by wind direction (%)



Frequency of counts by wind direction (%)



Frequency of counts by wind direction (%)



Frequency of counts by wind direction (%)

Influence naturelle maritime pour l'ensemble des sites avec des vents de nord-ouest supérieurs à 4 m/s qui entraîne la présence de sels marins dans les PM10. La station Rocabey est plus impactée le 09/09 et au niveau du site Vélodrome s'ajoute une potentielle influence du port pouvant expliquer la présence de poussières minérales dans les PM10.

Le 10/09 (vents de sud-ouest inférieurs à 6 m/s) s'ajoute une influence de la zone portuaire avec la présence de poussières minérales au niveau du site Police et de la station Rocabey. A noter l'augmentation des concentrations en NH₃ en fin de matinée au niveau du site Ormeaux avec des vents de sud-ouest : influence de la zone industrielle probable.

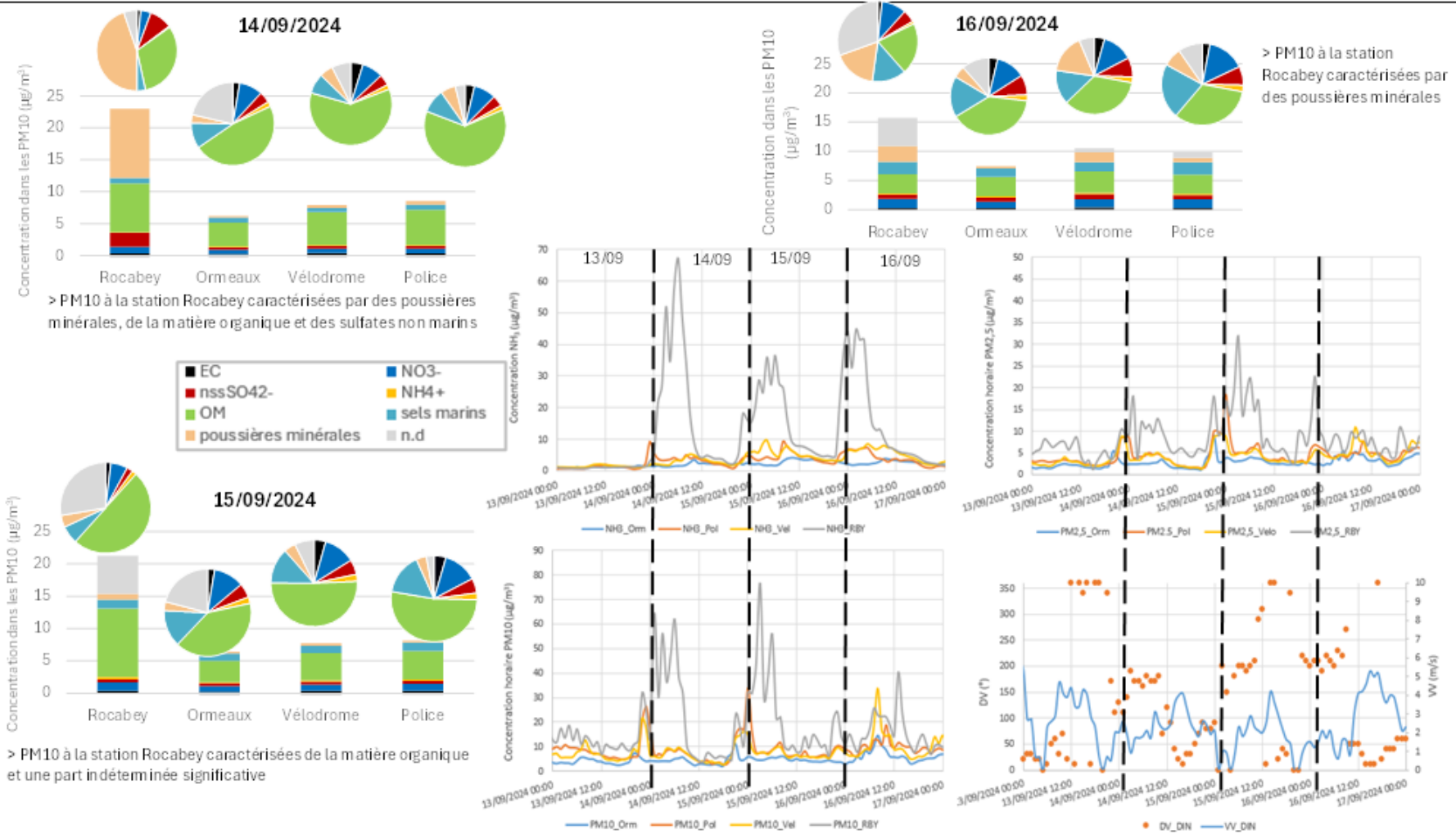
Le 11/09, le site Vélodrome présente des poussières minérales avec des vents issus du nord-ouest qui peuvent être liées à une influence des activités portuaires ou naturelle.

Spatialisation des niveaux de PM10 et d'ammoniac à Saint-Malo

14 - 16/09/2024

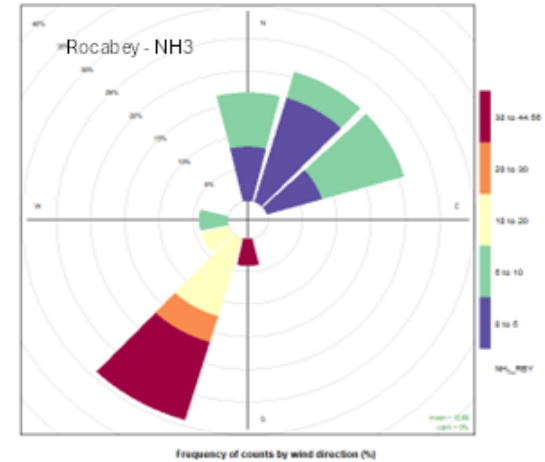
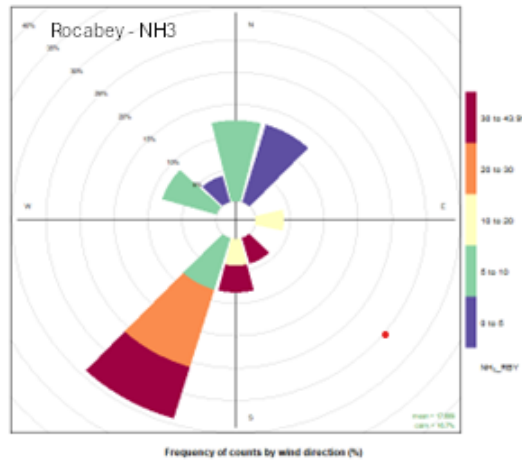
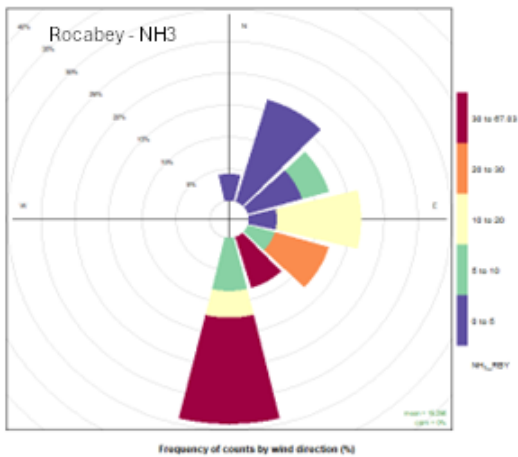
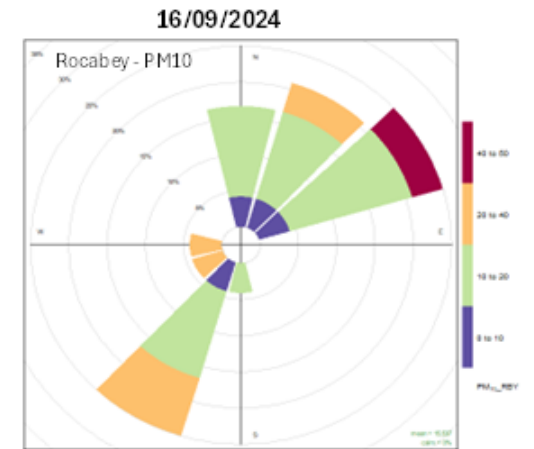
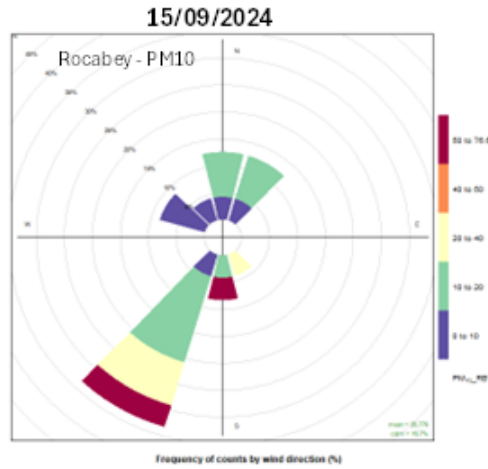
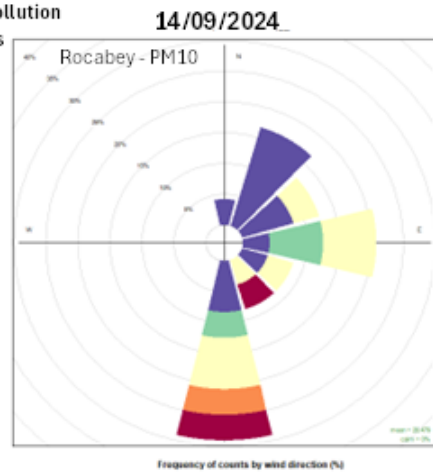
Constat: 3 jours successifs avec des concentrations journalières en PM10, PM2,5 et NH₃ à la station Rocabey plus élevées (d'un facteur 2 à 4) par rapport aux 3 autres sites

Maximum horaire et journalier en ammoniac le 14/09 et maximum horaire en PM10 le 15/09 à la station Rocabey



Spatialisation des niveaux de PM10 et d'ammoniac à Saint-Malo

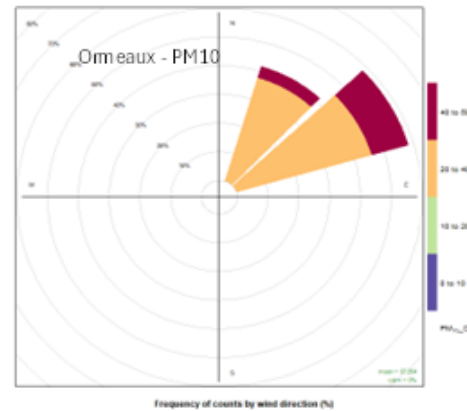
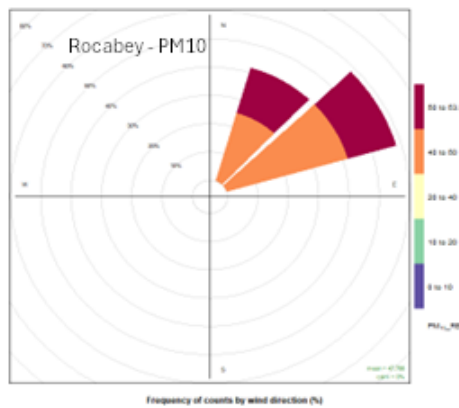
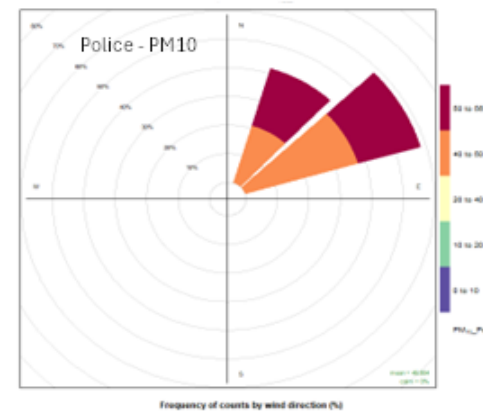
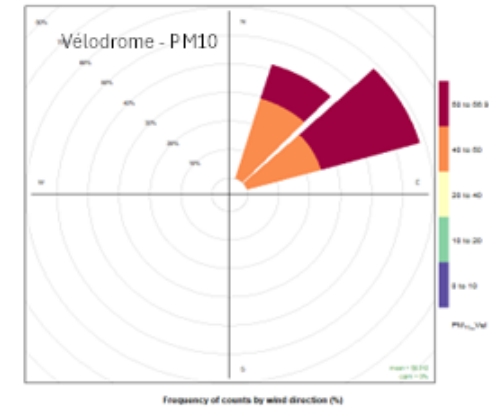
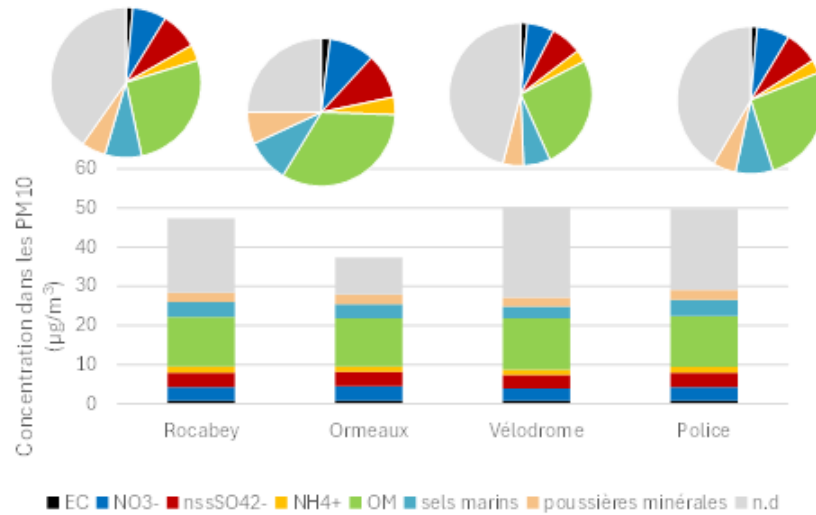
Roses de pollution journalières



Durant les nuits du 14 au 15 puis du 15 au 16, des augmentations en PM10 (et PM2,5), avec une augmentation conjointe des concentrations en NH₃, sont constatées par vents faibles (< 3 m/s). Dans la nuit du 16 au 17, seul l'ammoniac présente une augmentation. Les roses de pollution PM10 et NH₃ présentent globalement une influence de sud-ouest à sud. Cela révèle l'influence d'une activité anthropique qui impacte la station Rocabey de nuit ; potentiellement la zone portuaire du fait de la présence de poussières minérales. Le 16/09 une influence de nord-est est visible pour les PM10 probablement responsable de l'augmentation en début d'après-midi.

19-sept-24

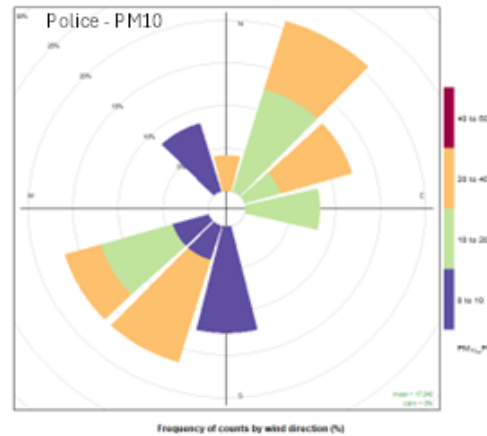
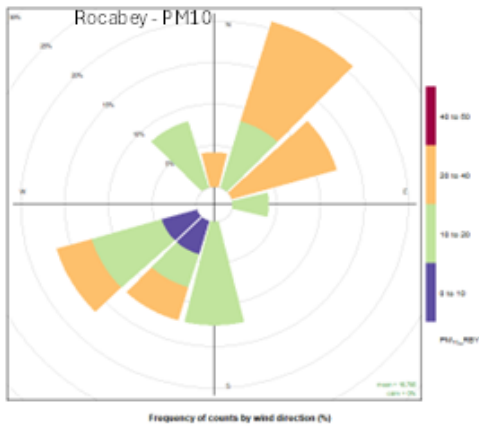
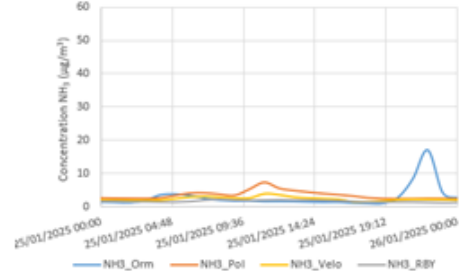
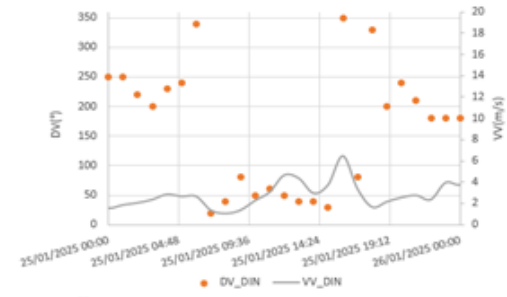
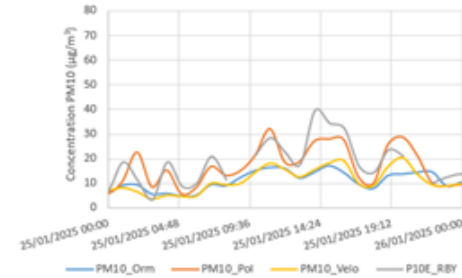
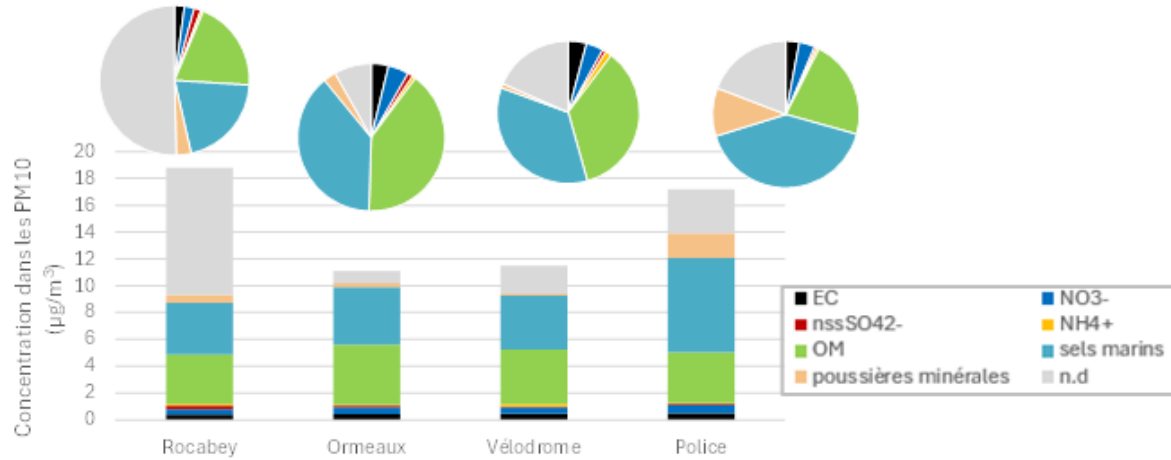
Constat : seuil journalier IR (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en PM10 atteint aux sites Police et Vélodrome et proche à la station Rocabey (48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) - Episode de pollution PM10 au niveau de 2 départements bretons et des départements du littoral de la Manche (Normandie et Hauts-de-France)



Fortes concentrations PM10 mesurées au niveau des 4 sites de Saint-Malo, composées de matière organique et d'espèces inorganiques. La présence de sulfate d'ammonium confirme une arrivée des masses d'air chargées en PM en provenance du nord-est et qui s'ajoutent aux émissions urbaines locales

25-janv-25

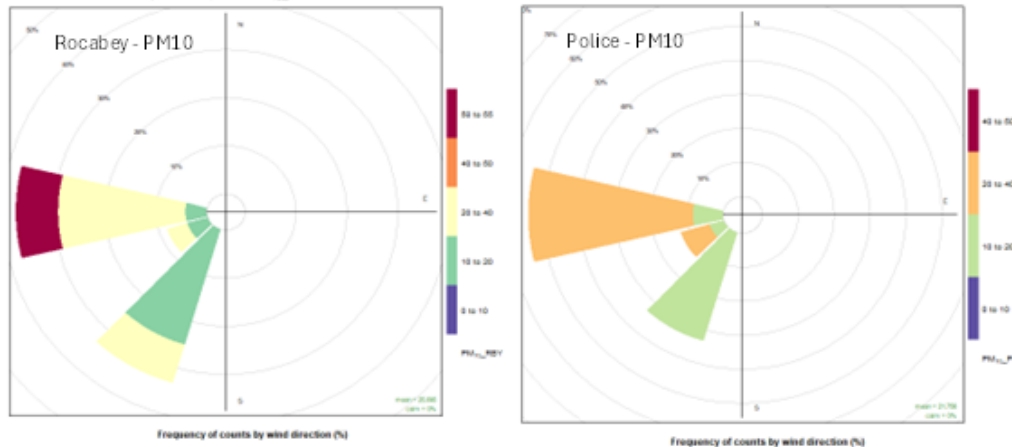
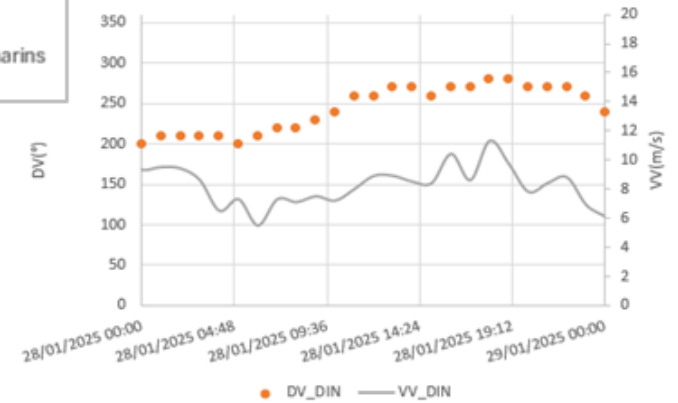
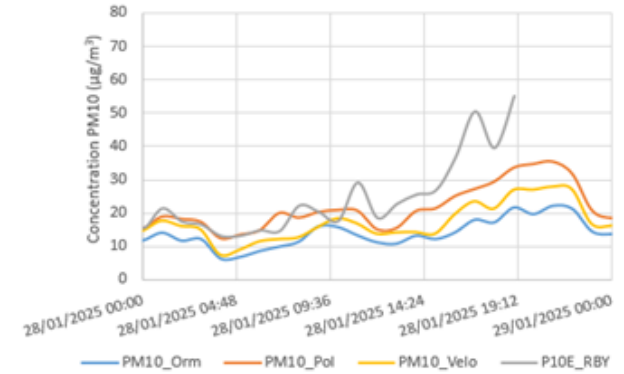
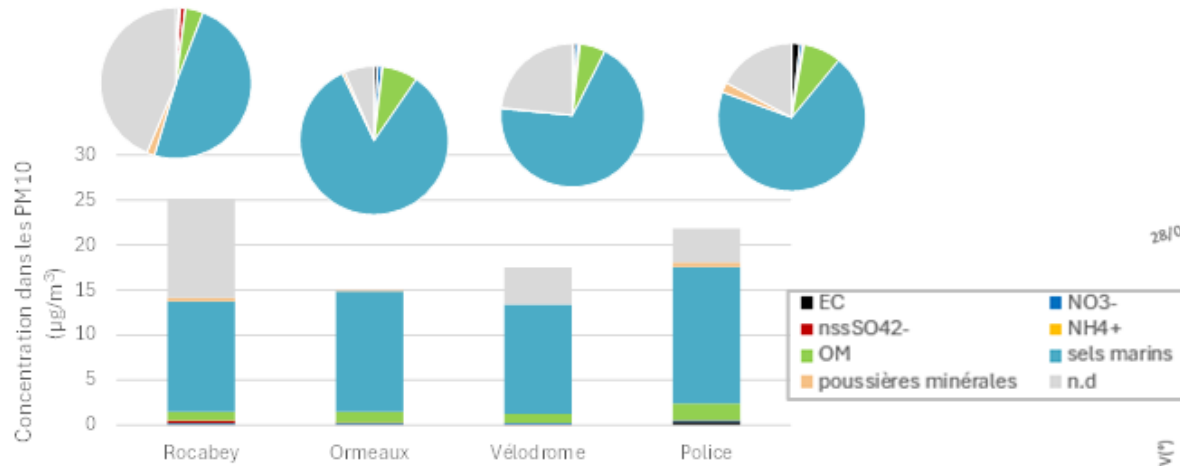
Constat: Des concentrations similaires en PM10 à la station Rocabey (19 µg/m³) et au site Police (17 µg/m³)



Influence maritime naturelle notable sur l'ensemble des sites avec la présence de sels marins
 A noter la présence d'une augmentation ponctuelle en NH₃ au site Ormeaux le soir du 25/01 par vent de sud-ouest (<4 m/s), influence ZI probable

28-janv-25

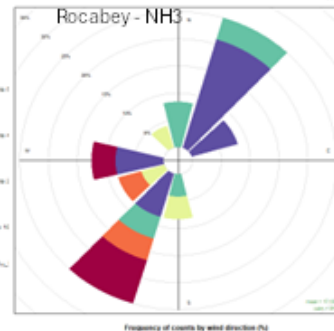
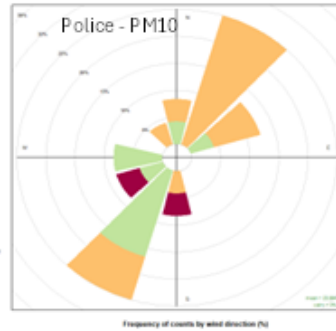
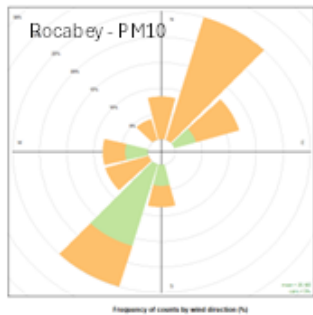
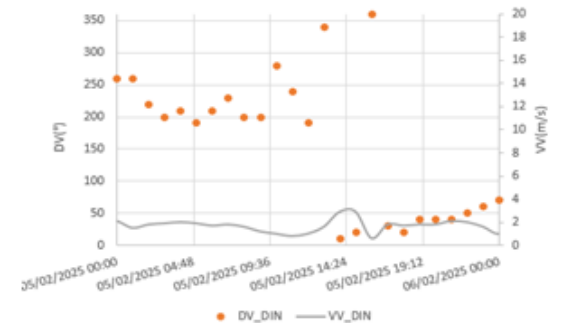
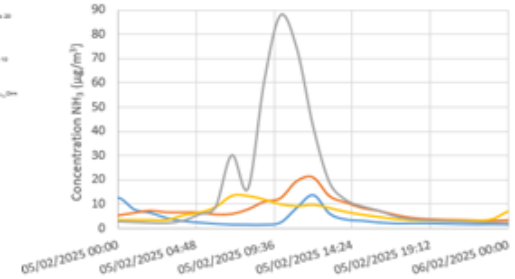
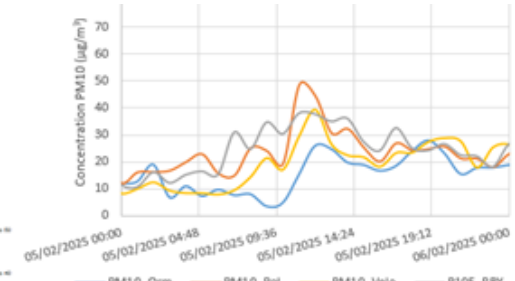
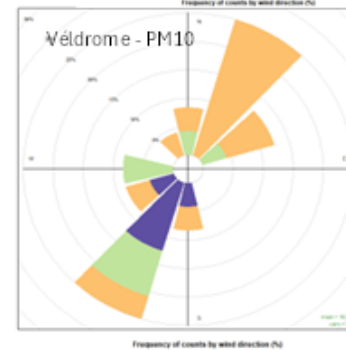
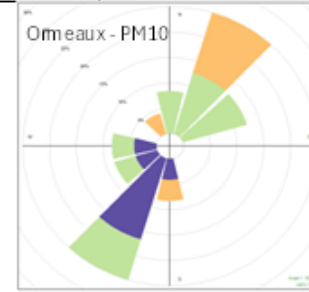
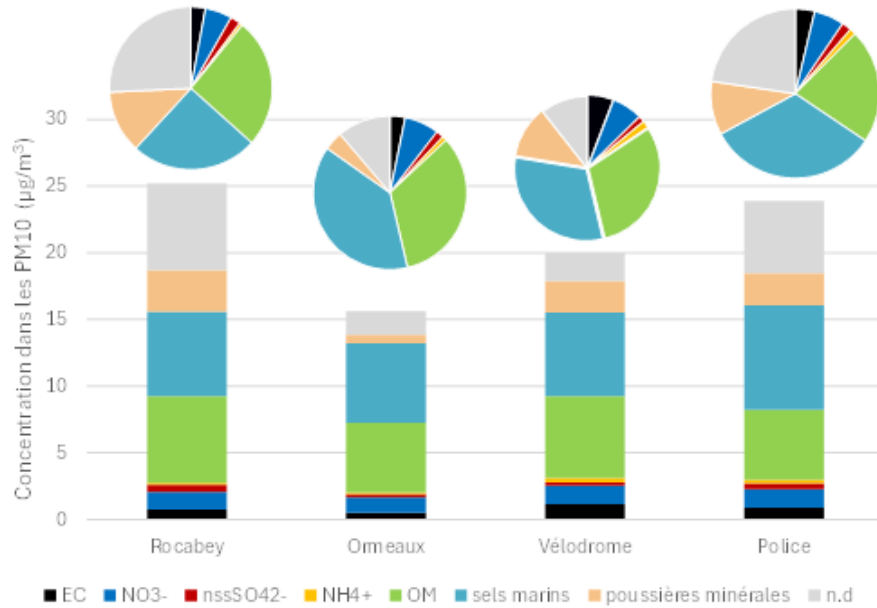
Constat: Des concentrations similaires à la station Rocabey (25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et au site Police (22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Maximum horaire de la campagne hivernale à la station Rocabey



Influence maritime naturelle notable sur l'ensemble des sites avec la présence de sels marins par vents d'ouest supérieurs à 6 m/s
A noter la présence de carbone élémentaire au niveau du site Police en concentrations 3 fois supérieure à celles des autres sites.

05-févr-25

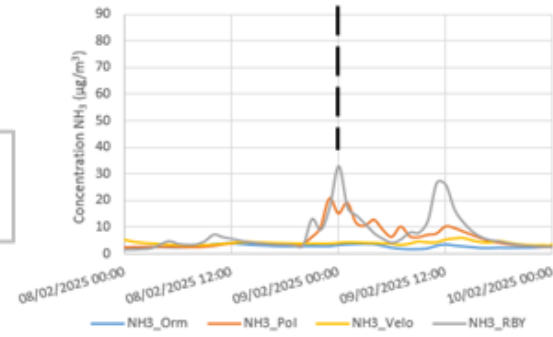
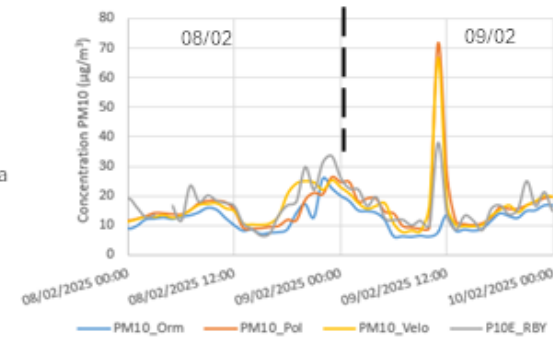
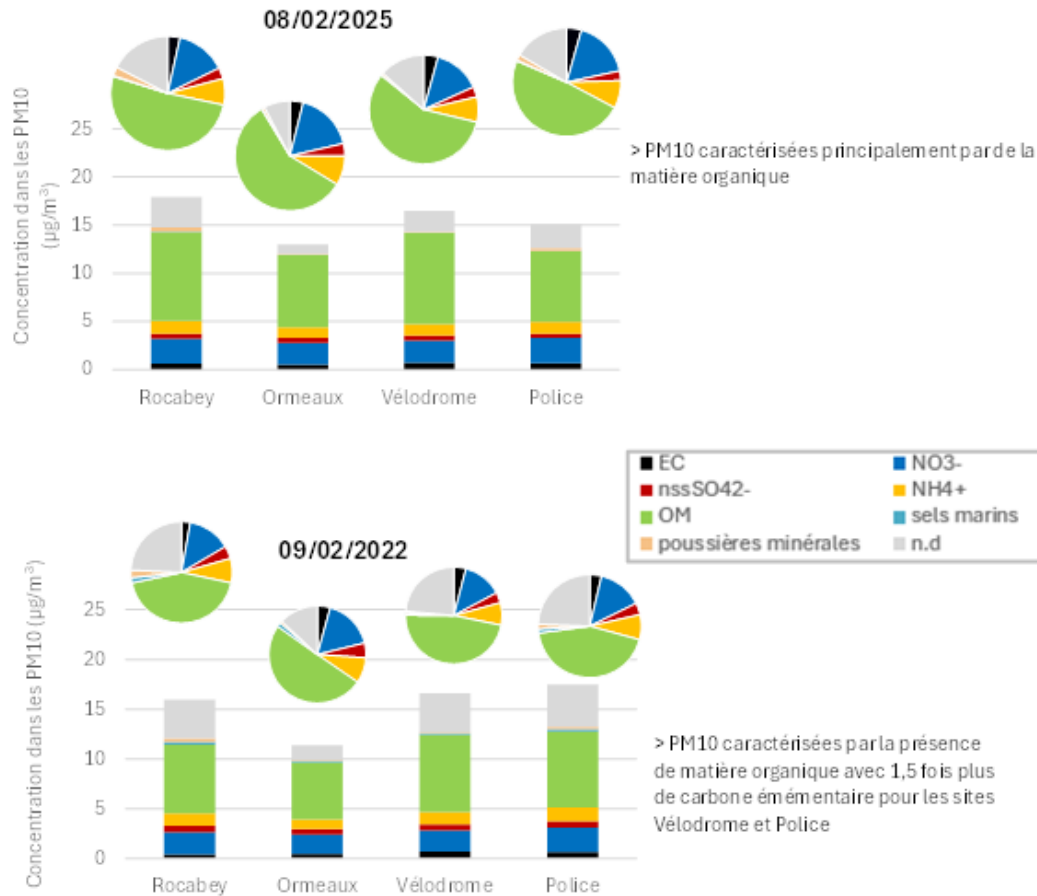
Constat: Des concentrations en PM10 plus élevées à la station Rocabey ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et au site Police ($24 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et des niveaux similaires en PM2,5 pour les sites de Saint-Malo. Une forte concentration journalière en NH_3 à Rocabey ($17 \mu\text{g}/\text{m}^3$) avec le maximum horaire de la campagne hivernale atteint.



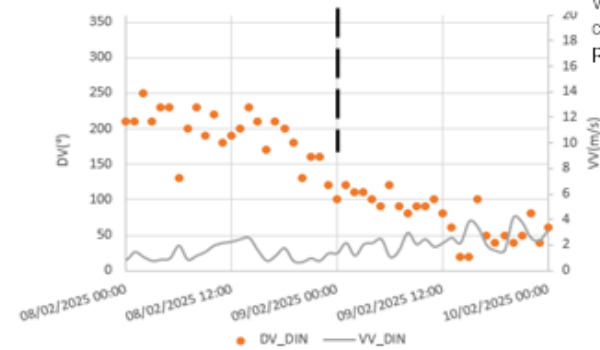
Influence naturelle maritime pour l'ensemble des sites avec une concentration en sels de mer plus élevée pour le site Police
 Influence trafic pour les PM10 au niveau du site Vélodrome (EC plus fort d'un facteur 1,6 par rapport à Rocabey)
 Influence anthropique des niveaux en NH_3 à Rocabey par vent de sud-ouest à 10h, influence potentielle du port

08-09/02/2025

Constat: le 08/02 une concentration journalière plus élevée à Rocabey (18 µg/m³) et des niveaux proches pour les autres sites du cœur de ville
Maximum horaire PM10/PM2,5 le 09/02 aux sites Police et Vélodrome



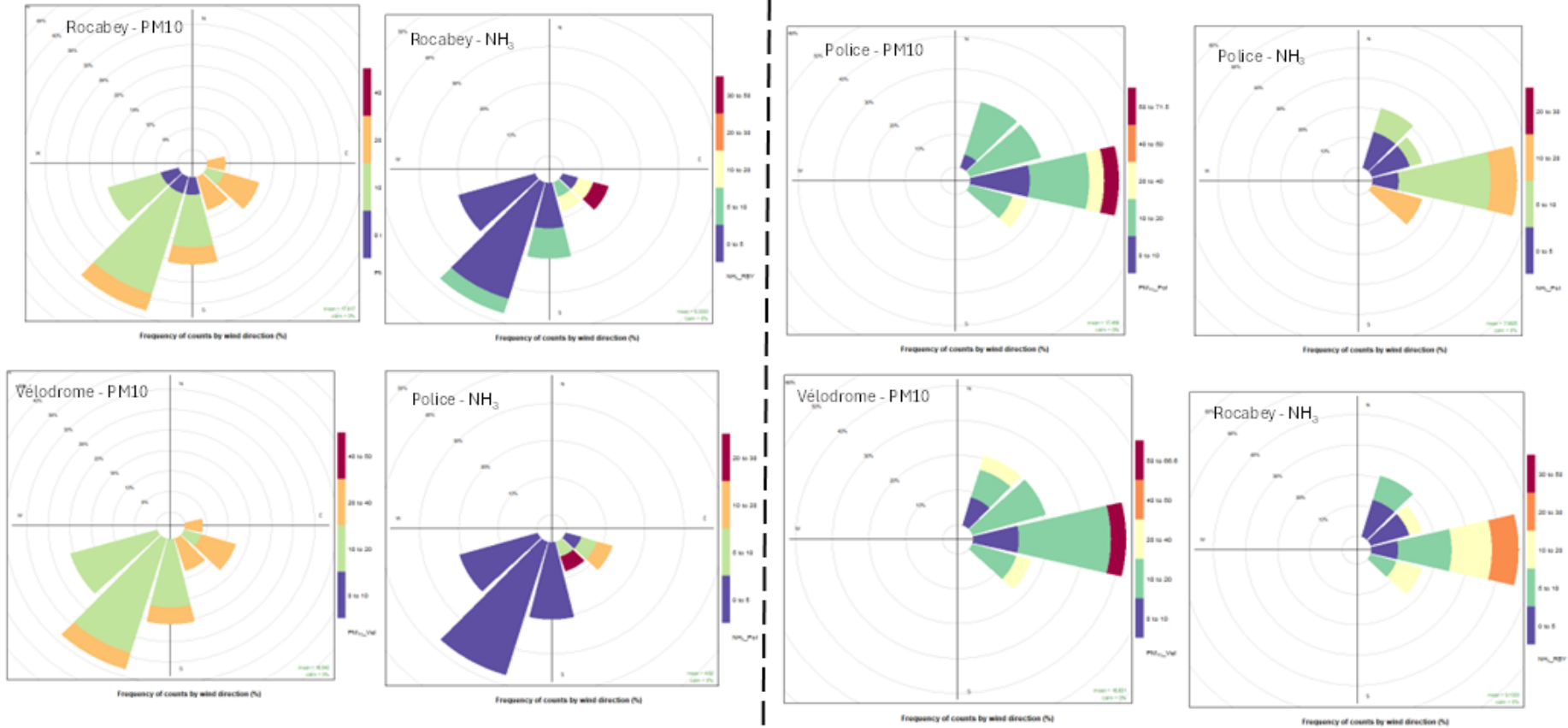
> Augmentation des concentrations en PM10 dans la nuit du 8 au 9/02, parvents de sud-ouest, corrélée à une augmentation en ammoniac à Police et Rocabey
Augmentation ponctuelle en PM10 à 11h le 09/02 plus marquée à Vélodrome et Police et corrélée à du NH₃ à Rocabey



Roses de pollution journalières

08/02/2025

09/02/2025



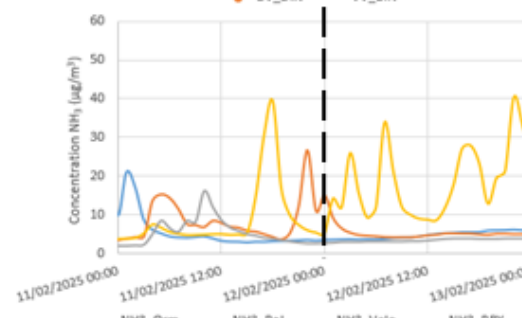
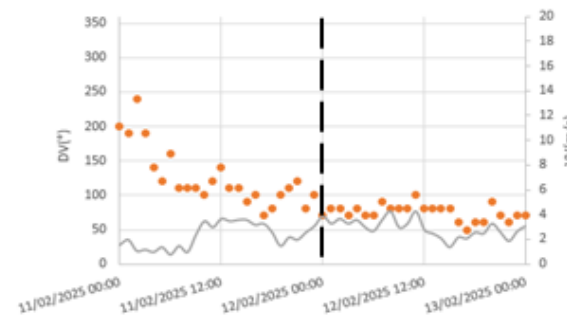
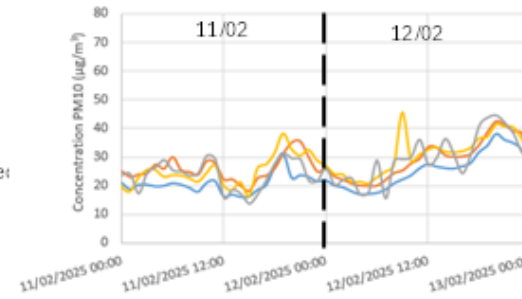
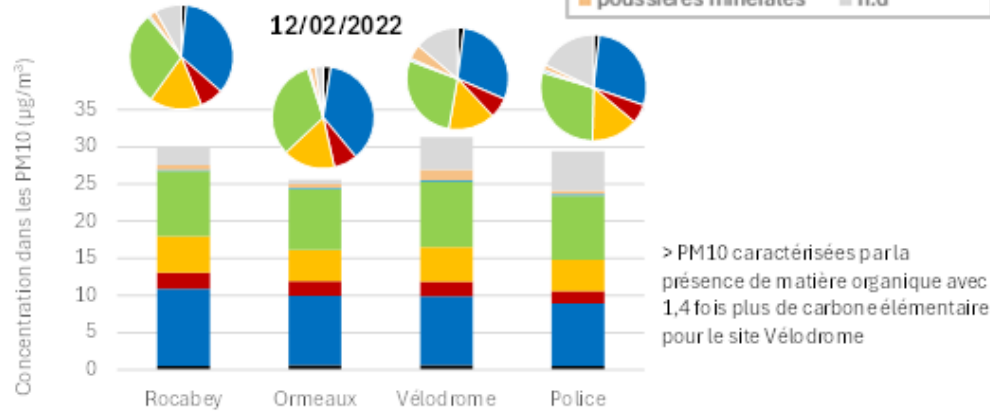
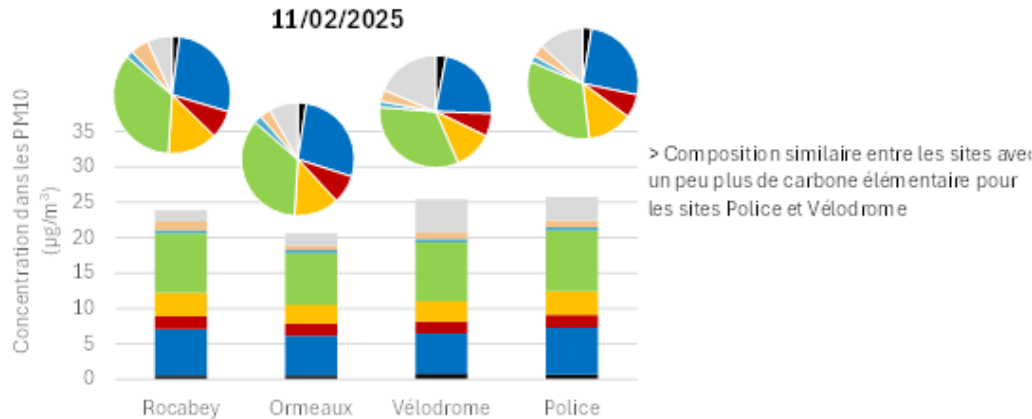
Influence anthropique en lien avec des phénomènes de combustion commune aux différents sites (plus particulièrement ceux du coeur de la ville de Saint-Malo)

Du 8 au 9 février, influence anthropique dans les niveaux de NH_3 à Rocabey et Police par vents faibles (<2m/s) de sud-ouest, influence potentielle de la ZI

Le 09/02, influence ponctuelle d'un phénomène de combustion pour les sites Police et Vélodrome vers 11h

11-12/02/2025

Constat: le 11/02 des niveaux plus élevés en PM10 (proches de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM10) et NH_3 (9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour les sites Police et Vélodrome
Le 12/02 les maxima horaire et journalier en NH_3 sont observés au site Vélodrome



> Des niveaux et des variations proches en PM10 pour l'ensemble des sites (dans des conditions peu dispersives vitesse de vent < 4 m/s) avec ponctuellement des variations plus fortes pour les sites Police et Vélodrome
Pas de corrélation NH_3 /PM10 et plusieurs augmentations ponctuelles en NH_3 impactant chacun des sites en fonction des vents

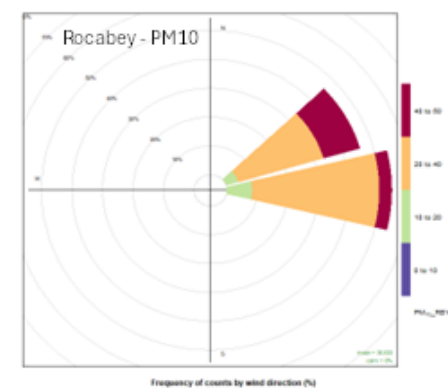
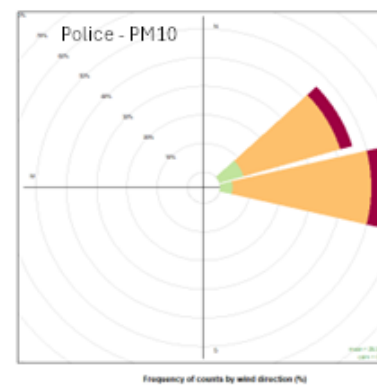
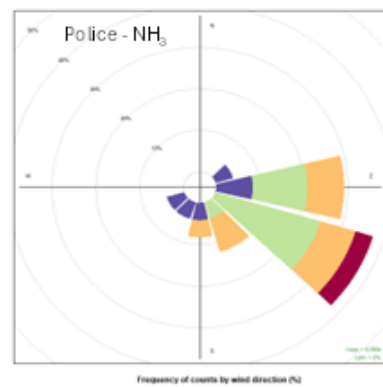
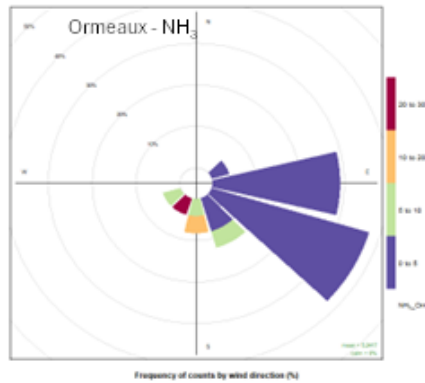
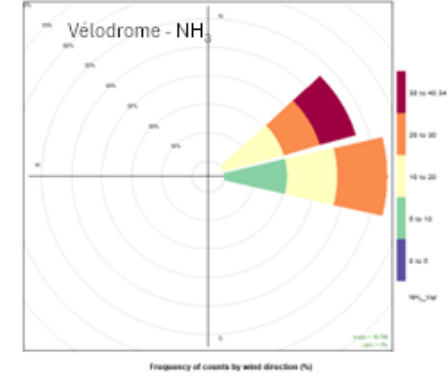
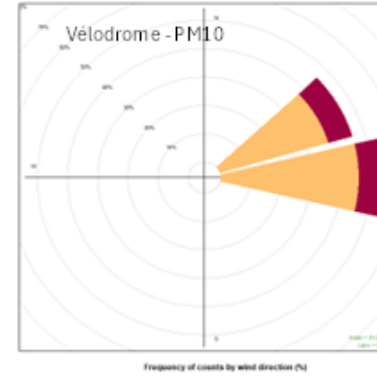
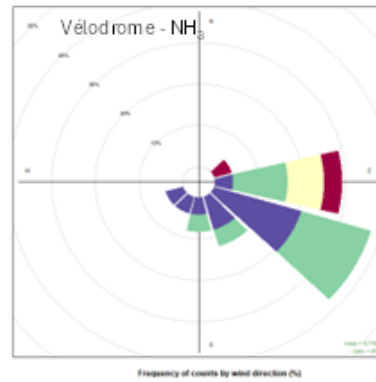
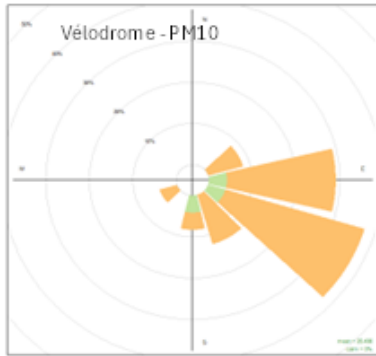
Moyenne jour en NH_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
11/02/2025	12/02/2025
6	4
5	5
9	19
9	5

Spatialisation des niveaux de PM10 et d'ammoniac à Saint-Malo

Roses de pollution
journalières

11/02/2025

12/02/2025



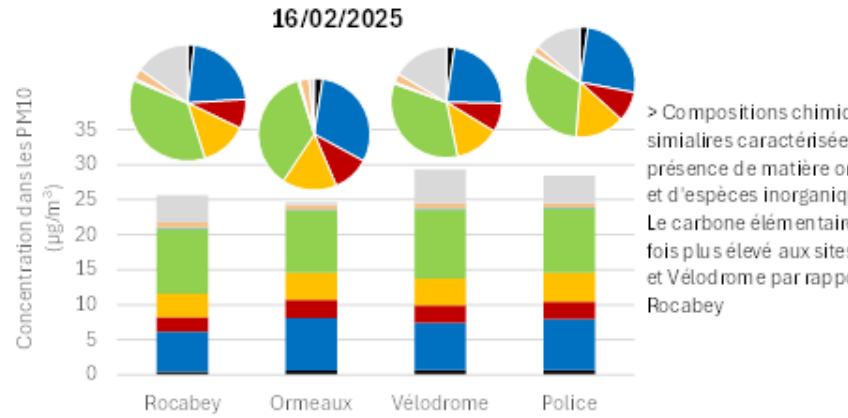
Des concentrations et des compositions chimiques en PM10 qui sont proches sur l'ensemble des sites malouins en raison de conditions météorologiques peu dispersives (vitesse de vent < 4m/s). Pour ces 2 journées le site Vélodrome est un peu plus influencé par des phénomènes de combustion (ex trafic routier)

L'influence du secteur de la ZI sur les concentrations en ammoniac est constatée sur les différents sites ; le 11/02 par vent de sud-ouest au site Ormeaux, par vent de sud-est au site Police, par vent d'est au site Vélodrome et le 12/02 seul le site Vélodrome est impacté par vent d'est.

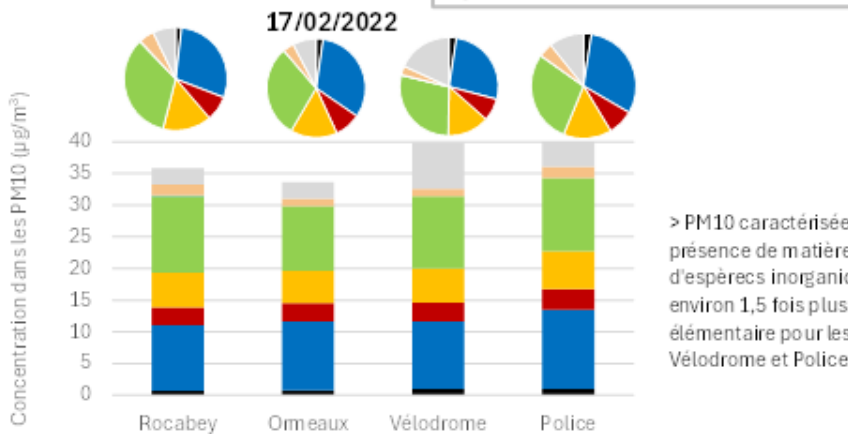
La corrélation ammoniac/PM n'est pas constatée.

16-17/02/2025

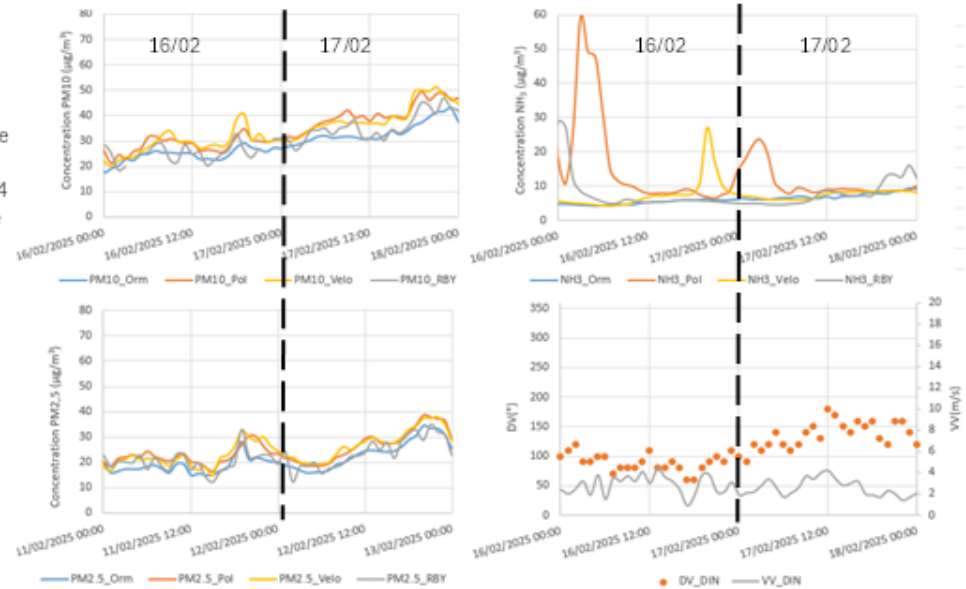
Constat: le 16/02, les maxima horaire et journalier en NH₃ sont atteints au site Police, les niveaux mesurés en PM supérieurs pour les sites Police et Vélodrome
 le 17/02, les concentrations journalières maximales en PM10 et PM2,5 pour l'ensemble des sites avec des niveaux légèrement plus élevés pour les sites Police et Vélodrome



> Compositions chimiques similaires caractérisées par la présence de matière organique et d'espèces inorganiques. Le carbone élémentaire est 1,4 fois plus élevé aux sites Police et Vélodrome par rapport à Rocabey



> PM10 caractérisées par la présence de matière organique et d'espèces inorganiques avec environ 1,5 fois plus de carbone élémentaire pour les sites Vélodrome et Police



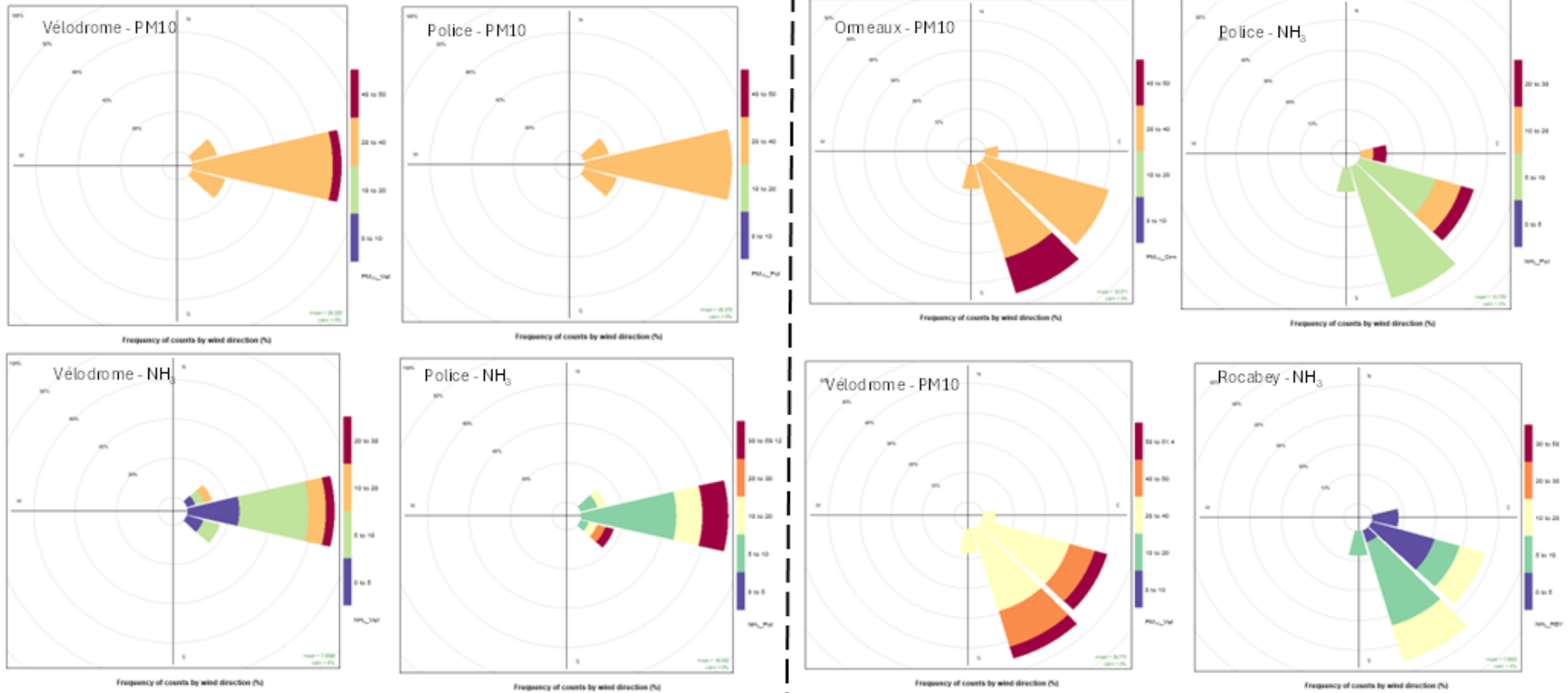
> Augmentations ponctuelles des concentrations en NH₃ dans la nuit de 15 au 16 pour le site Police par vent d'est à sud-est et du 16 au 17 février pour les sites Police et Vélodrome. Variation horaire similaire en PM10 et PM2,5. Pas de corrélation PM et NH₃

Moyenne jour en NH ₃ (µg/m ³)	
16/02/2025	17/02/2025
7	8
5	7
8	7
16	11

Roses de pollution journalières

16/02/2025

17/02/2025



Des compositions en PM10 et des niveaux en PM10 et PM2,5 similaires pour les différents sites traduisent un niveau de fond commun lié à des vents faibles (<4m/s) de secteur est et à des conditions favorables à la présence d'espèces inorganiques secondaires.

Dans la nuit du 15 au 16, une influence anthropique en direction de la ZI sur les niveaux de NH₃ est observé au site Police et également dans la nuit du 16 au 17 dans une moindre intensité. Une influence ponctuelle du niveau de NH₃ au site Vélodrome parvient faible (<4m/s) de sud-ouest, influence potentielle de la ZI.



Spatialisation des niveaux de PM10 et d'ammoniac à Saint-Malo



www.airbreizh.asso.fr

3 E, rue de Paris
Atalis 2,
35510 CESSON-SEVIGNE
Tél. 02 23 20 90 90