

RAPPORT D'ETUDE

N°01/2023/SZH/V0

Identification des sources des particules sur la zone littorale des Hauts de France et de la Normandie

Campagnes de terrain menées en 2021



Auteurs : Shouwen ZHANG (Atmo Hauts-de-France),
Abdoulaye SAMAKE (Atmo Normandie)

Partenaires : Laurent ALLEMAN & Olivier FAVEZ (LCSQA),
Thuy Vy DINH NGOC & Jean-Luc JAFFREZO (IGE)

Diffusion : Février 2024



Institut des Géosciences de
l'Environnement



Avant-propos

Atmo Hauts-de-France et Atmo Normandie sont des associations de type « loi 1901 » agréées par le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire au même titre que l'ensemble des structures chargées de la surveillance de la qualité de l'air en France, formant le réseau national ATMO. Leurs missions s'exercent dans le cadre de la loi sur l'air du 30 décembre 1996. Les deux associations sont agréées du 1^{er} janvier 2023 au 31 décembre 2025, au titre de l'article L.221-3 du Code de l'environnement

Conditions de diffusion

Atmo Hauts-de-France et Atmo Normandie diffusent des informations sur les problématiques liées à la qualité de l'air dans le respect du cadre légal et réglementaire en vigueur. La diffusion des informations vers le grand public est gratuite. A ce titre, les rapports d'études sont librement disponibles sur les sites www.atmo-hdf.fr et www.atmonormandie.fr.

Propriété intellectuelle

Lorsque des informations sous quelque forme que ce soit (éléments rédactionnels, graphiques, cartes, illustrations, photographies...) sont susceptibles de relever du droit d'auteur elles demeurent la propriété intellectuelle exclusive des associations Atmo Hauts-de-France et Atmo Normandie. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle de ces informations faites sans l'autorisation écrite d'Atmo Hauts-de-France et d'Atmo Normandie est illicite et constituerait un acte de contrefaçon sanctionné par les articles L.335-2 et suivants du Code de la Propriété Intellectuelle.

Responsabilités

Pour le cas où le présent document aurait été établi pour partie sur la base de données et d'informations fournies à Atmo Hauts-de-France et Atmo Normandie par des tiers, l'utilisation de ces données et informations ne saurait valoir validation par Atmo Hauts-de-France et Atmo Normandie de leur exactitude. La responsabilité d'Atmo Hauts-de-France et Atmo Normandie ne pourra donc être engagée si les données et informations qui leur ont été communiquées sont incomplètes ou erronées, quelles qu'en soient les répercussions. Atmo Normandie ne peut en aucune façon être tenue responsable des interprétations, travaux intellectuels et publications diverses de toutes natures, quels qu'en soient les supports, résultant directement ou indirectement de ses travaux et publications.

Avertissement

Toute utilisation partielle ou totale de ce document (extrait de texte, graphiques, tableaux, ...) doit faire référence à l'observatoire dans les termes suivants : © **Atmo Hauts-de-France/Atmo Normandie – Rapport N°01/2023/SZH/V0**
En cas de remarques sur les informations ou leurs conditions d'utilisation, prenez contact avec Atmo Hauts-de-France ou Atmo Normandie :

- depuis le formulaire de contact disponible à l'adresse <http://www.atmo-hdf.fr/contact.html>
- par mail : contact@atmo-hdf.fr, contact@atmonormandie.fr
- par téléphone : Atmo Hauts-de-France : 03 59 08 37 30, Atmo Normandie : 02 35 07 94 30

	Nom	Qualité	Visa
Approbation	Arabelle PATRON-ANQUEZ	Responsable du Service Etudes (Atmo Hauts-de-France)	
	Sébastien LE MEUR	Coordinateur du programme CARA normand (Atmo Normandie)	

Sommaire

1. Synthèse de l'étude.....	6
2. Définitions.....	8
2.1. Les particules en suspension	8
2.2. Les sources.....	8
2.3. La composition.....	9
3. Contexte, enjeux et objectifs de l'étude	10
4. Matériels et méthodes.....	12
4.1. Sites et période de mesure retenus	12
4.2. Prélèvement et analyse des particules PM10	14
4.3. La PMF, un outil statistique pour remonter aux sources de particules	14
4.4. PMF : approche mono-site vs multi-sites	15
5. Résultats de l'étude	17
5.1. Solution PMF retenue.....	17
5.2. Variation temporelle	20
5.3. Zoom sur les épisodes de pollution.....	23
5.4. Influence des masses d'air et origines géographiques de 4 sources	29
6. Conclusion et perspectives.....	36

Annexes

Annexe 1 : Glossaire.....	38
Annexe 2 : Description de la méthode PMF.....	40
Annexe 3 : Comparaison des résultats obtenus par les approches PMF mono-site et multi-site multisites	44
Annexe 4 : Vitesses et directions du vent sur 4 stations météorologiques en mai 2021	50
Annexe 5 : Moyennes journalières en PM10 pour les 4 sites sur la période étudiée	51
Annexe 6 : Repères réglementaires.....	52

Illustrations

Figure 1 : Principaux polluants atmosphériques (source : Atmo Hauts-de-France)	9
Figure 2 : Stations de mesures (fond) en zone côtière (Normandie et Hauts-de-France).....	10
Figure 3 : Les régions Normandie et Hauts-de-France et leurs départements en bleu clair et foncé, respectivement, les stations de mesures (en bleu) sélectionnées pour l'étude et les établissements publics de coopération intercommunale (EPCI, en orange) où se trouvent ces stations	13
Figure 4 : Stations de mesures sélectionnées pour l'étude	13
Figure 5 : Contribution moyenne des principaux sources identifiées par PMF pour les 4 sites étudiés.	19
Figure 6 : Variation mensuelle des concentrations moyennes ($\mu\text{g.m}^{-3}$) des principaux facteurs constitutifs des PM_{10}	21
Figure 7 : Variation mensuelle des contributions relatives moyennes des principaux facteurs constitutifs des PM_{10}	22
Figure 8 : Contribution moyenne des principaux sources identifiées par PMF pour les 4 sites étudiés. Les données prises en compte sont celles du 2 au 3 mars 2021.	24
Figure 9 : Contribution moyenne des principaux sources identifiées par PMF pour les 4 sites étudiés. Les données prises en compte sont celles du 31 mars au 1 ^{er} avril 2021.....	26
Figure 10 : Contribution moyenne des principaux sources identifiées par PMF pour les 4 sites étudiés. Les données prises en compte sont celles du 21 avril 2021.	28
Figure 11 : Profil et série temporelle du nitrate-rich pour 4 sites étudiés	Erreur ! Signet non défini.
Figure 12 : Roses de pollution du nitrate-rich pour 4 sites étudiés	Erreur ! Signet non défini.
Figure 13 : rétrotrajectoires du nitrate-rich pour les 4 sites étudiés.....	32
Figure 14 : Profil et série temporelle des sels marins frais pour 4 sites étudiés	Erreur ! Signet non défini.
Figure 15 : Roses de pollution des sels marins frais pour 4 sites étudiés	Erreur ! Signet non défini.
Figure 16 : rétrotrajectoires des sels marins frais pour les 4 sites étudiés.....	33
Figure 17 : Profil et série temporelle de la combustion de biomasse pour 4 sites étudiés	Erreur ! Signet non défini.
Figure 18 : Roses de pollution de la combustion de biomasse pour 4 sites étudiés	Erreur ! Signet non défini.
Figure 19 : Profil et série temporelle du trafic routier primaire pour 4 sites étudiés	Erreur ! Signet non défini.
Figure 20 : Roses de pollution du trafic routier primaire pour 4 sites étudiés	Erreur ! Signet non défini.

Tableau 1 : Périodes de mesure pour chaque station sélectionnée..... 14

1. Synthèse de l'étude

En Hauts-de-France et en Normandie, il a été observé entre 2018 et 2019, une augmentation du nombre de jours de dépassement de la valeur réglementaire relative aux poussières en suspension dans l'air de taille inférieure ou égale à 10 µm - PM10 (> 50 µg/m³) pour une majorité des stations situées en zone côtière. Cette augmentation a principalement été constatée en période printanière. C'est dans ce contexte qu'en 2021, Atmo Hauts-de-France et Atmo Normandie, avec l'appui du LCSQA (Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air), ont mis en place une étude visant à améliorer la compréhension de ces épisodes de PM10 en zone littorale. Cette étude a été réalisée dans le cadre du programme CARA (caractérisation chimique des particules) et cofinancée par la Région Hauts-de-France, L'Agence Régionale de Santé Normandie, l'Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE) et le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA). Son principal objectif initial était, par l'analyse de la composition des particules PM10 sur 4 stations littorales (Manche et Mer du Nord) de comprendre l'origine des épisodes printaniers et côtiers de pollution particulaire.

Quatre stations de mesure ont été sélectionnées pour cette étude : deux en Hauts-de-France, Calais Berthelot (urbaine) et Arrest (rurale), et deux en Normandie, Phare d'Ailly (rurale) et Le Havre ville Haute (urbaine). Sur les 4 sites investigués, des filtres journaliers ont été collectés durant les 5 mois de l'étude (entre le 1^{er} février et le 29 juin 2021). Une caractérisation chimique détaillée a été réalisée sur l'ensemble de ces filtres dont les résultats ont été publiés dans un précédent rapport¹.

Cette étude est basée sur l'utilisation d'un outil statistique appelé Positive Matrix Factorization (PMF), qui permet la détermination de la contribution des principales sources et mécanismes de formation des particules. Dans un premier temps, deux approches, la PMF « mono-site » et la PMF « multi-sites » ont été réalisées et comparées. La PMF multi-sites a été retenue pour mieux identifier les profils de sources présentant une forte saisonnalité, qui sont difficilement caractérisables par une PMF « individualisée » en raison d'un manque de données sur certains sites.

La PMF multi-sites a permis de distinguer 11 facteurs qui ont pu être associés à des profils de sources des particules PM10. Pour simplifier l'interprétation, certains facteurs ont été regroupés. Ainsi, in fine, 9 sources seront utilisées pour la partie d'interprétation (sels marins, biogénique primaire, biogénique secondaire, trafic routier primaire, combustion de fuel lourd, poussières minérales, industries, combustion de biomasse, et nitrate-rich). Une forte contribution des sels marins et des aérosols secondaires enrichis en nitrate d'ammonium (nitrate-rich) à la masse des PM10 a été observée. Ces deux sources représentent ensemble en moyenne environ 50 à 60% de la masse totale des particules PM10 selon les sites sur la période d'étude.

La variabilité temporelle des principales sources identifiées est ensuite discutée pour chaque site. Les concentrations moyennes mensuelles de PM10 en période froide (février – mars) sont plus élevées que celles observées en périodes plus chaudes (avril – juin) sur l'ensemble des sites étudiés. 6 sources présentent une variabilité mensuelle marquée au cours de la période d'étude.

Sur la période étudiée, 4 dépassements de la valeur journalière réglementaire en PM10 (> 50 µg/m³) ont été constatés sur les sites d'étude, à savoir 1 dépassement à Calais et 3 dépassements à Arrest. Aucun dépassement

¹ Rapport d'étude n°01/2021/SZH/V0 – Caractérisation des particules sur la zone littorale des Hauts-de-France et de la Normandie

n'a été observé pour les deux sites normands. Les journées pour lesquelles des fortes concentrations journalières ont été observées ont fait l'objet d'une analyse approfondie. Ainsi, 3 sources (combustion de biomasse, nitrate-rich et trafic routier primaire) ont été identifiées comme sources majoritaires pendant ces épisodes hivernaux et printaniers.

Par ailleurs, une analyse des origines géographiques est présentée pour 4 facteurs (sources) parmi les plus abondants, confirmant les origines principalement locales du trafic routier primaire et de la combustion de biomasse. Sans surprise, les plus fortes concentrations de sels marins sont associées à des masses d'air océaniques, alors que le facteur riche en nitrate d'ammonium (nitrate-rich) apparaît comme ayant des origines essentiellement (supra-)régionales, avec des concentrations maximales en période anticyclonique sous vents de nord-est.

Enfin, un résumé des origines des particules et les actions prioritaires à envisager par secteur sont proposés sous forme de conclusions.

2. Définitions

2.1. Les particules en suspension

Les particules atmosphériques sont constituées de matière solide et/ou liquide en suspension dans l'air. Elles sont généralement composées d'un mélange complexe de substances chimiques organiques et inorganiques. Ces particules en suspension sont souvent désignées par l'abréviation **PM** qui provient de l'anglais "Particulate Matter".

Dans le cadre de l'étude de la qualité de l'air, les particules atmosphériques sont classées en fonction de leur diamètre aérodynamique. L'ensemble des particules dont le diamètre est inférieur à 10 micromètres (μm) est appelé **PM₁₀**. De manière similaire, les termes **PM_{2.5}** et **PM₁** désignent les particules dont le diamètre est inférieur à 2.5 et 1 μm , respectivement.

2.2. Les sources

Les particules atmosphériques sont émises par des sources naturelles ainsi que par des sources anthropiques (dues aux activités humaines). Les particules naturelles proviennent principalement des éruptions volcaniques, des activités sismiques, des embruns marins, du transport par le vent de poussières désertiques, de l'érosion des sols, des feux de forêts, et de la végétation (e.g. pollens). Les principales sources anthropiques sont le trafic routier (échappement et hors échappement), les autres transports motorisés (transport aérien, ferroviaire, maritime et fluvial, etc...), la production et la distribution d'énergie, le chauffage résidentiel (notamment au bois), certaines activités industrielles et agricoles, le traitement des déchets, et les activités de construction.

Deux catégories de particules sont à distinguer (Figure 1) selon leur processus de formation :

- Les **particules primaires**, qui sont émises directement dans l'atmosphère par différentes sources anthropiques et naturelles.
- Les **particules secondaires**, qui sont formées dans l'atmosphère par des réactions physico-chimiques à partir de précurseurs gazeux (e.g. SO_2 , NO_x , NH_3 , composés organiques volatils).



Figure 1 : Principaux polluants atmosphériques (source : Atmo Hauts-de-France)

2.3. La composition

La composition chimique des particules varie fortement en fonction de leurs sources d'émission ou de leur processus de formation à partir de précurseurs gazeux, et aussi selon leurs mécanismes de transformations dans l'atmosphère. Les particules sont généralement composées d'un mélange de :

- **Matière organique (OM).** La matière organique est la fraction qui contient l'ensemble des composés organiques. La quantité d'atomes de carbone contenu dans cette matière organique est appelé **carbone organique (OC)**. Il peut être émis directement dans l'atmosphère (OC primaire) mais aussi être formé par condensation ou nucléation de composés organiques volatils (OC secondaire).
- **Carbone suie (carbone élémentaire, noté EC ; ou black carbon, noté BC).** Le carbone suie est un polluant primaire, formé par la combustion incomplète de combustibles carbonés (combustibles fossiles, biocarburants, biomasse, etc...). Il est déterminé sous sa forme EC ou BC selon la technique de mesures employée (typiquement, méthode thermo-optique normalisée pour EC vs. méthode optique pour BC).
- **Espèces inorganiques solubles (ou ions : nitrates, sulfates, carbonates, chlorures, ammonium, etc...).** Ils peuvent être émis directement dans l'atmosphère (ex. NaCl provenant des embruns marins) ou être formés à partir de précurseurs gazeux (ex. le nitrate est formé à partir de NO_x gazeux).
- **Éléments minéraux insolubles.** Cette fraction des particules contient notamment différents éléments **métalliques**. Ils peuvent être émis par des sources naturelles (ex. Ca, Al, Fe provenant de l'érosion de la croûte terrestre, et présents au sein des particules d'origine désertique), ainsi que par des sources anthropiques (ex. As, Cd, Pb émis par certains procédés industriels).

3. Contexte, enjeux et objectifs de l'étude

En Hauts-de-France et en Normandie, il a été observé entre 2018 et 2019, une augmentation du nombre de jours de dépassement de la valeur réglementaire en PM10 (> 50 µg/m³ en moyenne journalière à ne pas dépasser plus de 35 jours par an) pour une majorité des stations de fond situées en zone côtière.

En Hauts-de-France, **55 dépassements cumulés en 2018** et **73 dépassements cumulés en 2019** ont été enregistrés sur toutes les stations confondues. En Normandie, **8 dépassements** ont été enregistrés en 2018 et **19** en 2019. En Hauts-de-France, ce sont les stations de fond (ie, hors stations trafic ou industrielles) de **Calais Berthelot (43j)**, **Saint-Pol-sur-Mer (47j)** et **Sangatte (33j)** qui enregistrent le plus de dépassements entre 2018 et mi-2021. En Normandie, ce sont les stations de fond du **Havre (20j)** et **phare d'Ailly (6j)**.

C'est dans ce contexte qu'en 2021, Atmo Hauts-de-France et Atmo Normandie avec l'appui de LCSQA, ont mis en place une étude sur les épisodes des PM10 en zone littorale afin d'améliorer la compréhension de leurs causes.



Figure 2 : Stations de mesures (fond) des PM10 en zone côtière (Normandie et Hauts-de-France)

Les objectifs principaux de cette étude sont :

- de comprendre l'évolution temporelle des particules PM10 sur 4 stations littorales (Manche et Mer du Nord) en périodes hivernale et printanière ;
- de déterminer la composition chimique des PM10 et leurs précurseurs en zone côtière et en particulier en cas de dépassement de la valeur limite journalière ;
- d'identifier les sources principales et leur contribution aux concentrations de PM10 ;
- d'identifier l'origine géographique des principales sources de PM10.

Un premier rapport publié en décembre 2022² s'est attaché à décrire le travail réalisé dans le cadre de cette étude, à présenter l'ensemble des résultats et à commencer à analyser les spécificités des épisodes de pollution en zone côtière.

Ce second rapport vise à déterminer plus en détail les sources à l'origine des pointes de pollution particulaire en zone côtière et leurs contributions respectives de manière à donner aux autorités des pistes pour agir afin de limiter certaines de ces sources et diminuer le nombre de jours de dépassement de la valeur limite journalière de PM10.

² Rapport d'étude n°01/2021/SZH/V0 – Caractérisation des particules sur la zone littorale des Hauts-de-France et de la Normandie

4. Matériels et méthodes

4.1. Sites et période de mesure retenus

Quatre stations ont été sélectionnées pour cette étude : deux en Hauts-de-France, intitulées **Calais** Berthelot (CA8) et **Arrest** (RU3), et deux en Normandie, intitulées **Phare d'Ailly** (AIL) et **Le Havre** ville Haute (HVH).

Calais est le chef-lieu du département du Pas-de-Calais et se situe sur la Côte d'Opale. Cette commune fait partie de la Communauté d'agglomération Grand Calais Terres et Mers qui compte 104 367 habitants. La commune de Calais occupe un territoire de 33,5 km² correspondant à une densité de population de 2 177 habitants/km², soit la densité la plus élevée des deux sites d'étude situés dans les Hauts-de-France. La station de Calais Berthelot est une station urbaine qui permet la surveillance de la pollution de fond. Elle mesure les PM_{2.5} et les PM₁₀ (polluants réglementés). Depuis 2023, elle constitue la station de caractérisation des particules (mesure de carbone suie, d'ammoniac, de caractérisation des particules non réfractaires).

Arrest est une commune rurale située dans le département de la Somme et appartenant à la Communauté d'agglomération de la Baie de Somme. Arrest s'étend sur un territoire de 11,15 km² et compte 855 habitants, soit une densité de population de 77 habitants/km². La station d'Arrest est donc une station rurale qui permet de suivre la pollution de fond. Les polluants réglementés PM₁₀ et ozone y sont mesurés.

Le Havre est la plus peuplée des 54 communes qui constituent Le Havre Seine Métropole, communauté urbaine qui compte 268 912 habitants³. La commune du Havre occupe un territoire de 53 km² et se caractérise par une densité de population de 3 185 habitants/km². La station Le Havre ville haute est une station urbaine qui mesure la pollution de fond. Elle permet le suivi en continu des polluants réglementés suivants : les particules (PM₁₀, PM_{2.5} et PM₁), l'ozone (O₃), les oxydes d'azote (NO_x) et le dioxyde de soufre (SO₂) ainsi que le black carbon.

La station du Phare d'Ailly est située sur la commune de Sainte-Marguerite-sur-Mer qui compose avec 15 autres communes la communauté d'agglomération de la région dieppoise qui compte 46 223 habitants. La commune de Sainte-Marguerite-sur-Mer occupe un territoire de 5,7 km² et se caractérise par une densité de population de 83 habitants/km². La station du Phare d'Ailly est une station rurale de pollution de fond qui mesure en continu les particules PM₁₀ et l'ozone.

³ INSEE Population 2018

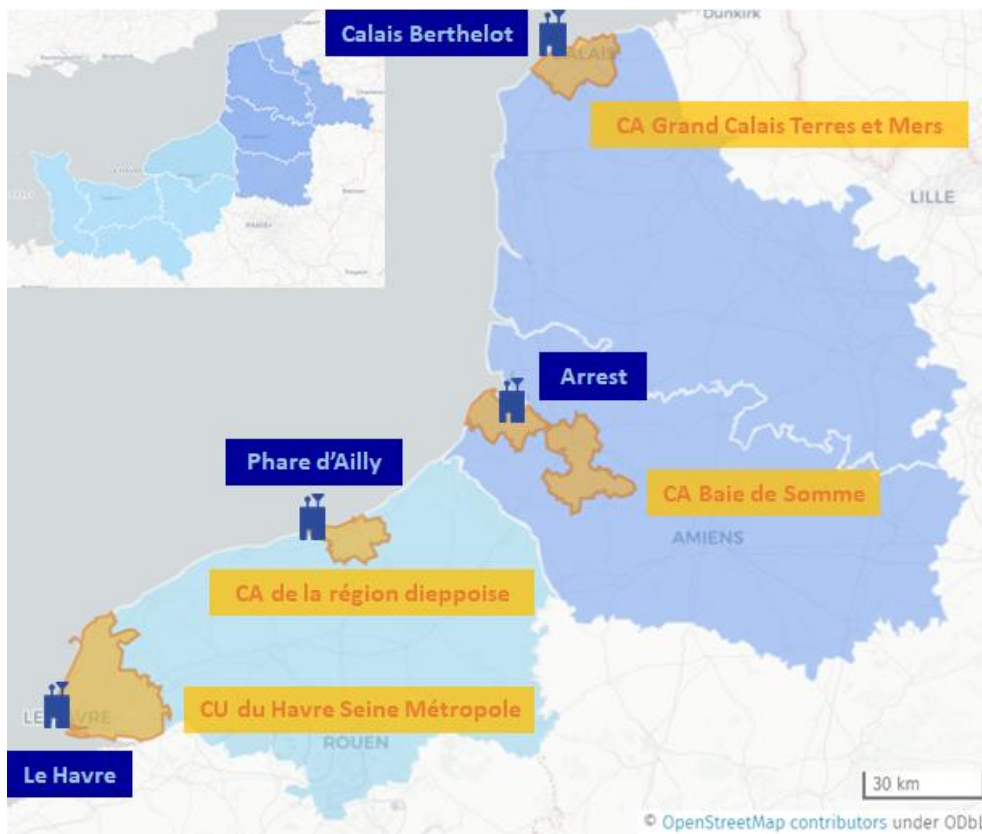


Figure 3 : Les régions Normandie et Hauts-de-France et leurs départements en bleus clair et foncé, respectivement, les stations de mesures (en bleu) sélectionnées pour l'étude et les établissements publics de coopération intercommunale (EPCI, en orange) où se trouvent ces stations

Hauts-de-France : Calais Berthelot (CA8)



Hauts-de-France : Arrest (RU3)



Normandie : Phare d'Ailly (AIL)



Normandie : Le Havre ville haute (HVH)



Figure 4 : Stations de mesures sélectionnées pour l'étude

L'étude a été réalisée entre le 1^{er} février et le 29 juin 2021. Les périodes de prélèvement des PM10 sur chaque station sont récapitulées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Périodes de mesure pour chaque station sélectionnée

Site	Période de prélèvement PM10
Calais Berthelot (CA8)	1 ^{er} février – 20 juin 2021
Arrest (RU3)	1 ^{er} février – 20 juin 2021
Phare d'Ailly (AIL)	10 février – 29 juin 2021
Le Havre ville haute (HVH)	1 ^{er} février – 16 juin 2021

4.2. Prélèvement et analyse des particules PM10

Le matériel de prélèvement et de mesure ainsi que les méthodes d'analyse sont décrits dans le premier rapport relatif à cette étude⁴.

Sur les 4 sites investigués, des filtres journaliers ont été collectés durant les 5 mois de l'étude. Une caractérisation chimique détaillée a été réalisée à l'IMT Nord Europe (métaux) et à l'Institut des Géosciences de l'Environnement (toutes les autres espèces chimiques) sur 136 à 140 filtres journaliers par site. Ces analyses ont notamment permis la détermination des concentrations d'un grand nombre de constituants des PM10 à savoir la matière carbonée (matière organique OM et carbone suie EC), les ions majeurs (Chlorures Cl⁻, Nitrates NO₃⁻, Sulfates SO₄²⁻, Ammonium NH₄⁺, Sodium Na⁺, Potassium K⁺, Magnésium Mg²⁺, Calcium, Ca²⁺), un grand nombre de métaux/éléments traces (e.g. Al, Ca, Fe, K, As, Ba, Cd, Co, Cu, La, Mn, Mo, Ni, Pb, Rb, Sb, Sr, V, Zn), et d'une large variété de marqueurs organiques spécifiques de sources, tels que les monosaccharides anhydrides (levoglucosan, mannosan, galactosan) pour la source combustion de biomasse, les polyols (arabitol, sorbitol, mannitol) pour les émissions primaires biogéniques des sols et des végétaux (spores fongiques), ou encore l'acide méthylsulfonique (MSA) pour la source marine biogénique.

L'ensemble de ces constituants et la variation de leurs concentrations au fil des jours sont les données d'entrée de l'outil PMF décrit ci-après qui permet de remonter aux principales sources à l'origine des concentrations de PM10 et d'estimer leurs contributions moyennes sur la période d'étude.

4.3. La PMF, un outil statistique pour remonter aux sources de particules

L'outil statistique Positive Matrix Factorization (PMF) permet la détermination de la contribution des principales sources et mécanismes de formation des polluants, à partir d'un jeu de données aussi dense que possible, en termes de nombre d'échantillons et d'espèces chimiques mesurées. Il est utilisé depuis 2011 par le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA) pour l'exploitation des données issues du programme national CARA⁵ notamment. Il est également utilisé à l'IGE depuis 2011 pour des utilisations plus spécifiques dans le cadre de programmes de recherche visant à développer ses applications. L'utilisation de ce type d'outil statistique revêt une part de subjectivité, notamment liée au choix des hypothèses de départ et/ou de la

⁴ Rapport d'étude n°01/2021/SZH/V0 – Caractérisation des particules sur la zone littorale des Hauts-de-France et de la Normandie

⁵ L'observatoire national de la composition chimique et des sources de particules fines en milieu urbain (<https://www.lcsqa.org/fr/le-dispositif-cara>)

solution finalement retenue. Ainsi, bien que les partenaires du projet disposent d'une longue expérience dans la pratique de cette méthode, **il faut considérer les résultats obtenus comme des estimations** et non comme des valeurs très précises.

Le principe général de la méthode utilisée (PMF) est détaillé dans l'Annexe 2. Sont décrites ci-dessous les principales modalités de mise en œuvre pour la présente étude.

4.4. PMF : approche mono-site vs multi-sites

La PMF « mono-site », qui est la méthode la plus souvent utilisée dans l'étude de sources, consiste à utiliser comme données d'entrée les concentrations journalières des espèces chimiques mesurées sur chacun des sites étudiés pris individuellement. La PMF « multi-sites » correspond au cas de figure où les données récoltées sur l'ensemble de sites de mesures sont regroupées en une seule matrice d'entrée.

Le regroupement des données mesurées sur plusieurs sites accroît le nombre d'échantillons disponibles pour l'analyse PMF. Cette approche multi-sites peut s'avérer intéressante pour identifier les profils de sources présentant une forte saisonnalité, qui sont difficilement caractérisables par une PMF « individualisée » en raison d'un manque de résultats sur certains sites au moment où les maxima journaliers de traceurs spécifiques de sources sont généralement enregistrés et apportent une information primordiale. C'est notamment le cas ici pour la source biogénique organique primaire pour laquelle on dispose d'une série temporelle limitée des traceurs organiques mesurés sur les sites Le Havre Ville Haute (HVH) et Calais Berthelot (CA8). Ainsi, la PMF multi-sites peut être considérée comme plus robuste, se basant sur un jeu de données plus dense et contenant donc plus d'informations sur la variabilité temporelle des principales sources de PM (qui peuvent donc être ensuite plus facilement séparée par l'outil statistique mis en œuvre).

Cependant, l'agrégation des jeux de données sur plusieurs sites peut induire une moins bonne prise en compte de la spécificité des sites étudiés et par conséquent conduire à des imprécisions dans les résultats obtenus pour les sources très fortement influencées par les émissions locales (ex., émissions industrielles) ; la PMF mono-site permet alors de mieux exprimer la spécificité de ces sources locales.

C'est pour cette raison que les 2 approches ont été menées de front afin de pouvoir déterminer celle qui apporte le plus d'informations pour cette étude. Les résultats obtenus pour chacune des approches sont détaillés et comparés dans l'Annexe 3 du présent rapport. Au regard de ces résultats (et compte-tenu notamment de la similarité des facteurs obtenus pour chaque site individuellement), il a été choisi de retenir les solutions obtenues par l'approche PMF multi-sites, qui sont donc présentés ci-dessous.

Synthèse des principales limites de cette étude ?

Comme indiqué précédemment, l'utilisation de l'outil statistique PMF est associée à certains biais, notamment liée au choix des hypothèses de départ et/ou de la solution finalement retenue. À noter qu'une approche harmonisée de traitement des données a été précédemment développée par l'INERIS et l'IGE pour limiter ces biais dans les études d'attribution des sources d'émission des PM10.

L'approche PMF multi-sites utilisée dans la présente étude peut induire une moins bonne prise en compte des spécificités propres à chaque site, et conduire par exemple à une légère sous-estimation de certaines sources locales notamment. La contribution des différentes sources identifiées par PMF à la masse totale de particules, doit être interprétée comme des estimations (et non des valeurs très précises) permettant de mettre en évidence les sources majoritaires en présence et les hiérarchiser.

De même, il faut garder à l'esprit que les mesures ont été réalisées seulement sur 5 mois et en 2021, année durant laquelle les épisodes de pollution particulaire côtiers ont été moins nombreux et moins intenses que les années précédentes. Ainsi les interprétations tirées des résultats ne sont pas complètement généralisables à une année entière plus polluée. Elles donnent néanmoins des éléments d'explications intéressants pour continuer à travailler sur la diminution de certaines sources de particules.

5. Résultats de l'étude

Comme mentionné ci-dessus, le lecteur est invité à se reporter aux Annexes 2 et 3 pour la comparaison des résultats obtenus via les 2 approches (mono-site et multi-sites). Seules les solutions retenues pour la PMF multi-sites, considérées comme plus robustes, sont présentées dans ce chapitre.

5.1. Solution PMF retenue

5.1.1. Sources identifiées

La PMF multi-sites a permis de distinguer 11 facteurs qui ont pu être associés à des profils de sources des particules PM₁₀. Selon leur mécanisme de formation, ces sources peuvent être distinguées comme sources primaires, avec des émissions directement dans l'atmosphère et sources secondaires (essentiellement nitrates, sulfates et une partie de la matière organique) provenant de processus de conversion gaz/particules.

Par souci de simplification, certains facteurs sont regroupés et **9 sources** seront prises en compte pour la partie d'interprétation, comme détaillé ci-dessous :

3 sources naturelles

Sels marins : cette source contient 2 facteurs différents : **les sels marins frais et les sels marins vieillis**. Le facteur sels marins frais est caractérisé par la forte contribution de Sodium (Na), Chlorure (Cl) et Magnésium (Mg), qui sont des composés majeurs de l'eau de mer. La différence principale entre les sels marins frais et les sels marins vieillis est le remplacement de Cl⁻ par NO₃⁻ à cause de la réactivité chimique des sels marins avec les acides. Les réactions entre le chlorure de sodium (NaCl) et des acides tels que les acides sulfurique et nitrique (H₂SO₄ et HNO₃) forment du nitrate de sodium (NaNO₃) et du sulfate de sodium (Na₂SO₄), respectivement.

Biogénique primaire : cette source est principalement liée à la **microflore fongique des sols et à la surface de la végétation**. Elle est dominée par la présence des polyols avec des proportions importantes d'OC dans sa masse totale.

Biogénique secondaire : cette source contient également 2 facteurs différents : MSA-rich et SOA biogénique.

Le MSA-rich est caractérisé par la présence du MSA (acide méthylsulfonique) avec des proportions importantes de SO₄²⁻, ces deux espèces pouvant provenir de l'oxydation du DMS (sulfure de diméthyle) émis par le **phytoplancton marin**. Le facteur **SOA-Biogénique** est caractérisé par la présence du 3-MBTCA (acide 3-méthyl-1,2,3-butanetricarboxylique), un des traceurs les plus pertinents pour les aérosols organiques secondaires (AOS) biogéniques. Ce traceur est issu de l'oxydation de composés organiques volatils émis par les plantes (α -pinène) et notamment les conifères. Ces deux facteurs sont donc constitués par des particules **organiques secondaires et biogéniques**.

5 sources anthropiques

Trafic routier primaire : il est caractérisé par la forte présence d'EC émis par les combustions de fuels fossiles. Ce facteur contient également différents éléments métalliques émis par l'usure de pneus et de freins. On considère que ce facteur trafic routier combine donc des émissions à **l'échappement** ainsi qu'une partie des émissions **hors-échappement**.

Combustion de fuel lourd (HFO) : Ce facteur est caractérisé par la présence prédominante des éléments V et Ni, liés à la combustion de fioul lourd par le **transport maritime** et également par les **raffineries** et centrales thermiques.

Industries : cette source se caractérise principalement par la présence importante des éléments métalliques tels que As, Cd, Pb, Se, et Zn. Ces éléments sont fréquemment observés au sein de **diverses émissions industrielles** (métallurgie, verrerie, production d'énergie, ...).

Combustion de biomasse : cette source est caractérisée par la présence de lévoglucosan et manosan, avec des proportions importantes d'OC. Elle correspond principalement au **chauffage au bois en hiver**, mais peut également concerner la combustion des déchets verts ou les feux de forêt.

Nitrate-rich : cette source est caractérisée par la forte présence de NO_3^- et NH_4^+ indiquant la présence du nitrate sous forme de nitrate d'ammonium (NH_4NO_3). Le nitrate d'ammonium, formé dans l'atmosphère, résulte de la combinaison des oxydes d'azote (émis majoritairement du trafic routier et de l'industrie) et de l'ammoniac (émis principalement par les activités agricoles). Ce facteur contient également une partie de sulfate sous forme de sulfate d'ammonium ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$). Cette source combine donc deux **composés inorganiques secondaires** importants : le nitrate d'ammonium et le sulfate d'ammonium.

1 source mixte

Poussières minérales : cette signature caractérise les processus de **remise en suspension des poussières** à partir des sources telles l'érosion des sols, les chantiers de construction, la circulation routière, les aires de stationnement. Cette source peut également inclure les sables sahariens transportés par les masses d'air sur de longues distances.

5.1.2. Contribution moyenne

La Figure 5 présente les contributions relatives moyennes des principales sources à la masse des PM_{10} sur les quatre sites étudiés. Cette Figure 5 met en évidence une forte contribution des **sels marins** et des aérosols secondaires enrichis en nitrate d'ammonium (**nitrate-rich**). Ces deux sources représentent ensemble en moyenne environ 50 à 60% de la masse totale des particules PM_{10} selon les sites. La Figure 5 montre également une contribution significative des **aérosols organiques biogéniques secondaires**, qui représentent entre 10 à 20% environ des PM_{10} mesurées sur chaque site. La combustion de la biomasse présente des contributions relatives de l'ordre de 10 à 15%. Le trafic routier apparaît également comme une source non négligeable de particules PM_{10} au niveau des sites urbains du Havre et de Calais, avec des contributions moyennes d'environ 10 à 15% (la contribution est plus faible au niveau des sites ruraux soit moins de 5%). D'autres sources plus minoritaires (telles que la combustion de fioul lourd, les poussières minérales, l'industrie, les émissions biogéniques primaires) ont été identifiées sur l'ensemble des quatre sites étudiés (Figure 5). Ces sources contribuent chacune à moins de 6% de la masse des particules sur chaque site (Figure 5).

La variabilité temporelle de chacun des facteurs identifiés est présentée dans la section suivante. Cette compréhension est nécessaire pour identifier les secteurs prioritaires sur lesquels une action politique pourrait permettre de réduire les émissions polluantes à court ou moyen terme.

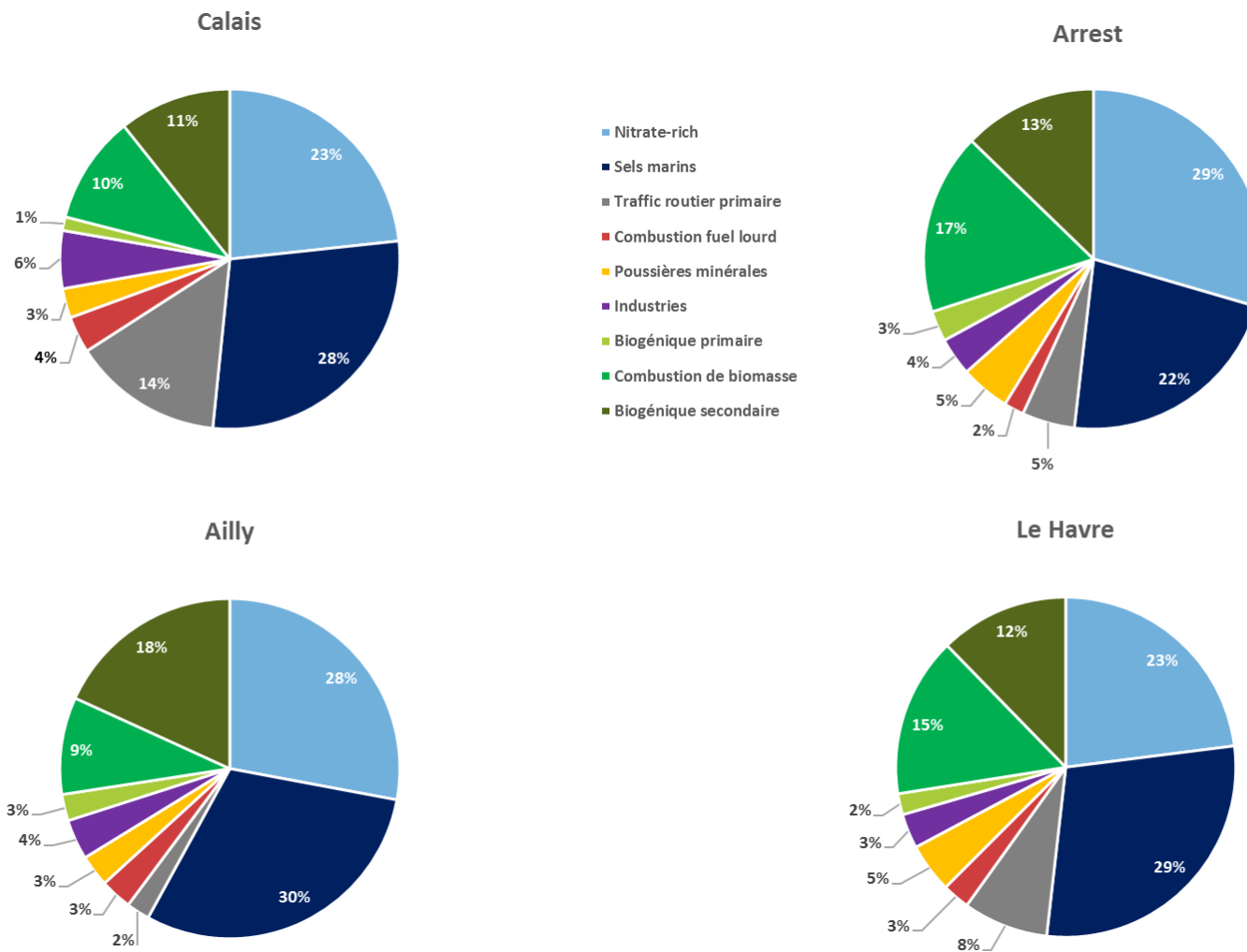


Figure 5 : Contribution moyenne des principales sources identifiées par la PMF pour les 4 sites étudiés.

5.2. Variation temporelle

Les contributions moyennes mensuelles (en $\mu\text{g.m}^{-3}$ et en %) obtenues pour chaque site sont présentées dans les Figure 6 et Figure 7. La Figure 6 montre que les concentrations moyennes mensuelles de PM_{10} en période froide (février – mars) sont plus élevées que celles observées en périodes plus chaudes (avril – juin) sur l'ensemble des sites étudiés. Par ailleurs, on note une baisse graduelle des niveaux de PM_{10} entre les mois d'avril et juin sur l'ensemble des sites étudiés à l'exception de Calais où les concentrations en juin sont légèrement plus élevées que celles observées en avril et mai (Figure 6).

Une description de la variabilité temporelle des principales sources identifiées est proposée ci-après :

Combustion de la biomasse : comme attendu et illustré dans la Figure 6, cette source présente une variabilité mensuelle très marquée sur l'ensemble des sites. En février, elle représente globalement plus d'1/4 (correspondant à des concentrations atmosphériques de $2.2 - 4.4 \mu\text{g.m}^{-3}$) de la masse des PM_{10} selon les sites alors qu'elle ne constitue que 1 à 2% ($0.1 - 0.2 \mu\text{g.m}^{-3}$) des PM_{10} en juin. En mars, la combustion de la biomasse représentait un peu moins d'1/4 des PM_{10} observées respectivement sur les sites du Havre et d'Arrest. Cette source est principalement liée au chauffage résidentiel au bois durant les périodes froides. Mais elle peut également être associée à la combustion de déchets verts ou aux feux de forêts pour d'autres mois de l'année.

Nitrate-rich : Cette source représente une fraction majoritaire des PM_{10} entre les mois de février et d'avril sur l'ensemble des sites. Elle constitue en moyenne mensuelle entre 1/4 à plus d'1/3 (correspondant à des concentrations de $4.1 \pm 0.9 \mu\text{g.m}^{-3}$) de la masse de PM_{10} selon les sites. Le nitrate-rich est une source secondaire de particules, qui se forme dans l'air par réaction chimique entre les oxydes d'azote (NO_x) et l'ammoniac (NH_3). Ce dernier polluant est quasi-exclusivement lié aux émissions agricoles (ex : élevage, épandage printanier d'engrais azotés).

Aérosols organiques biogéniques secondaires : cette source présente un cycle saisonnier bien marqué avec des concentrations maximales observées en juin, mois pendant lequel ces aérosols biogéniques secondaires constituent la source majoritaire des PM_{10} sur l'ensemble des sites. Les contributions les plus élevées sont respectivement observées sur les sites de Phare d'Ailly (59% à la masse des PM_{10}), Le Havre (46%), Arrest (41%) et Calais (31%). En juin, les concentrations moyennes de cette source varie de 3.0 à $3.7 \mu\text{g.m}^{-3}$. Ce cycle saisonnier est à relier aux conditions météorologiques (en particulier le fort ensoleillement) ainsi qu'à la forte activité biogénique, favorisant les émissions biogéniques et les processus d'oxydation photochimique (la transformation des espèces gazeuses en particules), au cours de cette période de l'année.

Aérosols organiques biogéniques primaires : cette source se caractérise également par un cycle saisonnier bien marqué. Les concentrations maximales sont observées en juin et varient de 0.5 à $1.3 \mu\text{g.m}^{-3}$ selon les sites. En cette période, les contributions relatives sont plus élevées pour les sites de fond ruraux (environ 10% de la masse des PM_{10} à Ailly et 15% à Arrest) par rapport aux sites de fond urbain (de l'ordre de 5%). Par ailleurs, cette source ne contribue qu'à une fraction négligeable ($\leq 2\%$) des PM_{10} entre les mois de février et d'avril sur l'ensemble des sites. Les fortes contributions en juin sont associées aux activités biologiques plus intenses durant cette période, favorisées par le rayonnement solaire plus fort et la température plus élevée.

Trafic routier primaire : cette source est identifiée comme un important contributeur à la masse des PM₁₀ tout au long de la campagne sur les deux sites de fond urbain (Calais et Le Havre) avec des contributions à la masse des PM₁₀ variant entre 7– 13% (soit 0.7 – 1.2 µg.m⁻³) pour le site du Havre et de 11 à 22% (soit 1.8 – 2.5 µg.m⁻³) pour Calais. On note également des maxima observés en juin pour ces deux sites de fond urbain. La contribution mensuelle de cette source est globalement plus faible sur les deux sites de fond ruraux, représentant en moyenne mensuelle entre 1 à 3% de la masse des PM₁₀ sur Ailly et près de 4 à 8% des PM₁₀ sur Arrest.

Sels marins : cette source contribue fortement à la masse des PM₁₀ tout au long de la période de l'étude. Elle constitue la principale contributrice aux PM₁₀ en mai sur l'ensemble des sites, et représente respectivement 50% (5.2 µg.m⁻³) des PM₁₀ pour la station du Havre et autour de 40% pour les autres sites. A noter qu'en mai, les vents soufflaient essentiellement de la mer vers la terre (Annexe 4).

Les autres facteurs identifiés (c'est-à-dire la combustion de fuel lourd, les autres activités industrielles et les poussières minérales) se révèlent être des sources minoritaires de PM₁₀, et ne présentent pas de variabilité mensuelle significative au cours de la période d'étude. Les émissions de particules liées à la combustion de fuel lourd représentent en moyenne mensuelle entre 1 et 6% de la masse des PM₁₀ selon les sites ; celles liées aux activités industrielles varient de 2 à 8% en fonction des sites. Enfin, les poussières minérales constituent en moyenne mensuelle 1 à 9% des PM₁₀ observées sur les quatre sites.

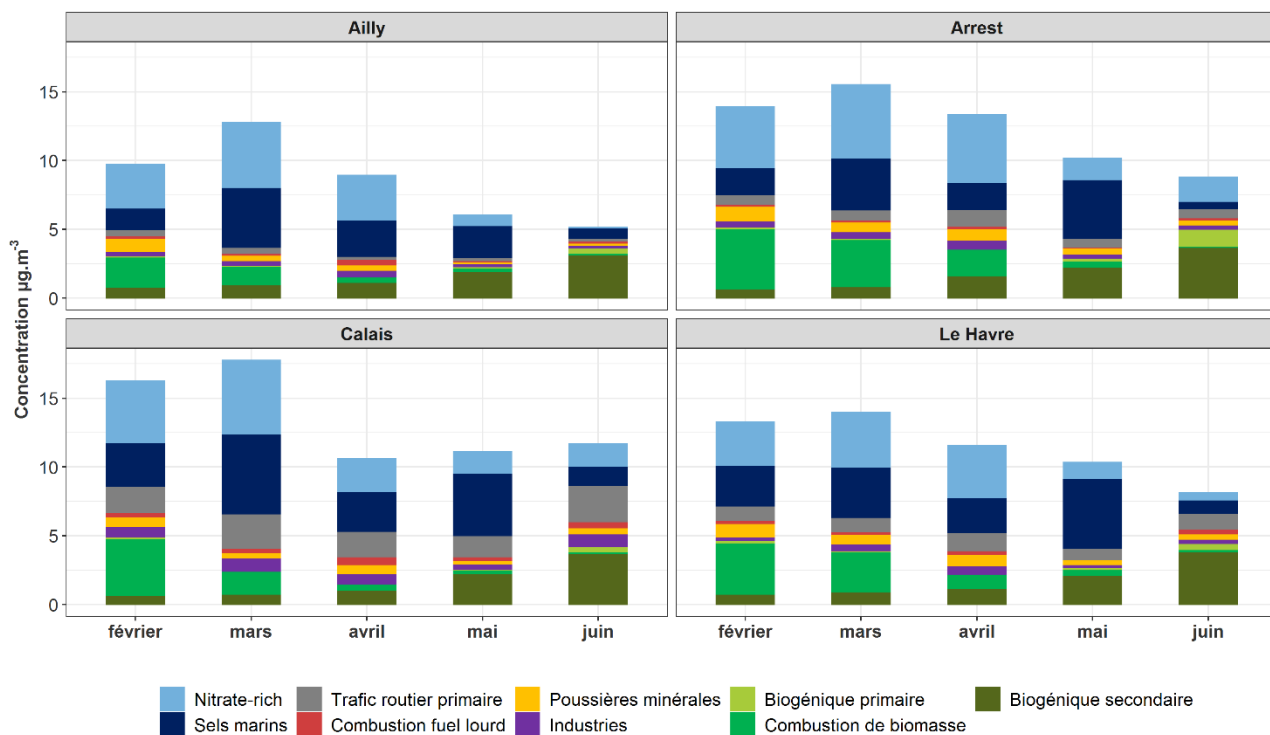


Figure 6 : Variation mensuelle des concentrations moyennes (µg.m⁻³) des principaux facteurs constitutifs des PM₁₀.

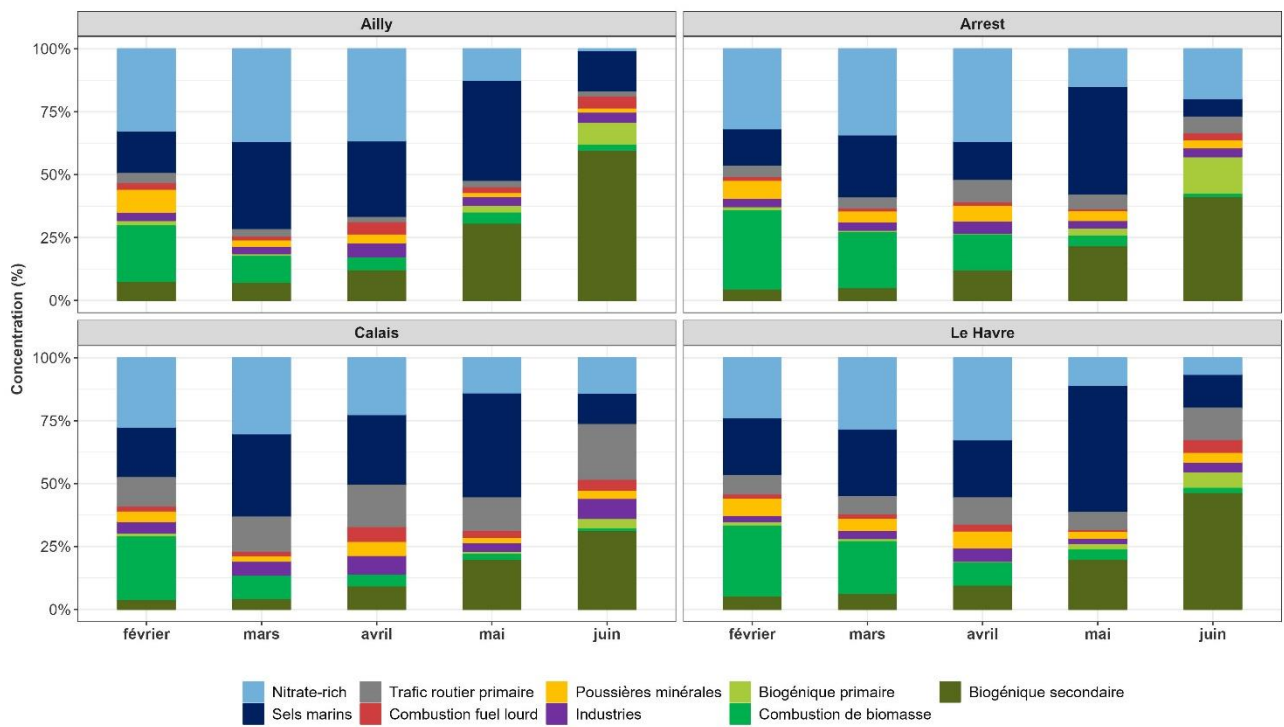


Figure 7 : Variation mensuelle des contributions relatives moyennes des principaux facteurs constitutifs des PM₁₀

5.3. Zoom sur les épisodes de pollution

L'évolution journalière des concentrations massiques de PM₁₀ pour les quatre sites est présentée dans l'Annexe 5. On note des hausses notables de concentrations de PM₁₀ à certaines dates sur l'ensemble des stations de mesures. La composition chimique des particules au cours de ces épisodes spécifiques de plus fortes concentrations de PM₁₀ a été analysée dans le premier rapport relatif à cette étude.

Dans cette partie, nous tenterons de comprendre la dynamique des sources de PM₁₀ lors de ces pics journaliers de PM₁₀ (source locale ou régionale ? Si locale, quelle origine ?). Les dates lors desquelles des fortes concentrations journalières ont été observées et retenues pour une analyse approfondie concernent 3 épisodes à savoir du 2 – 3 mars 2021, du 31 mars – 1^{er} avril 2021, et le 21 avril 2021.

5.3.1. Journées du 2 au 3 mars 2021

Un épisode de pollution particulaire a touché les régions Hauts-de-France et Normandie les 2 et 3 mars 2021. Le seuil d'information et de recommandation (seuil IR fixé à 50 µg.m⁻³) a été dépassé les 2 et 3 mars 2021 sur la station de mesure d'Arrest et le 3 mars de Calais. La moyenne journalière maximale (73 µg.m⁻³) a été enregistrée sur cette dernière station. Aucun dépassement du seuil IR n'a été enregistré sur les sites de mesure normands. Cependant, des concentrations supérieures ou égales à 43 µg.m⁻³ ont été mesurées sur les stations de mesures normandes le 2 mars 2023.

La Figure 8 présente les contributions relatives des différentes sources de PM₁₀ pour la période du 2 au 3 mars 2021. Cette figure montre que cet épisode de pollution particulaire est de type « mixte », caractérisé principalement par une contribution majoritaire de la source « nitrate-rich » (de l'ordre de 40 à 55% de la masse des PM₁₀ selon les sites) et celle de la combustion de biomasse (d'environ 20 à 30% de la masse des PM₁₀). Le trafic routier constitue également une source significative de PM₁₀ notamment pour les stations de fond urbain (environ 10%).

La prépondérance de la source nitrate-rich sur l'ensemble des quatre sites étudiés indique que cet épisode est d'échelle (supra-)régionale, impliquant le transport de masses d'air chargées en nitrate d'ammonium sur de longues distances. Néanmoins il n'est pas exclu que du nitrate d'ammonium complémentaire puisse se former plus localement à partir des émissions d'ammoniac et d'oxydes d'azote plus locales.

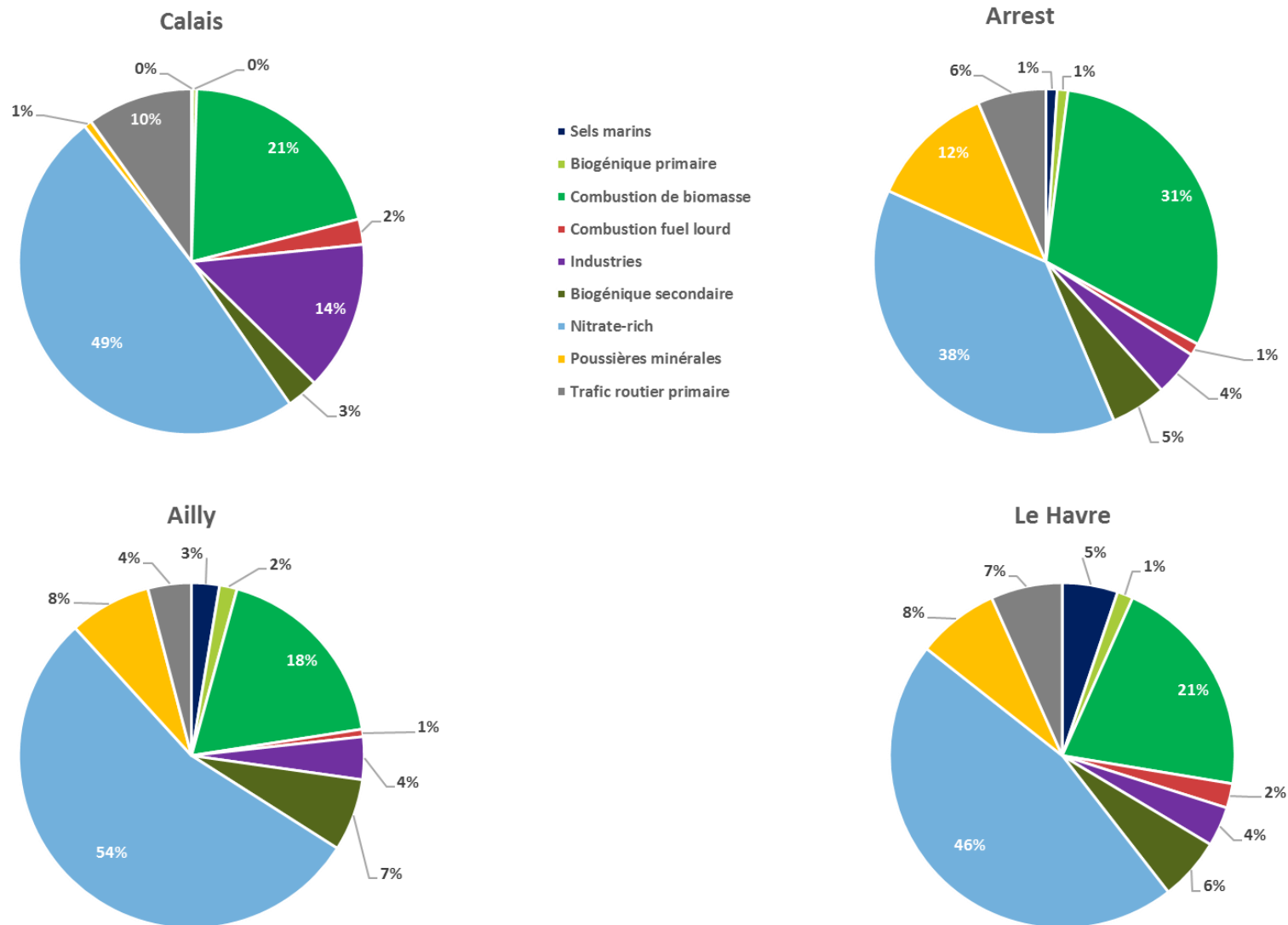


Figure 8 : Contribution moyenne des principales sources identifiées par la PMF pour les 4 sites étudiés. Les données prises en compte sont celles du 2 au 3 mars 2021.

5.3.2. Journées du 31 mars au 1^{er} avril 2021

Le 31 mars 2021, une augmentation de la concentration atmosphérique en PM₁₀ a été enregistrée sur les quatre sites étudiés. Les concentrations les plus élevées ont été observées le 1^{er} avril. Le dépassement du seuil IR a eu lieu le 1^{er} avril sur le site d'Arrest. A Calais, les concentrations du jour ont atteint le seuil de 50 µg.m⁻³ mais sans le dépasser. Sur les deux sites normands, les concentrations des PM₁₀ sont plus faibles même si une légère augmentation des particules a été enregistrée le 1^{er} avril.

Cet épisode se caractérise par une variabilité de la distribution des sources de PM₁₀ entre les sites (Figure 9). A Calais, les PM₁₀ sont dominées par deux sources : nitrate-rich (environ 1/3 de la masse des PM₁₀) et trafic routier (30%). A Arrest, le trafic routier (30%), les aérosols organiques biogéniques secondaires (18%) et les poussières minérales (12%) sont les sources majoritaires de PM₁₀ lors de cet épisode. Les émissions industrielles paraissent également importantes (10% de la masse des PM₁₀) sur ce site rural. Ce dernier résultat pourrait résulter d'un biais inhérent à l'utilisation de la PMF multi sites. A Ailly, les principales sources de PM₁₀ obtenues durant cet épisode sont : nitrate-rich (1/3 de la masse des PM₁₀), les sels marins (23%) et les aérosols organiques biogéniques secondaires (17%). Au Havre, les sources majoritaires de PM₁₀ sont plus variées et incluent : le trafic routier (1/4 de la masse des PM₁₀), les aérosols organiques biogéniques secondaires (17%), les poussières minérales (16%) et la combustion de la biomasse (10%).

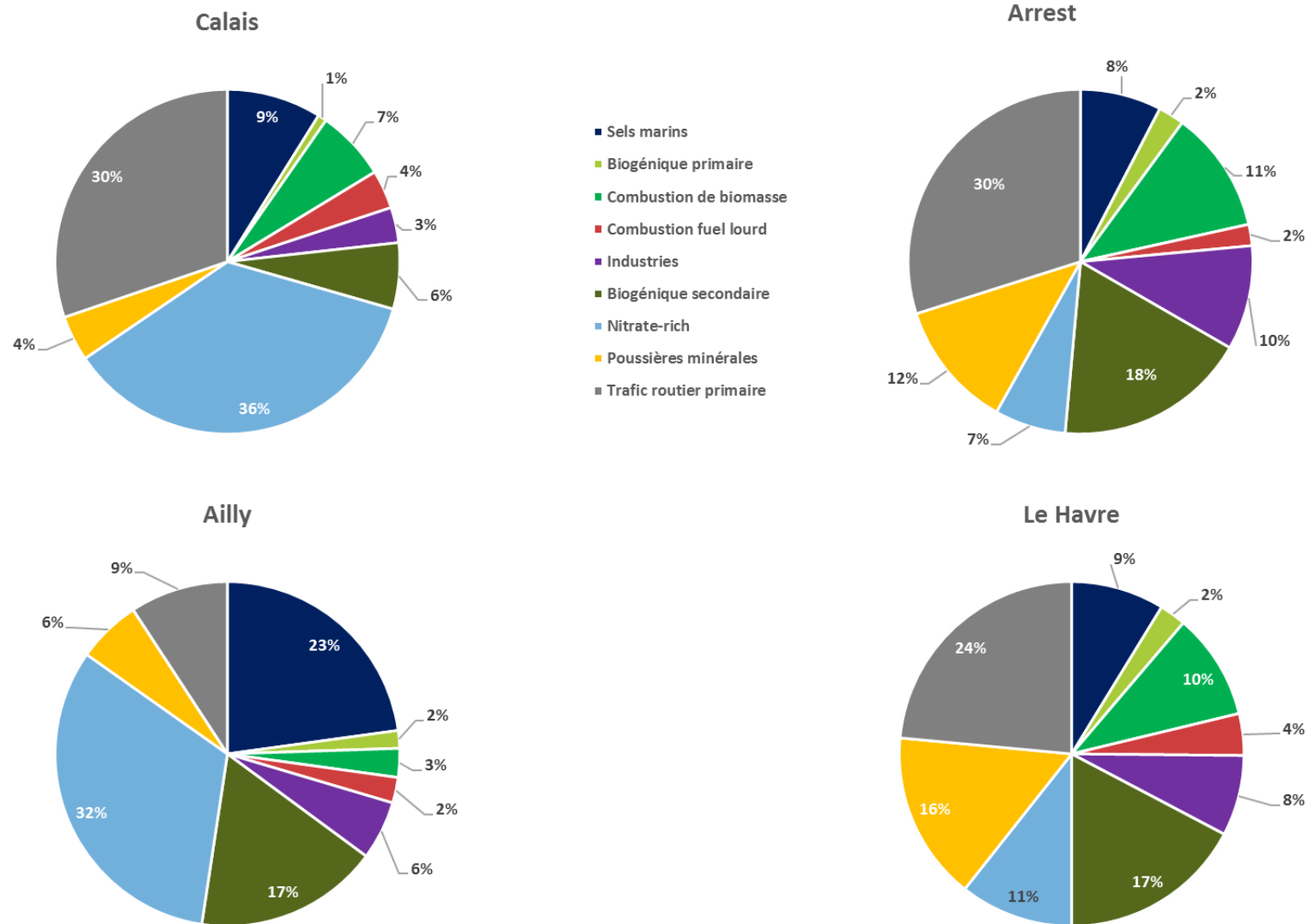


Figure 9 : Contribution moyenne des principales sources identifiées par PMF pour les 4 sites étudiés. Les données prises en compte sont celles du 31 mars au 1^{er} avril 2021.

5.3.3. Journée du 21 avril 2021

Le 21 avril 2021, les concentrations en particules PM₁₀ étaient en hausse mais aucun dépassement du seuil d'information et de recommandation n'a été enregistré. Les concentrations moyennes journalières variaient entre 33 µg.m⁻³ à Calais et 45 µg.m⁻³ au phare d'Ailly.

Dans ce cas typique d'épisode printanier, la source nitrate-rich constitue la principale source contributrice aux PM₁₀ sur chaque site. Elle représente près de 60% de la masse des PM₁₀ sur l'ensemble des sites à l'exception de Calais où elle en constitue environ 1/3. Les sels marins sont également importants, avec des contributions variant entre 5% (Arrest) à presque ¼ de la masse des PM₁₀ (Calais). La combustion de fuel lourd apparaît aussi comme un important contributeur (16%) aux PM₁₀ pour le site de Calais.

Des plans d'actions limitant les émissions des espèces précurseurs de nitrate d'ammonium (ex : ammoniac par les sources agricoles et les oxydes d'azote par le trafic routier) permettraient de réduire l'impact de la source nitrate-rich, aussi bien durant les épisodes de dépassements que le reste de l'année.

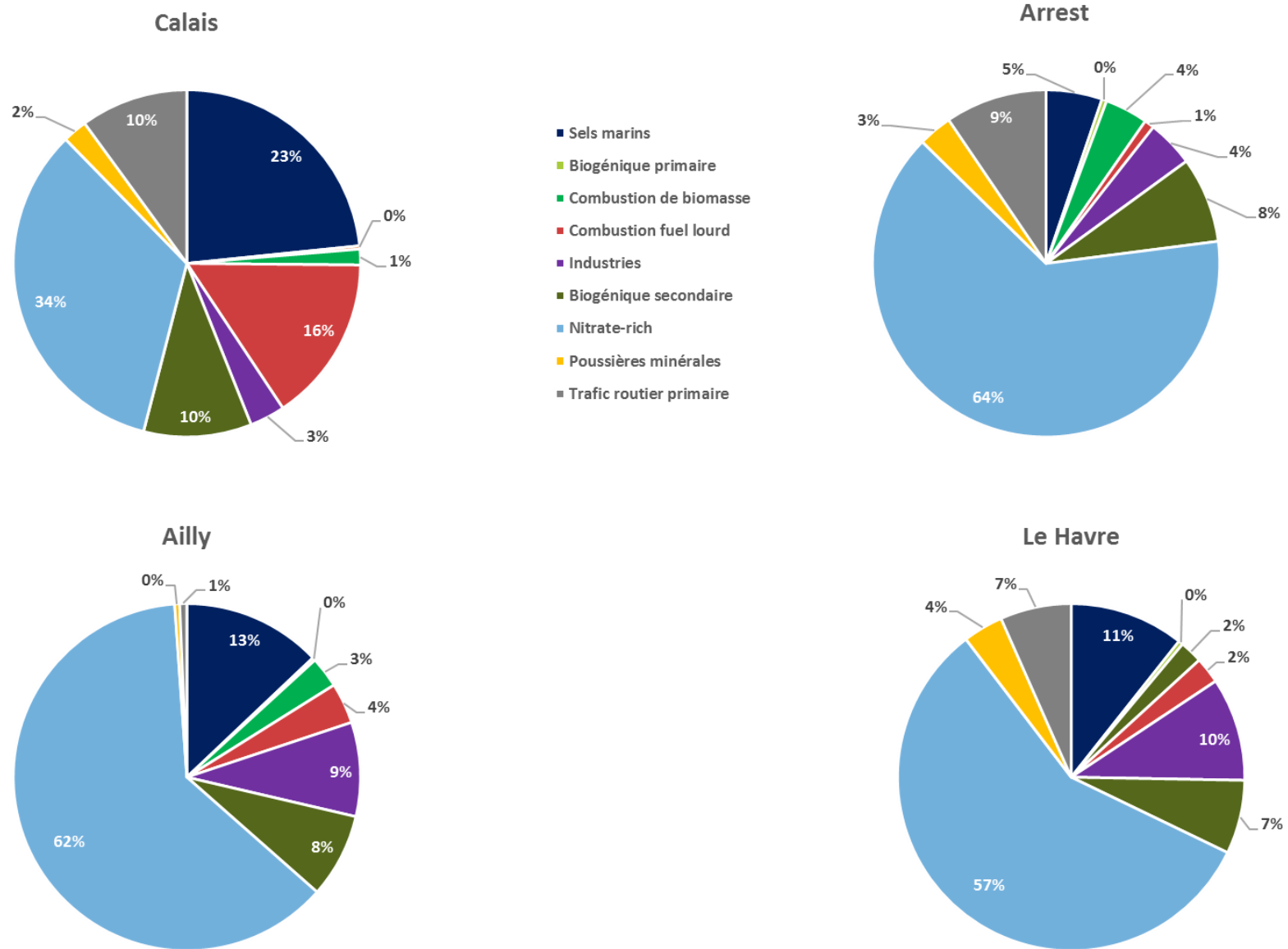


Figure 10 : Contribution moyenne des principales sources identifiées par la PMF pour les 4 sites étudiés. Les données prises en compte sont celles du 21 avril 2021.

5.4. Influence des masses d'air et origines géographiques des 4 sources majeures

Dans cette partie, l'influence des masses d'air et les origines géographiques des 4 sources majeures dans les PM10 sont discutées.

Pour les deux sources locales (combustion de biomasse et trafic routier primaire), les roses de pollution sont comparées entre sites. Pour les deux sources lointaines (nitrate-rich et sels marins frais), les rétrotrajectoires (72 heures) sont présentées pour mieux comprendre leurs origines géographiques historiques (3 jours avant l'observation sur un site).

Comment lire une rose de pollution ?

Une rose de pollution représente l'intensité de la pollution de l'air mesurée en fonction de la direction et de la vitesse du vent arrivant sur le site de mesure. Pour faciliter la lecture, nous positionnons le centre de la rose sur une carte à l'emplacement exact du site de mesure.

Cette représentation nous aide à identifier de quel secteur géographique provient le polluant mesuré sur le site. Au-delà de la direction du vent, des concentrations élevées proche du centre de la rose sont associées à des vents faibles et par conséquent à des sources plutôt locales. A l'inverse des concentrations fortes en périphérie de la rose sont à relier à des vents forts et donc à des sources plus lointaines.

5.4.1. Combustion de biomasse

La combustion de biomasse correspond principalement au chauffage au bois en hiver. En hiver, sa concentration est plus importante en période froide. Elle peut atteindre $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en moyenne journalière, à Arrest et Calais. A partir de mai, sa concentration est négligeable.

Les roses de pollution montrent que cette source est très locale, avec des maxima de concentrations associés uniquement aux vents faibles ($< 5 \text{ km/h}$).

Arrest est le site le plus impacté par cette source, probablement due à la forte utilisation de chauffage au bois dans les villages alentour. Le site d'Ailly est le moins impacté par cette source. A noter que ce site rural est excentré par rapport aux zones habitées et se trouve sur les hauteurs d'une falaise.

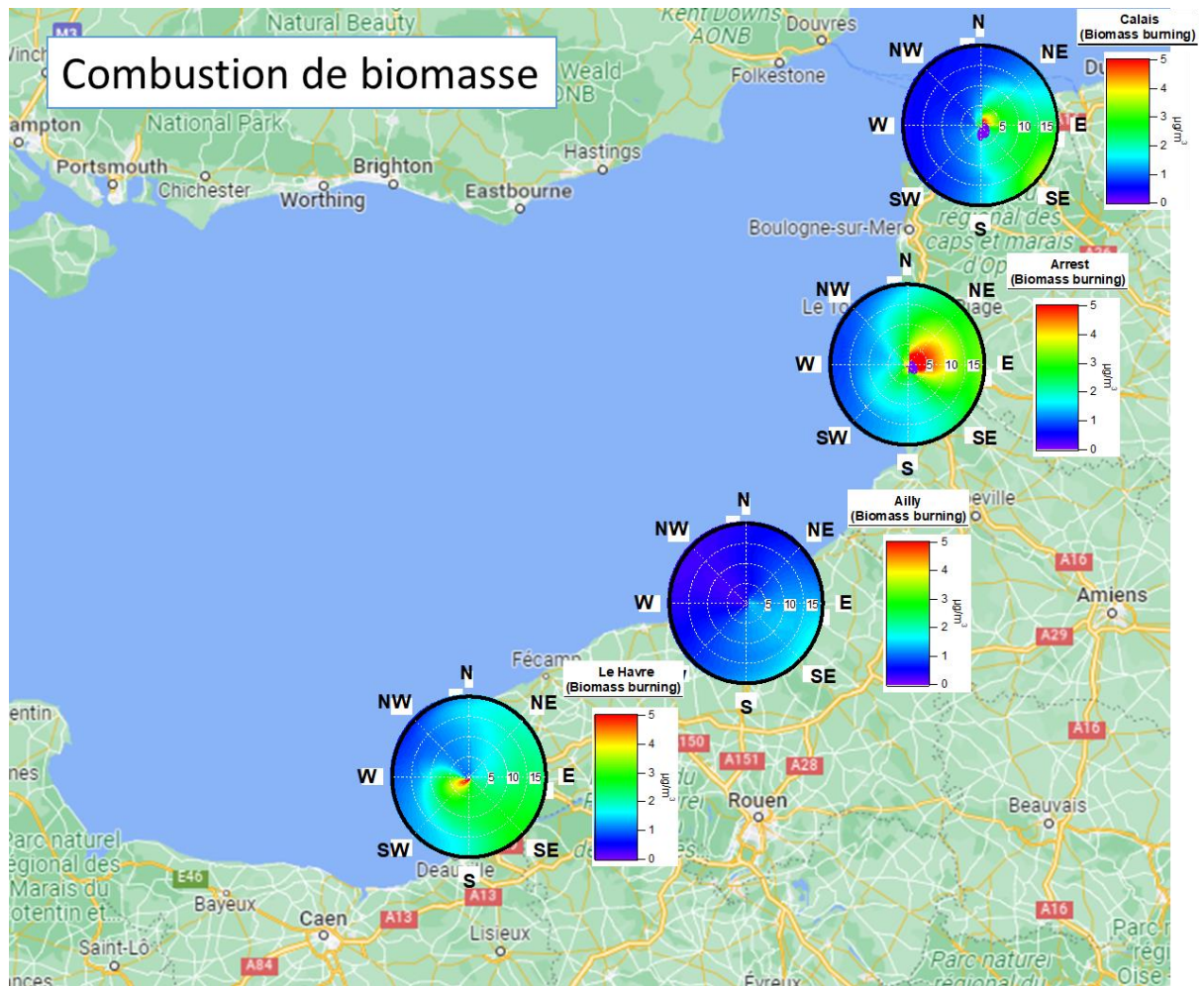


Figure 11 : Roses de pollution de la combustion de biomasse pour 4 sites étudiés

5.4.2. Trafic routier primaire

Le trafic routier primaire est caractérisé par la forte présence d'EC émis par les combustions de fuels fossiles. Ce facteur contient également différents éléments métalliques émis par l'usure de pneus et de freins. On peut donc considérer que ce facteur combine des émissions à l'échappement automobile ainsi qu'une partie des émissions hors-échappement.

Comme la combustion de biomasse, le trafic routier primaire constitue une source locale (présente principalement sur les sites urbains et par vent faible).

Calais montre une contribution à la concentration en PM10 issues du trafic routier primaire plus importante que les autres sites.

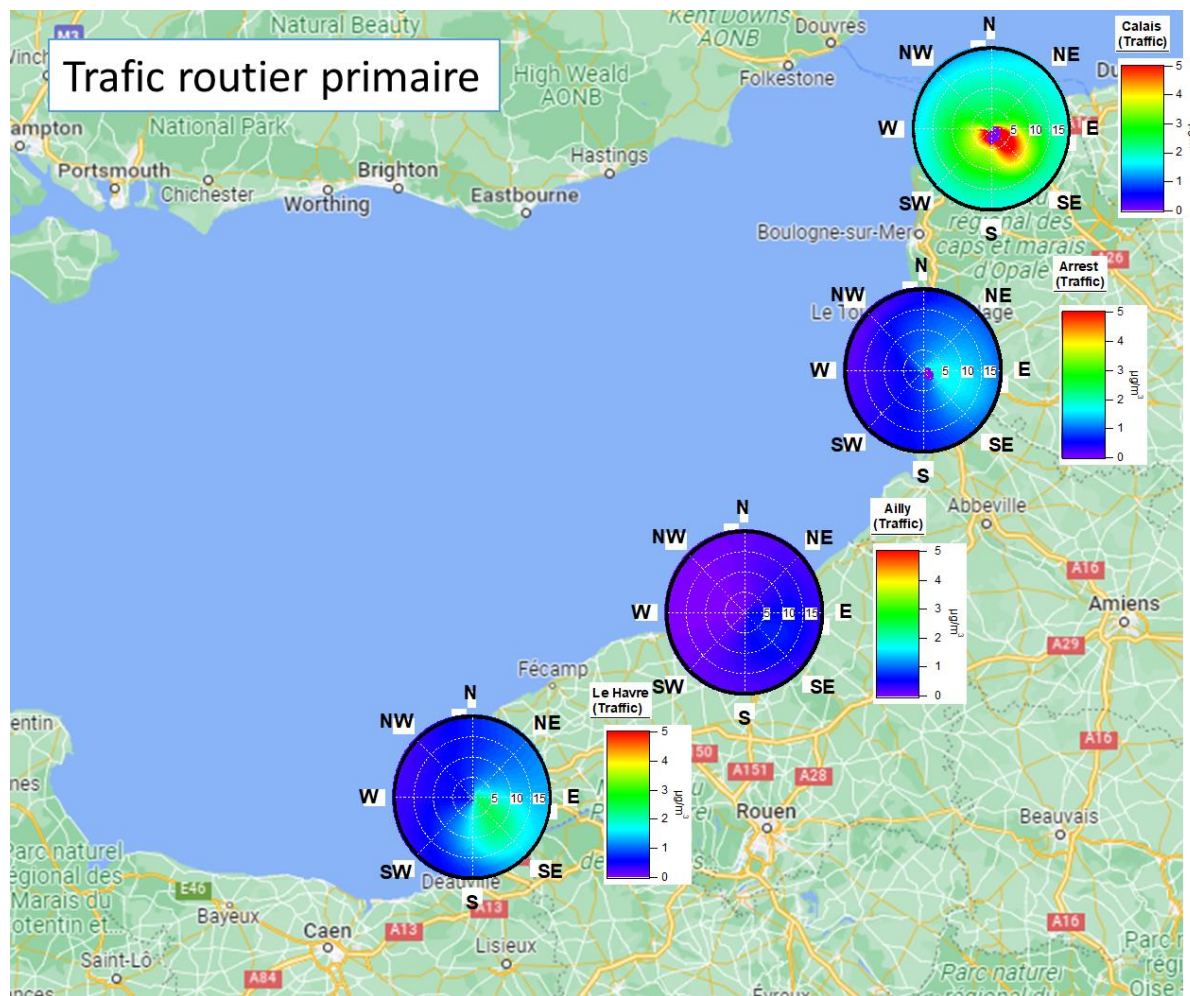


Figure 12 : Roses de pollution du trafic routier primaire pour 4 sites étudiés

5.4.3. Nitrate-rich

Cette source est caractérisée par la forte présence de NO_3^- et NH_4^+ indiquant la présence du nitrate sous forme de nitrate d'ammonium (NH_4NO_3). Le nitrate d'ammonium, formé dans l'atmosphère, résultant de la combinaison des oxydes d'azote (émis majoritairement par le trafic routier, le chauffage et l'industrie) et de l'ammoniac (émis principalement par les activités agricoles). Ce facteur contient également une partie de sulfate sous forme de sulfate d'ammonium ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$). Ainsi, cette source combine deux composés inorganiques secondaires importants : le nitrate d'ammonium et le sulfate d'ammonium.

Comment lire une carte de rétrotrajectoires ?

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

La Figure 13 montrent que l'origine géographique du nitrate-rich est similaire pour les quatre sites. Cette source provient principalement du Bénélux et de l'Europe de l'Est.

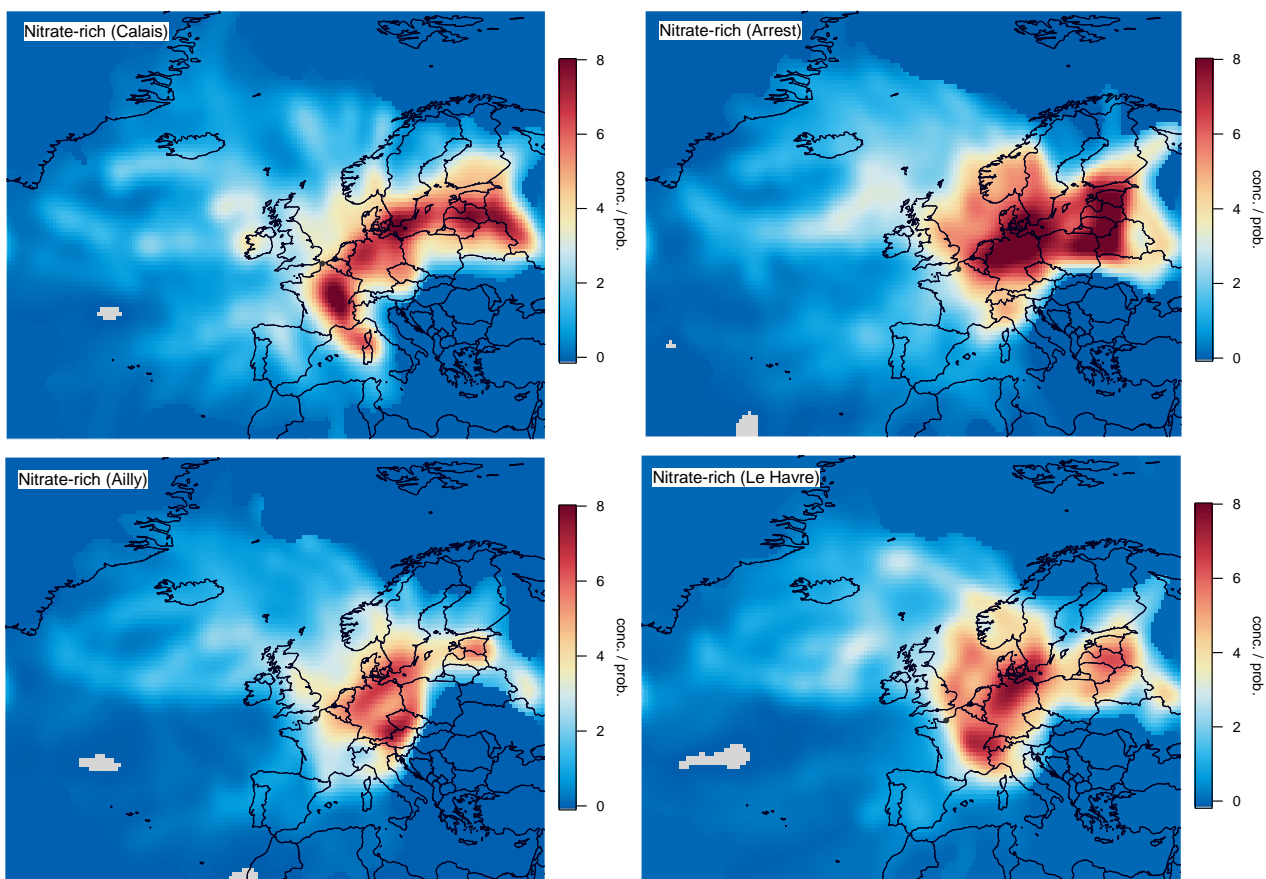


Figure 13 : rétrotrajectoires du nitrate-rich pour les 4 sites étudiés

5.4.4. Sels marins frais

Le facteur sels marins frais est caractérisé par la forte contribution de Sodium (Na), Chlorure (Cl) et Magnésium (Mg), qui sont des composés majeurs de l'eau de mer. Les concentrations maximales journalières sont à 15-20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à Calais et à Arrest, et autour de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à Ailly et au Havre.

Les rétrotrajectoires 72h montrent que les sels marins frais viennent principalement du nord de l'océan Atlantique. Calais est le site le plus directement impacté par cette source.

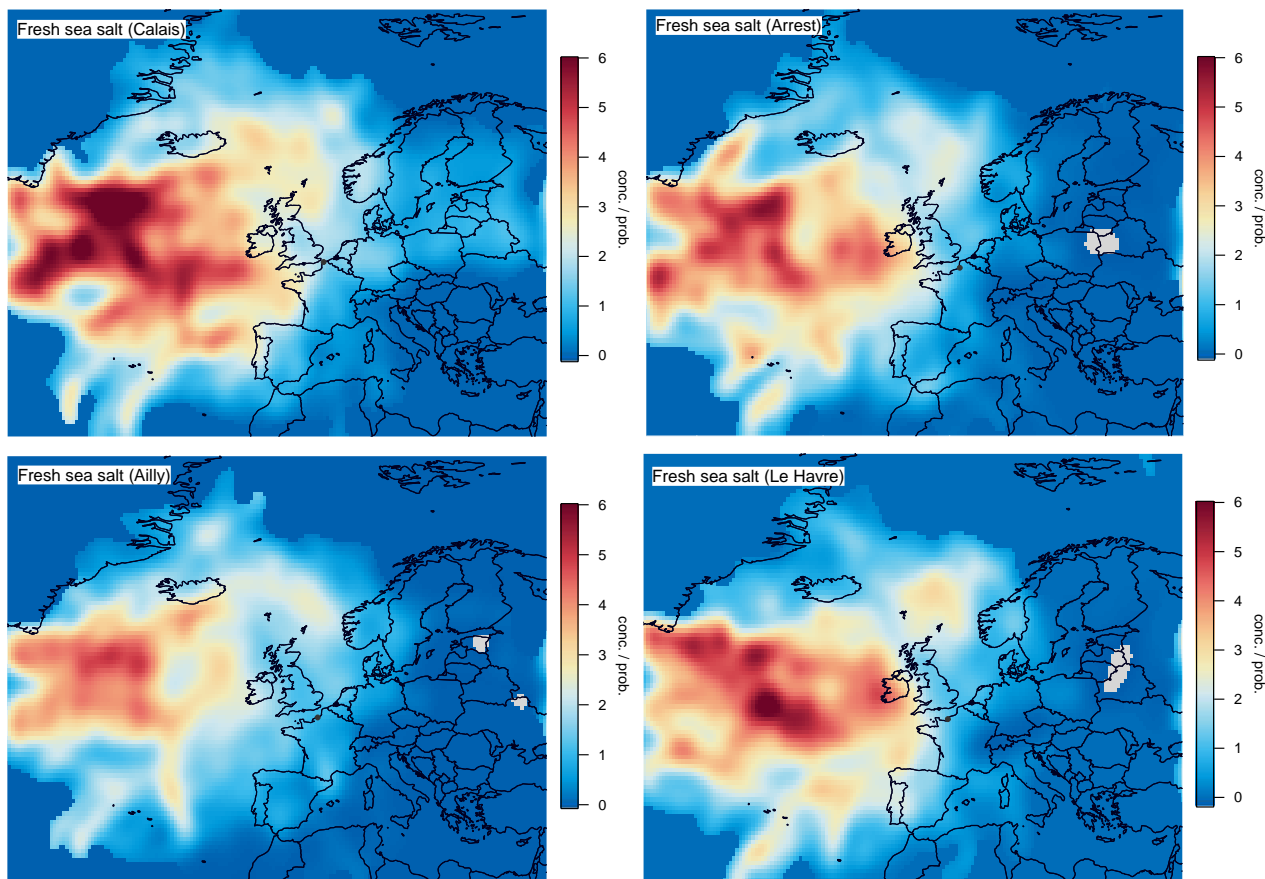


Figure 14 : rétrotrajectoires des sels marins frais pour les 4 sites étudiés

6. Quelles actions pour réduire certaines sources de particules mesurées en zone côtière ?

Comme nous l'avons vu précédemment, les sources de particules en suspension qui influencent les concentrations des 4 sites investigués sur l'ensemble de la période d'étude sont à la fois liées à **l'activité humaine** (sources anthropiques) mais aussi **naturelles**. Ces 2 types de sources sont, en moyenne, représentées à peu près à part égale (50 / 50). 5 sources se distinguent plus particulièrement :

- La source nitrate-rich qui est, en grande partie, associée aux émissions agricoles d'ammoniac sur l'Europe centrale et le Bénélux mais aussi nationales voire locales. Ces émissions se combinent à celles d'oxydes d'azote principalement liées au trafic automobile, maritime et à l'industrie pour former du nitrate d'ammonium, espèce secondaire susceptible de voyager sur de longues distances (plus ou moins stable sous forme particulaire selon les conditions météorologiques : température modérée élevée, humidité importante...).
- La combustion de biomasse essentiellement associée au chauffage en bois en période froide
- Le trafic automobile sur les sites urbains
- Les sels marins et les aérosols biogéniques secondaires d'origine naturelle.

Ce constat varie cependant selon les mois avec une importance accrue du chauffage au bois et de la source nitrate-rich entre février et avril. Ensuite le poids de ces sources diminue en même temps que les concentrations de PM10. La part de la source biogénique secondaire devient alors de plus en plus importante.

Les sels marins sont présents tous les mois de l'étude mais en concentration plus ou moins importante selon la direction des vents dominants (en provenance ou non de la mer).

La contribution du trafic routier sur les sites urbains n'est pas négligeable et s'observe sur l'ensemble de la période d'étude.

Enfin les parts des sources « combustion de fuel lourd » et « industrie » sont moindres même dans les villes industrialo-portuaires du Havre et de Calais. Ce constat peut peut-être s'expliquer par la hauteur des sources d'émissions (cheminées) et/ou par le positionnement des stations de mesure qui ne sont pas fréquemment sous les vents de ces sources comme au Havre. Il ne faut donc pas complètement exclure une influence plus marquée de ces sources sur d'autres sites.

Lors des jours où des concentrations plus élevées ont été enregistrées, la proportion des sources anthropiques à la masse des PM10 est plus importante qu'en moyenne. C'est le cas notamment durant l'épisode de pollution des 2-3 mars 2021.

Hormis pour les sources naturelles qui étaient moins bien caractérisées dans de précédentes études, les autres sources sont déjà bien connues et des actions ont souvent déjà été engagées pour leur réduction. Il s'agira de poursuivre ces actions et potentiellement de les intensifier afin de réduire les concentrations de PM10 en zone côtière.

Ainsi la baisse des PM10 liée à la source « **nitrate-rich** » passe notamment par des actions à différentes échelles (européenne, nationale, expérimentation locale) concernant les pratiques agricoles afin par exemple de tendre vers une diminution de l'utilisation des engrais azotés de synthèse. Il s'agit aussi de poursuivre la mise en place de bonnes pratiques comme l'enfouissement systématique des amendements liquides (lisiers...), l'ajustement de l'alimentation des animaux d'élevages, des pratiques d'élevages, de la gestion du stockage des

déchets (couverture des fosses de lisiers...). Des guides existent comme celui de l'ADEME de 2020 (guide des bonnes pratiques agricoles pour l'amélioration de la qualité de l'air).

Concernant la source « **trafic routier** » dont les émissions de NOx peuvent aussi contribuer localement à la formation de particules secondaires (source « nitrate-rich »), le renouvellement progressif du parc automobile par des véhicules moins polluants (encouragé par des aides nationales et locales à l'achat de véhicules plus récents) permettra de réduire en partie les émissions de cette source. Cela peut aussi passer par la limitation de l'usage de la voiture individuelle en ville via le développement de modes de transports doux (augmentation de l'offre de transport en commun, création/prolongation de pistes cyclables, incitation au co-voiturage, offre d'auto-partage...). En cas de prévision d'épisodes de pollution aux PM10, les restrictions de circulation et baisses de vitesses limitent les émissions de polluants primaires en conditions météorologiques favorables à l'accumulation des polluants.

Enfin les actions de réduction relatives aux sources « **trafic maritime** » et « **industries** » peuvent être aussi utiles même si ces sources apparaissent minoritaires dans le cadre de cette étude sachant que d'autres sites pourraient potentiellement être plus exposés à celles-ci. Par ailleurs ces sources émettent des NOx et SOx ; gaz qui participent au processus de formation du nitrate d'ammonium et du sulfate d'ammonium et favorisent la formation de particules en suspension associées à la source nitrate-rich. Ainsi les investissements permettant la réduction des PM, des NOx et des SOx dans le domaine de l'industrie et en particulier des secteurs du raffinage et de la production d'énergie sont de nature à contribuer à la baisse des concentrations de PM10. Les réflexions sur la décarbonation de l'industrie peuvent aussi aller dans ce sens.

Concernant le trafic maritime, l'utilisation de carburants de meilleure qualité comme cela est déjà le cas aux abords des ports et l'électrification progressive des quais font partie du mix de solutions permettant de réduire durablement les teneurs en PM10 dans l'air et notamment sur le littoral.

7. Conclusion et perspectives

En Hauts-de-France et en Normandie, il a été observé entre 2018 et 2019, une augmentation du nombre de jours de dépassement de la valeur réglementaire en PM₁₀ (> 50 µg/m³ en moyenne journalière) pour une majorité des stations de fond en zone côtière. C'est dans ce contexte qu'en 2021, Atmo Hauts-de-France et Atmo Normandie avec l'appui du LCSQA et de l'IGE, ont mis en place une étude sur les épisodes des PM₁₀ en zone littorale afin d'améliorer la compréhension de leurs causes.

Les 4 sites choisis pour cette étude sont, sur la période d'étude couvrant la fin de l'hiver et le printemps, fortement impactés par une contribution des sels marins et des aérosols secondaires enrichis en nitrate d'ammonium (nitrate-rich) à la masse des PM₁₀. Ces deux sources représentent ensemble en moyenne entre 51 et 58% de la masse des particules PM₁₀ selon les sites.

Les épisodes de pollution

Le nitrate-rich reste la source principale durant les 3 principaux épisodes de pollution étudiés (jusqu'à 64% des PM₁₀). Deux sources locales, la combustion de biomasse (jusqu'à 31% des PM₁₀) et le trafic routier primaire (jusqu'à 30% des PM₁₀) jouent également un rôle important lors de ces épisodes.

4 sources importantes

Le nitrate-rich (représentant principalement les **aérosols inorganiques secondaires**) provient majoritairement des directions Nord-Est et Est. Les stations en Hauts-de-France montrent une double origine (locale et plus lointaine) avec des concentrations plus élevées que pour les deux stations normandes.

Les sels marins frais sont associés aux vents forts et correspondent à la localisation géographique et l'exposition de la mer de chaque station de mesure.

Le **trafic routier primaire** et la **combustion de biomasse** sont deux sources très locales.

Le site d'Arrest est le site le plus impacté par la combustion de biomasse due à l'utilisation de chauffage au bois dans les villages aux alentours. Calais montre une concentration plus importante du trafic routier primaire que les autres sites.

Calais

A Calais, les concentrations de PM₁₀ mesurées sont les plus élevées parmi les quatre sites, notamment pour la période froide (février-mars). Ces particules sont issues à la fois de sources locales et lointaines.

Au mois de mars, les sels marins et le nitrate-rich contribuent ensemble jusqu'à 30% des PM₁₀ mesurées.

Au niveau local, le trafic routier et l'industrie sont les deux sources locales les plus importantes avec une contribution moyenne à 14% et à 8%, respectivement. La concentration maximale du trafic routier est observée au mois de juin, ce qui pourrait être liée à un trafic transmanche (ferries...) plus intense à cette période de l'année.

Arrest

Arrest est localisé à environ 10 km de la façade maritime. C'est donc le site le plus éloigné de l'étude par rapport à la mer.

Ce site semble très influencé par le chauffage au bois, avec une contribution jusqu'à 17% en moyenne. Cette source contribue à 4 µg/m³ des particules PM₁₀ au mois de février et jusqu'à 8 µg/m³ en cas d'épisode de pollution.

Il est aussi plus impacté par les sources biogéniques (primaire et secondaire) en été, jusqu'à 35 % des particules PM₁₀.

Phare d'Ailly

Le phare d'Ailly est une station rurale de pollution de fond en Normandie. Les concentrations en PM₁₀ mesurées sur ce site sont généralement plus faibles que sur les 3 autres sites. Il semble majoritairement impacté par les polluants transportés à longue distance (30% de sels marins, 28% de nitrate-rich et 18% de biogéniques secondaires). Au niveau local, le chauffage au bois représente entre 11 et 22 % de la masse des particules PM₁₀ mesurées entre les mois février et mars.

Le Havre

Sur la station urbaine du Havre, située en hauteur de la ville, les concentrations mesurées pendant cette étude sont plus faibles que celles enregistrées sur les sites des Hauts-de-France et cela malgré des émissions locales plus importantes en PM₁₀ (1327 tonnes calculées en 2018).

Au niveau local, le chauffage au bois est la principale source de PM₁₀, avec une contribution jusqu'à 28% en moyenne mensuelle. Le trafic routier et les activités industrielles représentent ensemble en moyenne mensuelle entre 9 et 16% de la masse des particules PM₁₀.

En terme d'actions, celles déjà engagées sur l'agriculture, le trafic routier, le chauffage au bois, l'industrie et le trafic maritime à court et moyen terme et détaillées dans le chapitre 6 sont à poursuivre voire à amplifier de manière à ce que la baisse des concentrations de PM₁₀ (en cas d'épisode de pollution mais aussi de façon chronique) tendent vers les seuils recommandés par l'Organisation Mondiale de la Santé.

En perspectives, compte-tenu de la complexité chimique des particules atmosphériques (PM), la mesure de leur potentiel oxydant (PO), c'est-à-dire leur capacité à dégrader les antioxydants et donc à endommager les cellules et les tissus de l'organisme, pourrait être un meilleur indicateur des impacts des PM sur la santé humaine. C'est pour cette raison que l'IGE (Institut des Géosciences de l'Environnement) a souhaité ajouter ce type de mesure à l'étude.

L'exploitation des résultats du PO est encore en cours avec pour objectif de permettre de faire le lien entre les différentes sources identifiées et leur impact sanitaire.

Annexes

Annexe 1 : Glossaire

µg/m³ : microgramme de polluant par mètre cube d'air. $1 \mu\text{g}/\text{m}^3 = 0,001 \text{ mg}/\text{m}^3 = 0,001$ milligramme de polluant par mètre cube d'air.

µm : micromètre. $1 \mu\text{m} = 0,001 \text{ mm} = 0,001$ millimètre.

AASQA : Association Agréée pour la Surveillance de la Qualité de l'Air.

ADEME : Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie.

Anthropique : Relatif à l'activité humaine. Qualifie tout élément provoqué directement ou indirectement par l'action de l'homme.

As : arsenic.

Biogénique : par des processus biologiques conduisant à l'émission de pollens, bactéries, virus ou fragments de plantes, ou formées à partir de composés organiques volatils (COV) d'origine naturelle.

Cd : cadmium.

CITEPA : Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique.

Concentration : la concentration d'un polluant représente la quantité du composé présent dans l'air et s'exprime en masse par mètre cube d'air. Les concentrations des polluants caractérisent la qualité de l'air que l'on respire.

Conditions de dispersion : ensemble de conditions atmosphériques permettant la dilution des polluants dans l'atmosphère et donc une diminution de leurs concentrations (vent, température, pression, rayonnement...).

COVnM : Composés Organiques Volatils non Méthaniques

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement.

Emissions : rejets d'effluents gazeux ou particulaires dans l'atmosphère issus d'une source anthropique ou naturelle (exemple : cheminée d'usine, pot d'échappement, feu de bioamasse...).

EPCI : Etablissement Public de Coopération Intercommunale.

Episode de pollution : période pendant laquelle une procédure d'information ou d'alerte est déclenchée traduisant le dépassement du niveau d'information et de recommandations voire du niveau d'alerte pour l'un ou plusieurs des polluants suivants : SO₂, NO₂, O₃ et PM10.

INSEE : Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques.

LCSQA : Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air.

mg/m³ : milligramme de polluant par mètre cube d'air. $1 \text{ mg}/\text{m}^3 = 0,001 \text{ g}/\text{m}^3 = 0,001$ gramme de polluant par mètre cube d'air.

ng/m³ : nanogramme de polluant par mètre cube d'air. $1 \text{ ng}/\text{m}^3 = 0,000001 \text{ mg}/\text{m}^3 = 0,000001$ milligramme de polluant par mètre cube d'air.

Ni : nickel.

NH₃ : Ammoniac

NO₂ : dioxyde d'azote.

NO_x : oxydes d'azote.

O₃ : ozone.

Objectif à long terme : niveau d'ozone à atteindre à long terme et à maintenir, sauf lorsque cela n'est pas réalisable par des mesures proportionnées, afin d'assurer une protection efficace de la santé humaine et de l'environnement dans son ensemble.

Objectif de qualité : niveau à atteindre à long terme et à maintenir, sauf lorsque cela n'est pas réalisable par des mesures proportionnées, afin d'assurer une protection efficace de la santé humaine et de l'environnement dans son ensemble.

Pb : plomb.

PM10 : particules en suspension de taille inférieure ou égale à 10 µm.

PM2.5 : particules en suspension de taille inférieure ou égale à 2,5 µm.

Polluant primaire : polluant directement émis par une source donnée.

Polluant secondaire : polluant non émis directement, produit de la réaction chimique entre plusieurs polluants présents dans l'atmosphère.

PPA : Plan de Protection de l'Atmosphère

PRSQA : Programme Régional de Surveillance de la Qualité de l'Air.

SECTEN : SECTeurs Economiques et éNergie.

SO₂ : dioxyde de soufre.

Valeur cible : niveau à atteindre, dans la mesure du possible, dans un délai donné, et fixé afin d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine ou l'environnement dans son ensemble.

Valeur limite : niveau à atteindre dans un délai donné et à ne pas dépasser, et fixé sur la base des connaissances scientifiques afin d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine ou sur l'environnement dans son ensemble.

Annexe 2 : Description de la méthode PMF

Principe de la méthode

Le modèle PMF (*Positive Matrix Factorization*) est une méthode d'analyse factorielle multivariée qui permet de quantifier la contribution des principales sources⁶. Cet outil statistique est largement utilisé pour l'analyse de jeux de données PM à l'échelle mondiale^{7,8,9}.

La méthode est basée sur l'équation (2) :

$$X = G \times F + E \quad (2)$$

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 :

$$Q = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(\frac{e_{ij}}{\sigma_{ij}} \right)^2 \quad (3)$$

Où e_{ij} (égale à la matrice E) et σ_{ij} sont des matrices qui correspondent aux résidus du modèle et aux incertitudes de mesure, respectivement.

Démarche d'étude

Le logiciel EPA PMF version 5.0 a été utilisé pour cette étude.

⁶ Pentti Paatero and Unto Tapper, "Analysis of Different Modes of Factor Analysis as Least Squares Fit Problems," *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 18, no. 2 (February 1, 1993): 183–94, [https://doi.org/10.1016/0169-7439\(93\)80055-M](https://doi.org/10.1016/0169-7439(93)80055-M).

⁷ Laurent Y. Alleman et al., "PM10 Metal Concentrations and Source Identification Using Positive Matrix Factorization and Wind Sectoring in a French Industrial Zone," *Atmospheric Research* 96, no. 4 (June 1, 2010): 612–25, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.02.008>.

⁸ Eugene Kim, Philip K. Hopke, and Eric S. Edgerton, "Source Identification of Atlanta Aerosol by Positive Matrix Factorization," *Journal of the Air & Waste Management Association* 53, no. 6 (June 1, 2003): 731–39, <https://doi.org/10.1080/10473289.2003.10466209>.

⁹ Yan Cheng et al., "PM2.5 and PM10-2.5 Chemical Composition and Source Apportionment near a Hong Kong Roadway," *Particology* 18 (February 1, 2015): 96–104, <https://doi.org/10.1016/j.partic.2013.10.003>.

1) Approche PMF mono-site

Base de données utilisée

	Arrest	Calais	Ailly	Havre
Strong	PM10recons, OC*, EC Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Na ⁺ , NH ₄ ⁺ , K ⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺ MSA, 3-MBTCA Levoglucozan, Mannosan, Polyols Al, As, Cd, Cs, Cu, Fe, Mn, Pb, Rb, Se, Sr, Ti, V	PM10recons, OC*, EC Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Na ⁺ , NH ₄ ⁺ , K ⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺ MSA, 3-MBTCA Levoglucozan, Mannosan, As, Ba, Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Pb, Rb, Se, Sr, Ti, V	PM10recons, OC*, EC Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Na ⁺ , NH ₄ ⁺ , K ⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺ MSA, 3-MBTCA Levoglucozan, Mannosan, Polyols Al, As, Cd, Mn, Pb, Rb, Se, Sr, V	PM10recons, OC*, EC Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Na ⁺ , NH ₄ ⁺ , K ⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺ MSA, 3-MBTCA Levoglucozan, Mannosan, Polyols Al, As, Cd, Cu, Fe, Mn, Pb, Rb, Se, Sr, Ti, V
Weak	Ba, Co, Ni, Zn	Al, Ni, Zn	Ba, Co, Cu, Fe, Ni, Ti, Zn	Ba, Co, Ni, Zn
Bad	Cs	Cs, Polyols	Cs	Cs, Polyols

OC : (OC = OC – [levoglucozan/1.25 + sorbitol/2.5 + mannitol/2.5 + arabitol/2.5])

Dates exclues pour les 4 sites (valeurs extrêmes) :

Arrest	Calais	Ailly	Le Havre
12/02/2021	04/02/2021	22/05/2021	21/02/2021
28/04/2021	18/02/2021		30/03/2021
30/04/2021	01/03/2021		31/03/2021
04/06/2021	02/03/2021		
	03/03/2021		
	30/03/2021		
	31/03/2021		
	01/06/2021		
	02/06/2021		

Contraintes chimiques spécifiques définies :

Factor	Element	Type	Value
Biomass burning	Levoglucosan	Pull Up Maximally	%dQ 0.50
Biomass burning	Mannosan	Pull Up Maximally	%dQ 0.50
Primary biogenic	Polyols	Pull Up Maximally	%dQ 0.50
Primary biogenic	Levoglucosan	Set to Zero	0
Primary biogenic	Mannosan	Set to Zero	0
Secondary oxidation	3-MBTCA	Set to Zero	0
MSA rich	MSA	Pull Up Maximally	%dQ 0.50
Dust	Ti	Pull Up Maximally	%dQ 0.50
HFO	V/Ni	3,4	%dQ 0.50
Traffic	Levoglucosan	Set to Zero	0
Traffic	Mannosan	Set to Zero	0
Traffic	MSA	Set to Zero	0
Traffic	Ba	Pull Up Maximally	%dQ 0.50
Traffic	Cu	Pull Up Maximally	%dQ 0.50
Traffic	Zn	Pull Up Maximally	%dQ 0.50
Traffic	Pb	Pull Up Maximally	%dQ 0.50
Industrial	Co	Pull Up Maximally	%dQ 0.50
Industrial	As	Pull Up Maximally	%dQ 0.50
Industrial	Mn	Pull Up Maximally	%dQ 0.50
Industrial	Cd	Pull Up Maximally	%dQ 0.50

2) Approche PMF multi-sites

Base de données utilisée

Multi-site	
Strong	PM10recons, OC*, EC Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} MSA, 3-MBTCA Levoglucosan, Mannosan, Polyols Al, As, Cd, Cs, Cu, Fe, Mn, Pb, Rb, Se, Sr, Ti, V
Weak	Ba, Co, Ni, Zn

OC : (OC = OC – [levoglucosan/1.25 + sorbitol/2.5 + mannitol/2.5 + arabitol/2.5])

Dates exclues pour les 4 sites (valeurs extrêmes)

Toutes les dates sont utilisées pour cette démarche

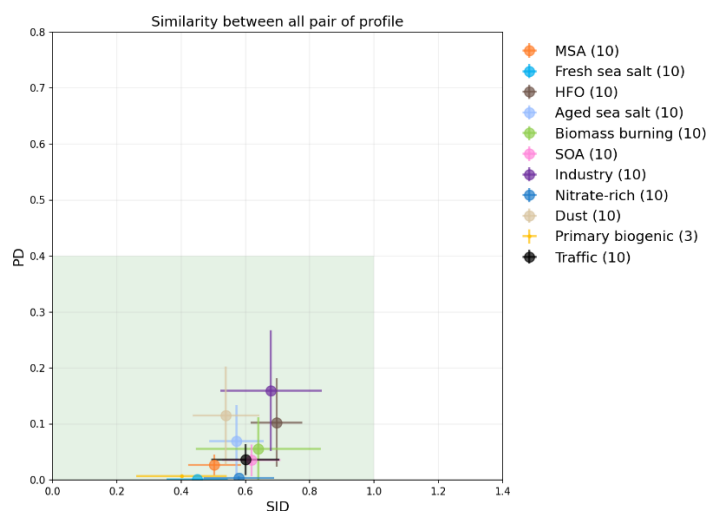
Contraintes chimiques spécifiques définies :

Factor	Element	Type	Value
Biomass burning	Levoglucosan	Pull Up Maximally	%dQ 0.50
Biomass burning	Mannosan	Pull Up Maximally	%dQ 0.50
MSA rich	MSA	Pull Up Maximally	%dQ 0.50
Secondary oxidation	3-MBTCA	Pull Up Maximally	%dQ 0.50
Traffic	Ca ²⁺	Pull Down Maximally	%dQ 0.50
Primary biogenic	Polyols	Pull Up Maximally	%dQ 0.50
Primary biogenic	EC	Pull Down Maximally	%dQ 0.50
Primary biogenic	Levoglucosan	Set to Zero	0
Primary biogenic	Mannosan	Set to Zero	0

Annexe 3 : Comparaison des résultats obtenus par les approches PMF mono-site et multi-site multisites

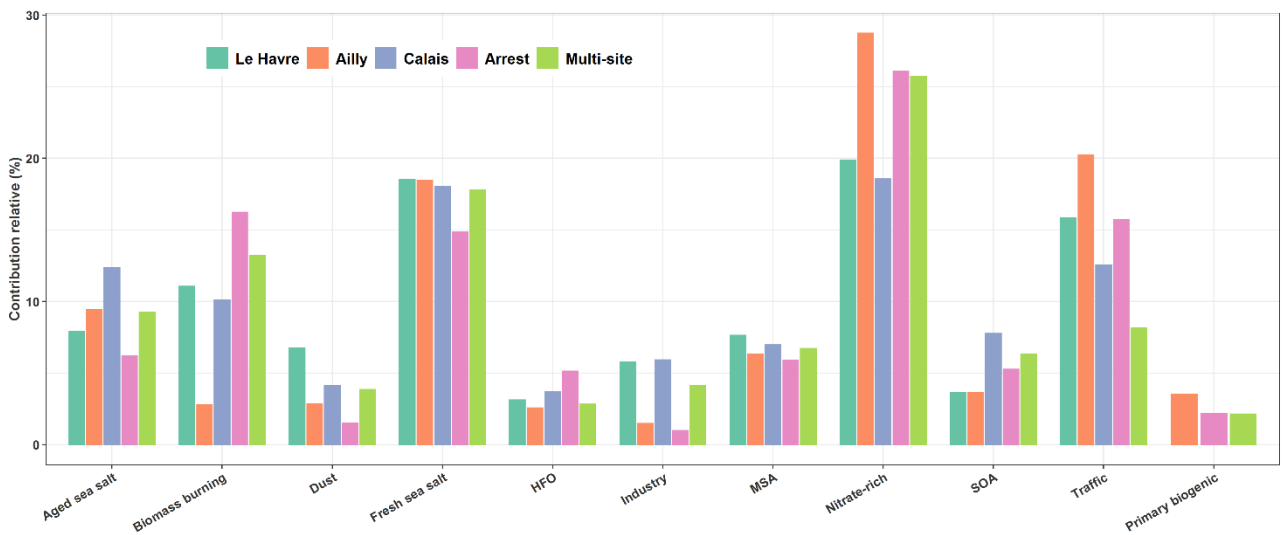
Une question récurrente lors de l'utilisation de résultats de PMF est de savoir si les profils de sources obtenus par différentes études et/ou sur différents sites sont comparables d'un point de vue géochimique. Les similitudes entre les profils chimiques de sources obtenus avec les PMF sont habituellement évaluées à travers l'analyse conjointe de deux métriques : la distance de Pearson (PD) et la distance identitaire standardisée (SID). Deux profils chimiques de sources sont généralement considérés comme similaires si leur PD et SID sont respectivement inférieurs à 0,4 et 1 (zone symbolisée par un rectangle vert dans la Figure ci-dessous).

La Figure suivante présente la moyenne et l'écart-type des deux métriques (PD et SID) pour toutes les combinaisons possibles entre paires de profils de source identiquement nommées. La Figure suivante montre une forte similitude géochimique entre les différents profils sur différents sites. Les profils « Industries » présentent la plus grande variabilité inter-sites ; cette observation est cohérente avec la diversité des activités industrielles sur nos régions.

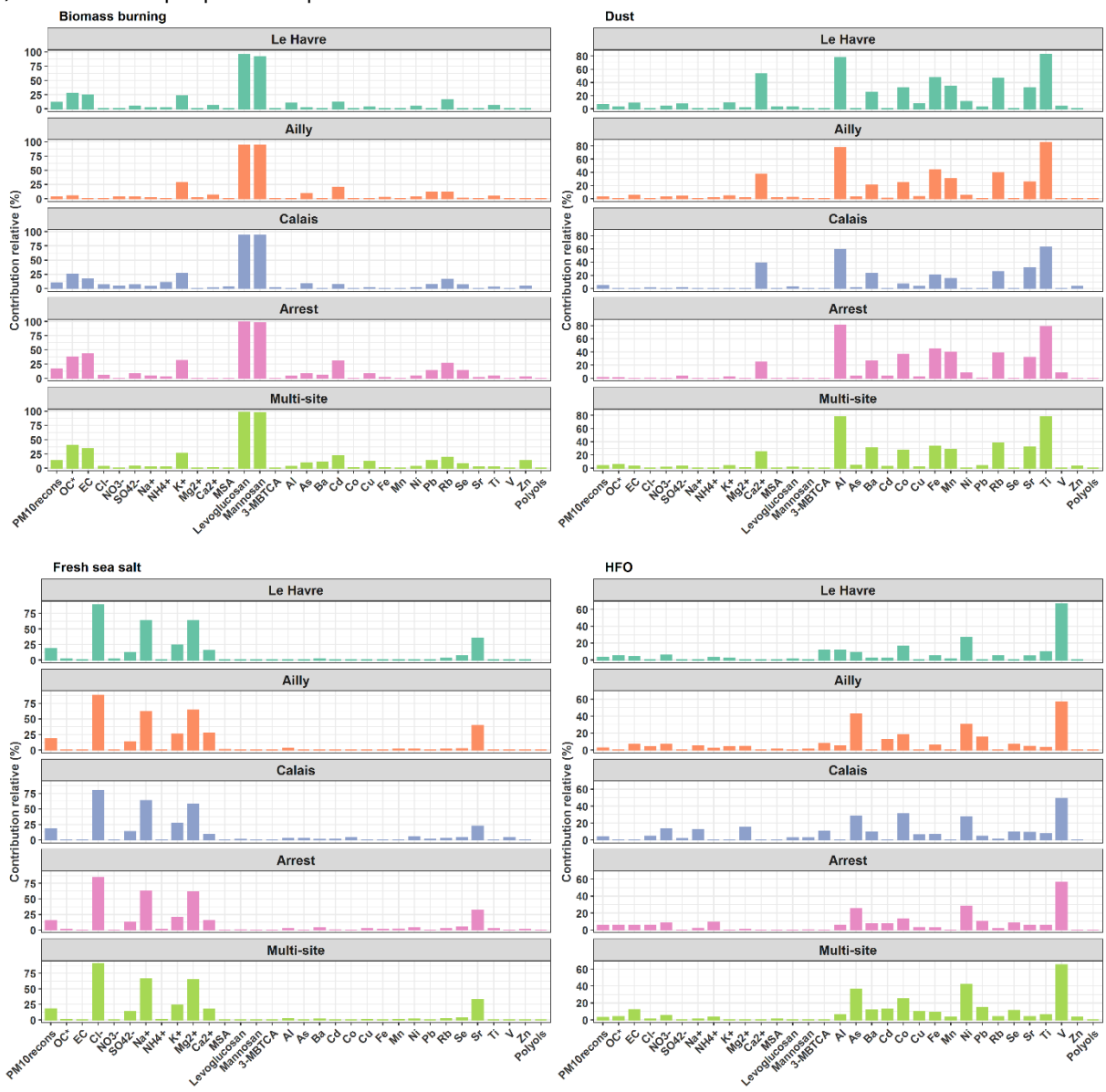


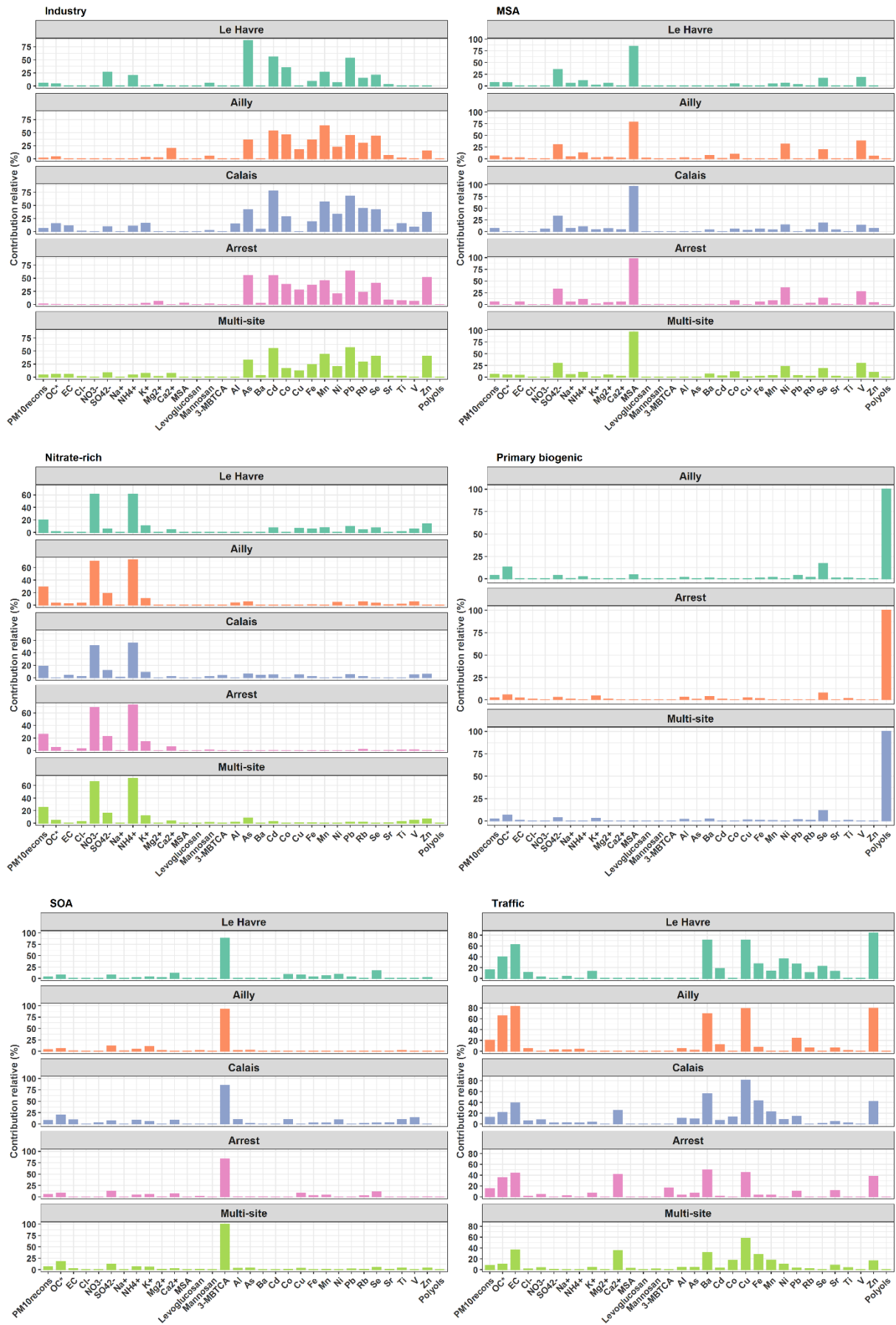
Comparaison des paires des profils appartenant à une même catégorie de source dans cette étude. La moyenne (cercles) et l'écart-type (barre d'erreur) pour chaque catégorie de source identifiée sont représentées. Le rectangle vert représente la limite au-delà de laquelle les profils chimiques des sources présentent de réelles différences. Les valeurs entre parenthèses indiquent le nombre de paires de profils de sources pris en compte.

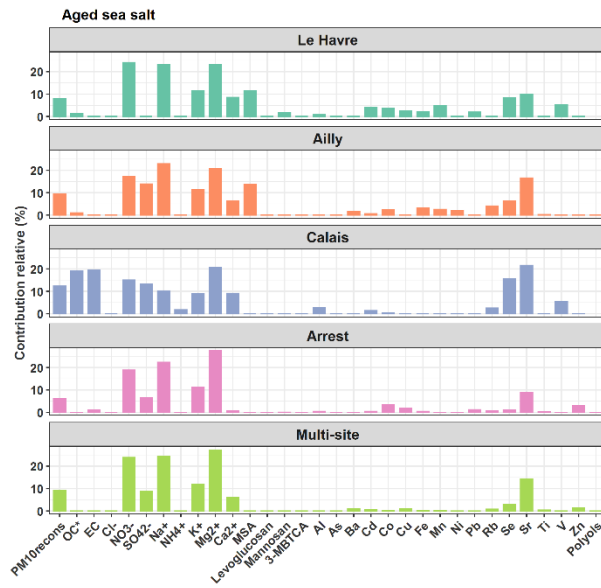
1) Contribution relative des particules PM10 par source



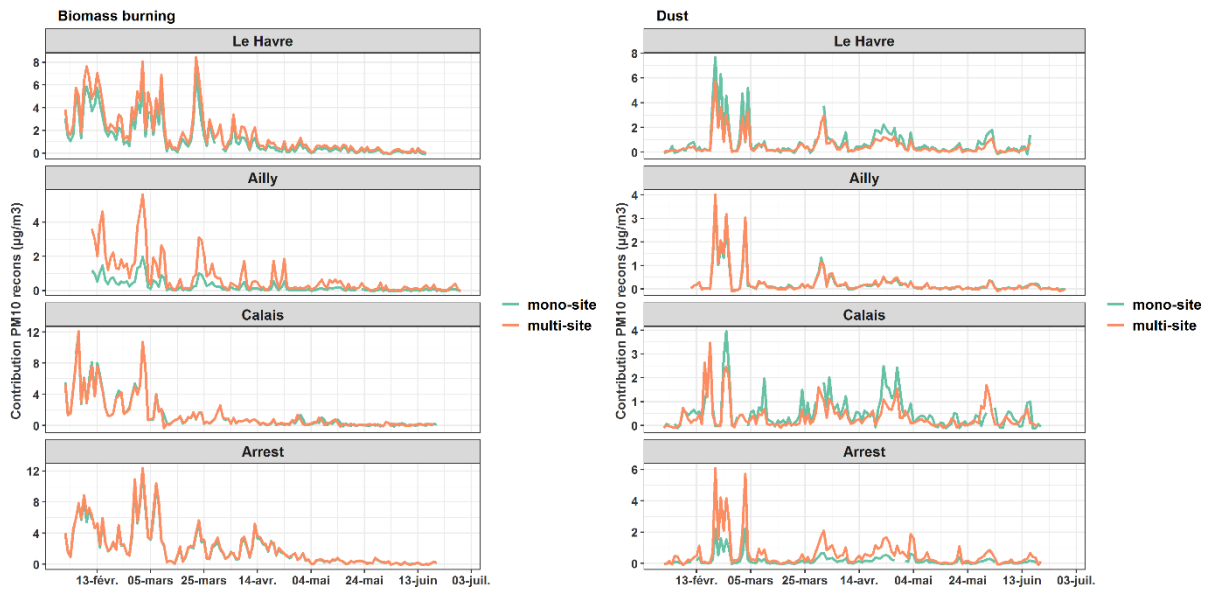
2) Profil chimique pour chaque source

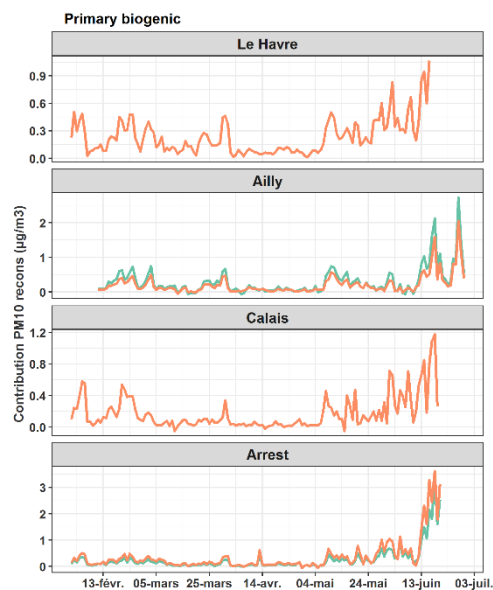
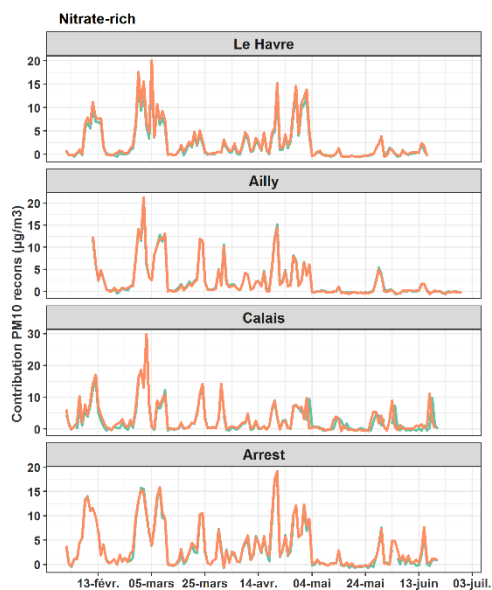
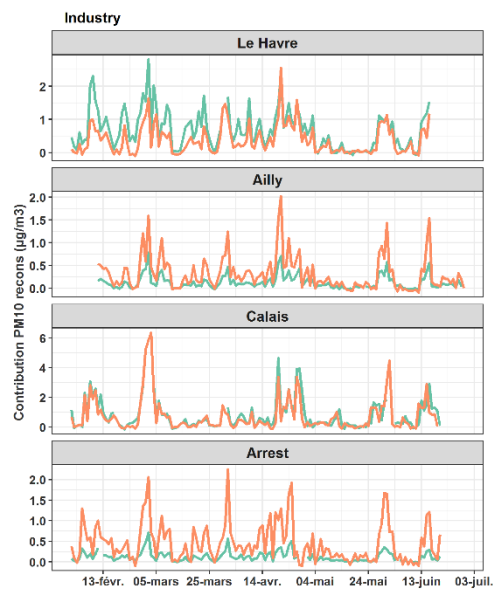
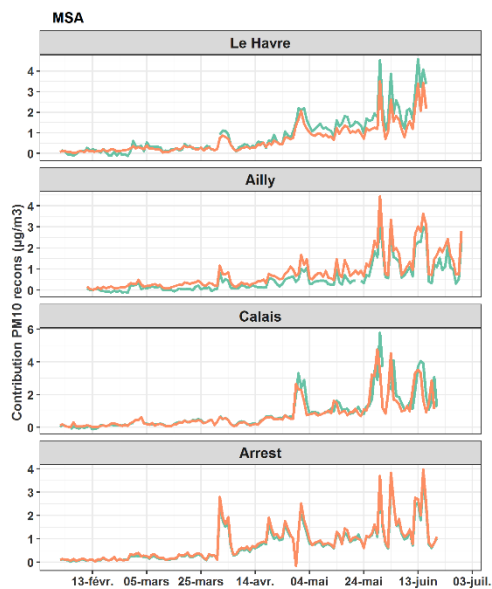
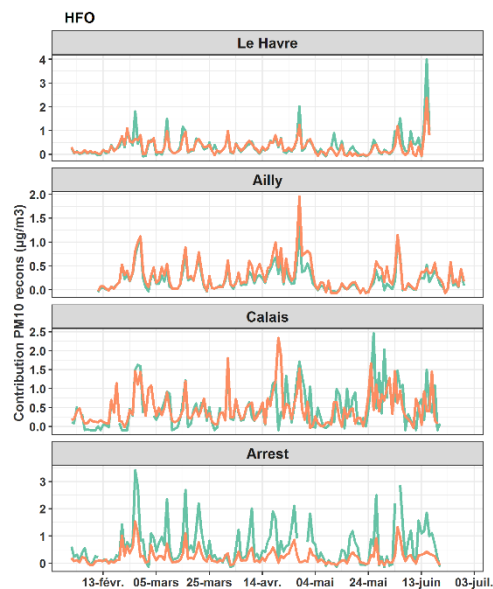
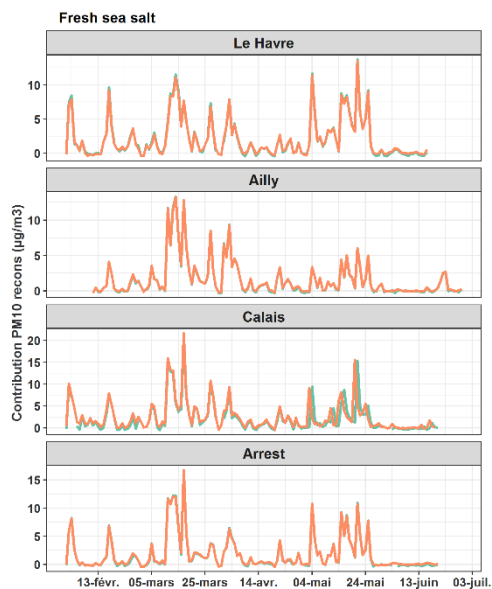


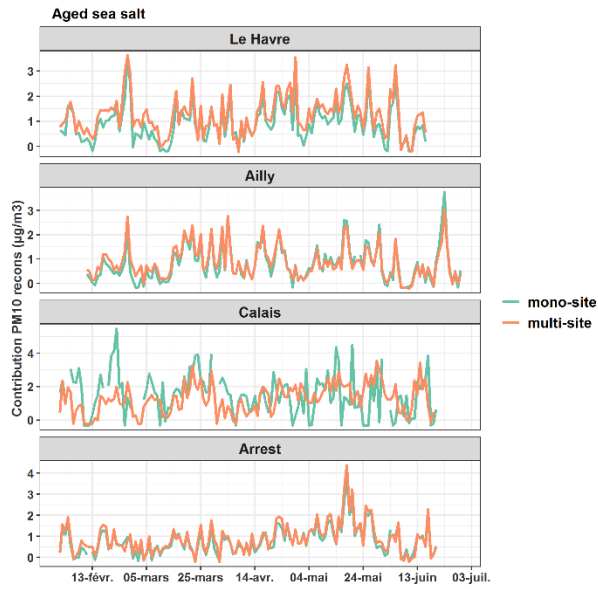
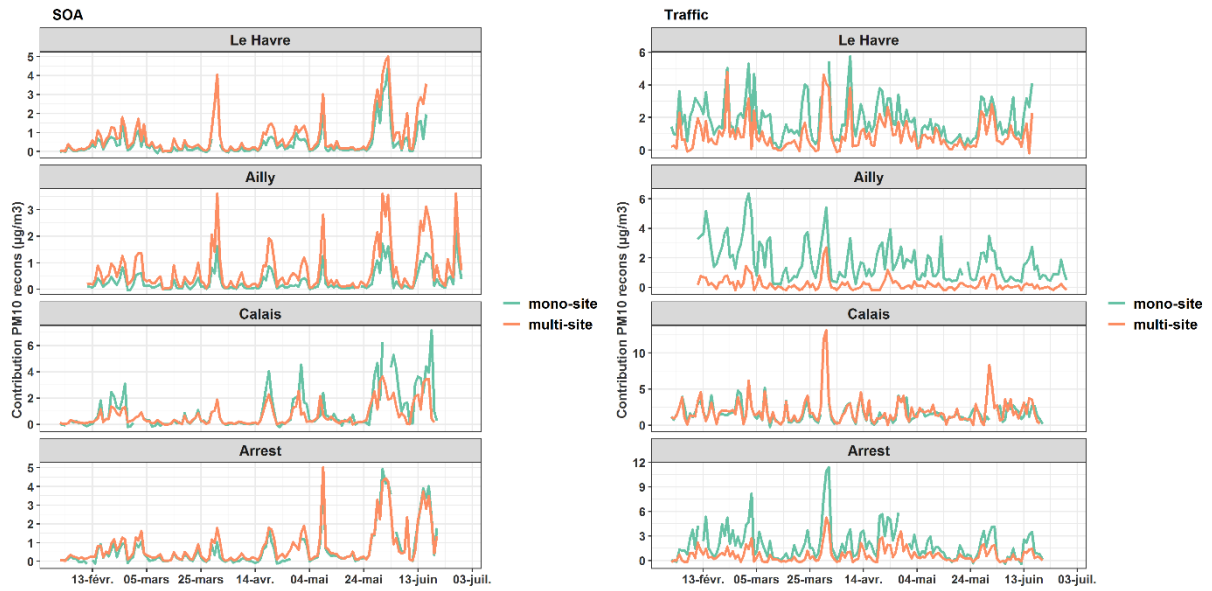




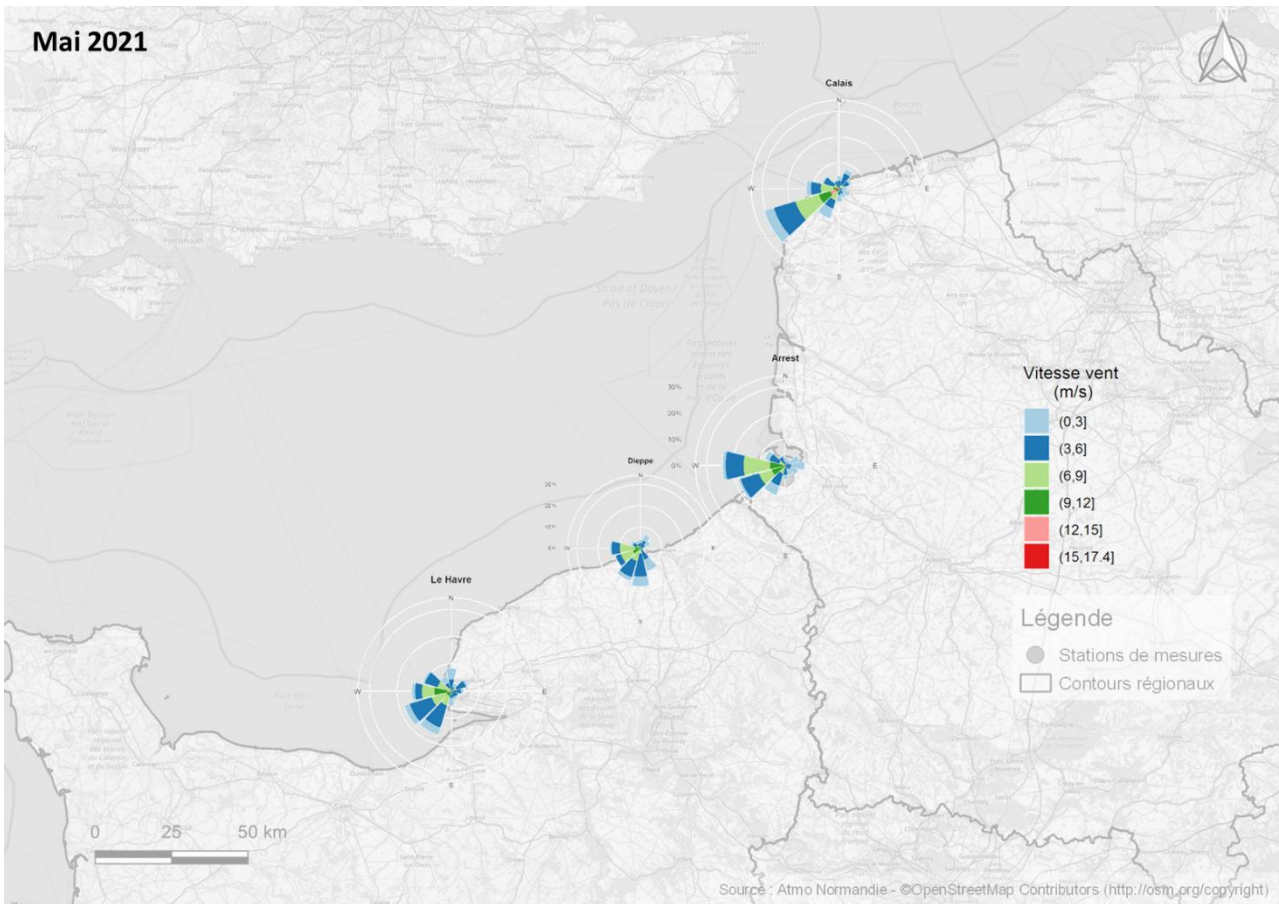
3) Séries temporelles



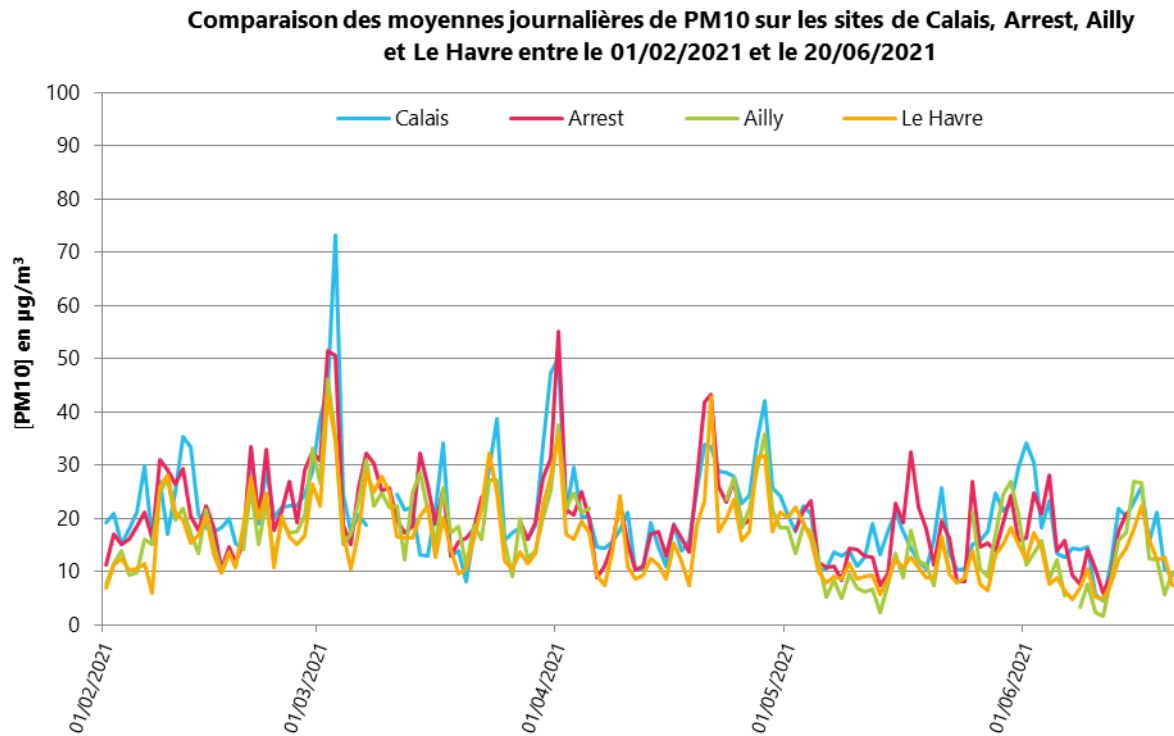




Annexe 4 : Roses des vents sur 4 stations météorologiques en mai 2021



Annexe 5 : Moyennes journalières en PM10 pour les 4 sites sur la période étudiée



Annexe 6 : Repères réglementaires

Le tableau suivant regroupe les valeurs réglementaires en air ambiant par polluant réglementé en 2018 en France :

Polluant	Normes en 2018				
	Valeur limite	Valeur cible	Objectif de qualité	Niveau d'information et de recommandation (NIR)	Niveau d'alerte (NA)
Ozone (O3)		Protection de la santé 120 µg/m ³ en moyenne sur 8h glissantes à ne pas dépasser plus de 25 jours/an (moyenne calculée sur 3 ans)	Protection de la santé 120 µg/m ³ en moyenne sur 8h glissantes	180 µg/m ³ (moyenne horaire)	Seuil 1 : 240 µg/m ³ pendant 3h consécutives
		Protection de la végétation 18 000 µg/m ³ .h pour l'AOT40** (moyenne calculée sur 5 ans)	Protection de la végétation 6 000 µg/m ³ .h pour l'AOT40**		Seuil 2 : 300 µg/m ³ pendant 3h consécutives
Dioxyde d'azote (NO2)	40 µg/m ³ en moyenne annuelle			200 µg/m ³ (moyenne horaire)	400 µg/m ³ pendant 3h consécutives
	200 µg/m ³ en moyenne horaire à ne pas dépasser plus de 18 heures/an				Persistance : 200 µg/m ³ plus de 2 jours consécutifs (J-1, J et J+1) (moyenne horaire)
Dioxyde de soufre (SO2)	125 µg/m ³ en moyenne journalière à ne pas dépasser plus de 3 jours/an		50 µg/m ³ en moyenne annuelle	300 µg/m ³ (moyenne horaire)	500 µg/m ³ pendant 3h consécutives
	350 µg/m ³ en moyenne horaire à ne pas dépasser plus de 24 heures/an				
Particules PM10	40 µg/m ³ en moyenne annuelle		30 µg/m ³ en moyenne annuelle	50 µg/m ³ (moyenne journalière)	80 µg/m ³ (seuil admis par le CSHPF) ou Persistance : 50 µg/m ³ plus de 2 jours consécutifs (J et J+1) (moyenne journalière)
	50 µg/m ³ en moyenne journalière à ne pas dépasser plus de 35 jours/an				
Particules PM2.5	25 µg/m ³ en moyenne annuelle	20 µg/m ³ en moyenne annuelle	10 µg/m ³ en moyenne annuelle		
Monoxyde de carbone (CO)	10 mg/m ³ en moyenne sur 8h glissantes				
Benzène (C ₆ H ₆)	5 µg/m ³ en moyenne annuelle		2 µg/m ³ en moyenne annuelle		
Plomb (Pb)	0.5 µg/m ³ en moyenne annuelle		0.25 µg/m ³ en moyenne annuelle		
Arsenic (As)		6 ng/m ³ en moyenne annuelle			
Cadmium (Cd)		5 ng/m ³ en moyenne annuelle			
Nickel (Ni)		20 ng/m ³ en moyenne annuelle			
Benzo(a)pyrène (C ₂₀ H ₁₂)		1 ng/m ³ en moyenne annuelle			

RETROUVEZ TOUTES
NOS **PUBLICATIONS** SUR :
www.atmo-hdf.fr et
www.atmonormandie.fr

Atmo Hauts-de-France

Observatoire de l'Air
199, rue Colbert – Bâtiment Douai
59000 Lille

Atmo Normandie

3 Place de la Pomme d'Or, 76000 ROUEN
Tél. : +33 2.35.07.94.30
Fax : +33 2.35.07.94.40

