



BILAN DES MESURES D'AMMONIAC ET DE PARTICULES FINES PM10 SUR LE TERRITOIRE PILOTE

Action B 1.2/B.4.2

Version du 20/06/2025

Lifeabaa2021@airbreizh.asso.fr

<https://lifeabaa2021.eu>



Contexte du rapport

Ce rapport a été produit dans le cadre du projet ABAA Life 2021 qui vise à réduire les émissions d'ammoniac d'origine agricole dans l'air ambiant et améliorer la qualité de l'air. Ce projet innovant, sur 4 ans, est porté par l'association agréée de surveillance de la qualité de l'air, Air Breizh, en partenariat avec la Chambre régionale d'Agriculture de Bretagne (CRAB).



Conditions de diffusion

Air Breizh est l'organisme agréé de surveillance de la qualité de l'air pour la région Bretagne, au titre de l'article L221-3 du Code de l'environnement, précisé par l'arrêté de 2022 pris par le ministère de l'Environnement portant renouvellement de l'agrément de l'association. À ce titre et compte tenu de ses statuts, Air Breizh est garant de la transparence de l'information sur les résultats des mesures et les rapports d'études produits selon les règles suivantes :

L'équipe du projet ABAA, constituée de salariés d'Air Breizh et de la CRAB, réserve un droit d'accès au public à l'ensemble des résultats de mesures et rapports d'étude selon plusieurs modalités : document papier, mise en ligne sur le site internet du projet ABAA (<https://lifeabaa2021.eu>), et sur le site internet d'Air Breizh (www.airbreizh.asso.fr).

Toute utilisation de ce rapport et/ou des données associées doit faire référence au projet ABAA.

Air Breizh et la CRAB ne peuvent, en aucune façon, être tenus responsables des interprétations et travaux utilisant les rapports d'études pour lesquels l'équipe du projet n'aura pas donné d'accord préalable.

Organisation interne – contrôle qualité

Projet :		Nom du rapport d'étude	
Version (date)	Modifications	Auteur	Validation
Version du 20/06/25	Rédaction	GUILLOT Sarah (ingénieure d'études)	LE QUILLEUC Meryll (Chef de projet ABAA) FALHUN Raphaële (Ingénieure d'études) CESBRON Olivier (Chef de projet études)

Sommaire

1. Rappel des objectifs de l'action B.1.2	10
2. Description du dispositif de surveillance	10
2.1. Description générale	10
2.2. Site Nord.....	12
2.3. Site Ouest.....	14
2.4. Site Sud	15
2.5. Synthèse	17
3. Polluants mesurés : ammoniac et particules fines.....	19
3.1. L'ammoniac	19
a. Propriétés et caractéristiques	19
b. Répartition des sources d'émission	19
c. Réglementation de l'ammoniac dans l'air.....	21
3.2. Les particules fines	22
a. Propriétés et caractéristiques	22
b. Répartition des sources d'émission de particules fines	23
c. La réglementation	25
3.3. Matériel de mesure et de prélèvement utilisé	26
4. Représentativité des données	27
4.1. Contexte météorologique sur le site Nord.....	27
a. Température	27
b. Précipitations	27
c. Vent	28
4.2. Représentativité des concentrations en PM10.....	30
5. Résultats des mesures d'ammoniac	31
5.1. Description statistique des mesures d'ammoniac	31
5.2. Etude des activités agricoles sur l'exploitation du site sud	33
5.3. Correction des mesures sur le site Sud	34
5.4. Site Nord	36
a. Evolution saisonnière.....	36

c. Evolution mensuelle	37
d. Evolution journalière	40
5.5. Site Ouest	40
a. Evolution saisonnière	40
b. Evolution mensuelle.....	41
c. Evolution journalière	44
5.6. Site Sud	45
a. Evolution saisonnière	45
b. Evolution mensuelle.....	45
c. Evolution journalière	48
5.7. Comparaison mensuelle des 3 sites	49
6. Lien entre ammoniac et activités agricoles	50
6.1. Sélection de certains jours	50
6.2. Site Nord.....	55
a. Influence des épandages	55
b. Influence d'activités localisées	57
6.3. Site Ouest.....	58
a. Influence d'activités localisées	58
b. Influence des épandages	59
6.4. Site Sud	61
7. Synthèse de l'ammoniac.....	63
8. Lien entre ammoniac et PM10.....	65
9. Présentation des données de particules PM10.....	66
9.1. Description globale	66
9.2. Evolution mensuelle	68
10. Composition chimique des particules sur le site Nord.....	70
10.1. Protocole	70
10.2. Composition chimique moyenne	71
10.3. Variation saisonnière	72
10.4. Nitrate d'ammonium.....	74
10.5. Sucres et méthylamines	76

10.6. Lien entre nitrate d'ammonium et ammoniac.....	79
10.7. Positive Matrix Factorization (PMF)	81
a. Méthode.....	81
b. Sources identifiées	82
c. Contribution moyenne	83
d. Variation saisonnière.....	84
12. Synthèse des particules	86
Conclusion.....	88
Références	91
Annexes.....	92
Annexe 1 : roses mensuelles de vent mesuré au site nord et normales mensuelles de rose de vent à Brest-Guipavas	92
Annexe 2 : valeurs présentées sur un graphique boxplot.....	95
Annexe 3 : fiches synthèses jour ammoniac	96
a. Site Nord	96
b. Site Ouest.....	112
c. Site sud	120
Annexe 4 : lien entre ammoniac et PM10.....	132
Annexe 5 : Procédure de validation des données d'analyse chimique des particules atmosphériques du LSCQA	133
Annexe 6 : principe de la méthode PMF	135

Index des tableaux

Tableau 1: périodes de mesures sur les différents sites du projet et exploitées dans le cadre de ce rapport.....	18
Tableau 2 : Valeurs de références pour les particules fines PM10 et PM2.5	25
Tableau 3 : Matériel de mesure et de prélèvements.....	26
Tableau 4: données statistiques des mesures en ammoniac	32
Tableau 5: données statistiques des mesures en ammoniac sur le site Sud avant et après correction.....	34
Tableau 6: données statistiques des concentrations en PM10 sur les différentes périodes de mesure.....	67
Tableau 7: Dates, fréquence et nombre de filtres collectés pendant la campagne de mesure.....	70
Tableau 8: données statistiques des concentrations d'arabitol et de mannitol.....	77
Tableau 9: données statistiques des concentrations de méthylamine et de di-méthylamine.....	78

Index des figures

Figure 1 : Plan présentant les 3 sièges d'exploitations sélectionnés pour accueillir les stations de mesure.....	11
Figure 2 : carte des stations MACE et Kergoff.....	12
Figure 3: répartition des différentes cultures dans un rayon de 1 km autour du site Nord [Source RPG 2023]	12
Figure 4: vue aérienne du site Nord et photo du camion laboratoire	13
Figure 5: répartition des différentes cultures dans un rayon de 1 km autour du site Ouest [Source RPG 2023]	14
Figure 6: vue aérienne du site ouest et photo de la remorque laboratoire.....	15
Figure 7: répartition des différentes cultures dans un rayon de 1 km autour du site Sud [RPG 2023]	16
Figure 8: vue aérienne du site sud et photo de la remorque laboratoire.....	17
Figure 9 : Répartition des émissions agricoles d'ammoniac en Bretagne (Inventaire Air Breizh Isea V5.1)	19
Figure 10 : Composition moyenne des effluents bovins, porcins et avicoles (en kg/t brut) [source : Analyses SATEGE - juin 2013].....	20
Figure 11 : Comparaison des tailles de particules PM10 et PM2,5 (Source U.S EPA)	22
Figure 12 : Fractions chimiques des particules.....	23
Figure 13 : Répartition des émissions de particules fines en Bretagne [Source Air Breizh Isea v5.2]	25
Figure 14: évolution mensuelle de la température sur le site Nord et des normales (1991 - 2020) à la station Météo France Brest – Guipavas	27
Figure 15: évolution mensuelle et normales (1991 - 2020) des précipitations à la station Météo France Brest-Guipavas.....	28
Figure 16: rose des vents sur le site Nord pendant la période de mesure (à gauche), normale annuelle (1991 - 2020) à la station Météo France de Brest (à droite).....	29
Figure 17: évolution mensuelle des concentrations en PM10 à MACE de janvier 2023 à décembre 2024, et de la moyenne mensuelle des concentrations calculées de 2019-2024	30
Figure 18: Niveaux en ammoniac sur les sites Nord, Ouest, Sud et à Kergoff du 26 septembre 2023 au 5 juin 2024..	31
Figure 19 : Concentrations moyennes hebdomadaires et activités agricoles sur le site sud	33
Figure 20: niveaux en ammoniac sur le site Sud avant et après correction.....	34
Figure 21: évolution saisonnière des concentrations en ammoniac sur le site Nord et à Kergoff	36
Figure 22: évolution mensuelle des concentrations en ammoniac sur le site Nord et à Kergoff.....	37
Figure 23: Evolution mensuelle du cumul de précipitation à Brest et de la concentration en ammoniac sur le site Nord.....	38
Figure 24: Roses mensuelles de pollution d'ammoniac sur le site Nord en 2023 et 2024	39
Figure 25: Profil journalier de concentrations en ammoniac et de la température sur le site Nord (mars 2023 – juin 2024).....	40
Figure 26: évolution saisonnière des concentrations en ammoniac sur le site Ouest et à Kergoff	41
Figure 27 : évolution mensuelle des concentrations en ammoniac sur le site Ouest et à Kergoff.....	42

Figure 28 : Roses mensuelles de pollution d'ammoniac au niveau du site Ouest.....	43
Figure 29 : Profil journalier des concentrations en ammoniac sur le site Ouest et de la température sur le site Nord (juillet 2023 – juin 2024)	44
Figure 30: évolution saisonnière des concentrations en ammoniac sur le site Sud et à Kergoff	45
Figure 31: évolution mensuelle des concentrations en ammoniac sur le site Sud et à Kergoff	46
Figure 32 : Roses mensuelles de pollution d'ammoniac au niveau du site Sud.....	47
Figure 33 : profil journalier des concentrations en ammoniac sur le site Sud et de la température sur le site Nord (septembre 2023 – juin 2024)	48
Figure 34: évolution mensuelle des concentrations en ammoniac sur les 3 sites ABAA.....	49
Figure 35 : jours sélectionnés sur les trois sites de mesure ABAA en 2023.....	51
Figure 36: jours sélectionnés sur les trois sites de mesure ABAA en 2024.....	51
Figure 37: exemple de fiche synthèse mensuelle sur le site Nord	53
Figure 38: exemple de zoom sur le 8 septembre 2023 sur le site Nord.....	54
Figure 39: rose de pollution journalière de l'ammoniac et évolution horaire des concentrations de NH ₃ sur le site Nord et à Kergoff et de la température sur le site Nord le 17 avril 2023.....	55
Figure 40: rose de pollution journalière sur le site Nord et évolution horaire de la température et de la concentration en ammoniac sur les sites Nord et Ouest le 8 septembre 2023.....	56
Figure 41 : rose de pollution de l'ammoniac sur le site Nord et évolution horaire de la température et de la concentration en ammoniac sur les sites nord et à Kergoff le 22 août 2023	56
Figure 42 : rose de pollution journalière de l'ammoniac et évolution horaire des concentrations de NH ₃ sur le site Nord et à Kergoff et de la température sur le site Nord le 15 mars 2024.....	57
Figure 43 : rose de pollution de l'ammoniac journalière sur le site Ouest et évolution horaire des concentrations de NH ₃ sur le site Ouest et à Kergoff et de la température sur le site Nord (8 octobre 2023).....	58
Figure 44 : rose de pollution journalière de l'ammoniac sur le site Ouest et évolution horaire des concentrations de NH ₃ sur le site Ouest et à Kergoff et de la température sur le site Nord (15 novembre 2023)	59
Figure 45 : rose de pollution journalière de l'ammoniac sur le site Ouest et évolution horaire des concentrations de NH ₃ sur le site Ouest, Nord et à Kergoff et de la température (3 février 2024)	60
Figure 46: rose de pollution journalière de l'ammoniac sur le site ouest et évolution horaire des concentrations de NH ₃ sur les sites Ouest, Nord et à Kergoff et de la température (8 septembre).....	61
Figure 47: rose de pollution journalière de l'ammoniac sur le site sud et évolution horaire des concentrations de NH ₃ sur les sites sud, ouest, nord et à Kergoff et de la température (11 septembre).....	62
Figure 48: schéma de la formation des particules fines à partir de l'ammoniac, des oxydes d'azote et du dioxyde de soufre.....	65
Figure 49: boxplot PM10 du 26 septembre 2023 au 05 juin 2024	66
Figure 50: évolution mensuelle des concentrations en PM10 sur les sites Nord, Ouest, Sud, à MACE et à Kergoff.....	68
Figure 51: composition chimique moyenne des particules sur l'ensemble de la campagne de mesure pour le site Nord.....	72
Figure 52 : évolution saisonnière de la composition chimique des particules sur le site Nord en contribution (en bas) et en concentration (en haut).....	73

Figure 53 : évolution saisonnière des concentrations en nitrate d'ammonium (en haut) et de sa contribution dans les PM10 (en bas) sur le site Nord.....	75
Figure 54: évolution mensuelle des concentrations en arabitol et en mannitol au niveau du site Nord.....	77
Figure 55: évolution mensuelle des concentrations en méthylamine et en di-méthylamine.....	78
Figure 56 : Concentrations en ammoniac et contribution en nitrate d'ammoniac dans les PM10 en 2023 (en haut) et en 2024 (en bas). Le trait bleu indique le seuil de 15% en nitrate d'ammonium au-dessus duquel des jours ont été sélectionnés.	80
Figure 57 : Contribution moyenne des principales sources identifiées par la PMF au niveau du site Nord	83
Figure 58: évolution saisonnière des contributions et des concentrations des différents facteurs constitutifs des PM10 au niveau du site Nord.....	84

1. Rappel des objectifs de l'action B.1.2

L'action B.1.2 consiste à mettre en place un dispositif de surveillance de l'ammoniac et des particules fines (PM10) sur le territoire pilote du projet. Ce dispositif a été pensé pour répondre à plusieurs objectifs :

- Améliorer les connaissances des mécanismes de dispersion de l'ammoniac sur le territoire et de sa contribution dans les particules fines,
- Permettre un calage de la modélisation (action B.2.2),
- Démontrer l'impact des bonnes pratiques agricoles mises en place sur le territoire pilote.

Néanmoins, après réflexion, répondre au troisième objectif peut s'avérer complexe car il faudrait, pour cela, comparer des périodes identiques de l'année et ce sur plusieurs années en enregistrant les pratiques et leurs évolutions. A ce stade, il n'y a pas encore suffisamment de données disponibles. Par ailleurs, le dispositif déployé sur le territoire pilote sera amené à être déplacé après un an de mesure. Pour répondre au troisième objectif, il a donc été prévu de réaliser des études de cas spécifiques en parallèle (présentées dans l'action B.3).

Le déploiement d'un dispositif de mesure sur 3 sites permettra de répondre aux 2 premiers objectifs de l'action B.1.2.

2. Description du dispositif de surveillance

2.1. Description générale

Le dispositif de surveillance de l'ammoniac et des particules fines sur le territoire pilote est constitué de 3 sites de mesure. Les paramètres mesurés en continu sur l'ensemble des 3 sites sont :

- L'ammoniac
- Les particules fines (PM10)

Sur l'un des 3 sites sont également mesurés :

- Plusieurs paramètres météorologiques
- La spéciation chimique des particules PM10 via des prélèvements sur filtres afin d'identifier les sources majoritaires

Ce dispositif a été installé de manière progressive entre le 9 mars 2023 et le 25 septembre 2023. Cette installation est décrite dans le livrable « Bilan de l'installation du dispositif de surveillance ».

Les 3 sites de mesure ont été choisis sur la commune de Plouarzel car différents élevages sont présents (porcins, bovins, volailles) avec des équipements plutôt efficaces en termes de réduction des émissions d'ammoniac. De plus, elle correspond à la zone où les agriculteurs partenaires du projet étaient les plus nombreux. Les stations de mesure ont été installées au niveau de sièges d'exploitation pour être au plus près des sources d'émissions et ainsi être représentatifs d'une exposition de proximité, et pour disposer d'une alimentation électrique nécessaire pour les stations de mesure. Il a

été décidé de trianguliser une zone d'environ 4/5 km afin de rester dans une zone restreinte pour aider à la compréhension des mesures. Les 3 sites de mesure sont installés sur les exploitations suivantes :

- Site nord : exploitation de bovins lait (165 UGB) et cultures dont légumes,
- Site ouest : exploitation de bovins lait (125 UGB) et majorité de prairies ; site proche du bourg de Plouarzel,
- Site sud : exploitation de volailles en poulet de chair (3940 UGB) et station de compostage.

A noter que la notion d'UGB (Unité Gros Bétail) représente une référence et un indicateur dans le milieu de l'élevage. Elle correspond à une façon de définir la charge animale sur un élevage, d'après les besoins nutritionnels ou alimentaires des animaux qui y vivent. L'idée principale est de se dire que pour un individu qui a un besoin de 1, on peut nourrir deux individus qui ont des besoins de 0.5. De cette manière, à chacun correspond un coefficient pour lui attribuer une valeur en UGB.

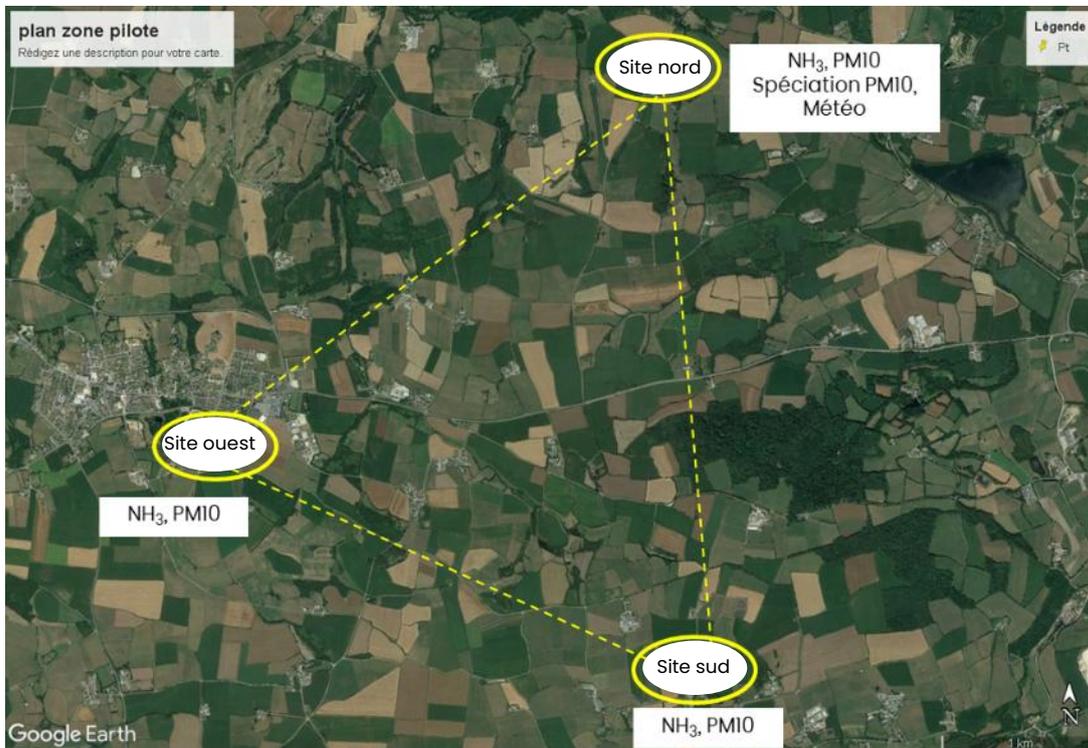


Figure 1 : Plan présentant les 3 sièges d'exploitations sélectionnés pour accueillir les stations de mesure.

Sur ces trois sites, les mesures ont été réalisées sur les périodes suivantes :

- Du 10 mars 2023 au 28 août 2025 sur le site Nord (dans ce rapport, les mesures jusqu'au 30 juin 2024 sont étudiées pour être en cohérence avec les périodes de mesures des deux autres sites),
- Du 7 juillet 2023 au 19 juin 2024 sur le site Ouest,
- Du 26 septembre 2023 au 5 juin 2024 sur le site Sud.

En complément, les concentrations d'ammoniac et de PM10 en continu mesurées au niveau des stations fixes d'Air Breizh sont disponibles sur les lieux suivants :

- Station urbaine de fond de Brest Macé (PM10),
- Station rurale nationale de fond de Kergoff (Merléac - 22), en centre Bretagne (ammoniac et PM10).

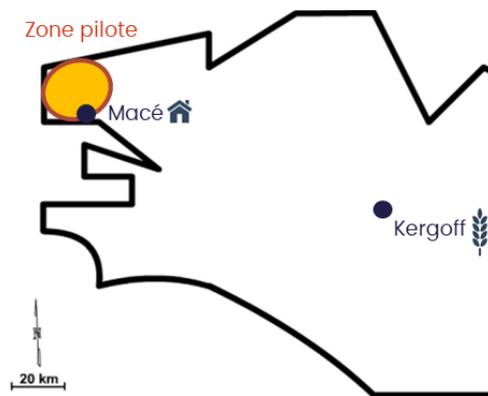


Figure 2 : carte des stations MACE et Kergoff

Les pourcentages de chaque culture sur un rayon de 1 km autour du point de mesure ont été calculés à partir du registre parcellaire graphique de 2023. En lien avec la temporalité de collecte de ces données, les répartitions suivantes ne sont donc valables que pour le printemps 2023.

2.2. Site Nord

Pour le site Nord, installé au cœur d'une exploitation de bovin lait, les proportions de chaque culture autour du point de mesure sont les suivantes :

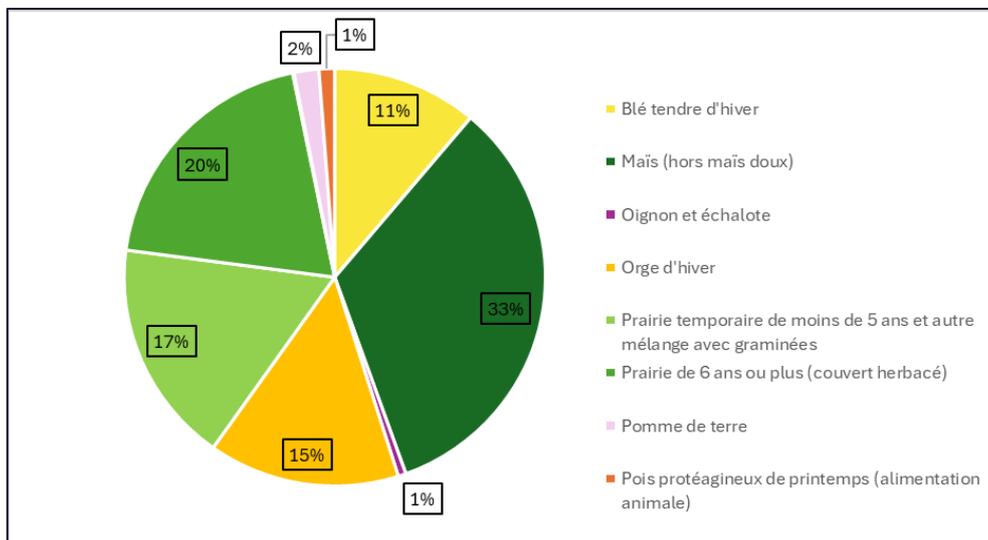


Figure 3: répartition des différentes cultures dans un rayon de 1 km autour du site Nord
[Source RPG 2023]

Les surfaces autour de l'exploitation sont occupées majoritairement par des prairies (37%), ce qui s'explique par le type d'installation (élevage de bovin) et le besoin de pâturage du cheptel, les cultures du maïs (33%) et des céréales (26%).

Par ailleurs, la Figure 4 présente une vue aérienne de l'exploitation correspondant au site Nord. Les analyseurs de PM10, d'ammoniac et la station météo (pour mesurer la température, la direction et la vitesse des vents) ont été installés dans un camion laboratoire installé au sud de l'exploitation. Les mesures, étudiées dans ce rapport, ont eu lieu du **10 mars 2023 au 30 juin 2024** sur ce site.

A proximité du camion, plusieurs espaces peuvent influencer les concentrations en ammoniac :

- Un bâtiment d'exploitation de vaches (étable) à 85 mètres au Nord du camion,
- 2 fosses ouvertes au Nord-Est, l'une à 75 mètres et la seconde, plus à l'Est, à 55 mètres,
- Un espace de stockage de maïs situé entre le camion et les fosses à 15 mètres du camion. Le stockage est maximal à partir de novembre (après la récolte) et se vide progressivement jusqu'en mai,
- Un potager au Sud du camion.

Les bâtiments d'exploitation et les fosses sont des sources d'émissions d'ammoniac tandis que l'espace de stockage du maïs peut agir comme obstacle aux vents en provenance du Nord (soit notamment des fosses de stockage).

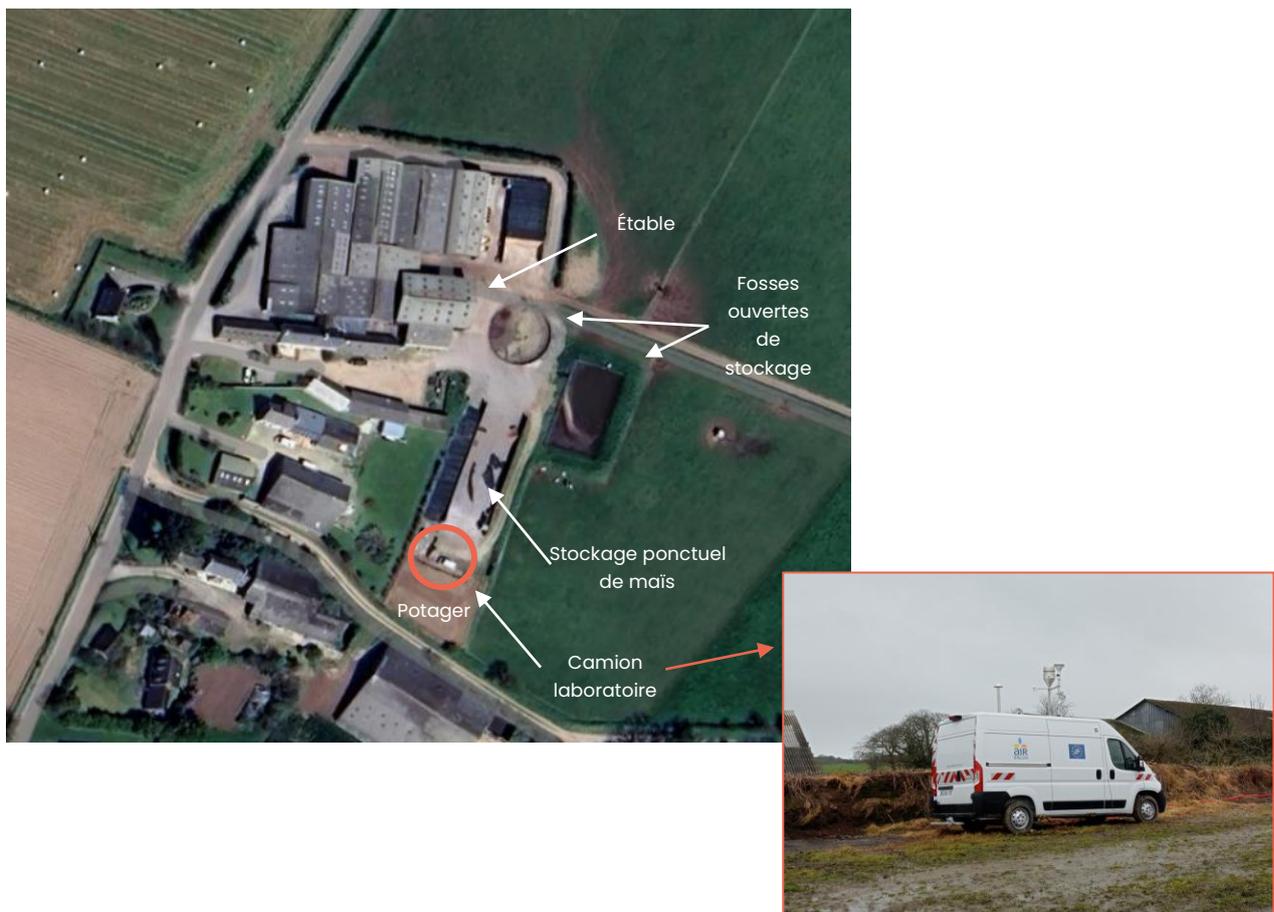


Figure 4: vue aérienne du site Nord et photo du camion laboratoire

2.3. Site Ouest

Le site Ouest est situé à proximité du bourg de Plouarzel (au Nord) et de différentes cultures. Il se trouve au sein d'une exploitation de bovin destiné à la production de lait. Les proportions de chacune de ces cultures dans un rayon de 1 km autour du point de mesure sont les suivantes :

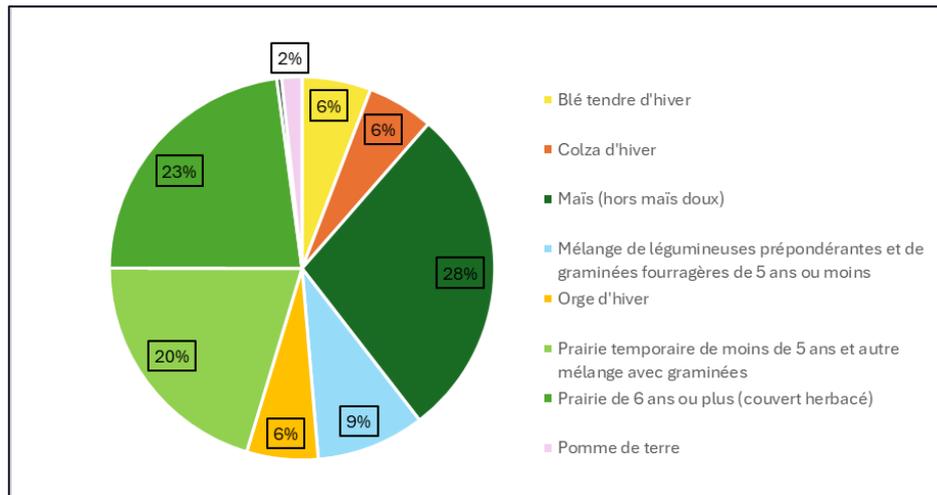


Figure 5: répartition des différentes cultures dans un rayon de 1 km autour du site Ouest
[Source RPG 2023]

L'environnement du point de mesure est dominé par des pâturages (43%). A noter la présence de culture de légumineuse et de graminées fourragères pour cette exploitation ce qui constitue une particularité (9% de la surface).

La Figure 6 présente une vue aérienne de l'exploitation correspondant au site Ouest. Sur ce site, les mesures ont eu lieu du 7 juillet 2023 au 19 juin 2024. Les analyseurs de PM10 et d'ammoniac ont été installés dans une remorque. A proximité de celle-ci, plusieurs espaces et activités peuvent influencer les concentrations en ammoniac :

- Un bâtiment d'exploitation (étable) de vaches situé à 30 mètres à l'Ouest de la remorque,
- Une fosse située au Nord-Ouest derrière l'étable, à 78 mètres de la remorque,
- La manipulation du lisier entre l'étable et la fosse,
- Le passage fréquent des vaches devant la remorque.

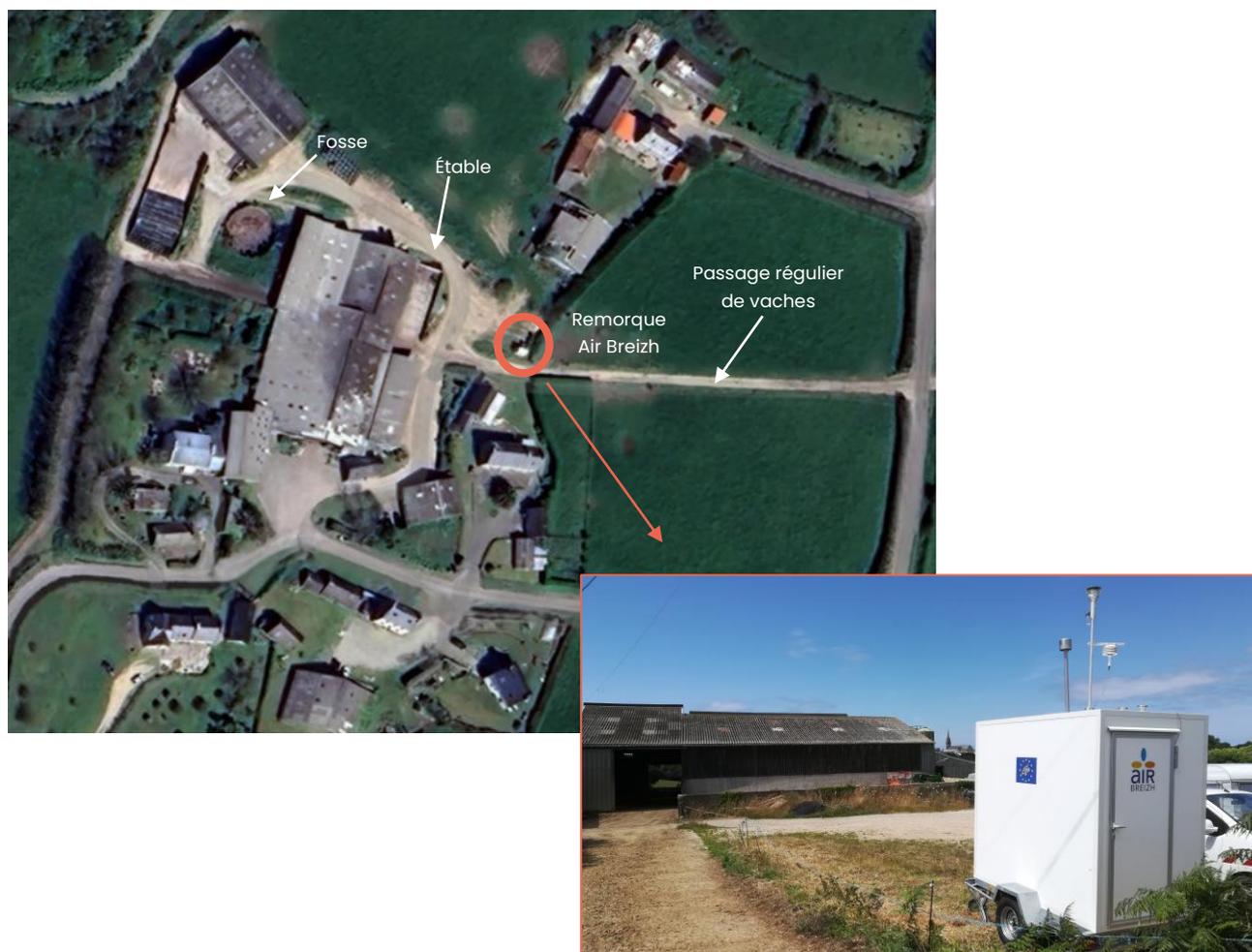


Figure 6: vue aérienne du site ouest et photo de la remorque laboratoire.

2.4. Site Sud

Le site de mesure Sud a été installé au sein d'une exploitation de volailles. Les proportions des différentes cultures autour du site sud sont les suivantes :

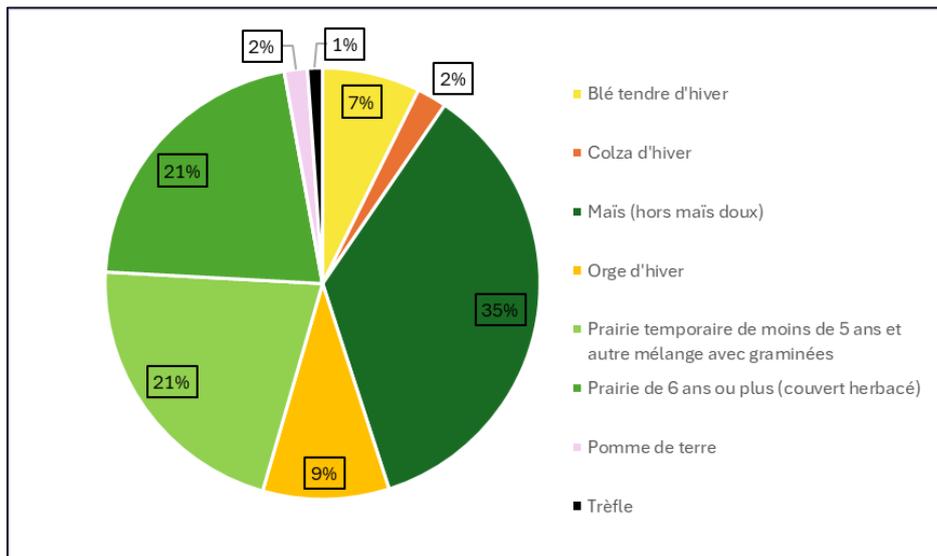


Figure 7: répartition des différentes cultures dans un rayon de 1 km autour du site Sud [RPG 2023]

Malgré cette particularité en termes d'élevage par rapport aux deux autres sites de mesure, l'occupation des surfaces dans un rayon de 1 km est très proche avec une majorité de prairies (42%).

La Figure 7 présente une vue aérienne de l'exploitation correspondant au site Sud. Sur ce site, les mesures ont eu lieu du **26 septembre 2023 au 5 juin 2024**. Les analyseurs de PM10 et d'ammoniac ont été installés dans une remorque située au Sud-Est de l'exploitation, à côté des bureaux et du parking des employés. De plus, la remorque est séparée du champ à l'Est par une haie d'environ deux mètres de hauteur. Le champ situé au Sud de l'exploitation se trouve sur un terrain en pente. A proximité de la remorque, plusieurs espaces et activités peuvent influencer les concentrations en ammoniac :

- La station de compostage située à 110 mètres au Nord-Est de la remorque,
- Les bâtiments d'élevage de poulets au Nord-Ouest dont le plus proche se trouve à 20 mètres de la remorque.

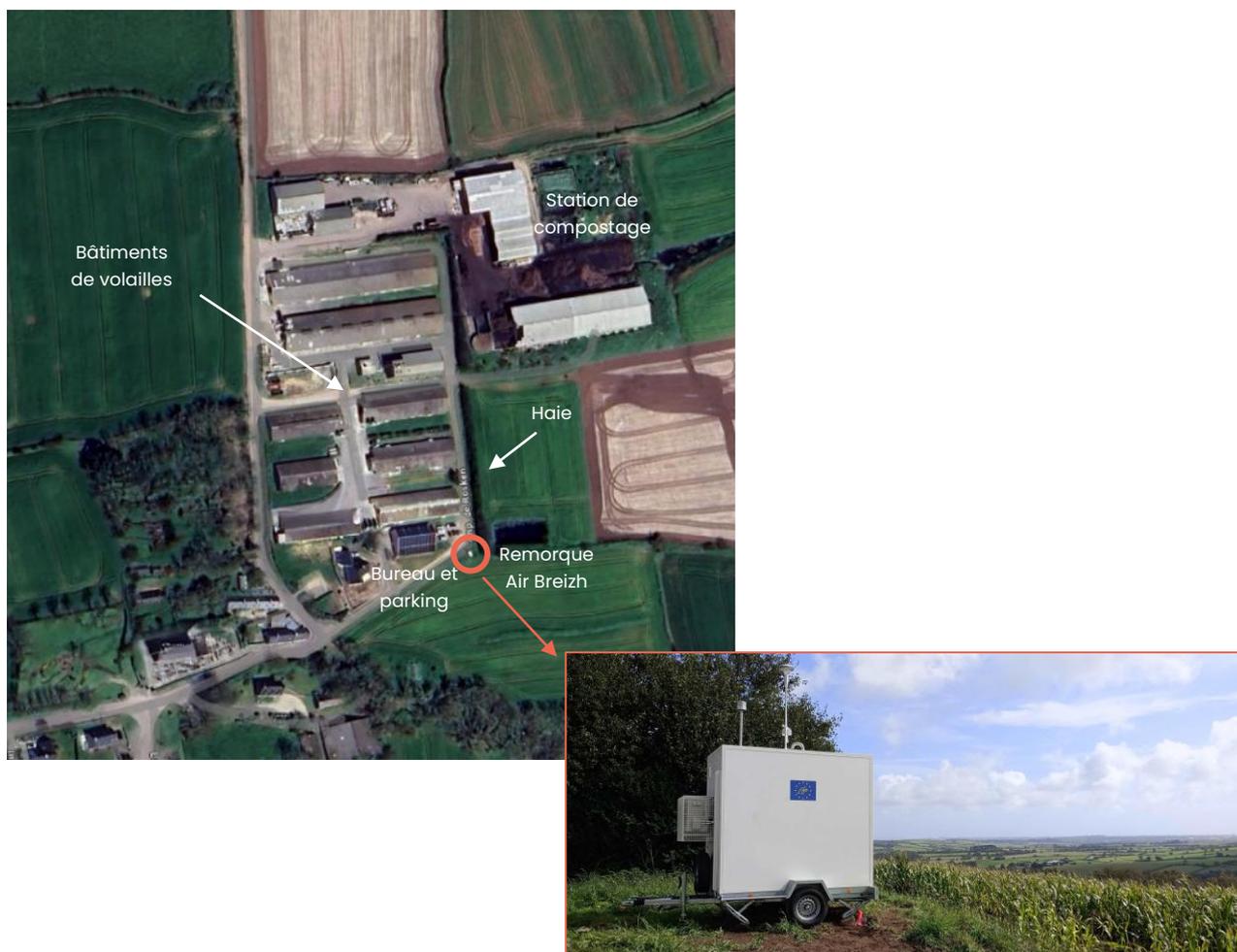


Figure 8: vue aérienne du site sud et photo de la remorque laboratoire.

2.5. Synthèse

Le Tableau 1 synthétise les données exploitées dans le cadre de ce rapport. Il rappelle les mesures réalisées dans le cadre de ce projet (3 sites de mesure au niveau du territoire pilote) et les données du réseau de surveillance régionale exploitées.

Lors du projet, trois sites de mesure ont été mis en place sur le territoire pilote en plus des stations fixes du réseau de surveillance régionale, la station urbaine de fond MACE (Brest) et la station rurale nationale Kergoff (Merléac en centre Bretagne) (Tableau 1). Chacun de ces sites a des activités différentes, cependant les cultures présentes dans un rayon d'un kilomètre autour de chaque site du projet sont majoritairement des prairies et du maïs.

Tableau 1: périodes de mesures sur les différents sites du projet et exploitées dans le cadre de ce rapport

Sites	Ammoniac	Particules fines PM10	Paramètres météorologiques	Composition chimique des PM10
Site Nord	10/03/2023-30/06/2024			10/03/2023-20/05/2024
Site Ouest	07/07/2023-20/06/2024			
Site Sud	26/09/2023-05/06/2024			
MACE (Station urbaine de fond)	10/03/2023-16/10/2023	10/03/2023-17/06/2024		
Kergoff (Station rurale nationale)	10/03/2023-30/06/2024			

3. Polluants mesurés : ammoniac et particules fines

3.1. L'ammoniac

a. Propriétés et caractéristiques

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 (INRS, 2021). 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 (ANSES, 2021). En conséquence, l'ammoniac réagit facilement avec les acides atmosphériques pour former des aérosols inorganiques secondaires (renvoi chapitre 8).

Son temps de résidence dans l'atmosphère est estimé à quelques heures seulement. La volatilisation de l'ammoniac est favorisée par des températures élevées.

b. Répartition des sources d'émission

En Bretagne, 99% des émissions d'ammoniac sont liées à l'agriculture (Source : Inventaire des émissions Air Breizh Isea v5.1). Au sein de l'agriculture, les émissions au niveau des sites d'exploitations (bovins, volailles et porcins) représentent près de 50% des émissions agricoles. Les épandages d'effluents organiques occupent 33% des émissions. Le reste des émissions est représenté par les épandages d'engrais minéraux (10%) et les zones de pâturage (9%) (figure ci-dessous).

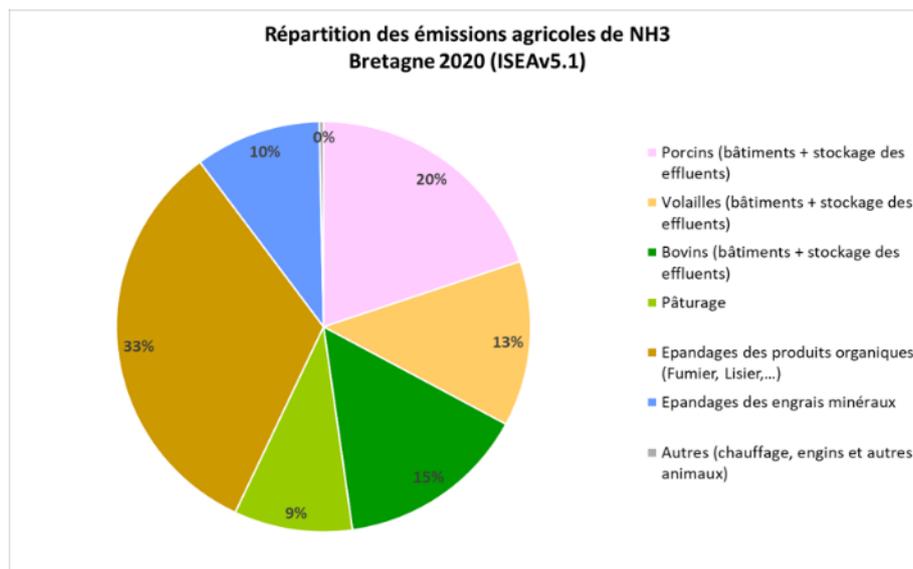


Figure 9 : Répartition des émissions agricoles d'ammoniac en Bretagne (Inventaire Air Breizh Isea v5.1)

Représentant plus d'un tiers des émissions agricoles d'ammoniac en Bretagne, les **activités d'épandage** de produits organiques (fumier, lisier) constituent un levier important pour diminuer les émissions. Celles-ci dépendent :

- du temps et de la surface de contact entre le produit organique et l'air. Pour ce faire, l'utilisation de matériel peu émissif est recommandée : une tonne à lisier avec rampe à pendillards engendre par exemple une réduction des émissions d'ammoniac (par rapport à la buse-palette sans enfouissement) de 30 % à 50 %. Cette réduction est comprise entre 40 et 65 % pour les rampes à patins et entre 56 à 80 % pour l'injection peu profonde (1).
- de la teneur en azote ammoniacal du produit organique : la teneur ammoniacale des lisiers est plus élevée que celle des fumiers. Le type d'élevage influence également la teneur en azote dans l'effluent. Comme présenté dans le tableau ci-dessous, la teneur en azote ammoniacal d'un fumier de volailles est 3.5 fois plus importantes que celle d'un lisier de bovins.

	Matière sèche (MS)	Matière organique (MO)	C/N	pH	Azote total (NTK)	Azote ammoniacal (NH4)	Phosphore total (P205)	Potassium total (K20)	Calcium total (Ca0)	Magnésium total (MgO)
Fumier de bovins	260 (210 à 300)	190 (150 à 210)	15,5 (12,0 à 18,1)	8,9 (8,7 à 9,3)	6,6 (5,1 à 7,4)	0,5 (0,2 à 0,7)	3,3 (2,3 à 4,0)	8,8 (5,8 à 11,3)	9,4 (4,8 à 11,6)	1,8 (1,2 à 2,2)
Compost de fumier de bovins	260 (210 à 290)	170 (140 à 180)	13,6 (10,8 à 14,6)	8,9 (8,7 à 9,2)	6,9 (5,2 à 7,3)	0,3 (0,1 à 0,3)	4,8 (3,3 à 4,9)	9,3 (6,5 à 11,1)	14,4 (8,0 à 17,3)	2,6 (1,7 à 2,8)
Lisier de bovins	40 (20 à 60)	30 (10 à 50)	6,8 (4,7 à 8,9)	7,8 (7,5 à 8,1)	2,2 (1,5 à 3,0)	1,0 (0,6 à 1,4)	1,0 (0,4 à 1,4)	2,3 (1,3 à 2,8)	1,5 (0,8 à 2,1)	0,6 (0,2 à 0,8)
Lisier de porcins	30 (20 à 40)	20 (10 à 20)	2,3 (1,5 à 2,9)	8,1 (8,0 à 8,3)	3,6 (2,5 à 4,5)	2,2 (1,4 à 2,5)	1,6 (0,7 à 2,1)	2,8 (1,8 à 3,5)	1,7 (0,7 à 1,9)	0,6 (0,2 à 0,8)
Fientes de volailles	500 (420 à 590)	320 (210 à 420)	7,8 (6,7 à 8,6)	8,5 (8,0 à 8,9)	21,5 (14,4 à 26,0)	3,5 (1,9 à 4,3)	22,4 (16,7 à 26,5)	17,7 (15,5 à 21,3)	59,1 (37,0 à 77,6)	7,3 (5,8 à 8,9)
Fumier de volailles	530 (430 à 610)	380 (320 à 490)	9,3 (7,4 à 10,5)	8,1 (7,7 à 8,9)	22,0 (17,3 à 27,5)	3,5 (1,6 à 5,2)	20,2 (13,8 à 25,3)	20,8 (15,3 à 24,2)	32,9 (19,8 à 39,5)	6,7 (4,7 à 7,4)

Source : Analyses SATEGE, Chambres d'agriculture du Nord - Pas-de-Calais et de la Somme (plus de 400 analyses).

Figure 10 : Composition moyenne des effluents bovins, porcins et avicoles (en kg/t brut) [source : Analyses SATEGE - juin 2013]

Par ailleurs, les **émissions au niveau des sites d'exploitations** ne sont pas à négliger occupant la moitié des émissions agricoles d'ammoniac. L'ensemble des filières (bovins, volailles et porcins) sont concernées. Les leviers de réduction des émissions de l'ammoniac au niveau du site d'exploitation concernent :

- l'alimentation des animaux en ajustant les apports en matière azotée,
- les bâtiments en adaptant le temps de présence des animaux dans le bâtiment et la gestion des effluents. Le principe général consiste à éliminer au plus tôt et de manière la plus efficace les déjections.
- le stockage des effluents en extérieur : ces émissions dépendent de la surface de contact entre l'air et l'effluent ainsi que de sa teneur en azote ammoniacal. Cette dernière est dépendante du type de litière utilisée et de l'alimentation distribuée en bâtiment.

c. Réglementation de l'ammoniac dans l'air

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) (2):

- 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 qu'il ne s'agit pas de mesures réalisées selon le protocole de surveillance de l'atmosphère des lieux de travail.

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 (3) :

- 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 (4).

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

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 (année de référence 2005) dans la Directive NEC 2 (2016-2284).

3.2. Les particules fines

a. Propriétés et caractéristiques

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 PM2,5 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).

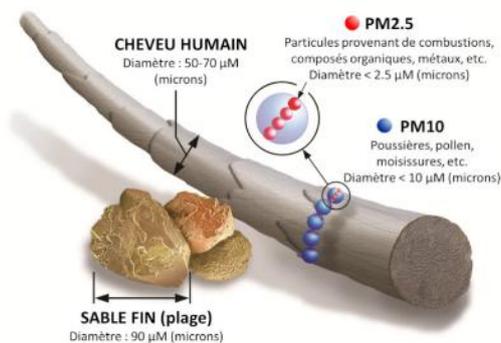


Figure 11 : Comparaison des tailles de particules PM10 et PM2,5 (Source U.S EPA)

- 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 et 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) ou encore 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** :

❖ Fraction carbonée :

- **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 (alcane, 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.

L'OM n'est généralement 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 V.1.d)).

- **carbone élémentaire (EC)** (ou carbone suie BC) 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).

❖ Fraction inorganique :

- **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 : NO_x , SO_2 , NH_3). Ces ions se trouvent principalement dans l'atmosphère sous forme de nitrate et sulfate d'ammonium (NH_4NO_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$).

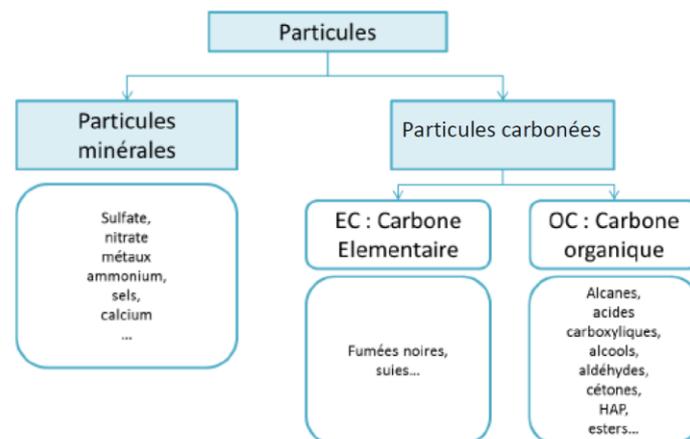


Figure 12 : Fractions chimiques des particules

b. Répartition des sources d'émission de particules fines

En Bretagne, les activités agricoles contribuent respectivement à 46% des émissions de PM10 et 19% des émissions de PM2.5 (Figure 13).

Les travaux aux champs sont identifiés comme les plus émetteurs de particules primaires au sein du secteur agricole (de l'ordre de 70% des émissions de PM10). Deux postes sont identifiés comme fortement contributeurs : le travail du sol et la récolte. Lors du travail du sol, le niveau des émissions varie selon la nature des travaux effectués et le matériel utilisé. Les conditions climatiques et le type de sol influencent également ce phénomène. La réduction du nombre de passages d'engins, les interventions sur sol légèrement humide et sans vent, la couverture des sols en hiver limitent les émissions.

L'érosion éolienne peut aussi conduire à des émissions lorsque les sols ne sont pas couverts, particulièrement par vents forts sur des sols secs. Néanmoins, l'impact de l'érosion éolienne sur les émissions de particules primaires n'est pas comptabilisé dans les inventaires des émissions en France.

Concernant la récolte, le climat, la culture et la texture du sol sont les principaux facteurs influençant les émissions.

S'agissant des PM2.5, les émissions des engins agricoles contribuent majoritairement à travers la combustion d'hydrocarbures, l'abrasion des freins et les pneumatiques.

La réduction du nombre d'intervention au champ permettrait de réduire ces émissions.

La part de l'élevage dans les émissions des particules du secteur agricole est moins importante (de l'ordre de 30% des PM10 et 15% des PM2.5). En revanche ce secteur contribue indirectement via les émissions d'ammoniac, qui sont des précurseurs de particules fines secondaires non prises en compte dans les inventaires des émissions.

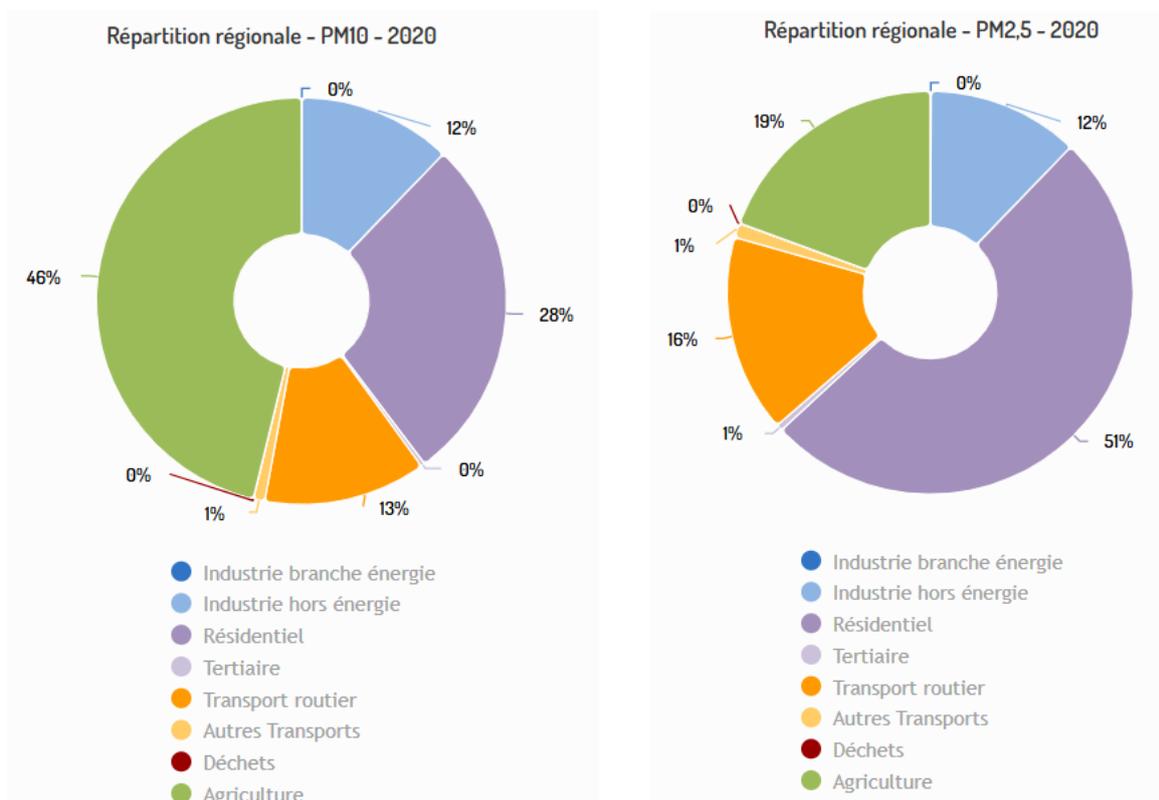


Figure 13 : Répartition des émissions de particules fines en Bretagne [Source Air Breizh Isea v5.2]

c. La réglementation

Les valeurs de référence sont issues du code de l'environnement (article R221-1), des lignes directrices de l'OMS relatives à la qualité de l'air (révisées en 2021) et de la nouvelle directive 2024/2881, approuvée en octobre 2024, qui fixe de nouveaux seuils pour 2030. Ces seuils de références sont présentés dans le Tableau 2 ci-dessous.

Les mesures PM durant cette campagne seront comparées aux seuils journaliers Informations/Recommandations pris en compte au niveau de la Préfecture du Finistère c'est-à-dire, 50 µg/m³ en moyenne journalière pour les PM10 (arrêté préfectoral du 18 décembre 2017 relatif aux mesures d'urgence applicables en cas de pic de pollution de l'air ambiant).

Tableau 2 : Valeurs de références pour les particules fines PM10 et PM2.5

Polluant	Valeur limite		Objectif qualité	Recommandation OMS (2021)		Nouvelle directive européenne (seuils visés en 2030)	
	Moy journalière	Moy annuelle	Moy annuelle	Moy journalière	Moy annuelle	Moy journalière	Moy annuelle
PM10	50 µg/m ³	40 µg/m ³	30 µg/m ³	45 µg/m ³	15 µg/m ³	45 µg/m ³	20 µg/m ³
PM2,5	-	25 µg/m ³	10 µg/m ³	-	5 µg/m ³	25 µg/m ³	10 µg/m ³

3.3. Matériel de mesure et de prélèvement utilisé

Le matériel de prélèvement et de mesure utilisé est présenté dans le Tableau 3.

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 est réalisée en laboratoire (IGE) et permet de connaître la composition au jour le jour des particules PM10.

Tableau 3 : Matériel de mesure et de prélèvements

Polluants	Analyseurs	Sites
Ammoniac	Picarro (G2103)	Site Nord, Site, Sud, Site Ouest, Station rurale Kergoff, Station urbaine Macé
Mesure PM10	Fidas	Station rurale Kergoff, Station urbaine Macé
	BAM	Site Nord, Site Sud, Site Ouest
Prélèvement PM10	Préleveur DA80	Site Nord

4. Représentativité des données

4.1. Contexte météorologique sur le site Nord

Les conditions météorologiques peuvent influencer la concentration des polluants dans l'air en favorisant leur dispersion ou leur accumulation. Il est donc important d'étudier le contexte météorologique dans lequel les mesures de polluants ont été réalisées. La température, la direction et la vitesse du vent ont été mesurées par la station météo située sur le site Nord. De plus, les précipitations ont été étudiées en utilisant les données de la station Météo France de Brest.

a. Température

La température influence la concentration en polluants dans l'air et notamment la volatilisation de l'ammoniac. Celle-ci est favorisée par des températures élevées (6). La Figure 14 présente l'évolution mensuelle de la moyenne de température de mars 2023 à juin 2024 sur le site Nord ainsi que les normales de température à Brest (station Météo France) de 1991 à 2020.



Figure 14: évolution mensuelle de la température sur le site Nord et des normales (1991 - 2020) à la station Météo France Brest – Guipavas

Les températures moyennes mensuelles augmentent progressivement à partir d'avril pour atteindre leur maximum de 18°C en septembre 2023, puis elles diminuent progressivement à partir de septembre pour atteindre leur minimum de 7°C en janvier 2024. Sur la période de mesure, l'écart entre les températures mesurées et les normales varie entre -1% et 50%. Les températures sont majoritairement supérieures aux normales, avec des écarts importants lors des mois de mars 2023, décembre 2023 et février 2024 (respectivement 27%, 40% et 50%).

Un autre paramètre à prendre en compte dans le contexte météorologique est les précipitations.

b. Précipitations

Les précipitations favorisent le lessivage de l'atmosphère et donc la diminution des concentrations en polluants dans l'air. La volatilisation de l'ammoniac est favorisée pour une pluviométrie faible ou nulle

(7). L'évolution mensuelle des précipitations de mars 2023 à mai 2024 et les normales de précipitations à Brest (station Météo France) de 1991 à 2020 sont présentées sur la Figure 15.

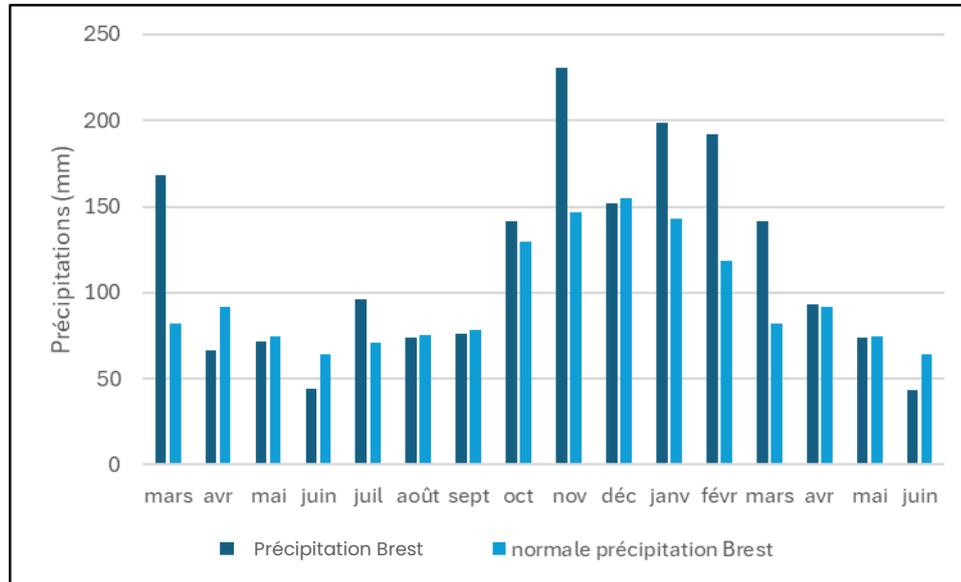


Figure 15: évolution mensuelle et normales (1991 - 2020) des précipitations à la station Météo France Brest-Guipavas

Les précipitations les plus importantes ont été enregistrées en mars 2023 et d'octobre 2023 à mars 2024 (> 140mm) avec un maximum de 230,7 mm en novembre 2023. D'avril à septembre 2023, les précipitations sont moins importantes (< 100 mm). Sur la période de mesure, les précipitations enregistrées à Brest sont supérieures à la normale en mars 2023, juillet 2023 et d'octobre 2023 à mars 2024.

Le troisième paramètre météorologique étudié ici est la direction et la vitesse des vents.

c. Vent

La direction et la vitesse du vent influence les concentrations en ammoniac en fonction des sources potentielles présentes dans les différentes directions autour du point de mesure. De plus, la volatilisation de l'ammoniac est favorisée pour des vitesses de vents élevées (7).

La Figure 16 présente la rose des vents de l'ensemble de la période de mesure sur le site Nord et les normales de rose de vents de la station Météo France de Brest Guipavas de 1991 à 2020.

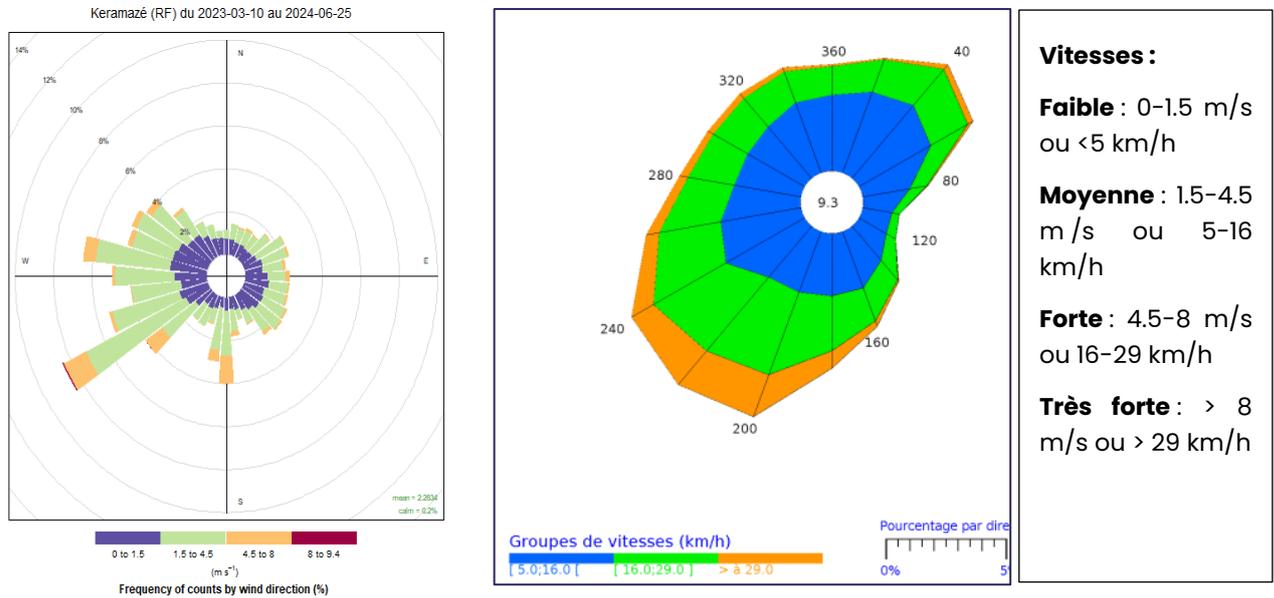


Figure 16: rose des vents sur le site Nord pendant la période de mesure (à gauche), normale annuelle (1991 – 2020) à la station Météo France de Brest (à droite)

Pendant la période des mesures, sur le site Nord, les vents provenaient majoritairement du Sud-Ouest avec une vitesse moyenne à très forte et du Nord-Ouest avec des vitesses moyennes à fortes. La rose des normales de vents sur ces 30 dernières années montre que les vents à Brest provenaient aussi majoritairement du Sud-Ouest avec des vitesses moyennes à très fortes et du Nord-Ouest avec des vitesses moyennes à fortes. Cependant, les normales de vents provenaient aussi du Nord-Est avec des vitesses moyennes à fortes ; conditions non rencontrées sur le site Nord pendant la période de mesure.

Les **conditions de vents sont variables en fonction des mois** : les roses de vent observées au niveau du site nord de mars 2023 à juin 2024 sont présentées et comparées aux normales mensuelles de rose de vent à la station Météo France Brest-Guipavas en annexe 1.

Les vents mesurés pendant les mois printaniers 2023 et 2024 sont issus de secteurs différents. Le mois d'avril 2024 présente des vents de Sud et Sud-Ouest non mesurés en avril 2023. En mai 2023, la rose est dominée par des vents de Nord-Est., de même que le mois de juin 2024. Dans l'ensemble, les conditions mensuelles de vent pendant la campagne de mesure sont peu représentatives des normales avec des vents de secteur Ouest très représentés et des vents de Nord-Est moins présents comparativement aux normales et notamment durant les mois printaniers, à l'exception du mois de mai 2023.

A noter que la comparaison, entre les normales enregistrées au niveau de la station Météo France Brest-Guipavas et les mesures faites au niveau du site nord pendant la campagne, a été faite de manière indicative. Plusieurs kilomètres séparent ces 2 points ce qui peut influencer les conditions de vent.

4.2. Représentativité des concentrations en PM10

L'objectif de ce paragraphe est de situer la période retenue pour cette campagne (de mars 2023 à juin 2024) par rapport aux niveaux moyens sur 5 ans. Pour ce faire, les moyennes mensuelles des concentrations en PM10 à MACE de janvier 2023 à décembre 2024, et la moyenne mensuelle de 2019 à 2024, ont été comparées sur la Figure 17.



Figure 17: évolution mensuelle des concentrations en PM10 à MACE de janvier 2023 à décembre 2024, et de la moyenne mensuelle des concentrations calculées de 2019-2024

Sur la période d'étude du projet ABAA (de mars 2023 à juin 2024), les concentrations en PM10 sont inférieures à la moyenne interannuelle en avril et en août 2023 et de février à mai 2024. L'écart à la moyenne sur ces mois varie entre 14% en mai 2024 et 40% en mars 2024.

En septembre 2023, la concentration en PM10 est au contraire plus importante que la moyenne de 26%. La présence de poussières désertiques a impacté les niveaux de PM10 mesurés début septembre notamment.

Sur la période de mesures du projet ABAA, les conditions météorologiques sont spécifiques à la période étudiée. Les précipitations ont été très importantes par rapport aux normales (11 mois sur 16 présentent une pluviométrie excédentaire) et de hautes températures ont été mesurées en mars 2023, décembre 2023 et février 2024. Les conditions de vent au niveau du site nord, différentes des normales (à la station Météo-France Brest - Guipavas), sont dominées par des vents d'un large secteur Ouest, à l'exception du mois de mai 2023 qui présente des vents dominants de Nord-Est représentatifs de la normale mensuelle. Par ailleurs, les concentrations en PM10 à MACE ont été inférieures à la moyenne des 5 dernières années sur 6 des 16 mois du projet.

5. Résultats des mesures d'ammoniac

5.1. Description statistique des mesures d'ammoniac

La Figure 18 présente les concentrations horaires en ammoniac sur les trois sites du projet ABAA et sur le site rural Kergoff sur la période de mesure commune aux 4 sites (du 26/09/2023 au 05/06/2024) sous forme de box plot. Les différentes valeurs visibles sur les boxplot dans ce rapport sont présentées en Annexe. Sur cette période, les mesures à MACE ne sont disponibles que jusqu'au 16 octobre 2023, il n'est donc pas présenté sur la figure suivante.

Par ailleurs, le Tableau 4 présente l'ensemble des données statistiques sur les trois sites du projet ainsi qu'à la station Kergoff et à la station MACE pour leurs différentes périodes de mesures.

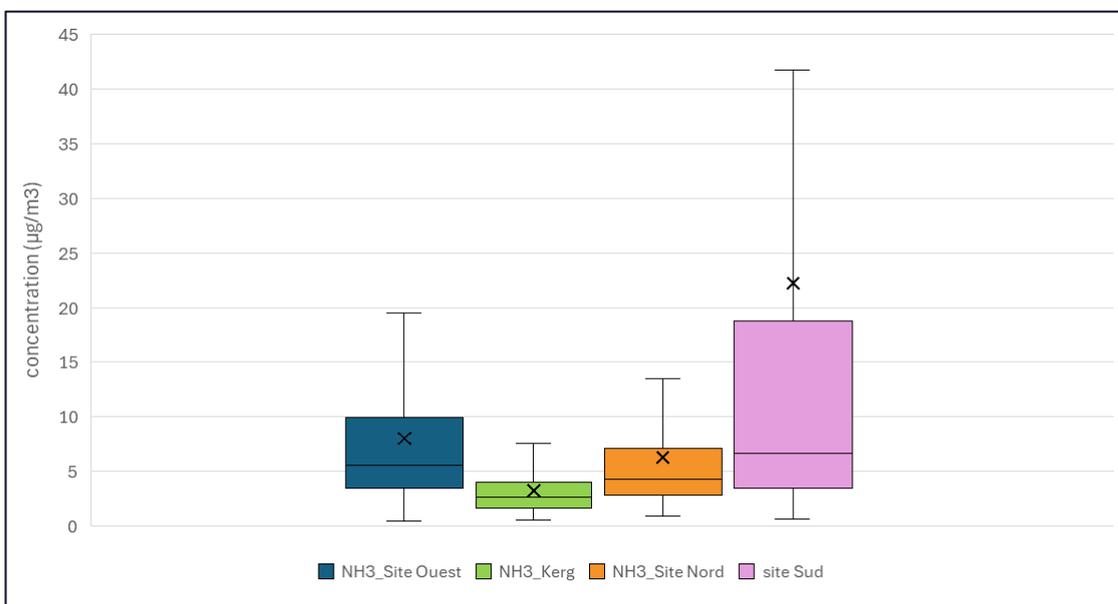


Figure 18: Niveaux en ammoniac sur les sites Nord, Ouest, Sud et à Kergoff du 26 septembre 2023 au 5 juin 2024

Tableau 4: données statistiques des mesures en ammoniac

Valeur ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Site nord <i>Du 10/03/2023 au 30/06/2024</i>	Station Macé <i>Du 10/03/2023 au 16/10/2023</i>	Station Kergoff <i>Du 10/03/2023 au 20/06/2024</i>	Site ouest <i>Du 7/07/2023 au 19/06/2024</i>	Site sud <i>Du 26/09/2023 au 5/06/2024</i>
1 ^{er} quartile horaire	3.0	1.4	2.0	3.4	3.4
Médiane horaire	4.9	2.3	3.0	5.4	6.6
Moyenne horaire	7.7	2.7	3.6	7.9	22.2
3 ^{ème} quartile horaire	9.6	3.7	4.5	9.7	18.7
Maximum horaire	145.4	17.0	29.0	84.0	3317.4
Maximum journalier (date)	29.4 (15/03/2024)	8.8 (09/09/2023)	11.6 (05/09/2023)	42.8 (02/02/2024)	367.4 (18/02/2024)

La concentration moyenne à la station de Brest Macé est la plus faible en cohérence avec la typologie de la station. C'est, en effet, une station urbaine et donc éloignée des sources d'ammoniac principalement agricoles. Les stations du projet ABAA étant placées au cœur d'exploitation et dans une zone agricole dense, des concentrations plus élevées sont observées par rapport à la station rurale Kergoff. Le site Ouest présente une concentration moyenne en ammoniac plus élevée que celle observée sur le site Nord néanmoins elles sont du même ordre de grandeur. En ce qui concerne le site Sud, la moyenne des concentrations en ammoniac est plus de deux fois plus élevée que sur les autres sites. Cette différence est due à des valeurs ponctuelles très fortes (max relevé $3.3 \text{ mg}/\text{m}^3$) certainement liées à l'activité de l'exploitation. Ce site de mesure est proche d'un élevage de volaille, présentant, tout d'abord, un UGB plus élevé que les 2 autres exploitations (cf. partie 2.1) ; par ailleurs les fientes de volailles sont particulièrement riches en azote minéral (7).

Comparaison avec les seuils sanitaires et les valeurs critiques de biodiversité :

Pour rappel, les concentrations d'ammoniac dans l'air ne sont actuellement pas réglementées (au même titre que les particules fines par exemple), cependant il existe des valeurs toxicologiques de référence et des valeurs critiques pour la biodiversité (cf. partie 3.1.c).

Aucun de ces seuils n'a été atteint lors de la période de mesure. Le maximum journalier de $367.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ atteint sur le site Sud le 18 février 2024 est largement inférieur à la VTR pour une exposition aiguë de $5900 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Sur la période de mesure, l'ensemble des sites dépassent les niveaux critiques, fixés pour la protection de la biodiversité, de 1 et $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, avec une moyenne minimale de $3.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ au niveau de la station rurale Kergoff.

5.2. Etude des activités agricoles sur l'exploitation du site sud

Le site sud est composé de plusieurs bâtiments d'élevage de volaille (3940 UGB) ainsi qu'une station de compostage. Comme mentionné précédemment, les fientes de volailles sont particulièrement émissives en ammoniac. Par ailleurs, les stations de compostage peuvent aussi émettre de l'ammoniac en particulier lors des phases de fermentation et de retournement (8).

Dans son rapport, Atmo BFC a également effectué des mesures sur le site d'une exploitation de volailles et a mesuré des concentrations plus élevées que sur les autres sites de mesure (2). Les pics de concentrations, mesurés par badge alpha (mesure passive permettant d'obtenir une donnée par semaine) coïncidaient avec les dates des curages à la suite des départs des animaux.

Une étude similaire a donc été réalisée, ici, en y associant les activités recueillies et réalisées sur l'exploitation.

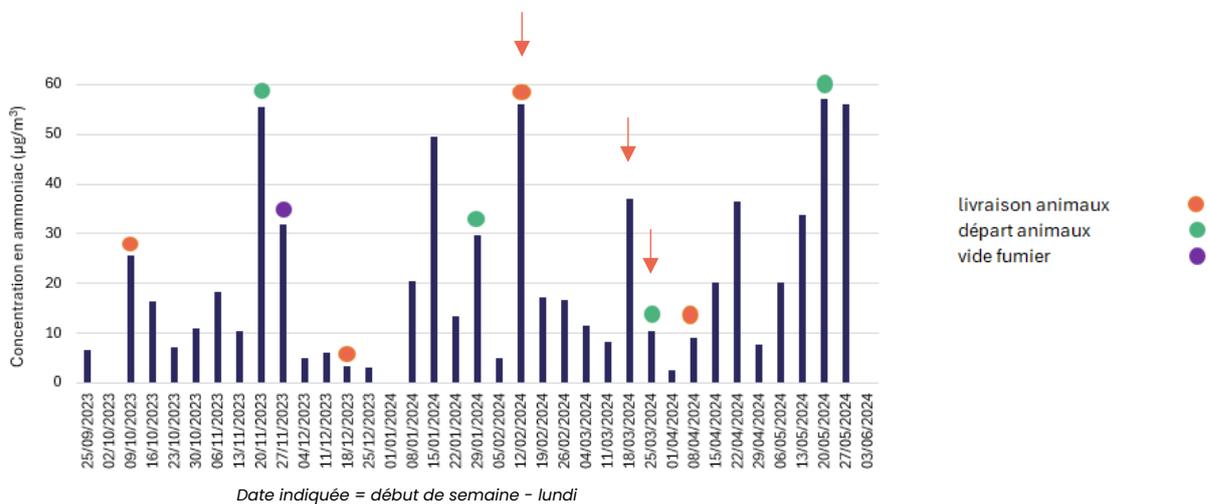


Figure 19 : Concentrations moyennes hebdomadaires et activités agricoles sur le site sud

Le départ des animaux coïncide assez généralement avec les moyennes hebdomadaires en ammoniac les plus élevées, comme cela a également été observé en Bourgogne Franche Comté. La livraison des animaux impacte moins les concentrations en ammoniac puisque aucune accumulation de fientes n'a encore eu lieu. Le pic de concentration en ammoniac observée la semaine du 12/02/2024 semble donc être associé à une autre activité que la livraison des animaux réalisée autour de ces jours-ci. Les dates des activités ayant été soit récupérées auprès de l'exploitant soient estimées via les périodes moyennes de chaque activité, il est possible que le départ des animaux de la semaine du 25/03/24 se soit réalisé quelques jours plus tôt et que le pic en ammoniac de la semaine du 18/03/24 soit associé à cette activité.

Certains pics ne semblent pas pouvoir être expliqués par les activités des bâtiments de volaille. La station de compostage, située dans le même axe que les bâtiments de volaille, a pu contribuer aux augmentations de concentrations en ammoniac. Toutefois, aucune information sur les activités réalisées au niveau de la station de compostage n'a pu être récupérée.

5.3. Correction des mesures sur le site Sud

Pour minimiser l'impact local de l'exploitation, dû à l'élevage de volailles, et obtenir des mesures comparables à celles des autres sites ABAA, il a été décidé **d'invalidier les pics horaires supérieurs à 84 µg/m³ pour le site Sud**, ce qui correspond au maximum horaire atteint sur le site Ouest. Avec ce critère, 11% des données horaires (de septembre 2023 à juin 2024) ont été invalidées. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 20 et dans le Tableau 5.

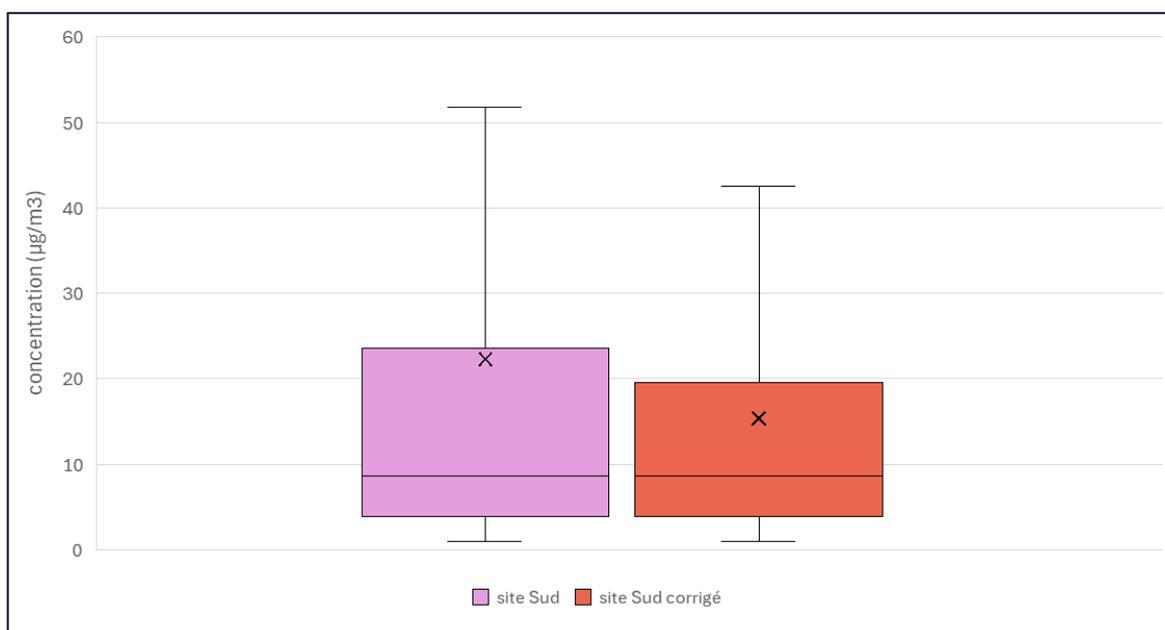


Figure 20: niveaux en ammoniac sur le site Sud avant et après correction

Tableau 5: données statistiques des mesures en ammoniac sur le site Sud avant et après correction

Concentration en NH ₃ (µg/m ³)	Site Sud	Site Sud corrigé
1 ^{er} quartile horaire	3.4	3.3
Médiane horaire	6.6	6.0
Moyenne horaire	22.2	13.3
3 ^{me} quartile horaire	18.7	15.3
Maximal horaire	3317.4	83.8

Après les corrections faites sur le site Sud, la moyenne de ce site est passée de $22.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à $13.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (-40%). Cependant elle reste supérieure aux moyennes observées sur les site Nord et Ouest, respectivement de $6.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et de $8.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Après correction des données, l'influence de l'élevage de volailles est toujours visible. **Dans la suite de ce rapport, les données corrigées seront utilisées.**

5.4. Site Nord

a. Evolution saisonnière

La Figure 21 présente l'évolution de la concentration en ammoniac selon les saisons sur le site Nord en parallèle des concentrations observées à la station rurale de Kergoff du 10 mars 2023 au 31 mai 2024.

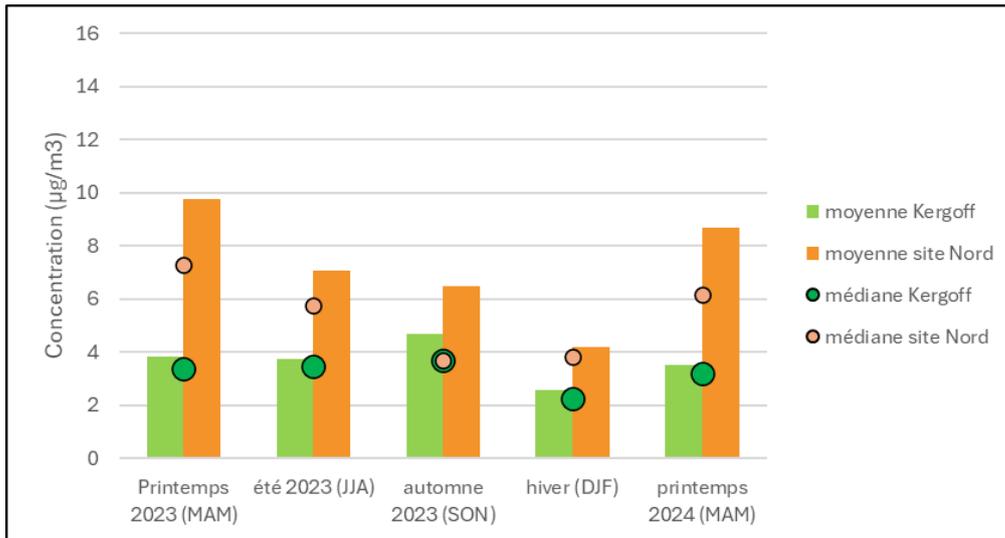


Figure 21: évolution saisonnière des concentrations en ammoniac sur le site Nord et à Kergoff

Sur le **site Nord**, la concentration en ammoniac est **plus importante aux printemps** et plus faible en hiver. Cela est cohérent avec les **périodes d'activités agricoles** comme les épandages ayant lieu majoritairement au printemps et en été. En automne, la concentration moyenne en ammoniac est proche de celle de l'été 2023 mais la médiane des concentrations est plus faible en automne qu'en été 2023. Cette différence peut être due à des activités ponctuelles pendant l'été sur l'exploitation du site Nord. La concentration moyenne de NH_3 lors des **deux printemps** est du **même ordre de grandeur** ($9.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2023 et $8.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2024) avec tout de même un écart relatif de -11% en 2024.

A la station Kergoff, les niveaux en ammoniac sont systématiquement inférieurs à ceux observés sur le site Nord et ils varient moins car le site est plus éloigné des sources. De plus, à Kergoff, les médianes sont proches des moyennes, des niveaux ponctuels et élevés sont donc moins souvent observés qu'au niveau du site Nord.

A Kergoff, excepté en hiver où la concentration moyenne minimale ($2.26 \mu\text{g}/\text{m}^3$) est mesurée (tel que sur le site nord) il y a peu de variations saisonnières. La concentration moyenne maximale ($4.68 \mu\text{g}/\text{m}^3$) est obtenue à l'automne 2023.

c. Evolution mensuelle

Pendant une même saison, une variation des concentrations en ammoniac peut être observée. La Figure 22 présente l'évolution mensuelle de la concentration en ammoniac sur le site nord et à la station Kergoff.

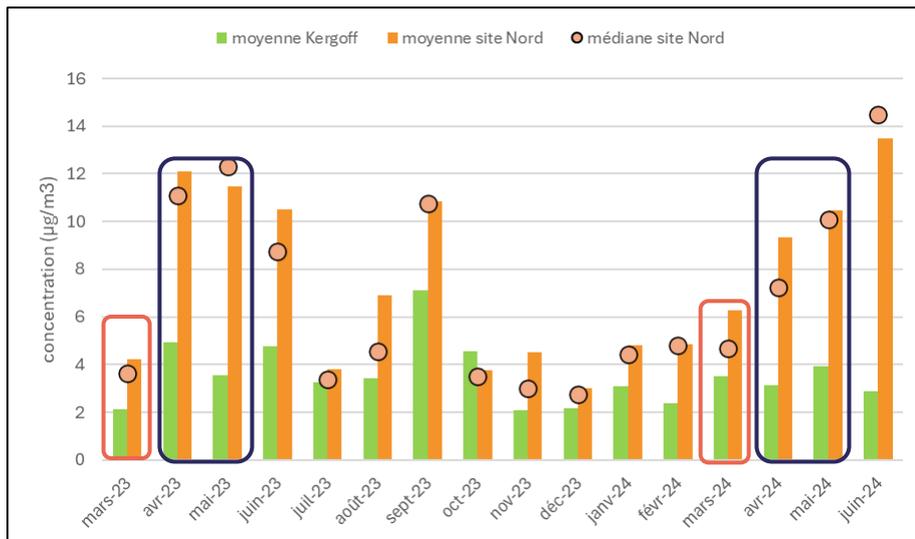


Figure 22: évolution mensuelle des concentrations en ammoniac sur le site Nord et à Kergoff

La Figure 22 montre que sur le site Nord, lors des deux printemps, les **concentrations** moyennes et médianes en ammoniac sont **plus basses en mars qu'en avril et mai**.

Au niveau de la station de **Kergoff**, les variations d'ammoniac sont moins importantes car la station est plus éloignée des sources. Cependant le mois de mars 2023 présente des concentrations moins importantes qu'en avril et qu'en mai 2023, comme sur le site nord. Ce n'est pas le cas du printemps 2024 pour lequel les concentrations sont du même ordre de grandeurs sur les trois mois à la station Kergoff. En mars, à Kergoff, les pluies ont été plus importantes en 2023 qu'en 2024 (144 mm en 2023 et 103 mm en 2024) et en avril, elles ont été plus faibles en 2023 qu'en 2024 (respectivement 62 mm et 82 mm). Ces différences peuvent contribuer aux variations de concentrations observées. En **automne**, la concentration en ammoniac est **plus importante en septembre** comme c'était le cas sur le site Nord, ce qui peut s'expliquer par des **températures plus chaudes** en septembre.

❖ Influence de la pluviométrie

Les faibles concentrations observées en mars 2023 et 2024 peuvent s'expliquer par une **météo très pluvieuse lors de ces deux mois (respectivement en mars 2023 et mars 2024 +105% et +72% d'écart relatif de pluviométrie par rapport à la normale mensuelle)**. Les précipitations ont pour effet de lessiver l'atmosphère entraînant de faibles concentrations de polluants dans l'atmosphère et une non-volatilisation de l'azote présent dans le sol. De plus, les conditions météorologiques ont entraîné

un report des épandages réalisées habituellement à partir de mars (sur maïs par exemple) au mois d'avril.

Pendant l'été 2023, la concentration moyenne en ammoniac est plus basse en juillet qu'en juin et en août. Cela peut être dû à une pluviométrie plus importante en juillet (96 mm) qu'en juin (44 mm) et août (74 mm). En effet, **les concentrations en ammoniac les plus basses sont enregistrées pour des cumuls de précipitations importants ($\geq 100\text{mm}$)** (Figure 23).

A l'automne 2023, le mois de **septembre** présente des concentrations moyenne et médiane plus **importantes** que celles d'octobre et de novembre. Cela s'explique par des activités agricoles ayant lieu au mois de septembre comme des **épandages sur prairies**. En effet, dans l'environnement de ce site (rayon de 1 km), 37% de la superficie est occupée par des prairies (cf partie 2.2).

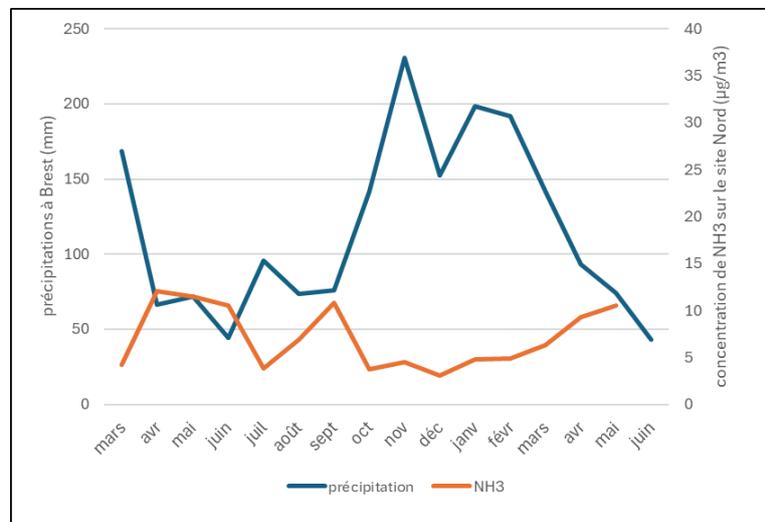


Figure 23: Evolution mensuelle du cumul de précipitation à Brest et de la concentration en ammoniac sur le site Nord

❖ Roses de pollution d'ammoniac

Par ailleurs, les **conditions de vents** peuvent avoir un impact sur les concentrations mesurées. Les roses de pollution mensuelles d'ammoniac de 2023 et 2024 sur le site Nord sont présentées sur la Figure 24. Chaque pale correspond à une direction de vent. Plus elle est grande, plus les vents provenant de cette direction sont fréquents. Les couleurs représentent les concentrations en ammoniac mesurées (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

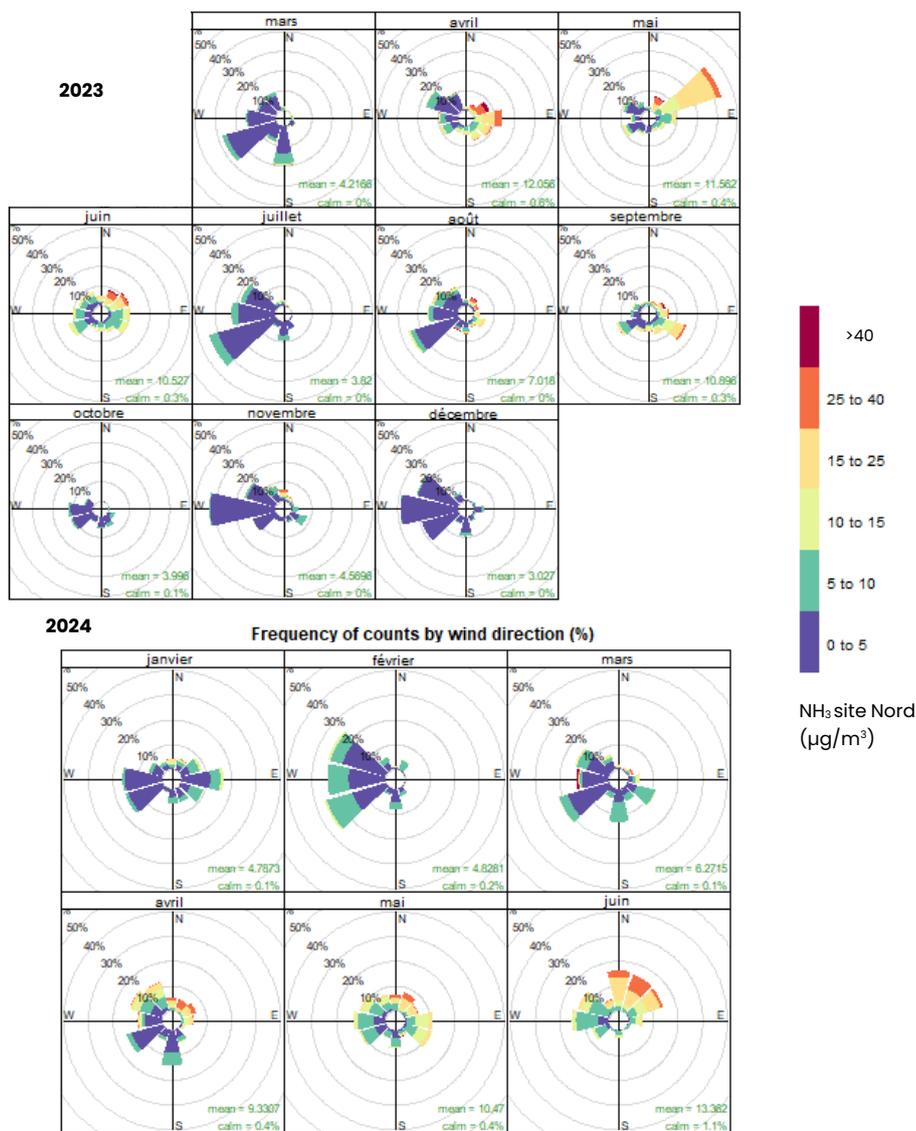


Figure 24: Roses mensuelles de pollution d'ammoniac sur le site Nord en 2023 et 2024

En 2023, les concentrations les plus importantes en ammoniac sur le site nord proviennent majoritairement du Nord-Est (avril à juin) et du Sud-Est (en septembre et avril par exemple). En revanche, les concentrations les plus faibles sont plutôt issues de l'Ouest. En 2024, une influence d'un large secteur Nord/Nord-Est est constatée pour les plus fortes concentrations en ammoniac à nouveau, pour les mois d'avril à juin avec une dominance pour le mois de juin. Des fosses ouvertes de stockage se trouvent dans la direction Nord-Est du site Nord (Figure 4), elles peuvent être une source d'émission d'ammoniac et avoir un impact sur les mesures réalisées. Au mois d'avril 2024, une influence issue de Nord-Ouest est observée et non de secteur Sud-Est, comme constatée en 2023.

d. Evolution journalière

L'analyse du profil journalier des niveaux d'ammoniac sur le site Nord met en avant une hausse dans l'après-midi. **Les concentrations en ammoniac augmentent avec la température** comme le montre la Figure 25 qui présente le profil moyen journalier de la température et de la concentration en ammoniac sur le site Nord. La concentration en ammoniac augmente dans la matinée, à partir de 8h, pour atteindre un pic dans l'après-midi (entre 14 et 17h) avant de diminuer, ce qui correspond au profil journalier des températures (9). La température est un facteur influant dans le processus de volatilisation de l'ammoniac.

Au niveau du site Nord, une bonne corrélation est observée entre la température moyenne et les niveaux en ammoniac. Les heures les plus chaudes sont celles où l'on mesure le plus d'ammoniac pour ce site. Ce profil est similaire à celui d'un site rural (7).

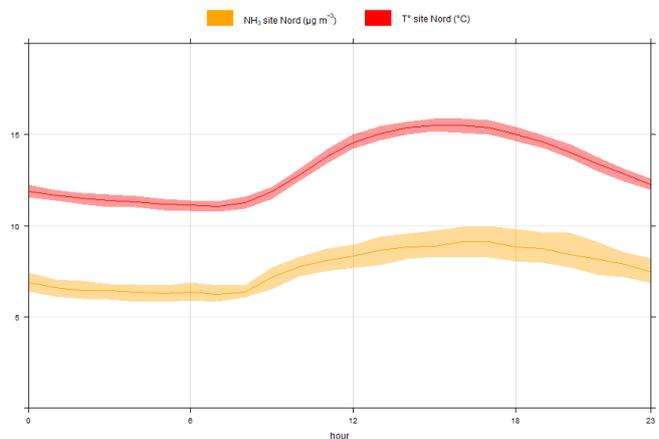


Figure 25: Profil journalier de concentrations en ammoniac et de la température sur le site Nord (mars 2023 – juin 2024)

Au niveau du site Nord, les concentrations les plus importantes sont observées au cours des deux printemps, en avril et en mai, mais aussi en juin 2023 et 2024, ainsi qu'en septembre 2023. Or ces périodes correspondent à celles des épandages, notamment sur maïs aux printemps et sur prairie en septembre, qui représentent respectivement 33% et 37% des cultures autour de ce site.

L'influence des conditions météorologiques est constatée avec :

- les précipitations qui font baisser les concentrations en ammoniac,
- les vents de Nord-Est ou Sud-Est favorables aux concentrations plus élevées,
- une corrélation entre les concentrations en ammoniac et la température extérieure au fil de la journée.

5.5. Site Ouest

a. Evolution saisonnière

L'évolution saisonnière des concentrations en ammoniac sur le site Ouest et à la station rurale de Kergoff est présentée sur la Figure 26.

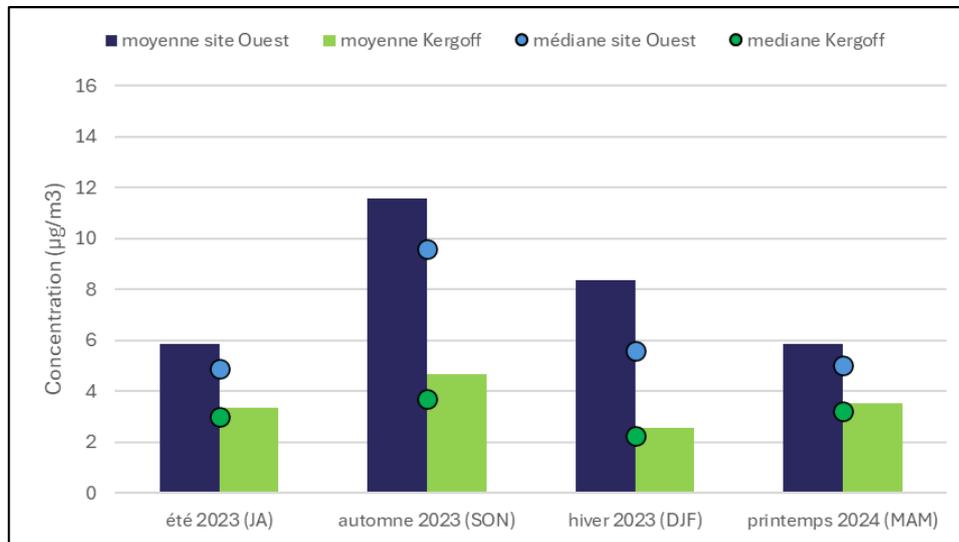


Figure 26: évolution saisonnière des concentrations en ammoniac sur le site Ouest et à Kergoff

Sur le **site Ouest**, des variations importantes de la concentration en ammoniac selon les saisons peuvent être observées comme sur le site Nord. Elle varie entre $4.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $11.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur ce site tandis qu'au niveau de la station de fond Kergoff, la concentration en ammoniac varie entre $2.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $4.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à cette période. **Les concentrations les plus élevées sont mesurées en automne sur le site Ouest, ce qui coïncident avec des épandages sur prairie.** Pour rappel, dans l'environnement de ce site (1 km de rayon), 43% de la superficie est occupée par des prairies (cf partie 2.3). Au niveau du site Ouest, la concentration moyenne en ammoniac est plus importante en hiver qu'en été et au printemps, tandis que l'hiver correspond aux niveaux minimums à la station Kergoff. Cela peut être dû à des activités d'épandage sur prairie qui sont réalisées au mois de février notamment.

b. Evolution mensuelle

L'évolution mensuelle de la concentration en ammoniac sur le site Ouest est présentée sur la Figure 27 en parallèle de celle mesurée au niveau de la station Kergoff.

Sur le site de Kergoff, les variations et les concentrations en ammoniac sont moins importantes qu'au niveau du site Ouest. Elles varient entre $1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $7.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à Kergoff et entre $4.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $14.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur le site Ouest. Les écarts entre les deux sites sont supérieurs à 60% (respectivement 68%, 78% et 83%) pour les mois d'octobre, novembre 2023 et février 2024. Ces résultats sont cohérents avec la typologie de la station Kergoff puisque ses concentrations sont représentatives d'un bruit de fond rural.

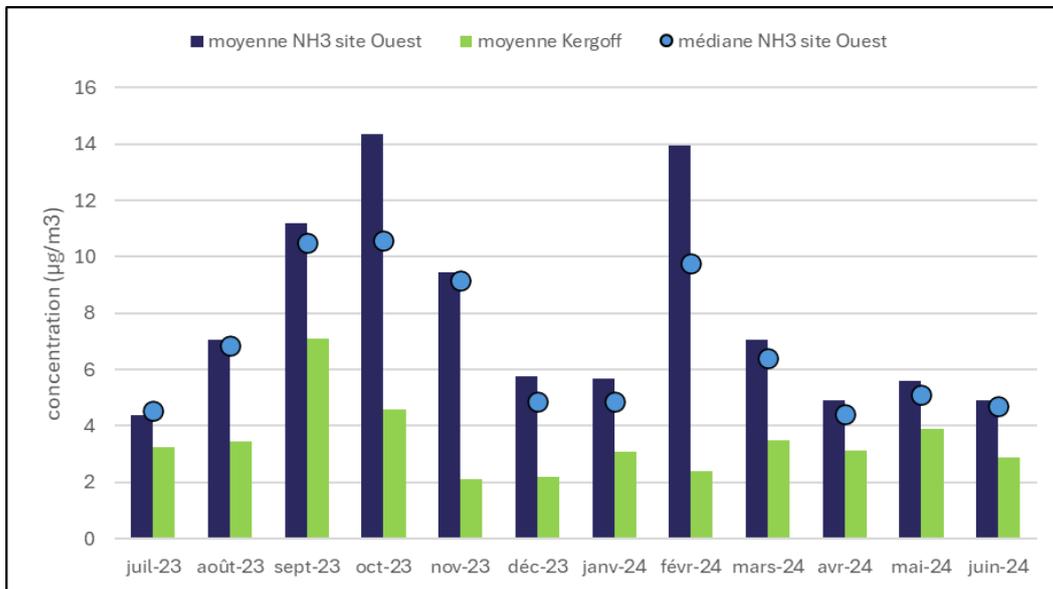


Figure 27 : évolution mensuelle des concentrations en ammoniac sur le site Ouest et à Kergoff

Les concentrations moyennes les plus importantes sur le site Ouest sont observées en octobre 2023 et en février 2024 et, dans une moindre mesure, en septembre et novembre 2023. Cependant les concentrations médianes d'octobre 2023 et de février 2024 sont du même ordre de grandeur que les concentrations en ammoniac de septembre et de novembre 2023. Les différences entre les concentrations médianes et moyennes en octobre (36%) et en février (43%) proviennent de concentrations ponctuellement élevées à l'origine d'activités ayant lieu sur l'exploitation du site Ouest ou à proximité. Par exemple, les 15 premiers jours d'octobre 2023, les vaches étaient au champ avec un accès libre à l'étable entraînant des passages réguliers ou des potentiels arrêts à proximité du point de mesure. Le maximum horaire du site Nord est atteint à cette période (7 octobre 2023 à 20h).

❖ Roses de pollution d'ammoniac

Par ailleurs, les **conditions de vents** peuvent avoir un impact sur les concentrations mesurées. Les roses de pollution mensuelles d'ammoniac de 2023 et 2024 sur le site Ouest sont présentées sur la Figure 28. Chaque pale correspond à une direction de vent. Plus elle est grande, plus les vents

provenant de cette direction sont fréquents. Les couleurs représentent les concentrations en ammoniac mesurées (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

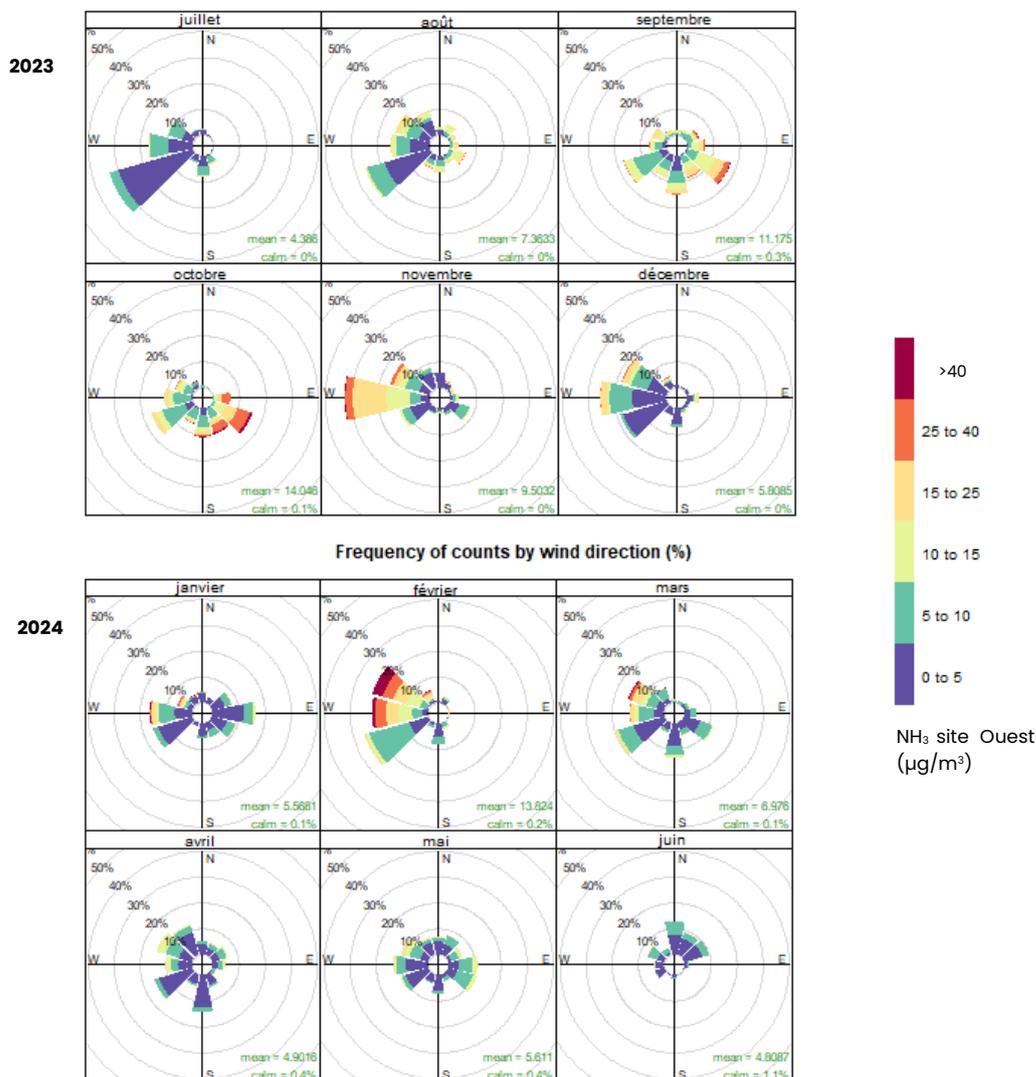


Figure 28 : Roses mensuelles de pollution d'ammoniac au niveau du site Oest

En 2023, les concentrations les plus importantes en ammoniac sur le site ouest proviennent majoritairement du Sud-Est (septembre et octobre) et de l'Ouest (en novembre). Excepté ce mois de novembre 2023, les concentrations les plus faibles proviennent généralement de l'ouest comme sur le site nord. La présence du bâtiment à l'ouest du site de mesure peut jouer sur les concentrations mesurées en novembre, période où les vaches commencent à être plus au bâtiment que plus tôt dans l'année. En 2024, les concentrations les plus élevées proviennent de l'ouest et du nord-ouest (février et mars). Les deux mois avec les plus fortes concentrations mensuelles en ammoniac, octobre 2023 et février 2024, présentent des influences différentes, respectivement de sud-est et de nord-ouest.

c. Evolution journalière

La Figure 29 présente l'évolution journalière moyenne de la concentration en ammoniac mesurée sur le site Ouest et de la température enregistrée sur le site Nord. La concentration la plus forte (proche de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) est mesurée en fin de matinée alors que la température est en cours d'augmentation. Le profil moyen journalier est différent de celui rencontré au niveau du site Nord (Figure 25).

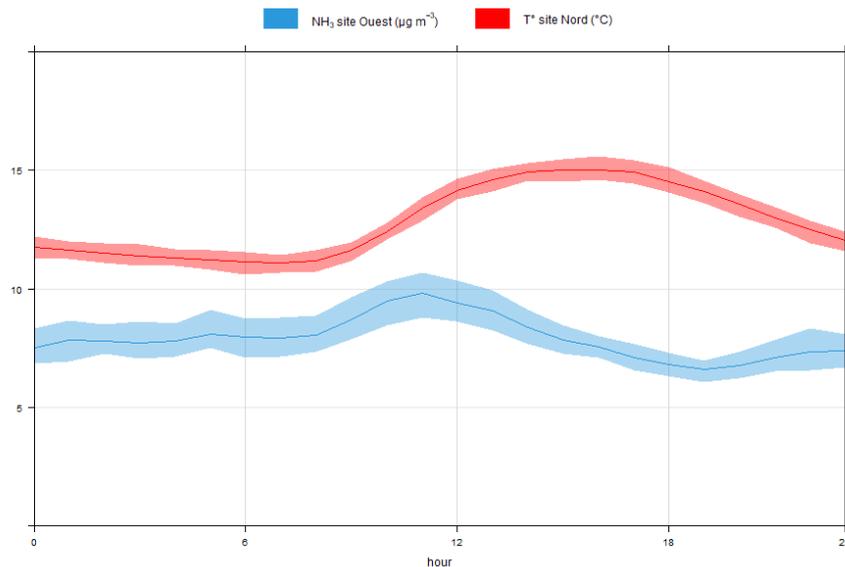


Figure 29 : Profil journalier des concentrations en ammoniac sur le site Ouest et de la température sur le site Nord (juillet 2023 – juin 2024)

Sur le site Ouest, les niveaux en ammoniac les plus importants ont été mesurés en automne et en hiver (pendant les mois de septembre à novembre 2023 et février 2024). A ces périodes des épandages sur prairie sont réalisés. En octobre et en février, du fait de moyennes plus importantes que les médianes, des activités ponctuelles (exemple des vaches à proximité du point de mesure début octobre) sur ce site peuvent expliquer cette différence. Le profil moyen journalier présente un maximum en fin de matinée ce qui diffère d'un profil type lié à l'augmentation de la température influençant la volatilisation de l'ammoniac (à l'image de ce qui a été observé sur le site Nord).

5.6. Site Sud

Les résultats présentés ci-dessous sont issus du jeu de données corrigées afin de minimiser l'impact local de l'exploitation.

a. Evolution saisonnière

La Figure 30 présente l'évolution saisonnière des concentrations en ammoniac après correction sur le site Sud en parallèle de celles observées sur le site rural de Kergoff.

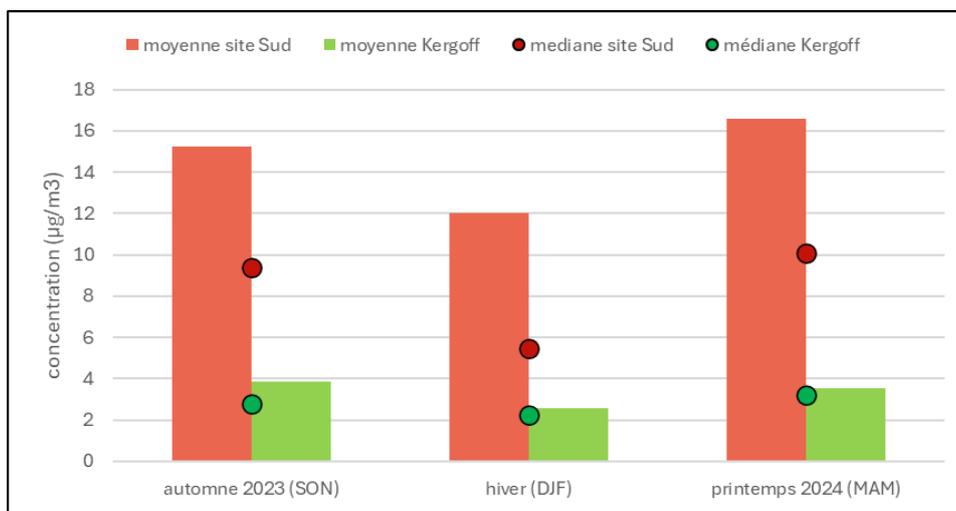


Figure 30: évolution saisonnière des concentrations en ammoniac sur le site Sud et à Kergoff

Selon les saisons, la concentration moyenne en ammoniac varie entre 12 µg/m³ et 17 µg/m³ sur le **site Sud** et entre 3 et 4 µg/m³ à la station Kergoff. Après correction des données, les moyennes sont encore élevées ce qui traduit l'influence de l'exploitation de volailles au niveau de ce point de mesure.

De plus, sur le site Sud, il y a un écart important entre les concentrations médianes et moyennes à cause de la présence de valeurs ponctuelles élevées malgré les corrections effectuées précédemment. Les médianes sont plus basses de 6 à 7 µg/m³ par rapport aux moyennes. Sur ce site, les concentrations les plus basses sont observées en hiver.

b. Evolution mensuelle

La Figure 31 présente l'évolution mensuelle des concentrations en ammoniac sur le site Sud et à la station Kergoff d'octobre 2023 à mai 2024. Les mois de septembre 2023 et de juin 2024 ne sont pas présentés car les mesures ont été réalisées seulement sur quelques jours de ces deux mois (du 26/09/2023 au 30/09/2023 et du 01/06/2024 au 05/06/2024).

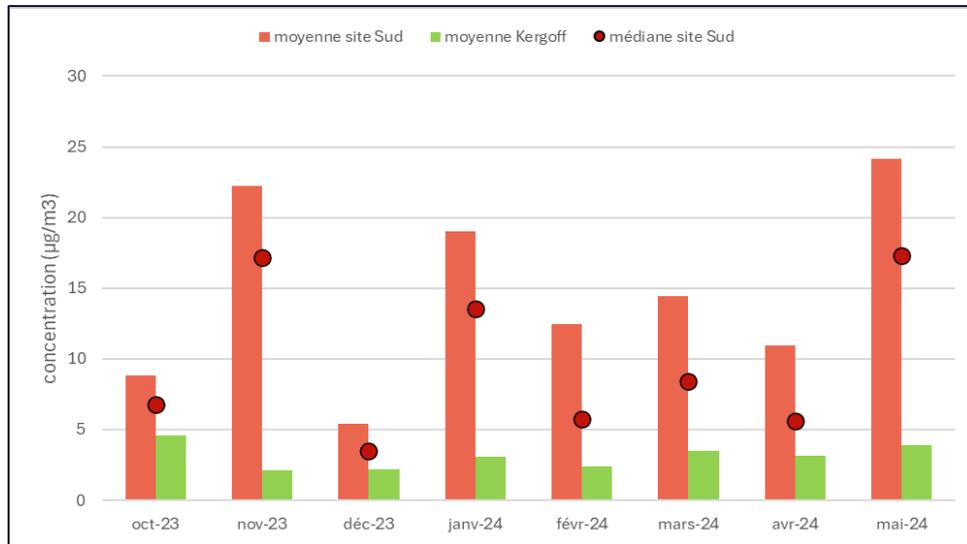


Figure 31: évolution mensuelle des concentrations en ammoniac sur le site Sud et à Kergoff

Sur cette période, les concentrations en ammoniac varient entre 1.7 µg/m³ et 4.6 µg/m³ à la station Kergoff et entre 3.5 µg/m³ et 24.1 µg/m³ sur le site Sud. Sur ce dernier site, les concentrations les plus importantes sont observées en novembre 2023 et en mai 2024 et, dans une moindre mesure, en janvier 2024. Elles sont respectivement de 22.2 µg/m³, 24.1 µg/m³ et 19.0 µg/m³.

Il est possible que certains épandages réalisés début novembre, fin janvier et en mai contribuent aux niveaux mesurés, cependant, l'influence des activités ayant eu lieu sur l'exploitation est probablement majoritaire (exemple : nettoyage des poulaillers référencé, dans la partie 4.2, en novembre, janvier, mars et mai).

❖ Roses de pollution d'ammoniac

Par ailleurs, les **conditions de vents** peuvent avoir un impact sur les concentrations mesurées. Les roses de pollution mensuelles d'ammoniac de 2023 et 2024 sur le site Sud sont présentées sur la Figure 32. Chaque pale correspond à une direction de vent. Plus elle est grande, plus les vents provenant de cette direction sont fréquents. Les couleurs représentent les concentrations en ammoniac mesurées (en µg/m³).

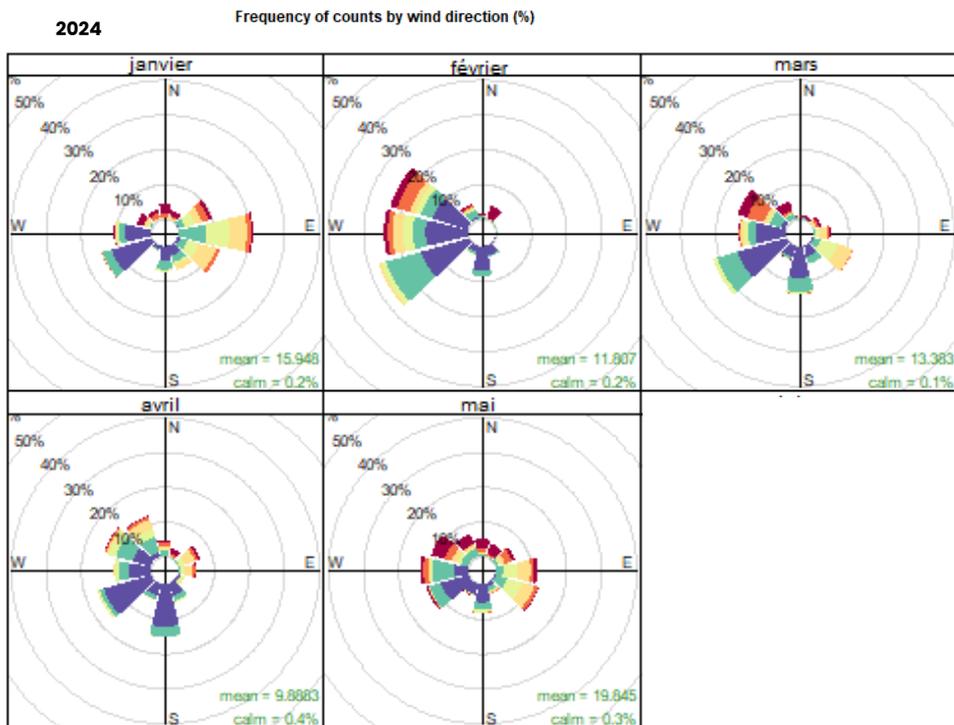
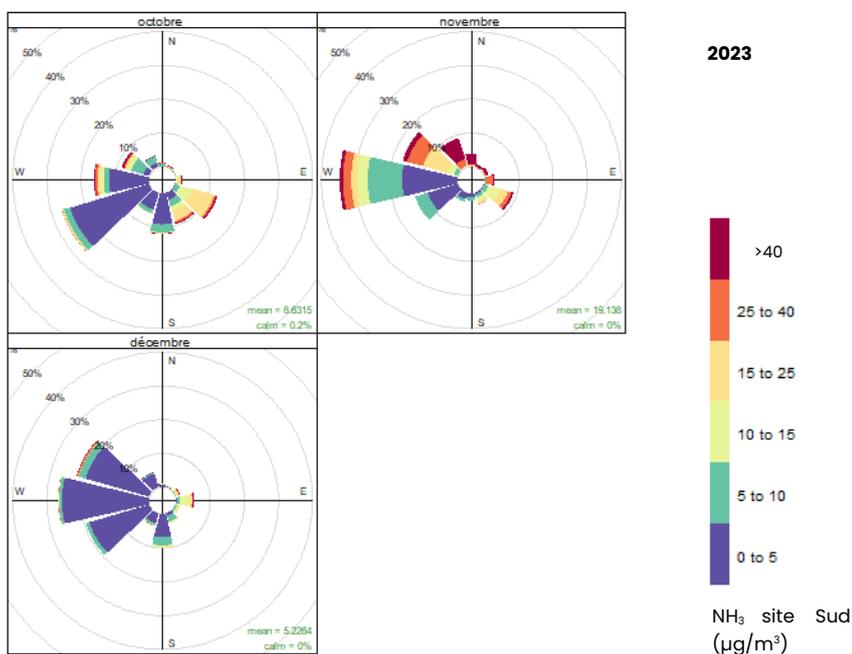


Figure 32 : Roses mensuelles de pollution d'ammoniac au niveau du site Sud

Au niveau du site Sud, en 2023, les concentrations les plus élevées en ammoniac proviennent majoritairement d'un large secteur nord-ouest (octobre et novembre). Dans une moindre mesure, quelques concentrations élevées ont une origine de sud-est. En 2024, le secteur nord-ouest présente toujours des concentrations fortes (>40 µg/m³) (en février, mars, et mai). Des concentrations élevées

proviennent également de l'est en janvier et en mai. Les concentrations les plus faibles proviennent globalement de tous l'ouest comme sur les 2 premiers sites. Les bâtiments de volailles situés au nord/nord-est du site de mesure peuvent être une source d'émissions d'ammoniac et avoir un impact sur les concentrations mesurées (Figure 8).

c. Evolution journalière

Le profil moyen journalier de l'ammoniac (données corrigées) pour le site Sud et de la température au niveau du site Nord sont présentés dans la Figure 33. Le profil moyen des mesures d'ammoniac au niveau de ce site présente plusieurs pics avec une concentration maximale (proche de $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$) atteinte en milieu de matinée. La corrélation avec la température n'est pas constatée comme c'est le cas pour le site Nord. Le profil atypique constaté au niveau du site Sud traduit l'influence d'activités environnantes qui impactent les mesures d'ammoniac (proximité de l'élevage de volaille) avec un niveau de fond supérieurs aux autres sites durant toute la journée.

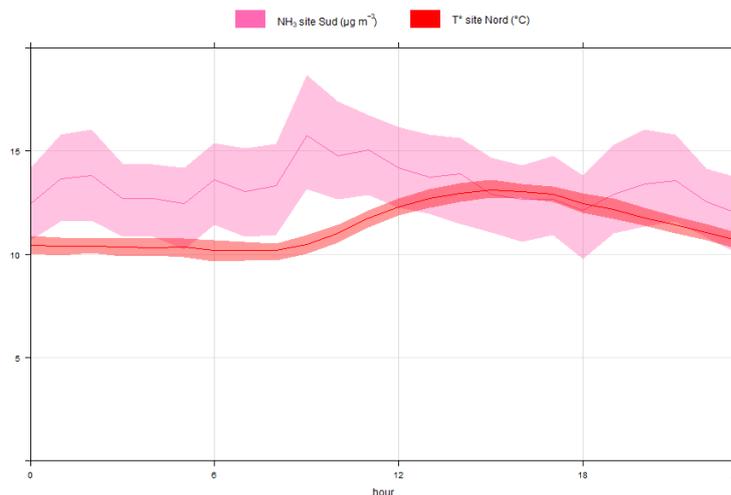


Figure 33 : profil journalier des concentrations en ammoniac sur le site Sud et de la température sur le site Nord (septembre 2023 – juin 2024)

Le site Sud se situe à proximité d'un élevage de volaille qui entraîne des pics particulièrement élevés. Le constat de l'influence ponctuelle marquée de certaines activités d'exploitation de volaille a déjà été réalisée dans d'autres régions françaises (exemple de l'étude réalisée par Atmo BFC). Rappelons que les déjections de volailles présentent la teneur en azote ammoniacal la plus élevée (Figure 10). Malgré la correction réalisée, les niveaux restent élevés et atypiques, avec les concentrations les plus fortes mesurées en novembre 2023, janvier 2024 et mai 2024.

5.7. Comparaison mensuelle des 3 sites

L'évolution mensuelle des concentrations en ammoniac a été comparée sur les trois sites du projet sur leur période commune de mesure, à l'exception des mois de septembre 2023 et de juin 2024 pour lesquels trop peu de jours communs sur les 3 sites ont été étudiés (Figure 34).

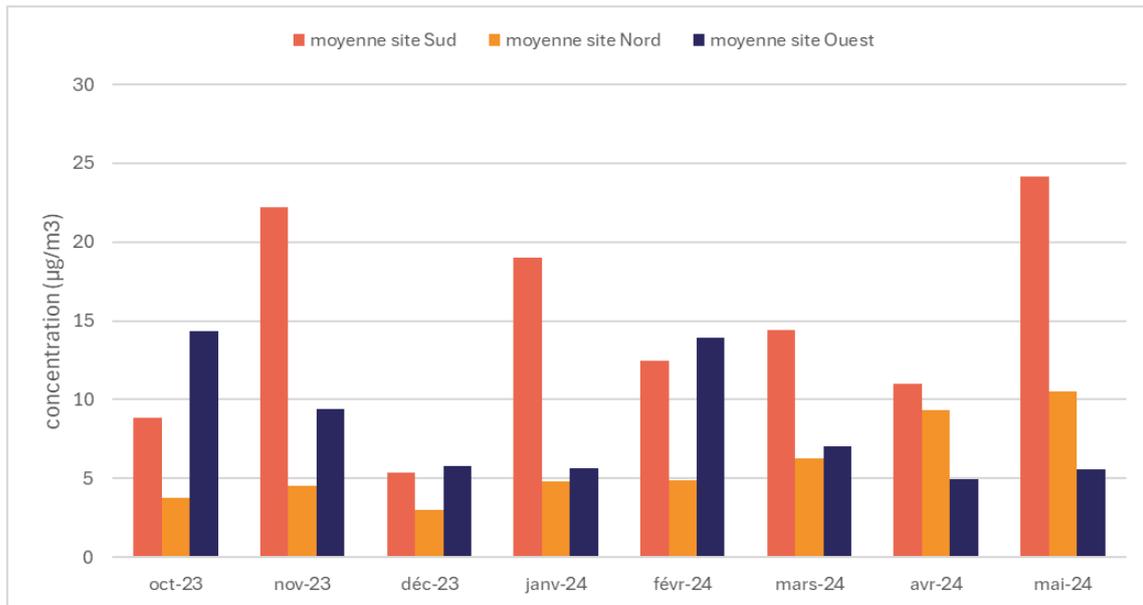


Figure 34: évolution mensuelle des concentrations en ammoniac sur les 3 sites ABAA

L'évolution des concentrations en ammoniac est différente sur les trois sites de mesure malgré leur proximité. Cela peut être due aux activités agricoles différentes exercées sur chacun des sites et dans leurs environs. Par ailleurs, l'occupation des sols propre à chaque site peut expliquer les variations mensuelles. Par exemple pour le site Nord, des parcelles de maïs sont majoritairement présentes dans le quart Sud-Ouest. Les épandages sur ces cultures au printemps associés à des vents dominants de Sud-Ouest pourraient expliquer ces niveaux plus élevés à cette saison. Pour le site Ouest, la répartition des cultures est différente de celle du site Nord avec la présence d'un secteur urbanisé au Nord (commune de Plouarzel).

Une des limites dans cette analyse est l'absence de données sur l'occupation des sols en 2024 (RPG) qui aurait pu permettre d'affiner le traitement de ces évolutions temporelles.

Le site Sud présente les niveaux en ammoniac les plus élevés durant tous les mois. Les maximums de concentrations sont observés en mai 2024 sur le site Nord tandis que sur le site Ouest, les concentrations les plus importantes sont mesurées octobre 2023.

Sur le **site Nord**, les concentrations les plus importantes sont observées en **avril et en mai** ce qui correspond aux **périodes d'épandage sur différentes cultures comme le maïs** qui représente 33% des cultures dans un rayon de 1 km autour de ce site.

Sur le **site Ouest**, les niveaux les plus importants ont été mesurés en **octobre, février**, et dans une moindre mesure en novembre. En octobre et en février, des épandages sur prairies ont eu lieu ce qui peut expliquer les concentrations mesurées.

Sur le **site Sud**, les concentrations en ammoniac les plus hautes ont été mesurées en **novembre, janvier et mai**. A l'exception du mois de mai, très peu d'épandage ont lieu lors de ces mois, les concentrations observées peuvent donc être liées à d'autres activités agricoles ayant eu lieu sur la ferme et notamment à l'élevage de volailles.

Pour faire le lien entre les activités agricoles et les niveaux d'ammoniac, il a été choisi d'étudier plus en détail les jours présentant des concentrations de NH_3 importantes sur chacun des trois sites.

6. Lien entre ammoniac et activités agricoles

6.1. Sélection de certains jours

Le lien entre les niveaux en ammoniac et des activités agricoles potentielles a été réalisé en utilisant des jours présentant des concentrations en ammoniac importantes sur chacun des sites. Ces jours ont été choisis selon deux critères :

- Une concentration journalière en ammoniac supérieure à $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ce qui correspond au maximum journalier atteint à la station Kergoff. Cela correspondait à 100 jours sur le site Nord, 53 sur le site Ouest et 102 sur le site Sud.
- 20% des jours avec les écarts absolus les plus importants entre les concentrations mesurées sur le site et celles observées à Kergoff ont été sélectionnés.

Sur le site Sud, après la correction des données, certains jours présentaient trop peu de données horaires pour calculer une moyenne journalière. Les jours sélectionnés sur ce site sont ceux qui répondaient aux critères définis ci-dessus et pour lesquels un nombre d'heures était suffisant.

Avec ces critères les jours suivants ont été sélectionnés (Figure 35 et Figure 36).

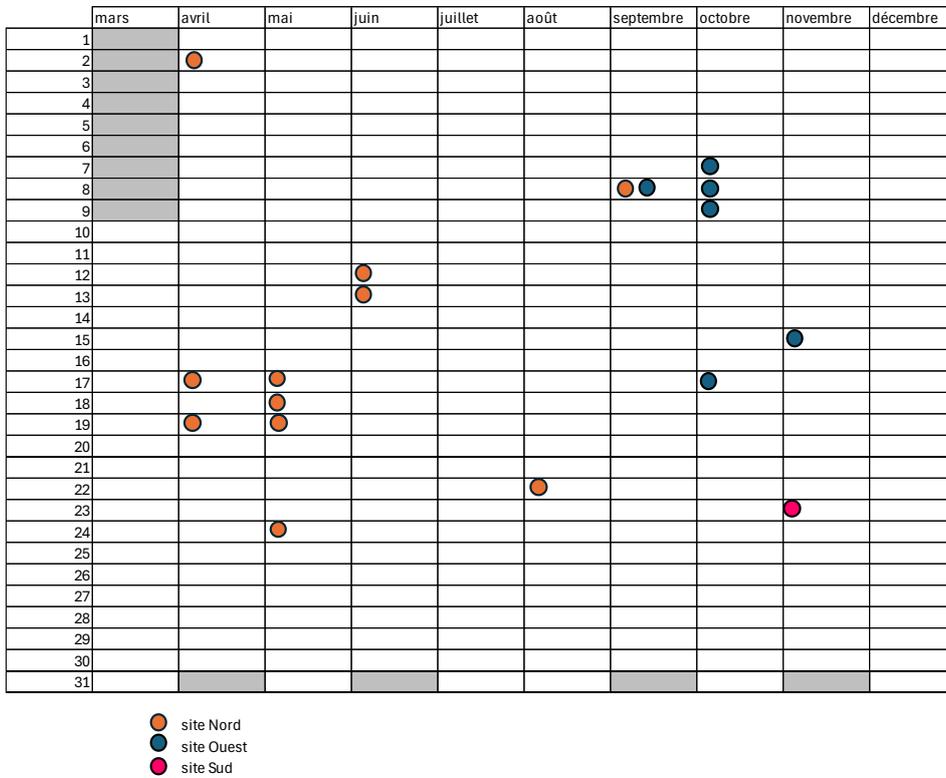


Figure 35 : jours sélectionnés sur les trois sites de mesure ABAA en 2023

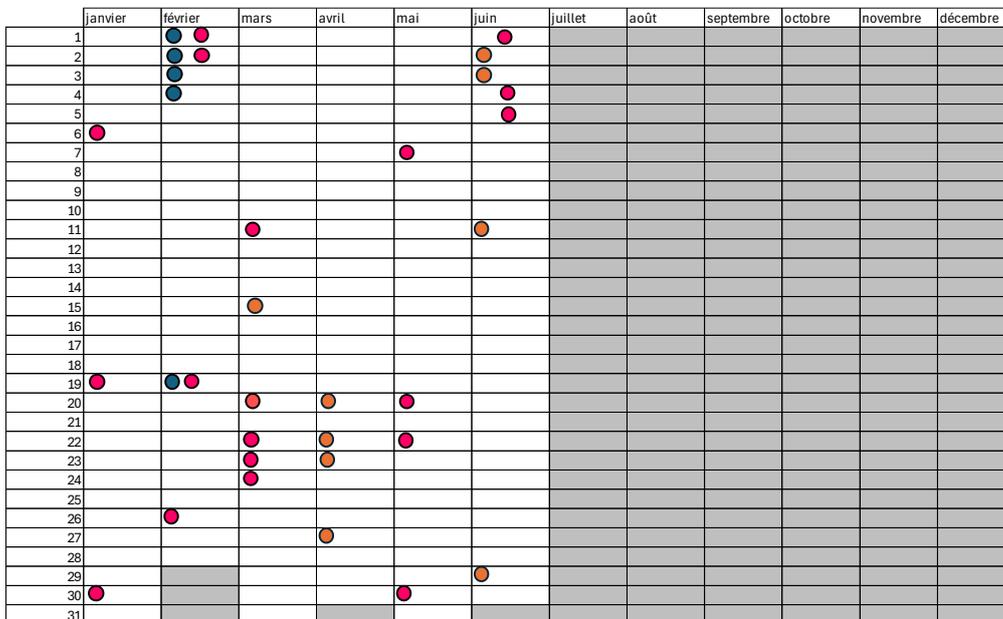
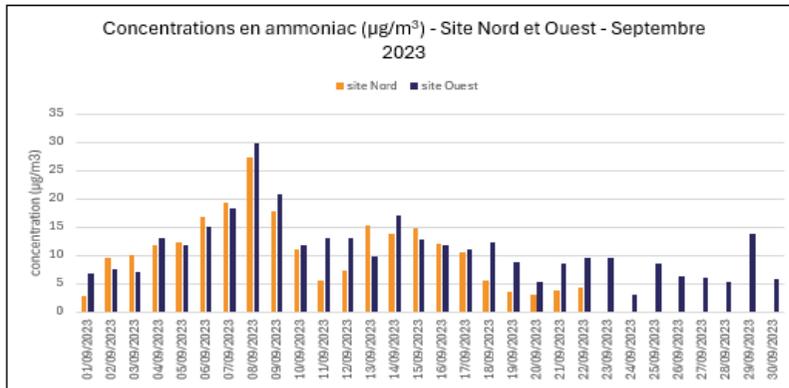
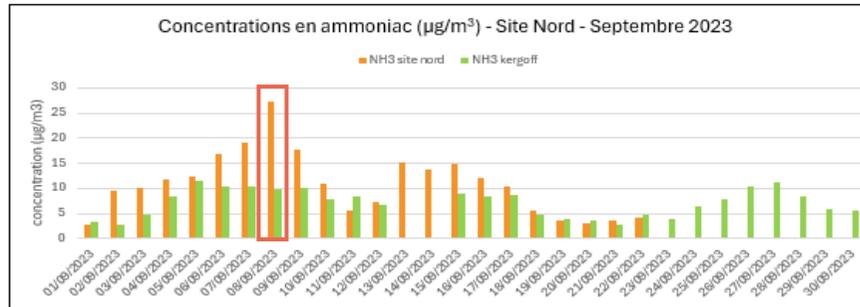
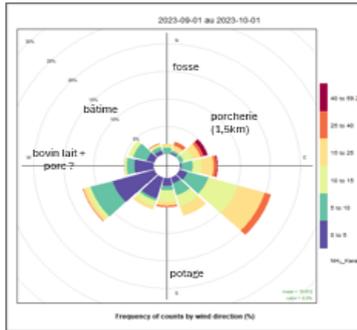


Figure 36: jours sélectionnés sur les trois sites de mesure ABAA en 2024

Sur l'ensemble des sites, **51 jours** (dont 5 dates communes) ont été choisis sur la période de mesure (de mars 2023 à juin 2024). Sur le **site Nord, 20 jours** ont été sélectionnés, principalement en avril, mai et juin. Sur le **site Ouest, 11 jours** ont été choisis, en majorité en octobre et en février. Sur le **site Sud, 20 jours** ont été sélectionnés principalement de janvier à mars et en mai-juin.

Une fois ces jours sélectionnés, des fiches synthèses par mois et par site ont été réalisées, un exemple est présenté sur la Figure 37. Pour cela, les informations suivantes ont été rassemblées :

- L'évolution journalière de la concentration en ammoniac sur les différents sites,
- Une rose de pollution mensuelle de l'ammoniac avec la position des différentes sources potentielles d'ammoniac réalisée avec les données de vent du site nord,
- L'évolution journalière des cumuls de précipitations sur la station Météo France de Brest,
- L'évolution journalière de la température moyenne mesurée sur le site nord,
- Les informations partielles sur les activités agricoles réalisées et renseignées par les agriculteurs propriétaires des exploitations sur lesquelles sont situées les stations de mesure.



activités agricoles/autre	Colonne
05/09/2024	prairie
21-sept	ensilage et remplissage stock (potager, sud)
02 au 05/09	nuage de sable du sahara

Colonne1	Colonne2	Colonne3
activités agricoles autour		
début septembre	prairie	autre
mi septembre		
fin septembre	prairie	

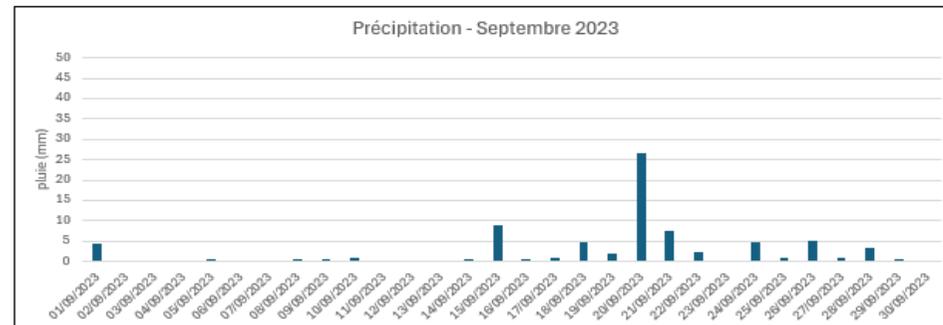
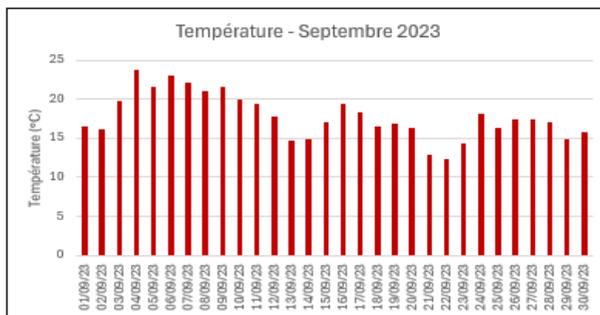


Figure 37: exemple de fiche synthèse mensuelle sur le site Nord

Puis pour chaque mois, un zoom sur les jours spécifiques a été réalisé en utilisant les données suivantes (Figure 38) :

- Les roses de vent et de pollution journalières d'ammoniac pour les jours choisis réalisées avec les données de vent du site nord,
- L'évolution horaire de la concentration en ammoniac sur le site pour lequel le jour a été sélectionné en parallèle avec celle observée à la station Kergoff et avec l'évolution horaire des températures sur le site nord,
- L'évolution horaire des concentrations en ammoniac sur les trois sites ABAA.

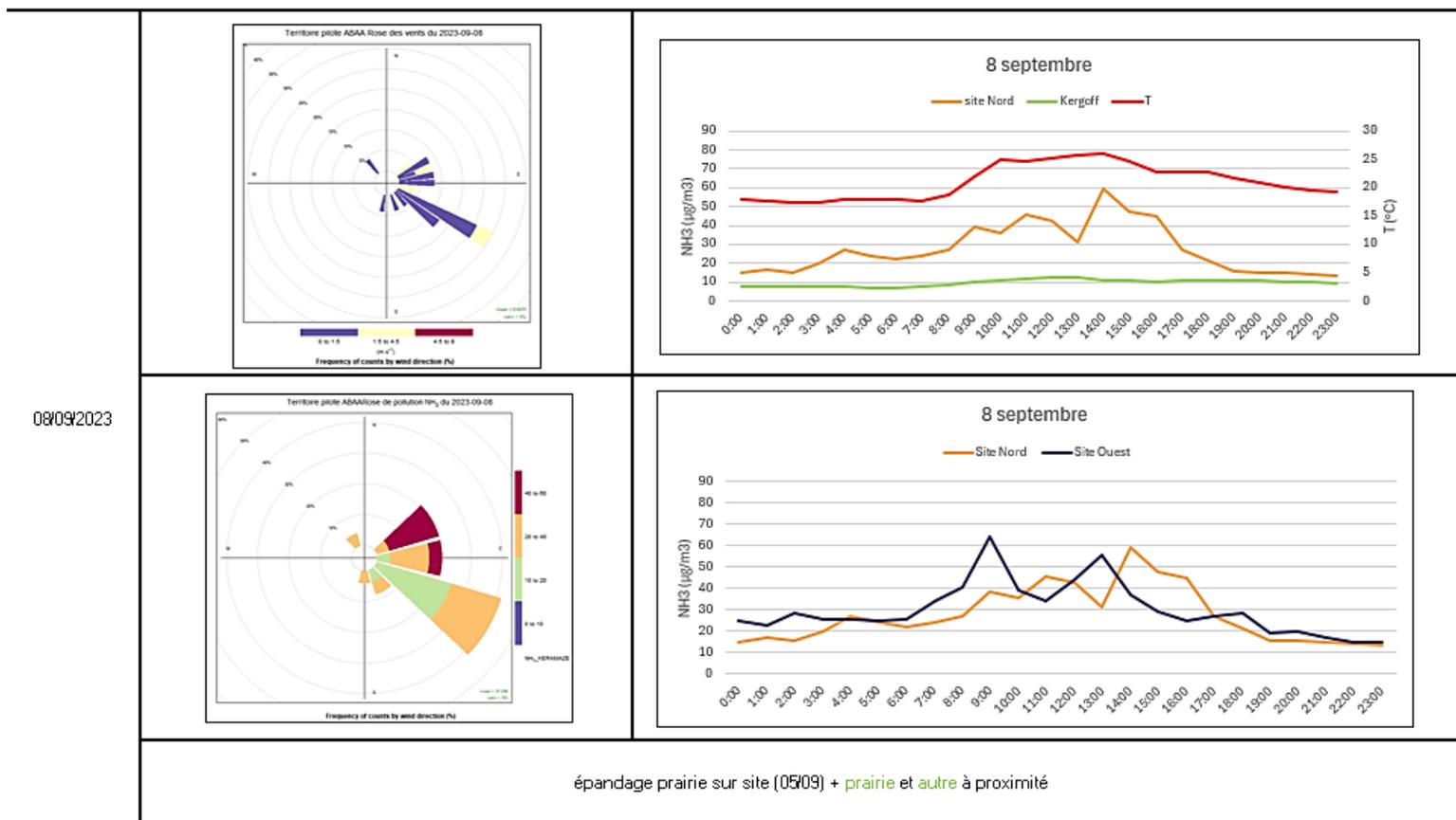


Figure 38: exemple de zoom sur le 8 septembre 2023 sur le site Nord

Une fois ces fiches réalisées, chacun des jours sélectionnés a été étudié plus en détail et ils ont été reliés à une activité agricole potentielle. Pour chacun des sites, des exemples de jours pour lesquels l'analyse détaillée a été faite sont présentés dans les parties suivantes.

6.2. Site Nord

a. Influence des épandages

Sur le site Nord, 20 jours ont été sélectionnés majoritairement en avril et en mai. Toutes les dates de ces périodes, ainsi que celles du mois de juin 2023, présentent des roses de pollution et des évolutions horaires des concentrations en ammoniac similaires. Plusieurs figures sont présentées dans la suite, comme exemples représentatifs des différents jours étudiés.

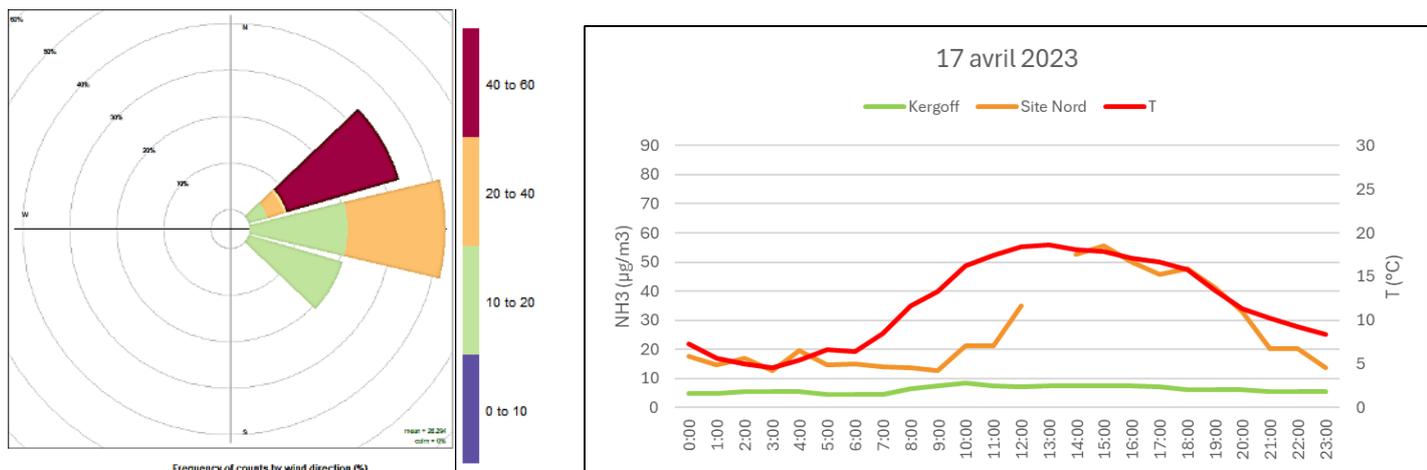


Figure 39: rose de pollution journalière de l'ammoniac et évolution horaire des concentrations de NH₃ sur le site Nord et à Kergoff et de la température sur le site Nord le 17 avril 2023

Les roses de pollution, en exemple celle du 17 avril 2023, montrent une source importante d'ammoniac au Nord-Est du point de mesure. Par ailleurs, l'évolution horaire des concentrations en ammoniac est corrélée à la température.

En comparaison, durant le printemps 2024, les concentrations horaires en ammoniac sont plus basses et leurs sources plus variées, du Nord-Est au Nord-Ouest que durant le printemps 2023 (Figure 24). A cette période de **nombreux épandages** ont lieu notamment **sur maïs**. Les niveaux observés peuvent donc être liés aux épandages sur ces cultures et/ou pendant et après le brassage du lisier stocké dans la fosse se situant au Nord-Est du camion laboratoire.

De même, le 8 septembre 2023, la rose de pollution montre des sources d'ammoniac à l'Est du point de mesure et un profil journalier lié à celui de la température. De plus, l'évolution horaire des concentrations sur le site Nord est assez semblable à celle observée sur le site Ouest même si les pics ne sont pas observés au même moment (Figure 40).

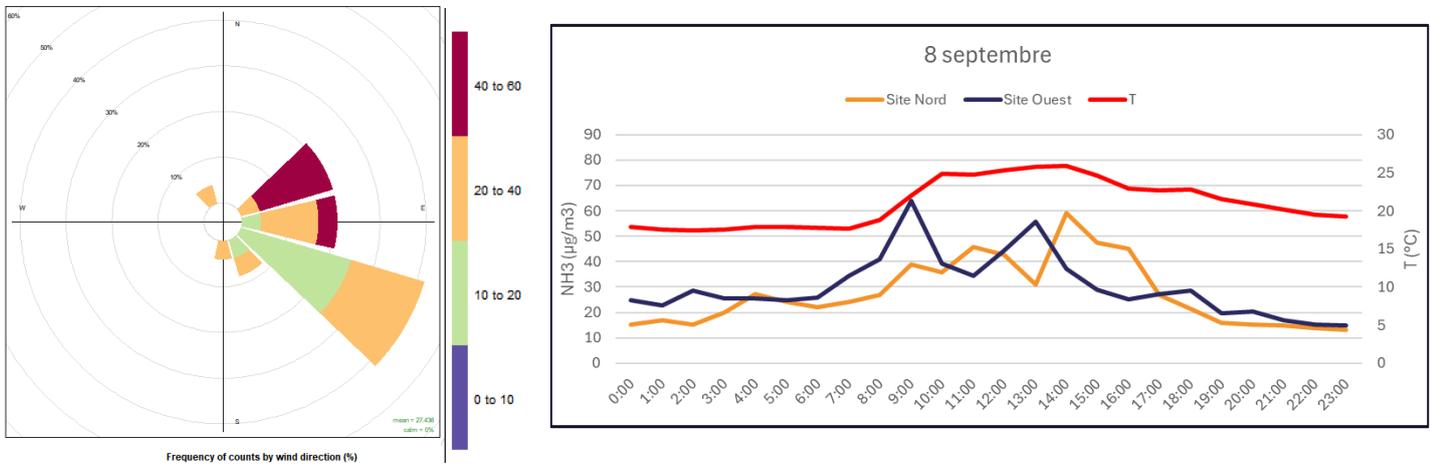


Figure 40: rose de pollution journalière sur le site Nord et évolution horaire de la température et de la concentration en ammoniac sur les sites Nord et Ouest le 8 septembre 2023

Autour de ces deux sites, les cultures majoritaires sont des prairies, 37% sur le site Nord et 43% sur le site Ouest. Or à cette période (septembre), des épandages sur prairies ont eu lieu ce qui peut expliquer les niveaux en ammoniac observés.

Le 22 août une concentration journalière en ammoniac de 24 µg/m³ a été mesurée sur le site Nord. La rose de pollution montre une source majoritaire d'ammoniac au Nord-Est qui peut être due aux deux fosses ouvertes présentes dans cette direction. Cependant, des concentrations supérieures à 20 µg/m³ sont observées dans toutes les directions, ce qui peut traduire des niveaux de fond plus élevés pour cette journée (Figure 41) et des sources multiples tout autour du camion laboratoire.

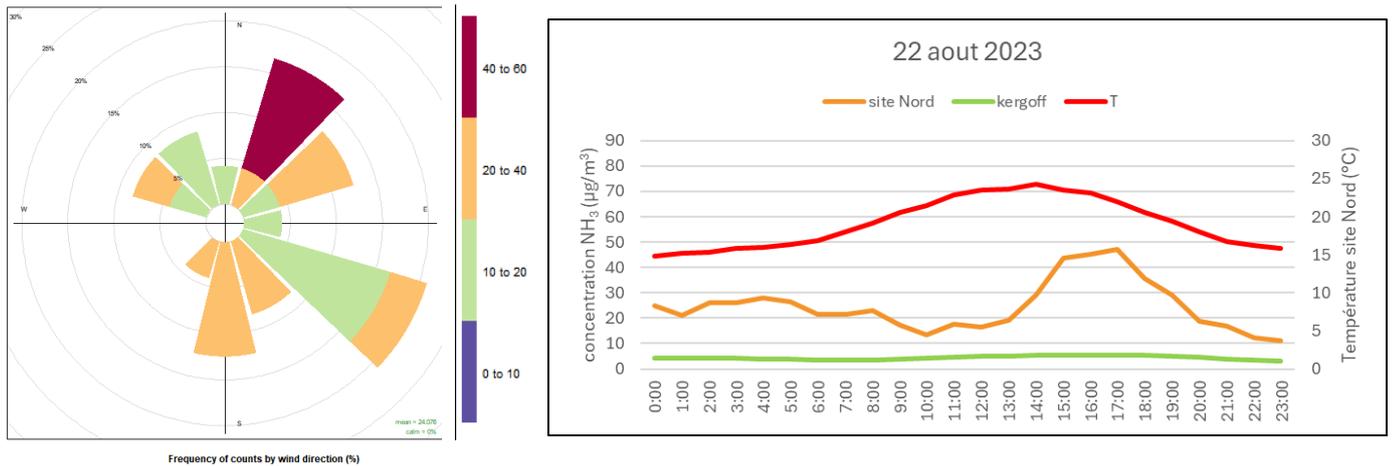


Figure 41 : rose de pollution de l'ammoniac sur le site Nord et évolution horaire de la température et de la concentration en ammoniac sur les sites nord et à Kergoff le 22 août 2023

Des épandages sur dérobée (culture qui s’intercale entre deux cultures principales et qui est destinée à être récoltée pour être valorisée) ont été réalisés sur des parcelles du site nord, le 22 et le 23 août, ce qui peut expliquer les niveaux en ammoniac observés.

b. Influence d’activités localisées

Parmi les jours sélectionnés sur ce site, le 15 mars 2024 a un profil particulier. La rose de pollution de l’ammoniac et l’évolution horaire des concentrations sont présentées en Figure 42.

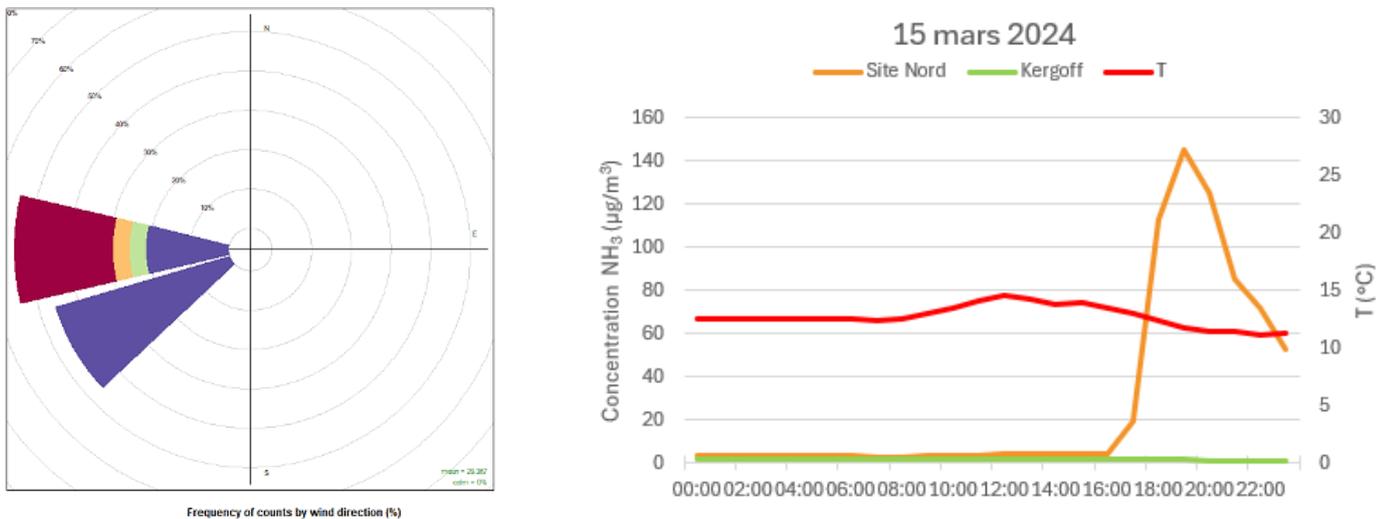


Figure 42 : rose de pollution journalière de l’ammoniac et évolution horaire des concentrations de NH₃ sur le site Nord et à Kergoff et de la température sur le site Nord le 15 mars 2024.

La Figure 42 montre que la concentration élevée en ammoniac observée ce jour-ci est due à un pic de concentration (145 µg/m³, maximum horaire mesuré sur le site nord) à 19h00. La source de ce pic se situe à l’Ouest du point de mesure, or il y a une exploitation de porc dans cette direction. Une activité particulière, au niveau de cette exploitation voisine, à ce moment-là pourrait expliquer ces niveaux.

Sur le site Nord, les concentrations les plus élevées en ammoniac s’expliquent par différentes activités : l’influence des épandages sur des parcelles à proximité, au printemps ou à l’automne, l’influence de la fosse à lisier au Nord-Est du point de mesure et la potentielle influence d’une exploitation porcine voisine.

6.3. Site Ouest

a. Influence d'activités localisées

Sur le site Ouest, 11 jours ont été sélectionnés en majorité en octobre et en février. Au mois d'octobre, les roses de pollution montrent des sources provenant du Sud/Sud-Est ainsi que des variations horaires particulières qui ne suivent pas l'évolution de la température comme le montre la Figure 43.

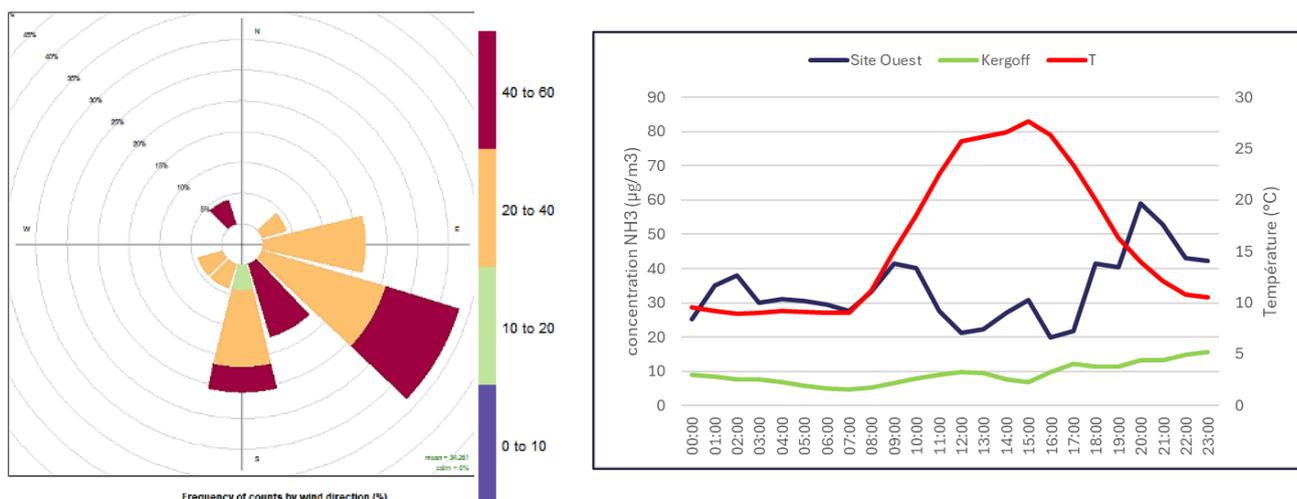


Figure 43 : rose de pollution de l'ammoniac journalière sur le site Ouest et évolution horaire des concentrations de NH_3 sur le site Ouest et à Kergoff et de la température sur le site Nord (8 octobre 2023)

Par ailleurs, à cette période peu d'épandages ont lieu. Les concentrations observées peuvent venir d'autres activités ayant lieu sur la ferme.

Le 15 novembre 2023 présente aussi un profil horaire particulier. Cependant la rose de pollution montre une source en ammoniac à l'ouest du point de mesure (Figure 44).

Les niveaux observés ce jour-là sur le site Sud sont similaires à ceux mesurés sur le site Ouest tandis qu'ils sont plus bas sur le site Nord. Les concentrations élevées ce jour-là proviennent de l'ouest du site de mesure, où se trouvent les bâtiments d'élevage. Une contribution des activités réalisées dans les bâtiments est donc possible, en particulier lorsque les concentrations mesurées sur le site Sud sont plus faibles. Toutefois, sur le site Sud, une influence d'ouest est également observée. Les niveaux mesurés sur les 2 sites sont donc probablement associés à une influence de fond présente ce jour-là.

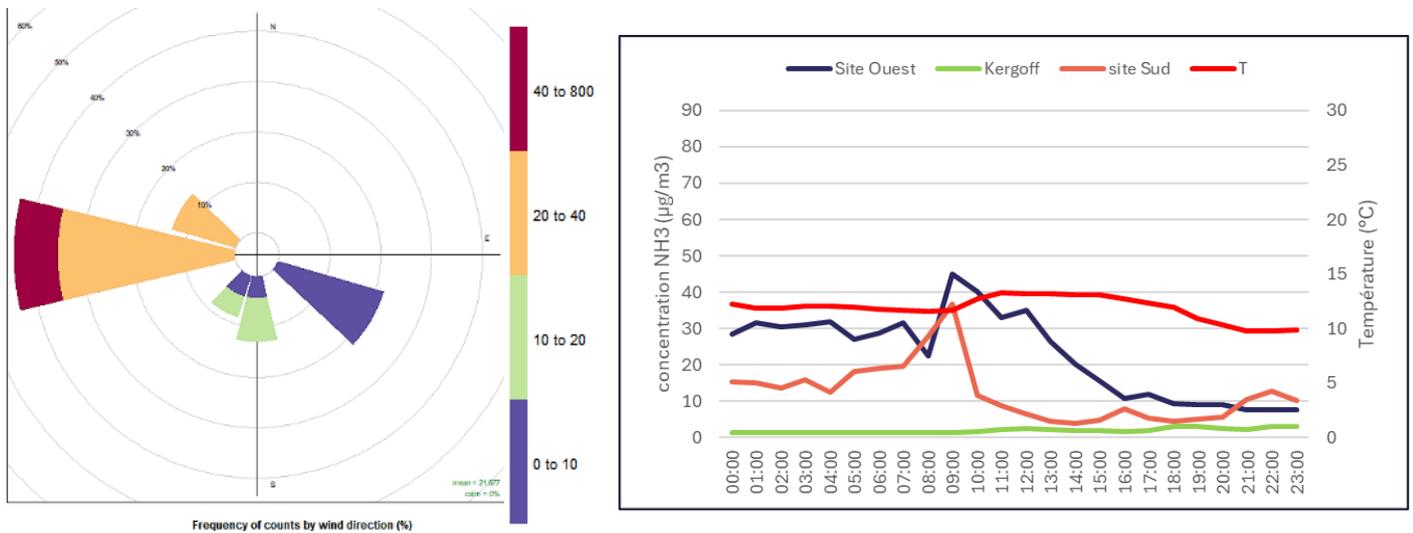


Figure 44 : rose de pollution journalière de l'ammoniac sur le site Ouest et évolution horaire des concentrations de NH3 sur le site Ouest et à Kergoff et de la température sur le site Nord (15 novembre 2023)

b. Influence des épandages

En ce qui concerne le mois de février, les roses de pollution montrent des sources provenant du Nord-Ouest/Ouest. De plus, l'évolution horaire de la concentration en ammoniac ne suit pas l'évolution de la température, mais elle est similaire à celle observée sur le site Sud pour les mêmes dates, le 3, 4 et 19 février. (Figure 45).

A cette période, des épandages sur prairies ont eu lieu ce qui peut expliquer les concentrations observées. En effet, le recueil d'informations auprès de l'exploitant du site Ouest renseigne sur la réalisation d'épandage sur des parcelles de prairies, de culture d'orge et de blé durant plusieurs journées début février et mi-février. Ces informations viennent confirmer l'augmentation des niveaux d'ammoniac dans l'atmosphère du fait des pratiques d'épandage sur ce type de culture à cette période.

Les concentrations au niveau du site Nord ne présentent pas les mêmes augmentations que les 2 autres sites ce qui confirme une forte variabilité spatiale des concentrations d'ammoniac.

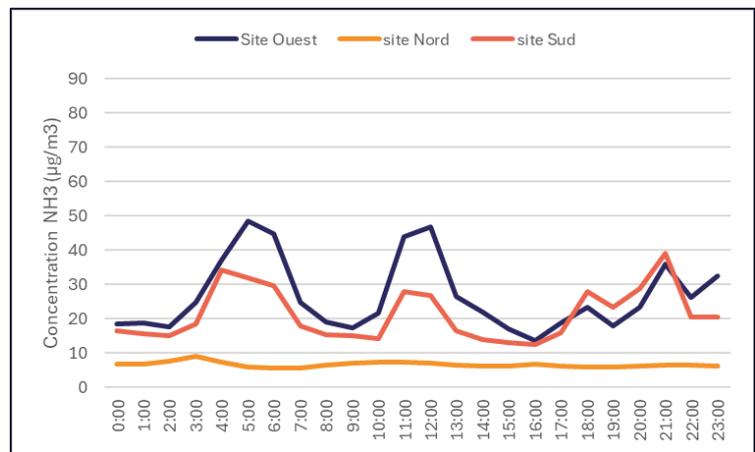
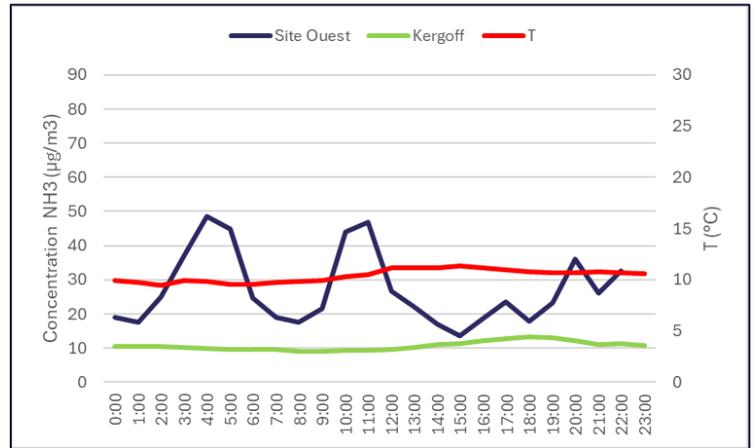
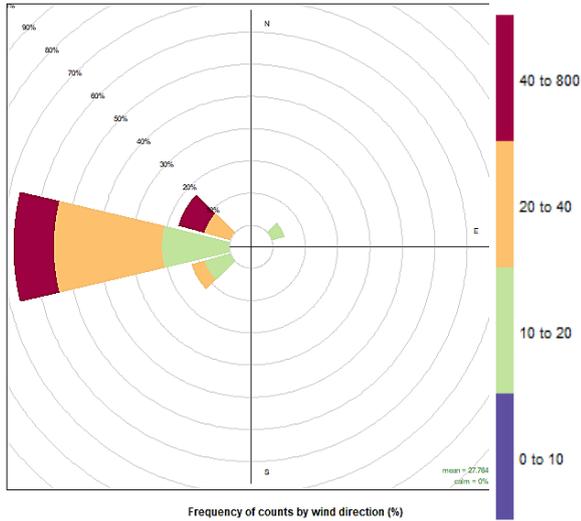


Figure 45 : rose de pollution journalière de l'ammoniac sur le site Ouest et évolution horaire des concentrations de NH_3 sur le site Ouest, Nord et à Kergoff et de la température (3 février 2024)

De même, le 8 septembre, les niveaux mesurés sur le site Nord et le site Ouest sont du même ordre de grandeur. L'évolution horaire des concentrations en ammoniac varie entre les 2 sites avec 2 pics sur le site Ouest, en matinée et en début d'après-midi et une augmentation progressive sur le site Nord avec un pic en milieu d'après-midi. Sur le site ouest, les concentrations les plus élevées proviennent du sud-est (Figure 46). Sur le site Nord, elles proviennent du nord/est et de l'est.

Ce jour-là, aucune mesure n'était encore faite sur le site sud.

A cette période, des épandages sur prairies ont aussi eu lieu, ce qui peut être lié aux concentrations en ammoniac mesurées.

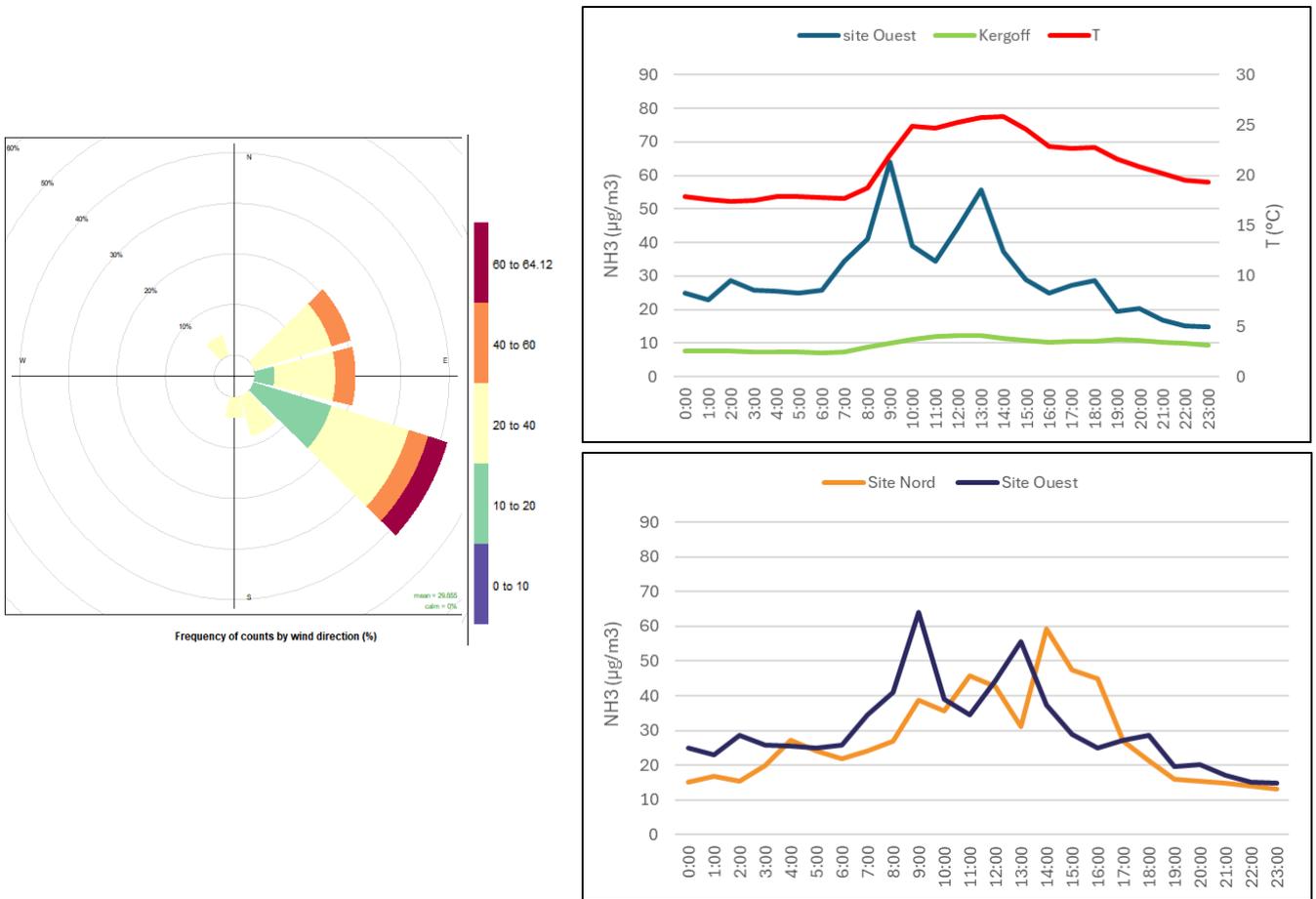


Figure 46: rose de pollution journalière de l'ammoniac sur le site ouest et évolution horaire des concentrations de NH_3 sur les sites Ouest, Nord et à Kergoff et de la température (8 septembre).

Sur le site Ouest, les jours sélectionnés pour leurs concentrations élevées en ammoniac sont sous l'influence d'activités locales à la ferme mais également des épandages réalisés sur des parcelles à proximité (en particulier en février et en septembre). Une influence de fond est visible avec un impact des activités sur le site Ouest mais également sur le site Sud.

6.4. Site Sud

Sur le site Sud, 20 jours ont été sélectionnés après correction des données. Ils se situent majoritairement sur la période de janvier à mars 2024 et en mai-juin 2024. Certains de ces jours présentent peu de données horaires, ce qui rend leur analyse plus difficile. Cependant, pour l'ensemble des jours étudiés, les roses de pollution montrent des sources au Nord du point de mesure. La Figure 47 présente un exemple de rose de pollution sur ce site ainsi que les évolutions des concentrations horaires sur les différents sites et l'évolution de la température ce jour-là.

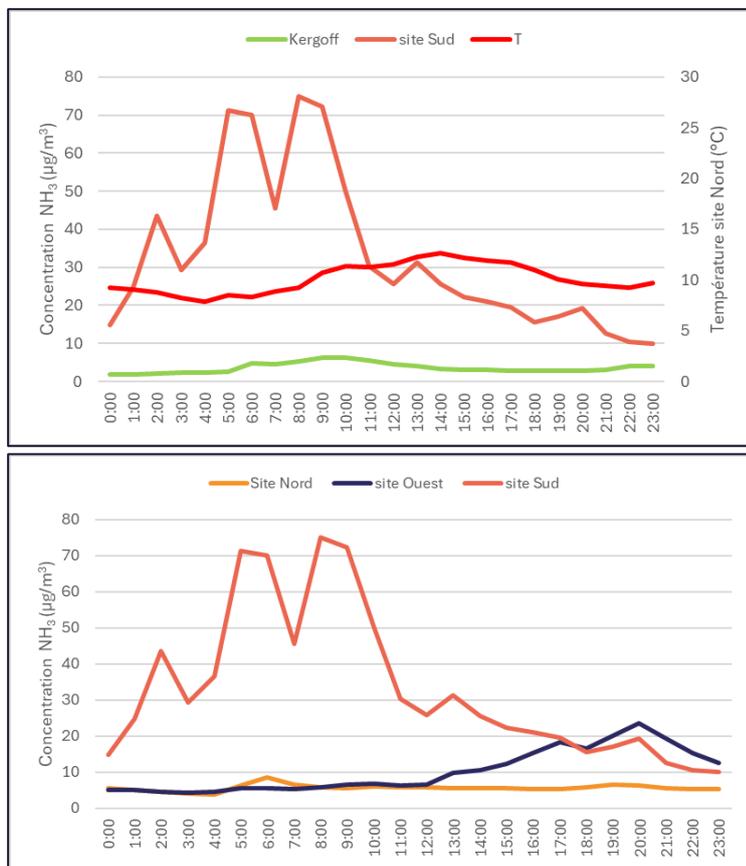
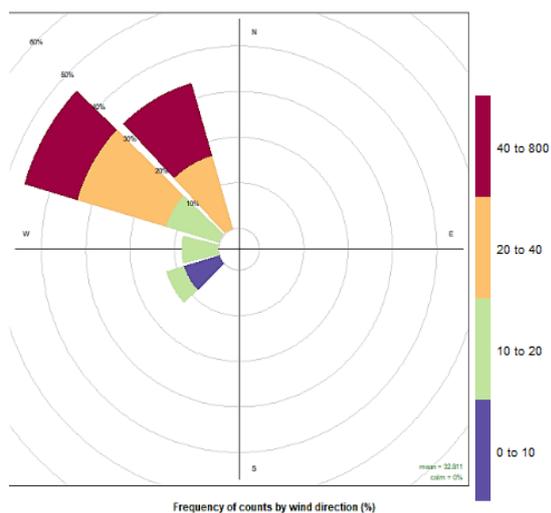


Figure 47: rose de pollution journalière de l'ammoniac sur le site sud et évolution horaire des concentrations de NH_3 sur les sites sud, ouest, nord et à Kergoff et de la température (11 septembre).

Les bâtiments d'élevage des volailles ainsi que la station de compostage se trouvent au nord-ouest du point de mesure ce qui peut expliquer les concentrations en ammoniac importantes mesurées et visibles sur la rose de pollution. De plus, de mars à juin, des épandages peuvent avoir lieu ce qui peut être une seconde source d'ammoniac lors des jours sélectionnés ces mois-ci.

7. Synthèse de l'ammoniac

Dispositif de mesure

Sur la période du projet (du 10 mars 2023 au 30 juin 2024), l'ammoniac a été mesuré sur 3 sites sur la commune de Plouarzel, **Nord, Ouest, Sud**, et les mesures ont été comparées à celles réalisées sur les sites de mesures permanents de **Kergoff** et de **MACE**. La station de Kergoff est une station rurale nationale de fond (Merléac en centre Bretagne) tandis que Macé est une station de type fond urbain à Brest. Les niveaux en ammoniac mesurés sur ce dernier site sont les plus faibles car il est plus éloigné des sources étant donné sa typologie. Les trois sites du projet sont situés au cœur d'exploitations agricoles et présentent donc des niveaux plus importants que la station rurale de fond de Kergoff.

Evolution spatiale

Sur les sites **Nord et Ouest**, les concentrations en ammoniac observées sont du **même ordre de grandeur** tandis que sur le site **Sud**, elles sont **plus élevées**. Sur ce site, des valeurs horaires particulièrement élevées sont observées, probablement en lien avec la **proximité d'un élevage de volailles** dont les déjections sont fortement émissives en ammoniac. Afin de s'affranchir des influences micro-locales liées à l'exploitation de volailles, le jeu de données a été corrigé. Malgré la correction apportée, le niveau de fond en ammoniac de ce site Sud (caractérisé par la médiane) reste supérieur aux 2 autres points (de l'ordre de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur l'ensemble des mesures).

Evolution temporelle

L'**évolution temporelle** des concentrations en ammoniac peut s'expliquer par les **conditions météorologiques** et par les **différentes activités agricoles**. Cette évolution est **différente sur chaque site** puisqu'elle dépend **des activités agricoles réalisées** et de la répartition des cultures (autour des points de mesure) sur lesquelles des épandages sont réalisés.

Rappelons que l'ammoniac est un composé volatil et réactif dans l'atmosphère ce qui contribue aux fortes variations spatio-temporelles.

Lien avec les pratiques agricoles

Pour faire un **lien entre les concentrations en ammoniac, et les activités agricoles**, les **jours** pour lesquels **les concentrations** étaient les plus importantes, **supérieures à $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$** , avec l'écart le plus important par rapport à celles mesurées sur le site de Kergoff ont été sélectionnés sur chacun des sites. Au total, 51 jours ont fait l'objet d'une analyse détaillée.

Le **site Nord** est principalement influencé par des **épandages** ayant lieu aux **printemps** comme les épandages sur maïs et par les **fosses** ouvertes se situant au Nord-Est du point de mesure. En effet, les concentrations les plus importantes sont observées lors des printemps 2023 et 2024 : sur les 20 jours sélectionnés, 19 ont été associés à des épandages.

Sur le **site Ouest**, les niveaux en ammoniac les plus importants sont mesurés en **octobre 2023** et en **février 2024**. Ces niveaux ont été associés à des **activités agricoles** ayant eu lieu **sur l'exploitation en octobre** et à des **épandages** notamment sur prairie en **février**. Parmi les 11 jours sélectionnés, 6 ont été associés à des épandages et 5 à des activités locales.

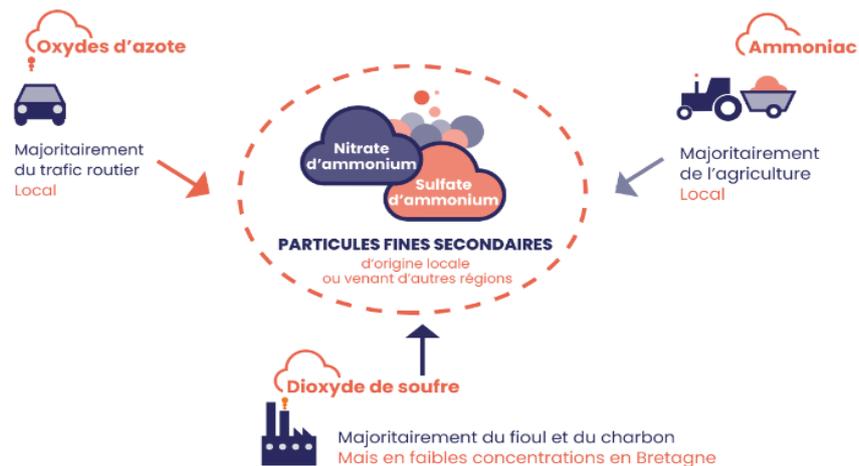
Sur le **site Sud**, la proximité immédiate de bâtiments d'élevage de volailles entraîne des **valeurs horaires très élevées**. Cependant après une correction des données, les niveaux les plus importants ont été observés en **mai 2024, novembre 2023 et janvier 2024**. Aucune hypothèse de source n'a pu être faite pour expliquer les niveaux mesurés lors de ces mois, excepté l'influence du type d'exploitations agricoles.

8. Lien entre ammoniac et PM10

L'ammoniac réagit avec d'autres espèces (oxydes d'azote et dioxyde de soufre) présentes dans l'air pour former du sulfate d'ammonium, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, puis du nitrate d'ammonium, NH_4NO_3 . 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 (10).

L'excédent d'ammoniac réagit ensuite avec le nitrate, produit à partir des oxydes d'azote, pour former du nitrate d'ammonium (Figure 48). 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 défavorise sa formation. Au-dessus de 30°C, il n'est quasiment plus produit (11).

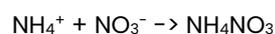
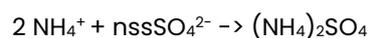
OXYDES D'AZOTE, AMMONIAC ET DIOXYDE DE SOUFRE FORMENT, EN SE COMBINANT, DES PARTICULES FINES



Source : à partir du schéma élaboré par Airparif

Figure 48: schéma de la formation des particules fines à partir de l'ammoniac, des oxydes d'azote et du dioxyde de soufre

Les concentrations de ces deux composés ne sont pas mesurées directement, elles ont donc été calculées à partir des concentrations en NH_4^+ , NO_3^- et SO_4^{2-} non marins (nssSO_4^{2-}) et des équations de réactions suivantes :



Le nitrate d'ammonium est présent majoritairement dans les PM2.5, mais la réglementation porte sur les PM10. Il a donc été choisi de mesurer les concentrations de ces dernières.

9. Présentation des données de particules PM10

9.1. Description globale

Lors du projet, les concentrations en PM10 ont été mesurées sur les sites Nord, Ouest et Sud, et sur les sites de mesure permanents de Brest Macé et de Kergoff. La Figure 49 présente les niveaux horaires observés sur la période de mesures communes aux 5 sites sous forme de boxplot (du 26/09/2023 au 05/06/2024). Le Tableau 6 présente également l'ensemble des données statistiques sur les périodes de mesure des différents sites.

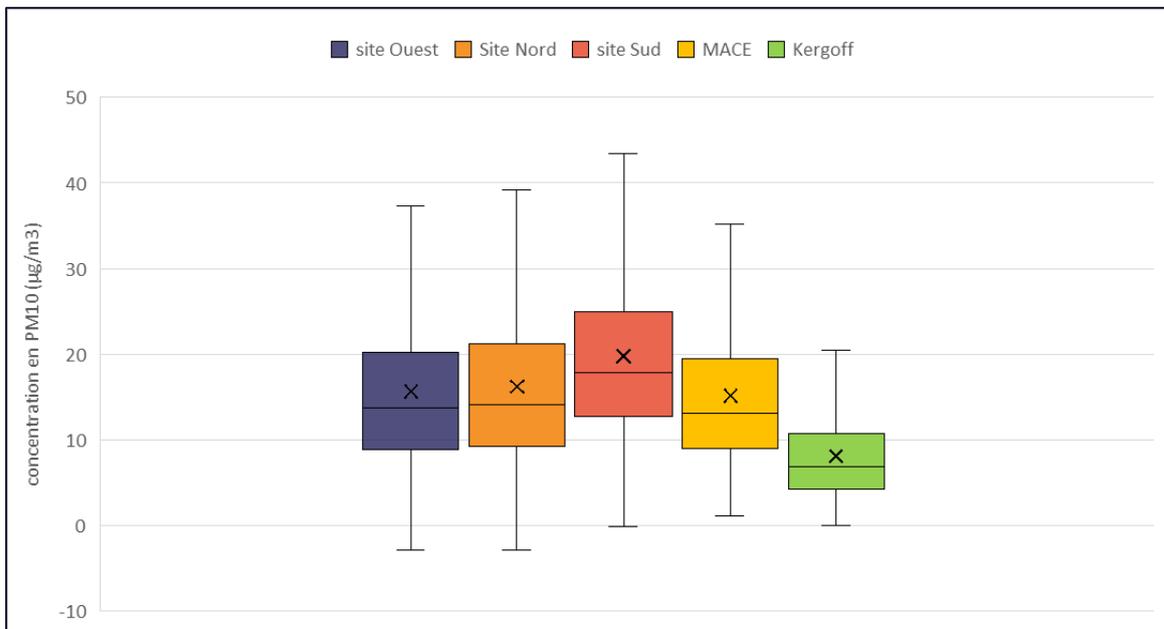


Figure 49: boxplot PM10 du 26 septembre 2023 au 05 juin 2024

Tableau 6: données statistiques des concentrations en PM10 sur les différentes périodes de mesure

Valeur ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Site nord <i>Du 10/03/2023 au 30/06/2024</i>	Macé <i>Du 10/03/2023 au 30/06/2024</i>	Kergoff <i>Du 10/03/2023 au 30/06/2024</i>	Site ouest <i>Du 7/07/2023 au 19/06/2024</i>	Site sud <i>Du 26/09/2023 au 5/06/2024</i>
1 ^{er} quartile horaire	8.8	8.8	4.9	8.1	12.7
Médiane horaire	14.0	13.0	7.8	12.9	18.0
Moyenne horaire	16.3	15.3	9.4	14.9	19.8
3 ^{ème} quartile horaire	21.5	19.4	11.7	19.3	25.1
Maximum horaire	152.6	84.3	97.9	177.1	327.6
Maximum journalier (date)	44.7 (04/02/2024)	57.8 (07/09/2023)	57.4 (07/09/2023)	47.6 (06/09/2023)	49 (04/02/2024)

Des mesures n'étant pas disponibles au niveau des différents sites à des dates communes, ils ont été comparés à titre indicatif dans le paragraphe suivant. Les **concentrations moyennes** en PM10 des différents sites présentés sont relativement **proches** en raison de **sources multiples** de PM10 qui ne discriminent pas un site par rapport à un autre. Il peut tout de même être observé une concentration moyenne en PM10 **plus faible** à la station rurale de **Kergoff** par rapport aux 3 sites du projet ABAA ainsi que par rapport à la station urbaine de Brest Macé. En effet, les sites ABAA et la station de Brest Macé sont plus sous l'influence de la brise de mer que la station rurale de Kergoff qui se trouve en centre Bretagne. Concernant les stations du projet ABAA, les niveaux observés sur les sites Nord et Ouest sont similaires à ceux mesurés à MACE, tandis que le **site Sud** présente des **niveaux légèrement plus élevés**. Cette différence est probablement due à un impact locale lié aux activités particulières de l'exploitation. En effet, des émissions locales de particules sont attendues, entre autres, au niveau de la station de compostage qui en émet lors de la mise en mouvement des déchets et du compost, lors des retournements, du criblage, du broyage et du transfert de matière (8).

A noter que le maximum journalier observé à la même période à Macé, Kergoff et sur le site Ouest (6 et 7 septembre 2023) est associé à un **épisode régional de particules désertiques** présent sur plusieurs jours et augmentant les niveaux en particules fines PM10 sur toute la région.

Par ailleurs, **aucun des sites ne dépasse la valeur réglementaire annuelle actuelle** de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La valeur réglementaire annuelle fixée par la directive européenne adoptée le 14 octobre 2024, de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, est quant à elle atteinte, uniquement sur le site Sud.

9.2. Evolution mensuelle

L'évolution mensuelle des concentrations en PM10 sur les 5 sites de mesure est présentée sur la Figure 50. Les concentrations en PM10 des mois de septembre 2023 et de juin 2024 sur le site Sud ne sont pas représentées car les mesures n'ont été réalisées que sur quelques jours (du 26 au 31 septembre 2023 et du 01 au 05 juin 2024).

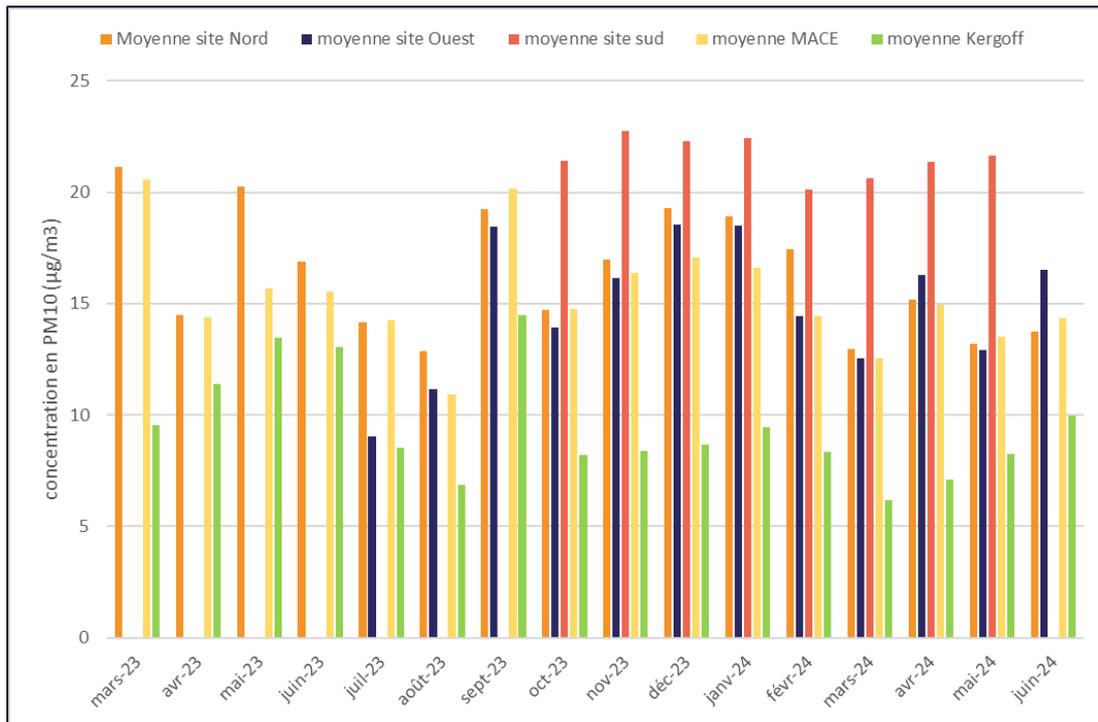


Figure 50: évolution mensuelle des concentrations en PM10 sur les sites Nord, Ouest, Sud, à MACE et à Kergoff.

Contrairement à l'ammoniac, il est plus difficile d'observer une saisonnalité puisque les particules ont diverses sources d'émission (cf partie 3.2.b). Il n'y a donc **pas de lien direct entre les concentrations mensuelles en ammoniac et celles en PM10** (Annexe 4). Il peut, toutefois, être observé des concentrations plus élevées sur l'ensemble des stations du Finistère (les 3 sites ABAA + la station de Brest Macé) durant les mois de mars, septembre, novembre, décembre 2023 et janvier 2024, peut-être en raison d'une présence plus importante de sels de mer (ce qui sera étudié dans la partie 10.3). Les mois d'hiver peuvent également être influencés par des sources liés au chauffage. Il reste, néanmoins, **difficile d'indiquer exactement à quoi sont dues les variations mensuelles avec seulement l'information de la concentration mensuelle massique en PM10.**

Lors de la période de mesure (de mars 2023 à juin 2024), les concentrations en PM10 sont proches sur les sites Nord et Ouest ainsi qu'à MACE, tandis que sur le site Sud, les niveaux observés sont plus hauts (sur l'ensemble de la période de mesure en commun), comme c'était le cas pour l'ammoniac. L'impact des activités à proximité de ce site semble influencer également les

concentrations en PM10. L'évolution mensuelle est plus difficile à expliquer que pour l'ammoniac en raison des nombreuses sources de PM10.

La composition chimique des particules a aussi été analysée lors du projet, au niveau du site Nord et permet d'obtenir des informations plus précises pour identifier les sources de PM10.

10. Composition chimique des particules sur le site Nord

10.1. Protocole

Sur le site Nord, la composition chimique des particules a aussi été étudiée. Pour cela, un préleveur DA80 permet de collecter les PM10 sur un temps donné. Durant la campagne, 180 prélèvements ont été réalisés du 10 mars 2023 au 21 mai 2024, avec une durée d'échantillonnage de 24h, de 00 :00 à 00 :00. Des fréquences de prélèvements différentes ont été choisies avec la Chambre d'Agriculture en se basant sur les activités agricoles et sont présentées dans le tableau ci-dessous. Les périodes pendant lesquelles les prélèvements sont quotidiens sont celles correspondant aux périodes générales des épandages.

Tableau 7: Dates, fréquence et nombre de filtres collectés pendant la campagne de mesure

Dates	Fréquence	Nombre d'échantillons prélevés
10/03/2023-29/04/2023	Tous les jours	48
29/04/2023-24/05/2023	Tous les 3 jours	9
29/05/2023-22/08/2023	Tous les 6 jours	15
24/08/2023-27/09/2023	Tous les 3 jours	12
02/10/2023-08/12/2023	Tous les 6 jours	12
09/02/2024-22/02/2024	Tous les 3 jours	5
23/02/2024-09/05/2024	Tous les jours	75
11/05/2024-21/05/2024	Tous les 3 jours	4

Les filtres sont ensuite envoyés à un laboratoire, ici, l'Institut des Géosciences et de l'Environnement (IGE), pour analyse des espèces chimiques suivantes : **carbone organique (OC)** et **carbone élémentaire (EC)**, sucres (Arabitol, Mannitol, Trehalose, Levoglucosan, Mannosan, Galactosan, L-Rhamnose, Glucose), **ions** (Li^+ , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , Br^- , NO_3^- , SO_4^{2-}), Methylamine, Dimethylamine, MSA, Oxalate et 3-MBTCA.

Puis, certaines données ont été invalidées, pour que l'ensemble soit représentatif en suivant la « procédure de validation des données d'analyse chimique des particules atmosphériques » du LCSQA (Annexe 5).

Après invalidation de certains filtres, **149 filtres ont été exploités** pour l'analyse de la composition chimique des PM10 sur le site nord, soit 83% des échantillons collectés.

10.2. Composition chimique moyenne

La composition chimique moyenne des particules PM10, au niveau du site Nord de mars 2023 à juin 2024, est présentée sur la Figure 51. Les composés pris en compte sont la matière organique (OM), le carbone élémentaire (EC), le nitrate (NO_3^-), le sulfate (SO_4^{2-}), l'ammonium (NH_4^+), le chlorure (Cl^-), le sodium (Na^+) et les autres ions. Certains composés présents dans la matière organique seront étudiés à part (paragraphe 10.5). La matière organique (constituée d'une multitude de composés dont le nombre et les concentrations individuelles sont impossibles à quantifier) est estimée à partir des mesures de carbone organique (OC) et d'un facteur de correction de 1.75.

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),
- 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 comme le nitrate d'ammonium par exemple (12).

Sur **l'ensemble de la période de mesure**, la part non déterminée est significative (33% en moyenne). Ce résultat est cohérent avec ceux rencontrés au niveau d'autres sites français (13). Ce qui est notable dans ces résultats, c'est la **dominance des sels de mer** (NaCl), et cela s'explique facilement par la localisation du site de mesure (à proximité de la mer).

La **matière organique** constitue seulement 10% des particules PM10 mesurées. Cette contribution est plus faible que ce qui est observé généralement dans les PM10 (de 13 à 22% sur des sites de la zone littorale des Hauts-de-France et de la Normandie (13)) du fait de la contribution plus importante des sels marins.

En moyenne, les **composés inorganiques secondaires** avec le nitrate, l'ammonium et le sulfate représentent respectivement 8%, 3% et 7% des particules sur le site de mesure. Ces contributions sont similaires à celles rencontrées lors de l'étude sur la composition chimique au niveau du port de Brest en 2021 (14). Les autres ions contribuent à hauteur de 3% des PM10 mesurées sur le site Nord.

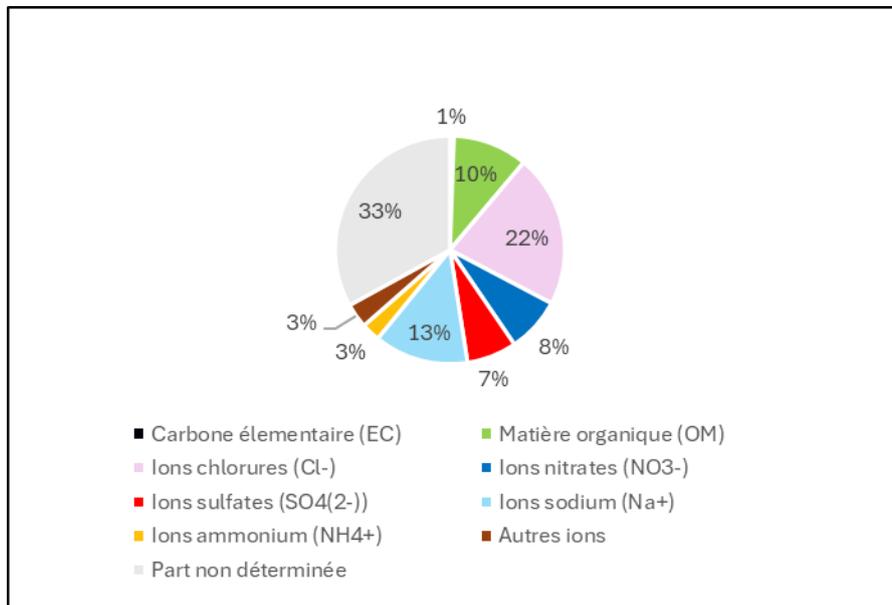


Figure 51: composition chimique moyenne des particules sur l'ensemble de la campagne de mesure pour le site Nord

La part indéterminée mise de côté, les composés mesurés les plus importants dans les PM10 sont les sels marins, la matière organique et les composés inorganiques secondaires.

10.3. Variation saisonnière

Les variations saisonnières de la composition chimique des particules ont aussi été étudiée (Figure 52). Le nombre de prélèvements considérés pour chaque saison est indiqué en haut du graphique ci-dessous. Il est important de noter que l'été 2023 est illustré par 12 prélèvements avec respectivement 1, 5 et 6 filtres en juin, juillet et août. De même, l'hiver 2024 est représenté par 12 prélèvements dont 11 en février 2024.

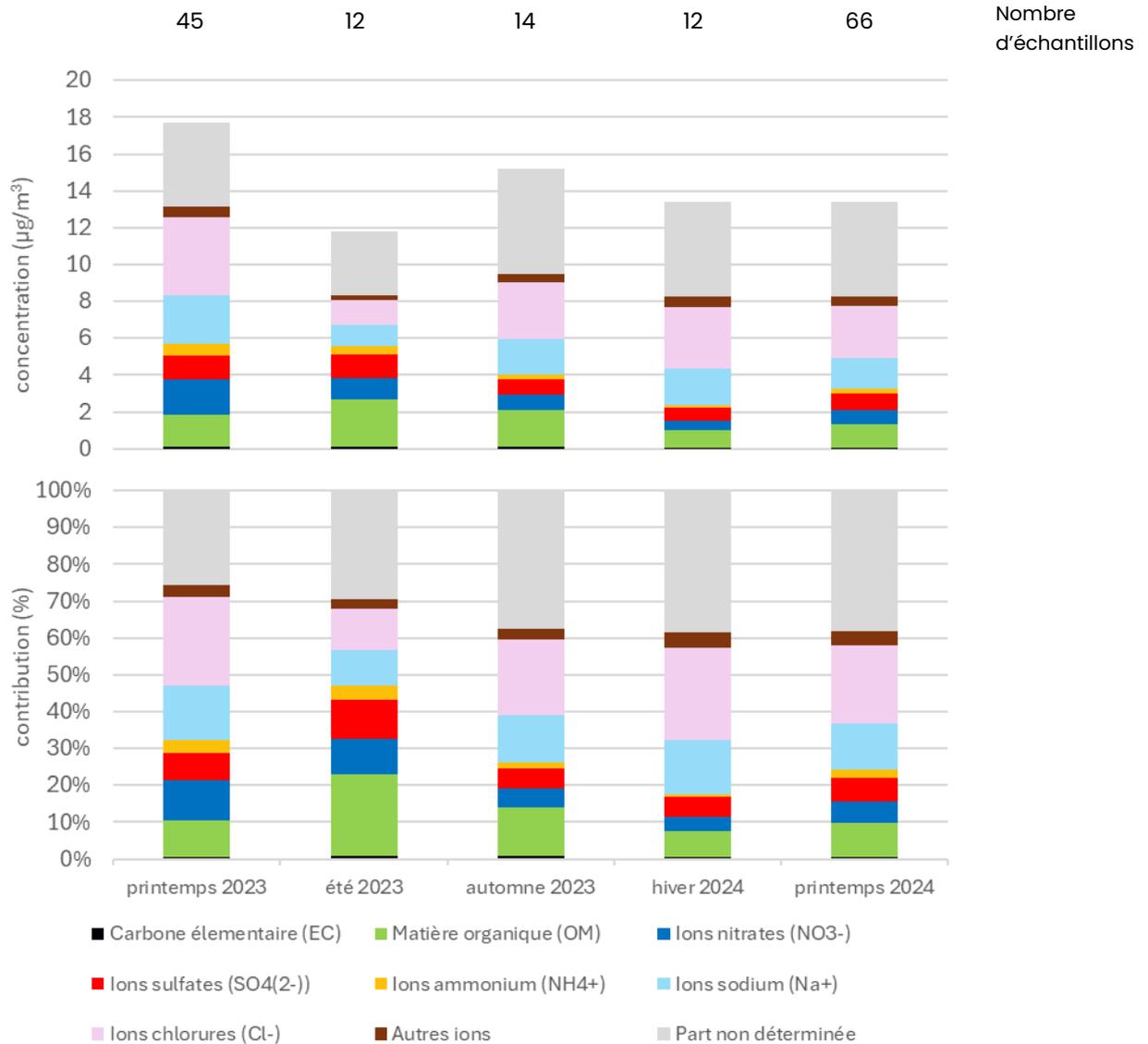


Figure 52 : évolution saisonnière de la composition chimique des particules sur le site Nord en contribution (en bas) et en concentration (en haut)

De la même manière que pour la concentration massique des PM10, **la composition chimique** montre une **variation saisonnière** marquée. Les ions Cl^- et Na^+ sont considérés comme provenant principalement des sels de mer. C'est au cours de l'été 2023 que les concentrations sont les plus faibles

La **matière organique** présente des variations significatives puisque la concentration moyenne mensuelle en été 2023 est de $2.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en hiver 2024, soit une contribution comprise entre 22% (en été) et 7% (en hiver). Les faibles concentrations hivernales et printanières traduisent une faible contribution des sources primaires liées par exemple au chauffage résidentiel ou au trafic. Les faibles concentrations en contribution en carbone élémentaire (EC) corroborent la faible influence

des sources de combustion. L'évolution de certains traceurs présents dans la matière organique est discutée dans la partie 10.5.

Au **printemps et en été**, les **espèces inorganiques secondaires** (nitrate, sulfate et ammonium) représentent une part plus importante des particules qu'en hiver. La concentration de nitrate particulaire dépend des conditions météorologiques et des émissions de NO_x et de NH₃. La concentration du nitrate varie entre 0.5 µg/m³ en hiver 2024 et 1.9 µg/m³ au printemps 2023 tandis que celle de l'ammonium varie entre 0.1 µg/m³ en hiver 2024 et 0.6 µg/m³ au printemps 2023. La contribution de nitrate est de 11% au printemps 2023 alors qu'au printemps 2024 elle est de 6%. Le sulfate présente la plus forte concentration (1.3 µg/m³) et contribution (11%) pendant l'été 2023. Les conditions d'ensoleillement sont propices à l'oxydation du SO₂ et donc à la formation de sulfate d'ammonium. Contrairement au nitrate d'ammonium, le sulfate d'ammonium est stable dans l'atmosphère et peut être transporté sur de longues distances.

La détermination de la contribution des principales sources et mécanismes de formation des particules va être réalisée par la suite grâce à un outil statistique (partie 10.7).

La composition chimique des particules PM10 a été étudiée sur le site Nord de mars 2023 à mai 2024. Sur cette période, elles sont majoritairement composées de sels de mer sur l'ensemble des saisons étant donné la proximité de la mer. Les niveaux en ammonium et en nitrate sont minimums en hiver tandis que leurs maximums sont atteints respectivement au printemps 2023.

L'ammoniac émis principalement par l'agriculture, forme du sulfate et du nitrate d'ammonium sous certaines conditions. L'évolution des concentrations en nitrate d'ammonium sur la période de mesure a été étudiée dans le paragraphe suivant.

10.4. Nitrate d'ammonium

L'évolution mensuelle des concentrations et des contributions en nitrate d'ammonium sont présentées sur la Figure 53. Les données de nitrate d'ammonium présentées ci-dessous sont issues des estimations calculées à partir des concentrations en ammonium, en sulfate et en nitrate.

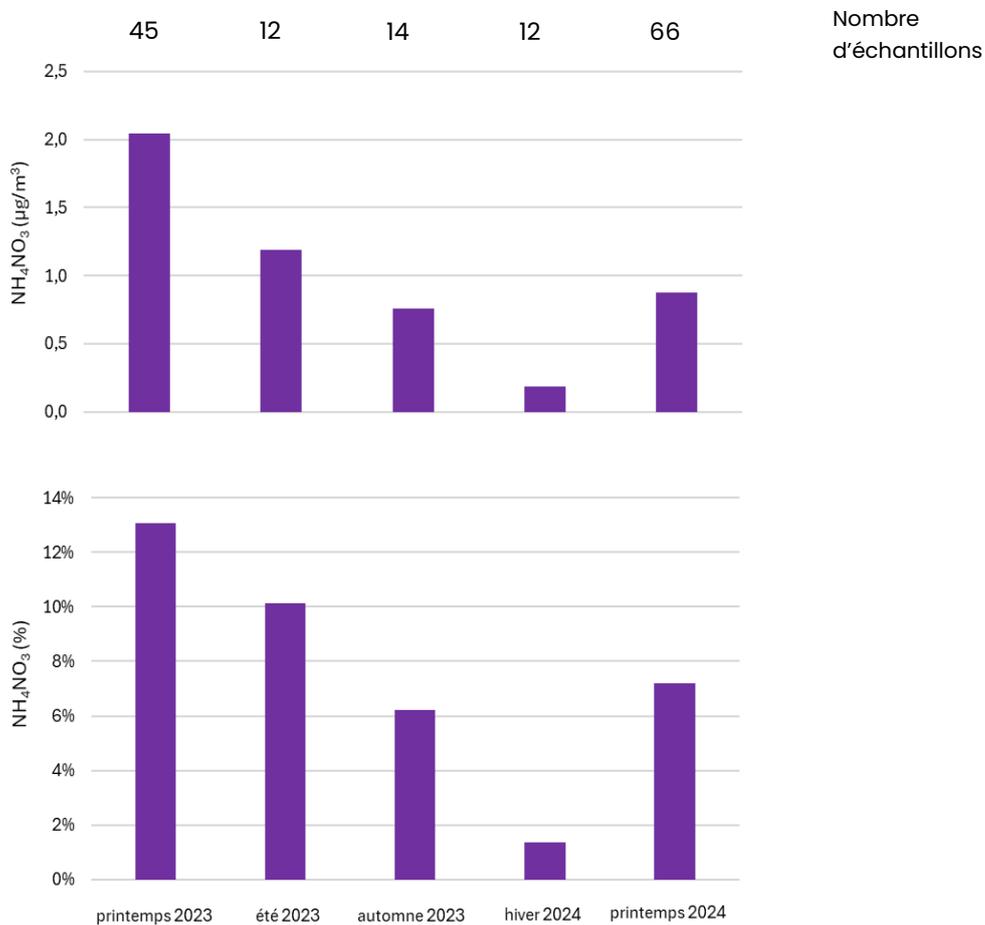


Figure 53 : évolution saisonnière des concentrations en nitrate d'ammonium (en haut) et de sa contribution dans les PM10 (en bas) sur le site Nord

Les niveaux de nitrate d'ammonium les plus importants ont été mesurés au printemps 2023, avec une concentration moyenne de $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et une contribution dans les PM10 de 13%. Cette période correspond à celle durant laquelle la majorité des épandages ont lieu, et des concentrations en ammoniac importantes ont été mesurées sur le site nord à cette même période.

En revanche, des concentrations nettement plus faibles sont mesurées au printemps 2024 ($0,87 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et cela s'explique par différentes **conditions météorologiques non favorables à la production et/ou au transport du nitrate d'ammonium** (faible fréquence des vents issus de Nord-Est à l'origine d'import de masses d'air chargées en nitrate d'ammonium (15)). En mars 2024, des concentrations faibles sont mesurées en raison d'une pluviométrie importante (cf. Figure 15) non propice à la formation de nitrate d'ammonium. Par ailleurs, ces précipitations ont provoqué un décalage dans le début des épandages réalisées par les agriculteurs. Les concentrations d'ammoniac mesurées en mars 2024

étaient donc également faibles pour la saison (cf. Figure 22, idem en mars 2023). En avril et mai 2024, des origines de vents particulières participent également aux niveaux bas de nitrate d'ammonium mesurés pendant le printemps 2024 (cf. Annexe 1). En effet, des vents de sud et sud-ouest non mesurés en 2023 sont présents, et, au contraire, moins de vents du nord-est sont mesurés par rapport à 2023. Ces conditions de vents en 2024 engendrent moins d'arrivées de masses d'air continentales potentiellement chargées en nitrate d'ammonium, ce qui peut expliquer les concentrations plus faibles mesurées au printemps 2024.

Les concentrations les plus faibles sont observées en hiver en lien avec la diminution des pratiques agricoles émettrices d'ammoniac et également des conditions météorologiques peu propices à la formation de nitrate d'ammonium (température faible, vitesse de vent élevé). A noter également qu'un faible nombre d'échantillons a été prélevé par rapport aux autres saisons puisque c'est pendant les saisons les plus propices aux émissions d'ammoniac et à la formation de nitrate d'ammoniac que l'échantillonnage a été le plus fréquent.

Par ailleurs, il est intéressant de noter que la contribution en nitrate d'ammonium dans les PM10 est également bien plus faible au printemps 2024 par rapport au printemps 2023 (7% et 13% respectivement). Le nitrate d'ammonium est essentiellement présent dans les particules PM2.5. Ici le nitrate d'ammonium est estimé dans les particules PM10, qui comprennent des particules de taille plus grossière (fraction 2.5 μm à 10 μm) telles que les sels de mer. Les conditions météorologiques n'étant pas propices à accumuler beaucoup de nitrate d'ammonium dans l'air, sa contribution dans les PM10 diminue également. En outre, les concentrations en PM10 au printemps 2024 sont plus faibles qu'au printemps 2023 (cf. Figure 50).

Sur la période de mesure, les concentrations en nitrate d'ammonium les plus importantes ont été observées au printemps 2023 sur le site Nord. Cette saison correspond à celle où les épandages sont le plus fréquent et avec des conditions météorologiques favorables à la formation du nitrate d'ammonium. Des niveaux plus faibles sont observés au printemps 2024 en lien avec des conditions météorologiques particulières (vents dominants différents, pluviométrie).

Certains composés qui n'ont pas été pris en compte dans la description globale, les sucres et les méthylamines, sont présentés dans le paragraphe suivant.

10.5. Sucres et méthylamines

Parmi les éléments présents en trace dans les particules, **certains sucres** peuvent être considérés comme des traceurs organiques et permettent d'identifier des sources et de mieux comprendre les variations temporelles des particules. C'est le cas de **l'arabitol et du mannitol** qui sont émis par la **flore fongique des sols et des végétaux**. Leurs concentrations varient respectivement entre 0.6 et 145 ng/m^3 et entre 0.8 et 80 ng/m^3 . Les données statistiques de ces deux composés sont présentées dans le Tableau 8.

Tableau 8: données statistiques des concentrations d'arabitol et de mannitol

Concentration (ng/m ³)	Arabitol	Mannitol
Moyenne	8.4	8.7
Q1	2.4	3.0
Médiane	4.5	5.2
Q3	6.9	8.7
Max	144.6	80.1

De plus, l'évolution mensuelle de leurs concentrations est présentée sur la Figure 54.

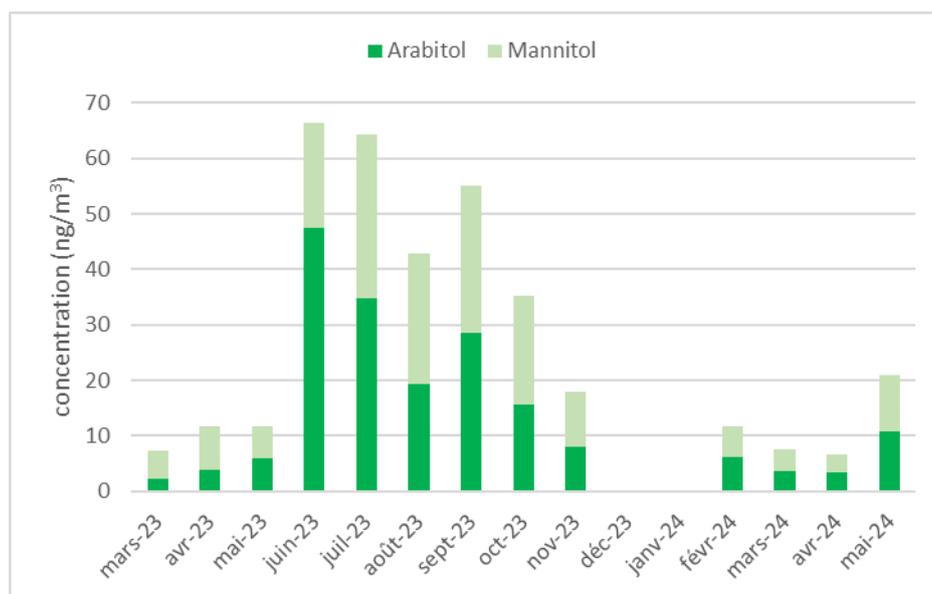


Figure 54: évolution mensuelle des concentrations en arabitol et en mannitol au niveau du site Nord

Les **polyols** (arabitol et mannitol) sont des **traceurs des émissions biogéniques primaires** (16). Or les activités biogéniques sont plus importantes lorsque les températures sont plus hautes et que le rayonnement solaire est plus important (émissions des spores fongiques ; des pollens...). Les concentrations en arabitol et en mannitol les plus fortes sont observées en juin, juillet, août et septembre 2023 (les mois les plus chauds pendant les mesures), ce qui est cohérent avec des conditions météorologiques favorisant une activité biogénique importante. La matière organique présente également les plus fortes concentrations durant l'été 2023.

Par ailleurs, la **méthylamine et la di-méthylamine** sont émises dans l'atmosphère par de nombreuses sources dont **les animaux d'élevage et leurs déjections** (17). Sur la période de mesure, leurs concentrations journalières varient respectivement entre 0.01 et 7 ng/m³, et entre 1.4 et 19 ng/m³ (Tableau 9).

Tableau 9: données statistiques des concentrations de méthylamine et de di-méthylamine

Concentration (ng/m ³)	Méthylamine	Di-méthylamine
Moyenne	0.7	4.9
Q1	0.1	2.4
Médiane	0.3	3.8
Q3	0.8	6.2
Max	7.0	19.3

La Figure 55 présente l'évolution mensuelle des concentrations de la méthylamine et de la di-méthylamine.

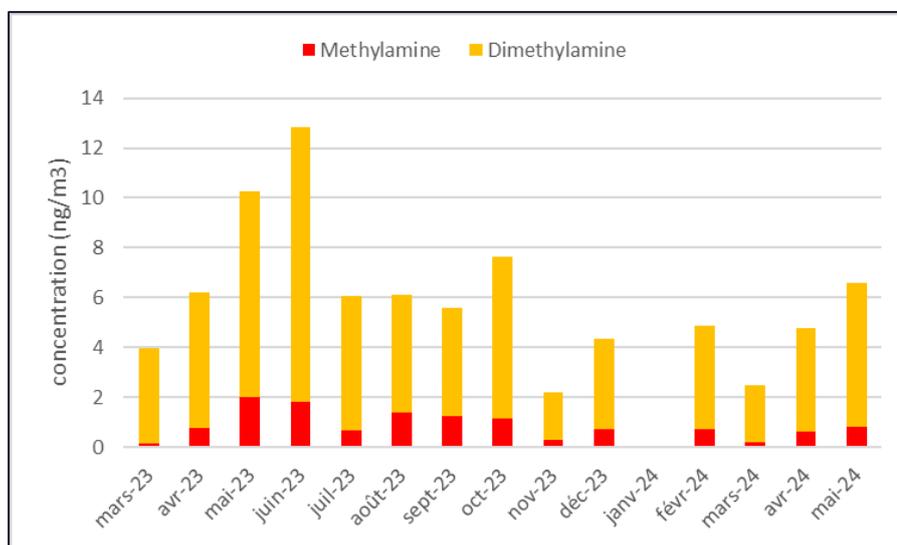


Figure 55: évolution mensuelle des concentrations en méthylamine et en di-méthylamine

Les concentrations mensuelles de méthylamine varient peu, entre 0.2 et 2.0 ng/m³, tandis que les concentrations en di-méthylamine varient entre 1.9 et 11.0 ng/m³. Les concentrations les plus importantes de di-méthylamine sont observées en mai et en juin 2023. Or lors de ces deux mois, des épandages ont eu lieu à proximité du site Nord, ce qui peut expliquer les niveaux mesurés à cette

période. Cela est cohérent avec les niveaux d'ammoniac, également plus élevés en mai et juin 2023 (cf partie 5.4.b)

L'arabitol et le mannitol sont deux traceurs des sources biogéniques primaires terrestres (spores fongiques, pollens). L'activité de ces sources est favorisée par un ensoleillement important et des températures chaudes, ce qui explique les plus fortes concentrations observées en juin 2023, juillet 2023, août 2023 et septembre 2023.

La méthylamine et la diméthylamine sont émises entre autres par les déjections des animaux d'élevage (17). Ces deux composés sont donc suspectés d'être émis lors des épandages de lisier. Les concentrations les plus importantes de ces amines sont observées en mai et juin 2023 ce qui correspond aux périodes d'épandage à proximité de ce site.

Pour étudier le lien entre le nitrate d'ammonium dans les PM10 et l'ammoniac gazeux, il a été décidé d'analyser certains jours pour lesquels les contributions en nitrate d'ammonium ont été importantes.

10.6. Lien entre nitrate d'ammonium et ammoniac

Les concentrations d'ammoniac jouent un rôle dans la formation de nitrate d'ammonium, il a donc été choisi d'utiliser un critère de sélection basé sur la contribution journalière en nitrate d'ammonium dans les particules fines PM10. Cette contribution varie entre 0 et 47% pendant la campagne de mesure. Les jours pour lesquels **cette contribution est supérieure ou égale au 3^{ème} quartile mesuré sur l'ensemble de la campagne ont été sélectionnés**. Cela correspond à une **contribution en nitrate d'ammonium supérieure à 12%**, soit 39 jours répartis sur l'ensemble de la campagne.

La Figure 56 présente les contributions en nitrate d'ammonium et les concentrations d'ammoniac sur l'ensemble de la campagne sur le site Nord. Il apparaît que des contributions en nitrate d'ammoniac supérieures à 12% dans les PM10 **sont mesurées en majorité durant les mois de mars, avril et mai**, aussi bien en 2023 qu'en 2024. Quelques jours sont également relevés ponctuellement en juin, août, septembre, octobre et décembre 2023.

Concernant les jours sélectionnés pendant les 2 printemps de la campagne, des augmentations dans les concentrations d'ammoniac sont généralement observés également. Ces observations sont cohérentes avec la période pendant laquelle la majorité des épandages ont lieu et également des conditions propices à la formation de nitrate d'ammonium (cf. partie 10.4). A noter que le 15 mars 2024 présente la concentration journalière la plus élevée en ammoniac ($29 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et une faible contribution en nitrate d'ammonium dans les PM10 (1% environ). Cette journée a été traitée dans la partie 6.2.b et a été considérée comme sous l'influence d'activités localisées. En effet, la concentration journalière en ammoniac est due à un pic de concentration ($145 \mu\text{g}/\text{m}^3$) mesuré à 19h. La concentration journalière en ammoniac du 15 mars 2024 est donc due à une activité ponctuelle et locale n'ayant pas conduit à la formation de nitrate d'ammonium puisque trop brève.

A l'exception du jour sélectionné en décembre 2023, il est également observé des augmentations dans les concentrations d'ammoniac pour les jours sélectionnés en juin, août, septembre et octobre. Les conditions météorologiques peuvent continuer à être propices à la formation de nitrate d'ammonium pendant ces mois-ci tant que la température n'est pas trop élevée (inférieure à 20 - 25°C) ce qui est le cas des jours présentant une contribution en nitrate d'ammonium supérieure à 12% dans les PM10. Par ailleurs, des activités agricoles telles que des épandages peuvent encore avoir lieu à ces périodes selon les types de cultures exploitées (prairie et colza en particulier pour lesquels des épandages ont été réalisés à ces périodes à proximité du site nord).

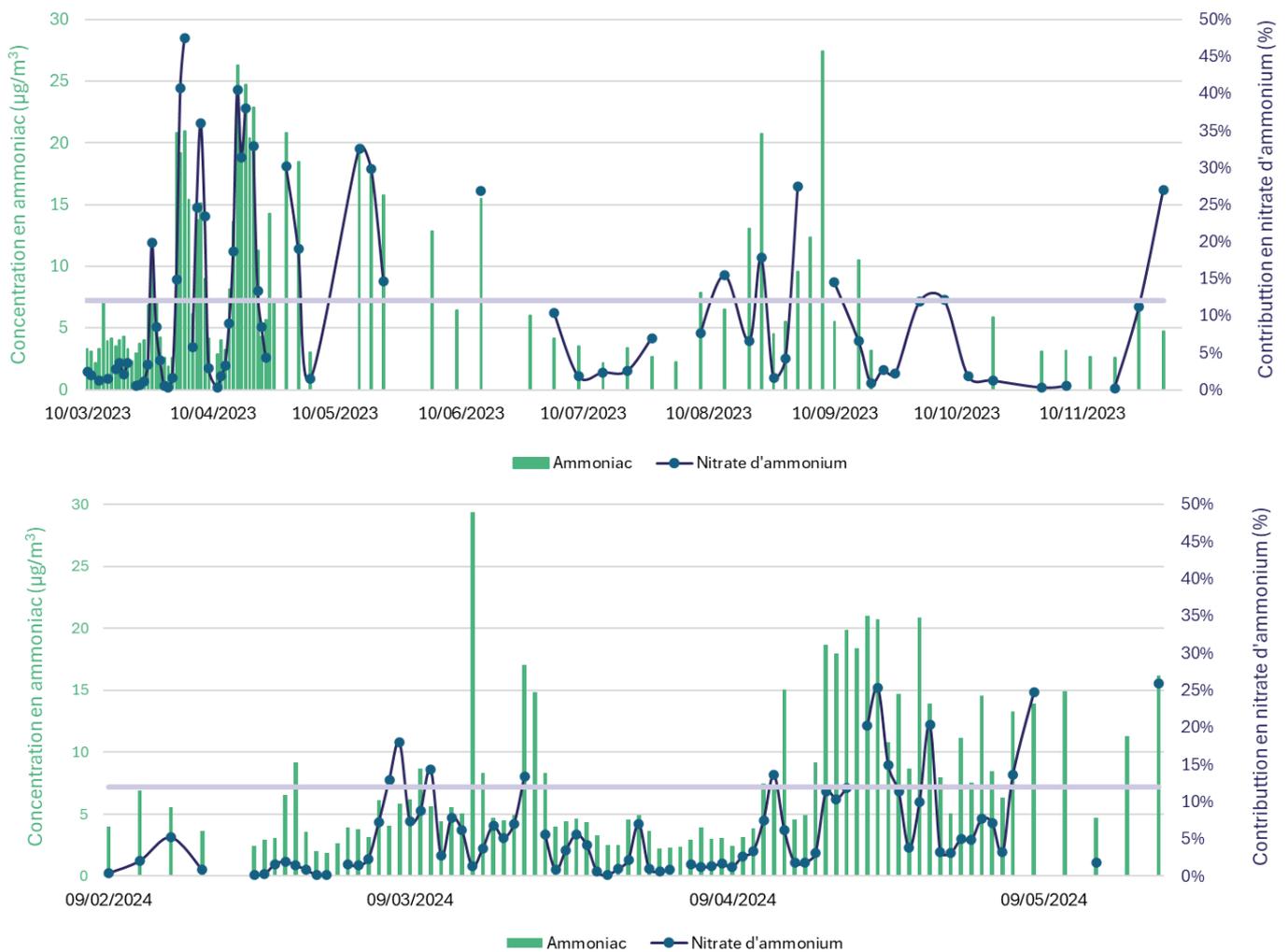


Figure 56 : Concentrations en ammoniac et contribution en nitrate d'ammonium dans les PM10 en 2023 (en haut) et en 2024 (en bas). Le trait bleu indique le seuil de 15% en nitrate d'ammonium au-dessus duquel des jours ont été sélectionnés.

Sur l'ensemble des journées sélectionnées, les températures moyennes journalières sont réparties entre 6 et 19°C. Ces températures correspondent à un intervalle sur lequel le nitrate d'ammonium sous forme particulière peut se former. En effet, pour des températures supérieures à 20-25°C, sa formation est fortement limitée (18) puisqu'il repasse sous forme gazeuse.

Par ailleurs, certains des jours sélectionnés lors de l'étude sur les niveaux mesurés en ammoniac (cf. partie 6.1) ont également été sélectionnés dans cette partie pour leur contribution en nitrate d'ammonium dans les PM10. Il arrive également que des jours sélectionnés pour leurs niveaux en ammoniac précèdent de plusieurs jours ceux sélectionnés pour leur contribution en nitrate d'ammonium. Cela n'est pas incohérent avec le temps de réaction nécessaire pour former du nitrate d'ammonium à partir de l'ammoniac.

Les 39 jours pour lesquels la contribution en nitrate d'ammonium dans les PM10 est supérieure à 12% correspondent à des périodes pendant lesquels les niveaux en ammoniac étaient élevés et correspondaient aux critères définis dans la partie 6, le jour même où quelques jours auparavant. De plus, ces jours-ci les conditions météorologiques étaient favorables à la formation de nitrate d'ammonium.

10.7. Positive Matrix Factorization (PMF)

L'analyse de la composition chimique des PM10 a été réalisée précédemment. Dans cette partie il s'agit à partir des concentrations sur les différents constituants de **remonter aux principales sources à l'origine de la concentration de PM10 et d'estimer leur contributions moyennes.**

La Positive Matrix Factorization (PMF) est un **outil statistique** qui permet d'identifier les **contributions des principales sources de polluants et leurs mécanismes de formation**, à partir d'un jeu de données le plus complet possible, tant en termes de nombre d'échantillons que d'espèces chimiques mesurées. Le principe de la méthode est détaillé en annexe 6. Cette méthode est utilisée par le LCSQA depuis 2011 pour l'exploitation de données, mais aussi par l'IGE pour des utilisations de recherche visant à développer ses applications (19). L'IGE, en charge de l'analyse de la composition chimique des filtres PM10, a réalisé une PMF sur les données du projet en utilisant les données de PM10 mesurées, ce qui explique la part non déterminée présente sur les graphiques suivants.

a. Méthode

La première étape réalisée lors d'une PMF est la préparation des données et leur vérification pour ne pas fausser les résultats. Dans la base de données du projet, certaines espèces ont des valeurs inférieures à la limite de quantification (LQ, correspondant à la plus petite valeur à partir de laquelle il existe un résultat de mesure avec une fidélité suffisante) sur une grande partie de la période étudiée comme certains traceurs de particules minérales (Al, Ti), de trafic (Pb, Cu) et du HFO (fioul lourd). Ces espèces n'ont donc pas été prises en compte dans la PMF. De même, les valeurs correspondant à des épisodes particuliers ont été exclues. Cela correspond aux dates suivantes :

- 05/09/2023 et 08/09/2023 : épisodes de poussières Sahariennes,
- 11/05/2024 : concentration importante en PM10,
- 13/11/2023 et 25/11/2023 : pic de carbone suie.

Une fois les données préparées, différents tests sont faits pour sélectionner le nombre de facteurs optimaux. Ici, les tests ont été réalisés en utilisant de 4 à 10 facteurs. Les données statistiques obtenues

ont montré des résultats satisfaisants à partir de 8 facteurs, cependant des sources inexistantes apparaissaient lorsque plus de 8 facteurs étaient utilisés. Des résultats satisfaisants ont été obtenus en utilisant 8 facteurs et des contraintes sur les éléments suivants : 3-MBTCA, Levoglucosan, Polyols, MSA.

Les corrélations entre l'estimation faite par la PMF et les mesures sont très bonnes pour les ions, moyennes pour les PM10 à cause de l'écart entre les PM10 mesurées et les PM10 reconstituées et moins bonnes pour les métaux à cause de valeurs inférieures à la LQ.

Il est important de considérer les résultats obtenus comme des estimations et non des valeurs précises.

b. Sources identifiées

Les **8 facteurs identifiés** par la PMF ont été associés à des profils de sources de particules PM10. Les sources sont distinguées comme sources primaires, avec des émissions directement dans l'atmosphère (exemple : trafic, sels marins, combustion de biomasse) et des sources secondaires (exemple : biogénique secondaire, aérosols inorganiques secondaires), du fait de réactions physico-chimiques dans l'atmosphère à partir de précurseurs gazeux. Pour simplifier l'analyse, certains facteurs sont regroupés dans une même source.

3 sources naturelles

- Les **sels marins** : ils sont caractérisés par la forte contribution du sodium (Na^+), du chlorure (Cl^-) et du magnésium (Mg^{2+}).
- Le **biogénique primaire** : cette source est associée à la microflore fongique des sols et à la surface de la végétation (19).
- Le biogénique secondaire : 2 facteurs ont été regroupés dans cette source :
 - Les **aérosols organiques secondaires (SOA)** : ce facteur est caractérisé par la présence du 3-MBTCA (acide 3-méthyl-1,2,3-butanetricarboxylique) qui provient de l'oxydation de composés organiques volatils (COV) émis par les plantes,
 - Le **MSA-rich** : il est caractérisé par la présence du MSA (acide méthylsulfonique) avec des proportions importantes de SO_4^{2-} qui sont produits par l'oxydation du DMS (sulfure de diméthyle) émis par le phytoplancton marin.

3 sources anthropiques

- Le **Trafic** : il représente à la fois les émissions dues à l'échappement et certaines émissions hors-échappement comme l'usure des pneus émettant des métaux.
- La **combustion de la biomasse** : ce facteur représente principalement le chauffage au bois en hiver mais aussi la combustion de déchets verts.
- Les **aérosols inorganiques secondaires (SIA)** : les 3 espèces majoritaires présentes dans ce facteur sont l'ammonium (NH_4^+), le nitrate (NO_3^-) et le sulfate non marins (nssSO_4^{2-}) indiquant la présence de nitrate d'ammonium (NH_4NO_3) et de sulfate d'ammonium ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$).

1 source mixte

- Les **poussières minérales** : ce facteur caractérise le processus de remise en suspension des poussières par des activités anthropiques (ex : chantier, labour des champs) ou naturelles (poussières crustales).

c. Contribution moyenne

Les contributions moyennes de ces différents facteurs sur l'ensemble de la période de mesure sont présentées en Figure 57.

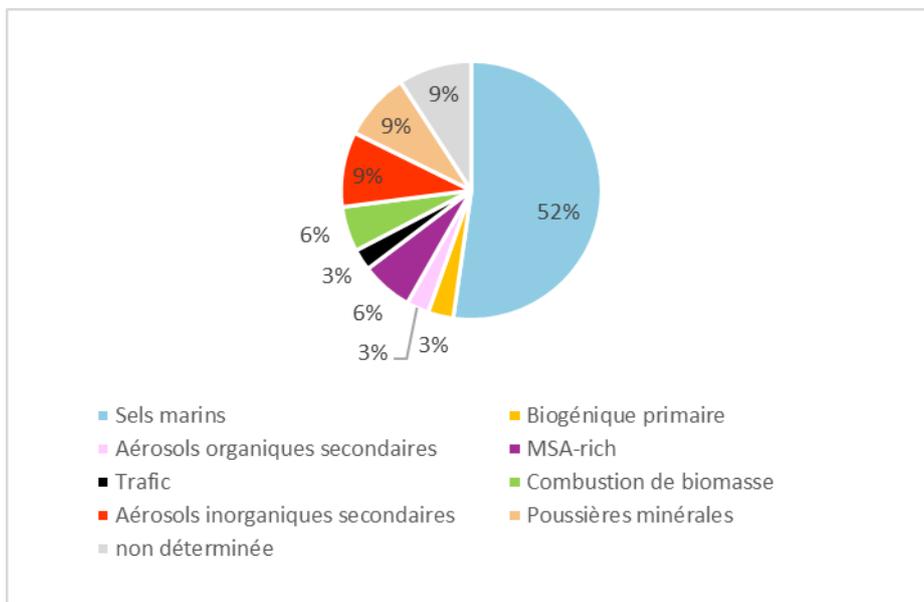


Figure 57 : Contribution moyenne des principales sources identifiées par la PMF au niveau du site Nord

Sur l'ensemble de la période de mesure, la source la plus importante des particules PM10 est les sels marins. Cette **contribution importante de sels marins** (52%) est due à la localisation du site de mesure qui est situé à proximité de la mer. Le restant des particules provient principalement des **aérosols inorganiques secondaires** (9%), des **particules minérales** (9%), du **MSA-rich** (6%), de la combustion de la biomasse (6%). La contribution de PM10 issues de source non déterminée est estimée à 9% des PM10 par la PMF.

D'autres sources plus minoritaires (telles que le trafic, les aérosols organiques secondaires, les émissions biogéniques primaires) ont été identifiées avec une contribution de 3%.

En moyenne pendant la période de mesure, 64% des particules fines PM10 mesurées au niveau du site Nord sont issues de sources naturelles : 52 % du fait des embruns marins et 12% liées aux sources d'émissions biogéniques primaires et secondaires (végétation, sol, océan). Les sources anthropiques (liées activités humaines telles que le trafic, la combustion de biomasse) expliquent 18% de la masse des PM10 mesurées au niveau du site Nord.

d. Variation saisonnière

L'évolution saisonnière des contributions et des concentrations des différents facteurs identifiés, de mars 2023 à mai 2024, est présentée sur la Figure 58. Les **concentrations moyennes printanières et automnale de PM10** (pendant les prélèvements réalisés au niveau du site Nord) sont **plus élevées que celles observées en été et en hiver**. La saisonnalité est bien marquée pour certaines sources de particules.

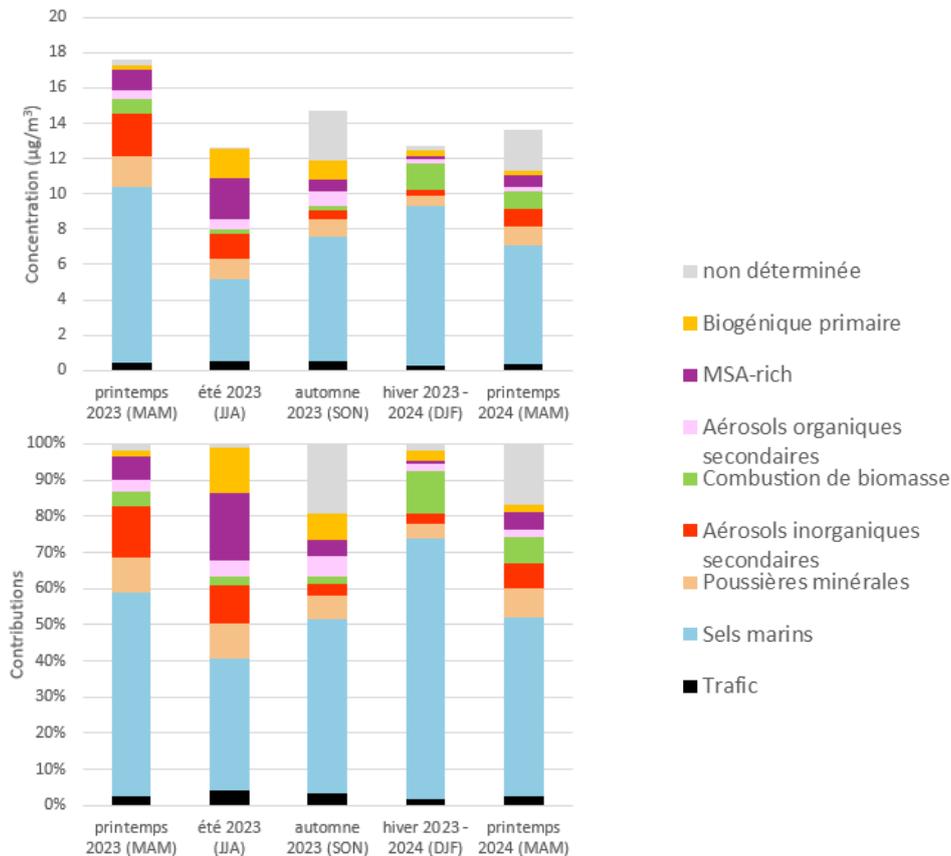


Figure 58: évolution saisonnière des contributions et des concentrations des différents facteurs constitutifs des PM10 au niveau du site Nord

Pour **toutes les saisons**, les **sels de mers** sont la source principale de PM10, avec des contributions qui varient entre 37% en été ($4.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et 72% en hiver. Les conditions de vent expliquent cette variation saisonnière avec des vents forts de Sud-Ouest, porteurs d'embruns marins en période hivernale. La plus forte concentration en sels marins constatée au printemps 2023 ($9.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) est liée à un mois de mars 2023 avec des vents forts de secteur sud-ouest dominants (cf annexe 1).

Les **aérosols inorganiques secondaires** sont notamment constitués du nitrate d'ammonium et du sulfate d'ammonium. Cette source présente des concentrations maximales observées au printemps 2023 ($2,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et une **contribution maximale de 14%**. Ce constat est cohérent avec l'analyse faite à la suite de l'estimation des concentrations en nitrate d'ammonium (cf partie 10.4). Le **nitrate**

d'ammonium est majoritaire au printemps lorsque les précurseurs gazeux sont présents (NH_3 , NO_x) dans l'atmosphère du fait notamment des pratiques agricoles. Durant l'**été**, les aérosols inorganiques secondaire représentent 11% des PM_{10} et sont liés à la présence du **sulfate d'ammonium** dont la formation est favorisée par fort ensoleillement.

Les aérosols organiques **biogéniques primaires** se caractérisent par une saisonnalité bien marquée. En effet, la concentration maximale est atteinte en été ($1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ce qui représente 13% des PM_{10} et les 2 printemps présentent les contributions minimales avec seulement 2%. Les **activités biogéniques** sont plus intenses en période estivale, favorisées par le **rayonnement solaire plus fort** et la température plus élevée.

Les **aérosols organiques secondaires** liées aux émissions biogéniques et aux processus d'oxydation photochimique de COV (mécanisme de transformation d'espèces gazeuses en particules), présentent des contributions allant de 2% (en hiver et printemps 2024) à 6% (automne 2023).

La contribution la plus importante du **MSA-rich** est observée en **été** (19%), soit $2.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, période pendant laquelle les températures et le rayonnement solaire sont plus importants, ce qui favorise le développement de phytoplancton conduisant à la formation de MSA. Ainsi sa concentration ($0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et sa contribution (1%) sont plus faibles en hiver.

Les **poussières minérales** présentent une contribution de 10% au printemps ($1.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et à l'été 2023 ($1.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Pour rappel l'épisode de poussières sahariennes de septembre 2023 a été exclu de cette analyse.

La **combustion de biomasse** présente une saisonnalité marquée. En hiver, elle représente 12% des PM_{10} ($1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) alors qu'elle ne constitue que 2% des PM_{10} en été et à l'automne 2023. Cette source est principalement liée au chauffage résidentiel au bois ce qui explique cette contribution en période froide. Elle peut aussi être issue de la combustion de déchets verts.

Le **trafic** est une source relativement stable d'une saison à l'autre avec des contributions comprises entre 2% et 4% des PM_{10} et des concentrations allant de $0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Au fil des saisons, les sels de mer représentent la principale contribution des PM_{10} allant de 37% à 72%. Les aérosols organiques issus des sources biogéniques (primaires et secondaires) présentent une forte saisonnalité en lien avec les conditions météorologiques favorisant les activités biogéniques et les mécanismes de transformations secondaires. De même, la contribution des sources de particules organiques secondaires liées aux phytoplanctons (MSA-rich) est plus forte en été. Les aérosols inorganiques secondaires, constitués de nitrate et de sulfate d'ammonium présentent les plus fortes contributions au printemps 2023 et à l'été, en lien avec les conditions propices pour chacune des espèces.

12. Synthèse des particules

L'**ammoniac** réagit avec le **nitrate**, qui est formé à partir des oxydes d'azote, pour produire du **nitrate d'ammonium (NH₄NO₃)** qui est un des composés présents dans les particules.

Concentrations en PM10

Lors du projet, les concentrations en **PM10** ont été mesurées sur les 3 sites, Nord, Ouest et Sud, et ont été comparées à celles réalisées sur les sites permanents de Kergoff (station rurale) et de Macé (station urbaine de fond). Elles sont **proches sur les sites Nord et Ouest ainsi qu'à Macé**, tandis que sur le site **Sud**, les niveaux observés sont **plus élevés** (facteur 1.3), comme c'était le cas pour l'ammoniac. A l'inverse, les concentrations enregistrées sur les 3 sites sont supérieures à celles de Kergoff, plus éloigné des sources naturelles et anthropiques (facteur 1.5). L'évolution mensuelle est plus difficile à expliquer que pour l'ammoniac en raison des nombreuses sources de PM10.

Composition chimique des particules

La **composition chimique** de ces particules a été étudiée sur le **site Nord du 10 mars 2023 au 20 mai 2024** à partir de prélèvements collectés à des fréquences différentes en fonction des périodes d'activités agricoles (cf partie 10.1).

La part indéterminée mise de côté, les composés mesurés les plus importants dans les PM10 sont les **sels marins** (composés de Na⁺ et Cl⁻), la **matière organique** et les **composés inorganiques secondaires**. Les variations saisonnières sont marquées pour les différents composés chimiques. Les **niveaux en ammonium et en nitrate** présentent les plus faibles concentrations en hiver tandis que les valeurs maximales sont atteintes au printemps 2023. Cette saison correspond à la période où les **épandages** sont les plus fréquents et à la saison durant laquelle la formation de nitrate d'ammonium est favorisée (température inférieure à 20°C, peu de pluie). Les **différences de niveaux enregistrés entre le printemps 2023 et 2024** illustrent, cependant, le rôle prépondérant des conditions météorologiques dans les processus de formation et transport du nitrate d'ammonium.

Pour aller plus loin dans l'analyse, **39 jours pour lesquels la contribution de NH₄NO₃** dans les PM10 est supérieure à 12% ont été sélectionnés. Il est constaté qu'ils **coïncident avec des niveaux importants en ammoniac** (déjà étudiés dans l'analyse détaillée des concentrations d'ammoniac sur le site Nord), le jour même ou plusieurs jours auparavant.

Recherche des sources d'émissions de PM10 et estimation des contributions via la méthode 'PMF'

Par ailleurs, une **PMF** a été réalisée pour identifier les **sources majoritaires de particules** tel que les sels marins, le trafic, ou encore les aérosols inorganiques secondaires. Les résultats ont permis de confirmer que la source majoritaire de particules sur ce site est les sels marins et que **64% des**

particules fines PM10 mesurées au niveau du site Nord sont issues de sources naturelles. Les aérosols inorganiques secondaires ont, quant à eux, une contribution maximale de 14% au printemps 2023.

Conclusion

❖ Contexte du projet :

Des mesures de la qualité de l'air ont été réalisées pour répondre aux objectifs du projet Life ABAA qui visent à **réduire les émissions d'ammoniac**. Parmi les objectifs de ce projet, le dispositif de mesure mis en place avait pour but **l'amélioration des connaissances des mécanismes de dispersion de l'ammoniac** et de sa **contribution dans les particules**.

Pour répondre à ces objectifs, **trois sites de mesure** ont été mis en place, de mars 2023 à juin 2024, sur la commune de Plouarzel (29), appelés sites Nord, Ouest et Sud. Ils triangulent une zone d'environ 4/5 km pour aider à la compréhension des mesures. Ces sites ont été implantés au sein de 3 exploitations agricoles qui se distinguent par des activités et des environnements différents. Deux d'entre eux se trouvent au sein d'exploitations de bovins et le 3^{ème} à l'intérieur d'une exploitation de volailles. Plusieurs paramètres ont fait l'objet d'un suivi en continu sur l'ensemble des sites : **l'ammoniac** et les **particules PM10**. En complément, des prélèvements sur filtre des particules PM10 en vue d'analyse différée de leur composition chimique ont été effectués sur le site Nord.

❖ Représentativité des données :

Au vu des concentrations PM10 mesurées, **la période de mesure, a été jugée atypique au regard de l'historique étudié**. Cela s'explique par des conditions météorologiques particulières. En effet, **des précipitations très importantes** ont été observées sur cette période ainsi que des **vents** provenant majoritairement d'un **large secteur ouest** et une **absence de vents issus de nord-est** contrairement aux normales saisonnières.

La durée significative de la campagne (15 mois) a permis d'étudier plus finement les évolutions temporelles et de couvrir plusieurs fois une même saison à l'image du printemps souvent à l'origine d'une augmentation des niveaux de particules fines en lien avec les activités agricoles.

❖ Des enseignements sur l'ammoniac

Des variations spatiales marquées

Les 3 sites de mesures présentent des **niveaux de fond supérieurs à ceux observés sur les stations du réseau de mesure régional**, de l'ordre de 2 à 3 fois ceux respectivement observés sur le site de fond urbain de Brest (Macé) ou rural en centre Bretagne (Kergoff). Ce constat se justifie par les implantations retenues, à savoir le cœur d'exploitations agricoles pour faciliter la compréhension des évolutions des concentrations mesurées. Par ailleurs, une **variation spatiale est également observée au sein du territoire pilote** avec des différences qui portent à la fois sur l'amplitude des pics et sur les profils temporaires. Les valeurs horaires maximales observées sur les sites sont de l'ordre de 100 à 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour deux d'entre eux, contre plus de 3 mg/m^3 pour le 3^{ème} en lien avec les activités agricoles exercées. A titre de comparaison, les sites de fond urbain et rural ont enregistré des valeurs horaires maximales de l'ordre de 15 à 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sur la même période.

Une augmentation des niveaux souvent liées à des activités d'épandage

Des variations saisonnières des concentrations d'ammoniac ont été constatées sur 2 des 3 sites (exploitations de bovins). En effet, **l'impact des épandages** réalisés dans les environs de chacun des sites a été observé. Au printemps, l'un des sites est influencé par les épandages sur maïs, tandis qu'à l'automne, les épandages sur prairies impactent les concentrations en ammoniac du second site.

A ces variations saisonnières s'ajoute **l'influence d'activités ponctuelles et propres à chacune des exploitations**. A titre d'exemple, sont constatées l'influence liée à la proximité des fosses de stockage des effluents ou encore de l'étable au point de mesure.

Une analyse détaillée de jours présentant des niveaux significatifs a permis de conclure que 80% d'entre eux sont influencés par les épandages réalisés autour des points de mesures.

Des niveaux atypiques sur l'un des sites en lien avec le type d'exploitation

Le site placé au sein de l'exploitation de volailles se démarque nettement des deux autres sites en raison de **valeurs ponctuellement très élevées en ammoniac ainsi qu'un niveau de fond supérieur**. Ce constat avait déjà été observé par ailleurs. En effet, la teneur en ammoniac des lisiers de volailles est nettement supérieure à celles des bovins. Rappelons que ces observations s'appliquent au cas étudié d'une exploitation qui présente plus de 100 000 volailles. A titre d'illustration, l'UGB, qui permet de traduire la taille d'une exploitation (nombre d'animaux), est environ 25 fois plus élevée sur cette exploitation de volailles qu'au niveau des deux autres exploitations de bovins retenues.

L'ammoniac n'est pas réglementé dans l'air ambiant au même titre que les particules fines PM10. En revanche, étant un précurseur de particules fines, son suivi dans l'air ambiant reste pertinent pour poursuivre l'amélioration de la qualité de l'air.

❖ Des enseignements sur les particules fines PM10

Des concentrations homogènes en lien avec le caractère multi-sources des PM10

Les niveaux moyens en PM10 enregistrés sur 2 des 3 exploitations sont du même ordre de grandeur que ceux mesurés dans le centre urbain de Brest. Les sources d'émissions de particules fines étant nombreuses (trafic, chauffage résidentiel, agriculture, sources naturelles, ...), la variabilité spatio-temporelle des concentrations en PM10 est moindre que celles de l'ammoniac.

En revanche, le 3^{ème} site se démarque par un niveau de fond plus élevé et de faibles variations temporelles (à l'échelle mensuelle). La proximité du bâtiment de volailles et d'une station de compostage pourrait expliquer cette particularité.

Une variabilité temporelle des activités agricoles sur les niveaux de PM10

Sur la période de mesure, les sources majoritaires sont les **sels de mer** ; les **sources naturelles représentent 64% des particules fines** PM10. Les sources anthropiques représentent 18% des particules mesurées.

Bien que les particules fines soient majoritairement issues des sels de mer, l'**empreinte des activités agricoles est mise en avant** par la présence du nitrate d'ammonium. Sa contribution dans les PM10 varie fortement pour atteindre un maximum saisonnier de 13% au printemps 2023. **A l'échelle journalière cette part peut représenter jusqu'à 50% de la masse des PM10.** Cette saison coïncide avec la période où **les épandages sont les plus fréquents.**

Ces résultats sont fortement **dépendant des conditions météorologiques** qui jouent un rôle prépondérant dans la formation et le transport du nitrate d'ammonium. C'est pourquoi le printemps 2024 présente des conditions moins favorables à la présence de nitrate d'ammonium dans les particules fines (moins de vent de nord-est contribuant souvent aux imports de nitrate d'ammonium, pluviométrie plus importante).

Les concentrations les plus élevées en nitrate d'ammonium coïncident généralement avec les niveaux les plus importants en ammoniac le jour même ou plusieurs jours auparavant.

Ce résultat confirme que la **présence d'ammoniac dans l'atmosphère**, accompagné de **conditions météorologiques printanières** est propice à la formation de nitrate d'ammonium.

❖ **Limites de la méthodologie mise en place et perspectives**

Rappelons que les résultats de cette étude sont **fortement dépendant de la localisation de la zone d'étude** et ne sont pas transposables en l'état à d'autres zones. Le choix s'est porté sur le territoire de Brest Métropole et du Pays d'Iroise en lien avec la forte **mobilisation des agriculteurs** et des collectivités. En contrepartie, la proximité avec le littoral a engendré une contribution importante des sels de mer dans les particules fines ce qui a eu pour effet de réduire la part des autres espèces.

Au sein du territoire, 3 exploitations ont été sélectionnées en lien avec les agriculteurs participants au projet. Comme cela a été démontré dans le rapport, **les résultats sont directement dépendants des activités exercées et des caractéristiques des exploitations.**

Un des enjeux de cette étude était la mise en relation des résultats avec les pratiques agricoles. Deux limites ont été identifiées : la collecte des pratiques agricoles et la répartition des cultures autour des sites de mesure. En effet, **une collecte plus fine des activités agricoles ainsi qu'une meilleure connaissance de la répartition des cultures** sur l'intégralité des saisons de l'étude aurait permis d'interpréter plus précisément les concentrations mesurées.

Enfin, bien que le nitrate d'ammonium soit majoritaire dans la fraction fine des particules (PM2.5), les mesures de particules ont été réalisées sur la fraction PM10 en lien avec la réglementation. Depuis l'écriture de ce projet, celle-ci a évolué et introduit désormais un seuil journalier à ne pas dépasser pour les PM2.5.

La présente étude a mis en avant la contribution des activités agricoles dans les particules PM10. L'évolution de la réglementation renforce l'intérêt de suivre et réduire cette part dans les PM2.5.

Références

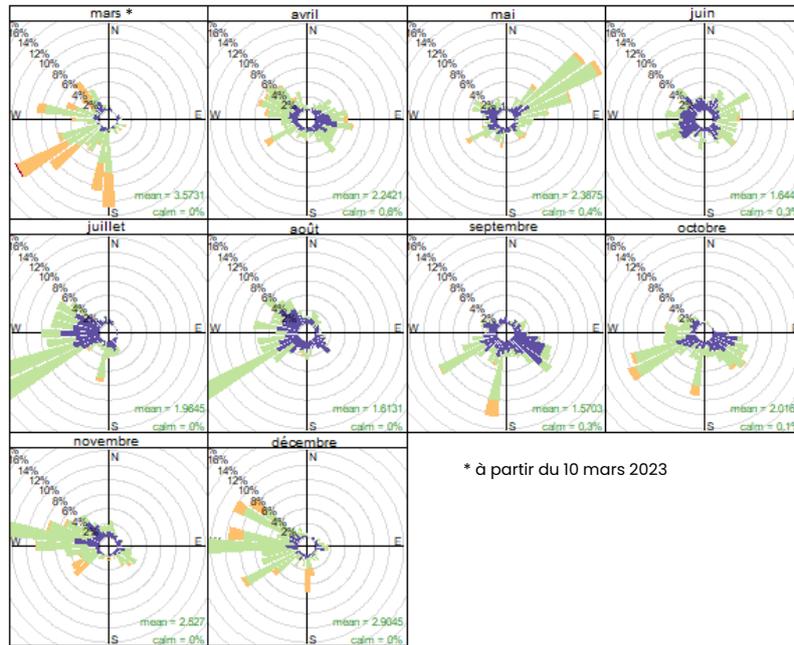
1. **RMT Élevages et Environnement.** *Guide des bonnes pratiques environnementales d'élevage.* 2019.
2. **INRS.** *Fiche toxicologique n°16, Ammoniac et solutions aqueuses.* 2021.
3. **ANSES.** *Élaboration de VTR aiguë, subchronique et chronique par voie respiratoire pour l'ammoniac.* 2018.
4. **AFNOR.** *Norme NF EN 17346, Air ambiant – Méthode normalisée pour la détermination de la concentration en ammoniac au moyen d'échantillonneurs par diffusion.* 2020.
5. **Anses.** *Valeurs guides de qualité de l'air intérieur : l'ammoniac.* 2021.
6. **M. RAMANANTENASOA.** *Prise en compte de la variabilité spatio-temporelle des émissions d'ammoniac liées à la fertilisation azotée en France et développements de modèles prédictifs.* 2018. pp. 1-32.
7. **Atmo BFC.** *L'ammoniac atmosphérique: de la caractérisation des sources aux leviers d'actions pour réduire les émissions.* septembre 2023.
8. **ADEME.** *Programme de recherche de l'ADEME sur les émissions atmosphériques du compostage.* 2012.
9. **X. Liu et al.,.** *Variability of ambient air ammonia in urban Europe (Finland, France, Italy, Spain, and the UK).* 2024.
10. **Air Breizh.** *Niveaux de concentrations et composition des particules PM10 à Saint-Malo.* 2020.
11. **B.Bessagnet et al.** *le rôle de l'agriculture sur les concentrations en particules dans l'atmosphère et l'apport de la modélisation.* 2016.
12. **Air Breizh.** *Saint-Malo: campagne de caractérisation chimique des PM2.5 et suivi de l'ammoniac.* 2022.
13. **S. ZHANG, M. DOMINIK-SEGUE.** *Caractérisation des particules sur la zone littorale des Hauts-de-France et de la Normandie.* 2021.
14. **Air Breizh.** *Campagne de mesure de la qualité de l'air dans le port de Brest et ses environs.* 2024.
15. **Ineris.** *Protocole d'analyse des épisodes de pollution pour l'aide à la décision.* 2025.
16. **S. Weber et al.** *Comparison of PM10 sources profiles at 15 French sites using a harmonized constrained positive matrix factorization approach.* 2019.
17. **Xinlei Ge, Anthony S. Wexler, Simon L. Clegg.** *Atmospheric amines – Part I. A review.* 2010.
18. **LCSQA.** *Variations spatio-temporelles des espèces chimiques majeures et de composés traces des PM10 en France métropolitaine.* 2017.
19. **S. Zhang, A. Samake.** *Identification des sources de particules sur la zone littorale des Hauts de France et de le Normandie.* 2024.

Annexes

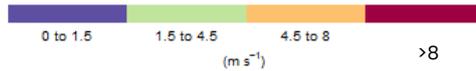
Annexe 1 : roses mensuelles de vent mesuré au site nord et normales mensuelles de rose de vent à Brest-Guipavas

Les roses mensuelles de vent ci-dessous ont été réalisées à partir des données horaires des mesures de vitesse et de direction de vent faites au niveau du site nord pendant la campagne du 10 mars 2023 et 30 juin 2024.

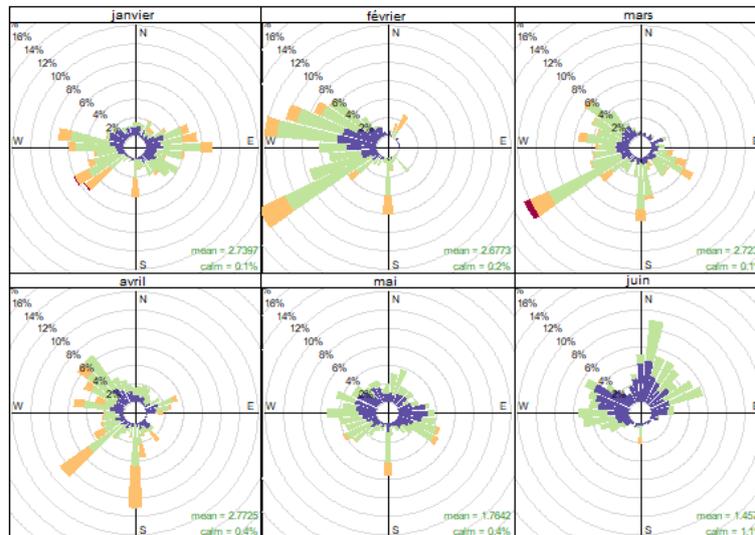
2023



* à partir du 10 mars 2023



Frequency of counts by wind direction (%)



2024

En **2023**, sur la période de mesure, le mois de mai se démarque, dominé par des vents de Nord-Est. Le reste de l'année présente **des vents dominants d'un large secteur Ouest** (Nord-Ouest à Sud-Ouest). Des vents de Sud-Est sont également mesurés en avril, juin, septembre et octobre 2023.

Les **roses mensuelles 2024** se distinguent de celles de 2023. En mars 2024, des vents de Sud-Est s'ajoutent à ceux de Sud-Ouest. Le mois d'avril 2024 présente des vents de Sud et Sud-Ouest non mesurés en 2023. Les vents dominants en mai 2023 sont issus du Nord-Est alors que le mois de mai 2024 présente des vents provenant d'un large secteur Ouest et de Sud-Est. La rose de vent de juin 2024 est dominée par des vents de Nord-Est avec des fréquences plus élevées qu'en juin 2023.

Pour comparaison avec les vents mesurés au niveau du site nord pendant la campagne sur le territoire pilote, les normales mensuelles de roses de vent (1991 – 2020) à la station Météo-France Brest-Guipavas (située à une vingtaine de kilomètres à l'Est du site nord) sont présentées ci-dessous.

Les normales mensuelles, au niveau de la station Brest-Guipavas, sont caractérisées par des vents dominants de Sud-Ouest avec des vitesses de vent plus élevées pour les mois d'hiver alors que les mois printaniers (mars à juin) présentent un secteur Nord-Est fortement représenté. Le secteur Sud-Est est moins fréquent notamment durant les mois printaniers et estivaux. Les vents de Nord-Ouest sont présents tout au long de l'année.

Les roses mensuelles observées pendant la campagne, au niveau du site Nord, sont différentes des conditions normales (de la station Brest-Guipavas), avec des vents de secteur Nord-Est peu représentés durant les mois printaniers à l'exception du mois de mai 2023.

Groupes de vitesses (km/h)



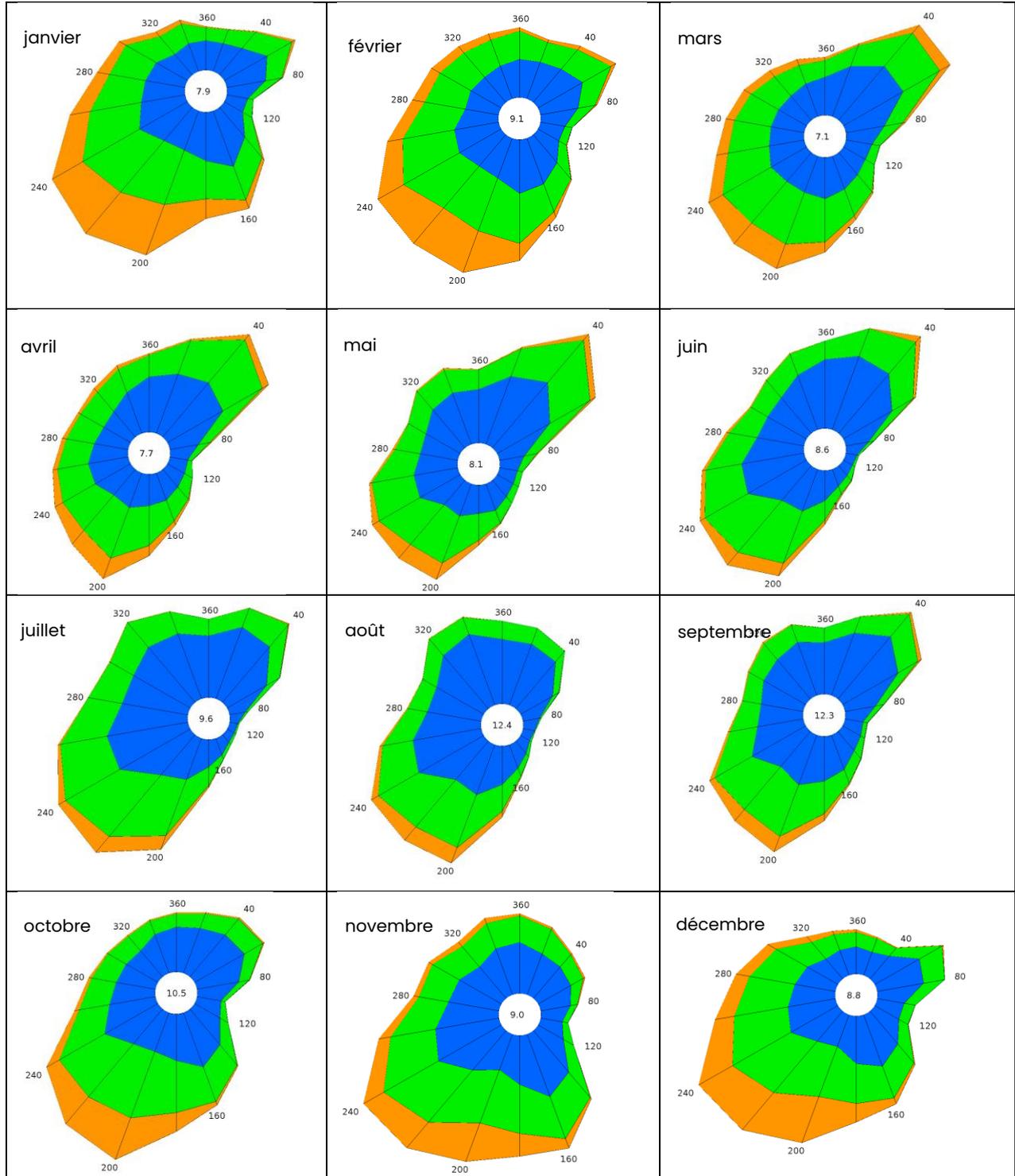
En m/s

[1,5 - 4,5]

[4,5 - 8]

>8

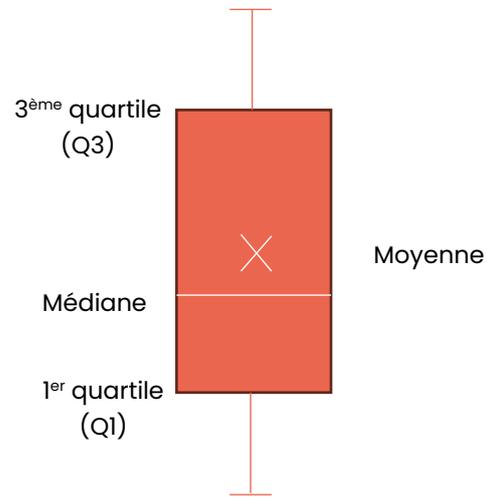
Direction d'où vient le vent en rose de 360° : 90° = Est, 180° = Sud, 270° = Ouest, 360° = Nord



Normales de rose de vent mensuelles à la station Météo France Brest-Guipavas (1991-2020)

Annexe 2 : valeurs présentées sur un graphique boxplot

Plus grande valeur inférieure à $Q3+1.5*(Q3-Q1)$

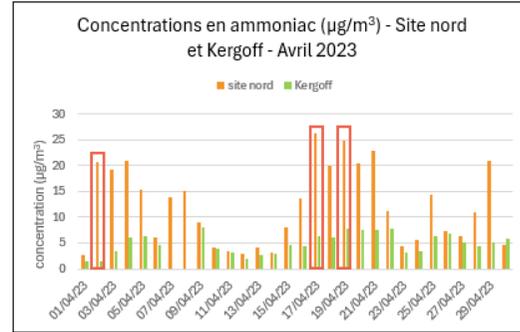
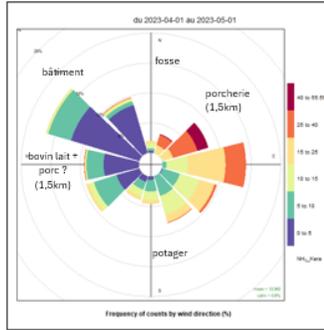


Plus petite valeur supérieure à $Q1-1.5*(Q1-Q3)$

Annexe 3 : fiches synthèses jour ammoniac

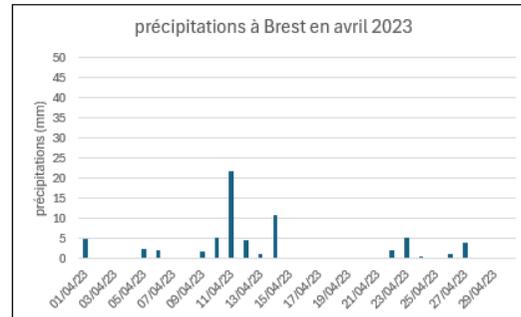
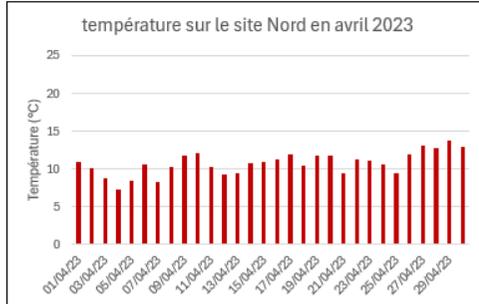
a. Site Nord

❖ **Avril 2023 :**



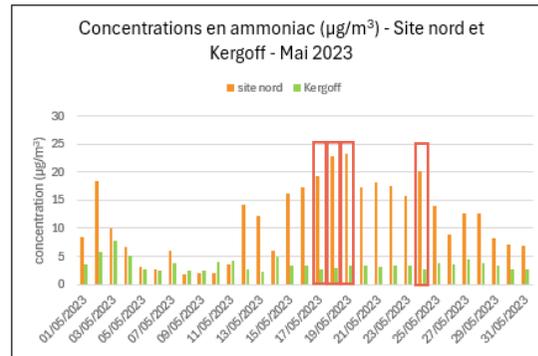
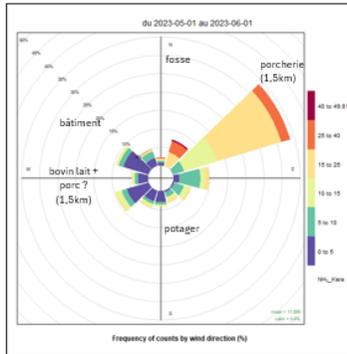
activités agricoles	
15/04-03/05	maïs
fin avril	retournement terre du potager (sud)

activités agricoles autour				
début avril	épandage prairie	épandage blé-orge		
mi avril		-	épandage maïs	
fin avril	épandage prairie	-		autre



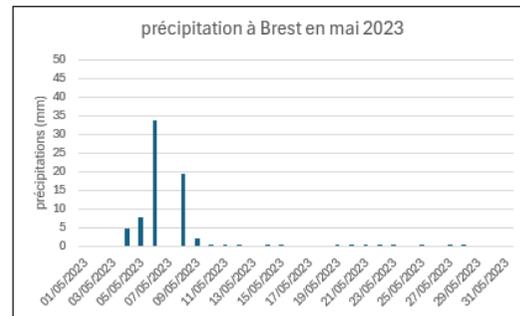
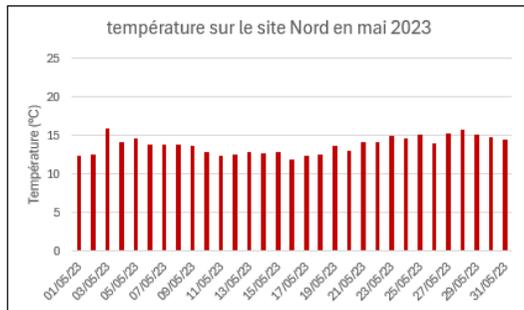
02/04/2023				<p>épandage prairie, blé-orge et maïs</p>
17/04/2023				<p>épandage prairie et maïs (sur site et à proximité)</p>
19/04/2023				<p>épandage prairie et maïs (sur site et en dehors) + autre</p>

❖ **Mai 2023 :**

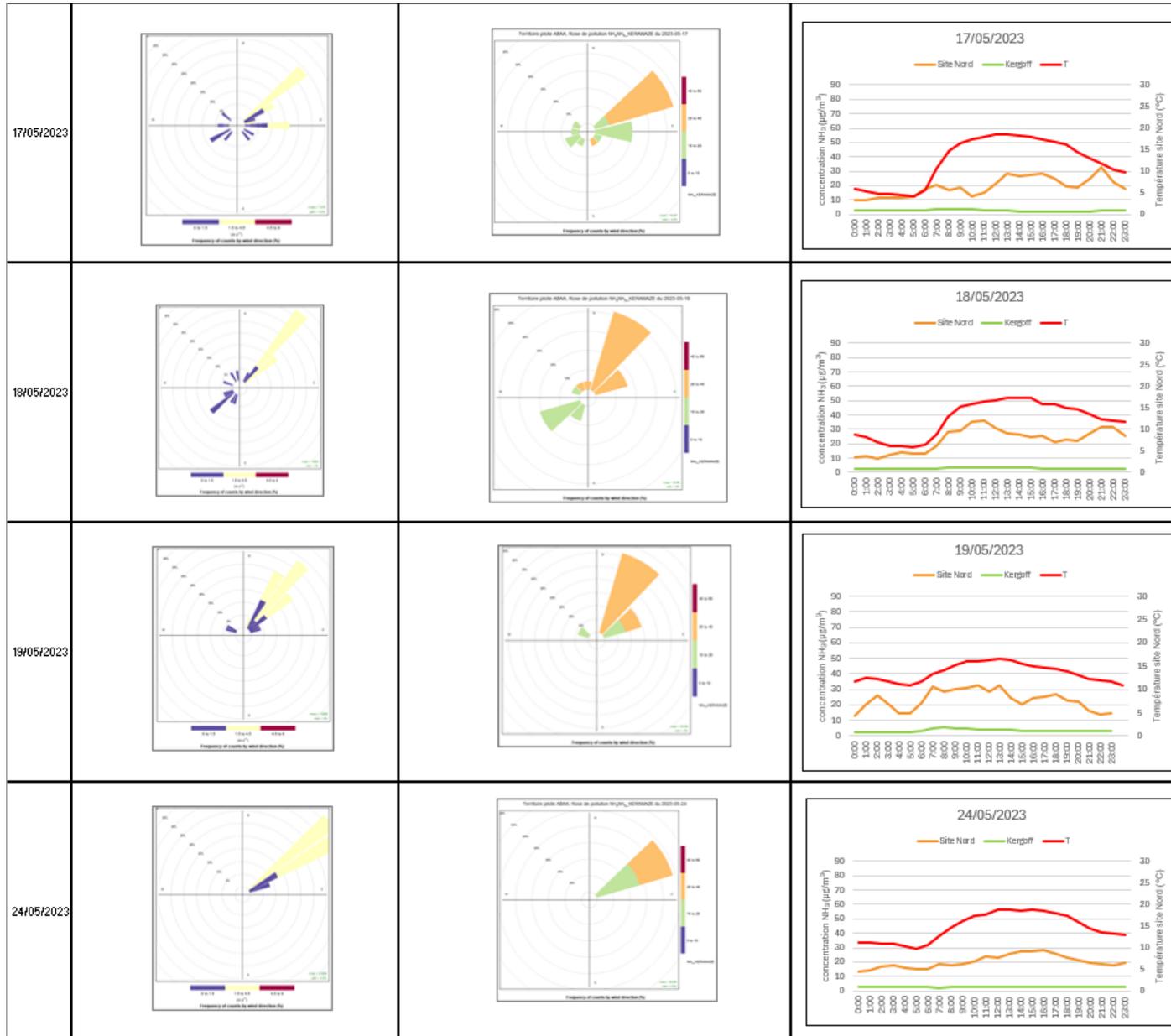


activités agricoles	
01 au 03/05	maïs

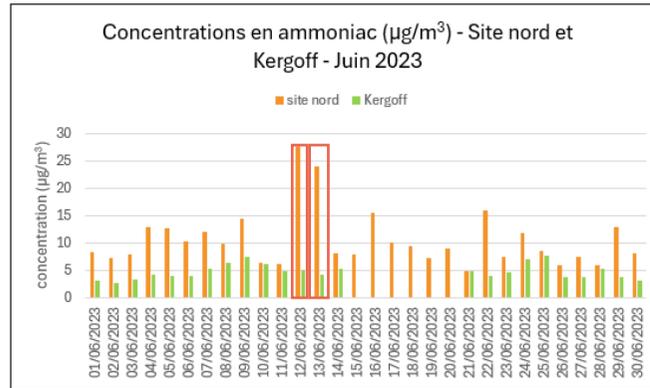
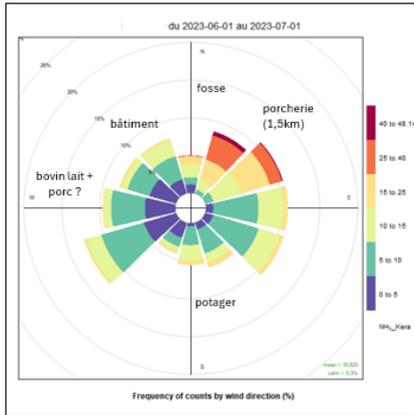
activités agricoles autour			
début mai	prairie	blé-orge	maïs
mi-mai	-	-	-
fin-mai	-	-	-



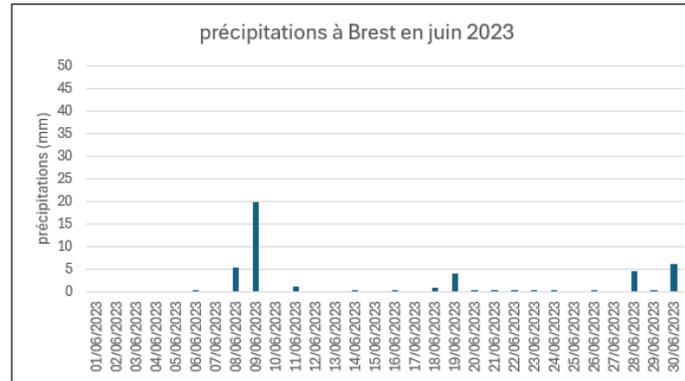
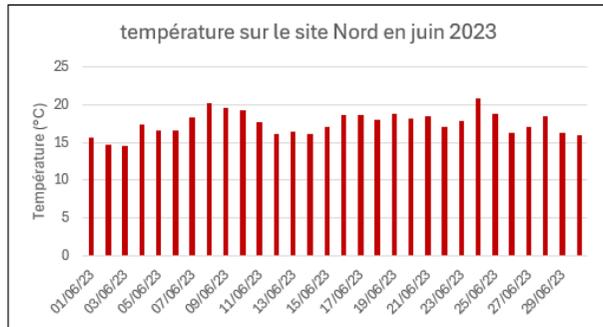
Bilan des mesures sur le territoire pilote



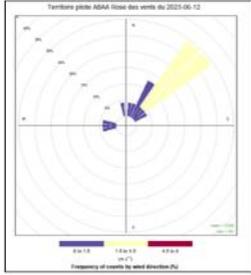
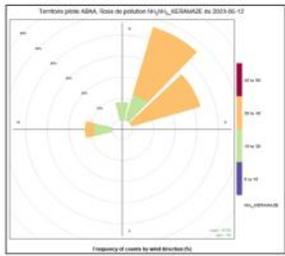
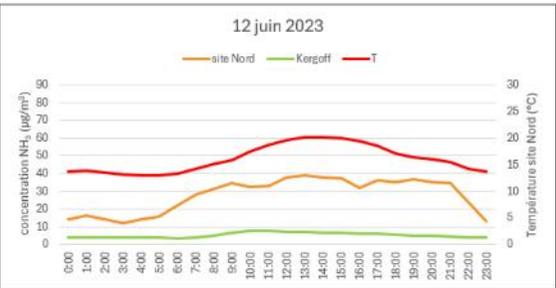
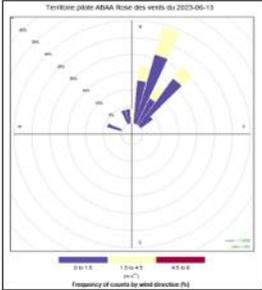
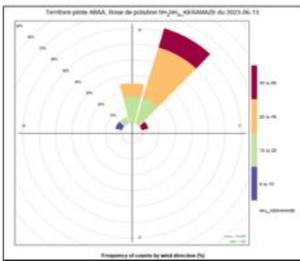
❖ **Juin 2023 :**



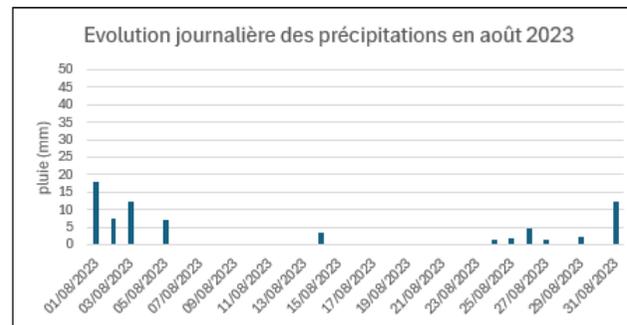
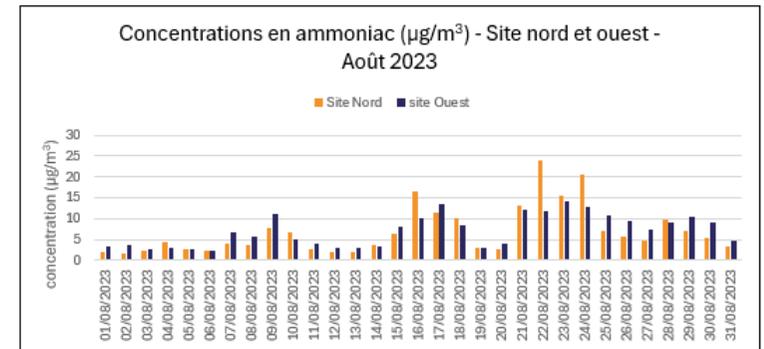
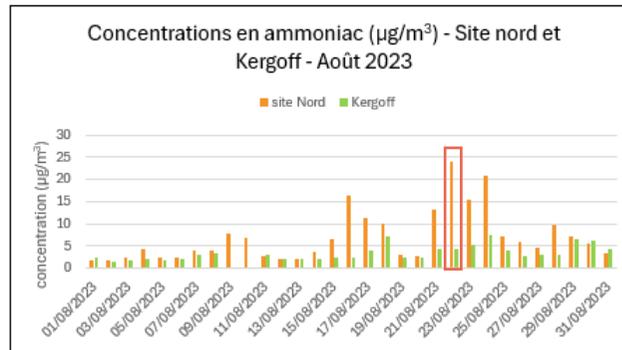
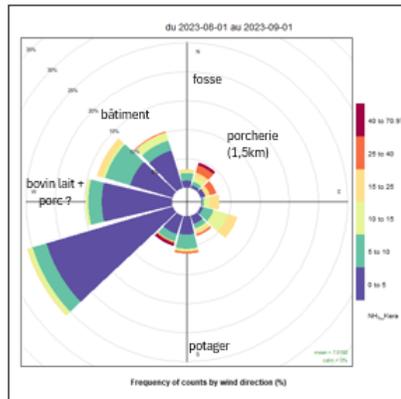
activités agricoles autour	
début juin	prairie
mi juin	prairie
fin-juin	-



Bilan des mesures sur le territoire pilote

<p>12/06/2023</p>				<p>épandage prairie</p>
<p>13/06/2023</p>				<p>épandage prairie</p>

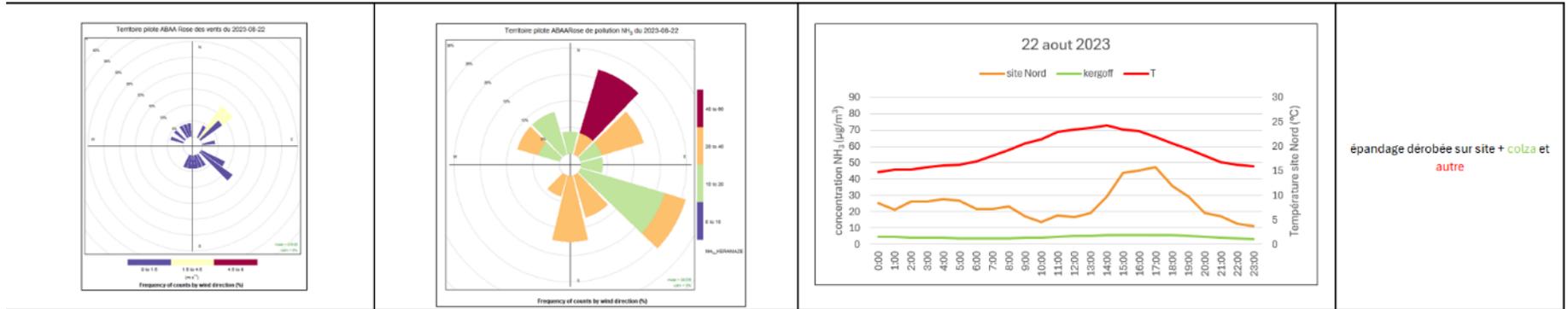
❖ **Août 2023 :**



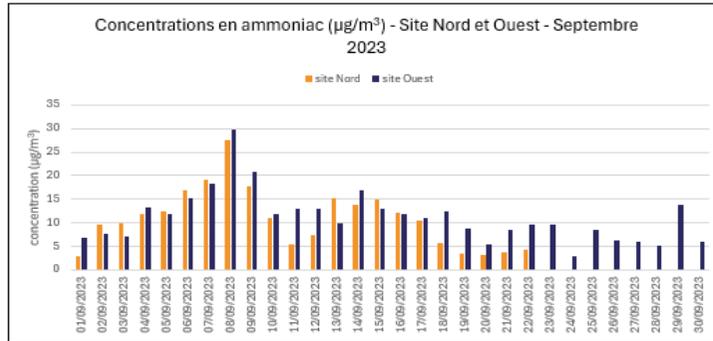
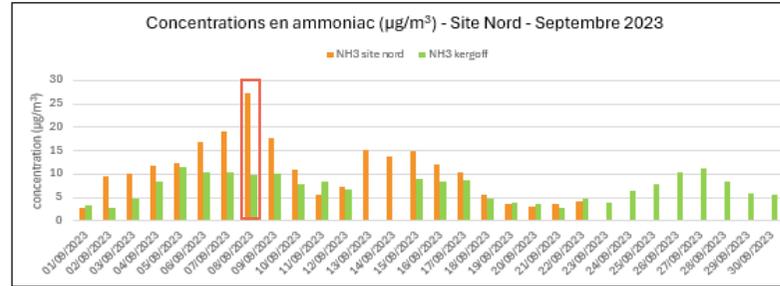
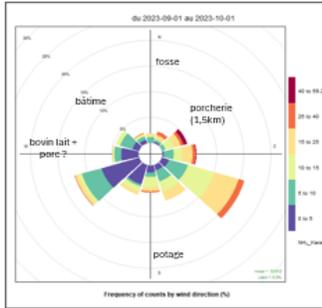
activités agricoles	
22-23/08	dérobée <i>entre céréales et maïs</i>

activités agricoles autour		
début aout	prairie	autre
mi aout		-
fin aout	colza	autre

Bilan des mesures sur le territoire pilote

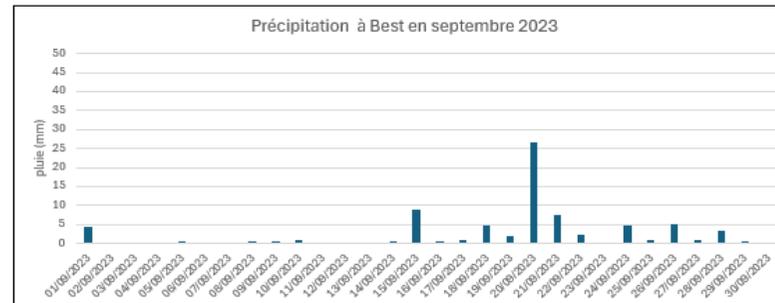
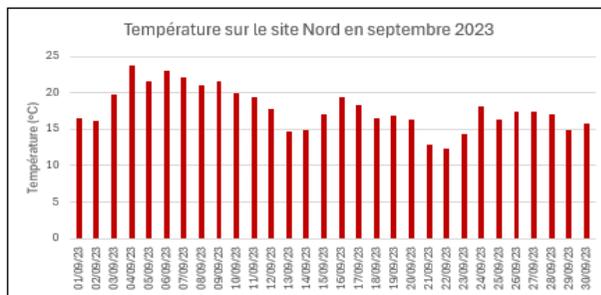


❖ **Septembre 2023 :**

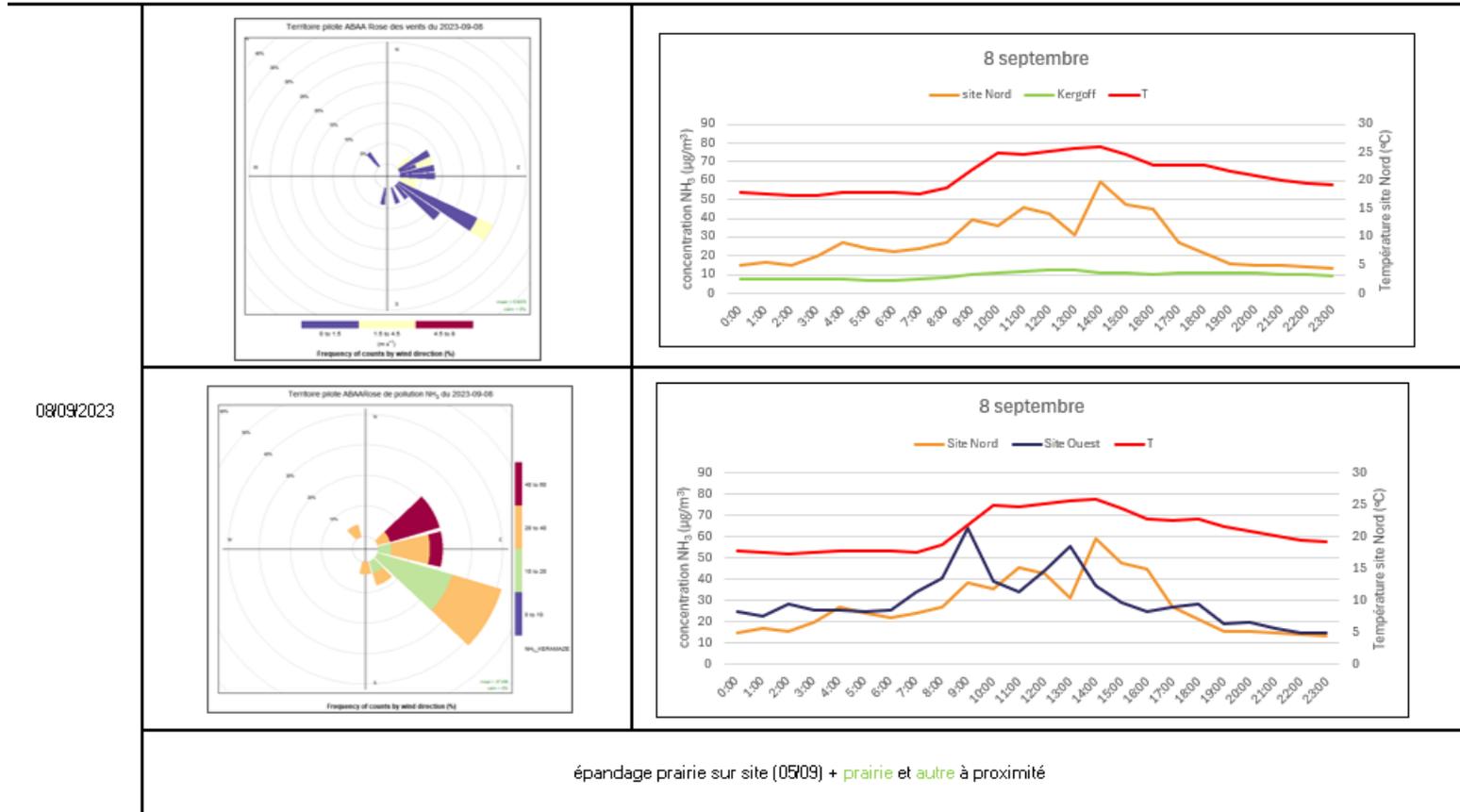


activités agricoles/autre	Colonne
05/09/2024	prairie
21-sept	ensilage et remplissage stock (potager, sud)
02 au 05/09	nuage de sable du sahara

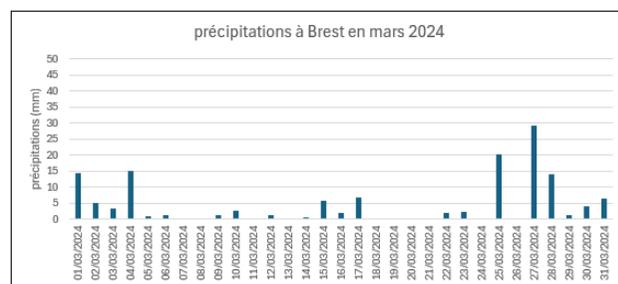
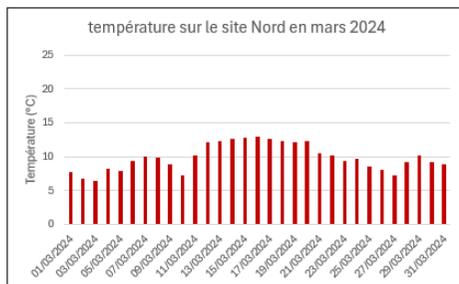
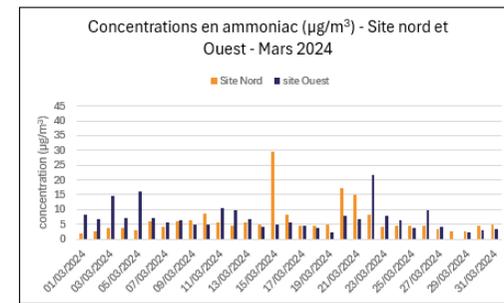
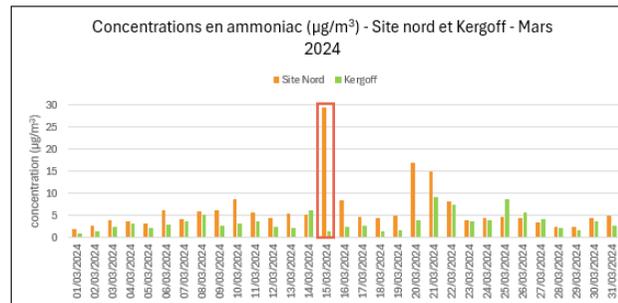
Colonne1	Colonne2	Colonne3
activités agricoles autour		
début septembre	prairie	autre
mi septembre		
fin septembre	prairie	



Bilan des mesures sur le territoire pilote



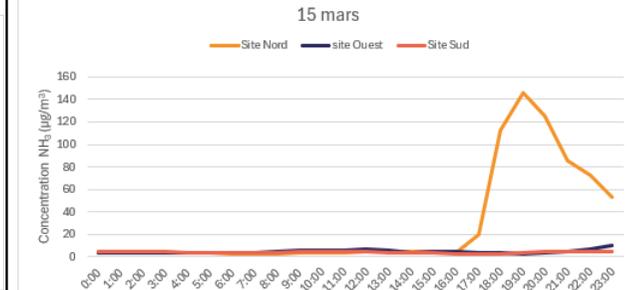
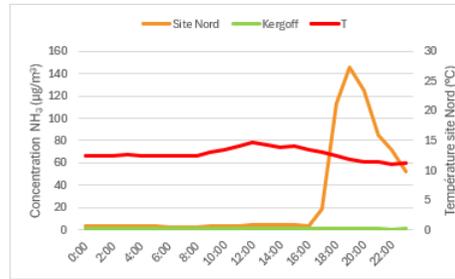
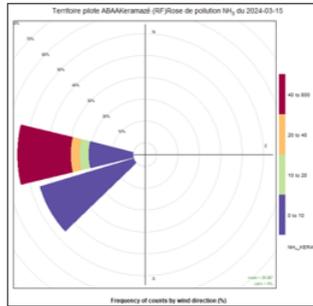
❖ Mars 2024 :



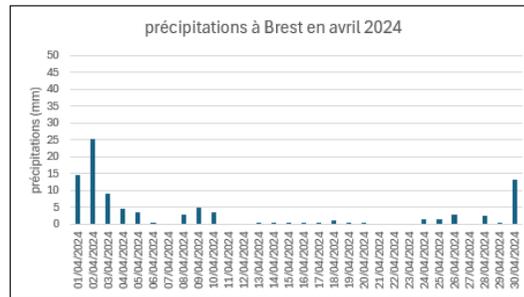
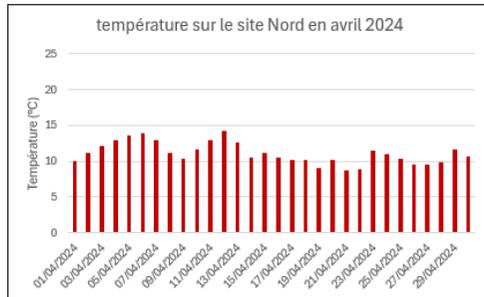
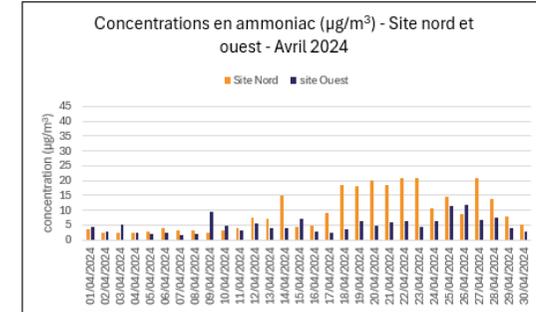
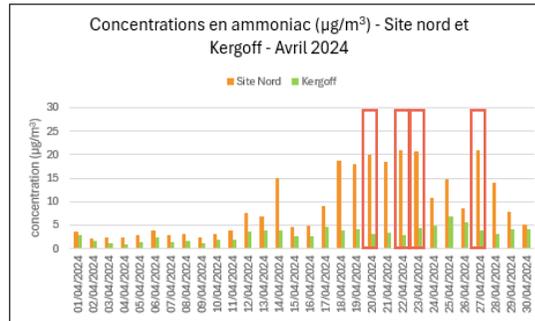
épandage possible			
à partir du 16 mars	maïs		
	colza	prairie	
	dérobée	autre	

Bilan des mesures sur le territoire pilote

15/03/2024



❖ **Avril 2024 :**



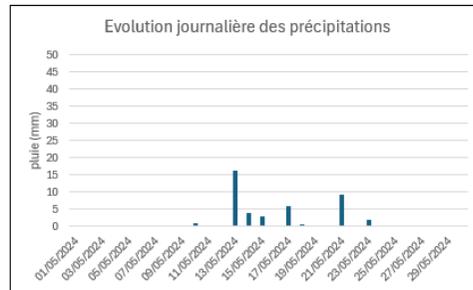
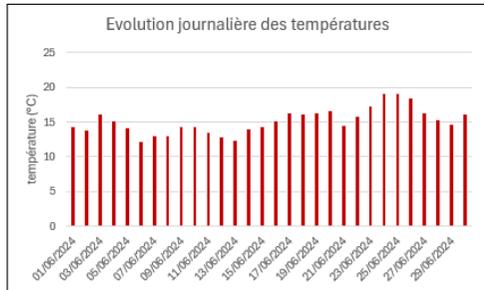
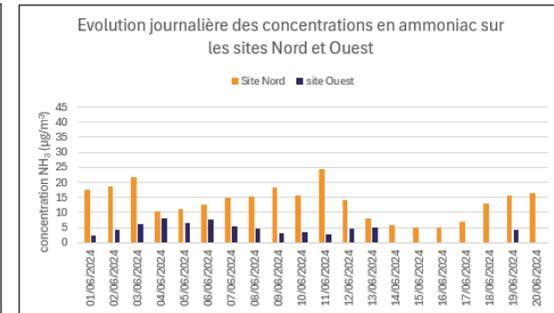
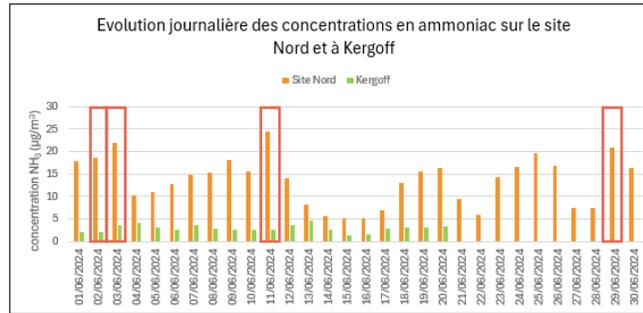
activités agricoles/autre	
20/04/2024	travaux potager

épandage possible			
colza	mais		
dérobée	autre		
prairie			

Bilan des mesures sur le territoire pilote

20/04/2024			
22/04/2024			
23/04/2024			
27/04/2024			

❖ **Jun 2024 :**



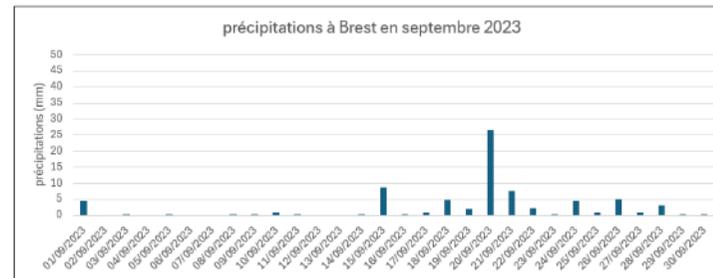
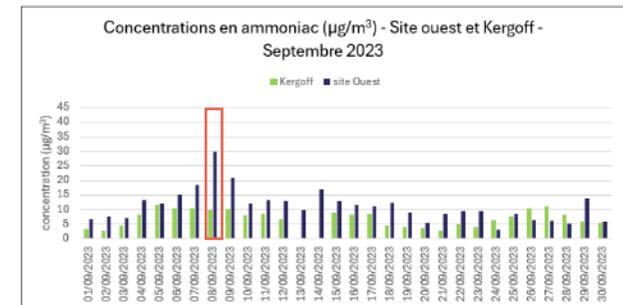
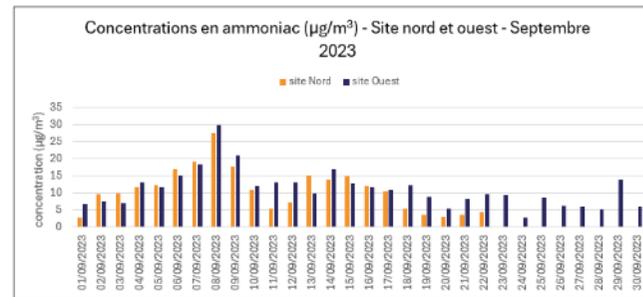
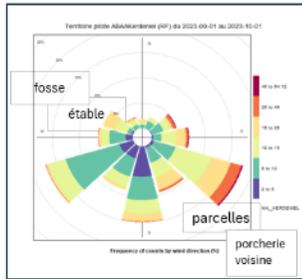
épandage possible		
colza	mais	
dérobée	autre	
prairie		

Bilan des mesures sur le territoire pilote

02/06/2024			
03/06/2024			
11/06/2024			
29/06/2024			<p style="text-align: center;">pas de données sur le site Ouest à cette date (arrêt le 20 juin)</p>

b. Site Ouest

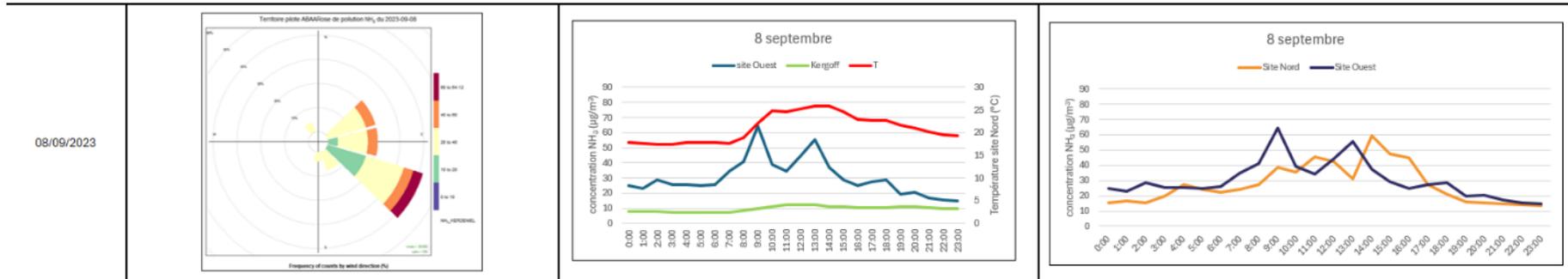
❖ Septembre 2023



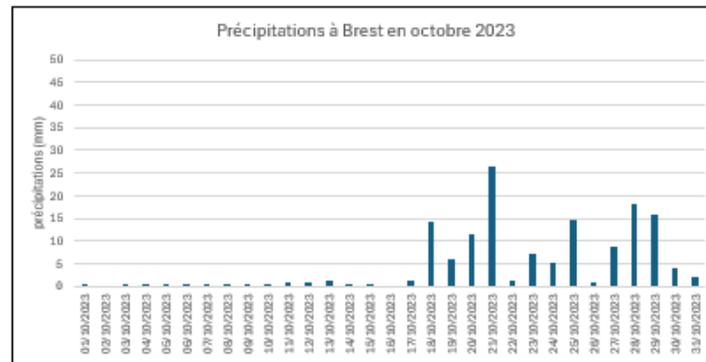
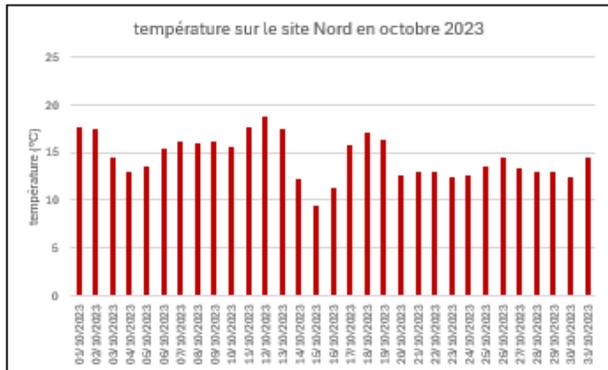
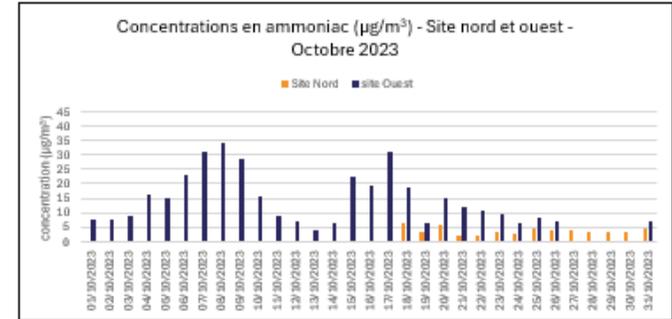
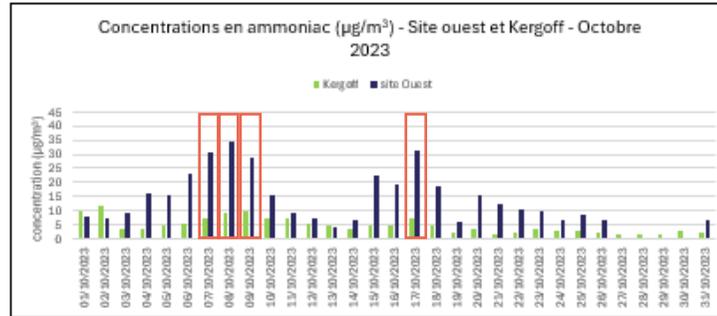
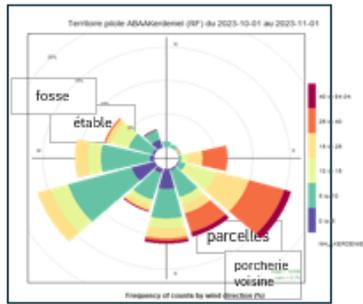
activités site	
22-sept	épandage lisier
27-sept	ensilage maïs (poussière possible)

activités agricoles autour		
début septembre	prairie	autre
mi septembre		
fin septembre	prairie	

Bilan des mesures sur le territoire pilote



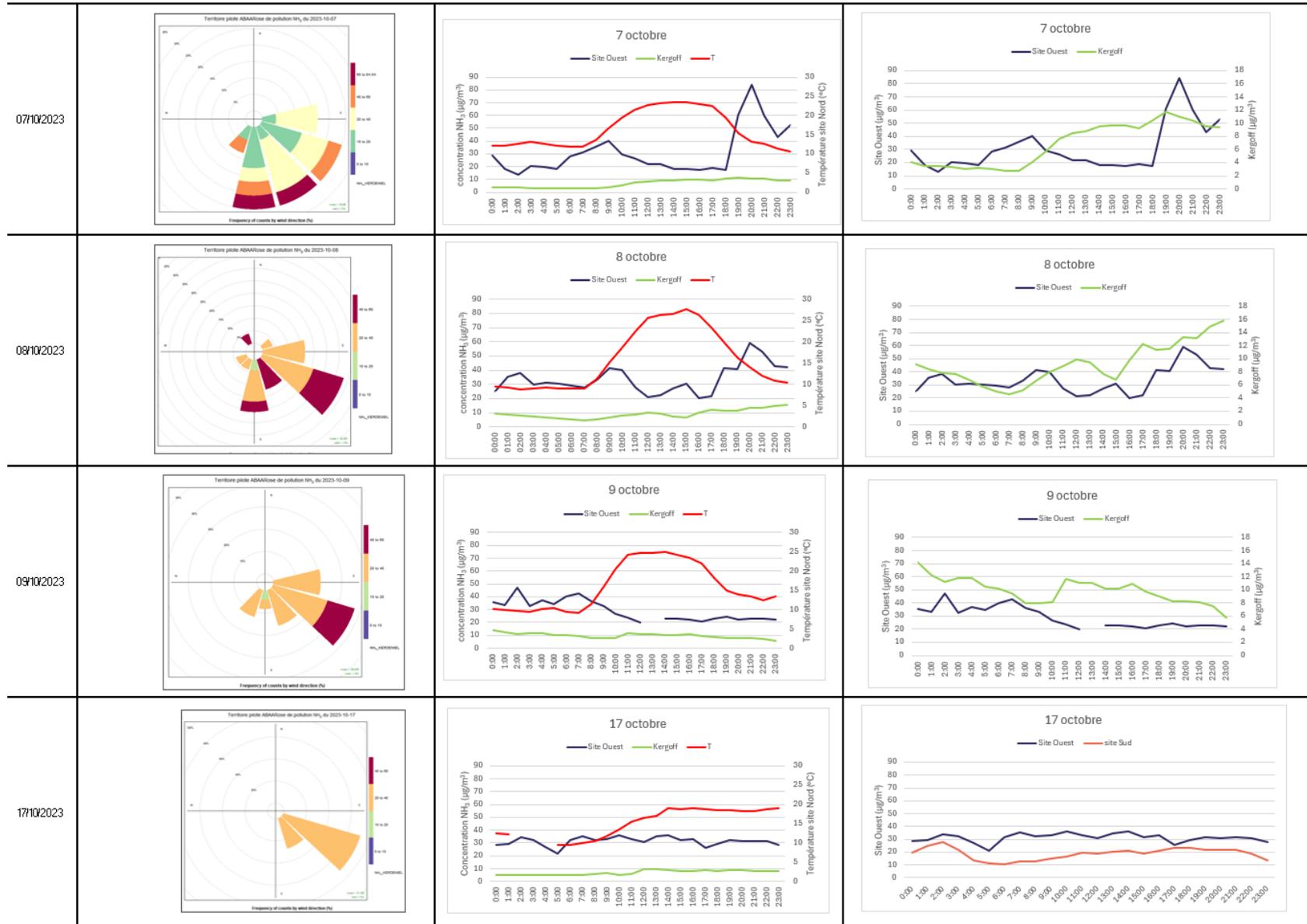
❖ **Octobre 2023 :**



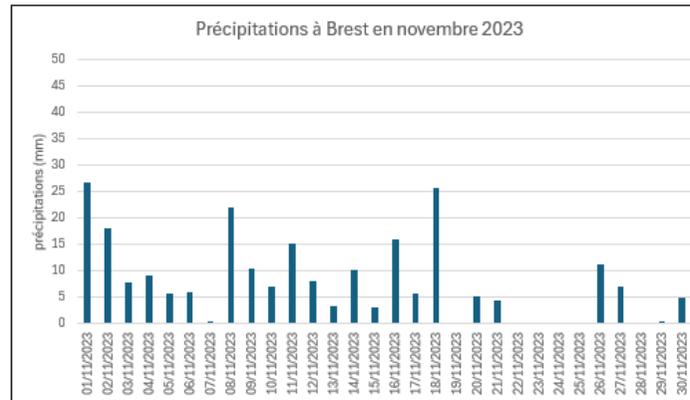
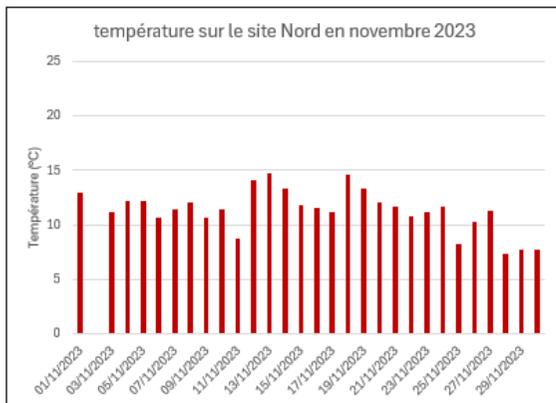
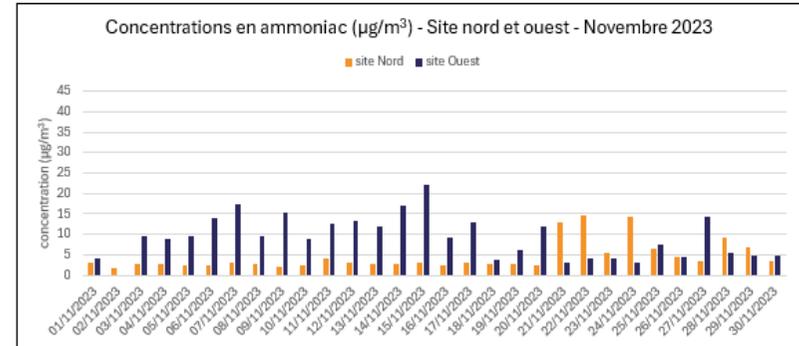
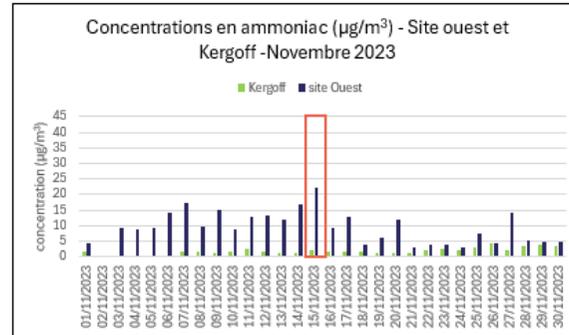
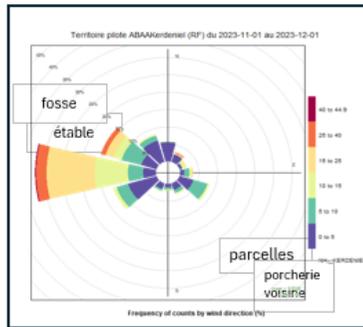
activités du 3 au 19 octobre	libre circulation des vaches
20-oct	vaches dans l'étable la nuit
04-oct	ensilage maïs (poussière possible)

épandage possible	
fin octobre	prairie
	colza
	autre

Bilan des mesures sur le territoire pilote

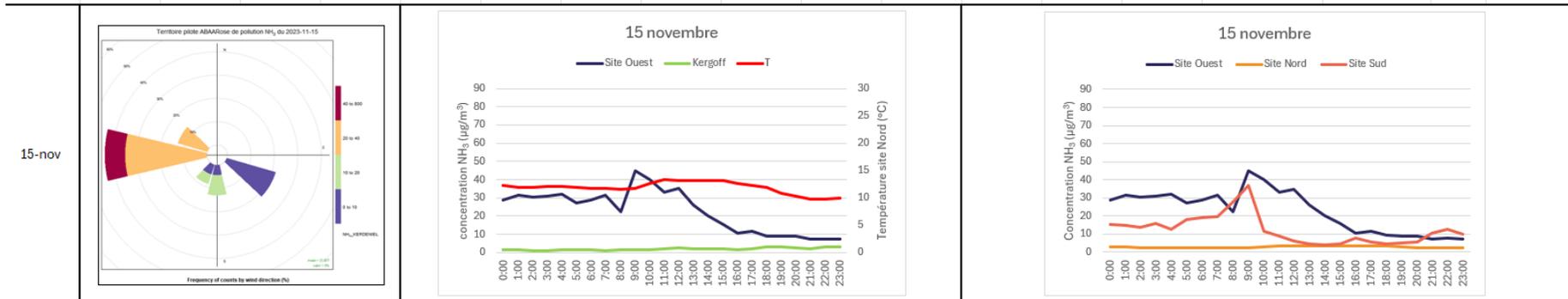


❖ **Novembre 2023 :**

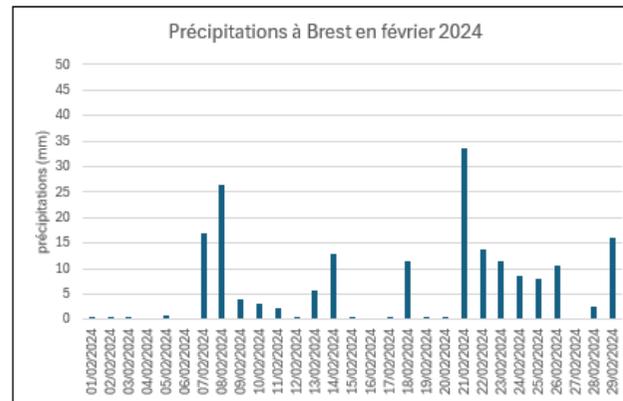
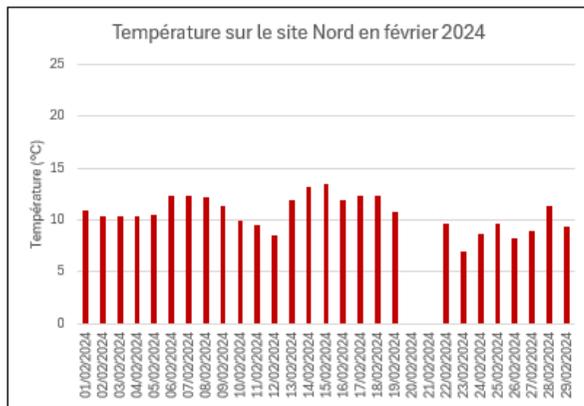
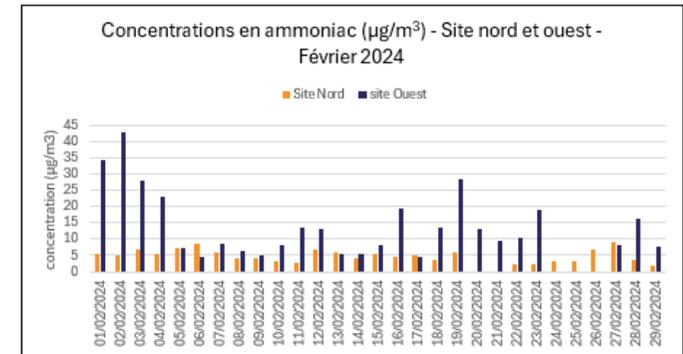
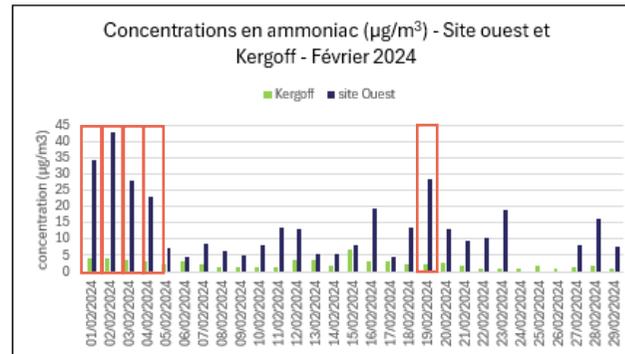
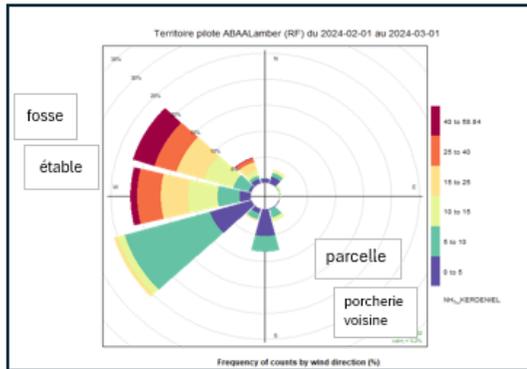


activité sur site	
20 et 27 novembre	sortie du fumier (batiment -> parcelles)

épannage possible				
début novembre	colza	dérobée	prairie	autre
tout novembre			seulement supp à 6 mois	



❖ Février 2024 :



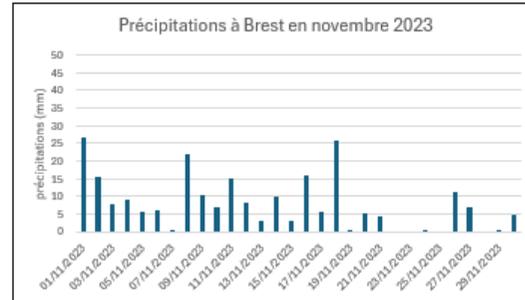
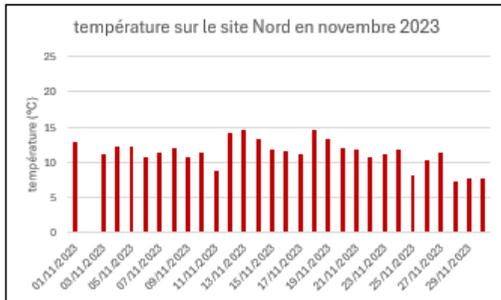
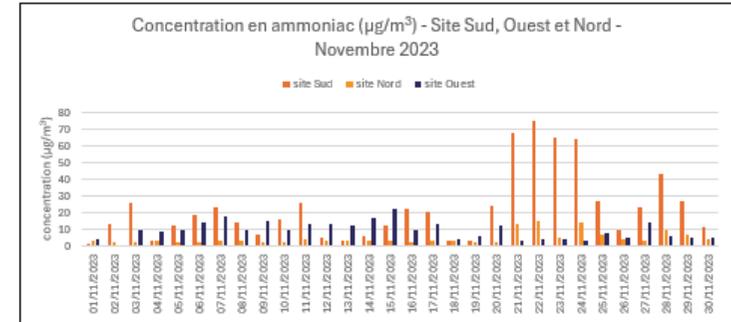
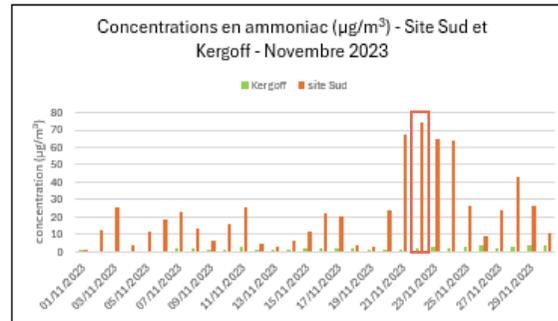
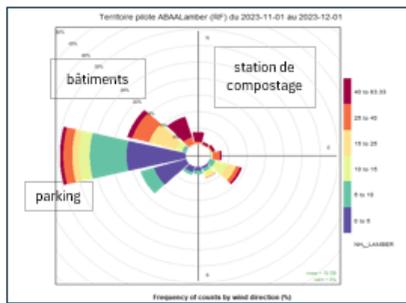
activités agricoles à proximité			
début février	prairie (1ere semaine)	Blé-orge	autre
mi février	prairie		
fin février			

Bilan des mesures sur le territoire pilote



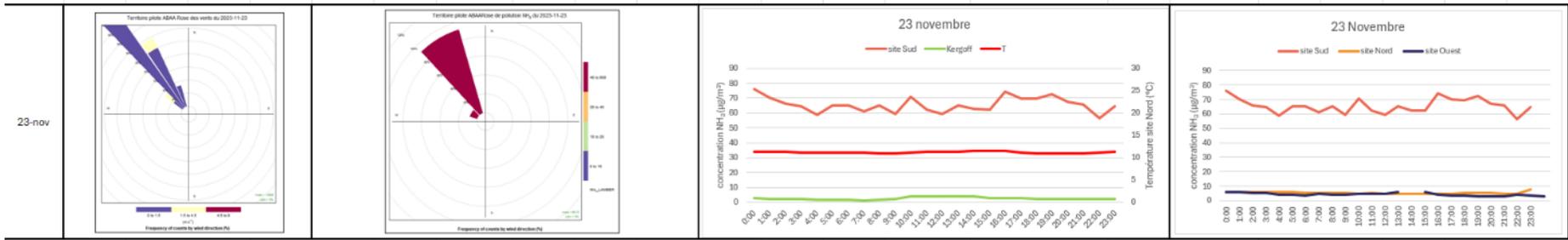
c. Site sud

❖ **Novembre 2023 :**

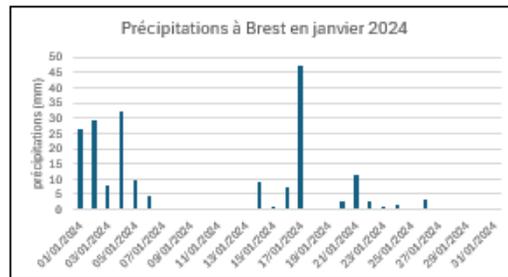
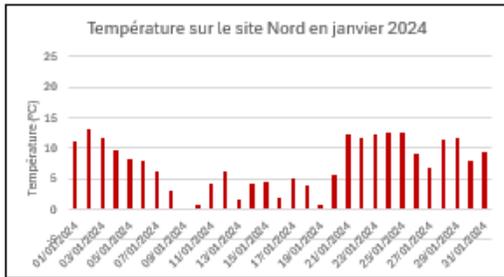
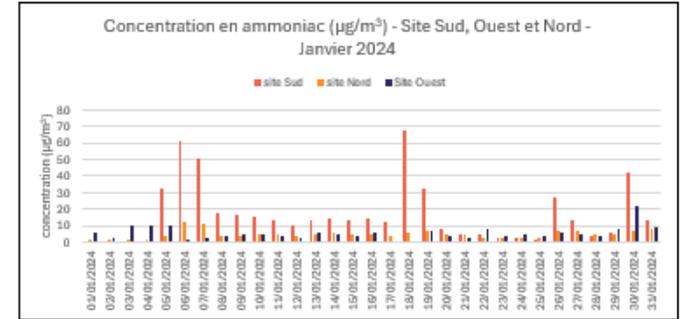
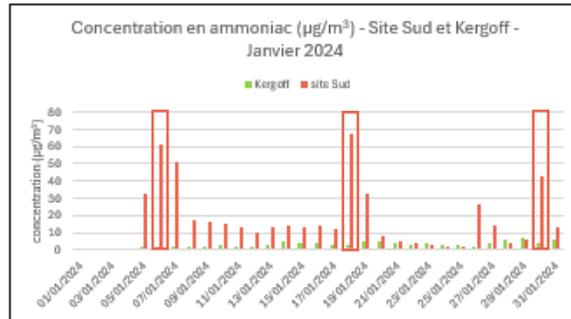
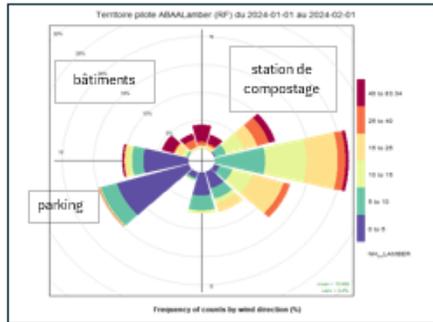


activité sur site			
01-21 novembre	ventilation plus forte		
21 au 24 novembre	vidage des poulaillers et nettoyage des batiments		
01-nov	tempête -> dégats station de compostage		
27-nov	vidage fumier		

épandage				
début novembre	colza	dérobée	prairie	autre
tout nvembre			seulement supp à 6 mois	



❖ Janvier 2024 :



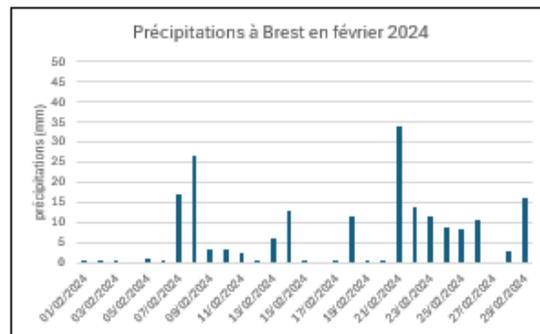
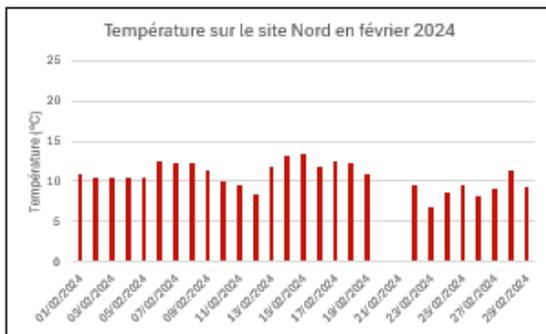
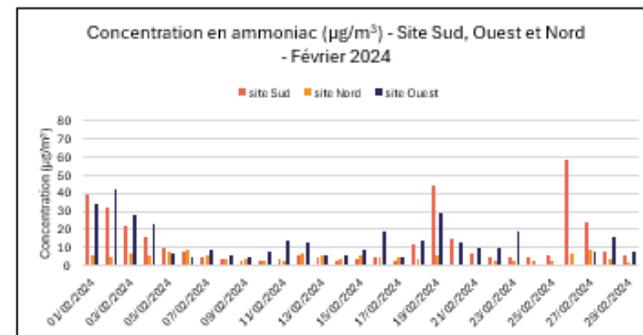
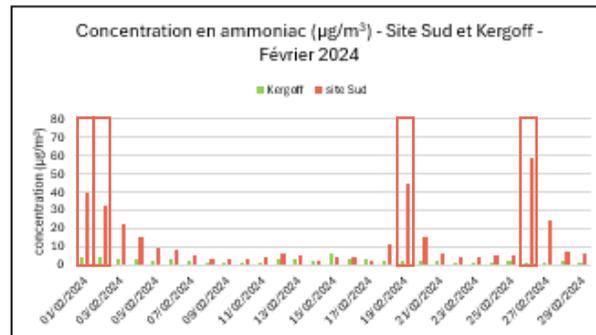
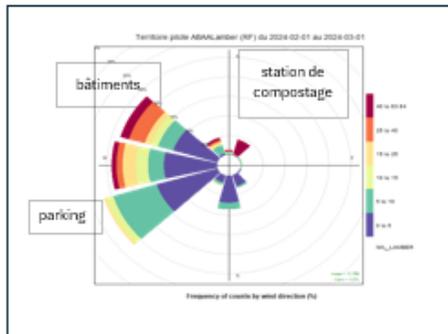
activité sur site	
fin janvier/début février	vidage des bâtiments (pic à surveiller)

épandages				
début janvier				
mi-janvier				
fin janvier	colza	dérobée	prairie	autre

Bilan des mesures sur le territoire pilote



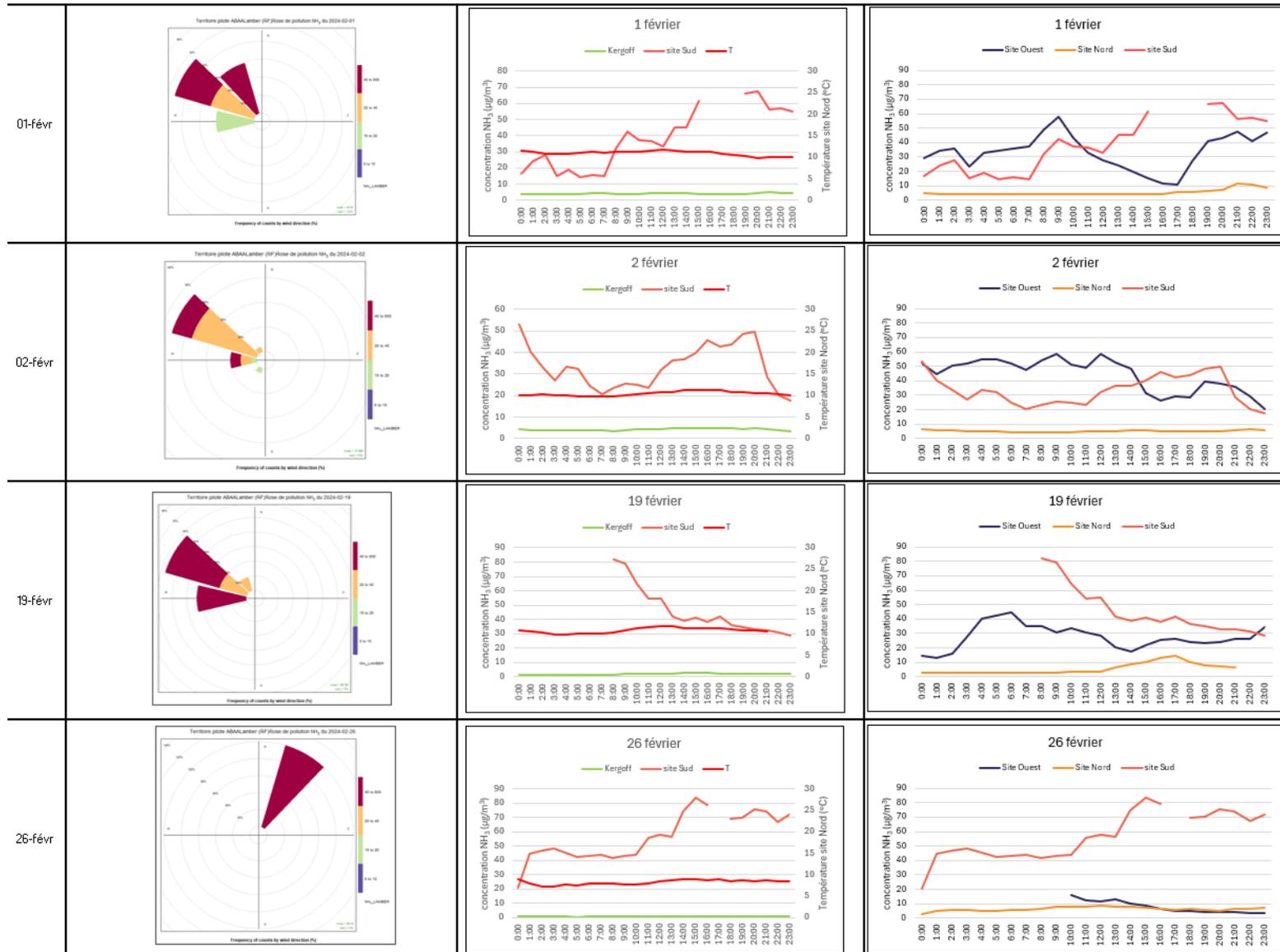
❖ **Février 2024 :**



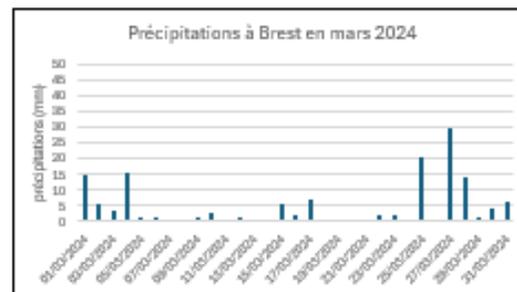
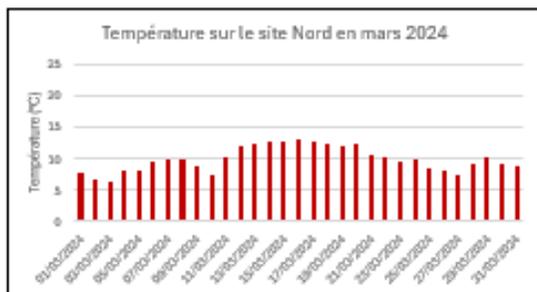
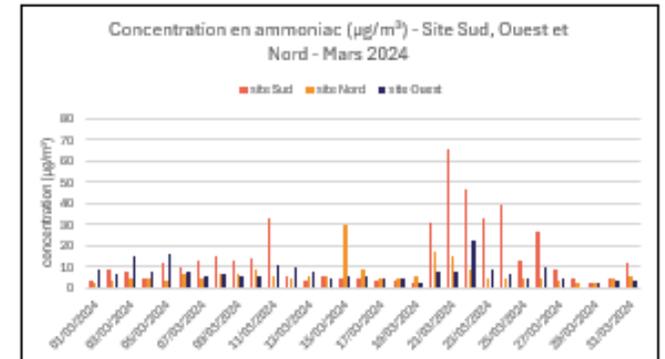
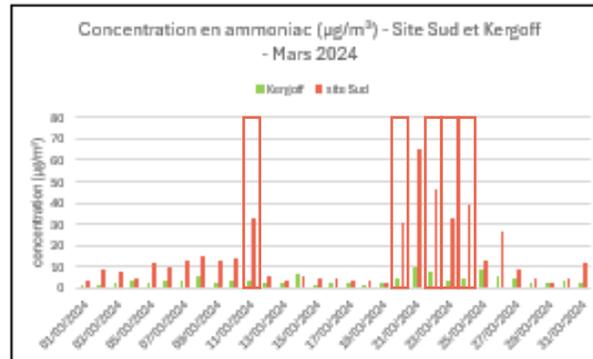
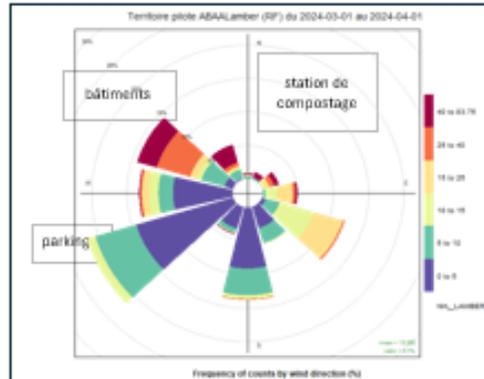
activités agricoles à proximité			
début février	prairie (1ere semaine)	Blé-orge	autre
mi février			
fin février	prairie		

activité sur site
fin janvier/début fe vidage des batiments (pic a surveiller)

Bilan des mesures sur le territoire pilote

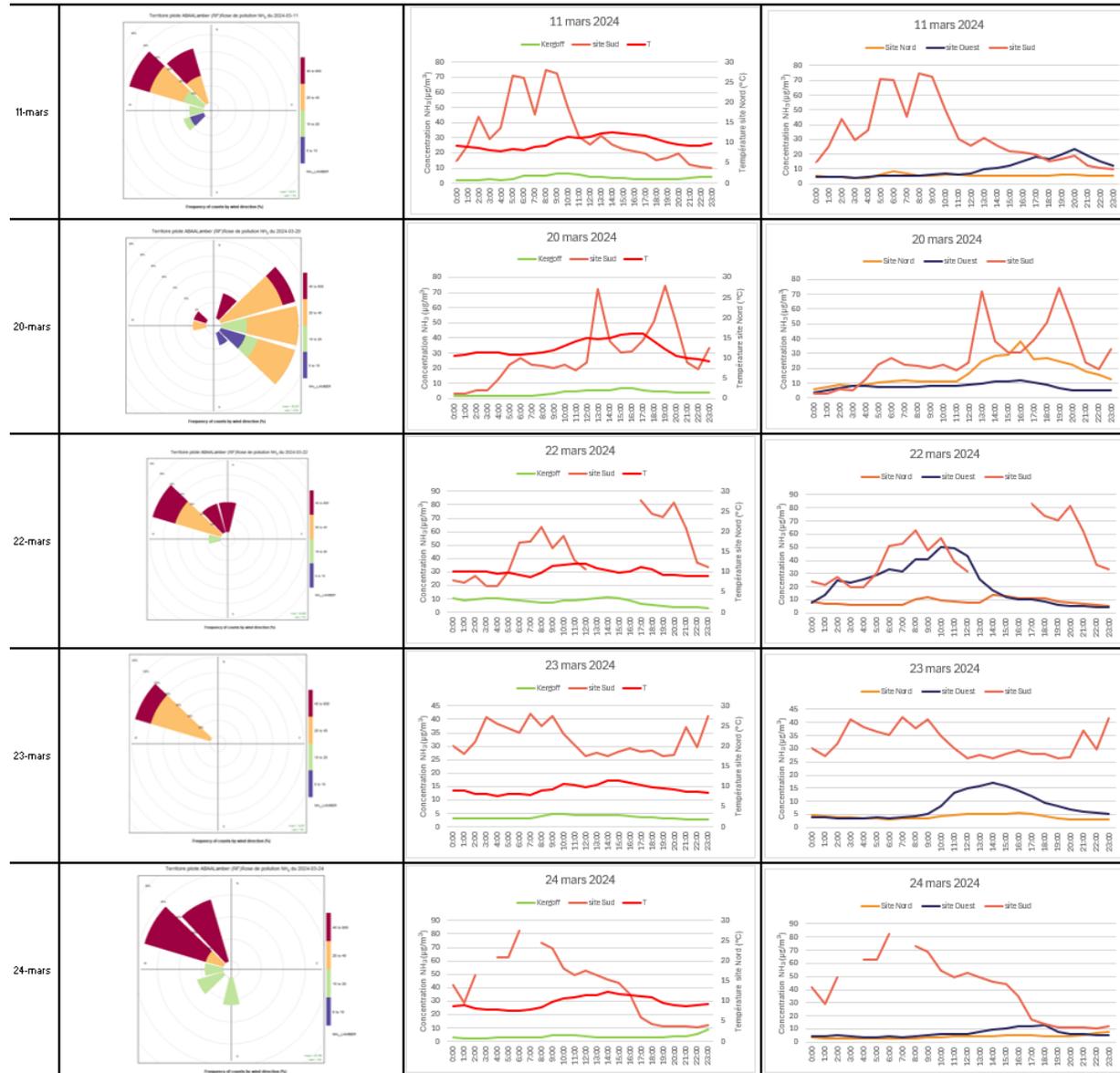


❖ Mars 2024 :

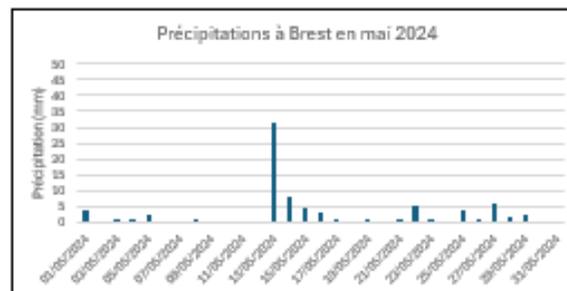
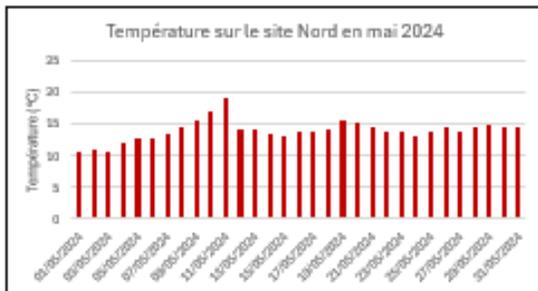
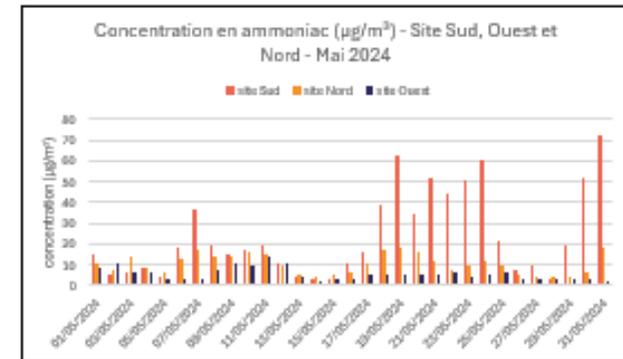
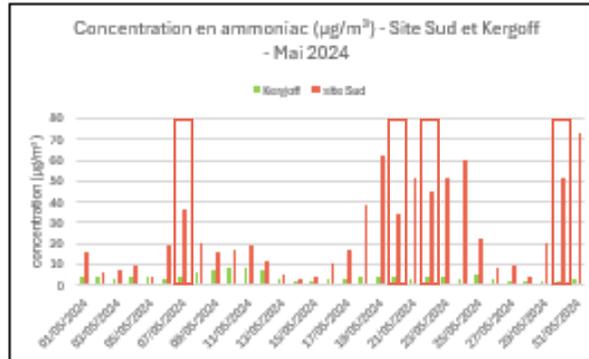
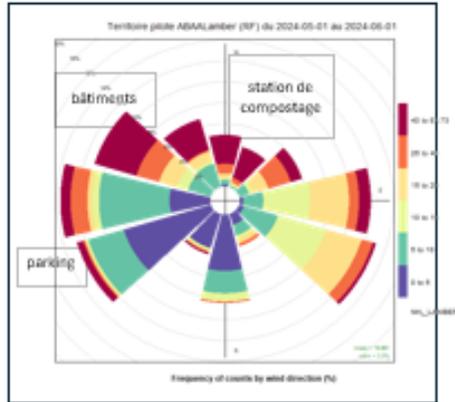


Spandagor parriblor			
à partir du 16 mars	maiz		
	calze	prairie	
	debrabco	autre	

Bilan des mesures sur le territoire pilote

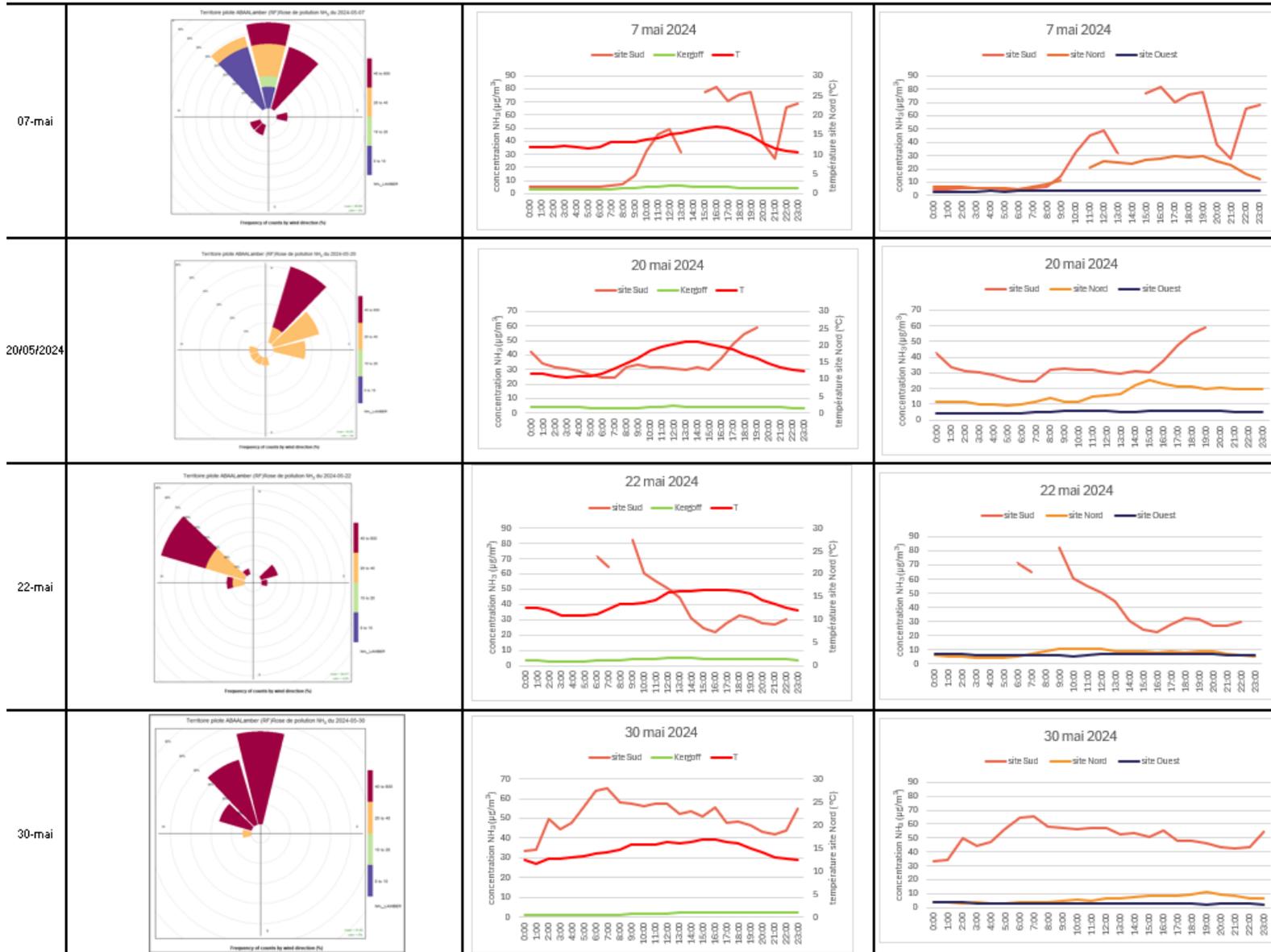


❖ **Mai 2024 :**



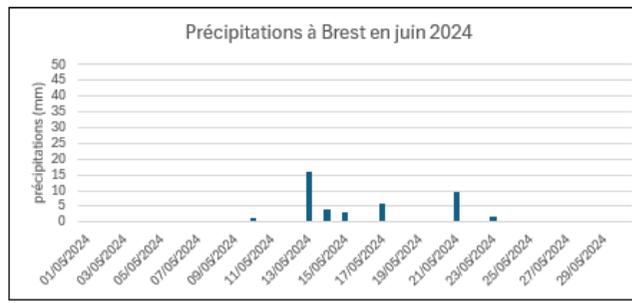
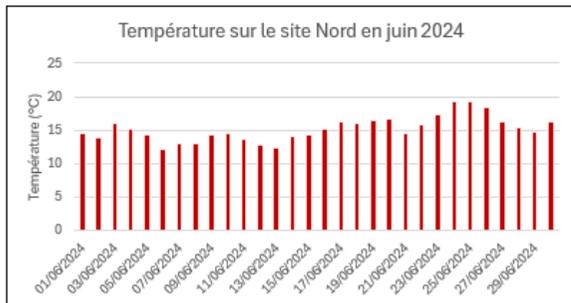
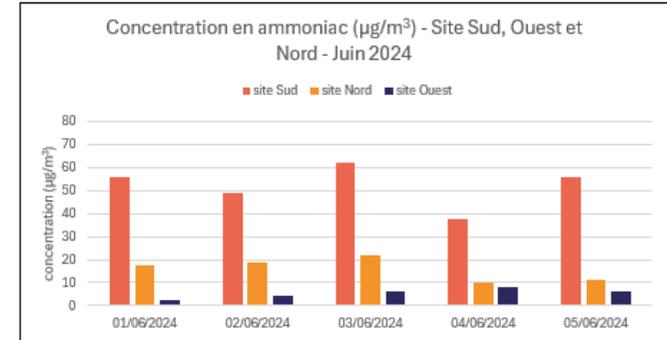
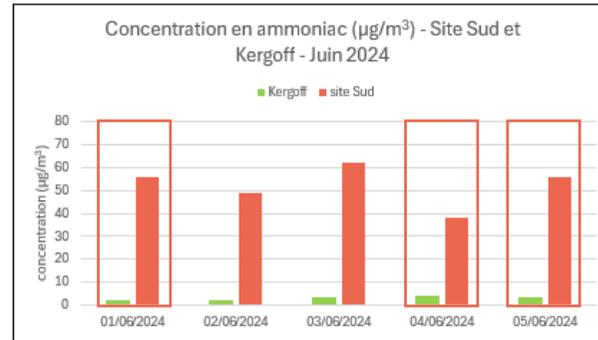
épandage possible			
calca	mdr		
prairie	autre		
dérobée			

Bilan des mesures sur le territoire pilote



❖ **Juin 2024 :**

Pas de rose de pollution d'ammoniac pour le mois de juin 2024 puisque les mesures se sont arrêtées le 6 juin, une rose de pollution mensuelle ne serait donc pas représentative.
 Toutefois, l'étude des premiers jours du mois de juin a pu être réalisée à l'échelle des concentrations journalières mesurées pour chacun de ces jours.



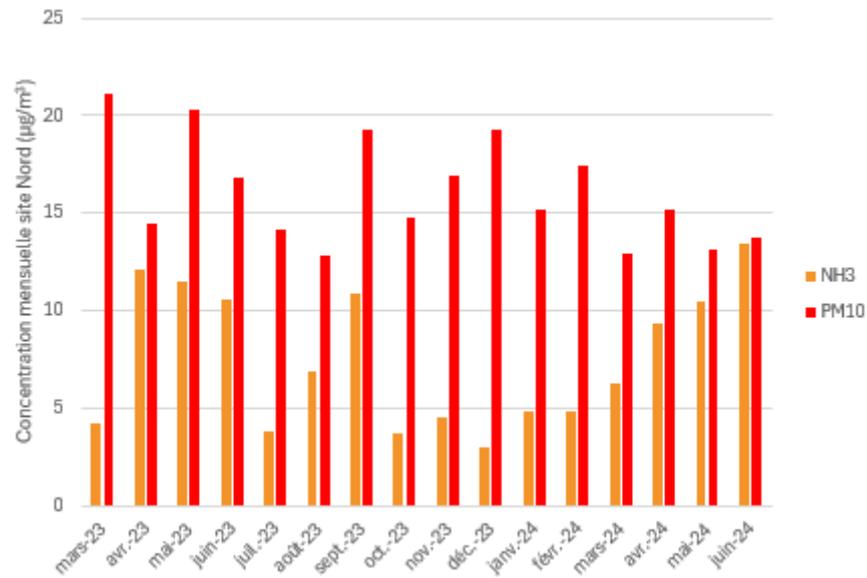
épandage possible			
colza	mais		
dérobée	autre		
prairie			

Bilan des mesures sur le territoire pilote



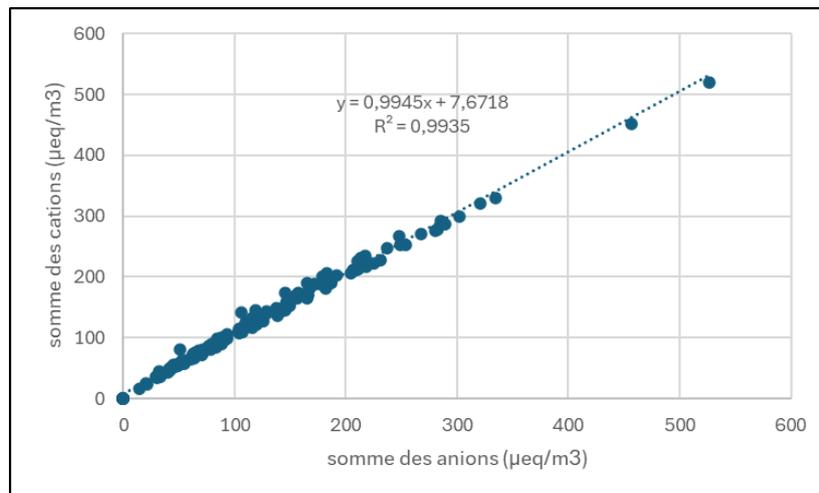
Annexe 4 : lien entre ammoniac et PM10

La figure ci-dessous présente les concentrations mensuelles en PM10 et en ammoniac obtenues au niveau du site Nord. Les concentrations mensuelles en PM10 varient de 13 (août 2023) à 21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (mars 2023) et celles d'ammoniac sont comprises entre 3 (décembre 2023) et 13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (juin 2024).

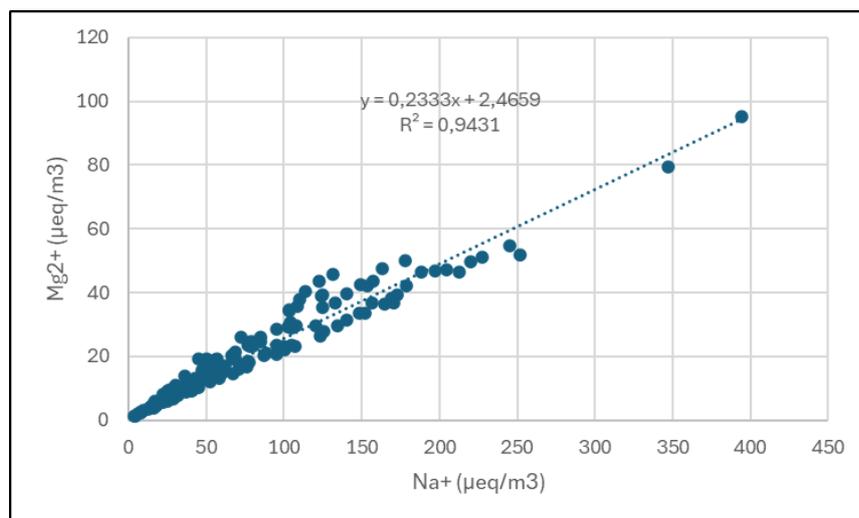


Annexe 5 : Procédure de validation des données d'analyse chimique des particules atmosphériques du LSCQA

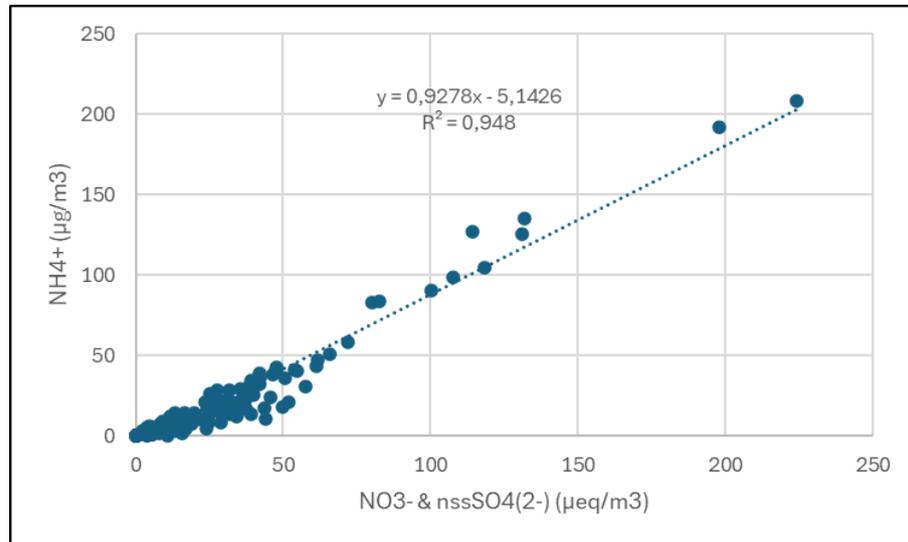
- Balance ionique** : elle correspond à la représentation de la somme des cations (Na^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} , K^+ et Mg^{2+}) en fonction de la somme des anions (SO_4^{2-} , NO_3^- et Cl^-) en $\mu\text{eq}/\text{m}^3$. Cette analyse permet de valider la qualité de l'analyse. La corrélation entre ces deux mesures doit être bonne avec une pente proche de 1.



- Corrélation Na^+ et Mg^{2+}** : la corrélation entre ces deux espèces doit être bonne avec un rapport de concentration, proche de celui de l'eau de mer (~ 0.23).



- **Neutralisation de l'ammonium** : dans l'atmosphère, l'ammonium est majoritairement associé au sulfate et au nitrate. Une bonne corrélation entre ces espèces (R^2 proche de 1) et une pente proche de 1 sont donc attendues.



- **Bouclage chimique** : les concentrations des PM10 reconstituées avec la méthode du bilan des masses doit être assez proche des concentrations mesurées. Cette méthode a déjà été utilisée par Air Breizh (Port de Brest, Campagne de mesure de la qualité de l'air dans le port et ses environs, 2024).

$$\text{PM10 reconstituées} = \text{EC} + \text{OM} + \text{nss SO}_4^{2-} + \text{poussières minérales} + \text{sels de mer}$$

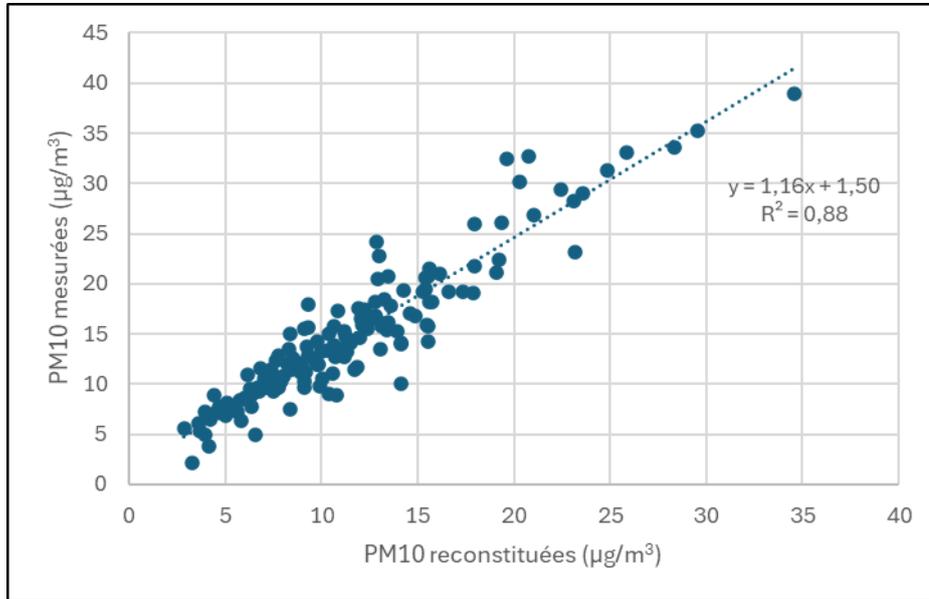
Où « **PM10 reconstituées** » est l'estimation de la concentration massique totale par bouclage chimique et les autres termes représentent les concentrations massiques des différents constituants :

$$\text{OM} = 1.75 \times \text{OC}$$

$$\text{nss SO}_4^{2-} = \text{SO}_4^{2-} - (0.251 \times \text{Na}^+)$$

$$\text{sels de mer} = 3 \times \text{Na}^+$$

$$\text{poussières minérales} = (\text{Ca}^{2+} - 0.039 \times \text{Na}^+) \times 8$$



Annexe 6 : principe de la méthode PMF

Le modèle PMF (Positive Matrix Factorization) est une méthode d'analyse factorielle multivariée qui permet de quantifier la contribution des principales sources. Cet outil statistique est largement utilisé pour l'analyse de jeux de données PM à l'échelle mondiale. La méthode est basée sur l'équation (1) :

$$X = G \times F + E$$

Les données d'entrée X sont une matrice de dimension $m \times n$, consistant en n espèces chimiques analysées dans m échantillons. Le nombre de facteurs p est défini par l'utilisateur. Dans notre étude, il correspond au nombre de sources qui a été identifié. G est la quantité de masse qui contribue à chaque source (dimension $m \times p$) et F est la matrice des profils pour chaque source (dimension $p \times n$). La matrice E (dimension $m \times n$) est le résidu du modèle (la partie non expliquée de X).

L'objectif de la solution PMF est de minimiser la fonction « Q » définie comme :

$$Q = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(\frac{e^{ij}}{\sigma_{ij}} \right)^2$$

Financeurs du projet

Le projet ABAA est lauréat du programme LIFE de l'Union Européenne et a le soutien financier de la région Bretagne ainsi que du Plan Régional Santé Environnement piloté par le préfet de région, l'Agence Régionale de Santé et le conseil régional.



Le PRDA de Bretagne apporte son soutien à la Chambre régionale d'Agriculture et le Réseau Mixte Technologique Bouclage a labellisé le projet ABAA.



Pour plus d'informations sur le rapport ou le projet :

Lifeabaa2021@airbreizh.asso.fr

<https://lifeabaa2021.eu>

