

RAPPORT D'ETUDE

N°2400.001

Caractérisation des particules sur la zone littorale des Hauts-de-France et de la Normandie

Étude menée en 2021



Auteurs : Shouwen ZHANG (Atmo Hauts-de-France),
Marta DOMINIK-SEGUE (Atmo Normandie)

Partenaires : Laurent ALLEMAN (LCSQA-IMT Nord Europe), Olivier FAVEZ
(LCSQA-INERIS), Jean-Luc Jaffrezo (IGE)

Diffusion : Décembre 2022



Institut des Géosciences de
l'Environnement



Avant-propos

Atmo Hauts-de-France et Atmo Normandie sont des associations de type « loi 1901 » agréée 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, 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 1er janvier 2019 au 31 décembre 2022, 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 le site 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°2400.001**

En cas de remarques sur les informations ou leurs conditions d'utilisation, prenez contact avec Atmo Normandie :

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

	Nom	Qualité	Visa
Approbation	Benoit ROCQ	Responsable du Service Etudes (Atmo Hauts-de-France)	
	Sébastien LE MEUR	Responsable du Service Etudes (Atmo Normandie)	

Sommaire

Glossaire	9
1. Synthèse de l'étude.....	11
2. Définitions.....	13
2.1. Les particules en suspension	13
2.2. Les sources des particules en suspension.....	13
2.3. La composition des particules en suspension.....	14
2.4. Emissions de polluants.....	15
2.5. Episodes de pollution	16
3. Contexte et objectifs de l'étude	17
4. Matériels et méthodes.....	19
4.1. Localisation et période d'étude	19
4.2. Matériel utilisé.....	22
4.3. Méthodes d'analyse utilisées.....	22
4.4. Limites	23
5. Contexte environnemental	24
5.1. Principaux émetteurs anthropiques de la zone d'étude	24
5.2. Emissions naturelles de la zone d'étude	26
5.3. Contexte météorologique.....	26
6. Résultats de l'étude	34
6.1. Concentrations en particules et nombre de particules.....	34
6.2. Composition chimique des PM10.....	44
6.3. OC/EC/BC.....	48
6.4. Composés inorganiques et leurs précurseurs.....	59
6.5. Métaux	63
6.6. Episodes de pollution	66
7. Conclusion et perspectives.....	91
8. Bibliographie	93

Annexes

Annexe 1 : Black Carbon et émissions primaires de combustion	94
Annexe 2 : Conditions météorologiques en 2019 en comparaison avec 2021	95
Annexe 3 : Validité des résultats	98
Annexe 4 : Cartes rétrotrajectoires (PSCF)	99
Annexe 5 : Ratio PM2.5/PM10 et ratio PM1/PM10	100
Annexe 6 : PUF (100-200 nm) et BCwb	101
Annexe 7 : Particules ultrafines	102
Annexe 8 : Composition chimique moyenne pour 4 sites étudiés (avec « masse inconnues »	104
Annexe 9 : PM10 reconstituées	105
Annexe 10 : Composition chimique moyenne des PM10 (Nogent-sur-Oise). 2013 - 2016	107
Annexe 11 : Repères réglementaires	108

Illustrations

Figure 1 : Principaux polluants atmosphériques (source : Atmo Hauts-de-France).....	14
Figure 2 : Relation entre les émissions et les concentrations de polluants atmosphériques	15
Figure 3 : Stations de mesures (fond) en zone côtière (Normandie et Hauts-de-France).....	17
Figure 4 : 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	20
Figure 5 : Stations de mesures retenues pour l'étude.....	21
Figure 6 : Emissions de particules PM10 et leur répartition par secteur d'activité dans les quatre EPCI. Les données d'émissions (PCITv2, MTEs, juin 2018) ont été extraites de la version A2018_v2020_v4 de l'inventaire d'Atmo Hauts-de-France. Atmo Normandie Inventaire version V3.2.6 ; format de rapportage « Tous secteurs ».....	24
Figure 7 : Emissions de particules PM10 liées aux différents modes de transport dans les quatre EPCI. Les données d'émissions ont été extraites de la version A2018_v2020_v4 de l'inventaire d'Atmo Hauts-de-France. Atmo Normandie Inventaire version V3.2.6	25
Figure 8 : Evolution des précipitations (en cumul mm) et de la température (en moyenne, °C) sur 4 stations météorologiques pendant la période de l'étude.	27
Figure 9 : Evolution de la pression atmosphérique (en hPa) en moyenne journalière sur 3 stations météorologiques : Calais, Dieppe et Le Havre pendant la période de l'étude.	27

Figure 10 : Evolution de l'humidité relative (en %) en moyenne journalière sur 4 stations météorologiques pendant la période de l'étude.	28
Figure 11 : Vitesses et directions du vent sur 4 stations météorologiques pendant la période de l'étude.	29
Figure 12 : Vitesses et directions du vent sur 4 stations météorologiques en février 2021.	30
Figure 13 : Vitesses et directions du vent sur 4 stations météorologiques en mars 2021.	30
Figure 14 : Vitesses et directions du vent sur 4 stations météorologiques en avril 2021.	31
Figure 15 : Vitesses et directions du vent sur 4 stations météorologiques en mai 2021.	31
Figure 16 : Vitesses et directions du vent sur 4 stations météorologiques en juin 2021.	32
Figure 17 : Comparaison des roses des vents sur 4 stations météorologiques en 2019 et 2021.	33
Figure 18 : Comparaison des précipitations sur 4 stations météorologiques en 2019 et 2021.	33
Figure 19 : Moyennes journalières en PM10 pour les 4 sites sur la période étudiée (ligne en pointillé rouge : seuil d'information et de recommandation, PM10 en moyenne journalière > 50 µg/m ³ ; ligne en pointillé rouge foncé : seuil d'alerte, PM10 en moyenne journalière > 80 µg/m ³).....	35
Figure 20 : Moyennes mensuelles de PM10 pour les 4 sites d'étude.....	35
Figure 21 : Roses de pollutions de PM10 (NWR) pour les 4 sites.	37
Figure 22 : Evolution du ratio PM2.5/PM10 pour les 4 sites d'étude entre le 1 ^{er} février 2021 et le 20 juin 2021	38
Figure 23 : Evolution du ratio PM1/PM10 pour les sites du Havre et d'Ailly entre le 1 ^{er} février 2021 et le 30 juin 2021	39
Figure 24 : Moyennes journalières de PUF pour les 4 sites sur la période étudiée.....	40
Figure 25 : Evolution de la concentration moyenne mensuelle de PUF mesurées aux stations d'Arrest et de Lille Leeds.....	40
Figure 26 : Moyennes journalières de PUF sur le site d'Arrest sur la période étudiée pour la gamme 20 - 70 nm.....	41
Figure 27 : Moyennes journalières de PUF sur le site d'Arrest sur la période étudiée pour la gamme 70 - 800 nm	41
Figure 28 : Comparaison des évolutions journalières de PUF (en bleu) et de PM10 (en rouge) mesurées à la station d'Arrest entre le 01/02/2021 et le 20/06/2021.....	42
Figure 29 : Comparaison des évolutions journalières de PUF en fonction de la classe granulométrique et de PM10 (en rouge) mesurées à la station d'Arrest entre le 01/02/2021 et le 20/06/2021.....	42
Figure 30 : Comparaison des évolutions journalières de PUF en fonction de la classe granulométrique et de PM10 (en rouge) mesurés à la station d'Arrest entre le 01/02/2021 et le 20/06/2021.....	43
Figure 31 : Composition chimique moyenne pour 4 sites étudiés	45
Figure 32 : Corrélation entre la somme des anions et la somme des cations.....	46
Figure 33 : Composition chimique mensuelle pour 4 sites étudiés	48
Figure 34 : Moyennes journalières en black carbon (eBC) pour les 4 sites sur la période étudiée ..	49

Figure 35 : Suivi temporel des concentrations de PM10 et PM2.5 et estimations des fractions issues des émissions primaires liées à la combustion d'hydrocarbures (PMff) et de biomasse (PMwb) sur les 4 sites.....	51
Figure 36 : Moyennes journalières en carbone élémentaire (EC) pour les 4 sites sur la période étudiée.....	52
Figure 37 : Evolution des concentrations moyennes mensuelles en carbone élémentaire (EC) pour les 4 sites sur les périodes d'étude de chaque site	52
Figure 38 : Comparaison des concentrations moyennes en black carbon mesurées au moyen d'AE33 et le carbone élémentaire mesuré sur filtres sur les 4 sites.....	53
Figure 39 : Corrélation du carbone organique et du carbone élémentaire mesurés sur filtres sur les 4 sites	55
Figure 40 : Concentration moyenne mensuelle du carbone organique et du carbone élémentaire	56
Figure 41 : Concentration moyenne mensuelle des traceurs organiques mesurés sur filtres sur les 4 sites	57
Figure 42 : Corrélation du lévoglucosan et du BCwb pour les 4 sites.....	59
Figure 43 : Evolution des concentrations moyennes journalières des PM10, PM2.5.....	61
Figure 44 : Evolution des concentrations moyennes journalières des PM10, PM2.5, NOx et NH3...62	
Figure 45 : Concentrations moyennes (sur la période étudiée) de métaux traceurs d'émissions industrielles.....	63
Figure 46 : Concentrations moyennes de métaux traceurs d'émissions du trafic routier.....	64
Figure 47 : Concentrations moyennes de métaux traceurs d'émissions de la combustion de fioul lourd	65
Figure 48 : Concentrations moyennes de métaux traceurs de poussières minérales.....	65
Figure 49 : Cartes de dépassement des seuils réglementaires pour les PM10 le 2 et 3 mars 2021 sur les stations de fond ainsi que les cartes analysées combinant modèle et observations (source : Prev'air). Les couleurs indiquent la gamme de concentrations de PM10 en microgramme par m ³ (cf. légendes). La couleur rouge représente le dépassement du seuil d'information et de recommandation (50 µg/m ³).....	67
Figure 50 : Concentration moyenne des PM10 avant, pendant et après l'épisode de pollution (28/02-05/03/2021). La couleur rouge représente le dépassement du seuil d'information et de recommandation (50 µg/m ³).....	68
Figure 51 : Evolution horaire des concentrations de PM10 sur les 4 sites suivis.	68
Figure 52 : Variation temporelle des paramètres météorologiques : pression, température, précipitation et vitesse du vent.....	69
Figure 53 : Champs de vent et les rétrotrajectoires (modèle Arpège) à Calais et au Havre le 2/03/2021	70
Figure 54 : Champs de vent et les rétrotrajectoires (modèle Arpège) à Calais et au Havre le 3/03/2021	71
Figure 55 : Composition chimique des PM10 sur les quatre sites le 2/03/2021	72
Figure 56 : Concentration des traceurs organiques sur les quatre sites le 2/03/2021	73

Figure 57 : Composition chimique des PM10 sur les quatre sites le 3/03/2021	74
Figure 58 : Concentration des traceurs organiques sur les quatre sites le 3/03/2021	75
Figure 59 : Cartes de dépassement des seuils réglementaires pour les PM10 le 31 mars et 1 avril 2021 sur les stations de fond ainsi que les cartes analysées combinant modèle et observations (source : Prev'air). Les couleurs indiquent la gamme de concentrations de PM10 en microgramme par m ³ (cf. légendes). La couleur rouge représente le dépassement du seuil d'information et de recommandation (50 µg/m ³).....	76
Figure 60 : Concentration moyenne des PM10 avant, pendant et après l'épisode de pollution (29/03-3/04/2021). La couleur rouge représente le dépassement du seuil d'information et de recommandation (50 µg/m ³).....	77
Figure 61 : Evolution horaire des concentrations de PM10 sur les 4 sites suivis. Ligne en pointillé rouge : seuil d'information et de recommandation, PM10 en moyenne journalière > 50 µg/m ³ ; ligne en pointillé rouge foncé : seuil d'alerte, PM10 en moyenne journalière > 80 µg/m ³).....	78
Figure 62 : Variation temporelle des paramètres météorologiques : pression, température, précipitation et vitesse du vent.....	79
Figure 63 : Champs de vent et les rétrotrajectoires (modèle Arpège) à Calais et au Havre le 31/03/2021.....	80
Figure 64 : Champs de vent et les rétrotrajectoires (modèle Arpège) à Calais et au Havre le 1/04/2021	81
Figure 65 : Composition chimique des PM10 sur les quatre sites le 31/03/2021.....	82
Figure 66 : Concentration des traceurs organiques sur les quatre sites le 31/03/2021	83
Figure 67 : Composition chimique des PM10 sur les quatre sites le 1/04/2021	84
Figure 68 : Concentration des traceurs organiques sur les quatre sites le 3/03/2021.....	84
Figure 69 : Cartes de dépassement des seuils réglementaires pour les PM10 le 21 avril 2021 sur les stations de fond ainsi que les cartes analysées combinant modèle et observations (source : Prev'air). Les couleurs indiquent la gamme de concentrations de PM10 en microgramme par m ³ (cf. légendes). La couleur rouge représente le dépassement du seuil d'information et de recommandation (50 µg/m ³).....	85
Figure 70 : Concentration moyenne des PM10 avant, pendant et après l'épisode de pollution (18/04-23/04/2021).	86
Figure 71 : Evolution horaire des concentrations de PM10 sur les 4 sites suivis. Ligne en pointillé rouge : seuil d'information et de recommandation, PM10 en moyenne journalière > 50 µg/m ³ ; ligne en pointillé rouge foncé : seuil d'alerte, PM10 en moyenne journalière > 80 µg/m ³).....	86
Figure 72 : Variation temporelle des paramètres météorologiques : pression, température, précipitation et vitesse du vent.....	87
Figure 73 : Champs de vent et les rétrotrajectoires (modèle ARPEGE) à Calais et au Havre le 21/04/2021.....	88
Figure 74 : Composition chimique des PM10 sur les quatre sites le 21/04/2021.....	89
Figure 75 : Concentration des traceurs organiques sur les quatre sites le 21/04/2021	90
Figure 76 : Cartes rétrotrajectoires (PSCF : Potential Source Contribution Function) pour les 4 sites	99

Figure 77 : Ratio PM2.5/PM10 pendant les périodes de pollution.....	100
Figure 78 : Ratio PM1/PM10 pendant les périodes de pollution	101

Tableaux

Tableau 1 : Nombre de jours de dépassement de la valeur réglementaire en PM10 (> 50 µg/m ³) entre 2018 et juin 2021	18
Tableau 2 : Stations de mesures retenues pour cette étude en région Hauts-de-France et en Normandie	20
Tableau 3 : Périodes de mesure pour chaque station retenue	21
Tableau 4 : Matériel employé lors de l'étude.....	22
Tableau 5 : Méthode d'analyse de la composition chimique des particules utilisée pour l'étude...22	
Tableau 6 : Résumé des quantités de PM10 (en tonnes/an) produites par secteur d'activités pour les 4 EPCI en 2018	25
Tableau 7 : Résumé des quantités de PM10 (en tonnes/an) produites par mode de transports pour les 4 EPCI en 2018	26
Tableau 8 : Récapitulatif des paramètres météorologiques mesurés.....	28
Tableau 9 : Récapitulatif des paramètres météorologiques mesurés en 2019 et 2021.....	33
Tableau 10 : Résumé statistique des concentrations mensuelles en PM10 pour les quatre sites d'étude entre le 1 ^{er} février 2021 et le 20 juin 2021	36
Tableau 11 : Résumé statistique des ratios PM2.5/PM10 pour les quatre sites d'étude entre le 01/02/2021 et le 20/06/2021	38
Tableau 12 : concentration moyenne de différents composés pour 4 sites entre 11/02 et 16/06 ..45	
Tableau 13 : Résumé statistique des concentrations moyennes de black carbon et estimations des fractions issues des émissions primaires (en équivalent PM10) liées à la combustion d'hydrocarbures (BCff/PMff) et de biomasse (BCwb/PMwb) pour les quatre sites d'étude du 1er février 2021 au 20 juin 2021	49
Tableau 14 : Résumé statistique des concentrations moyenne en carbone élémentaire (EC) pour les quatre sites d'étude du 11 février 2021 au 16 juin 2021 (période commune pour les 4 sites)	52
Tableau 15 : ratio OC/lévoglucosan et lévoglucosan/mannosan.....	58
Tableau 16 : Résumé statistique des concentrations moyennes en nitrate (NO ₃ ⁻) et ammonium (NH ₄ ⁺) pour les quatre sites d'étude du 11 février 2021 au 16 juin 2021 (période commune pour les 4 sites)	59
Tableau 17 : Moyennes journalières de PM10 sur les 4 sites de l'étude les jours où au moins un dépassement de 50 µg/m ³ a été constaté sur la période du 01/02/2021 au 30/06/2021 sur au moins un département de la région	66

Glossaire

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

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

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

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

As : arsenic.

BC : black carbon.

BC_{ff} : black carbon liées à la combustion d'hydrocarbures.

BC_{wb} : black carbon liées à la combustion de biomasse.

Cd : cadmium.

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...).

COV : Composés Organiques Volatils.

eBC : équivalent BC.

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 la procédure d'information et d'alerte a été 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. $1 \text{ mg}/\text{m}^3 = 0,001 \text{ g}/\text{m}^3 = 0,001 \text{ gramme}$ de polluant par mètre cube d'air.

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

Ni : nickel.

NH₃ : Ammoniac.

NO₂ : dioxyde d'azote.

NO_x : oxydes d'azote.

O₃ : ozone.

OC : carbone organique.

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.

PM1 : particules en suspension de taille inférieure ou égale à 1 µm.

PMff : particules primaires liées à la combustion d'hydrocarbures.

PMwb : particules primaires liées à la combustion de biomasse.

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.

PUF : Particules Ultrafines.

SO₂ : dioxyde de soufre.

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.

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 en poussières en suspension de taille inférieure à 10 µm PM10 ($> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 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, la direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL) 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 est, par l'analyse de la composition des particules PM10 sur 4 stations littorales (Manche et Mer du Nord), de tenter 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). L'étude a été réalisée entre le 1^{er} février et le 29 juin 2021. Sur la période étudiée, 4 dépassements de la valeur journalière réglementaire en PM10 ($> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ont été constatés sur les sites d'étude à savoir 1 dépassement à Calais et 3 dépassements à Arrest. Aucun dépassement n'a été observé pour les deux sites normands.

Le présent rapport a pour but de décrire le travail réalisé dans le cadre de cette étude, de présenter l'ensemble des résultats et d'analyser les spécificités des épisodes de pollution en zone côtière. Il sera complété par une deuxième analyse des données qui s'attachera à déterminer plus en détail les sources à l'origine des pointes de pollution particulaire et leurs contributions respectives.

Évolutions temporelles

Les évolutions temporelles des particules PM10 sont globalement similaires pour les quatre stations étudiées. Les concentrations mensuelles totales de PM10 sont plus importantes pour les stations des Hauts-de-France (Calais et Arrest) que pour celles de Normandie (Ailly et Le Havre). Les concentrations maximales sont mesurées en mars/avril puis elles diminuent progressivement plus on se rapproche de l'été.

Origine géographique

Les roses de pollution et les rétrotrajectoires montrent que les sources à l'origine des particules PM10 sont distinctes pour ces quatre sites : à Calais, Arrest et au Havre, les concentrations observées s'expliquent à la fois par des sources locales et lointaines. A Ailly, peu de sources locales semblent influencer les concentrations en PM10 observées. Il s'agit plutôt de sources régionales et lointaines.

Composition chimique

Il y a une homogénéité remarquable des évolutions temporelles de la composition chimique sur les 4 sites. La composition chimique moyenne montre que la matière organique est le composé majoritaire pour tous les sites. Elle représente 30-33% à Arrest et au Havre, et 25-26% à Calais et Ailly. La matière organique est en proportion plus faible que ce qu'on observe plus généralement à l'intérieur des terres. Il est également à noter l'accroissement des contributions des sources naturelles biogéniques au printemps.

Les composés inorganiques secondaires sont également très comparables d'un site à l'autre : 24-25% de nitrate, 10-13% de sulfate et 7-9% d'ammonium. La contribution des sels marins (NaCl) varie entre 16%-21%. C'est à Arrest que le pourcentage est le plus faible ce qui est cohérent avec son éloignement plus important à la mer. Les autres ions (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) et les métaux contribuent chacun à hauteur de 3%-4% des particules PM10 mesurées.

Parmi les 4 sites étudiés, l'impact le plus fort des émissions primaires liées à la combustion de la biomasse est observé à Arrest. L'impact des émissions primaires liées à la combustion d'hydrocarbures est plus marqué à Calais.

Certains métaux sont connus comme étant des traceurs de sources identifiées. Calais présente un niveau plus important de métaux d'origine industrielle et liés au trafic et à la combustion de fioul lourd.

Episodes de pollution

Les épisodes de pollution particulaire n'étaient pas au rendez-vous en grande quantité au printemps 2021. En effet, les conditions météorologiques n'ont pas favorisé la formation et l'accumulation des particules : périodes très pluvieuses contribuant au phénomène du lessivage de l'atmosphère, températures relativement élevées peu propices à la formation du nitrate d'ammonium. Néanmoins, quelques jours d'augmentation des concentrations des particules ont été observées, avec pour certains jours le dépassement du seuil réglementaire de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Leur analyse montre qu'en fin d'hiver et début de printemps, la composition des particules est dominée par la présence de la matière organique et du nitrate d'ammonium. La contribution importante de la matière organique couplée à une concentration élevée en lévoglucosan indique un impact des émissions liées à la combustion de biomasse. Les conditions anticycloniques, stables, une hauteur de couche limite faible et la présence d'inversions thermiques ont favorisé l'accumulation des particules dans l'air. La contribution importante de nitrate d'ammonium témoigne de la formation et du transport des particules secondaires inorganiques.

Puis, fin avril, quand les conditions météorologiques sont plus douces, les émissions liées au chauffage baissent et la contribution du nitrate d'ammonium est plus marquée dans l'épisode, notamment quand le flux de nord-est établi.

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 **PM2.5** et **PM1** désignent les particules dont le diamètre est inférieur à 2.5 et 1 μm , respectivement.

2.2. Les sources des particules en suspension

Les particules atmosphériques sont émises par des sources naturelles ainsi que par des sources anthropiques. 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 des particules en suspension

La composition chimique des particules varie fortement en fonction de leurs processus de formation et de leur vie dans l'atmosphère. Les particules sont généralement composées d'un mélange de (Putaud et al., 2004) :

- **Matière organique (OM).** La matière organique est la fraction qui contient l'ensemble des composés organiques. Le 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 (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...).
- **Ions inorganiques (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 métalliques.** Ils peuvent être émis par des sources naturelles (ex. Ca, Al, Fe provenant de la croûte terrestre), ainsi que par des sources anthropiques (ex. As, Cd, Pb émis par certains processus industriels).

2.4. Emissions de polluants

Les émissions de polluants correspondent aux quantités de polluants directement rejetées dans l'atmosphère par les activités humaines (cheminées d'usine ou de logements, pots d'échappement, agriculture...) ou par des sources naturelles (composés émis par la végétation et les sols, etc.).

Les émissions de polluants s'expriment en masse par unité de temps, généralement en tonnes par an.

Les émissions de polluants sont à ne pas confondre avec les concentrations de polluants, qui caractérisent la qualité de l'air que l'on respire, elles s'expriment le plus souvent en microgrammes de polluant par mètre cube d'air ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Elles sont influencées non seulement par les quantités de polluants émises mais également par les phénomènes atmosphériques qui influencent le devenir de ces espèces chimiques dans l'air. En effet, une fois émis dans l'atmosphère, les polluants peuvent être dispersés et transportés par des masses d'air, peuvent réagir entre eux pour former d'autres polluants (ou des espèces moins polluantes) et peuvent être déposés sur les sols et dans les cours d'eau. La Figure 2 illustre la relation entre émissions et concentrations de polluants.

DES ÉMISSIONS AUX CONCENTRATIONS DE POLLUANTS DANS L'ATMOSPHÈRE

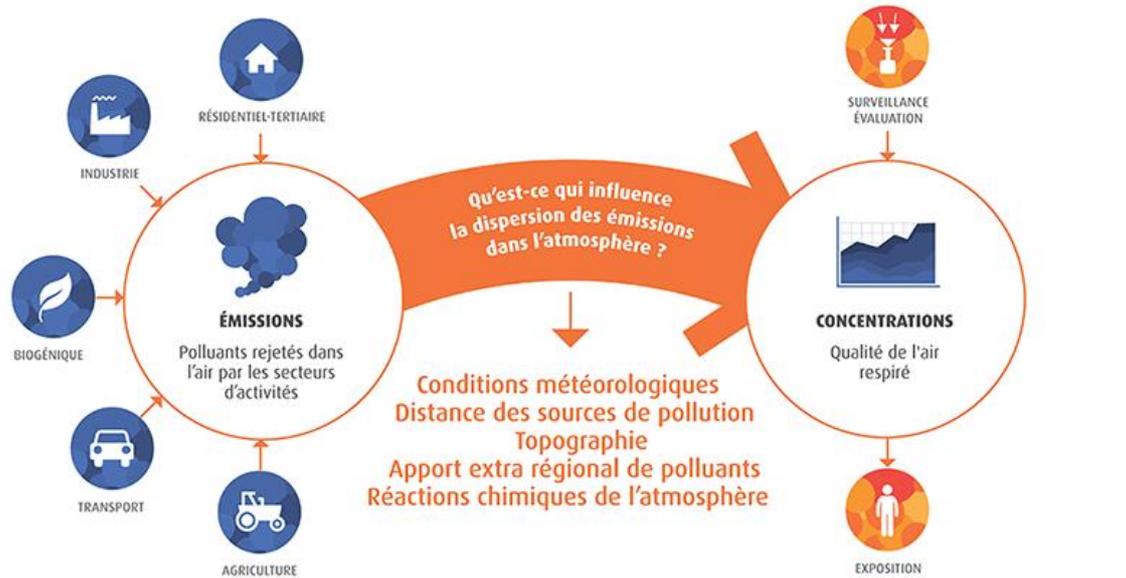


Figure 2 : Relation entre les émissions et les concentrations de polluants atmosphériques

2.5. Episodes de pollution

Un épisode de pollution correspond à une période, où les concentrations de polluants dans l'air ne respectent pas ou risquent de ne pas respecter les niveaux réglementaires, selon des critères prédéfinis (superficie couverte ou pourcentage de population impactée, niveau réglementaire franchi, durée de l'épisode, ...).

Quatre polluants sont intégrés dans la procédure de déclenchement d'épisode de pollution de l'air :

- l'ozone (O₃)
- le dioxyde d'azote (NO₂)
- le dioxyde de soufre (SO₂)
- les particules en suspension (PM10)

Deux niveaux réglementaires sont définis :

- Niveau d'information et de recommandation

Niveau au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine de groupes particulièrement sensibles au sein de la population. Ce niveau rend nécessaire la transmission d'informations immédiates et adéquates à destination de ces groupes, et des recommandations pour réduire certaines émissions.

- Niveau d'alerte

Niveau au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé de l'ensemble de la population ou un risque pour la dégradation de l'environnement, justifiant la mise en place de mesures d'urgence.

Le niveau d'alerte sur persistance est déclenché lorsque le niveau d'information et recommandation est prévu pour le jour même et le lendemain.

Le tableau suivant présente les différents seuils réglementaires de la procédure d'information et d'alerte, en microgramme par mètre cube d'air (µg/m³), en moyenne horaire, pour le dioxyde de soufre, le dioxyde d'azote, l'ozone et en moyenne journalière pour les particules en suspension PM10.

Seuils définis par l'article R.22-1 du code de l'environnement	Niveau d'information et de recommandation (NIR)	Niveau d'alerte (NA)
Ozone (O₃) moyenne horaire	180 µg/m ³	Seuil 1 : 240 µg/m ³ pendant 3h consécutives
		Seuil 2 : 300 µg/m ³ pendant 3h consécutives
		Seuil 3 : 360 µg/m ³
Dioxyde d'azote (NO₂) moyenne horaire	200 µg/m ³	400 µg/m ³ pendant 3h consécutives ou Persistance : 200 µg/m ³ plus de 2 jours consécutifs (J-1, J et J+1)
Dioxyde de soufre (SO₂) moyenne horaire	300 µg/m ³	500 µg/m ³ pendant 3h consécutives
Particules PM10 moyenne journalière	50 µg/m ³	80 µg/m ³ (seuil admis par le CSHPF) ou Persistance : 50 µg/m ³ plus de 2 jours consécutifs (J et J+1)

Source : Décret n°2010-1250 du 21 octobre 2010 relatif à la qualité de l'air et Arrêté du 26 mars 2014 relatif au déclenchement des procédures préfectorales en cas d'épisodes de pollution de l'air ambiant

3. Contexte 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 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 du **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.

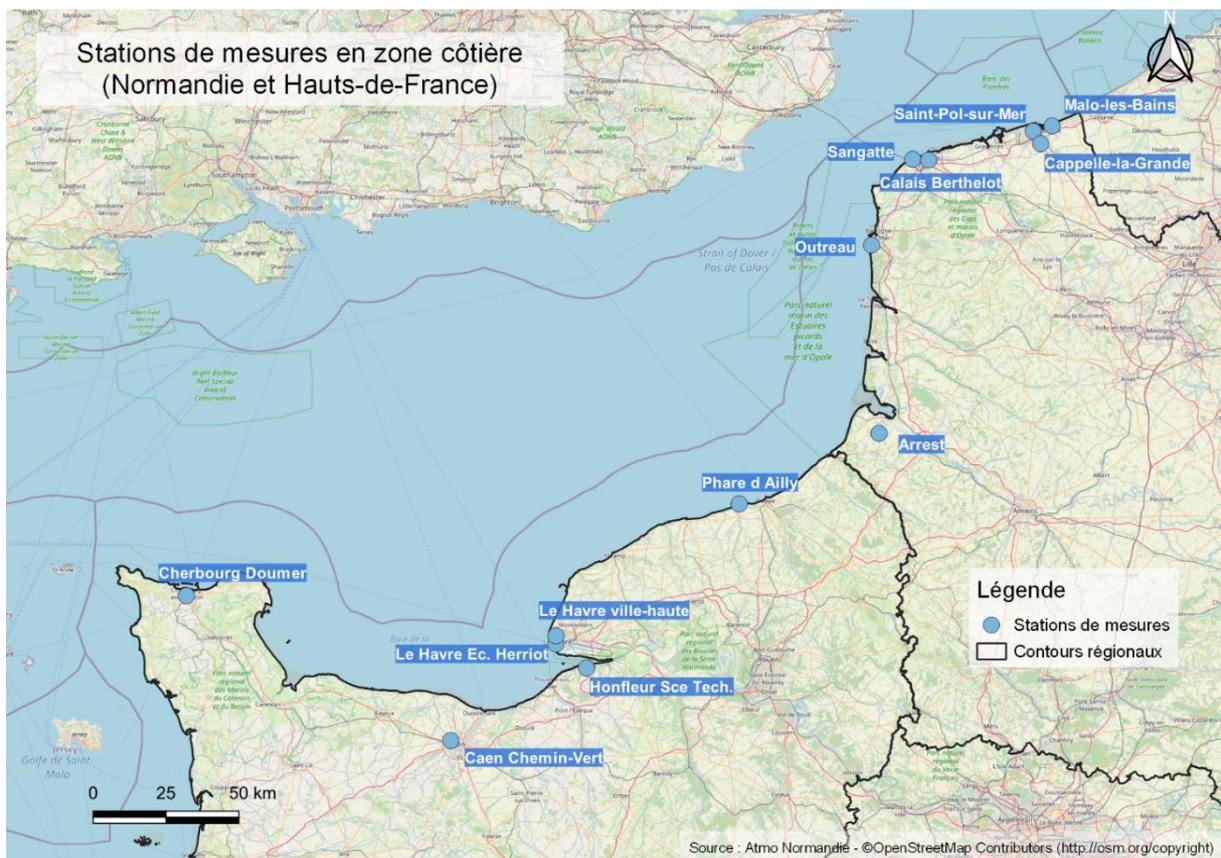


Figure 3 : Stations de mesures (fond) en zone côtière (Normandie et Hauts-de-France)

Tableau 1 : Nombre de jours de dépassement de la valeur réglementaire en PM10 (> 50 µg/m³) entre 2018 et juin 2021

	Arrest (RU3)	Outreau (BO2)	Sangatte (CA5)	Calais Berthelot (CA8)	Saint-Pol-sur-Mer (DKM)	Cappelle-la-Grande (DKH)	Malo-les-Bains (DK4)	Total par année
2018	3	1	9	15	8	10	9	55
2019	5	NR	11	22	20	7	8	73
2020	6	0	12	5	8	7	4	42
2021 (Jusqu'au 30/06)	4	0	1	1	11	3	0	20
Total	18	1	33	43	47	27	21	190

	Cherbourg	Caen	Honfleur	Le Havre	Le Havre ville haute	Phare d'Ailly	Total par année
2018	0	0	2	2	3	1	8
2019	3	2	1	5	6	2	19
2020	2	1	1	3	1	3	11
2021 (Jusqu'au 30/06)	1	0	1	0	0	0	2
TOTAL	6	3	5	10	10	6	40

Les objectifs principaux de cette étude sont :

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

In fine ce travail devrait permettre d'identifier les sources (et leur origine géographique) qui contribuent aux épisodes de pollution particulaire en zone côtière, afin de cibler les actions à mettre en œuvre par les différents acteurs pour limiter ces sources et diminuer le nombre de jours de dépassement de la valeur limite journalière de PM10.

Le présent rapport a pour but de décrire le travail réalisé dans le cadre de cette étude, de présenter l'ensemble des résultats obtenus sur la période et d'analyser les spécificités des épisodes de pollution en zone côtière. Il sera complété par une deuxième analyse de données qui s'attachera à déterminer plus en détail les sources à l'origine des pointes de pollution particulaire et leurs contributions respectives.

4. Matériels et méthodes

4.1. Localisation et période d'étude

Quatre stations ont été sélectionnées pour cette étude : deux en Hauts-de-France, **Calais** Berthelot (CA8) et **Arrest** (RU3), et deux en Normandie, **Phare d'Ailly** (ALL) 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. Elle 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 mesure la pollution de fond. Elle mesure, entre autres, les PM2.5 et les PM10 (polluants réglementés).

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, agglomération qui compte 268 912 habitants¹. 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, PM2.5 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 polluants réglementés : les particules PM10 et l'ozone.

¹ INSEE Population 2018

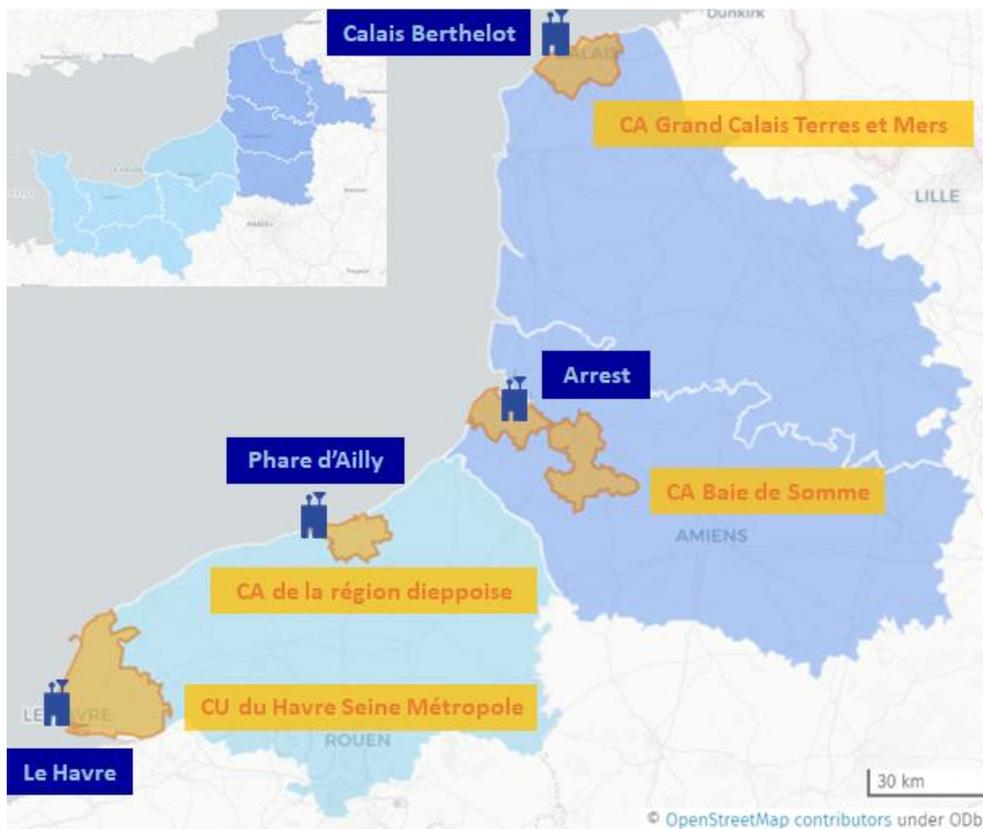


Figure 4 : Les régions Normandie et Hauts-de-France et leurs départements en bleus clair et foncé, respectivement, les stations de mesures (en bleu) sélectionnées pour l'étude et les établissements publics de coopération intercommunale (EPCI, en orange) où se trouvent ces stations

Le Tableau 2 résume les informations détaillées de chaque station : typologie, polluants mesurés en continu, distance à la mer, et les EPCI concernés. Parmi les quatre stations, Arrest est la station la plus éloignée du bord de mer (~10 km).

Tableau 2 : Stations de mesures retenues pour cette étude en région Hauts-de-France et en Normandie

Station					EPCI		
Immatriculation	Typologie	Polluants mesurés en continu	Influence des mesures	Distance à la mer [km]	Nom	Population en 2018*	Densité de population*
Calais Berthelot (CA8)	Urbaine	PM10, PM2.5, NOx	Fond	2	CA Grand Calais Terres et Mers	104 367	2177
Arrest (RU3)	Rurale	PM10, O ₃	Fond	10	CA de la baie de Somme	48 903	855
Le Havre ville haute (HVH)	Urbaine	PM10, PM2.5, PM1, O ₃ , BC, NO _x , SO ₂	Fond	1,7	CU du Havre Seine Métropole	268 912	3185
Phare d'Ailly (AIL)	Rurale	PM10, O ₃	Fond	0,3	CA de la Région Dieppoise	46 223	83

* Source : INSEE, Recensement de la population RP2018 en géographie du 01/01/2021 (<https://www.insee.fr>, consulté le 16/11/2021)

Hauts-de-France : Calais Berthelot (CA8)



Hauts-de-France : Arrest (RU3)



Normandie : Phare d'Ailly (AIL)



Normandie : Le Havre ville haute (HVH)



Figure 5 : Stations de mesures retenues pour l'étude

L'étude a été réalisée entre le 1^{er} février et le 29 juin 2021. Les périodes de mesures et les polluants mesurés sur chaque station pour les besoins de l'étude sont récapitulés dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Périodes de mesure pour chaque station retenue

Site	Période de prélèvement PM10	Polluants mesurés
Calais Berthelot (CA8)	1 ^{er} février – 20 juin 2021	PM10, PM2.5, BC, NO _x , NH ₃ , composition des particules
Arrest (RU3)	1 ^{er} février – 20 juin 2021	PM10, PM2.5, BC, NO _x , PUF, NH ₃ , composition des particules
Phare d'Ailly (AIL)	1 ^{er} février – 20 juin 2021 10 février – 29 février 2021	PM10, PM2.5, PM1, BC, composition des particules
Le Havre ville haute (HVH)	1 ^{er} février – 20 juin 2021 1 ^{er} février – 16 juin 2021	PM10, PM2.5, PM1, BC, NO _x composition des particules

4.2. Matériel utilisé

Le matériel de prélèvement et de mesure utilisé est présenté dans le Tableau 4.

Les particules PM10 sont collectées quotidiennement sur des filtres à quartz (150 mm de diamètre, Pall Tissu Qz filters) en utilisant un "High Volume Sampler" (HVS, Digital DA80) à un débit de 30 m³/h. L'analyse chimique de ces prélèvements permet de connaître la composition au jour le jour des particules PM10.

En parallèle, les particules PM10, PM2.5, PM1 et Black Carbon (BC) sont mesurées en continu. Les polluants gazeux comme NO, NO₂, et NO_x sont également mesurés. Le nombre de particules entre 20-800 nm est compté par un analyseur UFP3031 à Arrest. A noter que les mesures de NH₃ restent une information indicative en raison de l'interférence notamment de l'humidité relative de l'air.

Tableau 4 : Matériel employé lors de l'étude

Polluants	Analyseurs	Site
PM10	Préleveur DA80	Calais, Arrest, Ailly, Le Havre
PM10 et PM2.5	TEOM-FDMS/Jauge	Calais, Arrest, Ailly
PM10/PM2.5/PM1	FIDAS	Ailly, Le Havre
BC	AE33 (MAGEE)	Calais, Arrest, Le Havre, Ailly
NO/NO ₂ /NO _x	APNA 370 HORIBA	Calais, Arrest, Le Havre
PUF	UFP 3031 (TSI)	Arrest
NH ₃	T201 (TELEDYNE)	Calais, Arrest

4.3. Méthodes d'analyse utilisées

Les méthodes d'analyse de la composition chimique des particules PM10 sont récapitulées dans le Tableau 5. Les carbones organique et élémentaire, les ions majeurs, les espèces métalliques et les composés organiques « trace » sont analysés pour chaque filtre prélevé.

Tableau 5 : Méthode d'analyse de la composition chimique des particules utilisée pour l'étude

Composé(s) analysé(s)	Méthodes d'analyse	Laboratoire
OC/EC	TOT (analyse thermo-optique en transmission)	INERIS
Ions	IC (Chromatographie ionique)	IGE
Métaux	ICP-MS (inductively coupled plasma mass spectrometry) et ICP-AES (inductively coupled Plasma atomic emission spectrometry spectroscopy)	IMT
Organiques « traces »	HPLC-PAD (Chromatographie en Phase Liquide avec détection par Ampérométrie Pulsée)	IGE

4.4. Limites

Les résultats de cette étude sont représentatifs pour la période d'étude, qui a ciblé la période printanière afin de mieux comprendre les causes des pics de pollution à cette période.

Les inventaires d'émissions utilisés dans cette étude sont réalisés par Atmo Hauts-de-France et Atmo Normandie séparément. Bien que les méthodes soient presque identiques, il peut toujours y avoir des différences. De plus, les inventaires d'émission sont basés sur des données plus anciennes (année 2018) que les mesures sur sites (année 2021), induisant aussi potentiellement des écarts.

La différence entre la concentration massique des PM10 et la somme des masses des espèces chimiques déterminées par l'analyse est considérée comme « masse inconnue ». Elle représente de 25% à 49% des particules PM10 selon le site d'étude (Annexe 8). Ces masses non déterminées sont probablement liées :

- Aux incertitudes sur la masse mesurée par les analyseurs automatiques TEOM-FDMS/Jauges/FIDAS (jusqu'à 25%).
- Aux incertitudes liées au choix du facteur de conversion (1.8) entre le carbone organique (OC) et la matière organique (OM).
- À la quantité d'eau contenue dans l'aérosol, qui n'est pas prise en compte dans l'analyse chimique mais qui est incluse dans les mesures de masse totale.
- Aux composés semi volatils qui sont mesurés par les analyseurs automatiques mais qui ne sont plus présents sur les filtres au laboratoire (une partie de nitrate d'ammonium, et de matière organique).

5. Contexte environnemental

5.1. Principaux émetteurs anthropiques de la zone d'étude

Sur la zone d'étude, plusieurs sources de pollution par les particules PM10 coexistent. Les émissions des PM10 sont regroupées en **4 grands secteurs** : Transports ; Agriculture ; Résidentiel - Tertiaire et Industrie, déchets, énergie, construction.

Une comparaison des émissions de PM10 sur l'année 2018 pour les établissements publics de coopération intercommunale (EPCI) **Grand Calais Terres, Mers et Baie de Somme, Région Dieppoise et Havre Seine Métropole**, où se trouvent les stations de mesure, est présentée sur la Figure 6 et un résumé des quantités annuelles en PM10 est présentée dans le Tableau 6.

La contribution relative du secteur **Agriculture** aux émissions de PM10 pour l'EPCI **Baie de Somme** est la plus importante soit **37%** (86.7 tonnes/an) contre 7 à 25% des émissions de PM10 pour les 3 autres EPCI.

La contribution relative du secteur des **Transports** (incluant le transport maritime) représente **60%** et **43%** des émissions de PM10 respectivement pour l'EPCI **Grand Calais Terres et Mers** (soit 193.8 tonnes/an) et pour l'EPCI **Havre Seine Métropole** (soit 565.8 tonnes/an). Il représente 23 et 30% des émissions de PM10 pour les 2 autres EPCI.

Concernant le secteur **Résidentiel-Tertiaire**, il représente une part plus importante des PM10 de l'EPCI **Baie de Somme** avec **33%** des émissions (soit 77.8 tonnes/an) alors qu'il ne représente que 8% des émissions de PM10 dans l'EPCI du Havre Seine Métropole (soit 111.1 tonnes/an).

Enfin, le secteur **Industriel** contribue peu aux émissions des 2 EPCI en Hauts-de-France avec 7% des émissions. A l'inverse sa contribution est plus marquée pour les EPCI Région Dieppoise et **Havre Seine Métropole** puisqu'il représente respectivement 26 et **42%** des émissions.

Contribution des différents secteurs aux émissions de PM10 en 2018



Figure 6 : Emissions de particules PM10 et leur répartition par secteur d'activité dans les quatre EPCI. Les données d'émissions (PCITv2, MTES, juin 2018) ont été extraites de la version A2018_v2020_v4 de l'inventaire d'Atmo Hauts-de-France. Atmo Normandie Inventaire version V3.2.6 ; format de rapportage « Tous secteurs ».

D'après cet inventaire, en 2018, les émissions de PM10 de l'EPCI **Havre Seine Métropole** sont largement supérieures (**1326.9 tonnes**) à celles des autres EPCI (122-324 tonnes). Elles sont fortement influencées par les secteurs Transport (565.8 tonnes) et Industrie (558.2 tonnes). L'EPCI Région Dieppoise représente les émissions de PM10 les plus faibles, ce qui est cohérent avec sa typologie de fond rural.

Tableau 6 : Résumé des quantités de PM10 (en tonnes/an) produites par secteur d'activités pour les 4 EPCI en 2018

Emissions PM10 (tonnes/an)	Grand Calais Terres et Mers	Baie de Somme	Région Dieppoise	Havre Seine Métropole
Transports	193.8	54.1	37.2	565.8
Résidentiel-tertiaire	55.5	77.8	27.0	111.1
Industrie, déchets, énergie, construction	21.7	17.5	31.4	558.2
Agriculture	53.6	86.8	26.4	91.8
Total	324.6	236.1	122.1	1326.9

Les **différents modes de transports** des EPCI sont regroupés en **quatre catégories** : transport routier, transport ferroviaire, transport maritime et fluvial, et transport aérien. Ils sont comparés sur la Figure 7.

Les émissions liées au **transport routier** représentent la majorité des émissions de PM10 liées au transport pour les EPCI Région Dieppoise et Baie de Somme : **91%** (soit 33.7 tonnes/an) et **94%** (soit 50.7 tonnes/an), respectivement.

Le **transport maritime et fluvial** contribue respectivement à 57 et **60%** des émissions de PM10 lié au transport, pour **Grand Calais** (soit 193.8 tonnes/an) et **Havre Seine Métropole** (soit 335.6 tonnes/an). Il est à noter que les émissions maritimes issues de la phase croisière en haute mer ne sont pas calculées dans les inventaires des émissions.

Enfin, les **transports ferroviaire et aérien** représentent moins de 6% des émissions pour chaque EPCI.

Contribution des différents modes de transport aux émissions de PM10 en 2018

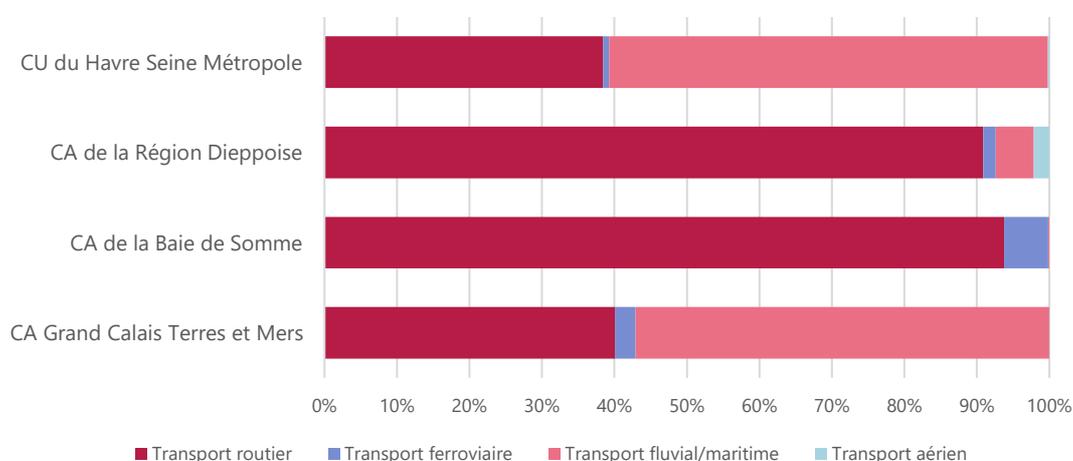


Figure 7 : Emissions de particules PM10 liées aux différents modes de transport dans les quatre EPCI. Les données d'émissions ont été extraites de la version A2018_v2020_v4 de l'inventaire d'Atmo Hauts-de-France. Atmo Normandie Inventaire version V3.2.6

A noter que les émissions des **transports maritime et fluvial** du **Havre** Seine Métropole (soit 335.6 tonnes/an) sont trois fois plus élevées que celui du Grand Calais, et dix fois plus élevées que les deux autres EPCI.

Tableau 7 : Résumé des quantités de PM10 (en tonnes/an) produites par mode de transports pour les 4 EPCI en 2018

Emissions PM10 (tonnes/an)	Grand Calais Terres et Mers	Baie de Somme	Région Dieppoise	Havre Seine Métropole
Transport routier	77.6	50.7	33.7	213.2
Transport ferroviaire	5.5	3.3	0.64	4.8
Transport fluvial/maritime	110.6	0.1	1.9	335.6
Transport aérien	0.002	0	0.80	1.2
Total	193.8	54.1	37.1	554.8

5.2. Emissions naturelles de la zone d'étude

Les émissions naturelles des particules sont non négligeables sur la zone d'étude :

- Les embruns marins pour lesquelles on attend une contribution non négligeable compte tenu de la proximité du littoral ;
- Les poussières du sol (voir les épisodes de poussières désertiques), qui peuvent avec une remise en suspension naturelle (par le vent) ou anthropique (trafic, construction, traitement de minerais, ...) ;
- Les émissions biogéniques par la végétation et l'environnement marins, qui peuvent être directes (débris de plantes, pollens, microbiologie, ...) ou secondaires (transformation des COV).

Toutes ces émissions peuvent être très marquées à certains moments, par épisodes (embruns marins, poussières), ou par périodes (cycles biologiques des écosystèmes). Elles peuvent constituer une fraction importante des PM10.

5.3. Contexte météorologique

Les conditions météorologiques enregistrées pendant les périodes de mesures sont récapitulées sur les Figure 8, Figure 9, Figure 10 et Figure 11.

Les précipitations sont représentées en cumul de mm par jour, la température [°C], l'humidité relative [%] ainsi que la pression atmosphérique [hPa] en moyenne journalière. Les roses des vents indiquent la direction d'où vient le vent et la vitesse du vent. Les données sont issues des stations météorologiques de Météo France situés au Havre (Cap de la Hève), à Dieppe, à Arrest (Cayeux/mer) et à Calais (Marck).

Les mois de mai et juin se caractérisent par une pluviométrie plus importante. Le mois d'avril était le moins pluvieux sur l'ensemble des stations. Les mois de mars, d'avril et début juin se caractérisent globalement par des conditions anticycloniques.

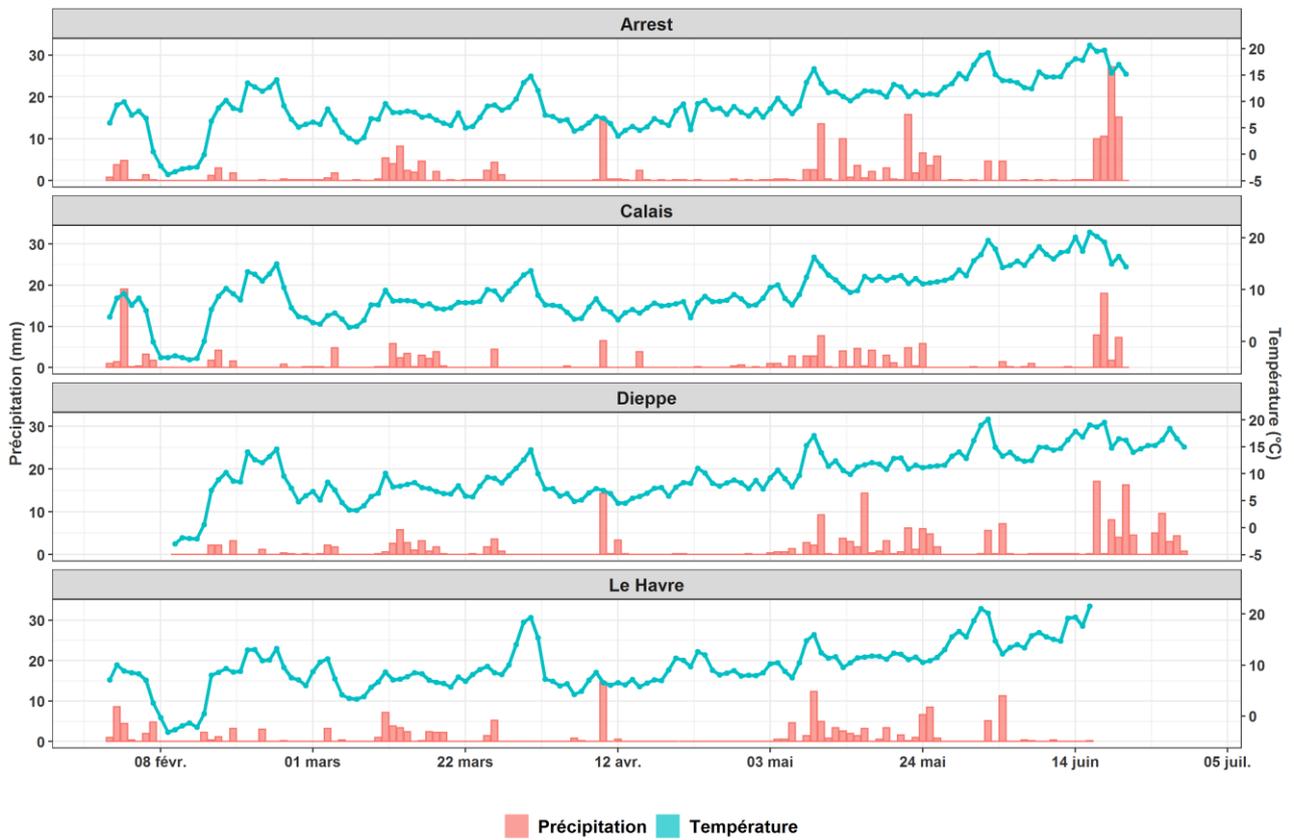


Figure 8 : Evolution des précipitations (en cumul mm) et de la température (en moyenne, °C) sur 4 stations météorologiques pendant la période de l'étude.

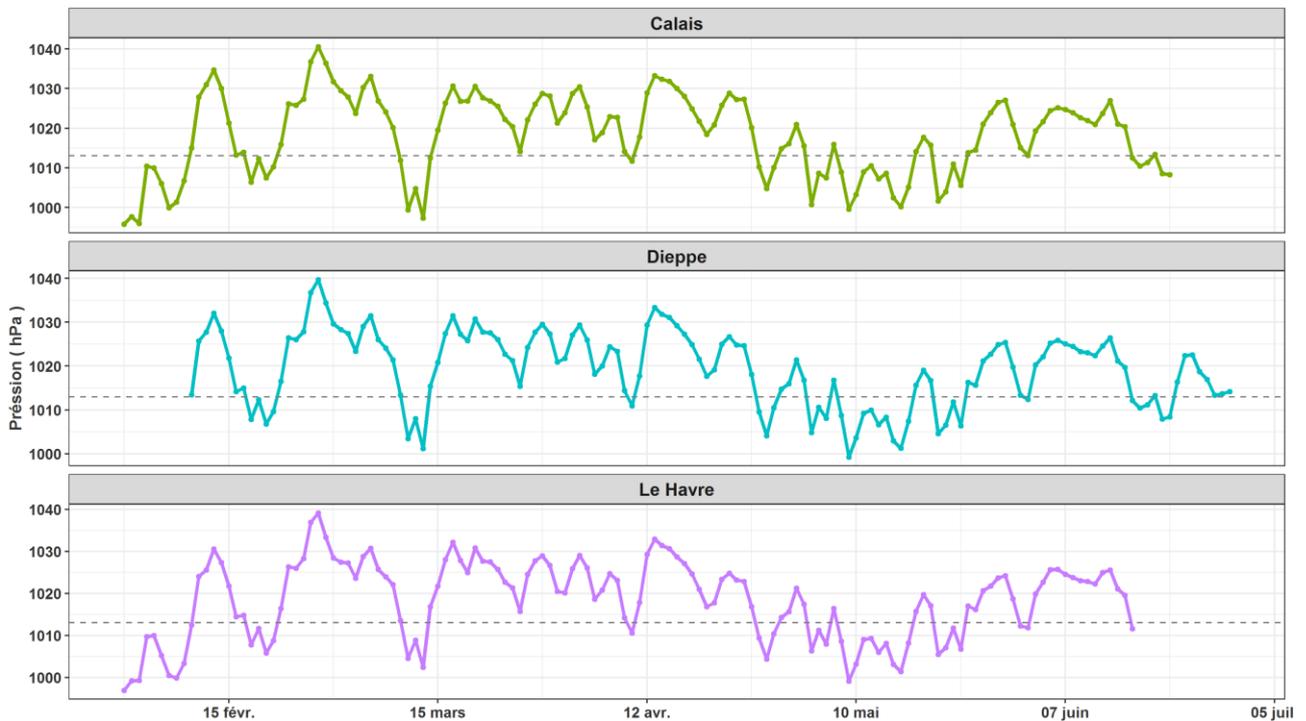


Figure 9 : Evolution de la pression atmosphérique (en hPa) en moyenne journalière sur 3 stations météorologiques : Calais, Dieppe et Le Havre pendant la période de l'étude.

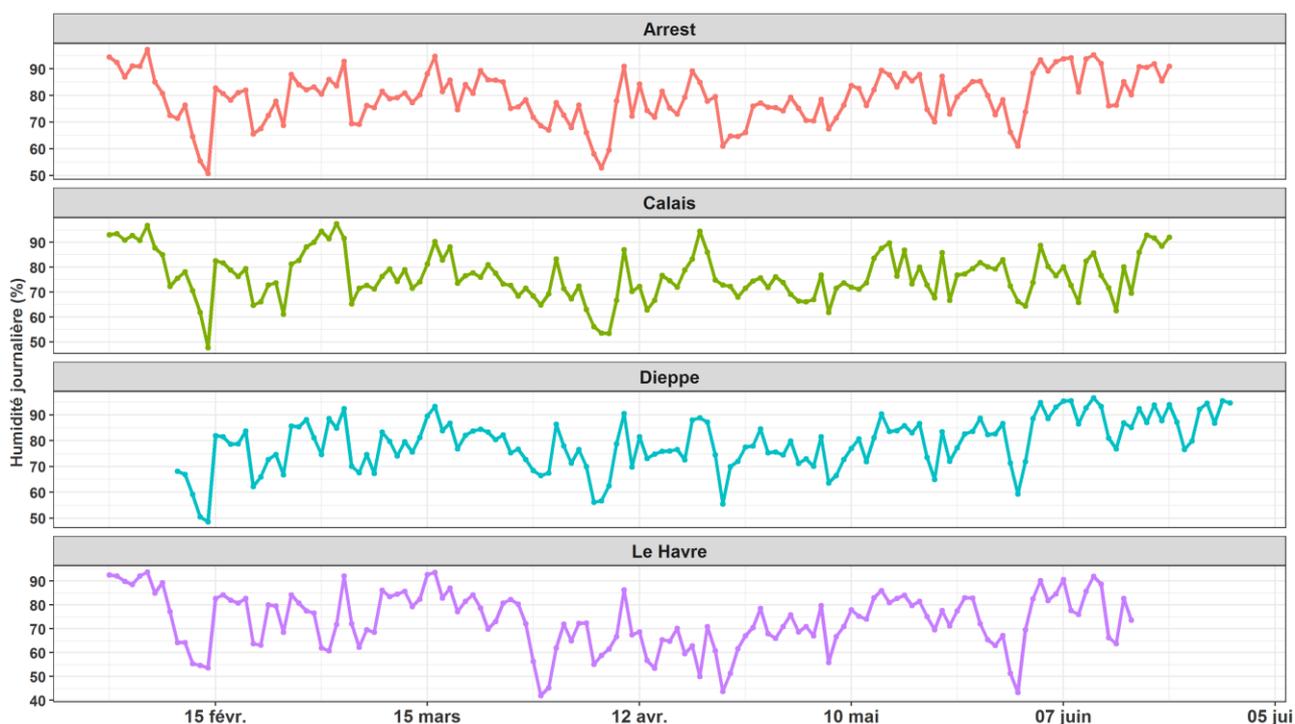


Figure 10 : Evolution de l'humidité relative (en %) en moyenne journalière sur 4 stations météorologiques pendant la période de l'étude.

Les conditions météorologiques varient peu entre les 4 stations. Il est cependant à noter que pendant les périodes de mesures les stations de Dieppe et d'Arrest ont enregistré la pluviométrie la plus forte.

Tableau 8 : Récapitulatif des paramètres météorologiques mesurés

Station	Température moyenne [°C]	Cumul des précipitations [mm]	Pression moyenne [hPa]	Humidité relative moyenne [%]	Vitesse de vent moyenne [m/s]
Arrest	9.2	229	-	79	4.2
Calais	9.3	164	1018	76.3	5.1
Dieppe	10.0	211	1019	78.9	4.5
Le Havre	9.6	161	1019	73.4	4.7

La station d'Arrest se caractérise par une vitesse de vent moyenne inférieure à 5 m/s. Lors de l'étude, les vents étaient majoritairement en provenance du secteur ouest-sud-ouest.

La station Calais se caractérise par des vents majoritairement du secteur sud-ouest dont la vitesse est plus soutenue que les vents en provenance des autres secteurs.

Les vents sur la station de Dieppe venaient en majorité des secteurs sud-sud-est et nord-nord-est avec globalement des vitesses inférieures à 5 m/s.

La station du Havre se caractérise par des vents majoritairement en provenance du secteur nord-est et de vitesse moyenne d'environ 5 m/s (Figure 11).

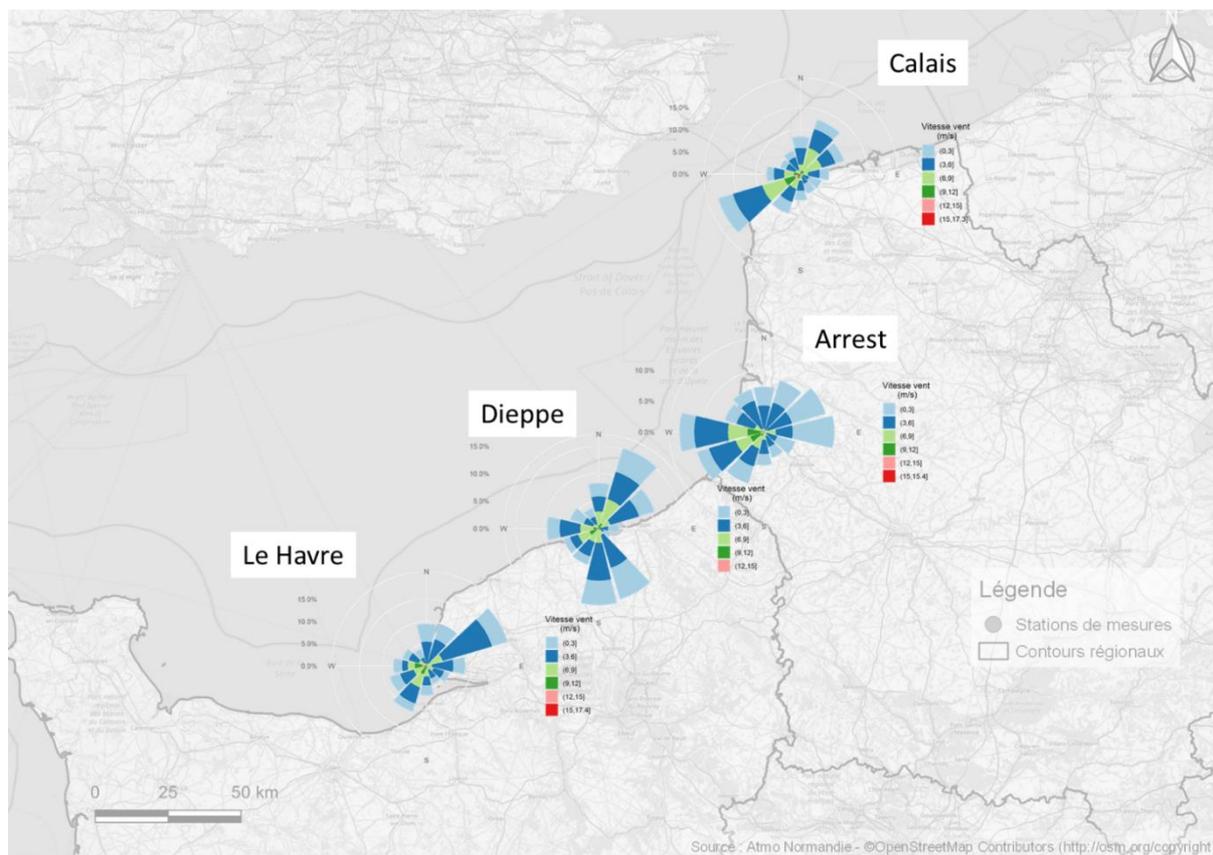


Figure 11 : Vitesses et directions du vent sur 4 stations météorologiques pendant la période de l'étude.

La direction et les vitesses du vent varient en fonction du mois.

Le mois de février se caractérise par des vents faibles à moyens en provenance majoritairement des terres. Pour Le Havre, les vents en provenance de la mer et de l'estuaire de la Seine ont été enregistrés (Figure 12).

En mars, les vents les plus soutenus ont été observés majoritairement en provenance de sud-ouest. Des vents en provenance de nord-est ont été également présents (Figure 13).

Le mois d'avril se caractérise par des vents de vitesse faible à moyenne principalement du secteur nord-est (Figure 14).

En mai, ce sont des vents du secteur ouest-sud-ouest qui dominent. Leur vitesse est parfois soutenue notamment au Havre et à Calais (Figure 15).

Le mois de juin est marqué par des vents plutôt faibles de direction très variable (Figure 16).

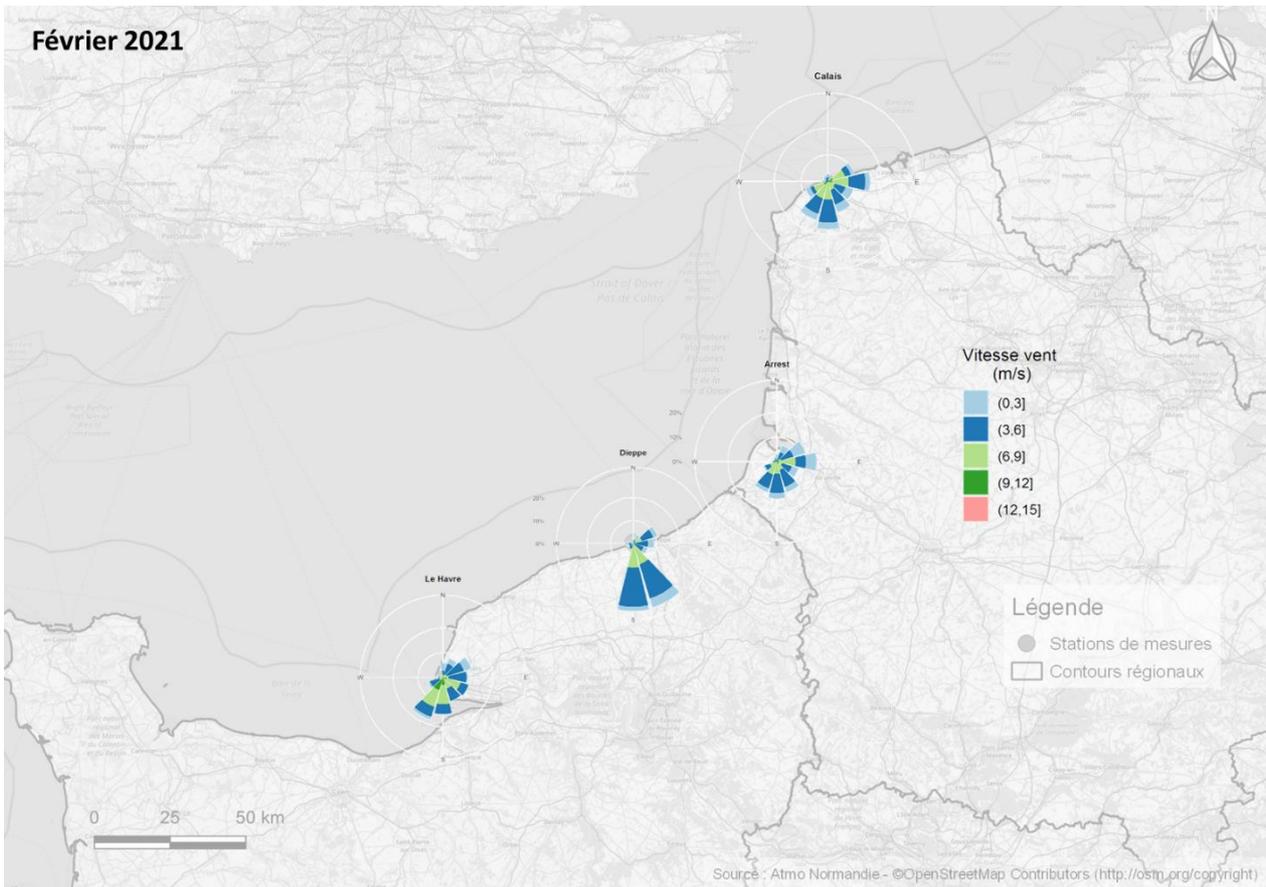


Figure 12 : Vitesses et directions du vent sur 4 stations météorologiques en février 2021.

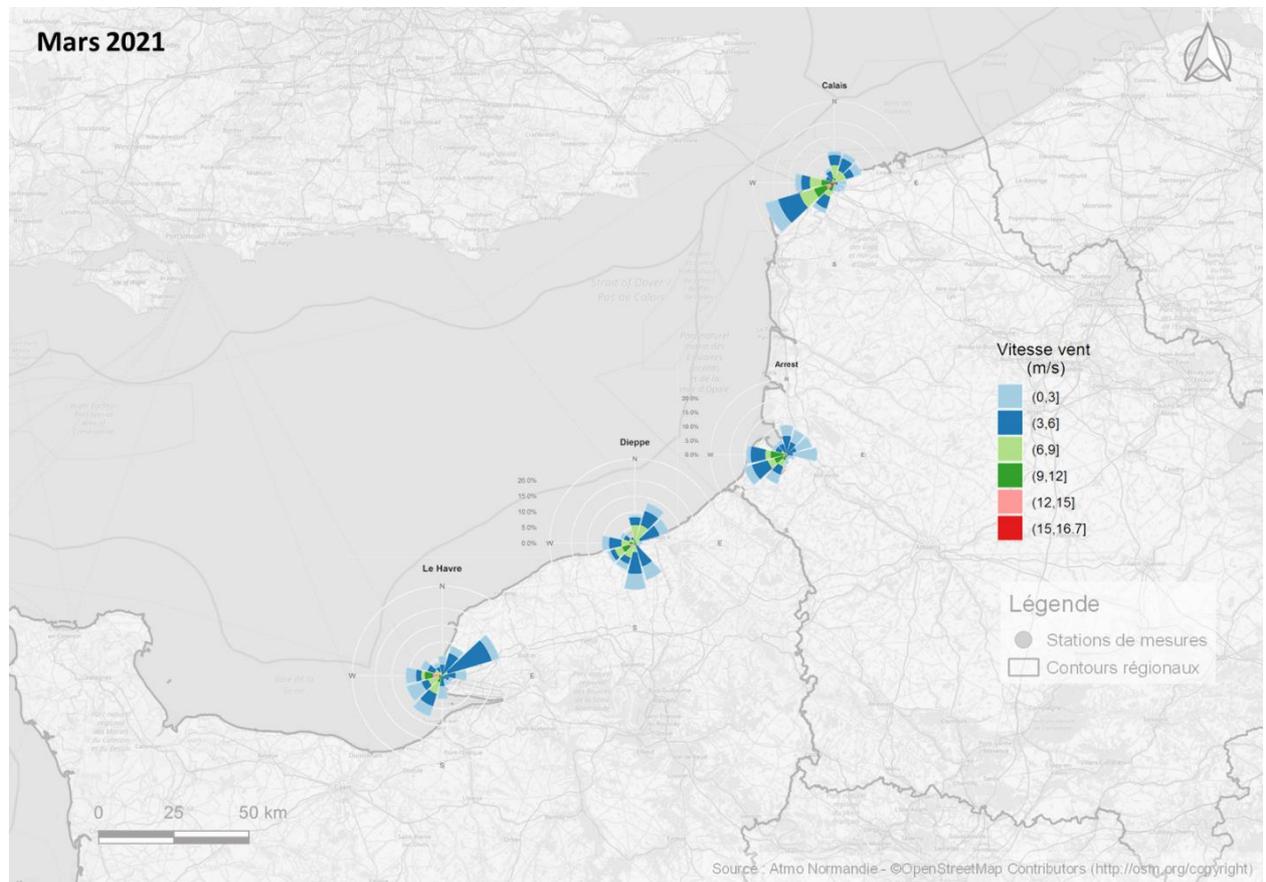


Figure 13 : Vitesses et directions du vent sur 4 stations météorologiques en mars 2021.

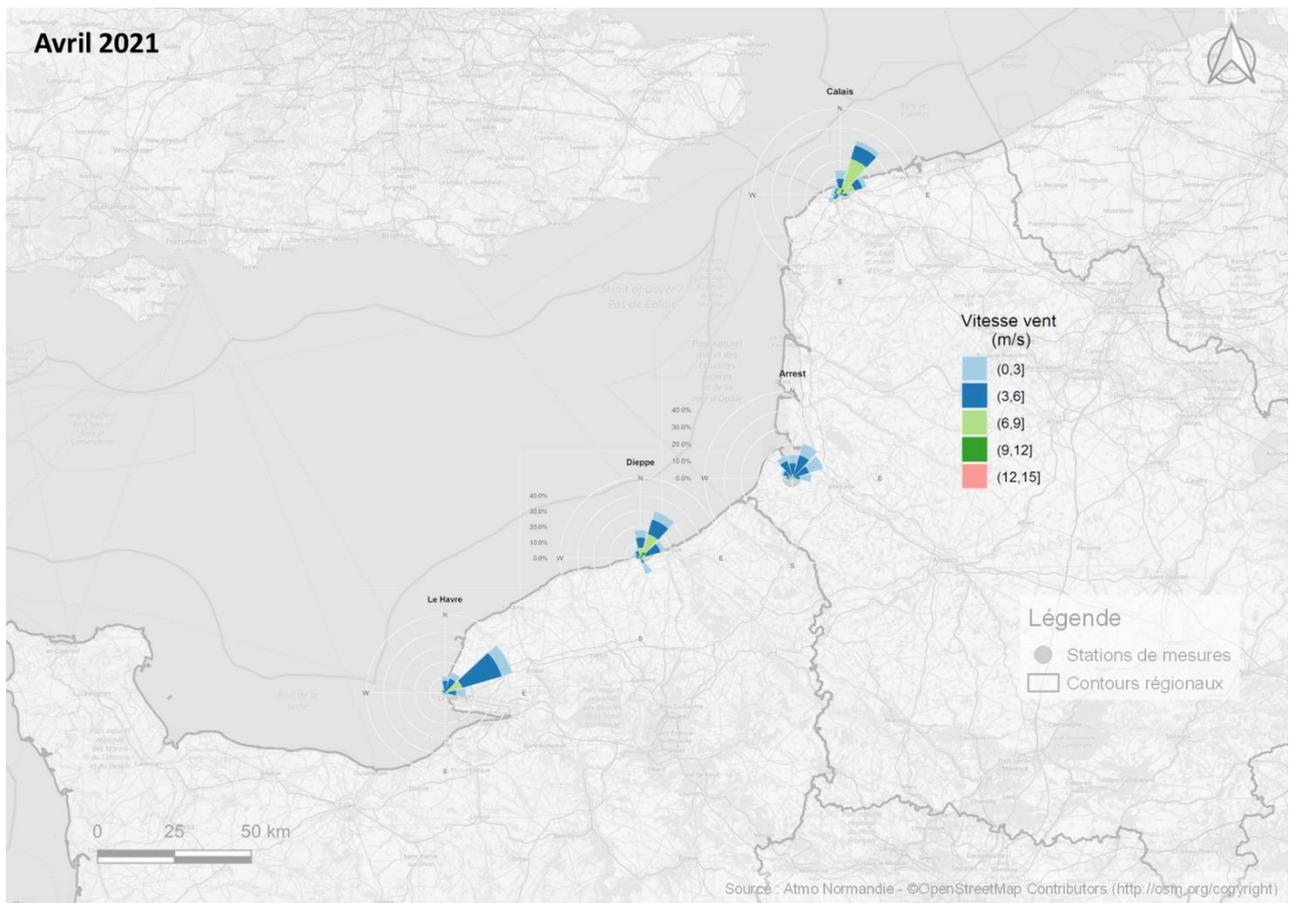


Figure 14 : Vitesses et directions du vent sur 4 stations météorologiques en avril 2021.

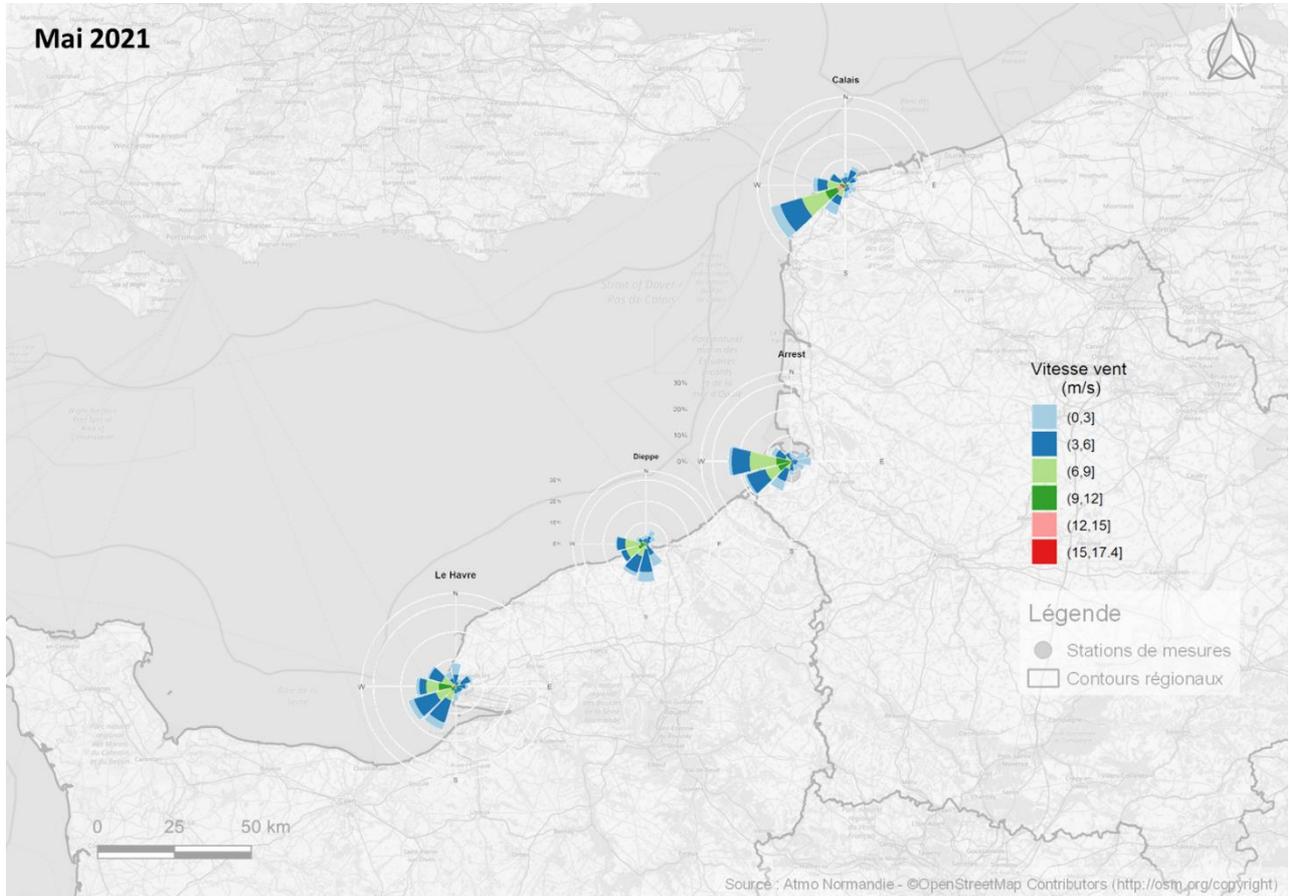


Figure 15 : Vitesses et directions du vent sur 4 stations météorologiques en mai 2021.

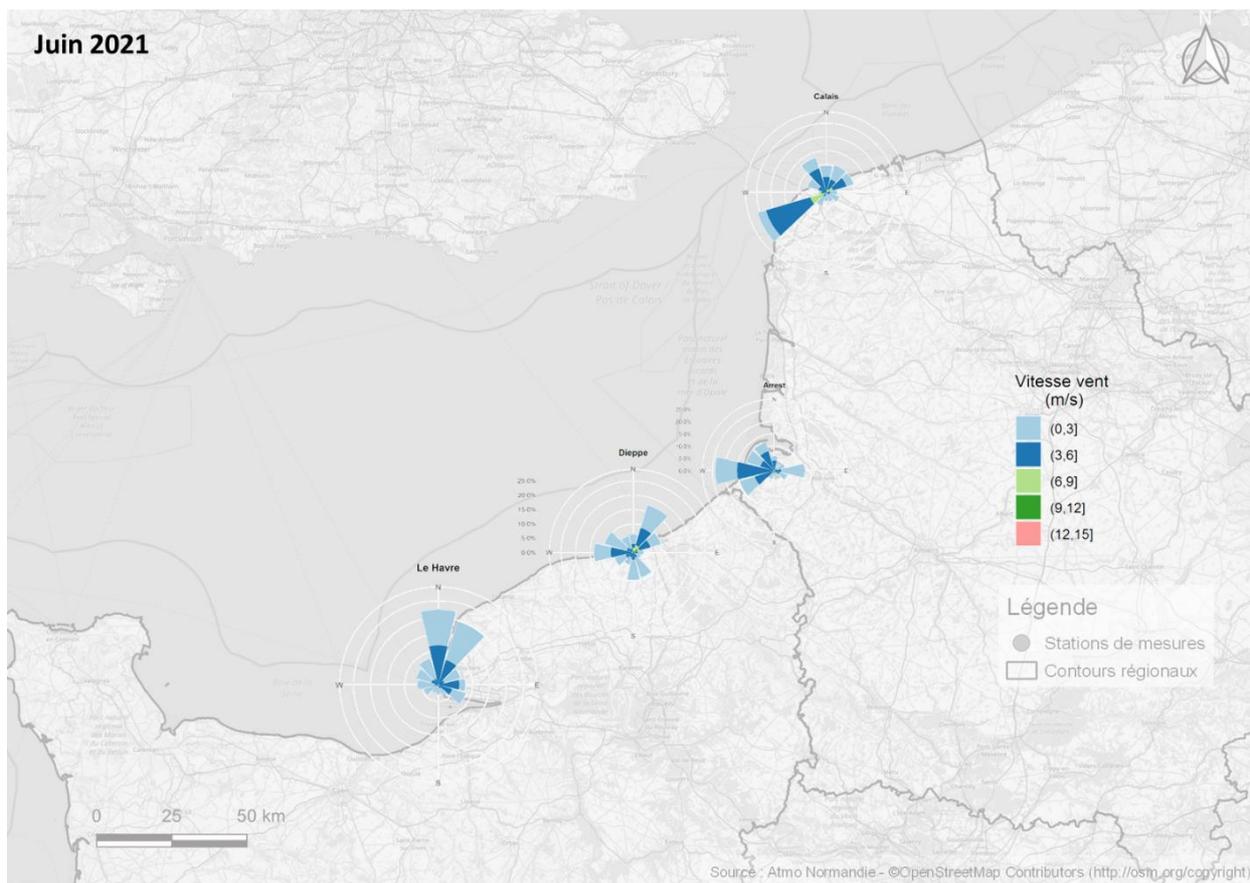


Figure 16 : Vitesses et directions du vent sur 4 stations météorologiques en juin 2021.

Comparaison des conditions météorologiques entre 2019 et 2021

Afin de mieux comprendre le faible nombre d'épisodes au printemps 2021 par rapport à l'année 2019, les conditions météorologiques (du février au juin) ont été comparées.

En 2019 les températures ont été plus douces et la vitesse des vents légèrement plus faible. Il n'y a pas des grandes différences enregistrées pour la pression ou l'humidité. En ce qui concerne la précipitation en 2019 et 2021 elle est comparable de février à avril (Tableau 9, Figure 18, Annexe 2).

Le mois de mai 2021 se caractérise par les précipitations plus importantes par rapport au mois de mai 2019. Puis le mois de juin est globalement pluvieux aussi bien en 2019 que 2020.

La comparaison des roses des vents ne montre pas des différences importantes.

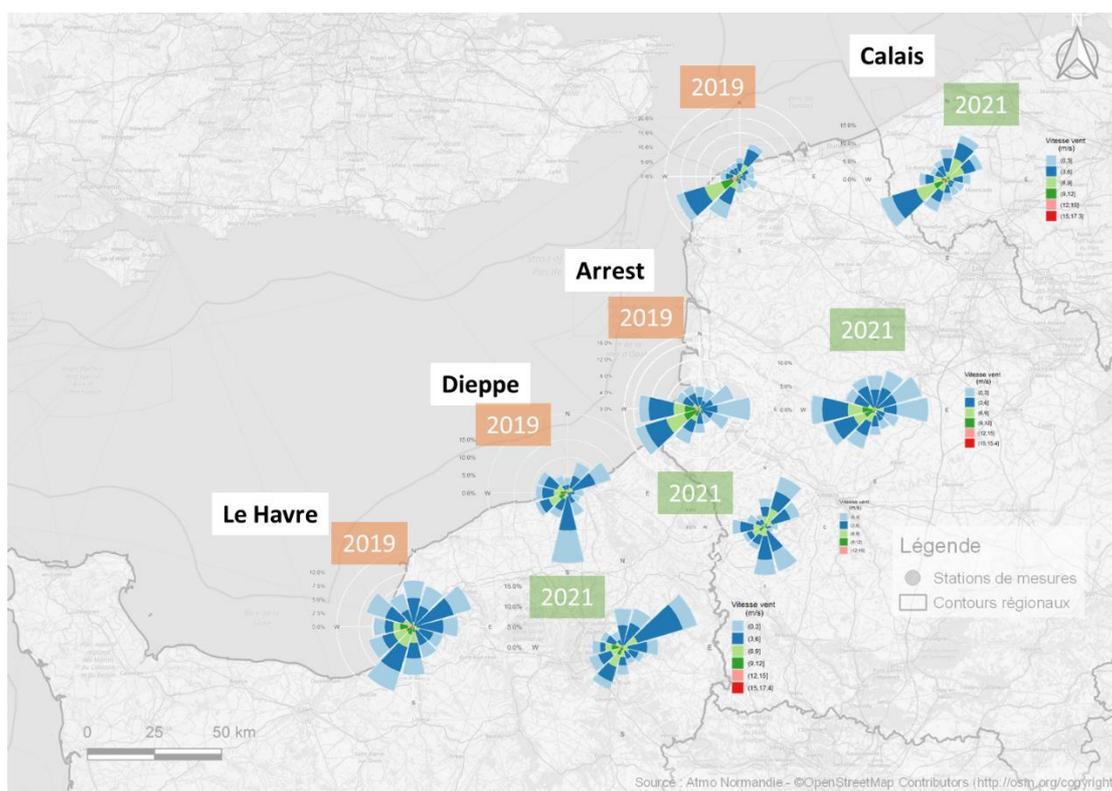


Figure 17 : Comparaison des roses des vents sur 4 stations météorologiques en 2019 et 2021.

Tableau 9 : Récapitulatif des paramètres météorologiques mesurés en 2019 et 2021.

Station	Température moyenne [°C]		Cumul des précipitation [mm]		Pression moyenne [hPa]		Humidité relative moyenne [%]		Vitesse de vent moyenne [m/s]	
	2021	2019	2021	2019	2021	2019	2021	2019	2021	2019
Arrest	9.2	11.1	229	228	-		79	79	4.2	4.3
Calais	9.3	11.0	164	207	1018	1017	76.3	78.5	5.1	4.9
Dieppe	10.0	10.7	211	190	1019	1017	78.9	79	4.5	4.4
Le Havre	9.6	11.5	161	206	1019	1017	73.4	74.8	4.7	4.3

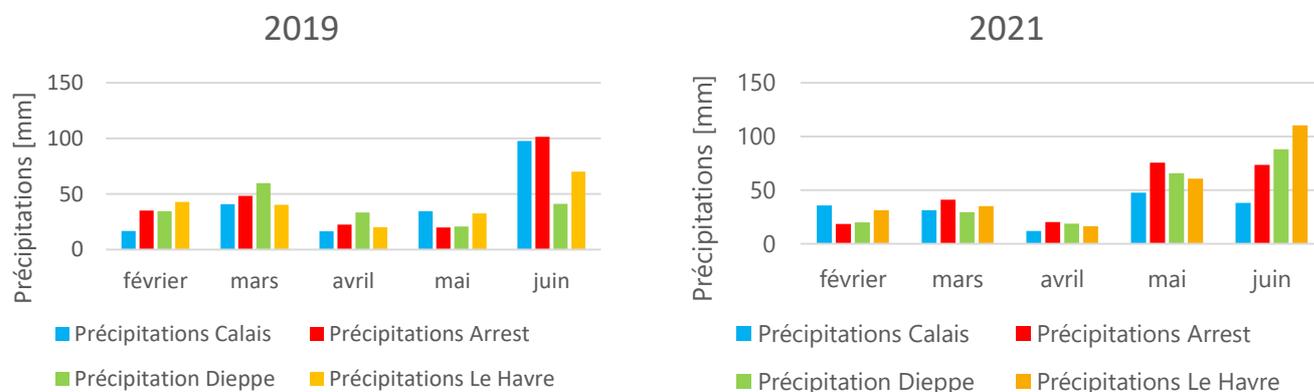


Figure 18 : Comparaison des précipitations sur 4 stations météorologiques en 2019 et 2021.

6. Résultats de l'étude

Le taux de fonctionnement varie fortement selon les instruments. Le taux de collecte des filtres pour la chimie des PM est très satisfaisant (> 99%) pour cette étude (Annexe 3).

6.1. Concentrations en particules et nombre de particules

Dans cette partie, l'évolution journalière et mensuelle des concentrations massiques de PM10 est présentée. Les roses de pollution PM10 pour chaque site et les cartes de leurs rétrotrajectoires nous apporteront les informations sur leurs origines géographiques potentielles. Les ratios PM10/PM2.5/PM1 seront discutés par la suite.

Enfin, l'analyse du nombre de particules (20-800 nm) est présentée. Elle est mesurée en continu par l'analyseur UFP3031 sur le site d'Arrest.

6.1.1. Variation temporelle

Les concentrations massiques de PM10 en moyenne journalière pour les quatre sites sont présentées sur la Figure 19.

Les évolutions temporelles de ces concentrations sont globalement similaires pour les quatre stations étudiées et ce, malgré les distances qui les séparent et leurs différentes typologies. Ce résultat suggère que les concentrations en PM10 mesurées au niveau de ces sites sont souvent sous l'influence de masses d'air qui se déplacent sur de grandes échelles (régionale/interrégionale/Europe).

Des différences existent néanmoins entre ces séries temporelles. Certaines dates sont remarquables à savoir le 02/03/2021 à Arrest, les 02/03/2021 et 03/03/2021 à Calais et le 01/04/2021 à Arrest, lors desquelles le seuil d'information et de recommandation fixé à $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne journalière est dépassé. Ces dates correspondent aux épisodes de pollution enregistrés dans le Tableau 10. Les concentrations journalières des quatre sites n'ont, en revanche, jamais dépassé le seuil d'alerte fixé à $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Globalement, sur la période d'étude, ce sont les concentrations mesurées à Calais qui sont les plus élevées. Cependant, à partir du printemps, les concentrations à Arrest sont régulièrement aussi voire plus importantes que les concentrations enregistrées à Calais.

Comparaison des moyennes journalières de PM10 sur les sites de Calais, Arrest, Ailly et Le Havre entre le 01/02/2021 et le 20/06/2021

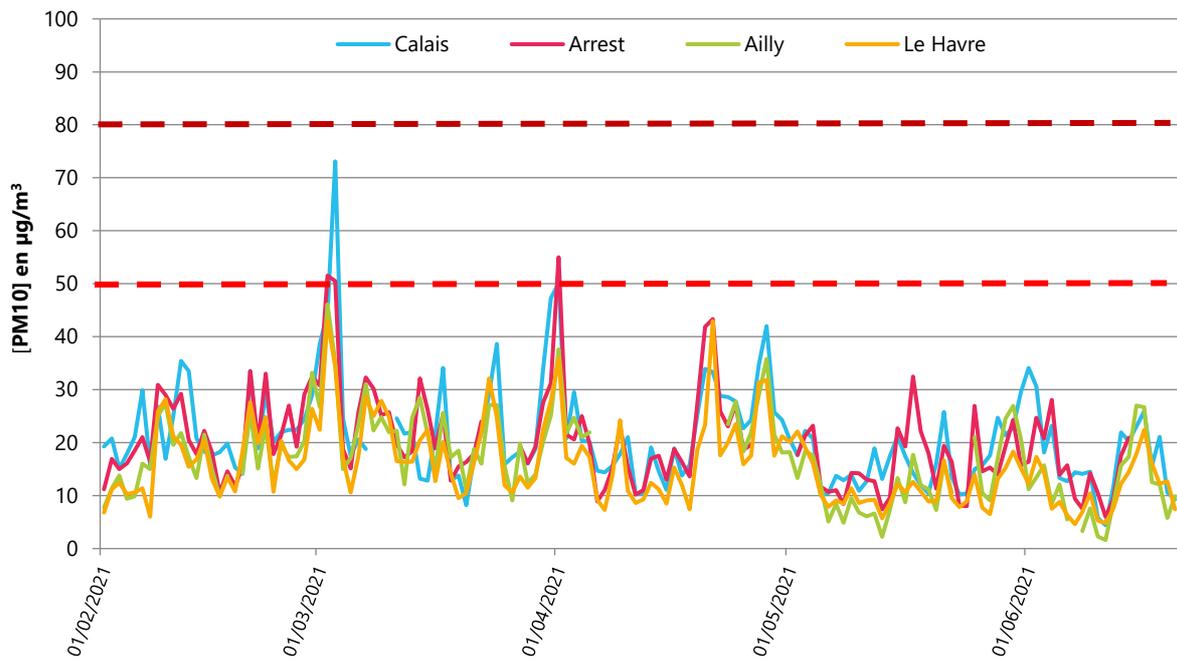


Figure 19 : Moyennes journalières en PM10 pour les 4 sites sur la période étudiée (ligne en pointillé rouge : seuil d'information et de recommandation, PM10 en moyenne journalière > 50 µg/m³ ; ligne en pointillé rouge foncé : seuil d'alerte, PM10 en moyenne journalière > 80 µg/m³)

Les concentrations mensuelles de PM10 par station ont été comparées (Figure 20) et on observe là encore que, de manière générale, elles sont plus élevées pour les stations des Hauts-de-France (Calais et Arrest) que pour celles de Normandie (Ailly et Le Havre). On peut également noter que les concentrations maximales sont mesurées en mars/avril puis qu'elles diminuent progressivement à mesure qu'on se rapproche de l'été. L'écart type est aussi plus important en mars-avril que les autres périodes.

Comparaison des moyennes journalières de PM10 sur les sites de Calais, Arrest, Ailly et Le Havre entre le 01/02/2021 et le 30/06/2021

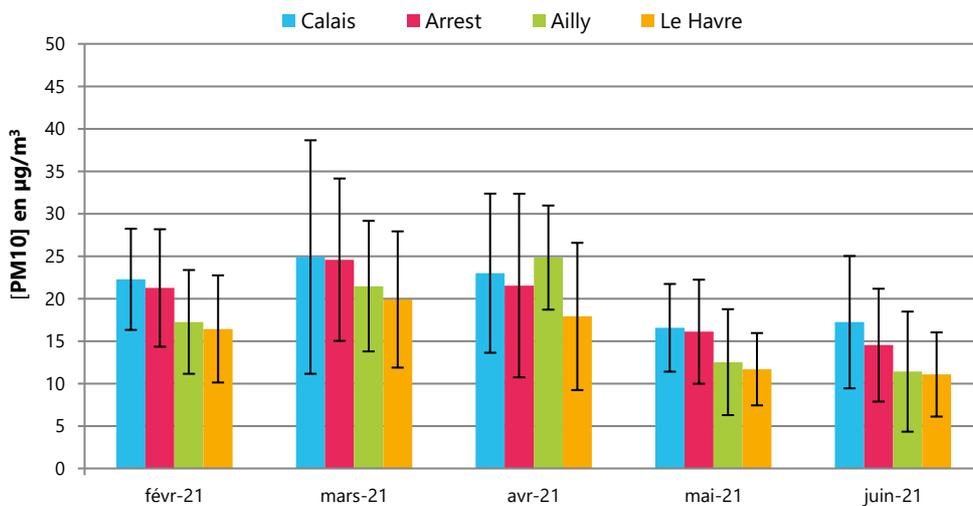


Figure 20 : Moyennes mensuelles de PM10 pour les 4 sites d'étude

Un résumé statistique des concentrations mensuelles en PM10 des quatre sites d'étude est présenté dans le Tableau 10.

Les concentrations maximales se trouvent généralement en mois de mars et d'avril et les concentrations minimales se trouvent en mai et juin. Les valeurs moyennes et médianes sont plus élevées en période froide (février-avril) qu'en période chaude (mai-juin).

Tableau 10 : Résumé statistique des concentrations mensuelles en PM10 pour les quatre sites d'étude entre le 1^{er} février 2021 et le 20 juin 2021

	[PM10]	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
Calais	Moyenne [min ; max]	22 [14 ; 35]	25 [8 ; 73]	23 [10 ; 50]	17 [10 ; 30]	17 [4 ; 34]
	Médiane	20.8	21.2	20.9	15.7	15.1
	Nombre de jours de dépassement	0	1	0	0	0
Arrest	Moyenne [min ; max]	21 [11 ; 34]	25 [13 ; 52]	22 [9 ; 55]	16 [7 ; 33]	15 [6 ; 28]
	Médiane	19.6	24.0	19.2	15.0	14.1
	Nombre de jours de dépassement	0	2	1	0	1
Ailly	Moyenne [min ; max]	17 [8 ; 33]	22 [9 ; 46]	25 [18 ; 38]	13 [2 ; 27]	11 [2 ; 27]
	Médiane	16.0	21.7	21.9	11.2	11.2
	Nombre de jours de dépassement	0	0	0	0	0
Le Havre	Moyenne [min ; max]	16 [6 ; 28]	20 [10 ; 43]	18 [7 ; 43]	12 [6 ; 22]	11 [5 ; 22]
	Médiane	16.0	17.4	17.2	10.1	11.3
	Nombre de jours de dépassement	0	0	0	0	0

6.1.2. Roses de pollution PM10

Les roses de pollution mettent en évidence les directions et vitesses de vents associées à des concentrations élevées. Chaque case correspond à une direction (d'où vient le vent) et une vitesse de vent. Les cases éloignées du centre représentent les vitesses de vent les plus élevées. La couleur de la case indique la concentration mesurée pour cette catégorie de vent (rouge pour la concentration la plus élevée et bleu/violet pour la concentration la plus faible). La direction du vent est indiquée par N (nord), S(sud), E (est), et W (ouest). La vitesse du vent est indiquée dans l'axe du graphe (entre 0-20 km/h).

Les roses de pollution PM10 sont réalisées par la méthode *Non-parametric Wind Regression* (NWR) avec l'outil de Zefir (J.-E. Petit *et al.*, 2017).

A Calais, les concentrations plus importantes (>30 µg/m³) des PM10 se trouvent dans le quart NE-E-SE, associées à des vents soit inférieurs à 10 km/h, soit supérieurs à 15 km/h. Ceci indique que les sources locales et les sources lointaines sont toutes responsables des augmentations de concentrations observées à Calais.

A Arrest, les concentrations plus élevées (~25 µg/m³) se trouvent dans les directions NE-E, avec une vitesse de vent inférieure à 10 km/h, donc cette station est plutôt sous influence locale et régionale.

A Ailly, les concentrations les plus importantes (20-25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) sont uniquement associées à des vents relativement forts (10-15 km/h) de secteur NE. Les PM10 observées ici sont principalement transportées et issues de sources régionales voire plus lointaines, très peu de sources locales étant présentes autour de ce site de mesure.

Au Havre, les concentrations élevées (20-25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) se trouvent principalement dans les directions SE-S associées à des vitesses de vents faibles à moyennes (<15 km/h). Les sources locales et régionales semblent donc prédominantes pour ce site.

En général, les concentrations de fond sont plus élevées en Hauts-de-France (15-20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) qu'en Normandie (10-15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

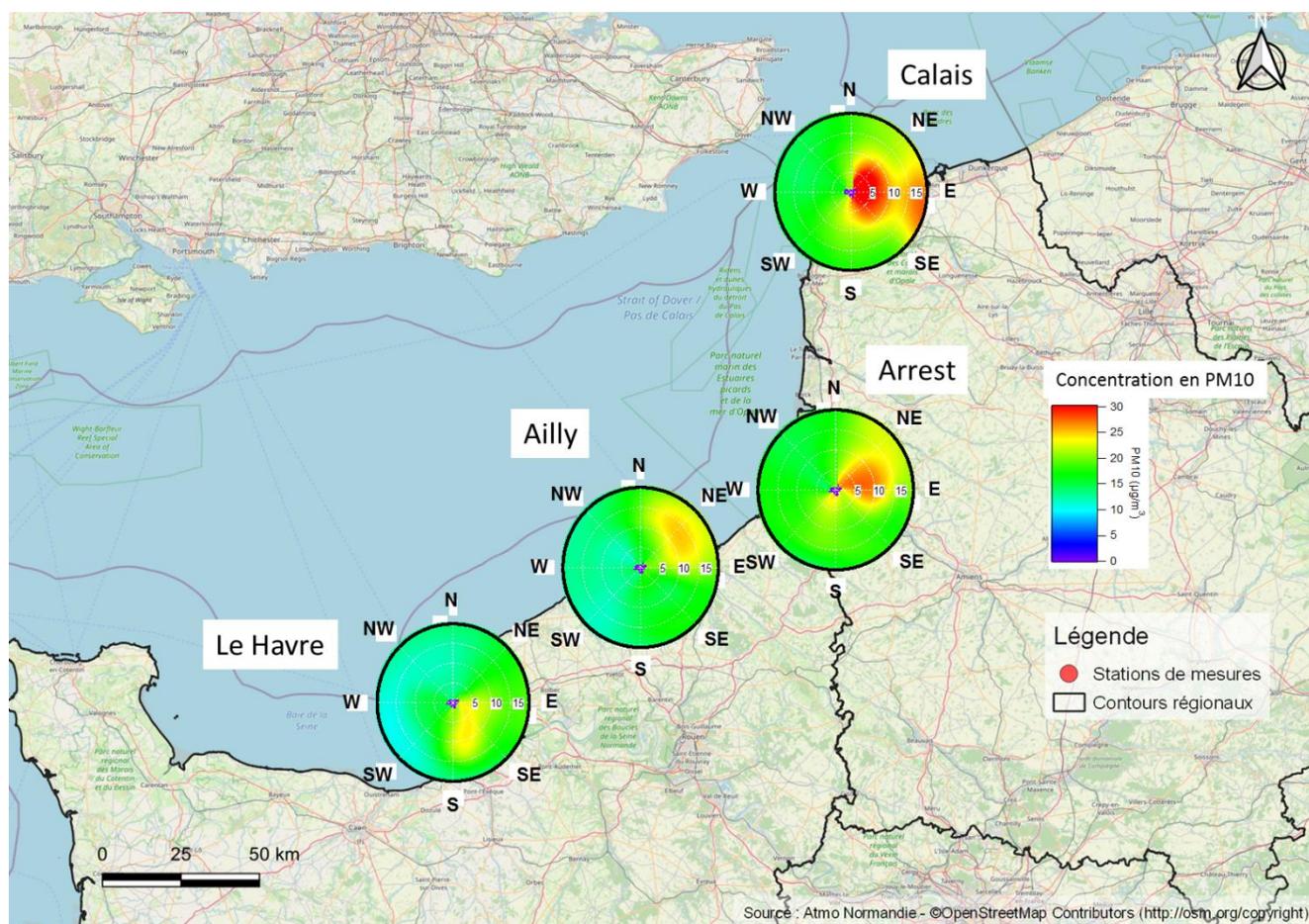


Figure 21 : Roses de pollutions de PM10 (NWR) pour les 4 sites.

Les analyses des rétrotrajectoires des particules PM10 sont présentées dans l'Annexe 4. A noter que cette analyse reste une information indicative de provenance des particules PM10.

6.1.3. Ratio PM10/PM2.5/PM1 en moyenne journalière

En général, un ratio PM2.5/PM10 élevé représente que les particules PM10 proviennent principalement de sources anthropiques. En revanche, un faible ratio PM2.5/PM10 indique une prédominance des particules grossières, qui pourraient être liées à des sources naturelles, par exemple, les sels marins ou les poussières minérales.

La comparaison de l'évolution du ratio PM2.5/PM10 en moyenne journalière est présentée sur la Figure 22 et un résumé statistique de ces ratios est présenté dans le Tableau 11.

Globalement, on constate que les courbes d'évolution du ratio PM2.5/PM10 des quatre stations de mesures suivent la même tendance de février à mai avec des valeurs de ratios fluctuant entre 0.4 et 0.9, ce qui signifie que les plus fines particules (<2.5 µm) peuvent représenter entre 40% à 90% des PM10. Certains jours, ces particules fines sont donc très majoritaires. A noter que le ratio PM2.5/PM10 à Calais est plus faible que celui des autres 3 stations, ce qui signifie que les PM10 à Calais présentent une proportion plus importante dans la partie grossière (poussières dont la taille est comprise entre 2.5 et 10 µm). A noter que à 15-20 km au sud-ouest de Calais, les carrières de calcaire peuvent contribuer à la fraction plus grossière dans les particules PM10 en plus des sels marins.

Puis en juin, on observe que le ratio diminue nettement à Calais ce qui signifie que les particules PM10 sont dominées par les particules grossières.

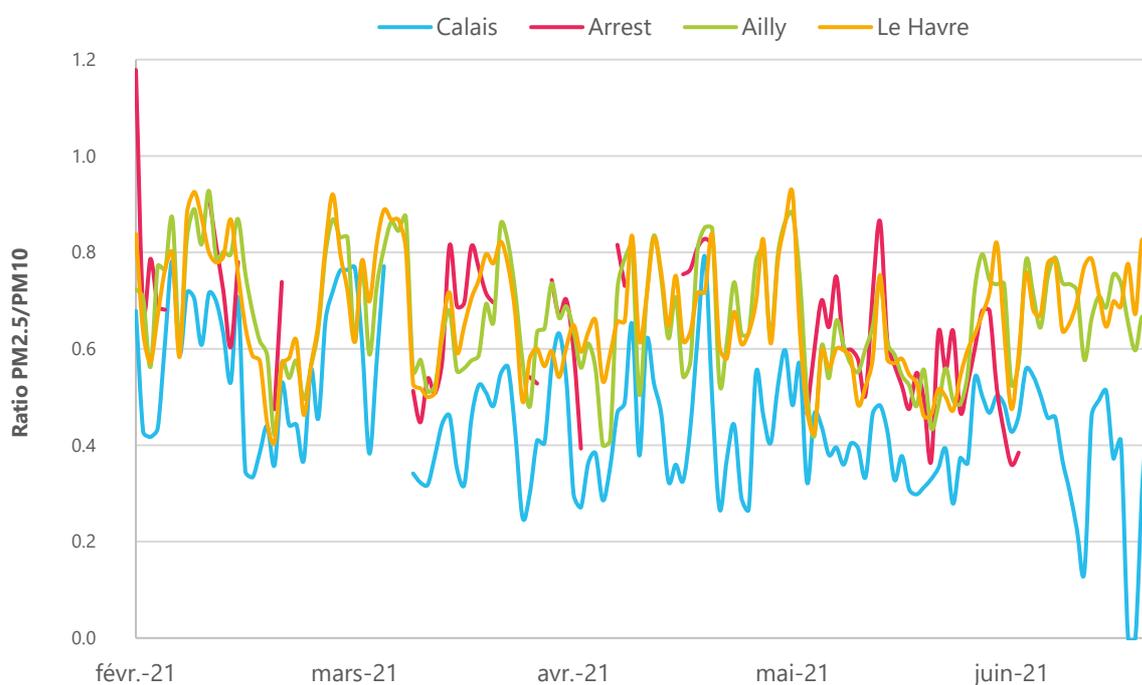


Figure 22 : Evolution du ratio PM2.5/PM10 pour les 4 sites d'étude entre le 1^{er} février 2021 et le 20 juin 2021

Tableau 11 : Résumé statistique des ratios PM2.5/PM10 pour les quatre sites d'étude entre le 01/02/2021 et le 20/06/2021

		Février	Mars	Avril	Mai	Juin
Calais	Moyenne [min ; max]	0.5 [0.3 ; 0.8]	0.5 [0.3 ; 0.8]	0.4 [0.3 ; 0.8]	0.4 [0.3 ; 0.6]	0.4 [0.1 ; 0.6]
	Médiane	0.5	0.5	0.4	0.4	0.5
Arrest	Moyenne [min ; max]	0.8 [0.5 ; 1.2]	0.6 [0.4 ; 0.8]	0.7 [0.4 ; 0.8]	0.6 [0.4 ; 0.9]	0.6 [0.4 ; 1.2]
	Médiane	0.7	0.7	0.7	0.6	0.4
Ailly	Moyenne [min ; max]	0.7 [0.4 ; 0.9]	0.7 [0.5 ; 0.9]	0.7 [0.4 ; 0.9]	0.6 [0.4 ; 0.9]	0.7 [0.4 ; 0.8]
	Médiane	0.7	0.7	0.7	0.6	0.7
Le Havre	Moyenne [min ; max]	0.7 [0.4 ; 0.9]	0.7 [0.5 ; 0.9]	0.7 [0.5 ; 0.8]	0.6 [0.4 ; 0.9]	0.7 [0.5 ; 0.8]
	Médiane	0.7	0.7	0.7	0.6	0.7

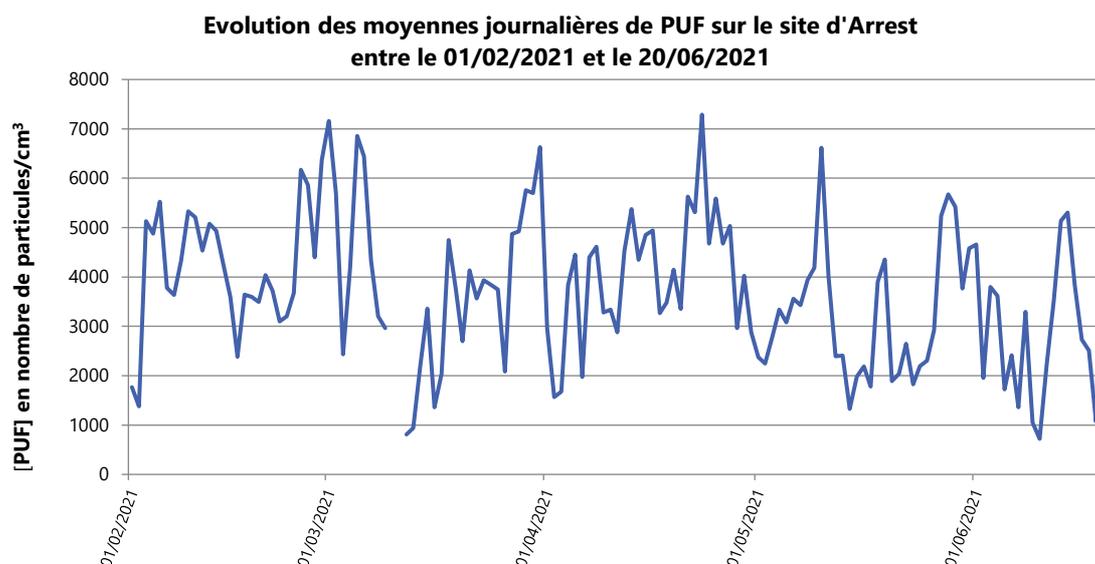


Figure 24 : Moyennes journalières de PUF pour les 4 sites sur la période étudiée

En revanche, si on approfondit en étudiant l'évolution de la concentration moyenne mensuelle durant la période étudiée (Figure 25), on constate que les niveaux moyens mensuels de PUF sont assez similaires de février à avril (~4000 p/cm³) puis baissent significativement à partir de mai (~3000 p/cm³). Les PUF totales mesurées à Lille Leeds (mesure sous influence du trafic automobile) sont environ 2 fois plus élevées (6000-8000 p/cm³) que celles d'Arrest pour la même période. Les PUF mesurées à Arrest correspondent au niveau de fond moyen en Hauts-de-France (< 5000 p/cm³).

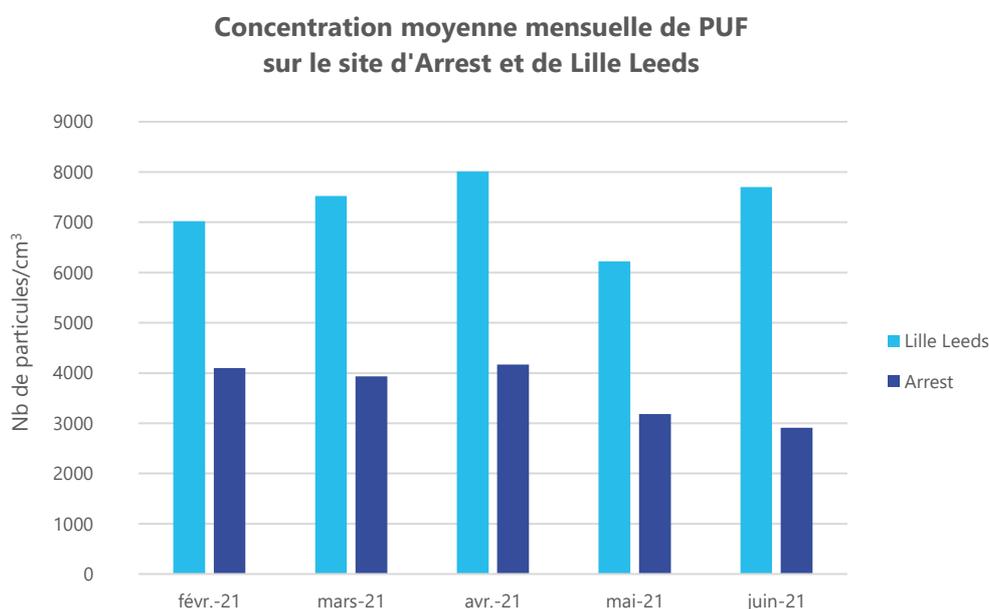


Figure 25 : Evolution de la concentration moyenne mensuelle de PUF mesurées aux stations d'Arrest et de Lille Leeds

Les figures suivantes (Figure 26 et Figure 27) présentent la comparaison des moyennes journalières des différentes classes granulométriques de PUF.

Les fractions plus fines (20-70 nm) ne montrent pas la même évolution temporelle que les fractions grosses (70-800 nm). Il est intéressant de noter que certaines classes (20-30 nm et 30-50 nm) (70-100 nm et 100- 200 nm) suivent la même tendance au cours du temps.

Les fractions plus fines (20-50 nm) augmentent significativement entre fin avril et début mai, notamment le 24 avril et le 11 mai. En revanche, les grosses fractions (70-200 nm) sont plus élevées en début mars et mi-juin.

Les variations de la concentration des PUF totales ne sont donc pas dominées par une seule classe granulométrique de PUF.

Comparaison des moyennes journalières de PUF sur le site d'Arrest entre le 01/02/2021 et le 20/06/2021

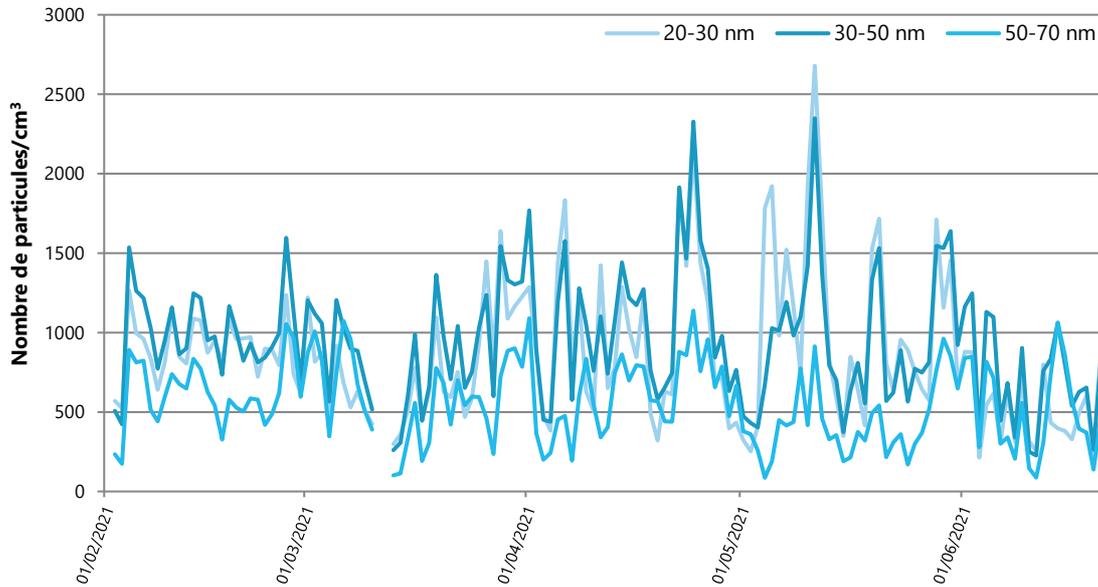


Figure 26 : Moyennes journalières de PUF sur le site d'Arrest sur la période étudiée pour la gamme 20 - 70 nm

Comparaison des moyennes journalières de PUF sur le site d'Arrest entre le 01/02/2021 et le 20/06/2021

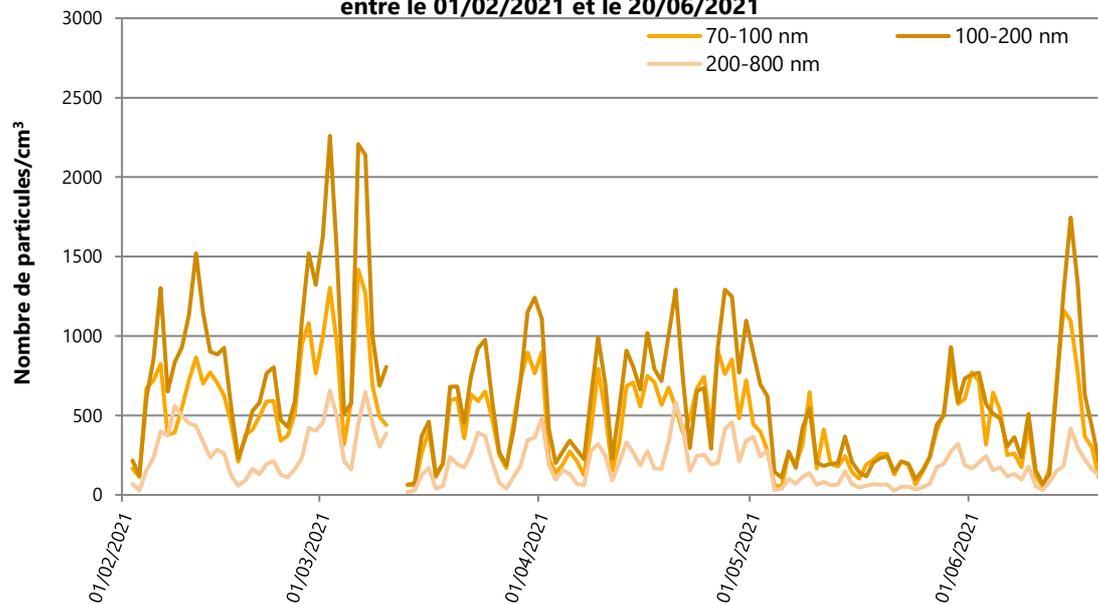


Figure 27 : Moyennes journalières de PUF sur le site d'Arrest sur la période étudiée pour la gamme 70 - 800 nm

La Figure 28 présente une comparaison entre l'évolution journalière des PUF totales et des PM10 durant la période d'étude. Tout d'abord, on remarque que l'évolution journalière des PUF totales et des PM10 est similaire durant les mois de février et mars. En revanche, à partir d'avril, les pics de concentration de PUF ne coïncident plus nécessairement avec ceux de PM10, et inversement. Ce constat peut être en lien avec une répartition différente des classes granulométriques au sein des PUF totales. C'est pourquoi, une comparaison plus approfondie a été faite en séparant les PUF selon leur classe granulométrique.

Il est intéressant de constater que les pics de PUF mesurés les 2 mars et 1^{er} avril sont concomitants aux pics de pollution en PM10 enregistrés ces jours-là à la station d'Arrest.

Comparaison des évolutions journalières de PUF et PM10 sur le site d'Arrest entre le 01/02/2021 et le 20/06/2021

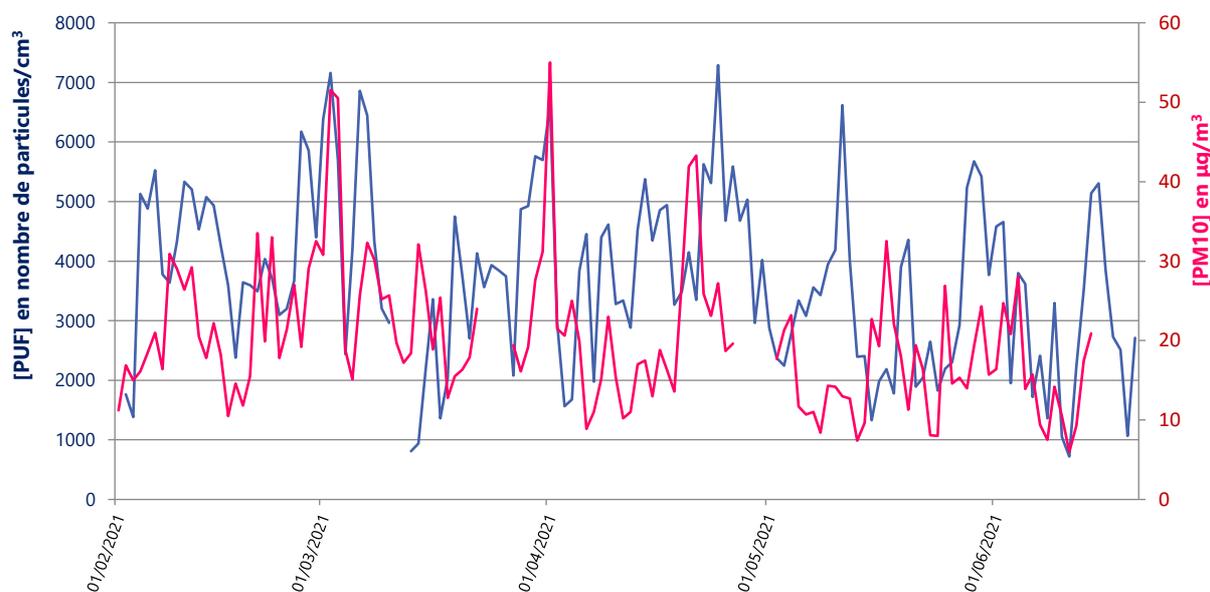


Figure 28 : Comparaison des évolutions journalières de PUF (en bleu) et de PM10 (en rouge) mesurées à la station d'Arrest entre le 01/02/2021 et le 20/06/2021

Les Figure 29 et Figure 30 montrent qu'il y a très peu de similarité entre les fractions fines de PUF en nombre et les particules PM10 en masse, sauf le pic du 01/04. En revanche, la classe 100-200 nm montre une bonne corrélation avec les PM10 en période hivernale, notamment pour les pics des 2 et 3 mars. Cette classe est considérée comme un traceur de combustion biomasse et sa comparaison avec BC_{wb} est présentée dans l'Annexe 6.

Comparaison des évolutions journalières de PUF et PM10 sur le site d'Arrest entre le 01/02/2021 et le 20/06/2021

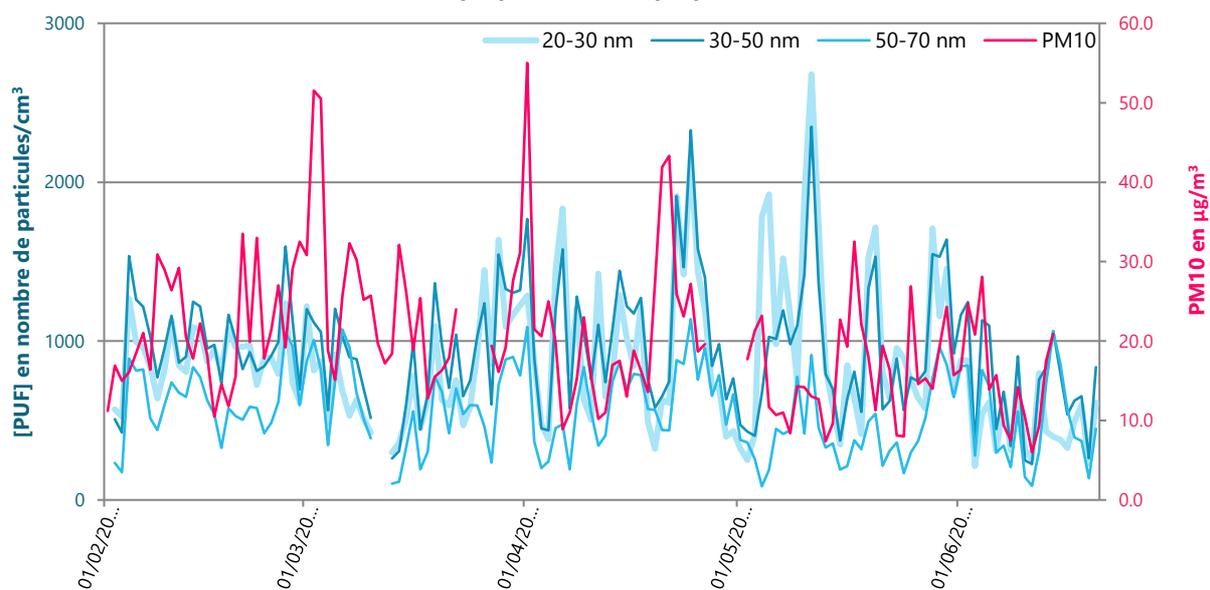


Figure 29 : Comparaison des évolutions journalières de PUF en fonction de la classe granulométrique et de PM10 (en rouge) mesurées à la station d'Arrest entre le 01/02/2021 et le 20/06/2021

Comparaison des évolutions journalières de PUF et PM10 sur le site d'Arrest entre le 01/02/2021 et le 20/06/2021

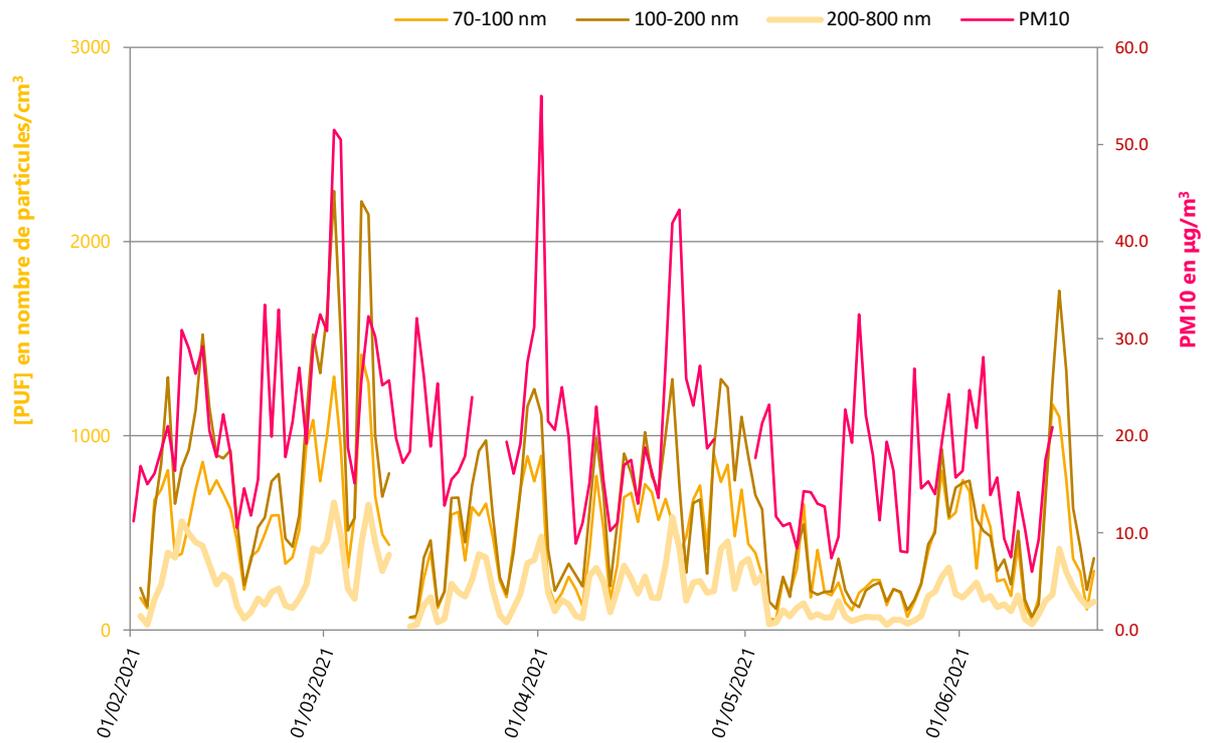


Figure 30 : Comparaison des évolutions journalières de PUF en fonction de la classe granulométrique et de PM10 (en rouge) mesurés à la station d'Arrest entre le 01/02/2021 et le 20/06/2021

La comparaison entre les PUF et les PM10 pendant les épisodes de pollution est présentée dans l'Annexe 7.

6.2. Composition chimique des PM10

Cette partie présente les résultats de la spéciation chimique des PM10, déterminée par prélèvement sur filtres et analyse différée (voir section 4.3). La composition moyenne, la balance ionique et la variation mensuelle sont discutées pour les quatre sites étudiés.

6.2.1. Composition chimique moyenne

La composition chimique moyenne pour la même période de prélèvement (10/02 – 16/06/2022) pour les quatre sites étudiés est présentée sur la Figure 31.

La différence entre la concentration massique des PM10 et la somme des masses des espèces chimiques déterminées par l'analyse est considérée comme « masse inconnue ». Elle représente de 25% à 49% des particules PM10 selon le site d'étude (Annexe 8). Ces masses non déterminées sont probablement liées :

- Aux incertitudes sur la masse mesurée par la méthode TEOM-FDMS (jusqu'à 25%).
- Aux incertitudes liées au choix du facteur de conversion $(1.8)^2$ entre le carbone organique (OC) et la matière organique (OM).
- À la quantité d'eau contenue dans l'aérosol, qui n'est pas prise en compte dans l'analyse chimique mais qui est incluse dans les mesures de masse totale.
- Aux composés semi volatils qui sont mesurés par les TEOM-FDMS mais qui ne sont plus présents sur les filtres au laboratoire (une partie de nitrate d'ammonium, et de matière organique).

La matière organique (OM) est calculée à partir des mesures de carbone organique (OC) multipliées par un facteur 1.8. La reconstitution des particules PM10 à partir de la composition chimique et le choix du facteur permettant de convertir OC en OM est discutée dans l'Annexe 9.

La **matière organique** est le composé dominant pour tous les sites, qui représente respectivement 30 et 33% au Havre et à Arrest, et 25 et 26% à Calais et Ailly. La matière organique est en proportion plus faible que ce qui est observé plus généralement à l'intérieur des terres (en liaison avec une contribution plus importante des embruns marins). Elle représente 42% des particules PM10 mesurées à Nogent-sur-Oise en 2013 et 2016 (Annexe 10).

Les composés **inorganiques secondaires** sont similaires pour les quatre sites : 24-25% de nitrate, 10-13% de sulfate et 7-9% d'ammonium. La contribution des **sels marins** (NaCl) varie entre 16%-21% : elle est plus faible à Arrest du fait du plus grand éloignement de ce site à la mer (Tableau 2). Les **autres ions** (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) et les **métaux** contribuent seulement à hauteur de 3%-4% des particules PM10 mesurées sur chaque site.

² Barbara J. Turpin et Ho-Jin Lim, « Species Contributions to PM2.5 Mass Concentrations: Revisiting Common Assumptions for Estimating Organic Mass », *Aerosol Science and Technology* 35, n° 1 (1 janvier 2001): 602-10, <https://doi.org/10.1080/02786820119445>.

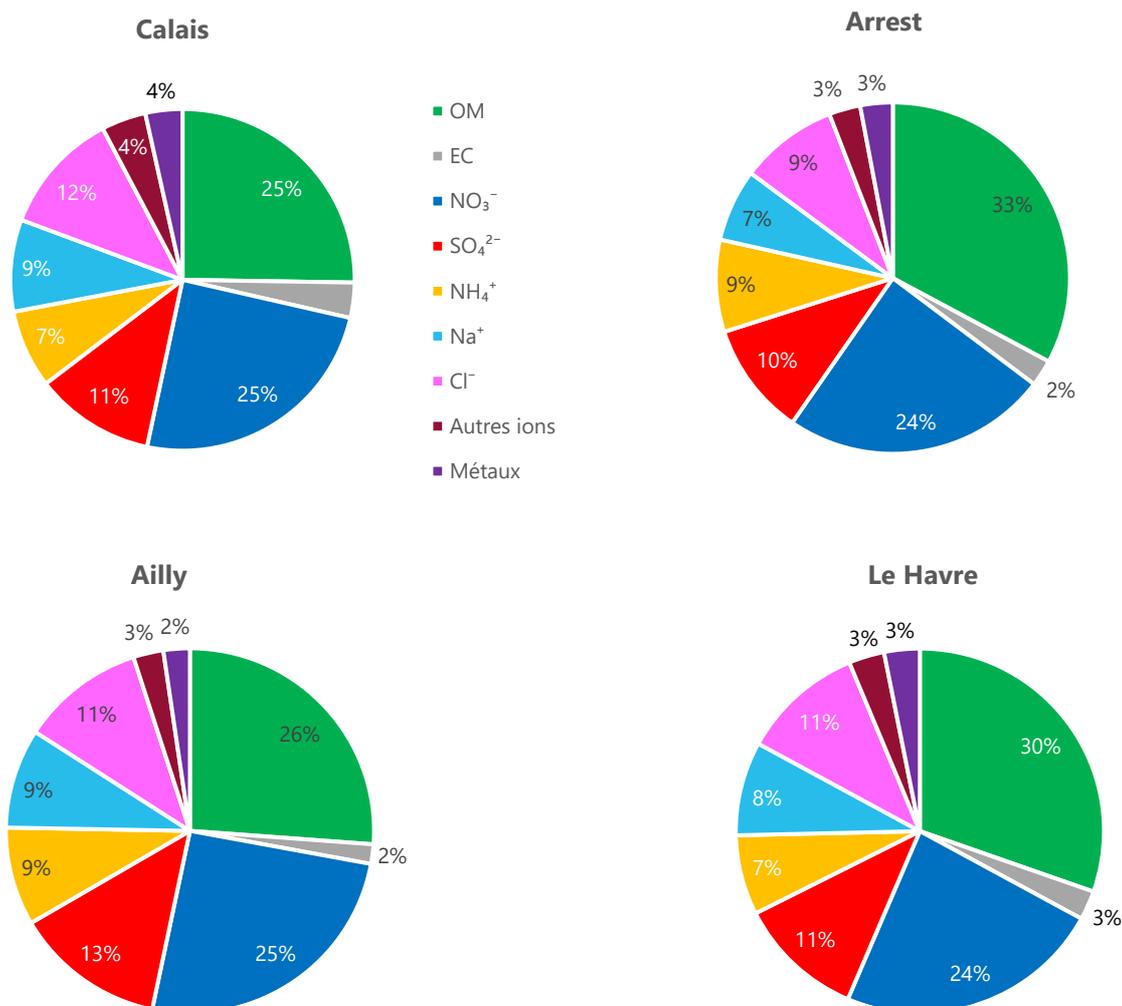


Figure 31 : Composition chimique moyenne pour 4 sites étudiés

Un résumé de la concentration moyenne de chaque composé est présenté dans le Tableau 12. Les niveaux sont plus élevés pour la plupart des composés à **Calais**. A Arrest, la matière organique et l'ammonium sont plus importants que sur les autres sites.

Tableau 12 : concentration moyenne de différents composés pour 4 sites entre 11/02 et 16/06

(µg/m ³)	OM	EC	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	Autres ions	Métaux
Calais	3.17	0.43	3.22	1.44	0.94	1.15	1.52	0.56	0.46
Arrest	4.08	0.31	3.11	1.29	1.06	0.87	1.18	0.38	0.40
Ailly	2.28	0.15	2.36	1.10	0.79	0.79	1.00	0.24	0.21
Le Havre	3.53	0.30	2.83	1.34	0.84	0.99	1.28	0.38	0.38

Ce qu'il faut retenir !

Les composés mesurés les plus importants pour tous les sites :
la matière organique et le nitrate

6.2.2. Balance ionique

La balance ionique a été réalisée pour évaluer la nature des particules collectées. Cette analyse permet de valider la qualité de l'analyse et connaître la nature des particules.

Pour chaque site, la somme des cations (sodium, ammonium, potassium, calcium et magnésium) est comparée avec la somme des anions (chlorure, nitrate et sulfate). Il y a une très bonne corrélation dans la balance ionique avec un $R^2=0.92-0.99$; la pente de cette régression linéaire est de 0.96-1.00. En conclusion, l'analyse des ions montre que la particule est quasi-neutre pour ces 4 sites et les concentrations des cations et des anions sont bien validées. Cela montre également que les autres ions (par exemple, les carbonates ne sont pas mesurés) ne sont pas trop présents pendant cette étude.

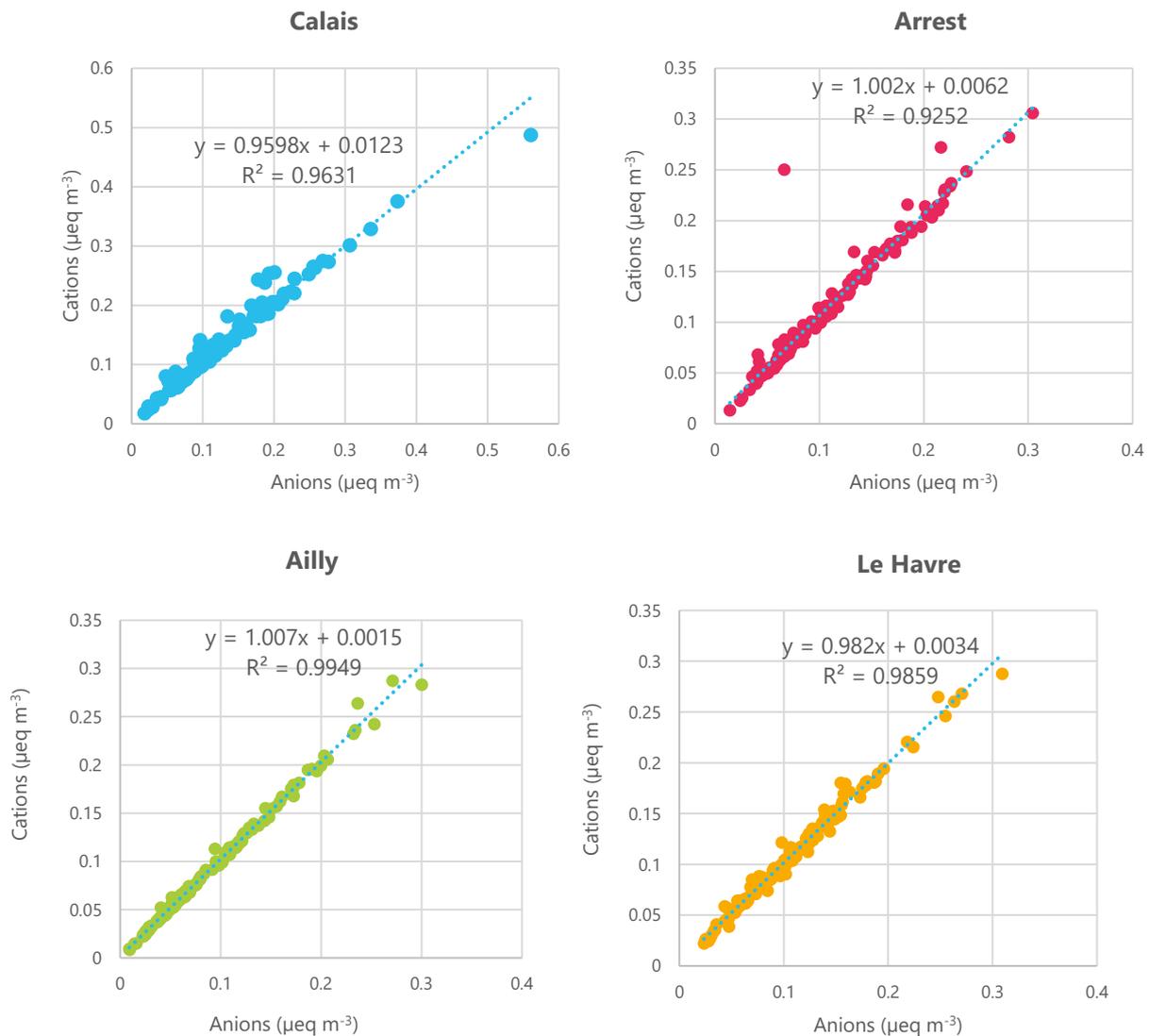


Figure 32 : Corrélation entre la somme des anions et la somme des cations (microéquivalent par mètre cube) pour 4 sites étudiés

Ce qu'il faut retenir !

Bon équilibre entre cations et anions : particule quasi-neutre pour ces 4 sites

6.2.3. Variation mensuelle

La composition chimique montre une variation mensuelle significative pour tous les sites. La différence entre la concentration massique des PM10 et la somme des masses des espèces chimiques déterminées par l'analyse est considérée comme « masse inconnue ».

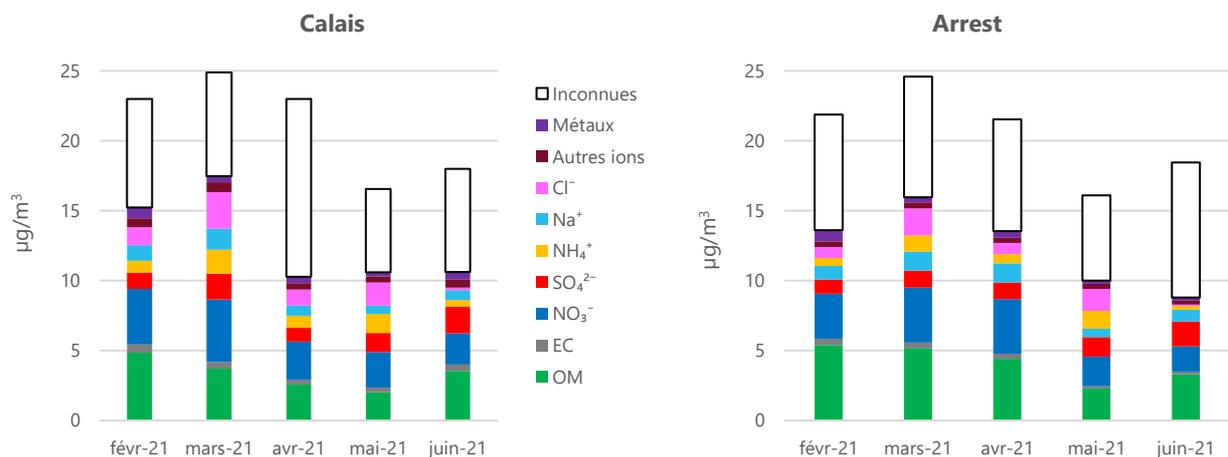
La variation de la matière organique et de ses traceurs sera discutée dans les sections 6.3.3 et 6.3.4.

La concentration de nitrate particulaire dépend des conditions météorologiques et des émissions de NO_x et de NH₃. En hiver et au printemps (périodes de fortes émissions liées aux épandages agricoles), sous des conditions anticycloniques (garantissant ainsi du temps sec et ensoleillé), le nitrate d'ammonium se forme en quantités importantes en phase particulaire.

La concentration du nitrate et de l'ammonium en moyenne mensuelle est plus élevée en période hivernale/printanière (4-6 µg/m³). En période estivale (mai-juin), avec les températures élevées, le nitrate d'ammonium se volatilise et passe en phase gazeuse ce qui explique que sa concentration en phase particulaire diminue (0.6-3.2 µg/m³). On parle de composé semi-volatil.

Les concentrations moyennes de sulfate présentent également des variations saisonnières bien marquées, avec des contributions plus importantes en juin (1.4-1.9 µg/m³). Les concentrations estivales élevées sont généralement liées au plus fort ensoleillement favorisant l'oxydation photochimique du SO₂ qui est ainsi transformé en acide sulfurique (H₂SO₄). Contrairement au nitrate d'ammonium, le sulfate d'ammonium n'est pas semi-volatil. Il est donc plus stable en phase particulaire, et peut être transporté sur de longues distances à partir de sa source d'origine.

Les ions Cl⁻ et Na⁺ dans les PM10 sont considérés comme provenant principalement des sels marins. Au mois de mars, la concentration en Cl⁻ est plus élevée (1.6-2.6 µg/m³) pour tous les sites. A noter que le niveau du NaCl du mois de mai est plus important au Havre que sur les autres sites. Au Havre, les vents en provenance majoritairement de la mer peuvent expliquer cette augmentation (Figure 15).



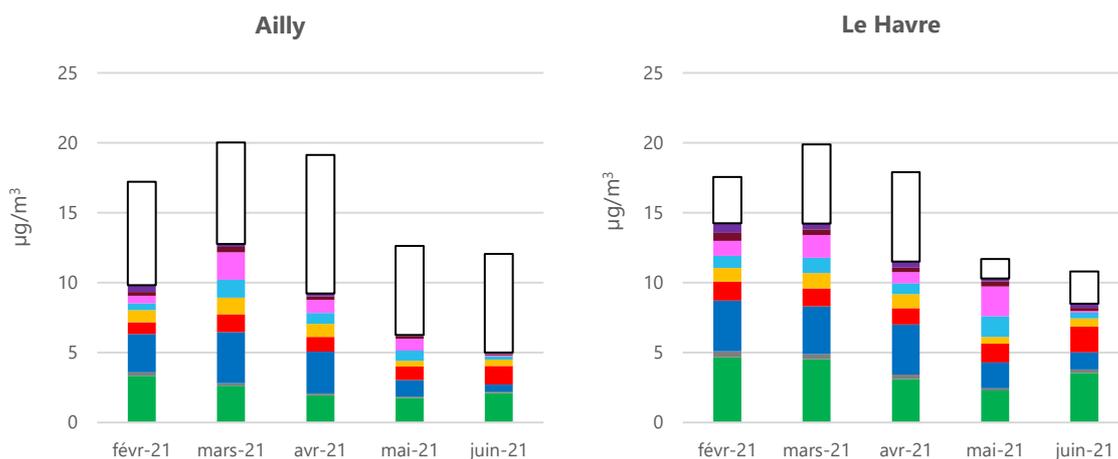


Figure 33 : Composition chimique mensuelle pour 4 sites étudiés

Ce qu'il faut retenir !

La composition chimique des particules en suspension montre une variation mensuelle significative

6.3. OC/EC/BC

Le carbone élémentaire (EC) est directement émis dans l'atmosphère (EC primaire) par la combustion incomplète de combustibles carbonés. Le carbone organique (OC) peut être émis directement sous forme de particules (OC primaire) ou formé à partir de la conversion de gaz en particules (OC secondaire).

Le Black Carbon (BC), appelé également le carbone suie, est formé par la combustion incomplète comme l'EC et il est produit par 2 sources primaires principales : la combustion d'hydrocarbures (trafic) et de biomasse (feu de bois en particulier) (LCSQA, 2015, 2017, 2020) (Annexe 1).

Dans cette section, le Black Carbon (BC) mesuré par l'AE33 et ses deux sources seront discutés. Ensuite, le BC sera comparé avec le carbone élémentaire (EC) prélevé sur filtre. Les ratios et la variation mensuelle du carbone organique et du carbone élémentaire seront également discutés. Enfin, les traceurs organiques nous indiqueront les sources potentielles des particules PM10.

6.3.1. Black Carbon BC (AE33)

Les concentrations d'équivalent black carbon (eBC) en moyenne journalière pour les quatre sites sont présentées sur la Figure 34 et un résumé statistique des concentrations du black carbon ainsi que sa déconvolution en fonction des sources (estimation de la proportion des 2 sources principales qui émettent ce composé) pour les quatre sites d'étude est présentée dans le Tableau 13.

Les tendances temporelles de ces concentrations sont globalement similaires pour les quatre stations étudiées et ce, malgré les distances qui les séparent et leurs différentes typologies. Globalement sur la période de mesures, ce sont les concentrations mesurées à **Calais** qui sont les plus élevées avec une moyenne de **0.84 µg/m³** contre une moyenne de 0.5 µg/m³ sur les stations du Havre et d'Ailly. Les différences les plus importantes entre la station de Calais et les autres stations sont observées les 6/02/2021, 2/03/2021, 3/03/2021, 30/04/2021, 31/04/2021 et 1^{er}/06/2021.

Les comparaisons mensuelles entre les sites ne peuvent pas être effectuées du fait du faible taux de fonctionnement de l'AE33 sur les sites d'Ailly et d'Arrest en mai et en juin.

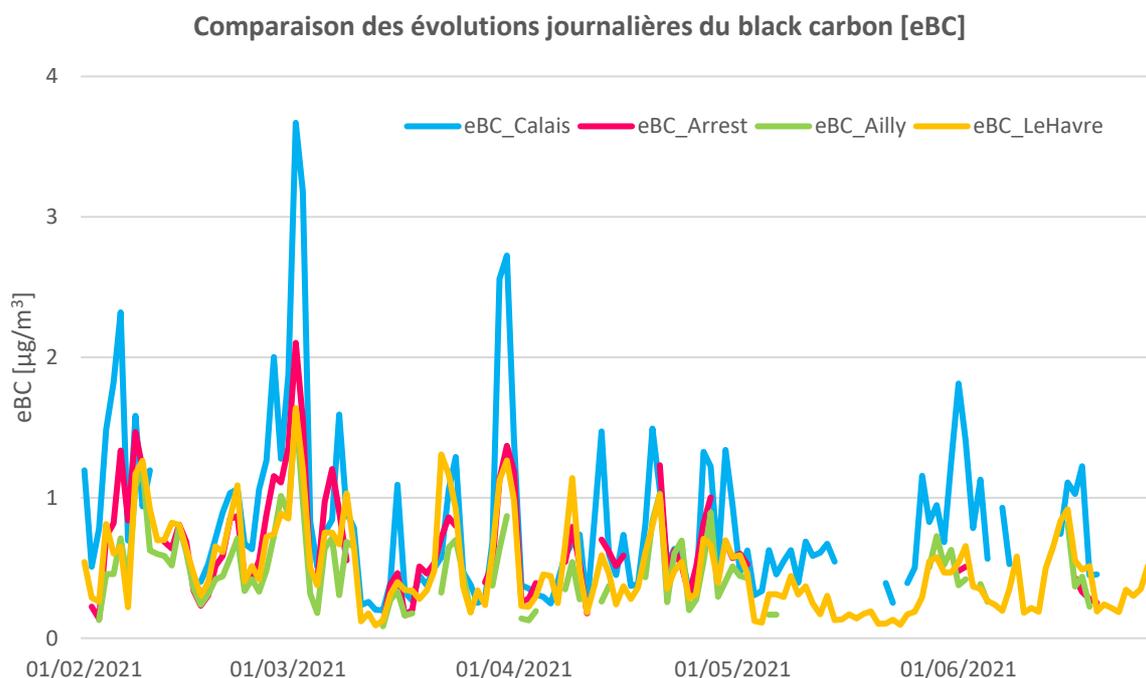
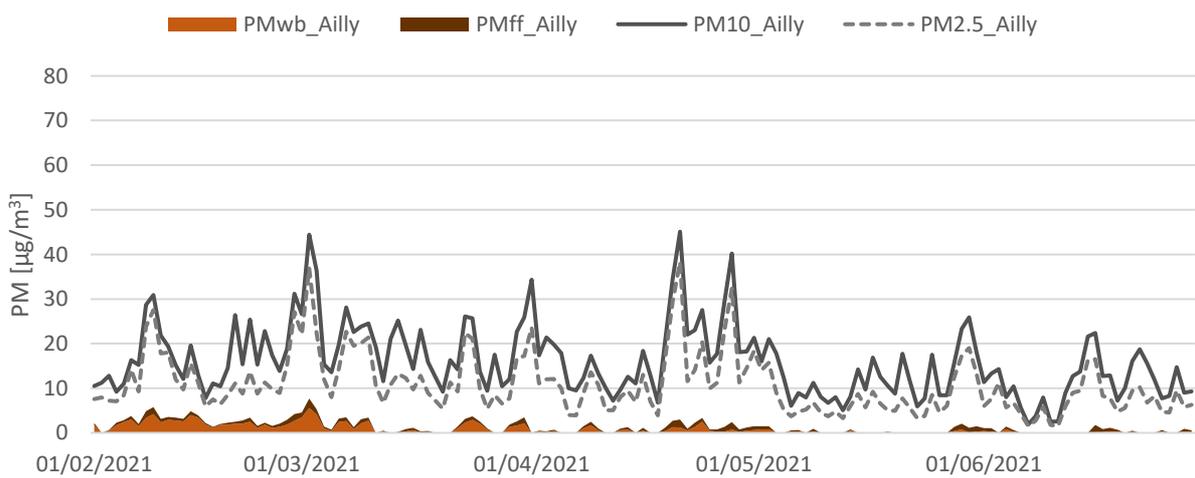
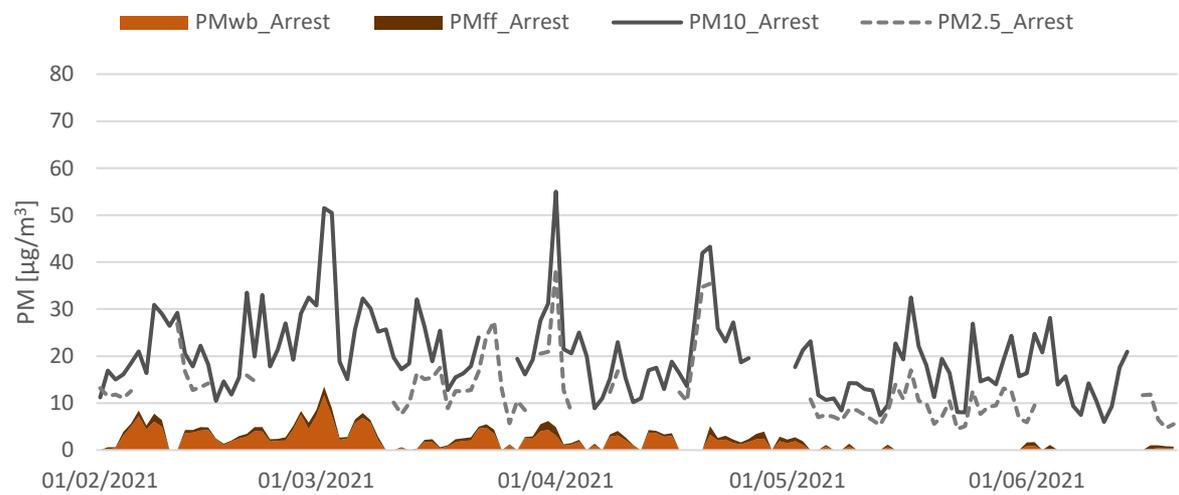
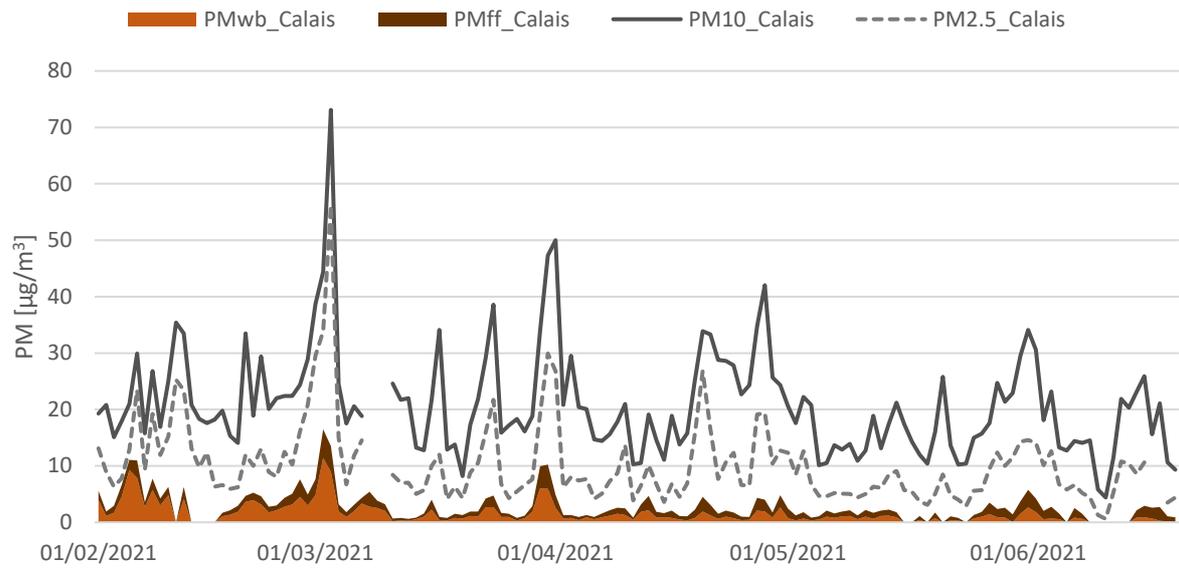


Figure 34 : Moyennes journalières en black carbon (eBC) pour les 4 sites sur la période étudiée

Tableau 13 : Résumé statistique des concentrations moyennes de black carbon et estimations des fractions issues des émissions primaires (en équivalent PM10) liées à la combustion d'hydrocarbures (BCff/PMff) et de biomasse (BCwb/PMwb) pour les quatre sites d'étude du 1er février 2021 au 20 juin 2021

		BC6	BCff	BCwb	PMwb	PMff
Calais	Moyenne	0.84	0.67	0.18	1.76	1.33
	[min ; max]	[0.20 ; 3.67]	[0.15 ; 2.53]	[0.00 ; 1.14]	[0.00 ; 11.44]	[0.29 ; 5.05]
	Médiane	0.67	0.52	0.10	0.99	1.05
Arrest	Moyenne	0.64	0.36	0.27	2.74	0.72
	[min ; max]	[0.10 ; 2.10]	[0.09 ; 0.94]	[0.01 ; 1.17]	[0.11 ; 11.65]	[0.17 ; 1.88]
	Médiane	0.53	0.32	0.22	2.22	0.64
Ailly	Moyenne	0.48	0.35	0.13	1.35	0.70
	[min ; max]	[0.09 ; 1.63]	[0.06 ; 1.07]	[0.00 ; 0.56]	[0.00 ; 5.56]	[0.13 ; 2.14]
	Médiane	0.43	0.30	0.10	0.99	0.60
Le Havre	Moyenne	0.50	0.33	0.17	1.68	0.66
	[min ; max]	[0.09 ; 1.64]	[0.07 ; 0.85]	[0.01 ; 0.87]	[0.08 ; 8.66]	[0.13 ; 1.69]
	Médiane	0.44	0.29	0.11	1.07	0.57

Le suivi temporel des concentrations de PM10 avec les estimations des fractions issues des émissions primaires (combustion d'hydrocarbures et de biomasse) indique, pour ces fractions, un impact faible des émissions primaires de combustion lorsque des niveaux élevés de PM10 sont enregistrés (Figure 35). En moyenne, parmi les 4 sites étudiés (Tableau 13), l'impact le plus fort des émissions primaires liées à la **combustion de la biomasse** est observé à **Arrest**. L'impact des émissions primaires liées à la **combustion d'hydrocarbures** est plus faible que celui des émissions primaires liées à la combustion de biomasse. Il est plus marqué à **Calais** (Tableau 13, Figure 35).



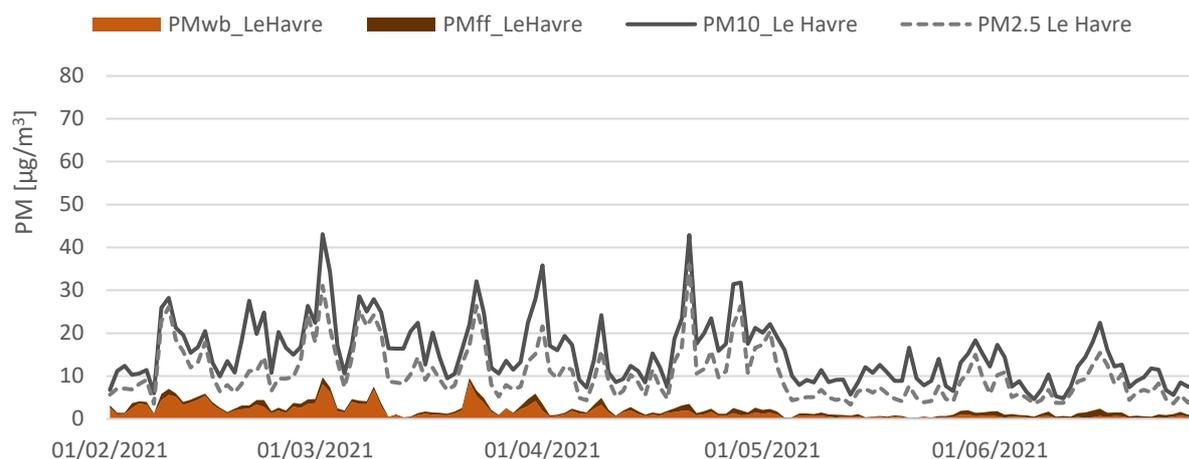


Figure 35 : Suivi temporel des concentrations de PM10 et PM2.5 et estimations des fractions issues des émissions primaires liées à la combustion d'hydrocarbures (PMff) et de biomasse (PMwb) sur les 4 sites

Selon les sites et les jours étudiés la contribution de la combustion d'hydrocarbures et de la biomasse varie. Lors de l'épisode des 2-3 mars 2021, les combustions d'hydrocarbures et de biomasse pouvaient monter jusqu'à respectivement environ 11% et 26% à Calais, 4% et 23 % à Arrest, 5% et 13% à Phare d'Ailly et 4% et 19% au Havre. Le 1^{er} avril 2021, les contributions des combustions d'hydrocarbures et de biomasse étaient faibles respectivement environ 5% et 5% à Calais, 3% et 6% à Arrest et 4% et 5% au Havre (pas de données à Ailly ce jour-là). De même, le 21 avril 2021, les combustions d'hydrocarbures et de biomasse contribuaient peu au pic des PM10 enregistré (respectivement 6% et 4% à Calais, 4% et 8% à Arrest, 4% et 3% à Phare d'Ailly et 4% et 4% au Havre).

Ce qu'il faut retenir !

La combustion de la biomasse est la plus importante à Arrest parmi les 4 sites. La combustion d'hydrocarbures est plus marquée à Calais.

6.3.2. Carbone élémentaire EC et black carbon BC

Les concentrations de carbone élémentaire (EC) en moyenne journalière pour les quatre sites sont présentées sur la Figure 36 et un résumé statistique des concentrations dans le Tableau 14.

Les tendances temporelles de ces concentrations sont globalement similaires pour les quatre stations étudiées et ce, malgré les distances qui les séparent et leurs différentes typologies. Globalement sur la période de mesures ce sont les concentrations mesurées à **Calais** qui sont **les plus élevées** en carbone élémentaire avec la moyenne de **0.43 µg/m³** contre la moyenne de 0.15 µg/m³ sur la station Phare d'Ailly (Tableau 14).

Les différences les plus importantes entre la station Calais et les autres stations sont observées les 2/03/2021, 3/03/2021, 30/03/2021, 31/03/2021, 1^{er}/05/2021 et 1^{er}/06/2021.

Comparaison des évolutions journalières du carbone élémentaire [EC]

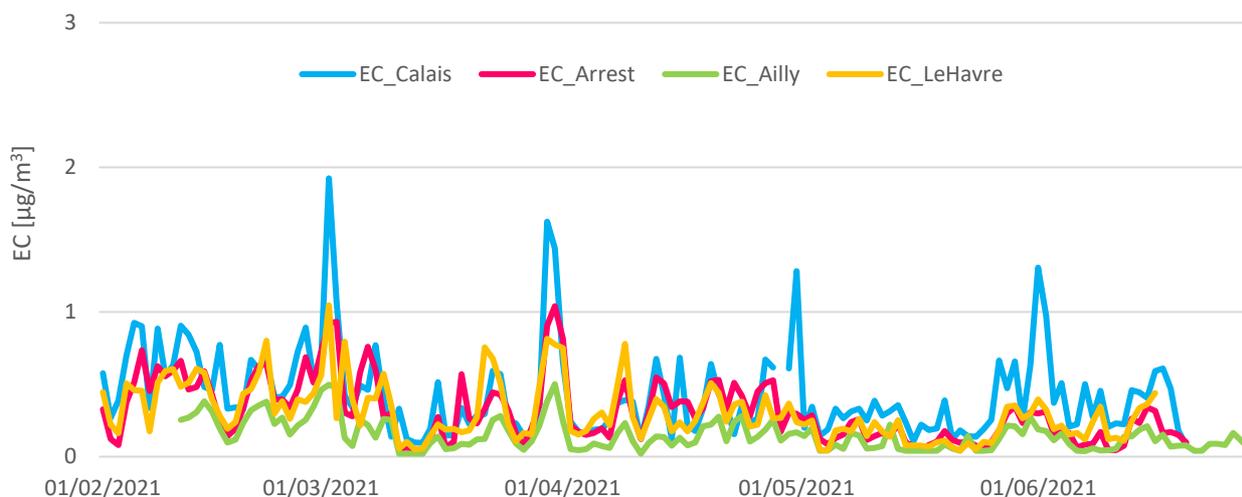


Figure 36 : Moyennes journalières en carbone élémentaire (EC) pour les 4 sites sur la période étudiée

Tableau 14 : Résumé statistique des concentrations moyenne en carbone élémentaire (EC) pour les quatre sites d'étude du 11 février 2021 au 16 juin 2021 (période commune pour les 4 sites)

	Calais	Arrest	Ailly	Le Havre
Moyenne	0.43	0.31	0.15	0.30
[min ; max]	[0.10 ; 1.92]	[0.02 ; 1.04]	[0.02 ; 0.50]	[0.04 ; 1.05]
Médiane	0.35	0.28	0.13	0.25

Les concentrations mensuelles de carbone élémentaire sont globalement les plus élevées en février et diminuent progressivement jusqu'en juin sauf pour les stations de Calais et du Havre où une augmentation est observée en juin par rapport au mois de mai.

Concentration moyenne mensuelle de carbone élémentaire

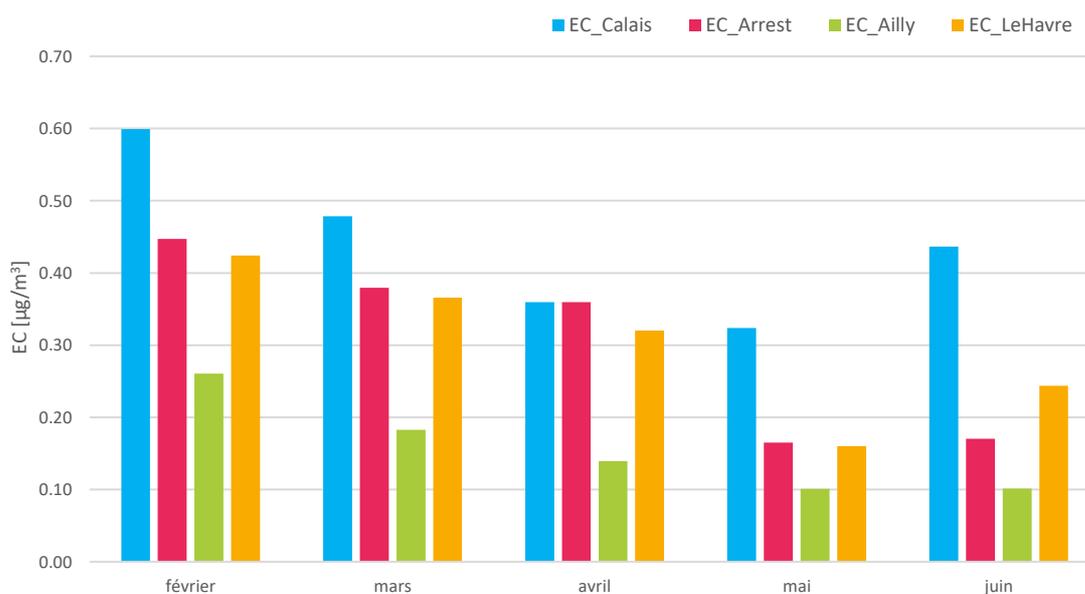


Figure 37 : Evolution des concentrations moyennes mensuelles en carbone élémentaire (EC) pour les 4 sites sur les périodes d'étude de chaque site

Sur la Figure 38 (moyennes journalières en black carbon mesurées au moyen d'AE33 en fonction des moyennes journalières en carbone élémentaire mesuré sur filtres pour les 4 sites), le nuage de points est réparti avec quelques exceptions en dessus de la bissectrice, ce qui indique que les concentrations en BC sont plus élevées que les concentrations en carbone élémentaire. Le **ratio BC/EC** varie entre **2** à la station Phare d'Ailly et **1.4** au Havre. Les corrélations sont autour de 0.8 sauf pour phare d'Ailly où elle est de 0.7. C'est possible qu'à Ailly, on s'approche un peu plus de la limite de détection autour de 0.05 µg/m³ en EC.

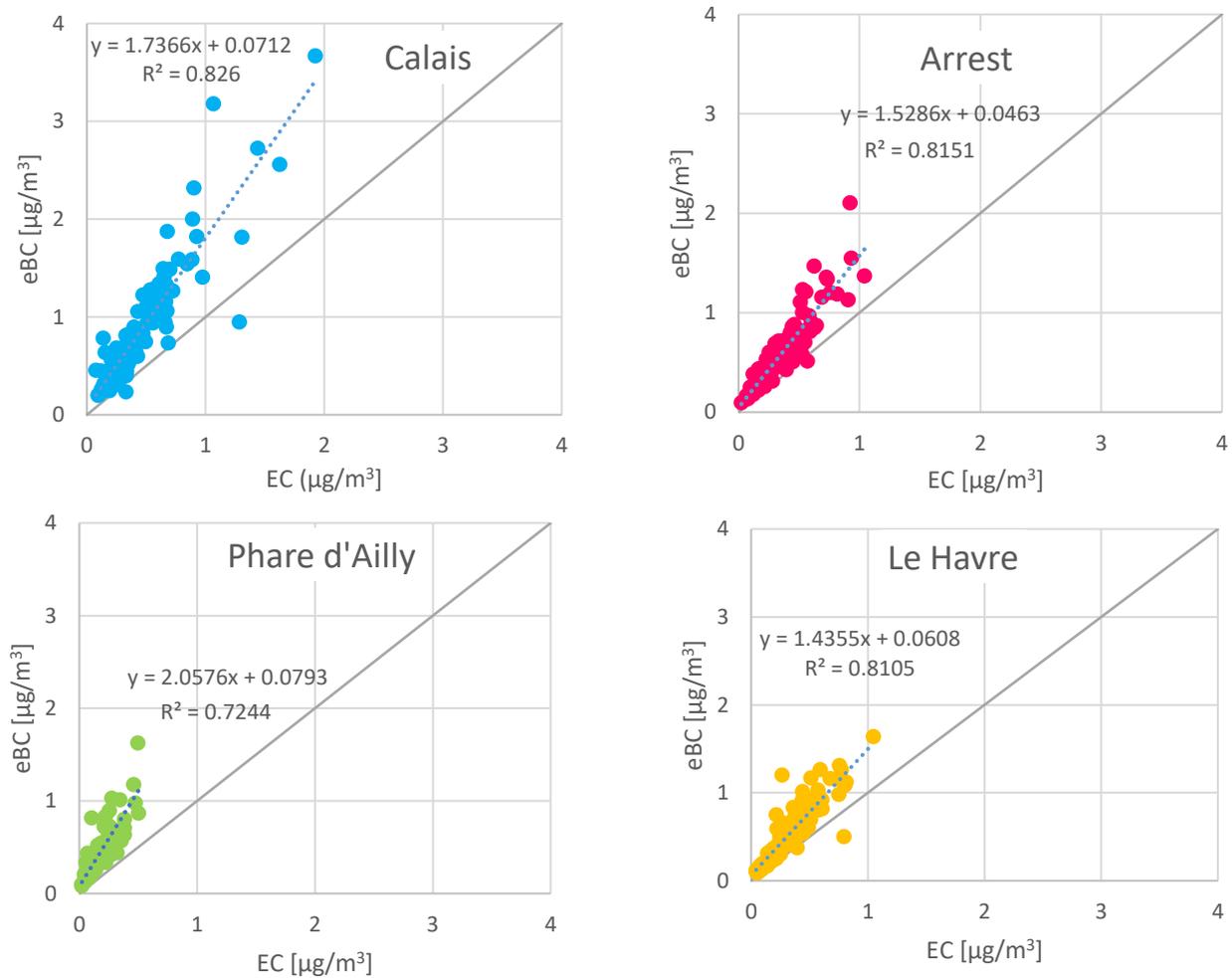


Figure 38 : Comparaison des concentrations moyennes en black carbon mesurées au moyen d'AE33 et le carbone élémentaire mesuré sur filtres sur les 4 sites

Ce qu'il faut retenir !

Les concentrations en carbone élémentaire sont globalement les plus élevées en février. Le ratio BC/EC varie entre 1.4 au Havre et 2 à la station Phare d'Ailly.

6.3.3. Ratio OC/EC

Une méthode couramment utilisée pour l'évaluation de l'OC secondaire est basée sur les ratios OC/EC.

En général, les travaux disponibles sur les sites européens montrent que les ratios OC/EC sont < 2 sur les sites fortement influencés par le trafic routier (excepté dans les tunnels), sont compris entre 2 et 9 pour les sites urbains de fond, et augmentent avec la diminution des émissions anthropiques, atteignant ainsi des valeurs > 10 dans les sites ruraux³.

Dans cette étude, le rapport OC/EC varie globalement entre **3.8 et 7.2**. Il est plus élevé (6.6-7.2) pour les stations de fond rural (Arrest et Ailly), et plus faible (3.8-5.4) pour les stations à proximité des sources primaires (Calais et Le Havre).

Le ratio OC/EC plus important peut-être causé par :

- L'abondance des composés organiques secondaires qui peuvent être transportés sur de longues distances ;
- Une contribution importante de la combustion de la biomasse ;
- Les émissions biogéniques qui peuvent aussi augmenter ce ratio.

³ M. Viana et al., « Organic and elemental carbon concentrations in carbonaceous aerosols during summer and winter sampling campaigns in Barcelona, Spain », *Atmospheric Environment* 40, n° 12 (1 avril 2006): 2180-93, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.12.001>.

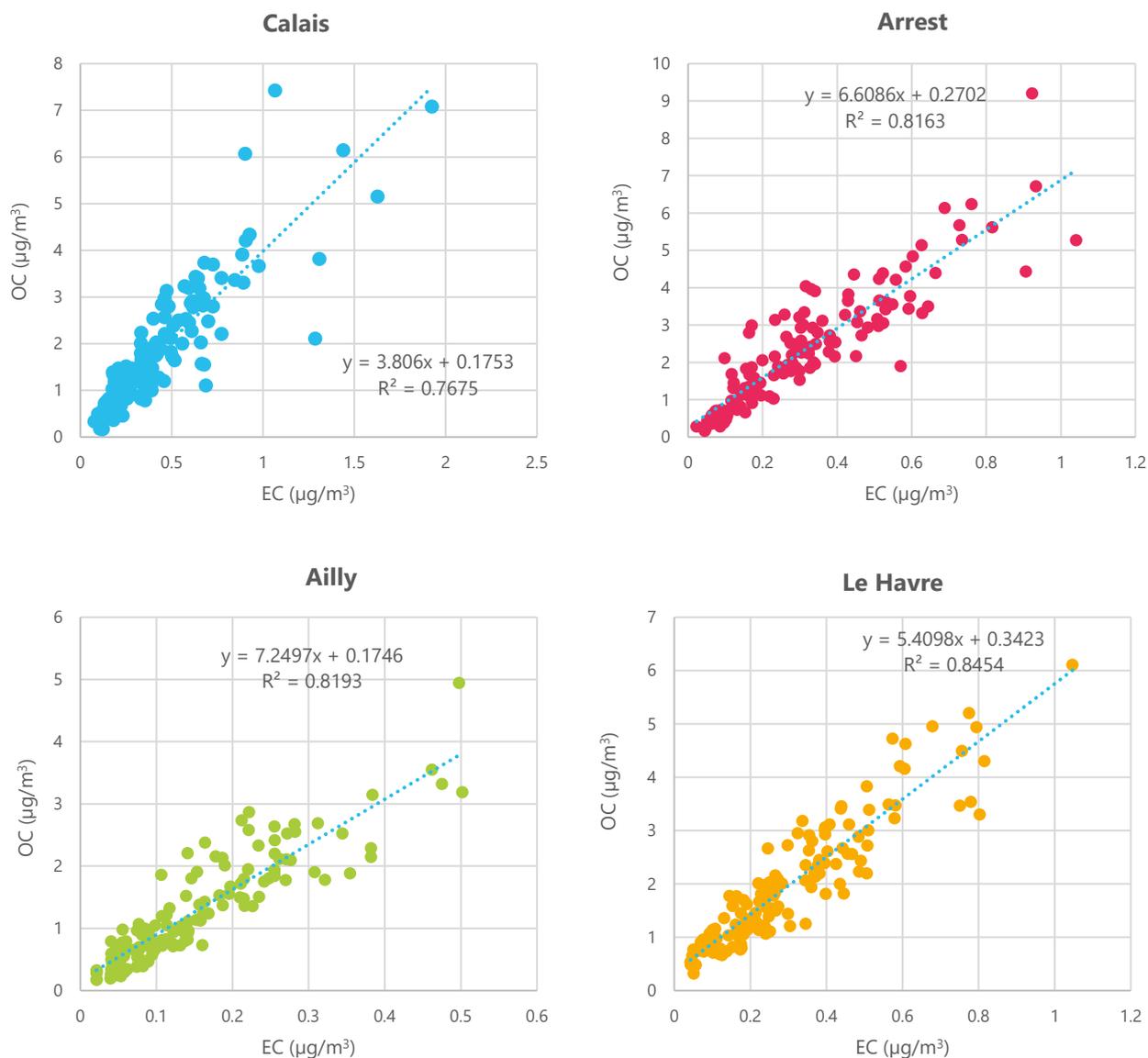


Figure 39 : Corrélation du carbone organique et du carbone élémentaire mesurés sur filtres sur les 4 sites

D'un point de vue de l'évolution mensuelle (figure 33), on remarque que la concentration de l'OC est plus élevée en période froide (février-mars : 1.8-3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et également en juin (1-2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Néanmoins, les 2 périodes fortes de OC (février et juin) ne sont pas liées aux mêmes sources. Sa concentration est minimale au mois de mai.

L'EC présente une variation similaire que l'OC pour chaque site, mais avec un niveau beaucoup moins important (<0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

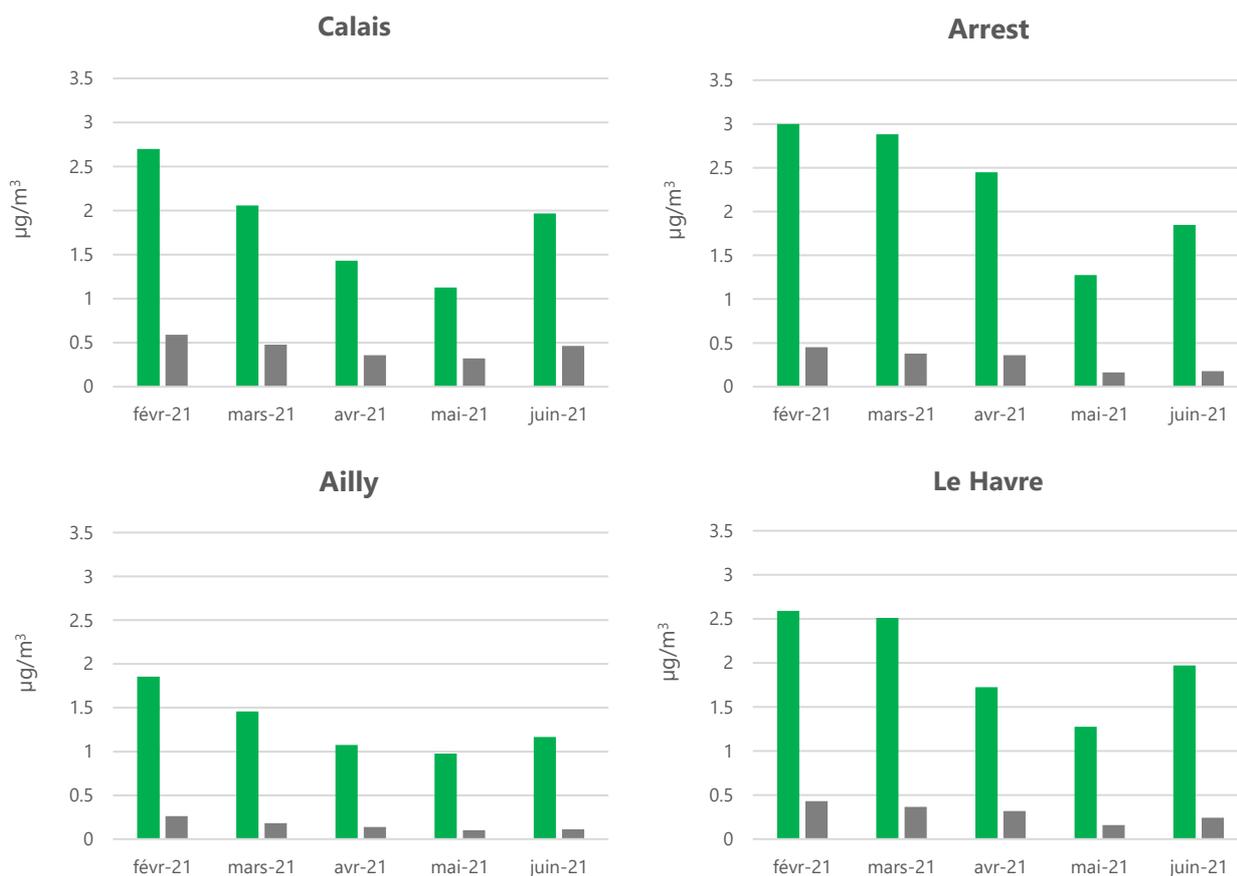


Figure 40 : Concentration moyenne mensuelle du carbone organique et du carbone élémentaire mesurés sur filtres sur les 4 sites

Ce qu'il faut retenir !

Le rapport OC/EC varie globalement entre 3.8 et 7.2
 La concentration de l'OC est plus élevée en période froide (février-mars) et également en juin.

6.3.4. Traceurs organiques

Les traceurs organiques permettent d'identifier les sources et mieux comprendre les variations temporelles des particules.

Le **lévoglucosan** est un bon traceur de la combustion du bois, notamment le chauffage en hiver ou encore le brûlage des déchets verts ou l'écobuage dans l'agriculture. Son évolution saisonnière est typique avec des maxima observés au mois de février et des niveaux minimums en juin. Parmi ces 4 sites, **Arrest** présente un niveau plus élevé, notamment en mois d'avril. Ailly est moins influencé par la combustion de biomasse par rapport aux autres sites.

L'acide méthanesulfonique (MSA) est produit par l'oxydation du diméthylsulfure (DMS), et il est considéré comme un traceur secondaire des émissions biogéniques marines de composés soufrés naturels. Le MSA

présente des évolutions saisonnières significatives avec des concentrations maximales observées en mai et juin, qui sont principalement dues au fort ensoleillement et aux températures élevées, en lien avec l'activité du phytoplancton. Son niveau est plus élevé en mois d'**avril** à **Arrest**, puis plus important à **Calais en mai et juin**.

Les **polyols (arabitol et manitol)**, émis par les spores fongiques, sont considérés comme des traceurs des sources biogéniques primaires terrestres. La concentration maximale des polyols est aussi observée en juin. Les activités biogéniques sont plus importantes (émissions des spores fongiques, des grains de pollen...) avec le rayonnement solaire plus intense et les températures plus élevées. **Arrest** présente un niveau 2-3 fois plus élevé que les autres sites en **juin**. La localisation spécifique d'Arrest très proche des étendues de la baie de Somme avec énormément de marais/champs d'algue et l'influence des marées peut jouer un rôle.

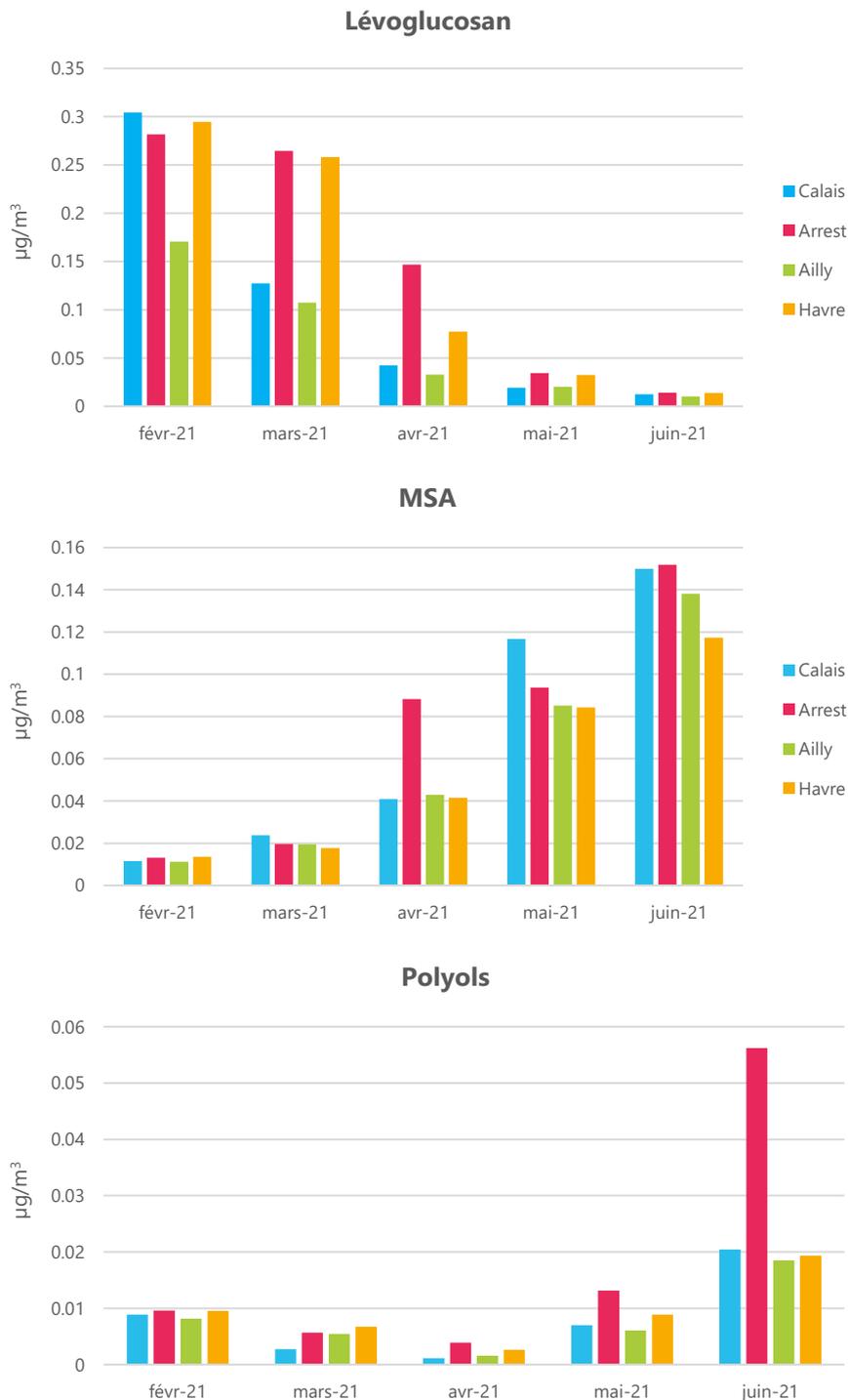


Figure 41 : Concentration moyenne mensuelle des traceurs organiques mesurés sur filtres sur les 4 sites

Tableau 15 : ratio OC/lévoglucosan et lévoglucosan/mannosan

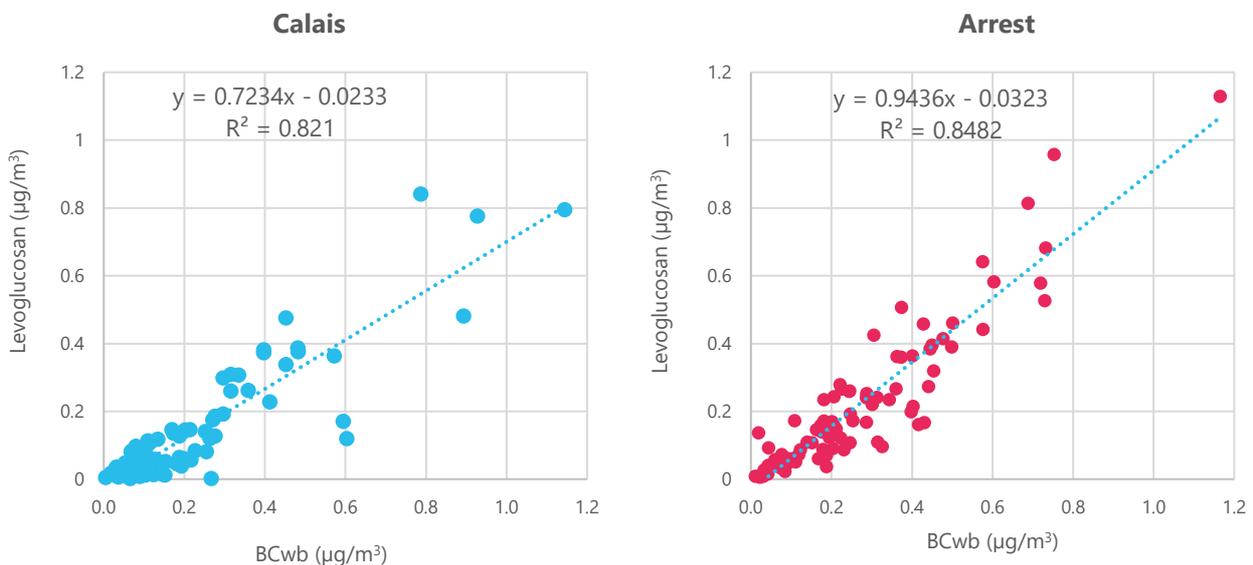
	OC/LEVO	LEVO/MANNO
Calais	14.78	11.97
Arrest	19.82	10.01
Ailly	19.45	12.38
Le Havre	14.67	12.22

Le Tableau 15 montre les ratios **OC/lévoglucosan** et **lévoglucosan/mannosan (L/M)** pour ces quatre sites.

Le rapport OC/lévoglucosan est influencé par les différentes conditions de combustion et types de bois. Deux sites ruraux (Arrest et Ailly) et deux sites urbains (Calais et Le Havre) présentent un ratio OC/Lévo similaire en fonction de leur typologie. Les valeurs sont plus élevées en site rural. On suppose que le vieillissement des PM sur les sites ruraux permet d'augmenter la concentration de l'OC secondaire.

Le mannosan, isomère du lévoglucosan, peut également être considéré comme un des traceurs de la combustion de la biomasse. Le ratio (L/M) peut être utilisé pour distinguer le type de combustion de la biomasse. Des études précédentes ont montré que les ratios L/M de la combustion du bois dur sont compris entre **15 et 25**, et le ratio L/M de la combustion du bois résineux est de **3 à 10**⁴. Les ratios pour Calais, Ailly et Le Havre sont entre **11.97 à 12.38**, ce qui signifie une forte utilisation du bois dur. En revanche, il est plus faible à Arrest (9.67), probablement dû à la combustion de déchets verts.

Le lévoglucosan et le BC_{wb} montrent une très bonne corrélation pour tous les sites avec un R²= 0.78-0.85. Ces résultats confirment que la concentration en BC_{wb} estime bien les niveaux de combustion de biomasse pour ces 4 sites.



⁴ Jisca Sandradewi et al., « Using Aerosol Light Absorption Measurements for the Quantitative Determination of Wood Burning and Traffic Emission Contributions to Particulate Matter », *Environmental Science & Technology* 42, n° 9 (1 mai 2008): 3316-23, <https://doi.org/10.1021/es702253m>.

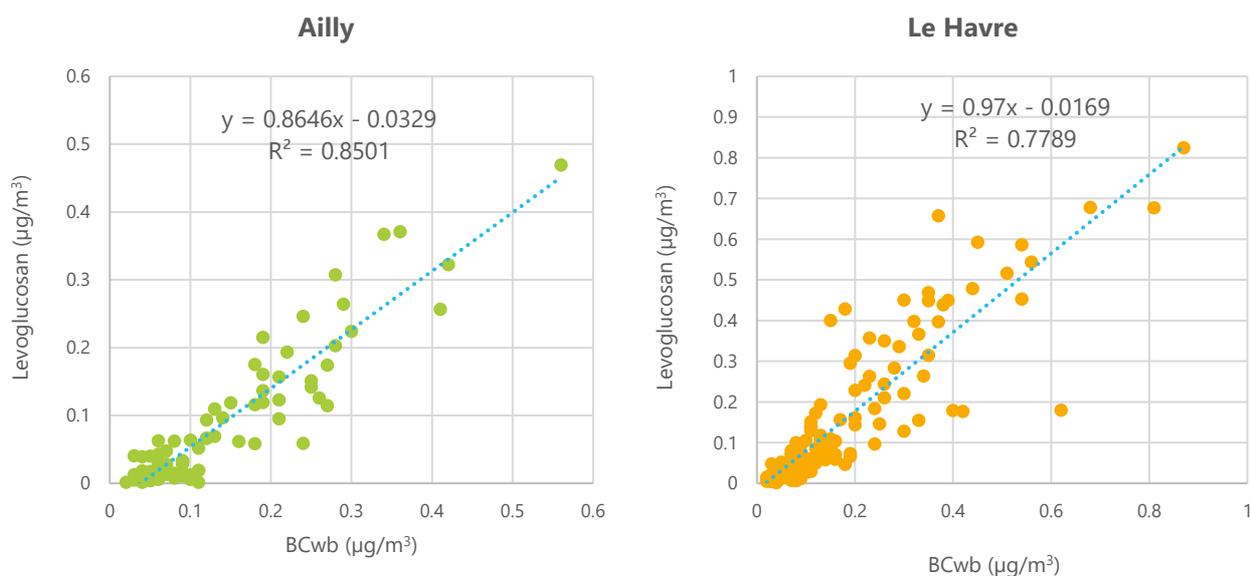


Figure 42 : Corrélation du lévoglucosan et du BCwb pour les 4 sites

Ce qu'il faut retenir !

En général, Arrest présente un niveau plus élevé pour les 3 traceurs organiques (Biomasse, biogénique marine et terrestre).

6.4. Composés inorganiques et leurs précurseurs

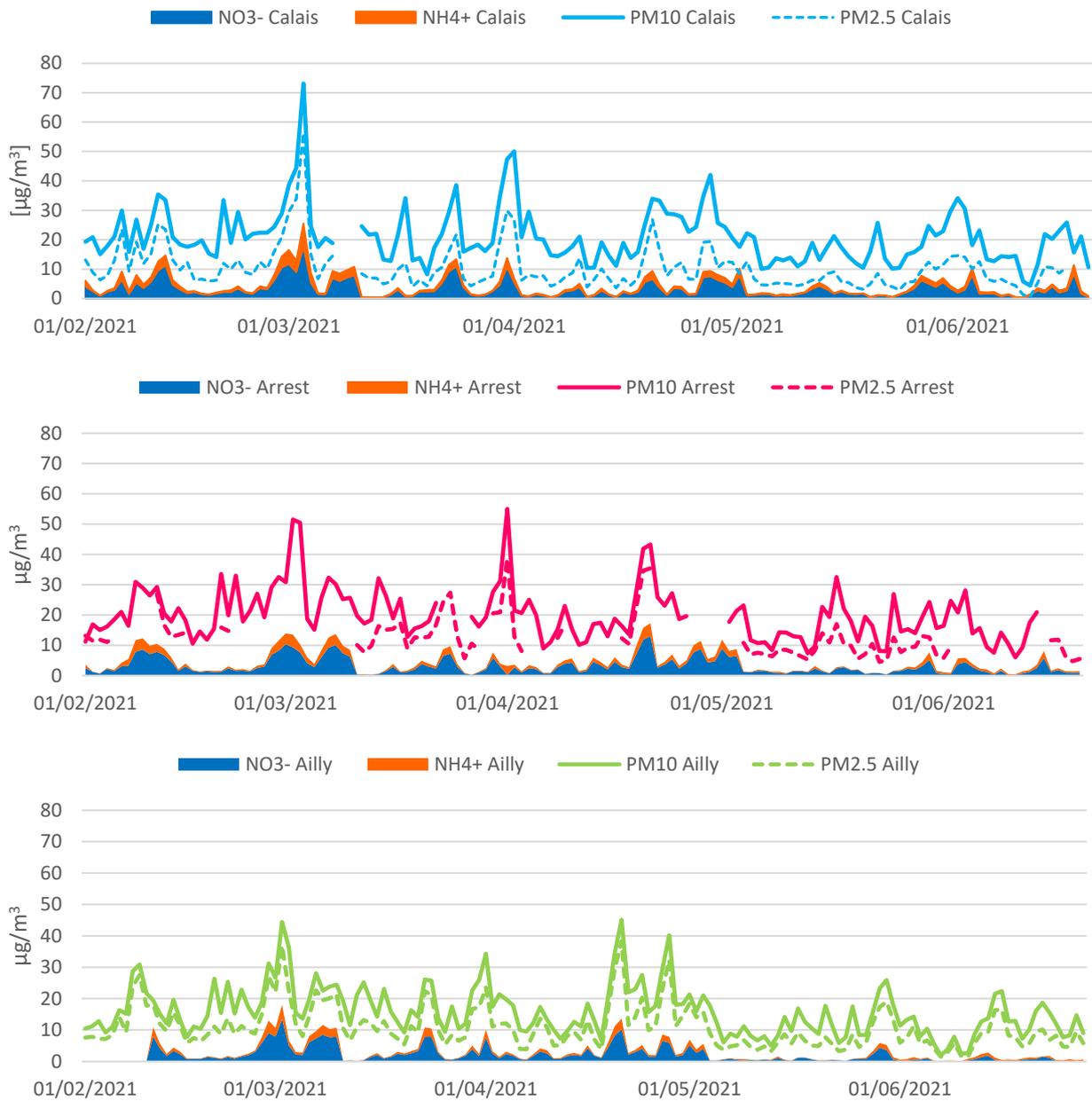
Parmi les composés inorganiques secondaires présents dans les particules atmosphériques, on trouve le nitrate et l'ammonium. Le nitrate est issu de l'oxydation du dioxyde d'azote (NO_2) en acide nitrique (HNO_3). L'ammonium provient directement de l'association de l'ammoniac (émis principalement par les activités agricoles) avec le sulfate et le nitrate.

Les statistiques pour le nitrate et l'ammonium mesurés sur les 4 sites sont récapitulées dans le Tableau 16. Les concentrations moyennes en nitrate varient entre 2.3 et 3.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Elles sont plus élevées sur les deux stations en Hauts-de-France. Les concentrations moyennes en ammonium varient entre 0.8 à Phare d'Ailly et au Havre et 1.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à Arrest.

Tableau 16 : Résumé statistique des concentrations moyennes en nitrate (NO_3^-) et ammonium (NH_4^+) pour les quatre sites d'étude du 11 février 2021 au 16 juin 2021 (période commune pour les 4 sites)

		Calais	Arrest	Ailly	Le Havre
NO_3^-	Moyenne	3.2	3.1	2.3	2.8
	[min ; max]	[0.2 ; 17.6]	[0.2 ; 13.0]	[0.0 ; 13.4]	[0.0 ; 14.6]
	Médiane	2.2	2.2	1.4	1.8
NH_4^+	Moyenne	0.9	1.1	0.8	0.8
	[min ; max]	[0.1 ; 7.9]	[0.0 ; 4.3]	[0.0 ; 4.6]	[0.0 ; 4.2]
	Médiane	0.5	0.7	0.4	0.5

Les nitrates contribuent en moyenne entre 12% (Phare d'Ailly) et 16 % (Le Havre) à la composition des PM10 mesurées sur la période commune pour les 4 sites. Quant à l'ammonium, il contribue en moyenne entre 4% et 5% à la composition des PM10. Certains jours, la part de nitrate et d'ammonium dans la composition des PM10 augmente. Cela est notamment observé début mars, fin mars, début avril et fin avril sur les 4 sites suivis. Ces périodes correspondent à l'augmentation des niveaux en PM10.



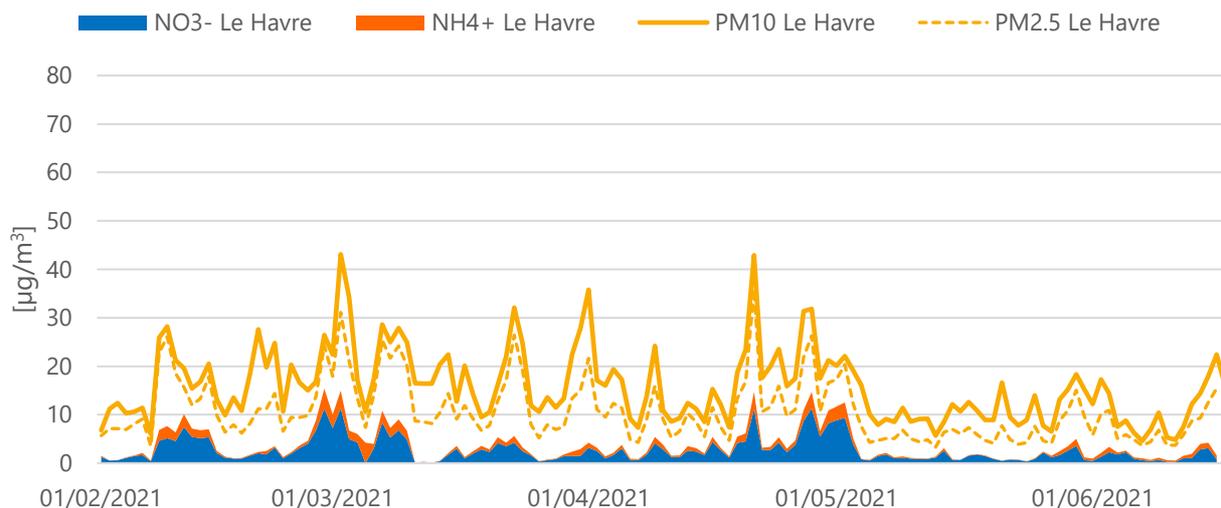
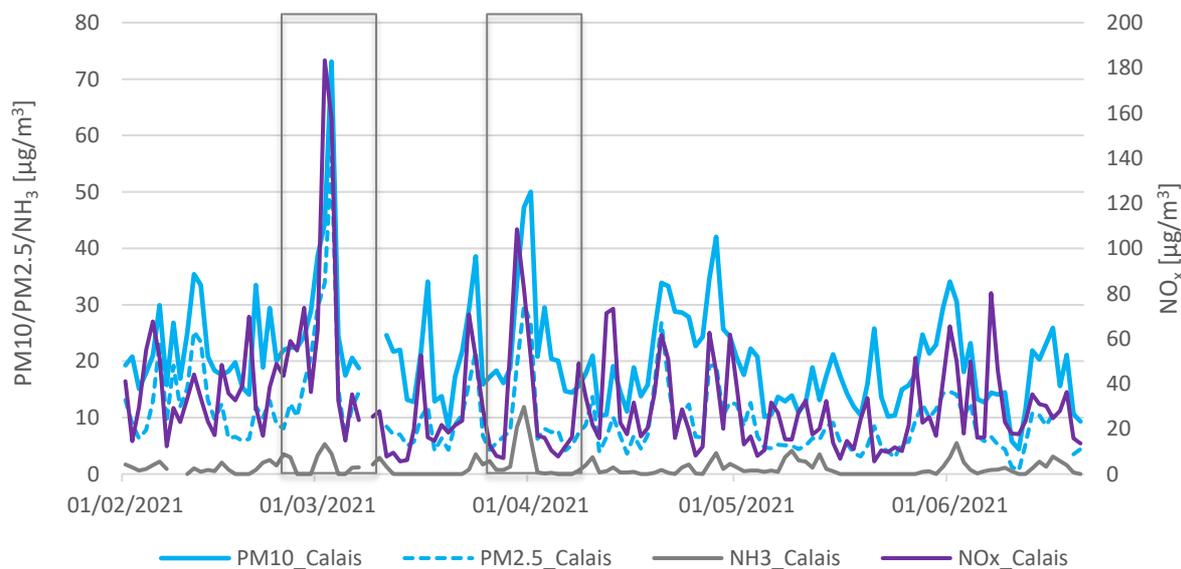


Figure 43 : Evolution des concentrations moyennes journalières des PM10, PM2.5 avec celles des nitrates (NO_3^-) et ammonium (NH_4^+) sur les 4 stations suivis.

Afin de mieux comprendre les augmentations des niveaux en PM10, les concentrations des oxydes d'azote (NO_x) et d'ammoniac (NH_3), gaz précurseurs impliqués dans la formation de certaines particules inorganiques secondaires (nitrate d'ammonium), ont été mesurées sur les stations à Calais et à Arrest. Leurs évolutions en fonction des concentrations des PM10/PM2.5 sont présentées sur la Figure 44.

Il est à noter que les pics des PM10 le 3 mars et le 1^{er} avril sont précédés par une augmentation des niveaux en oxydes d'azote et en ammoniac. Les pics en oxydes d'azotes sont nettement plus forts à Calais par rapport à Arrest, dus à des sources urbaines locales importantes.



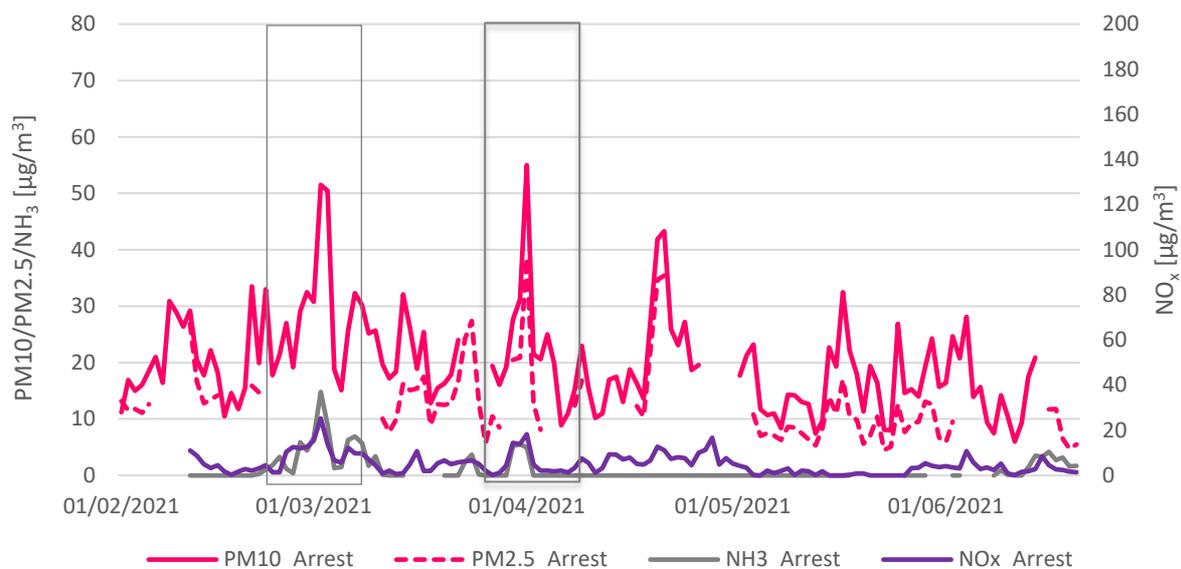


Figure 44 : Evolution des concentrations moyennes journalières des PM10, PM2.5, NOx et NH₃ sur les stations Calais (au dessus) et Arrest (en dessous) pendant la période de mesure.

Ce qu'il faut retenir !

Le nitrate d'ammonium est plus élevé sur les deux stations en Hauts-de-France. Sa concentration élevée correspond à l'augmentation des particules PM10 en période printanière.

6.5. Métaux

Cette section présente les concentrations de certains métaux présents dans les PM10. Ces concentrations sont exprimées en nanogramme par mètre cube d'air ($\text{ng}/\text{m}^3 = 0.001 \mu\text{g}/\text{m}^3$) car elles sont très inférieures à la concentration totale des PM10 dans l'atmosphère. Pour chaque site et chaque métal, les concentrations présentées ci-dessous sont les valeurs moyennes calculées sur la période d'étude.

Certains métaux sont connus comme étant des traceurs de sources identifiées. Ces traceurs métalliques sont classés en quatre catégories : traceurs d'émissions industrielles, traceurs d'émissions du trafic routier, traceurs de combustion de fuel lourd, et traceurs de poussières minérales.

6.5.1. Traceurs d'émissions industrielles

L'arsenic (As), Le césium (Cs), le cadmium (Cd) et le fer (Fe) sont des métaux traceurs de certaines industries (métallurgie, chimie, ...). Pour ces 4 métaux, **Calais** présente un niveau plus important, notamment pour le cadmium (Cd) et le fer (Fe), qui sont 3 fois plus élevées qu'à Ailly. Les niveaux à Arrest et au Havre sont assez similaires pour As et Cs et Fe.

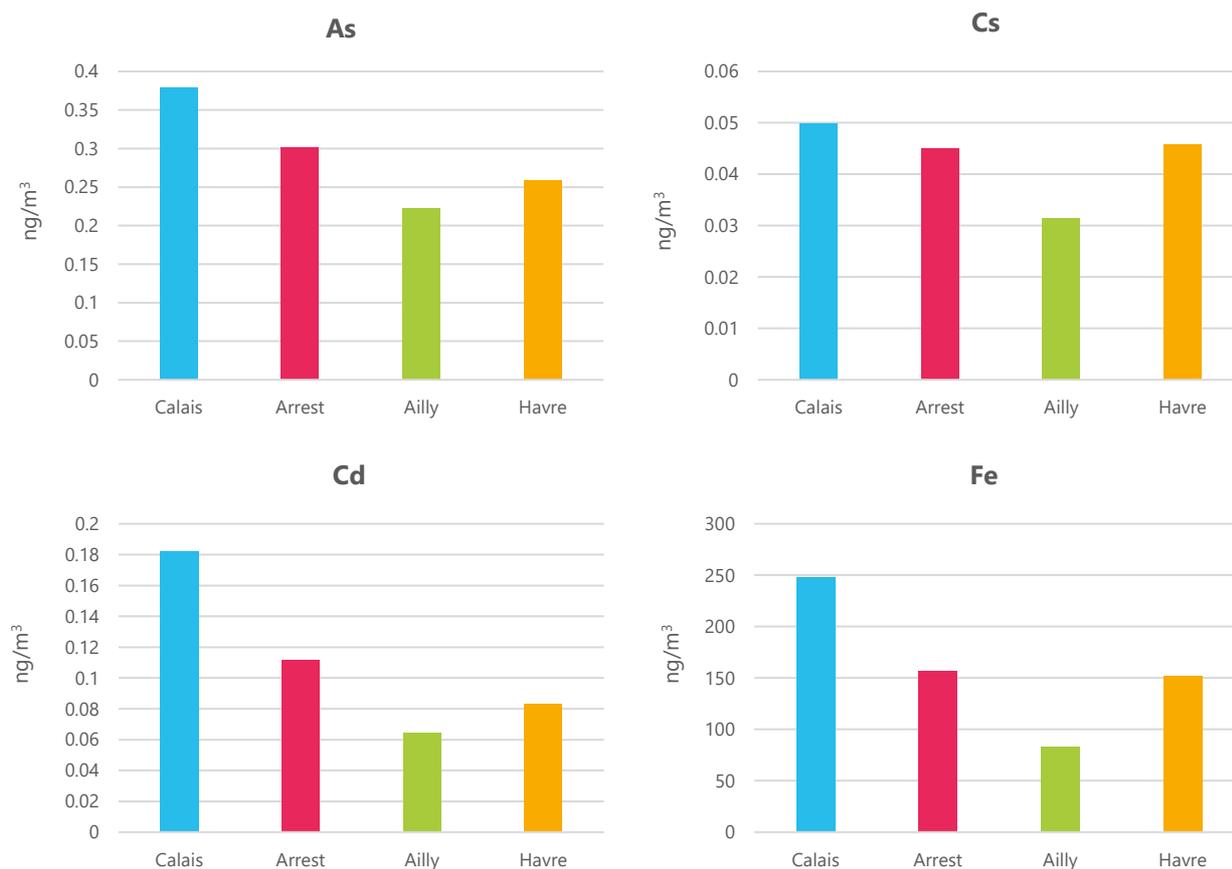


Figure 45 : Concentrations moyennes (sur la période étudiée) de métaux traceurs d'émissions industrielles.

6.5.2. Traceurs d'émissions du trafic routier

Certains éléments métalliques (baryum – Ba, cuivre – Cu, et antimoine – Sb) peuvent être émis par l'abrasion mécanique des pièces de véhicules motorisés telles que les freins, les pneus et les embrayages. Ils peuvent également être émis par la remise en suspension de poussières déposées au sol. Toutes ces émissions sont qualifiées de « hors-échappement ».

Calais montre un niveau plus important sur ces 3 métaux : baryum, cuivre et antimoine.

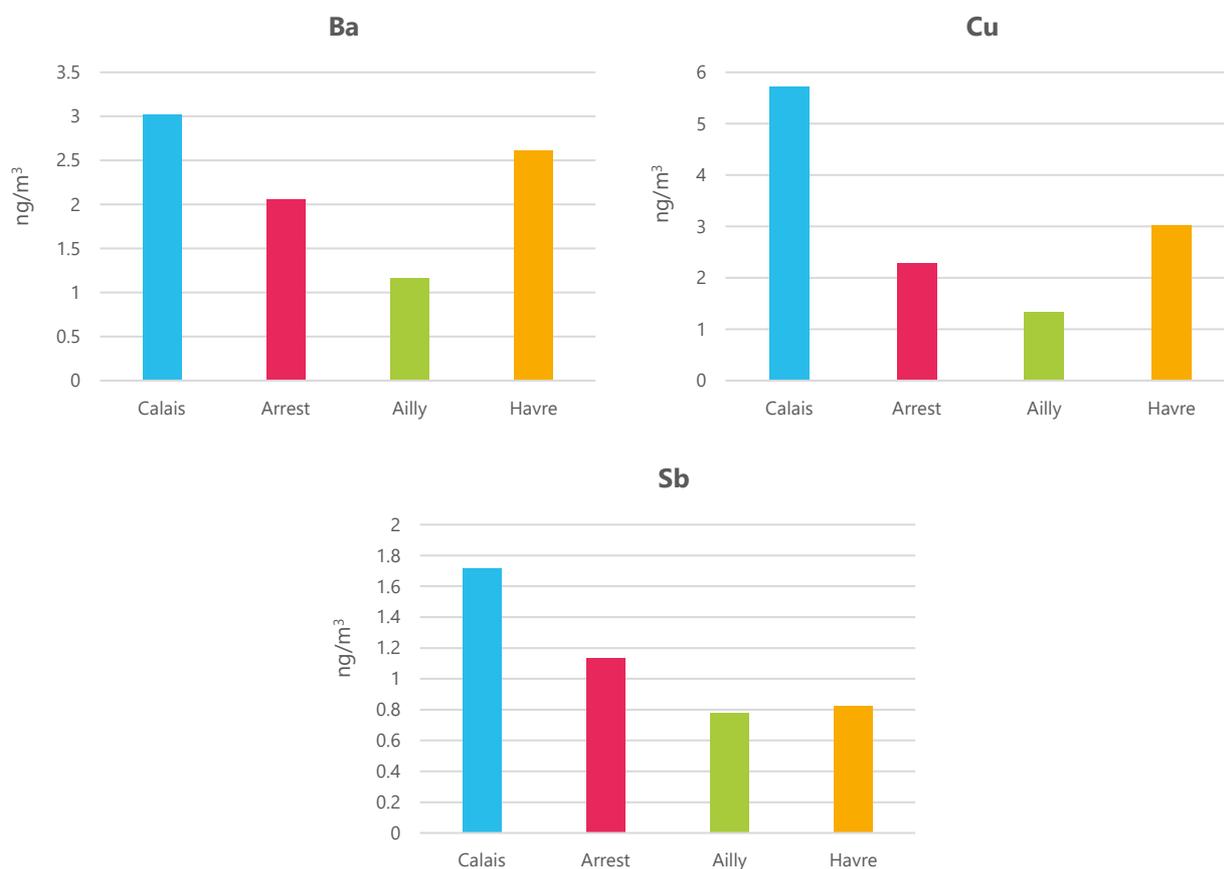


Figure 46 : Concentrations moyennes de métaux traceurs d'émissions du trafic routier

6.5.3. Traceurs d'émissions du fioul lourd

Le vanadium (V) et le nickel (Ni) peuvent être émis par l'industrie métallurgique et la combustion de fioul lourd, par exemple par les raffineries, les centrales thermiques, et le transport maritime. Les concentrations de vanadium et de nickel à **Calais** et au **Havre** sont plus élevées que pour les 2 autres sites. Arrest est moins influencé par la combustion de fioul lourd en lien avec sa distance éloignée du bord de mer.

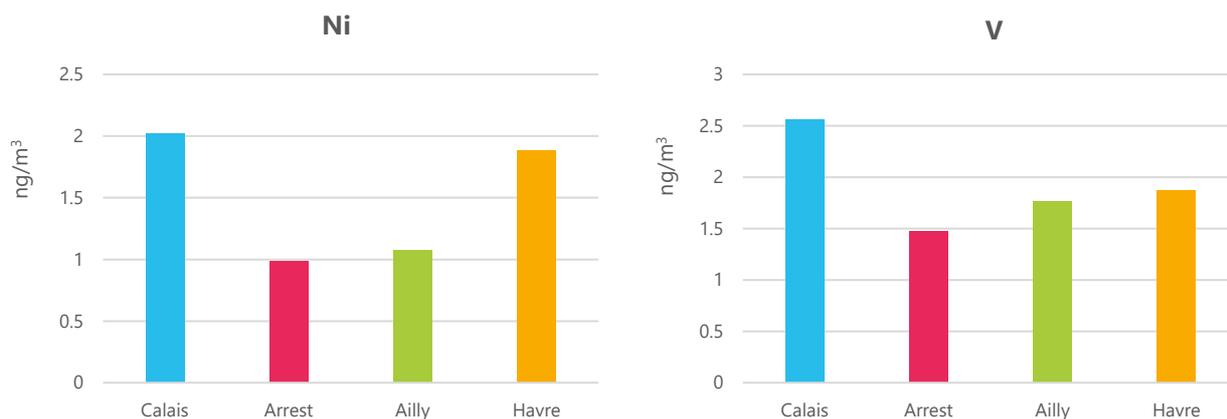


Figure 47 : Concentrations moyennes de métaux traceurs d'émissions de la combustion de fioul lourd

6.5.4. Traceurs d'émissions des poussières minérales

Les traceurs de poussières minérales (aluminium – Al, et titane – Ti) sont relativement abondants dans la croûte terrestre. Les poussières minérales peuvent être émises par la remise en suspension par le vent ou issues de l'érosion des sols, des activités de construction, etc. Les concentrations moyennes de d'aluminium et de titane sont présentées sur la Figure 48. Ces concentrations sont plus faibles pour le site de fond d'Ailly.

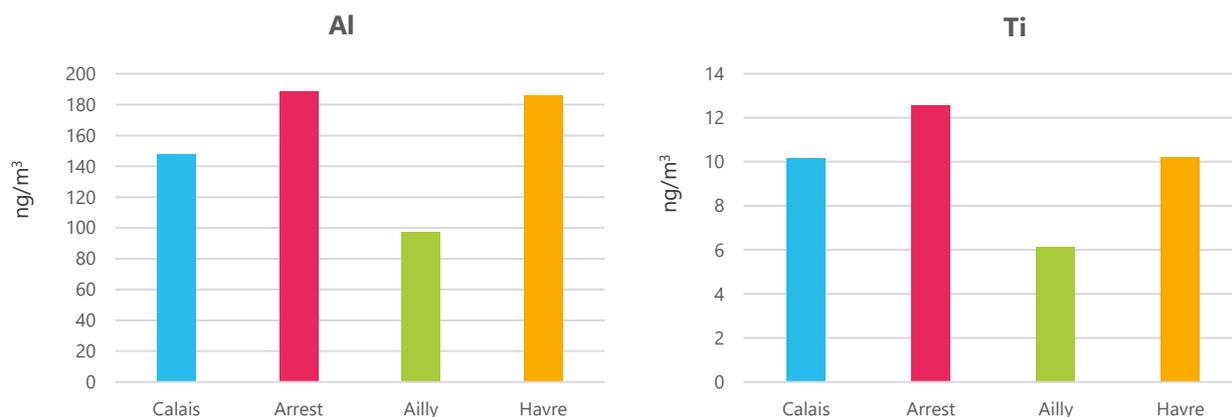


Figure 48 : Concentrations moyennes de métaux traceurs de poussières minérales

Ce qu'il faut retenir !

Calais montre un niveau plus important sur les métaux traceurs d'émissions industrielles, du trafic routier et du fioul lourd. En revanche, les poussières minérales sont plus abondantes à Arrest

6.6. Episodes de pollution

Au total, sur la période étudiée, on compte **5 épisodes** en région Hauts-de-France et **4 dépassements des PM10** toutes stations confondues ont été enregistrés sur les sites suivis lors de présente étude : **1** à Calais (03/03/2021) et **3** à Arrest (2-3/03/2021 et 01/04/2021) (Tableau 17). **Aucun** dépassement n'a été enregistré sur les sites normands. Cependant, des concentrations supérieures à 40 µg/m³ ont été mesurées sur les deux stations normandes les 02/03/2021 et 21/04/2021.

Tableau 17 : Moyennes journalières de PM10 sur les 4 sites de l'étude les jours où au moins un dépassement de 50 µg/m³ a été constaté sur la période du 01/02/2021 au 30/06/2021 sur au moins un département de la région

Date	PM10 (µg/m ³)				Commentaires
	Calais	Arrest	Ailly	Le Havre	
24/02/2021	22.0	21.4	22.8	20.3	Département de l'Aisne en épisode de pollution
25/02/2021	22.4	27.0	17.4	16.6	Départements de l'Aisne, de l'Oise et du Nord en épisodes de pollution
01/03/2021	38.7	30.8	26.6	22.4	Département du Nord en épisode de pollution
02/03/2021	44.4	51.5	44.4	43.1	Départements du Nord, du Pas-de-Calais, de l'Oise, de la Somme et de la Manche en épisode de pollution
03/03/2021	73.1	50.5	36.3	34.2	Départements du Nord, du Pas-de-Calais, de l'Oise, de la Somme et de l'Aisne en épisode de pollution
31/03/2021	47.3	31.2	25.9	27.9	Département du Nord en épisode de pollution
01/04/2021	50.0	55.0	34.3	35.8	Départements du Nord, du Pas-de-Calais, de l'Oise et de la Somme en épisode de pollution
20/04/2021	33.9	41.9	34.5	23.4	Département du Nord en épisode de pollution Dépassements autres stations du département du Pas-de-Calais
21/04/2021	33.3	43.3	45.1	42.9	Départements du Nord, de l'Oise, de l'Aisne et du Calvados en épisode de pollution
Nombre de jours	1	3	0	0	

Du fait du faible nombre d'épisodes de particules PM10, les dates retenues pour une analyse approfondie, afin de comprendre leurs sources sont les suivantes : **2 – 3 mars 2021, 31 mars – 1^{er} avril 2021 et 21 avril 2021**. Dans la suite du chapitre, les journées analysées, pour lesquelles une augmentation importante des concentrations en PM10 a été enregistrée, ont été assimilées à des « épisodes », même si certains jours et pour certaines stations la valeur seuil de 50 µg/m³ n'a pas été dépassée.

6.6.1. Episode du 2 – 3 mars 2021

Le premier épisode de pollution particulaire de l'étude a touché les régions Hauts-de-France et Normandie les 2 et 3 mars 2021. Il s'agit d'un épisode à grande échelle. Le 2 mars une augmentation des concentrations en PM10 concernait la zone côtière de la Bretagne jusqu'en Hauts-de-France ainsi que l'Île-de-France. Quant au

3 mars, le panache de PM10 s'est concentré sur la région Hauts-de-France et est descendu jusqu'en Ile-de-France (Figure 49).

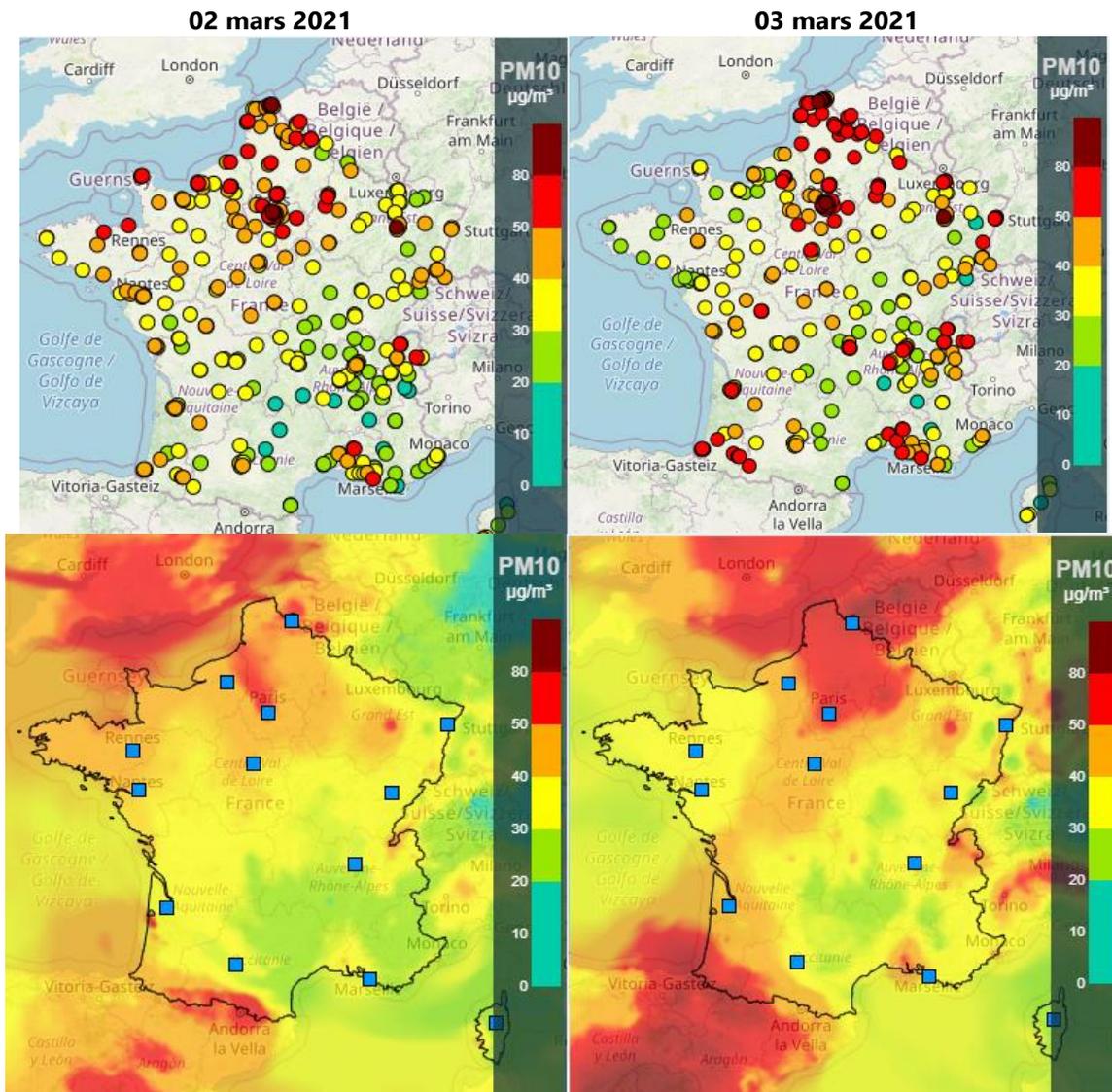


Figure 49 : Cartes de dépassement des seuils réglementaires pour les PM10 le 2 et 3 mars 2021 sur les stations de fond ainsi que les cartes analysées combinant modèle et observations (source : Prev'air). Les couleurs indiquent la gamme de concentrations de PM10 en microgramme par m^3 (cf. légendes). La couleur rouge représente le dépassement du seuil d'information et de recommandation ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Sur la zone d'étude, les dépassements du seuil d'information et de recommandation (IR) ont eu lieu les 2 et 3 mars sur la station à Arrest et le 3 mars sur la station à Calais. Le niveau le plus fort de $73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a été enregistré le 3 mars à Calais. Sur les 2 stations d'étude en Normandie, les concentrations les plus fortes ont été enregistrées le 2 mars sans dépassement du seuil IR. Elles variaient entre 43 et $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

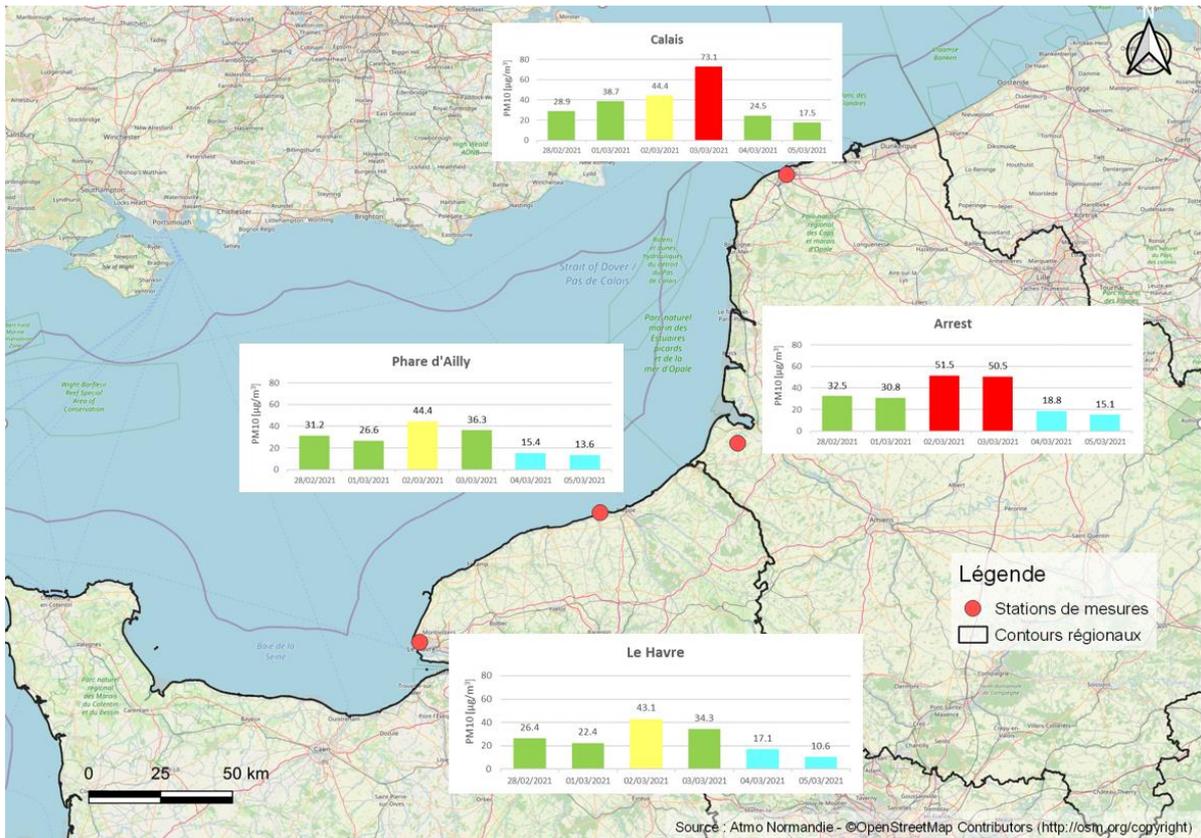


Figure 50 : Concentration moyenne des PM10 avant, pendant et après l'épisode de pollution (28/02-05/03/2021). La couleur rouge représente le dépassement du seuil d'information et de recommandation (50 µg/m³).

L'évolution horaire des concentrations en PM10 est similaire le 2 mars sur les 4 stations. Par contre le 3 mars, dans la matinée les niveaux se différencient. Sur les stations normandes, ils sont à la baisse ; quant aux stations en Hauts-de-France ils restent soutenus et augmentent même fortement à Calais pour atteindre le maximum (130 µg/m³ en moyenne horaire) dans la soirée du 3 mars (21h-00h).

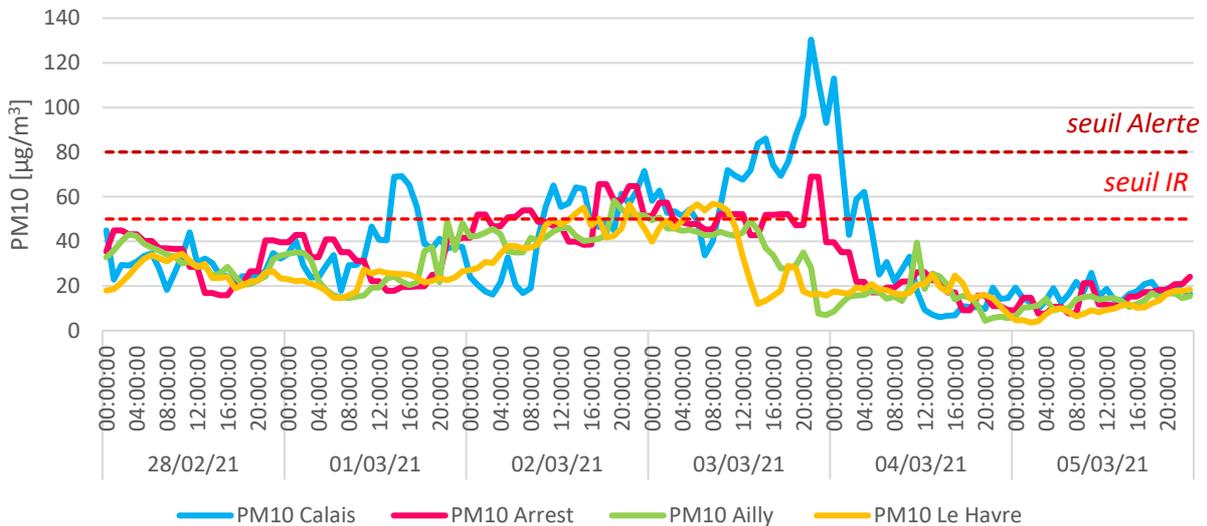


Figure 51 : Evolution horaire des concentrations de PM10 sur les 4 sites suivis. Ligne en pointillé rouge : seuil d'information et de recommandation, PM10 en moyenne journalière > 50 µg/m³ ; ligne en pointillé rouge foncé : seuil d'alerte, PM10 en moyenne journalière > 80 µg/m³)

Les conditions météorologiques

Les conditions météorologiques qui accompagnent cet épisode de début mars se caractérisent par des conditions anticycloniques (pressions autour de 1030 hPa), des températures basses avec des amplitudes journalières marquées surtout le 2 mars, une hauteur de couche limite faible et la présence d'inversions thermiques. Les vitesses de vents sont légèrement plus faibles sur les sites en Hauts-de-France que sur les sites normands. Le 3 mars, dans la deuxième partie de la journée, des précipitations ont été observées sur les stations normandes.

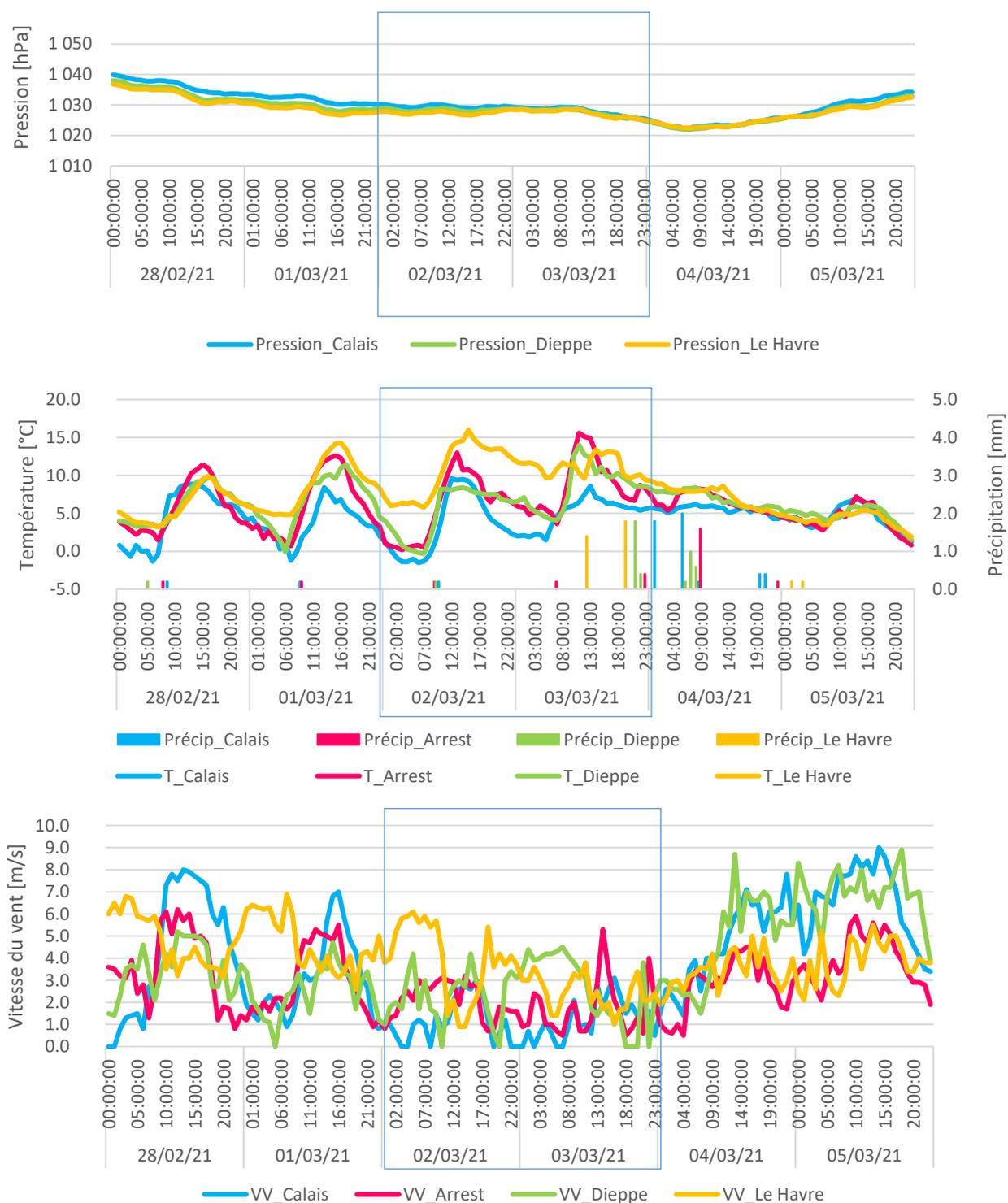
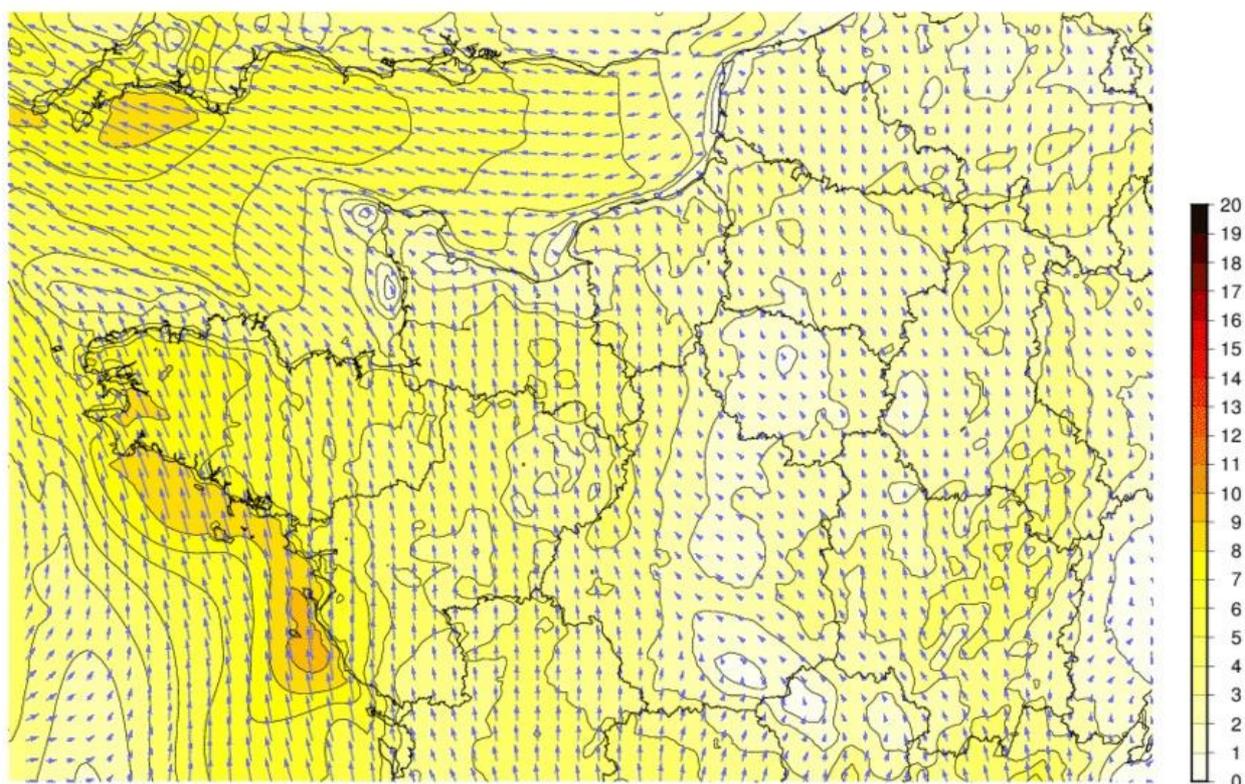


Figure 52 : Variation temporelle des paramètres météorologiques : pression, température, précipitation et vitesse du vent.

Le 2 mars, les vents dans les terres sont en provenance du sud-sud-est et sur la zone côtière ils viennent de nord-est et suivent la ligne côtière (Figure 53). Les rétrotrajectoires indiquent des masses d'air en provenance de la Mer du Nord qui font ensuite une boucle par l'est de l'Allemagne et arrivent en Normandie et Hauts-de-France par le sud-est. Le 3 mars, les vents en provenance de sud-ouest s'établissent en fin de matinée. Ils sont plus faibles en Hauts-de-France. Les masses d'air tournent progressivement et passent au sud-ouest (Figure 54).

2 mars 2021

Vent à 10m [m/s] NCEP/AVN+MM5 pour le 2021-03-02 15:00TU



Calais et Le Havre (Arpège)

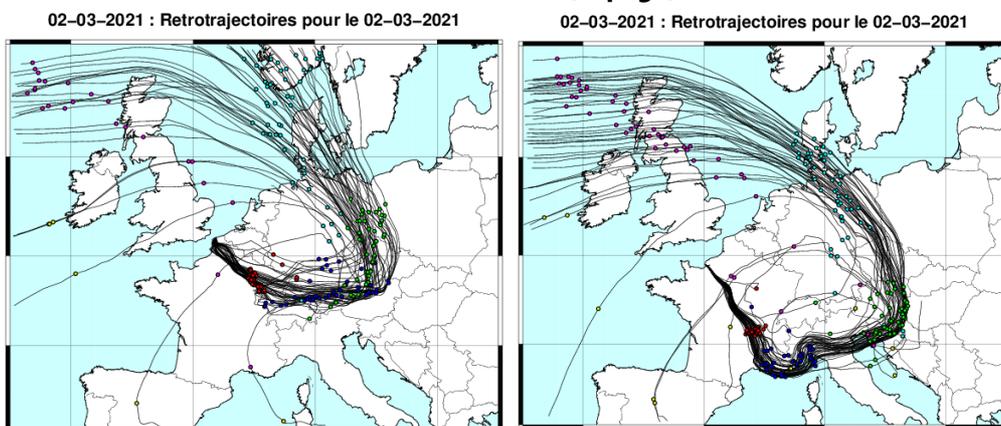
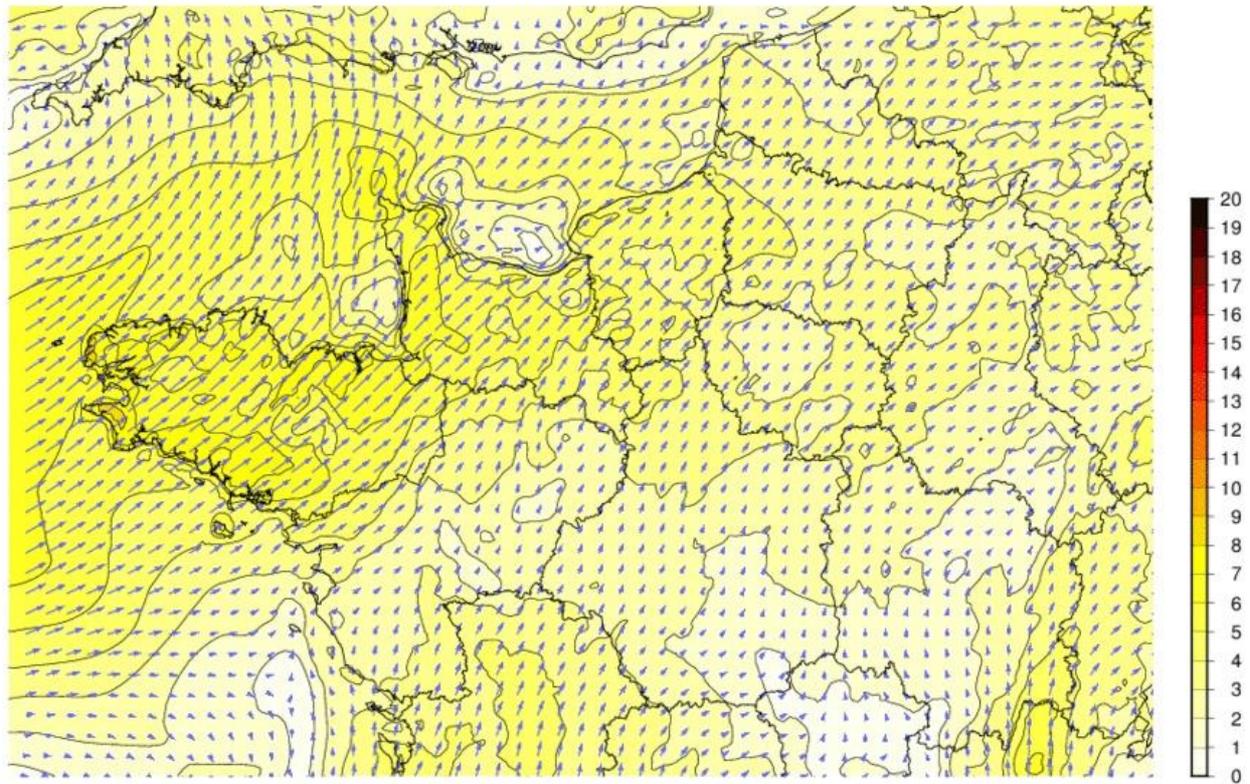


Figure 53 : Champs de vent et les rétrotrajectoires (modèle Arpège) à Calais et au Havre le 2/03/2021

3 mars 2021

Vent à 10m [m/s] NCEP/AVN+MM5 pour le 2021-03-03 12:00TU



Calais et Le Havre (Arpège)

03-03-2021 : Retrotrajectoires pour le 03-03-2021

03-03-2021 : Retrotrajectoires pour le 03-03-2021

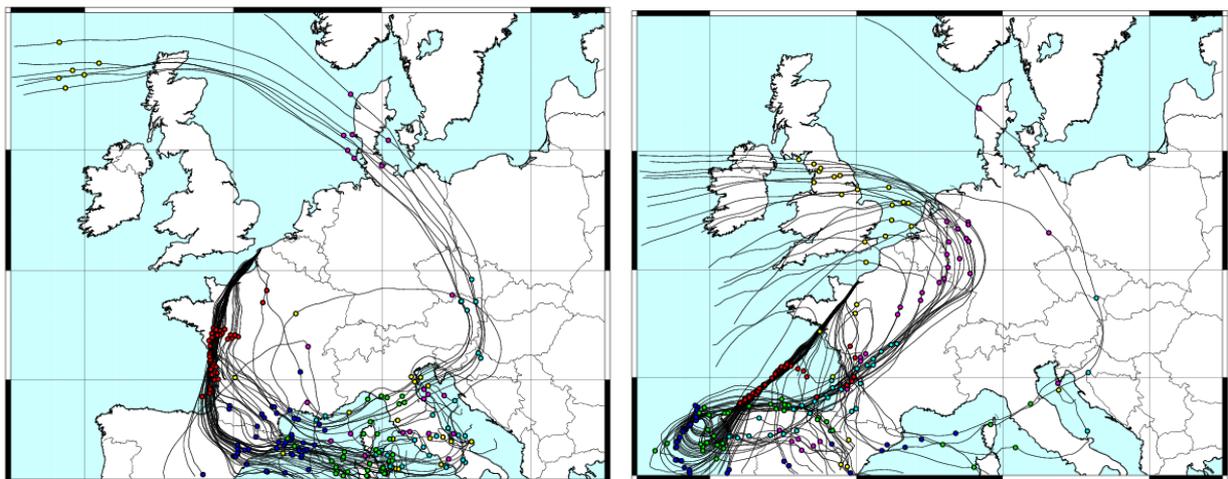


Figure 54 : Champs de vent et les rétrotrajectoires (modèle Arpège) à Calais et au Havre le 3/03/2021

☐ Analyse de la composition des particules

2 mars 2021

Les analyses chimiques des particules permettent de caractériser la nature de cet épisode. Le 2 mars, une prédominance de la matière organique et du nitrate dans les particules est observée. Alors que la **matière organique** est prédominante à Calais et Arrest, (12-16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ contre 9-10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à Ailly et au Havre), c'est le nitrate qui est majoritaire à Ailly et au Havre 11-13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (contre ~ 9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Hauts-de-France). Les concentrations en sulfate et ammonium sont homogènes entre ces quatre sites (3-4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

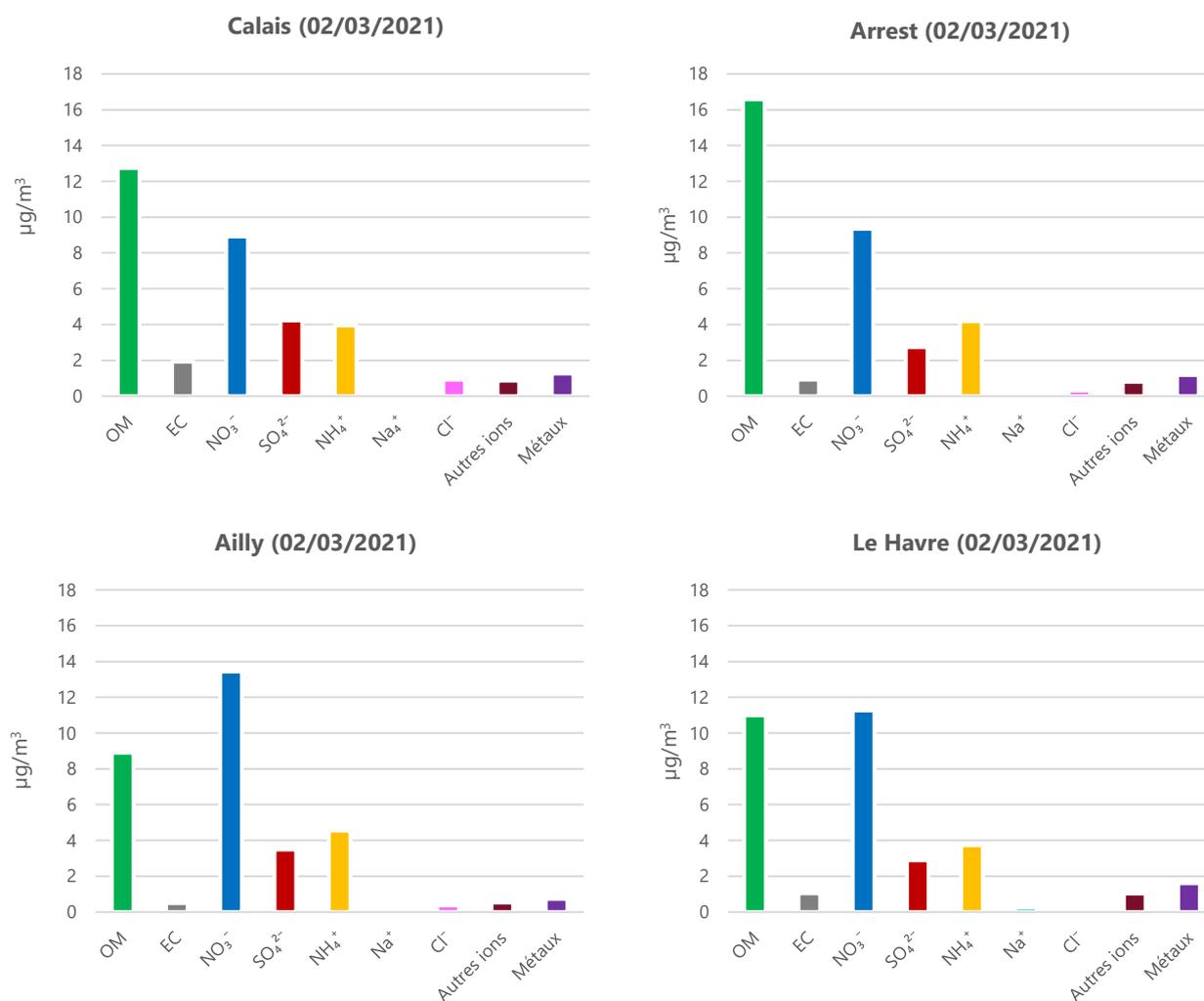


Figure 55 : Composition chimique des PM10 sur les quatre sites le 2/03/2021

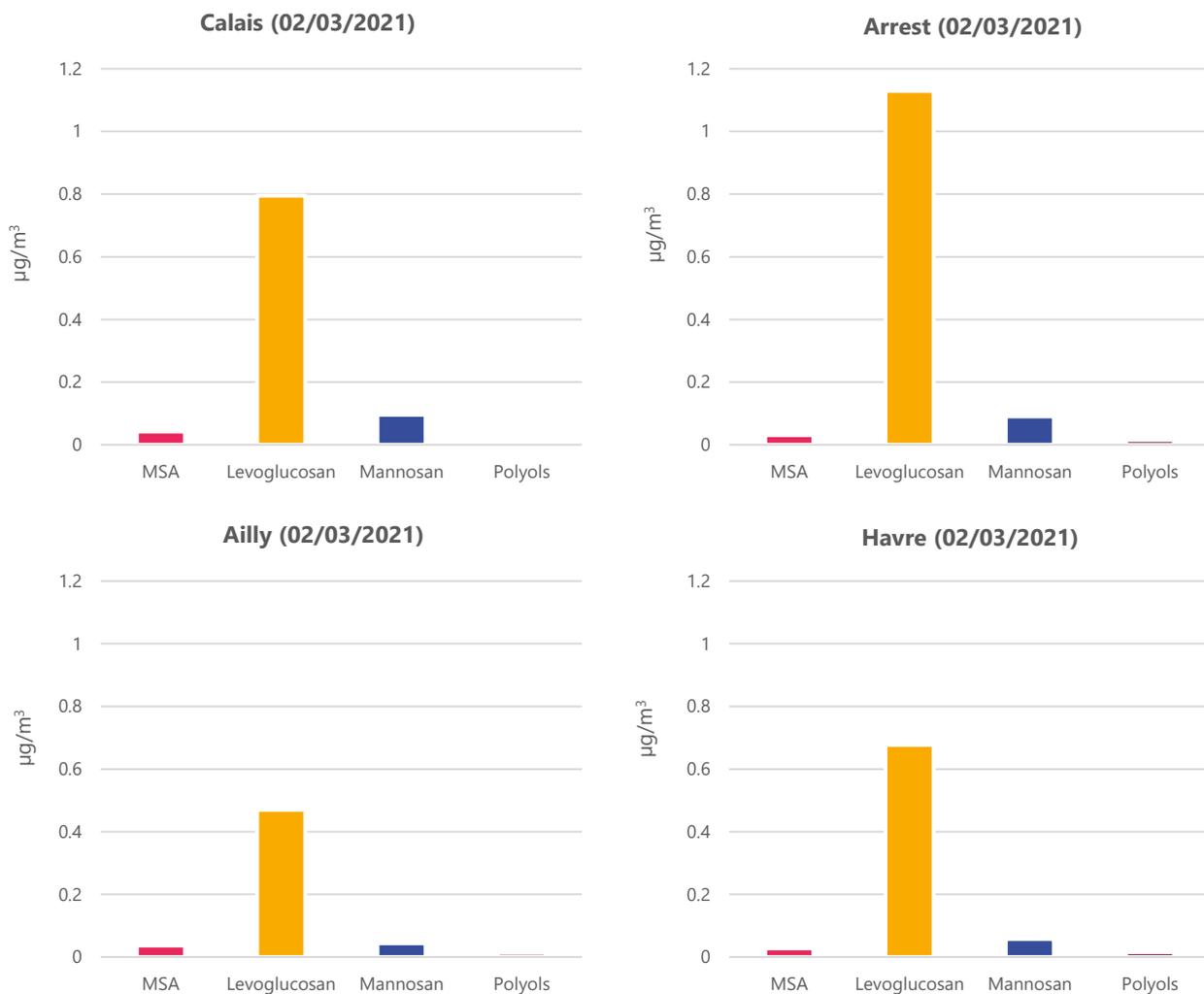


Figure 56 : Concentration des traceurs organiques sur les quatre sites le 2/03/2021

Les traceurs organiques nous aident à comprendre certaines sources des particules PM10. Le lévoglucosan, indicateur de la combustion de biomasse, est le composé dominant parmi ces traceurs. Il est plus élevé en Hauts-de-France (0.8-1.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ contre 0.5-0.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) qu'en Normandie.

En résumé, la combustion de biomasse (le chauffage au bois) est une source importante des particules PM10 mesurées ce jour, notamment en Hauts-de-France. En revanche, le nitrate d'ammonium présente un niveau plus élevé en Normandie.

3 mars 2021

Le 3 mars 2021, les concentrations de l'ensemble des composés sont en baisse en Normandie : 3-6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour la matière organique et environ 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le nitrate. En Hauts-de-France, les concentrations en matière organique restent élevées, entre 12 et 13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, et la concentration en **nitrate** augmente à **17.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à Calais**. La concentration du **sulfate et d'ammonium** est également en hausse (**12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et 7.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$**) sur ce site.

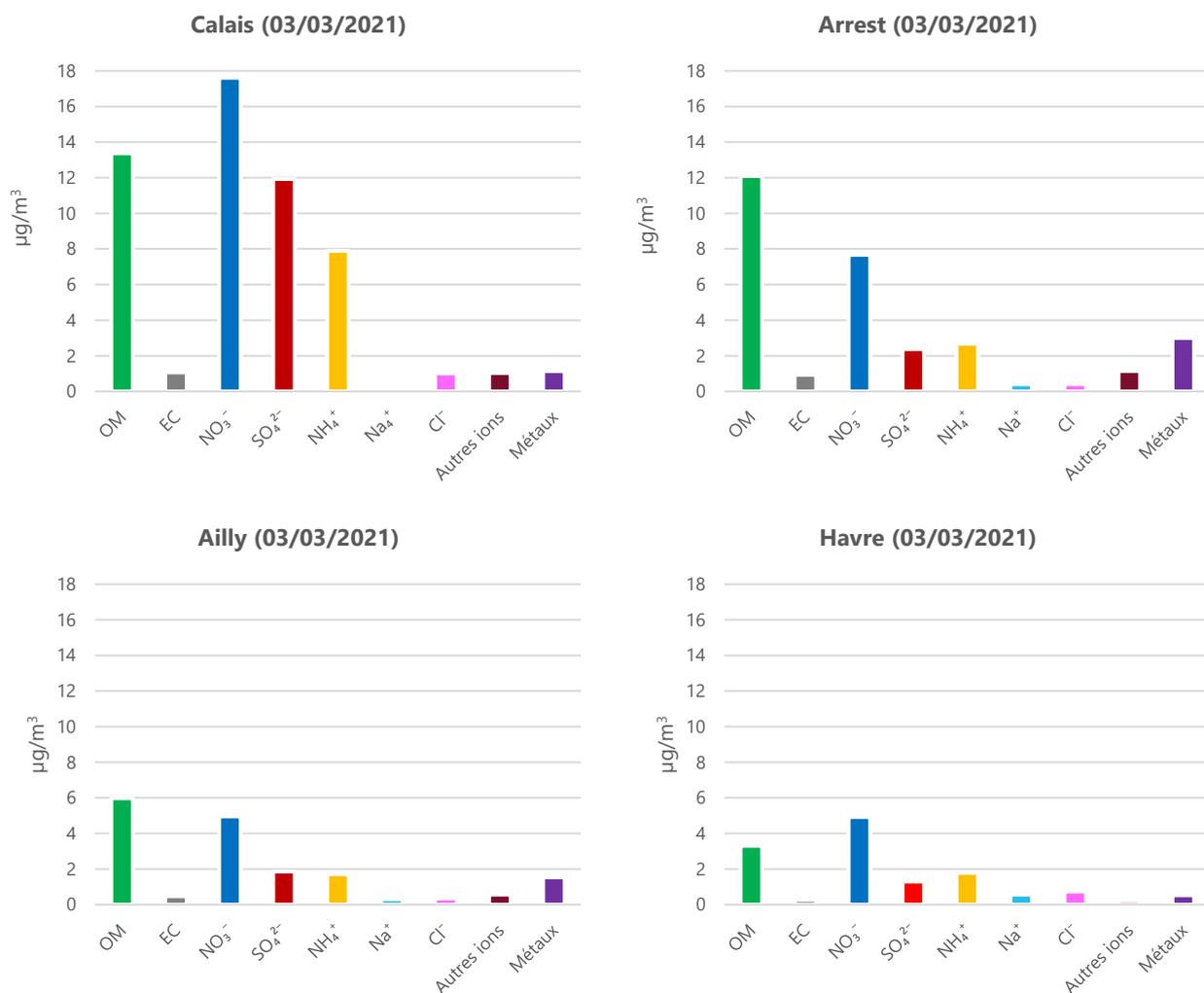
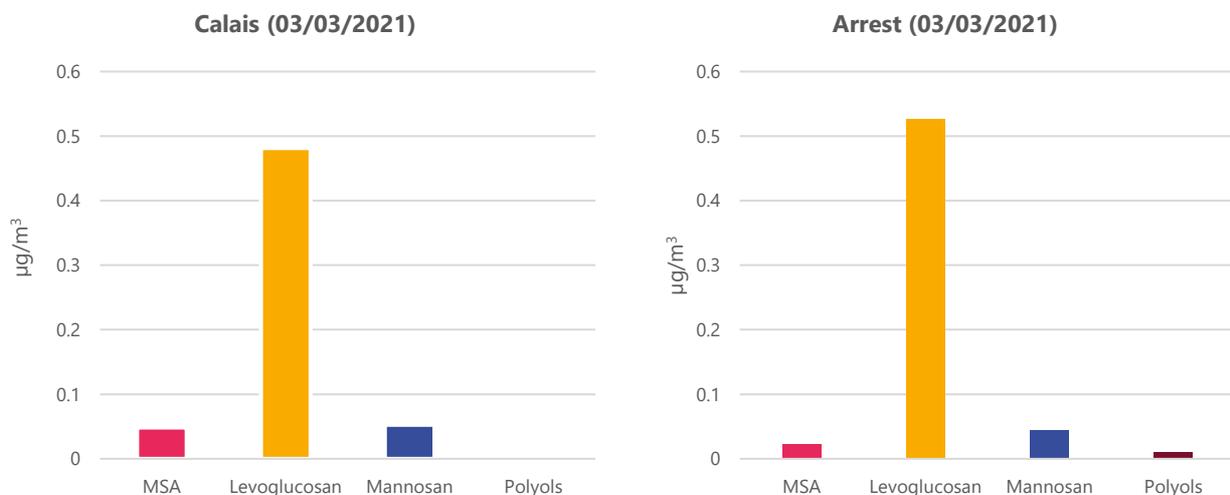


Figure 57 : Composition chimique des PM10 sur les quatre sites le 3/03/2021

Le 3 mars, le lévoglucosan est toujours le composé le plus important parmi les traceurs organiques, avec cependant un niveau moins important que le 2 mars. Il est plus élevé en Hauts-de-France qu'en Normandie.



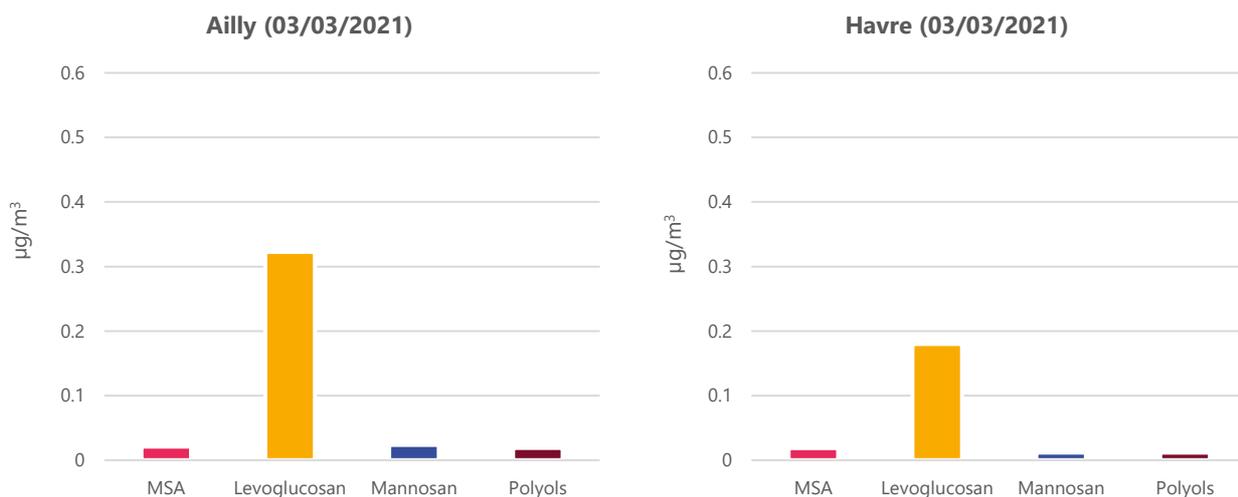


Figure 58 : Concentration des traceurs organiques sur les quatre sites le 3/03/2021

En résumé, cet épisode de pollution par les particules qui a duré deux jours est de type « mixte ». Il se caractérise par une composition variée des particules. D'une part, la contribution importante de la matière organique couplée à une concentration élevée en lévoglucosan indique un impact des émissions liées à la combustion de biomasse. Les conditions anticycloniques, stables, une hauteur de couche limite faible et la présence d'inversions thermiques ont favorisé leur accumulation dans l'air. Par ailleurs la contribution importante de nitrate d'ammonium mais aussi du sulfate d'ammonium (le 3 mars à Calais), témoignent de la formation et du transport des particules secondaires inorganiques. Elles résultent de réactions de polluants gazeux précurseurs déjà présents dans l'air comme le dioxyde d'azote, l'ammoniac et le dioxyde de soufre (issus notamment de la combustion, des activités agricoles, de l'industrie, du trafic et des sources naturelles) sous l'effet de l'humidité et de la température. La pluie en Normandie semble avoir permis une diminution de la pollution plus rapidement qu'en Haut de France également.

Il est à noter que le pic des PM10 le 3 mars est précédé par une augmentation des niveaux d'oxydes d'azote et d'ammoniac, les gaz précurseurs de certaines particules inorganiques secondaires à savoir les particules de nitrate d'ammonium (Figure 44). Les analyses PUF confirment que le 2 mars est fortement impacté par la combustion de biomasse (Annexe 6). Les ratios PM2.5/PM10 sont également élevés pour ce jour, ce qui indique une contribution des sources anthropiques importante.

6.6.2. Episode du 31 mars et 1^{er} avril 2021

L'épisode débute le 31 mars, au Nord de la France et en Belgique où les dépassements du seuil IR de 50 µg/m³ pour les particules PM10 sont enregistrés.

Le 1^{er} avril, l'épisode s'étend et touche toute la région Hauts-de-France, le nord-ouest de Belgique ainsi que la zone côtière jusqu'en Bretagne.

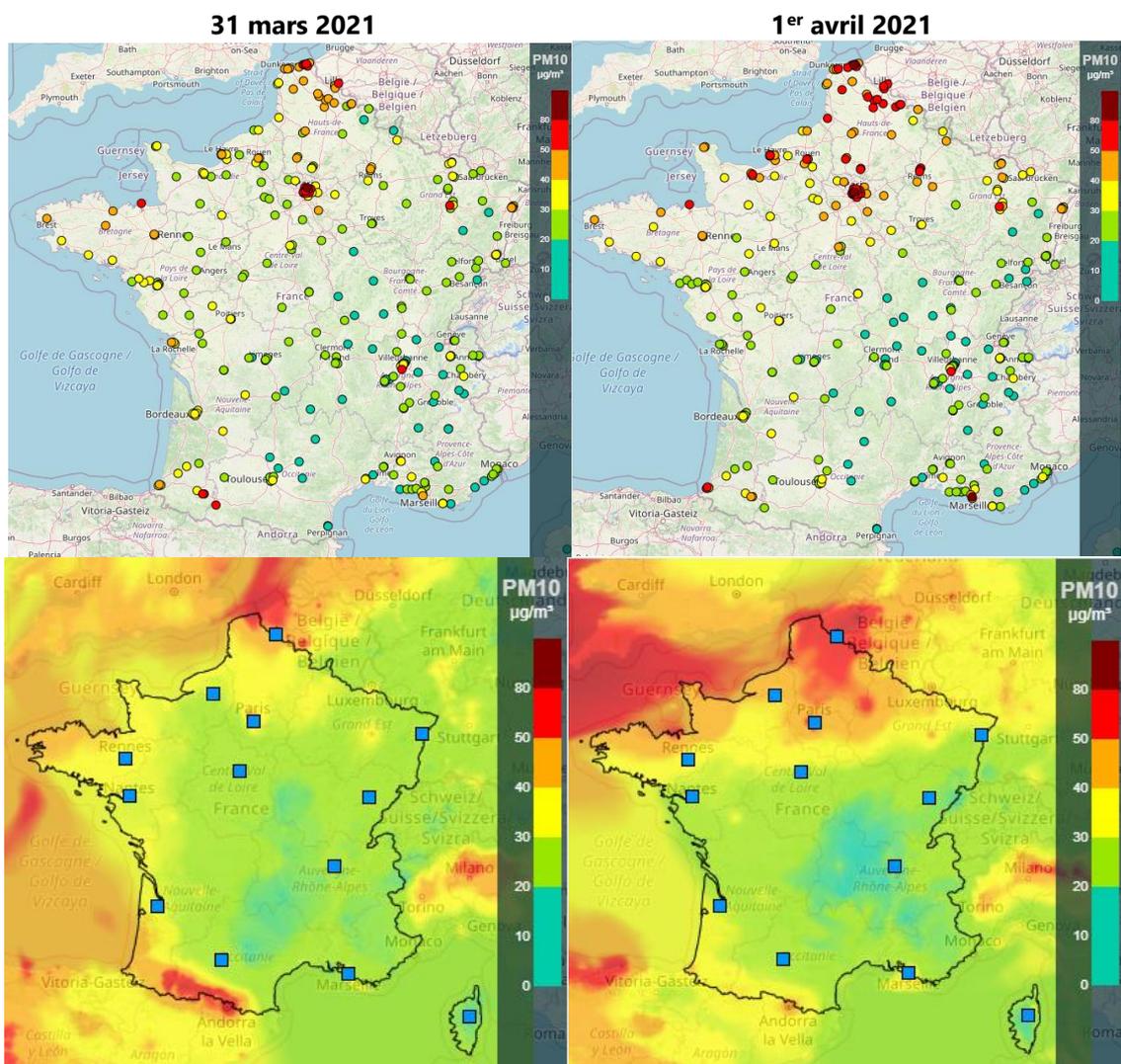


Figure 59 : Cartes de dépassement des seuils réglementaires pour les PM10 le 31 mars et 1 avril 2021 sur les stations de fond ainsi que les cartes analysées combinant modèle et observations (source : Prev'air). Les couleurs indiquent la gamme de concentrations de PM10 en microgramme par m^3 (cf. légendes). La couleur rouge représente le dépassement du seuil d'information et de recommandation ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Sur la zone d'étude, les concentrations les plus élevées en particules PM10 ont été observées le 1^{er} avril. Le dépassement du seuil d'information et de recommandation (IR) a eu lieu le 1^{er} avril sur la station à Arrest. A Calais, les concentrations ce jour ont atteint le seuil $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mais sans le dépasser. Sur les 2 stations d'étude normandes, les concentrations des PM10 sont plus faibles même si une légère augmentation des PM10 est observée le 1^{er} avril.

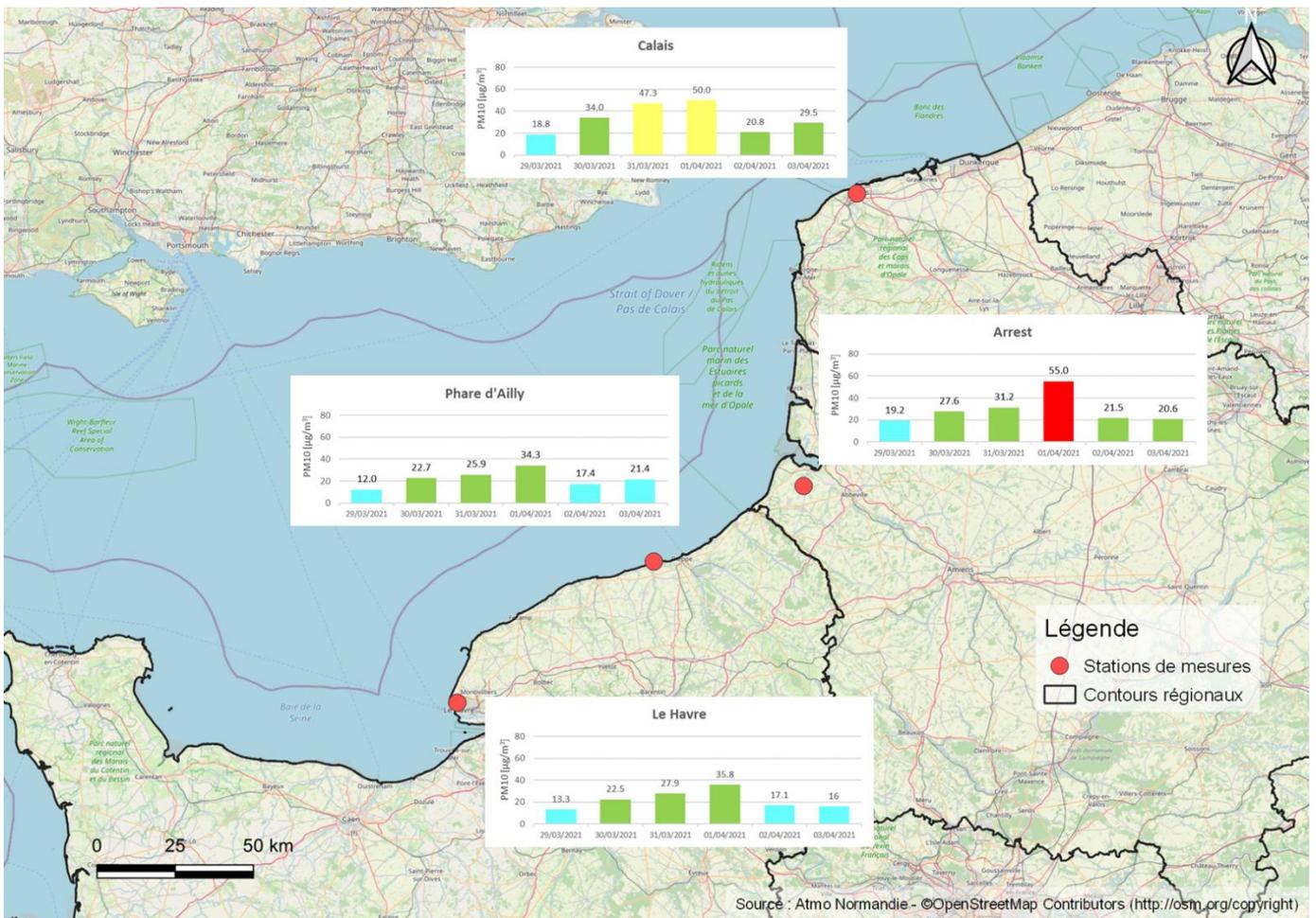


Figure 60 : Concentration moyenne des PM10 avant, pendant et après l'épisode de pollution (29/03-3/04/2021). La couleur rouge représente le dépassement du seuil d'information et de recommandation (50 µg/m³).

Le 31 mars, l'évolution horaire des concentrations en PM10 à Calais se différencie des autres stations. Les concentrations sont plus fortes. Une pointe importante de courte durée, qui dépasse 110 µg/m³ en moyenne horaire, est observée dans la matinée, puis à partir de la soirée les concentrations augmentent pour atteindre leur niveau maximum dans la matinée du 1^{er} avril. A Arrest, le niveau en PM10 augmente tôt dans la matinée du 1^{er} avril, reste élevé et atteint son maximum dans l'après-midi. Sur les deux stations normandes, une pointe de courte durée est enregistrée le 1^{er} avril. Elle est d'abord observée sur la station d'Ailly (maximum horaire 75 µg/m³) et ensuite au Havre (maximum horaire 64 µg/m³).

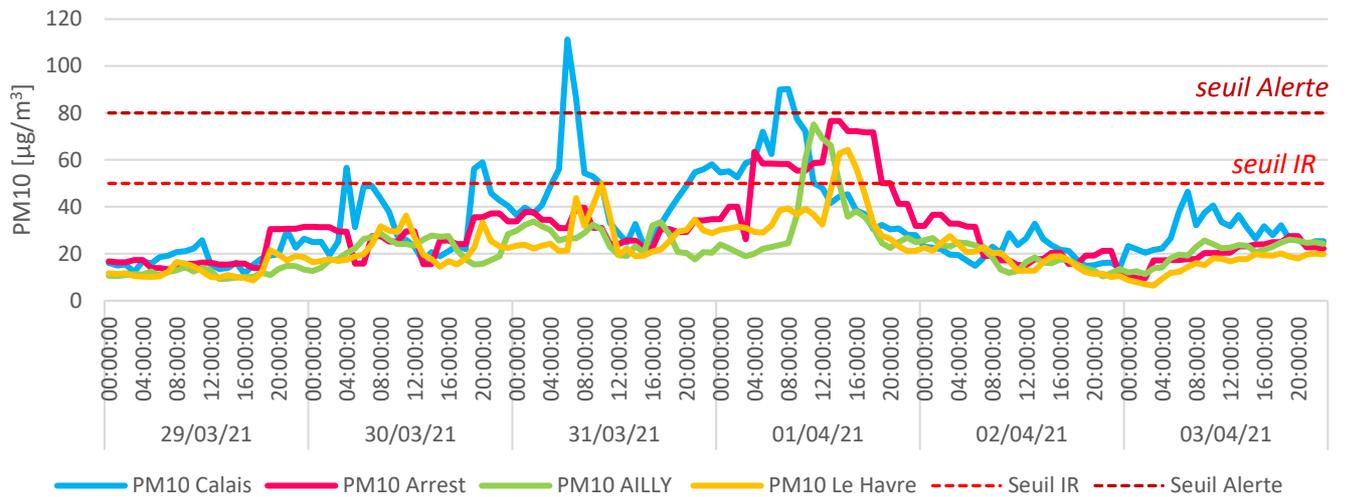
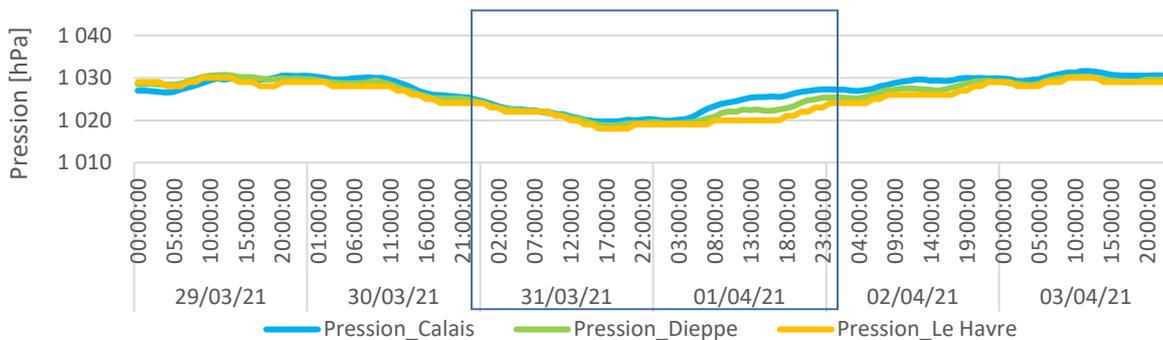


Figure 61 : Evolution horaire des concentrations de PM10 sur les 4 sites suivis. Ligne en pointillé rouge : seuil d'information et de recommandation, PM10 en moyenne journalière > 50 µg/m³ ; ligne en pointillé rouge foncé : seuil d'alerte, PM10 en moyenne journalière > 80 µg/m³)

Les conditions météorologiques

Les conditions météorologiques qui accompagnent cet épisode de fin mars et début avril se caractérisent par des conditions anticycloniques, avec des amplitudes journalières marquées (sauf au Havre) surtout le 31 mars, et la présence d'inversions thermiques. Les vitesses de vents sont faibles le 31 mars et augmentent progressivement le 1^{er} avril (Figure 62).



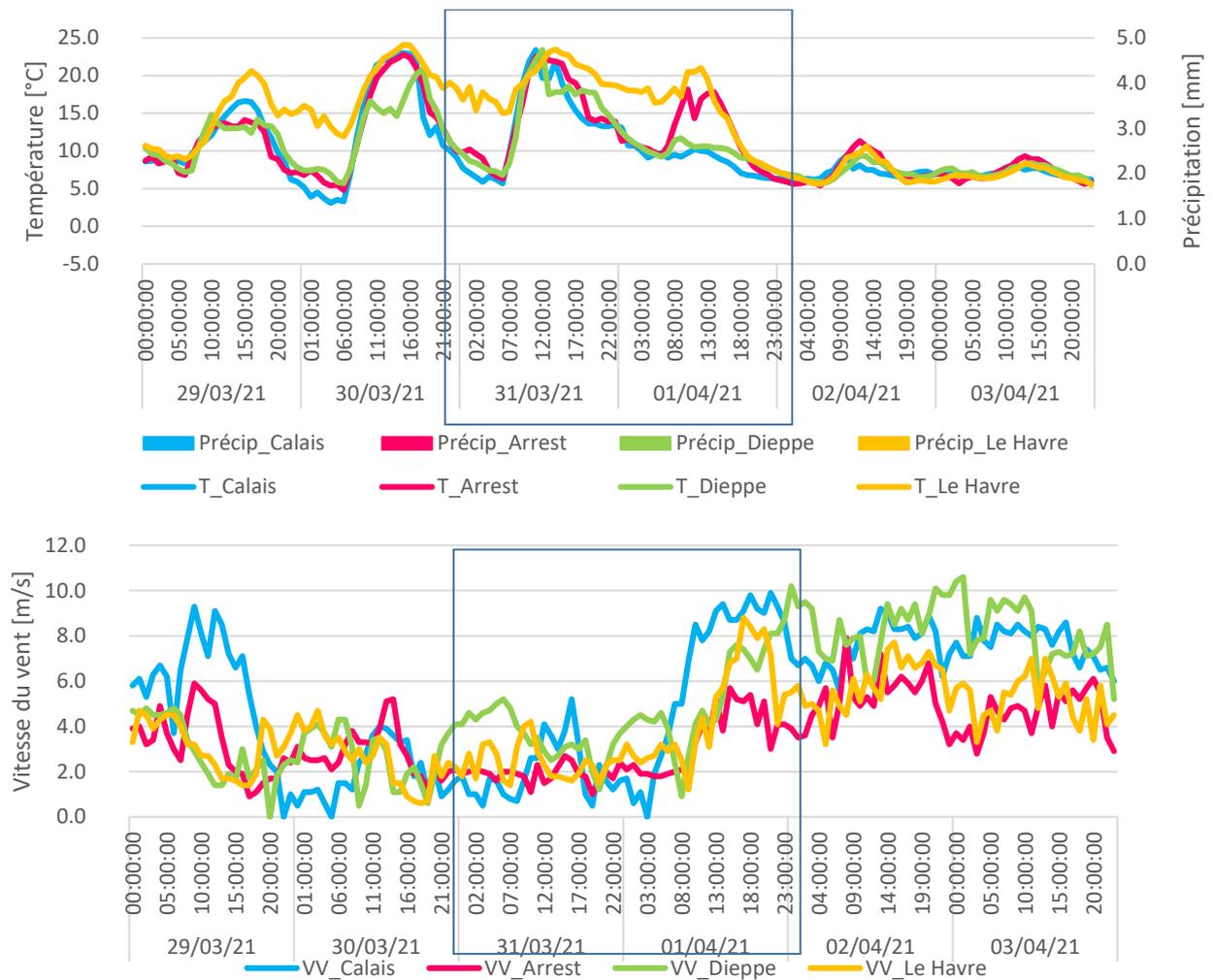
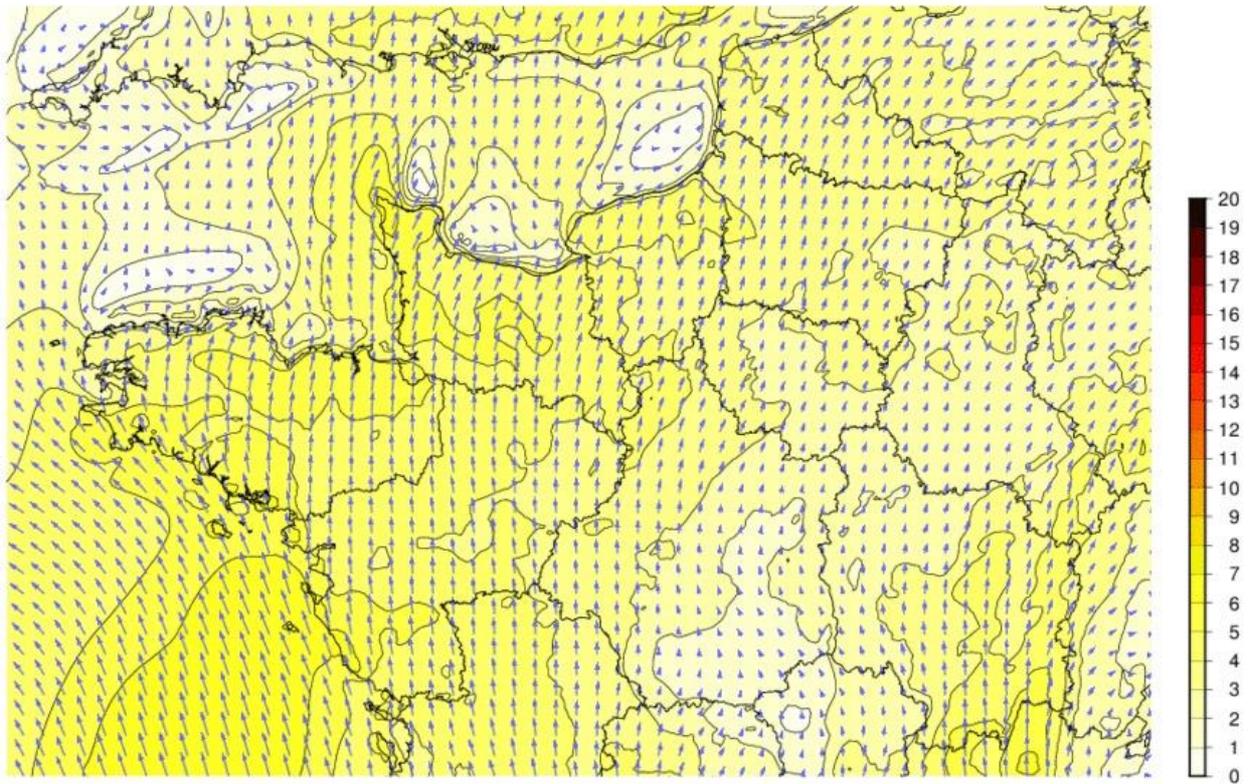


Figure 62 : Variation temporelle des paramètres météorologiques : pression, température, précipitation et vitesse du vent.

Le 31 mars, les vents faibles sont en provenance du sud-sud-ouest (Figure 63). Les rétrotrajectoires indiquent des masses d'air en provenance du sud qui prennent leur source à l'ouest. Dans la matinée du 1^{er} avril, les vents se renforcent et passent au nord-est et les masses d'air commencent à tourner et passer progressivement au nord-est (Figure 64).

31 mars 2021

Vent à 10m [m/s] NCEP/AVN+MM5 pour le 2021-03-31 12:00TU



Calais et Le Havre (Arpège)

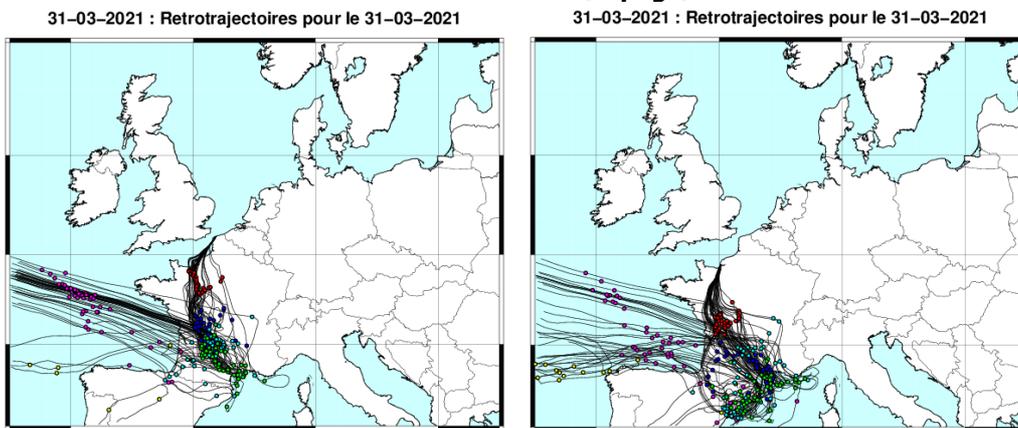
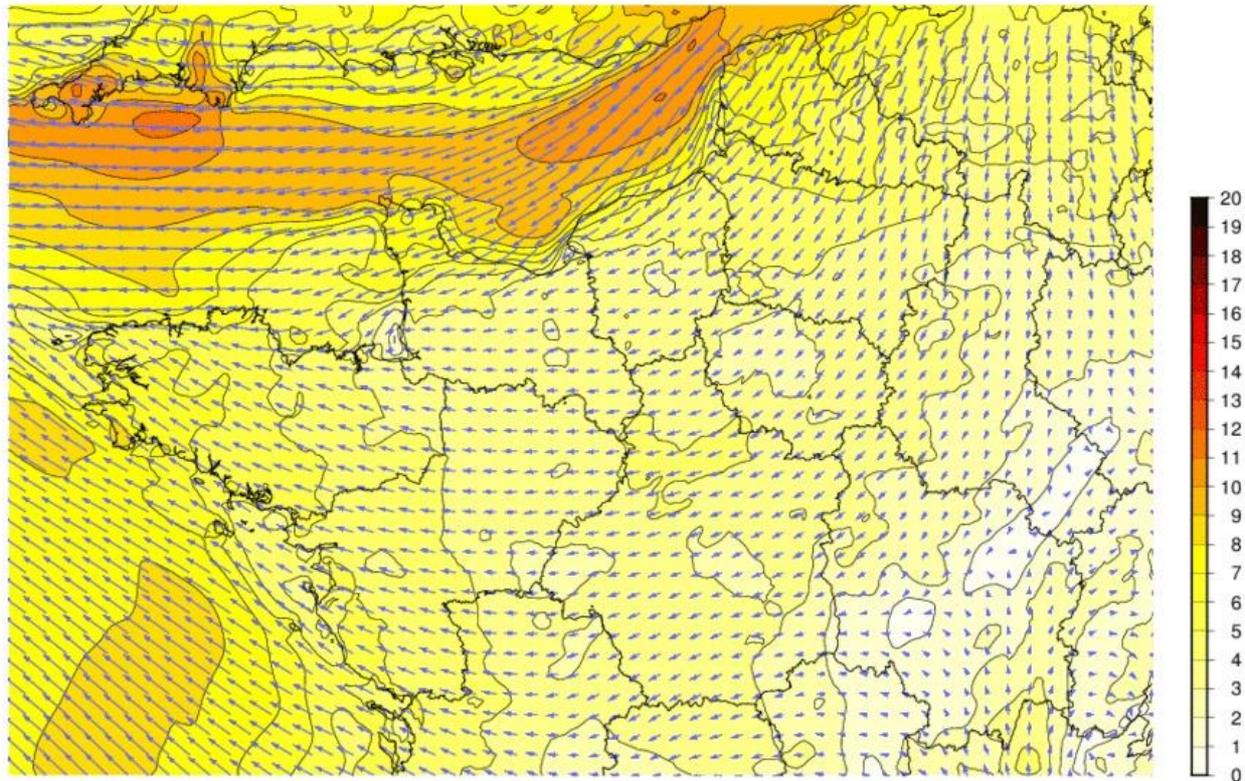


Figure 63 : Champs de vent et les rétrotrajectoires (modèle Arpège) à Calais et au Havre le 31/03/2021

1^{er} avril 2021

Vent à 10m [m/s] NCEP/AVN+MM5 pour le 2021-04-01 12:00TU



Calais et Le Havre (Arpège)

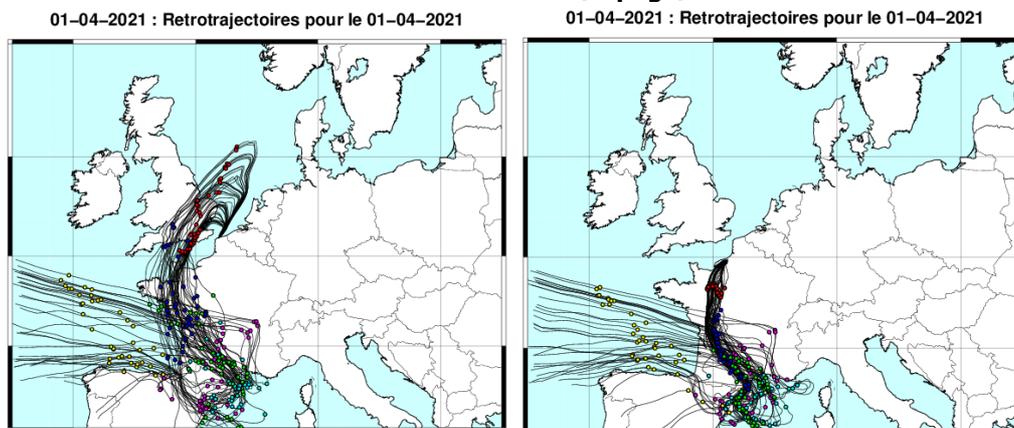


Figure 64 : Champs de vent et les rétrotrajectoires (modèle Arpège) à Calais et au Havre le 1/04/2021

☐ Analyse de la composition des particules

31 mars 2021

L'analyse de la composition des particules indique une proportion importante de la matière organique. Elle présente un niveau similaire (9-11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour les 2 stations des Hauts-de-France et au Havre. A Ailly, les concentrations en matière organique sont plus faibles (5.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Les particules à Calais se caractérisent aussi par une part importante de nitrate (10.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Les concentrations de ce dernier sont plutôt faibles sur les trois autres stations (< 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Il est également à noter le niveau légèrement plus élevé de sulfate au Havre

(3.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) par rapport aux autres sites. Il est à noter qu'une augmentation du dioxyde de soufre a été observé sur la zone du Havre dans la nuit du 30 et 31 mars et la matinée du 31 mars.

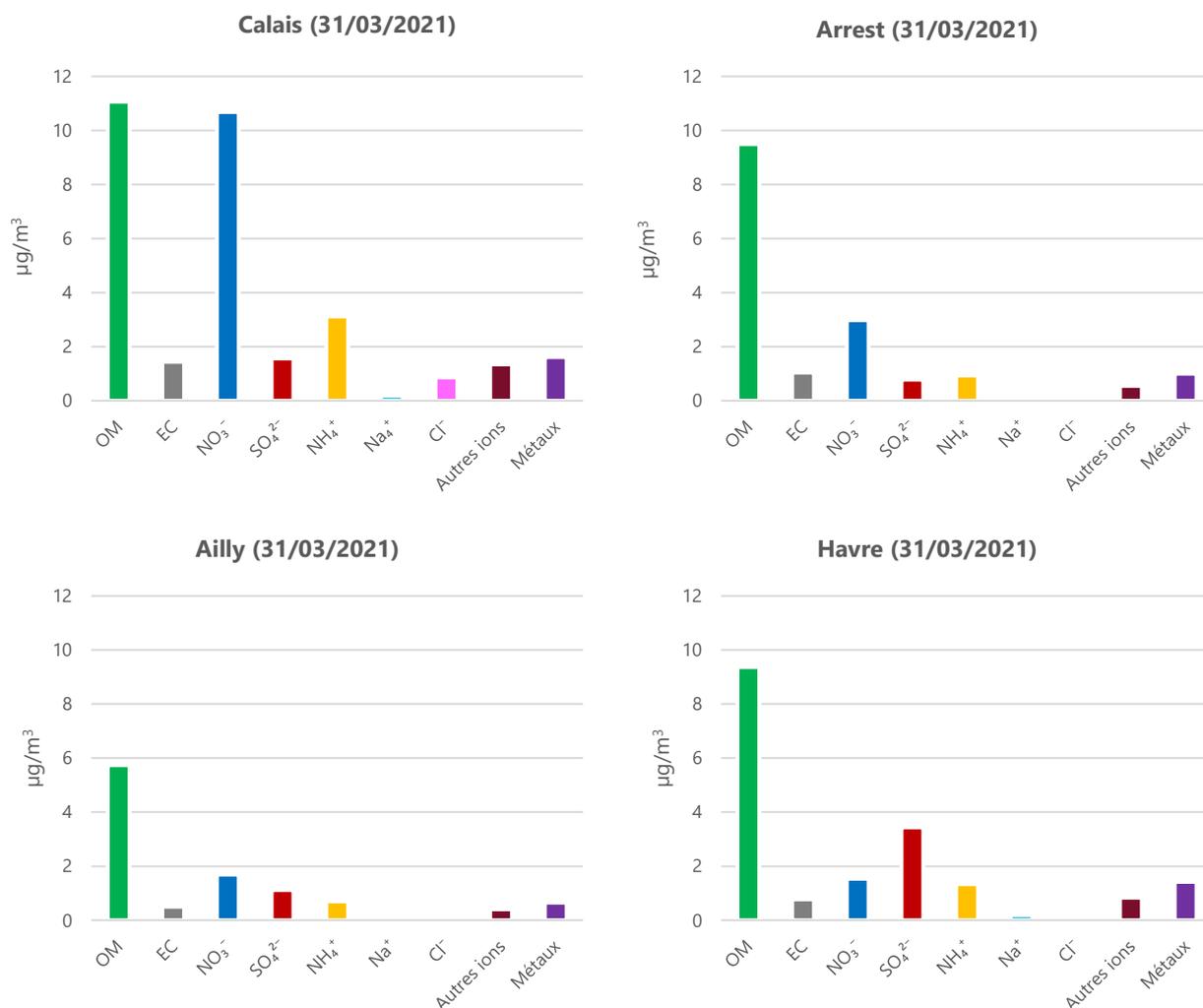


Figure 65 : Composition chimique des PM10 sur les quatre sites le 31/03/2021

Parmi les traceurs organiques, c'est toujours le lévoglucosan qui prédomine. Lors de cet épisode, comme pour la matière organique, il présente un niveau similaire (0.17-0.18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour trois des quatre stations. Seules les concentrations observées à Ailly sont plus faibles (0.06 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Cependant, ces niveaux sont largement inférieurs à ceux observés lors de l'épisode de début mars où des concentrations allant jusqu'à 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ont été enregistrées. De plus, à Calais, les concentrations de MSA et de mannosan sont légèrement plus élevées que sur les autres sites.

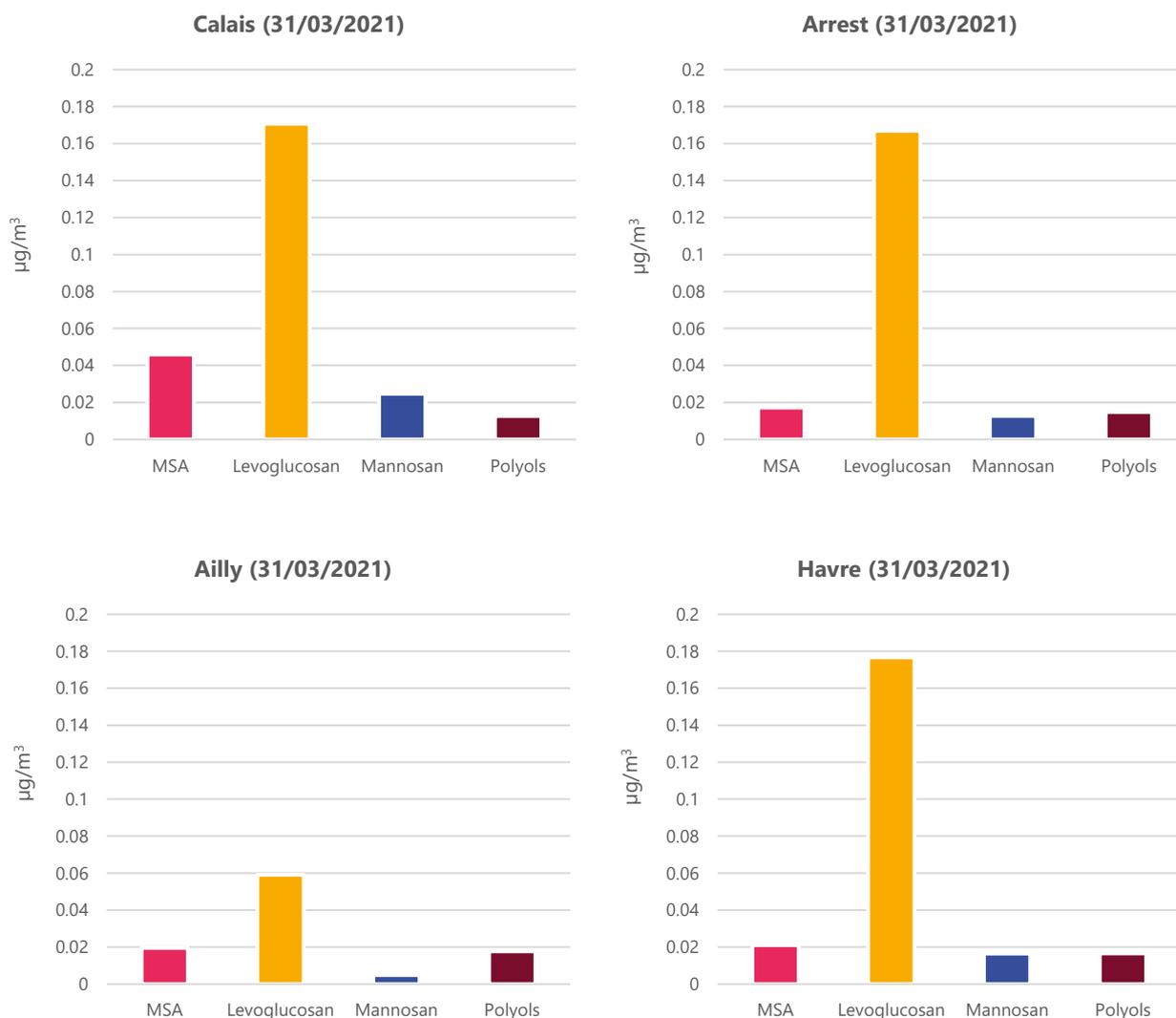
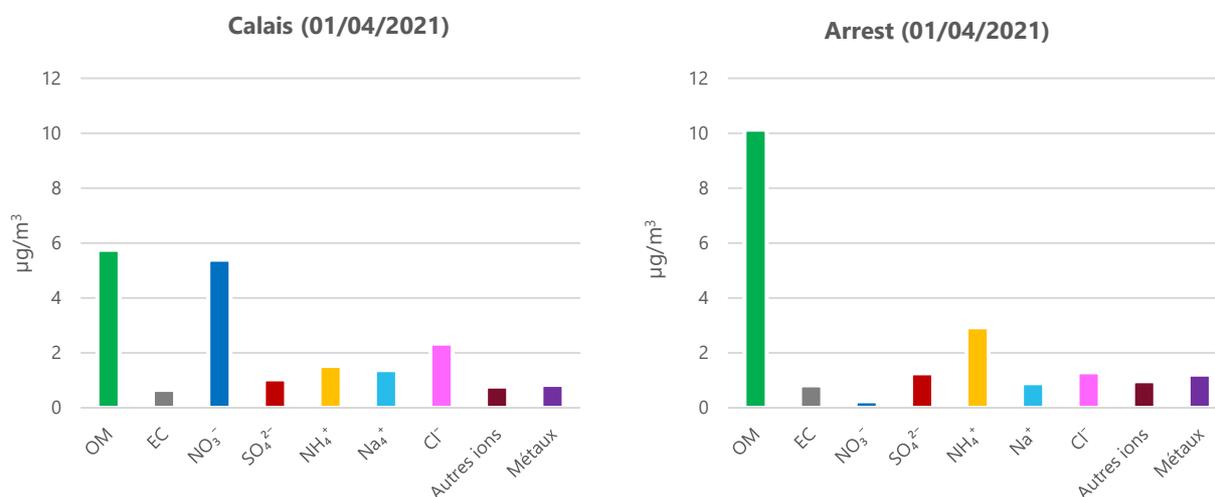


Figure 66 : Concentration des traceurs organiques sur les quatre sites le 31/03/2021

1^{er} avril 2021

Le 1^{er} avril, la composition chimique des particules est très différente d'un site à l'autre. A Arrest, la concentration de la matière organique est plus élevée ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) que sur les autres stations ($< 6 \mu\text{g}/\text{m}^3$). A Calais et Ailly, la concentration du nitrate est plus importante ($5.4\text{-}7.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) que sur les 2 autres stations. Les sels marins (NaCl) sont également importants sur ces deux sites.



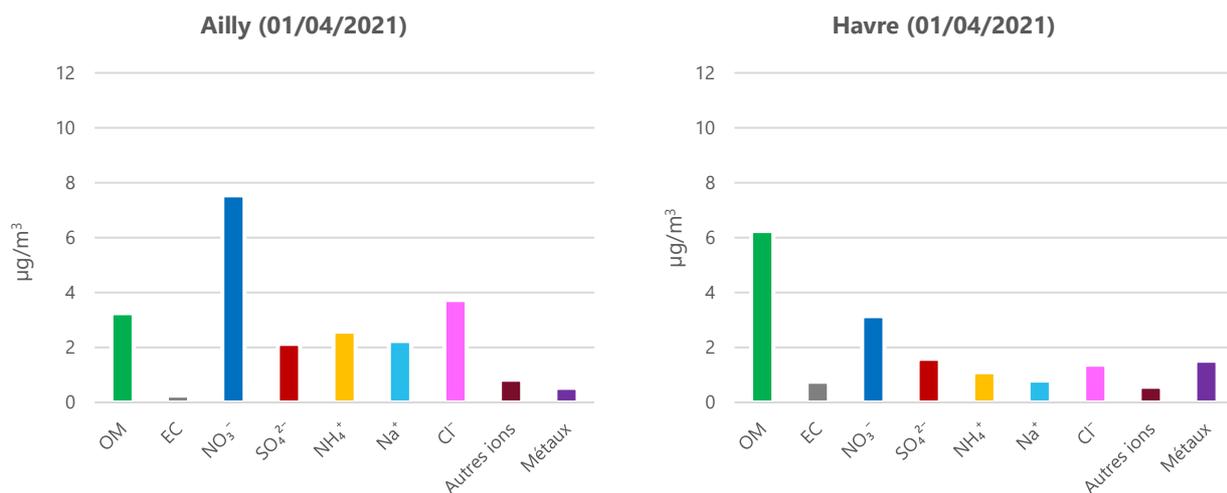


Figure 67 : Composition chimique des PM10 sur les quatre sites le 1/04/2021

Parmi les traceurs organiques, le MSA représente un niveau 4 à 5 fois plus élevé à Arrest que sur les trois autres sites. Ceci indique que le site d'Arrest est sous influence importante des masses d'air marines. Son niveau de lévoglucosan est également plus important.

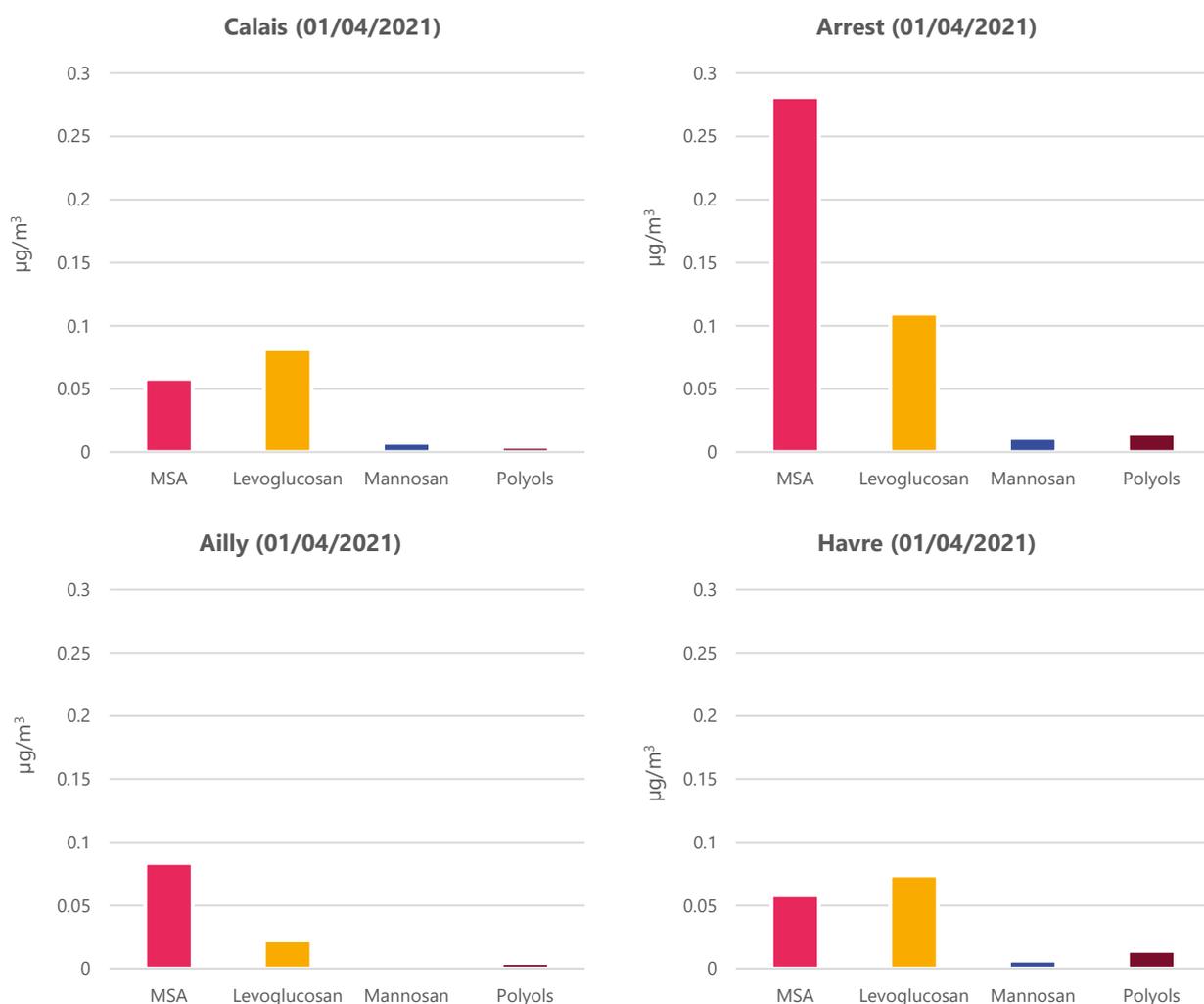


Figure 68 : Concentration des traceurs organiques sur les quatre sites le 3/03/2021

En résumé, cet épisode s'est caractérisé par une variabilité de la composition des particules entre les sites et aussi entre les jours de l'épisode. A Calais, une contribution à parts égales du nitrate d'ammonium et de la matière organique est enregistrée. A Arrest et au Havre, une forte contribution de la matière organique est observée avec une faible contribution du nitrate. A Ailly, le 31 mars c'est la matière organique qui prédomine dans la composition des particules alors que le 1^{er} avril c'est le nitrate. Le lévoglucosan est encore le traceur organique dominant mais avec un niveau 5 fois plus faible que le début mars. Le 1^{er} avril, une contribution en hausse du MSA est observé à Arrest ce qui indique un impact des masses d'air biogéniques marines âgées. A Ailly, le 1^{er} avril une augmentation des sels marins (NaCl) est observée, certainement en lien avec les vents soutenus en provenance de la mer. Il est à noter que le pic de PM10 du 1^{er} avril est précédé par une augmentation des niveaux en oxydes d'azote et en ammoniac, les gaz précurseurs du nitrate d'ammonium (Figure 44).

6.6.3. Episode du 21 avril 2021

Le 21 avril, l'épisode de pollution aux particules PM10 a touché principalement la zone frontière entre la France et la Belgique, et la région parisienne. Les particules PM10 sont également en hausse (> 40 µg/m³) sur la zone côtière du nord de la France.

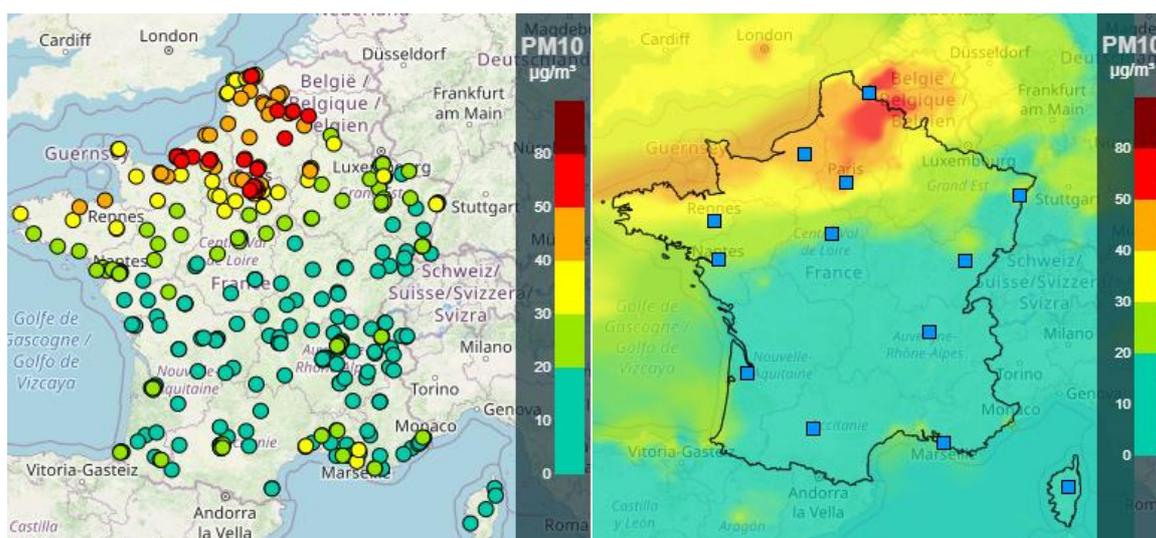


Figure 69 : Cartes de dépassement des seuils réglementaires pour les PM10 le 21 avril 2021 sur les stations de fond ainsi que les cartes analysées combinant modèle et observations (source : Prev'air). Les couleurs indiquent la gamme de concentrations de PM10 en microgramme par m³ (cf. légendes). La couleur rouge représente le dépassement du seuil d'information et de recommandation (50 µg/m³).

Sur la zone d'étude, le 21 avril, les concentrations en particules PM10 étaient en hausse mais aucun dépassement du seuil de 50 µg/m³ n'a pas été enregistré. Les niveaux variaient entre 34 µg/m³ à Calais et 45 µg/m³ au phare d'Ailly (Figure 70).

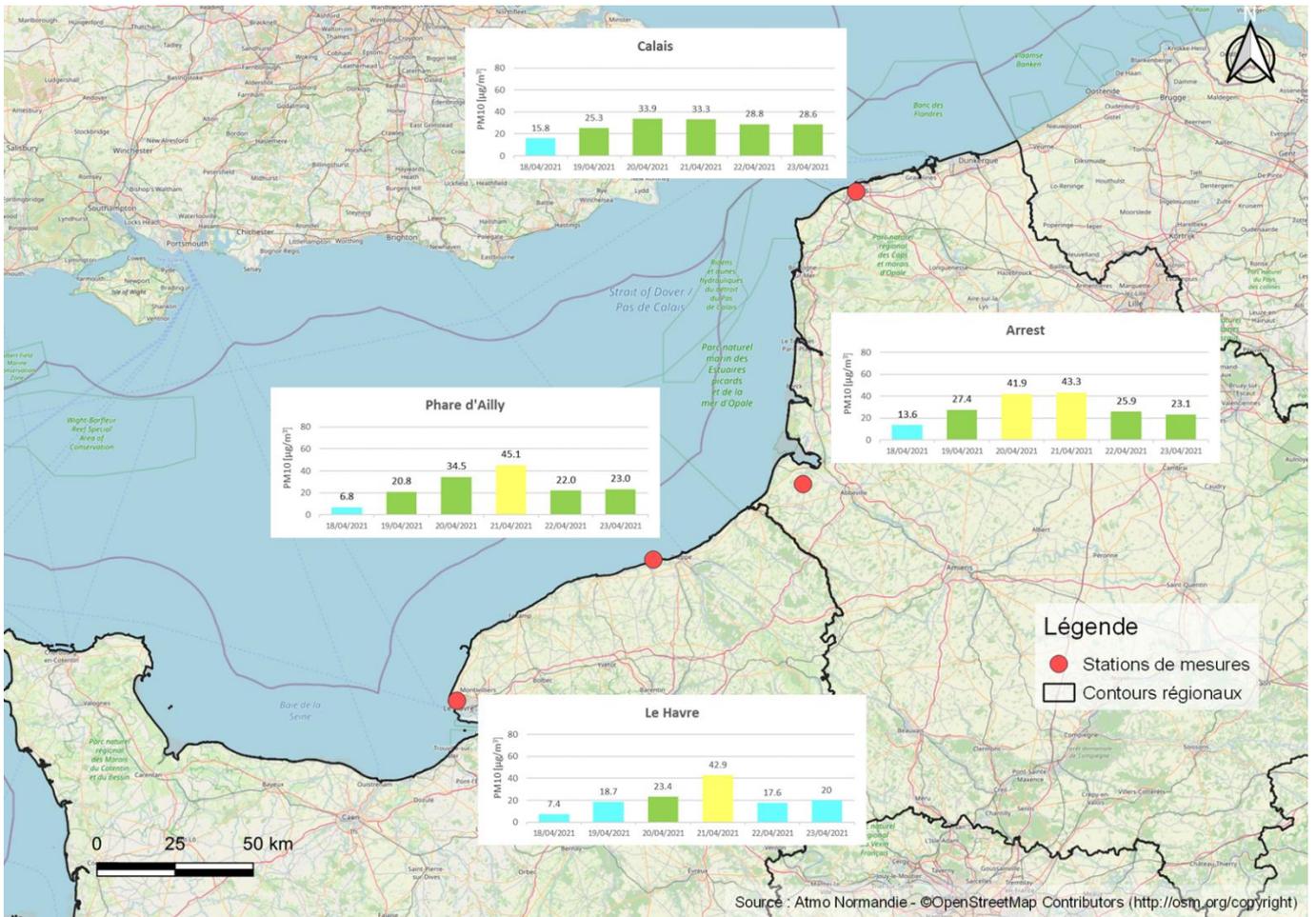


Figure 70 : Concentration moyenne des PM10 avant, pendant et après l'épisode de pollution (18/04-23/04/2021).

L'évolution horaire des concentrations en PM10, observée sur les 4 stations, indique une augmentation progressive des particules à partir du 20 avril pour atteindre le maximum le 21 avril au milieu de la journée. A Calais les concentrations restent néanmoins plus faibles. Les valeurs maximales horaires varient entre 53 µg/m³ à Calais et 74 µg/m³ au phare d'Ailly.

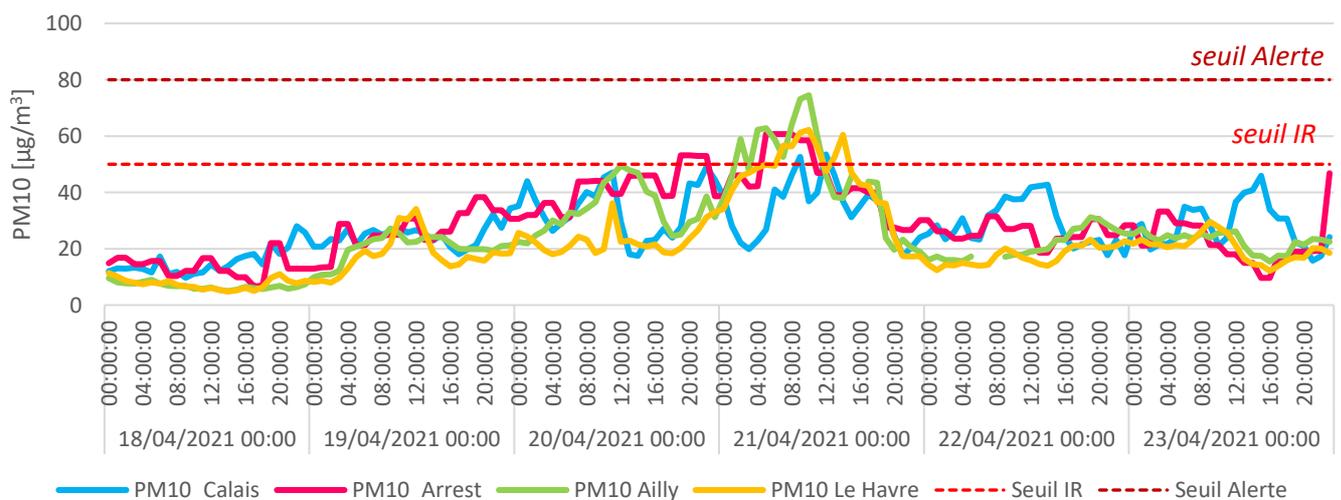


Figure 71 : Evolution horaire des concentrations de PM10 sur les 4 sites suivis. Ligne en pointillé rouge : seuil d'information et de recommandation, PM10 en moyenne journalière > 50 µg/m³ ; ligne en pointillé rouge foncé : seuil d'alerte, PM10 en moyenne journalière > 80 µg/m³

Les conditions météorologiques

Le 21 avril se caractérise par une situation anticyclonique. Les amplitudes journalières de température ne sont pas très marquées sauf à Arrest. Les vitesses de vent se renforcent dans la matinée du 21 avril et restent soutenues jusqu'à la fin de la journée.

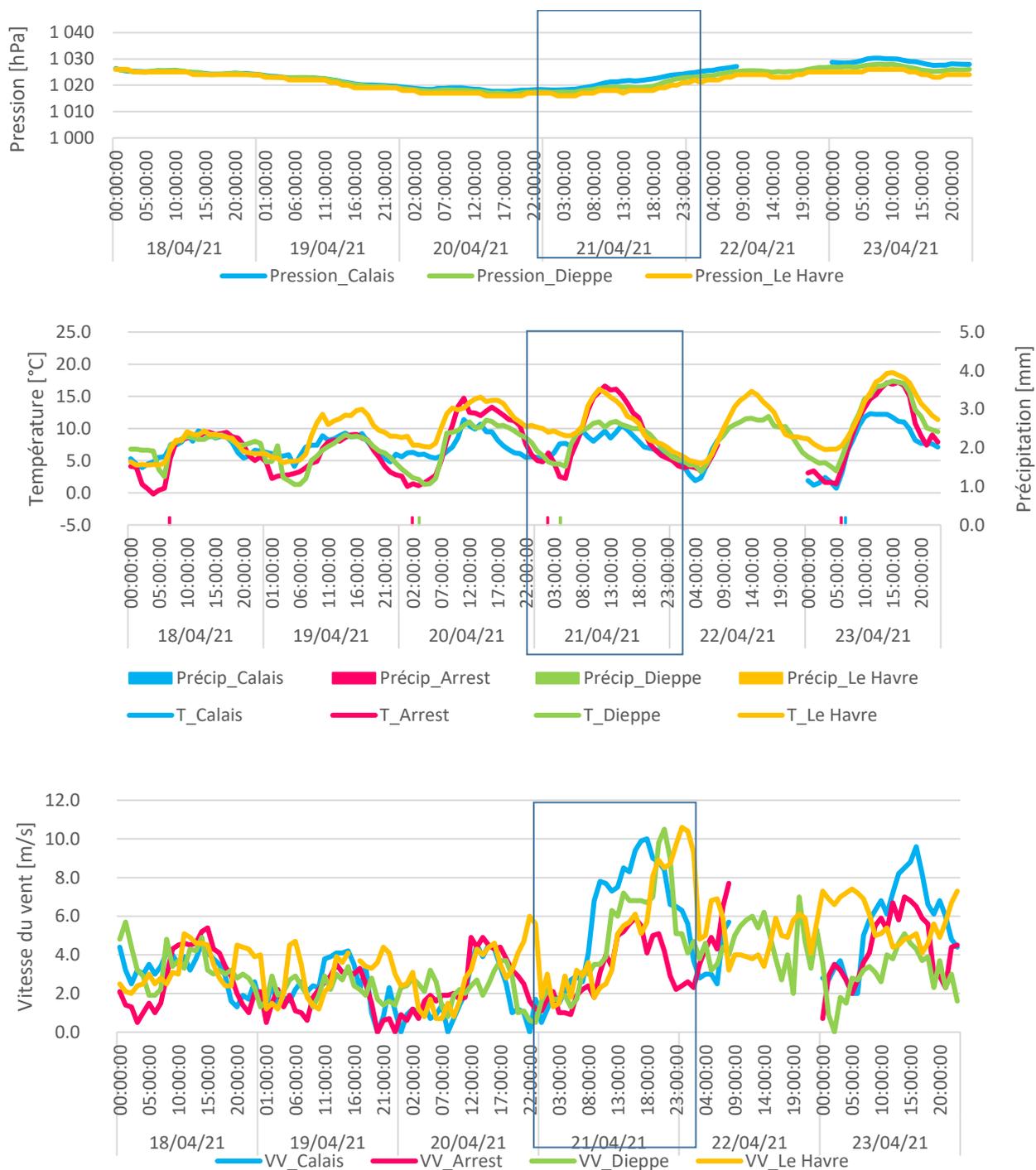
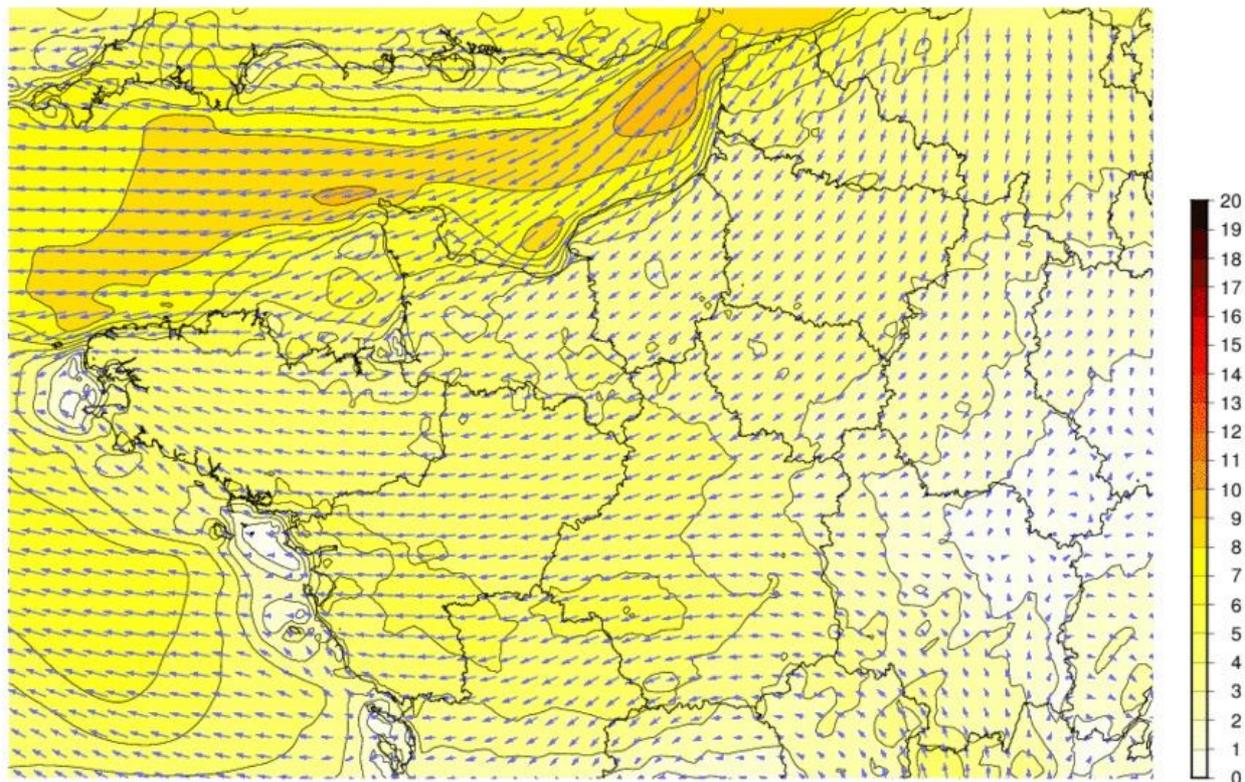


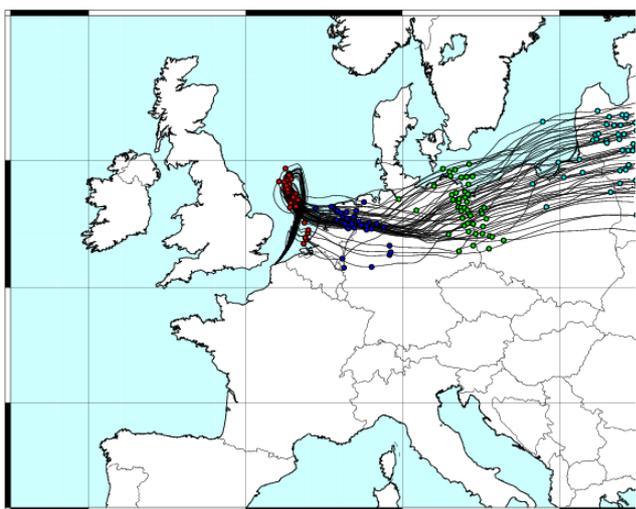
Figure 72 : Variation temporelle des paramètres météorologiques : pression, température, précipitation et vitesse du vent.

Toute la journée du 21 avril, les vents soufflaient en provenance du nord-est. Les rétrotrajectoires indiquent également des masses d'air en provenance de nord-est pendant une bonne partie de la journée. Puis dans la soirée, les masses d'air tournent au nord/nord-ouest. A Calais, ce changement arrive au milieu de la journée. Il peut être responsable des concentrations plus faibles sur ce site.

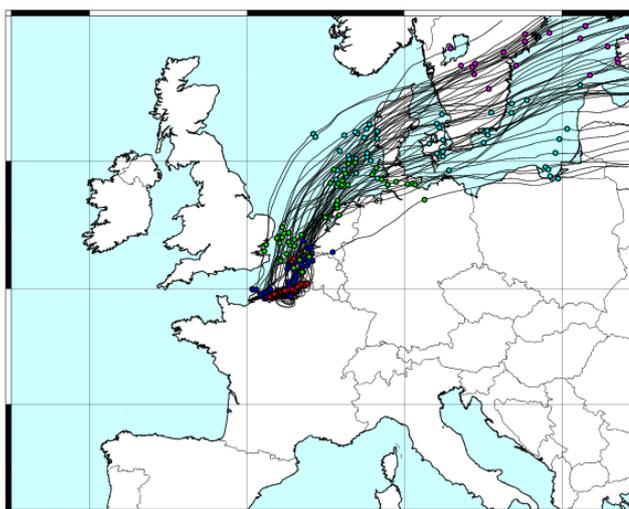
Vent à 10m [m/s] NCEP/AVN+MM5 pour le 2021-04-21 12:00TU



22-04-2021 : Retrotrajectoires pour le 21-04-2021



22-04-2021 : Retrotrajectoires pour le 21-04-2021



GFS : 12h TU

Figure 73 : Champs de vent et les rétrotrajectoires (modèle ARPEGE) à Calais et au Havre le 21/04/2021

☐ Analyse de la composition des particules

Le 21 avril, les PM10 à Arrest, Ailly et Havre sont composées principalement de nitrate d'ammonium. A Arrest la part de la matière organique n'est pas négligeable (6.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). En revanche, les niveaux des composés mesurés à Calais sont plus faibles (< 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

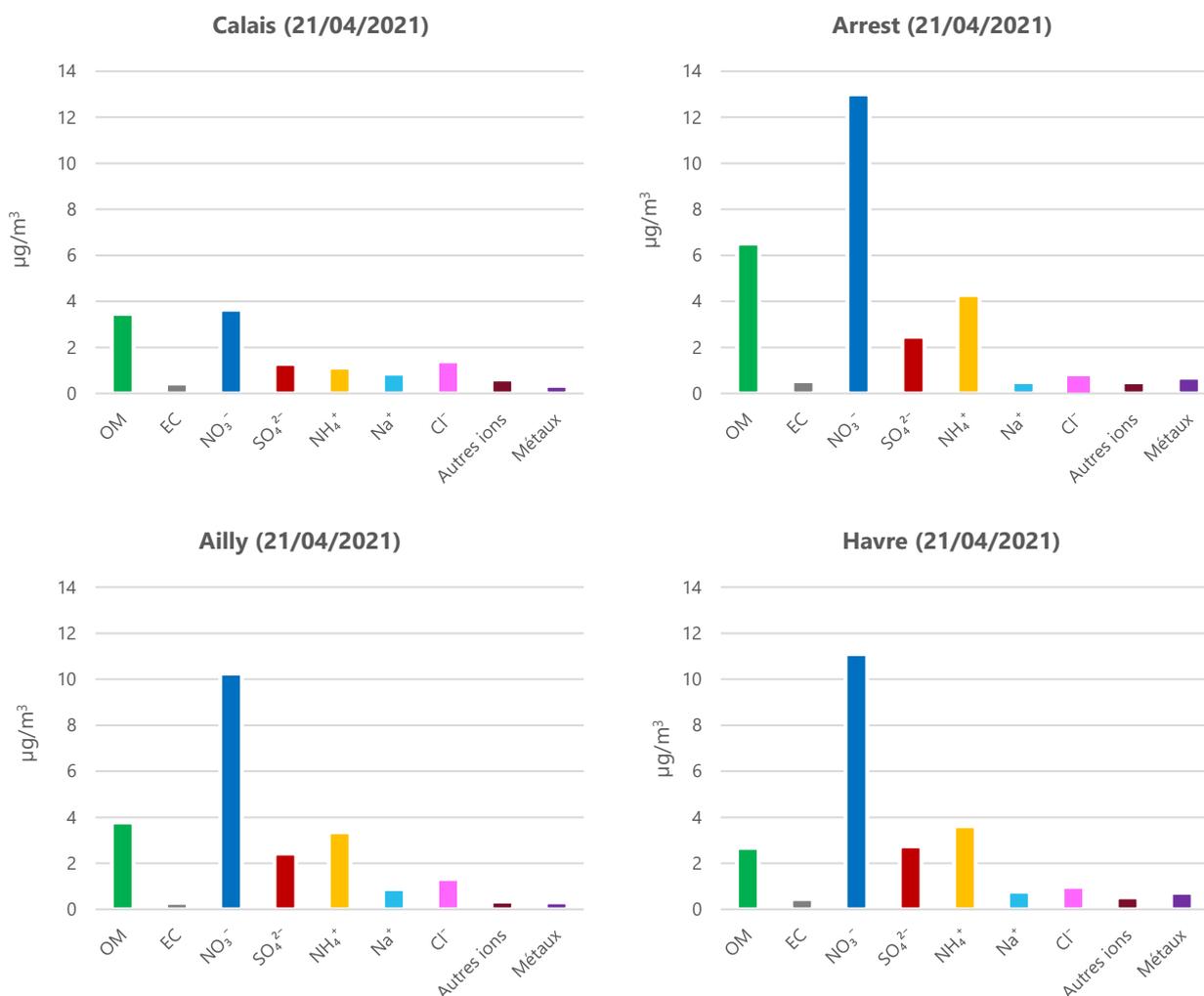
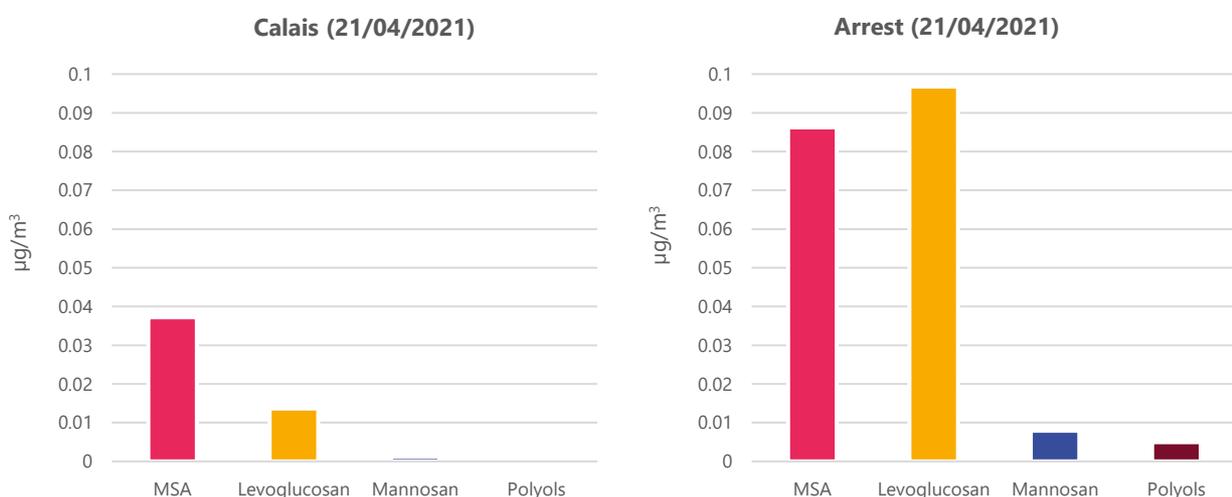


Figure 74 : Composition chimique des PM10 sur les quatre sites le 21/04/2021

Pour cet épisode, le MSA et le lévoglucosan présentent un niveau plus important à Arrest (0.09-1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Néanmoins, les concentrations absolues (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) restent très faibles pour tous les traceurs organiques.



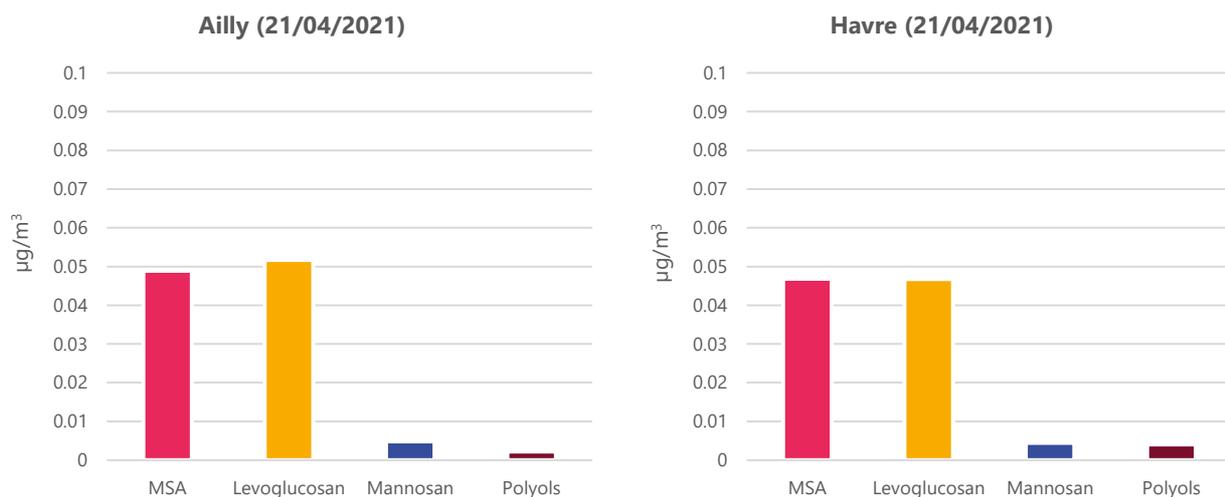


Figure 75 : Concentration des traceurs organiques sur les quatre sites le 21/04/2021

L'épisode du 21 avril est un épisode typique printanier, dominé par le nitrate d'ammonium, importé par la masse d'air du nord-est avec une quantité non négligeable de composés organiques. Ils peuvent être émis par la combustion de biomasse et les sources biogéniques secondaires.

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 ($> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 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 de LCSQA, ont mis en place une étude sur les épisodes des PM10 en zone littorale afin d'améliorer la compréhension de leurs causes.

Malgré certaines différences dans les intensités des concentrations, les 4 sites se trouvent dans un « bassin » influencé de façon similaire par la météorologie et les processus de transport, mais aussi par des émissions directes (chauffage, embruns, poussières...) ou indirectes/secondaires (émissions biogéniques) qui font que les concentrations suivent des tendances très similaires. Les résultats de cette étude sont relatifs à la période étudiée.

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 PM10 sont issues des sources locales et lointaines. La composition des particules à Calais est dominée par la matière organique et le nitrate. En moyenne sur la saison de la fin d'hiver et du printemps, ces deux composés ensemble représentent la moitié de la composition des particules. Les sels marins contribuent à plus de 20 % dans la composition des particules. La spéciation chimique montre que le niveau d'EC, de nitrate, de sulfate, de sels marins et de métaux est plus important que sur les autres sites. La concentration du BC et du BC_{ff} (lié à la combustion de fioul fossile) est également plus élevée à Calais.

Arrest

Arrest est un site rural régional. Il est localisé à environ 10 km de la mer. C'est donc le plus éloigné des 4 sites de l'étude par rapport à la mer. La composition des particules mesurée sur ce site présente un niveau important de matière organique et d'ammonium. Ce site semble très influencé par le chauffage au bois qui est mis en évidence par son niveau important en BC_{wb} et en lévoglucosan. Il est aussi plus impacté par les sources biogéniques en été.

Phare d'Ailly

Le phare d'Ailly est une station rurale de pollution de fond en Normandie. Les concentrations des PM10 mesurées sur ce site sont généralement plus faibles que sur les 3 autres sites. Il semble plutôt impacté par les polluants transportés à longue distance.

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). En effet, pour ce site, les vents du secteur sud-est, en provenance de la zone industrielle, était relativement rare pendant la période d'étude. Dans la composition des particules la matière organique représente 30% et le nitrate 24% en moyenne. Les sels marins contribuent à presque 20% dans la composition des particules.

Les épisodes de pollution particulaire n'étaient pas au rendez-vous en grande quantité au printemps 2021. En effet, les conditions météorologiques n'ont pas favorisé la formation et l'accumulation des particules : périodes très pluvieuses contribuant au phénomène du lessivage de l'atmosphère, températures relativement élevées peu propices à la formation du nitrate d'ammonium. Néanmoins, quelques jours d'augmentation des concentrations des particules ont été observées, avec pour certains jours le dépassement du seuil réglementaire de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Leur analyse montre qu'en fin d'hiver et début de printemps la composition des particules est dominée par la présence de la matière organique et du nitrate d'ammonium. La contribution importante de la matière organique couplée à une concentration élevée en lévoglucosan indique un impact des émissions liées à la combustion de biomasse. Les conditions anticycloniques, stables, une hauteur de couche limite faible et la présence d'inversions thermiques ont favorisé l'accumulation des particules dans l'air. La contribution importante de nitrate d'ammonium, témoigne de la formation et du transport des particules secondaires inorganiques.

Puis, fin avril, quand les conditions météorologiques sont plus douces, les émissions liées au chauffage baissent et la contribution du nitrate d'ammonium est plus marquée dans l'épisode qui a été identifié, notamment quand le flux de nord-est s'établit.

En perspective, la deuxième partie de ce rapport a pour but de déterminer plus en détail les sources à l'origine des pointes de pollution particulaire et leurs contributions respectives grâce à l'utilisation d'un modèle source-récepteur.

8. Bibliographie

Barbara J. Turpin et Ho-Jin Lim, « Species Contributions to PM2.5 Mass Concentrations: Revisiting Common Assumptions for Estimating Organic Mass », *Aerosol Science and Technology* 35, no 1 (1 janvier 2001): 602-10, <https://doi.org/10.1080/02786820119445>

Décret n°2010-1250 du 21 octobre 2010 relatif à la qualité de l'air et Arrêté du 26 mars 2014 relatif au déclenchement des procédures préfectorales en cas d'épisodes de pollution de l'air ambiant

INSEE, Recensement de la population RP2018 en géographie du 01/01/2021 (<https://www.insee.fr>, consulté le 16/11/2021)

J.-E. Petit et al., « A user-friendly tool for comprehensive evaluation of the geographical origins of atmospheric pollution: Wind and trajectory analyses », *Environmental Modelling & Software* 88 (1 février 2017): 183-87, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.11.022>.

Jisca Sandradewi et al., « Using Aerosol Light Absorption Measurements for the Quantitative Determination of Wood Burning and Traffic Emission Contributions to Particulate Matter », *Environmental Science & Technology* 42, no 9 (1 mai 2008): 3316-23, <https://doi.org/10.1021/es702253m>.

LCSQA, 24 janvier 2017, Episode de pollution particulaire de mi-janvier 2017

LCSQA, 2015 : Impact de la combustion de biomasse sur les concentrations de PM10 dans 10 agglomérations du programme CARA au cours de l'hiver 2014-2015

LCSQA, 2020 : Guide méthodologique pour la mesure du « Black Carbon » par Aethalomètre multi longueur d'onde AE33 dans l'air ambiant (Version 2020)

MTES, juin 2018, Guide méthodologique pour l'élaboration des inventaires territoriaux des émissions atmosphériques (polluants de l'air et gaz à effet de serre),

M. Viana et al., « Organic and elemental carbon concentrations in carbonaceous aerosols during summer and winter sampling campaigns in Barcelona, Spain », *Atmospheric Environment* 40, no 12 (1 avril 2006): 2180-93, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.12.001>.

Putaud JP, Raes F, Van Dingenen R, Brüggemann E, Facchini MC, Decesari S. et al. A European aerosol phenomenology– 2: Chemical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe. *Atmos. Environ.*, 2004; 38 (16): 2579-95

Annexes

Annexe 1 : Black Carbon et émissions primaires de combustion

L'AE33 est un instrument qui mesure la concentration de Black Carbon (BC) en effectuant une mesure de la lumière absorbée des particules prélevées en continu sur une bande filtrante. L'AE33, grâce à la mesure simultanée de l'absorption optique à sept longueurs d'onde, permet de distinguer deux fractions du Black Carbon que l'on peut relier à la combustion d'hydrocarbures (BCff) et à la combustion de biomasse (BCwb). Ces fractions peuvent ensuite être utilisées pour estimer (à l'aide d'un facteur multiplicatif et avec une précision de l'ordre de $\pm 50\%$) les concentrations de PM10 attribuables aux deux familles de sources (notées respectivement PMff et PMwb), telles que :

$$\begin{aligned} \text{PMff} &= a \times \text{BCff} \\ \text{et PMwb} &= b \times \text{BCwb} \end{aligned}$$

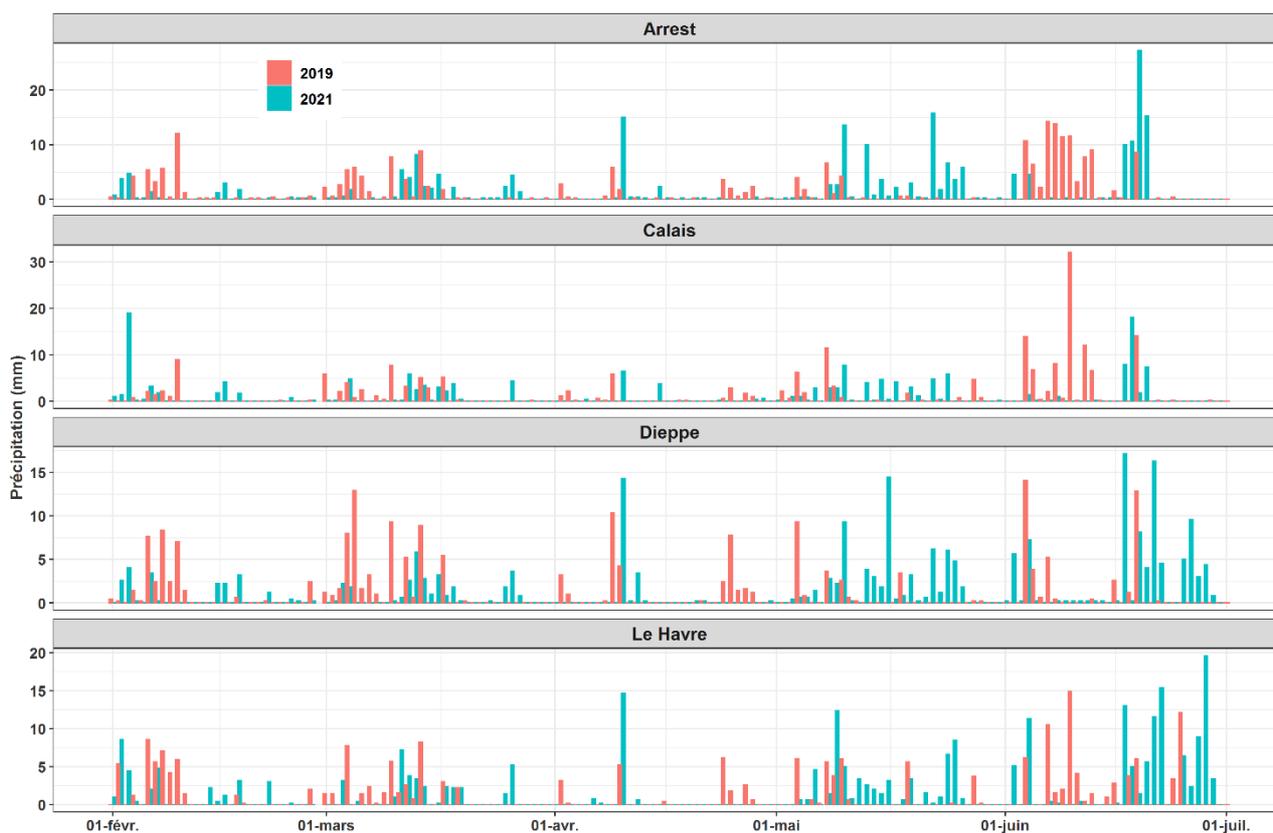
où PMff et PMwb représentent la concentration massique de particules PM10 primaires issues respectivement de la combustion d'hydrocarbures et de la combustion de biomasse. Les coefficients a et b sont issus (i) de la littérature scientifique pour la contribution fossile, et (ii) d'études LCSQA précédentes pour la contribution biomasse.

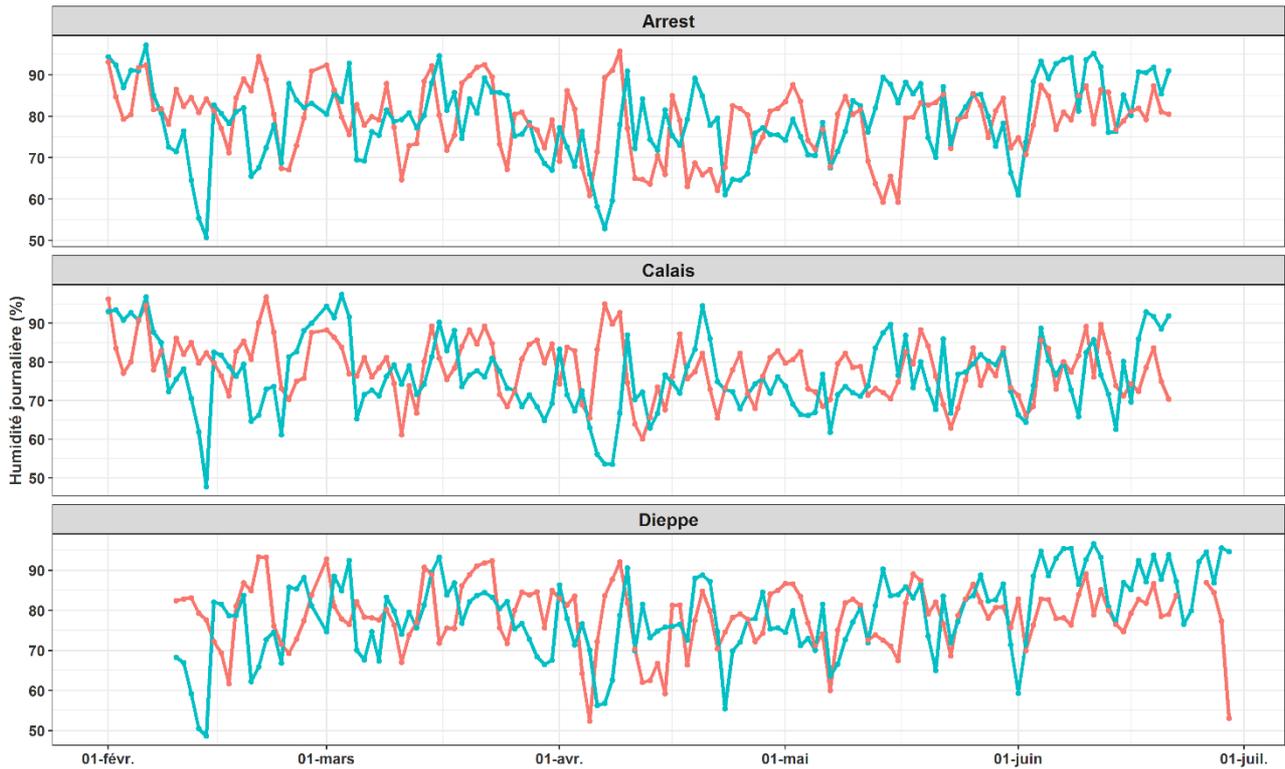
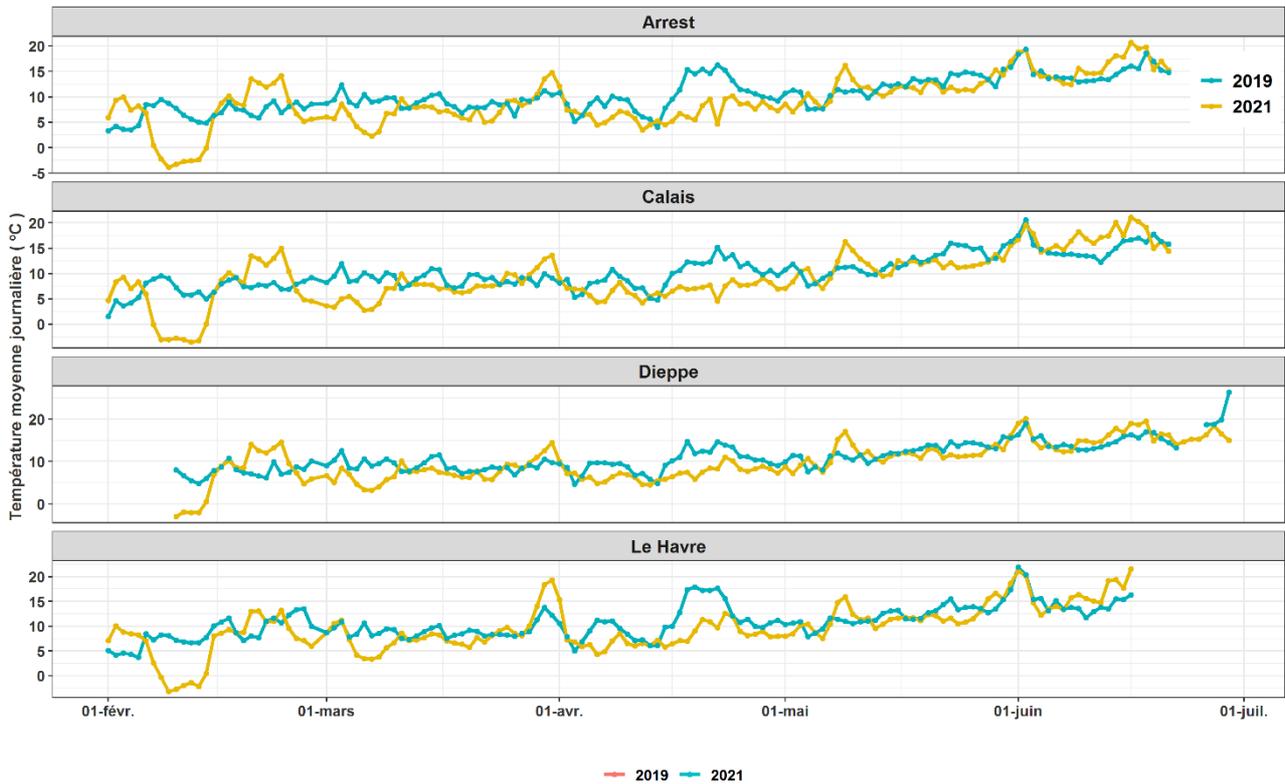
Dans la présente étude, un coefficient 10 a été utilisé pour estimer les particules primaires liées à la combustion de la biomasse et un coefficient 2 pour estimer les particules primaires liées à la combustion d'hydrocarbures. Les émissions primaires à l'échappement automobile sont comprises au sein de la fraction liée à la combustion d'hydrocarbures (PMff), mais ces estimations n'intègrent pas les émissions hors échappement, i.e. les particules issues de l'abrasion de la chaussée, des pneus, des freins... Ces estimations ne tiennent pas non plus compte de l'influence de l'échappement automobile sur la formation d'aérosols secondaires à partir des émissions de précurseurs gazeux (i.e., NOx, issus à 60% du transport au niveau national), dont l'influence sur les PM10 est impossible à évaluer à partir de mesures en temps réel.

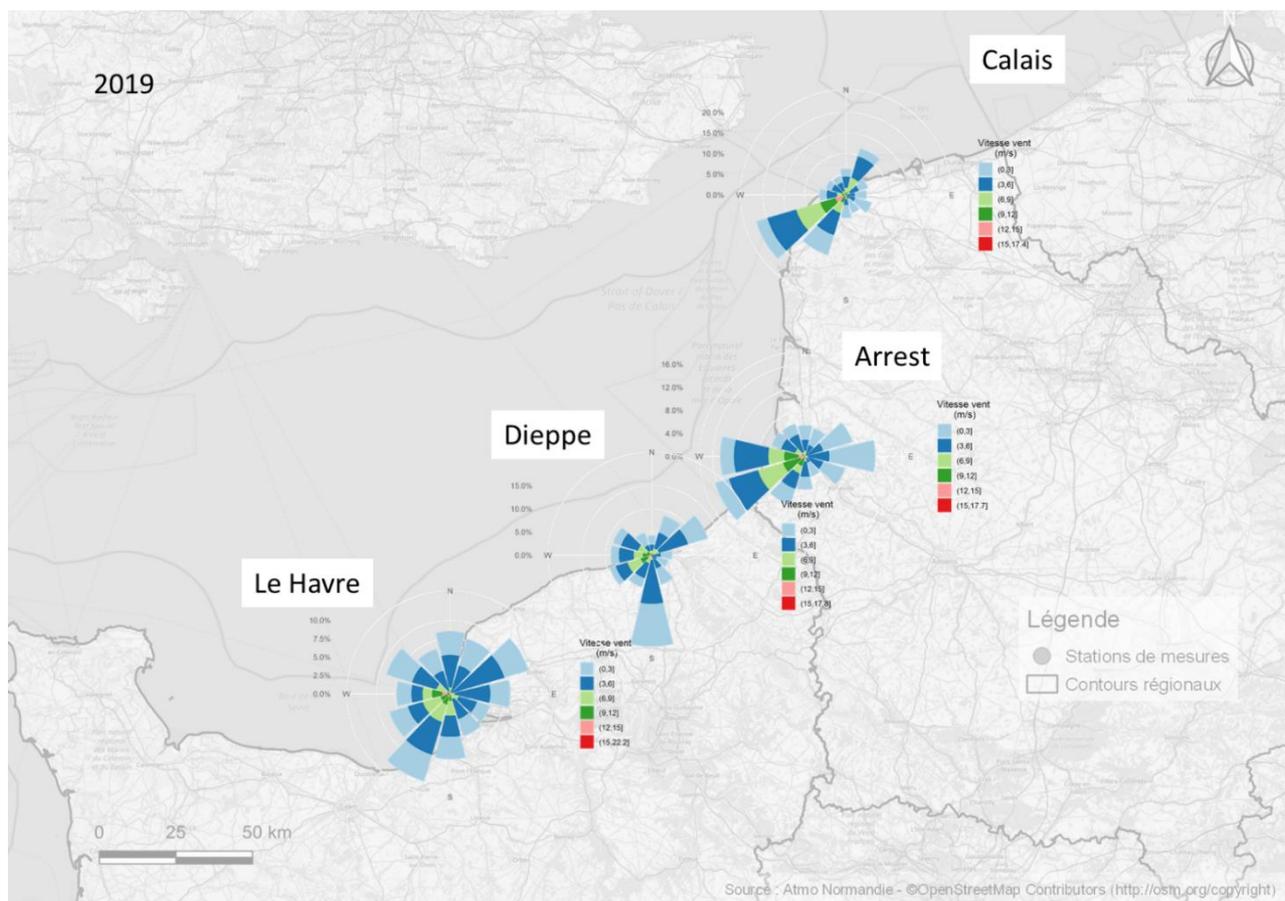
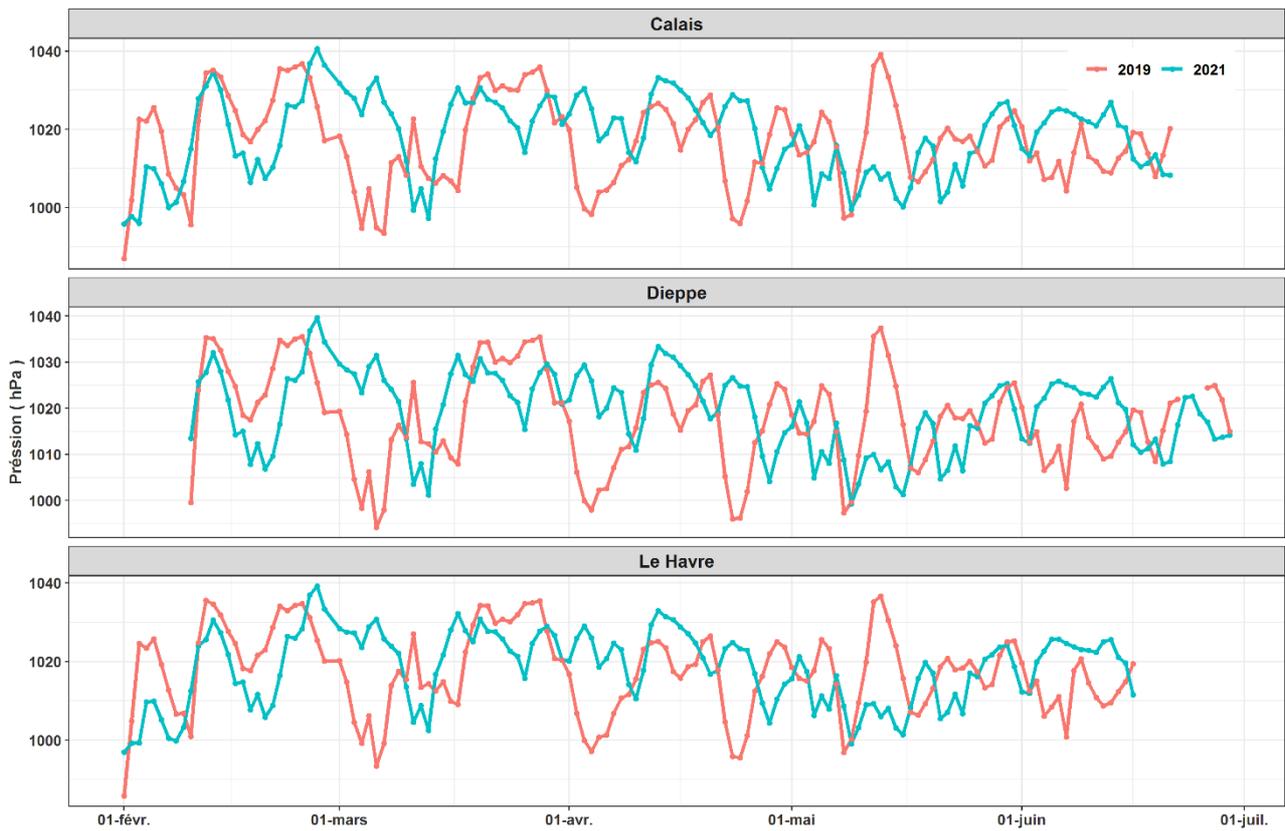
Il est à noter que si le terme « black carbon » (BC) est utilisé dans ce document pour citer les particules de carbone suie issues des combustions, il serait plus juste de parler d'« Equivalent Black Carbon (eBC) » afin de tenir compte du fait que la mesure optique réalisée à l'aide de l'AE33 à 880 nm ne peut être convertie en concentration massique qu'à l'aide d'un coefficient d'absorption massique (MAE) dont le choix reste actuellement sujet de discussion au sein de la communauté scientifique et des instances normatives .

Annexe 2 : Conditions météorologiques en 2019 en comparaison avec 2021

Afin de mieux comprendre le faible nombre d'épisodes au printemps 2021 par rapport à l'année 2019, les conditions météorologiques (du février au juin) ont été comparées. En 2019 les températures ont été plus douces et la vitesse des vents légèrement plus faible. Il n'y a pas des grandes différences enregistrées pour la pression ou l'humidité. En ce qui concerne la précipitation en 2019 et 2021 elle est comparable de février à avril. Le mois de mai 2021 se caractérise par les précipitations plus importantes par rapport au mois de mai 2019. Puis le mois de juin est globalement pluvieux aussi bien en 2019 que 2020. La comparaison des roses des vents ne montre pas des différences importantes.







Annexe 3 : Validité des résultats

Le taux de fonctionnement est globalement très satisfaisant (> 85%) pour cette étude. Certains analyseurs ont un taux de fonctionnement inférieur à 85% à cause des problèmes techniques. Les mesures NH₃ à Calais et Arrest sont considérées comme informations indicatives car la méthode utilisée est fortement influencée par l'humidité en air ambiant.

Calais Berthelot du 01/02 au 20/06/2021

Analyseurs	Taux de fonctionnement	Commentaire
DA80	100%	
TEOM PM10	98%	
Jauge PM2.5	97.5%	
AE33	89%	
NOx	98.8%	
NH ₃	98.4%	Mesure indicative

Arrest du 01/02 au 20/06/2021

Analyseurs	Taux de fonctionnement	Commentaire
DA80	100%	
TEOM PM10	92.1%	
Jauge PM2.5	61.9%	Peu de données valides à cause de problèmes techniques
AE33	72.8%	
NOx	92%	
NH ₃	80.4%	Mesure indicative
PUF	98.3%	

Le Havre ville haute du 1/2/21 au 16/06/21

Analyseurs	Taux de fonctionnement	Commentaire
DA80	100%	
FIDAS	99.8%	
AE33	99%	
NOx	87.5%	Données invalides du 31/5 au 16/6/21

Phare d'Ailly du 11/2/21 au 29/6/21

Analyseurs	Taux de fonctionnement	Commentaire
DA80	99.3%	Manque le 9/6/21
FIDAS	99.8%	
AE33	74.7%	À partir du 10 mars beaucoup de valeurs invalidées (problèmes d'humidité)

Annexe 4 : Cartes rétrotrajectoires (PSCF)

Les rétrotrajectoires des PM10 estimées par la méthode PSCF (Potential Source Contribution Function) pour la période d'étude de chaque site sont présentées.

A Calais, les masses d'air les plus chargées proviennent principalement du nord de l'Ecosse, de la mer du Nord, et des Pays-Bas. A Arrest, les PM10 sont influencées par les masses d'air d'Allemagne, de Belgique et de la mer du Nord.

A Ailly, les concentrations plus élevées proviennent de la mer Celtique. Au Havre, les masses d'air de la mer du Nord sont responsables pour les concentrations importantes.

En résumé, les influences lointaines sur les particules PM10 sont assez variées pour les quatre sites.

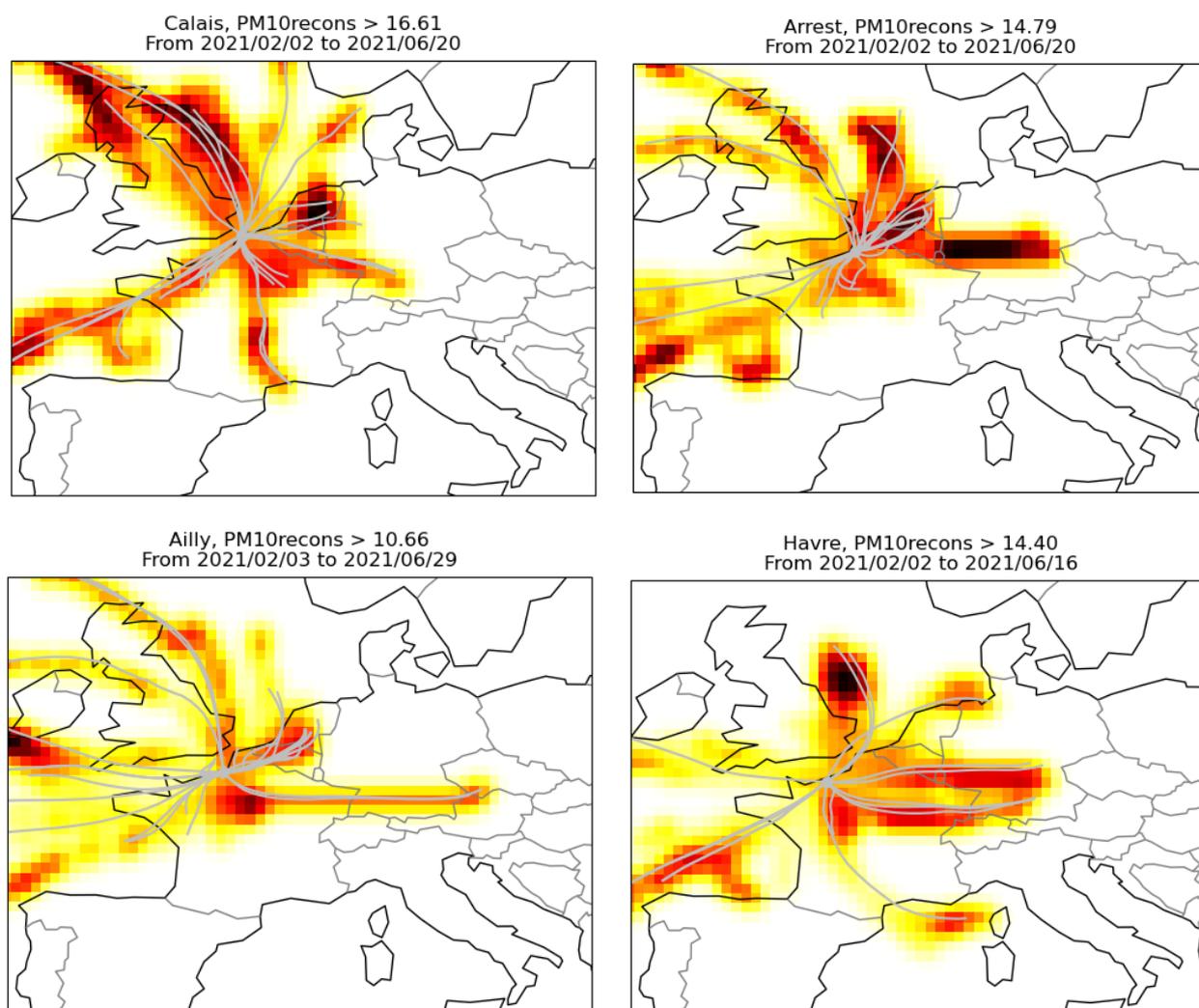


Figure 76 : Cartes rétrotrajectoires (PSCF : Potential Source Contribution Function) pour les 4 sites

Annexe 5 : Ratio PM2.5/PM10 et ratio PM1/PM10

Zoom sur l'épisode de pollution

Pour ces 3 épisodes de pollution observés (02-03/03, 31/03-01/04 et 21/04), les ratios PM2.5/PM10 sont très importants (~ 0.8) pour les épisodes de début mars et du 21 avril. Ces valeurs pendant l'épisode de pollution sont supérieures que les valeurs moyennes du mois pour chaque site. On suppose que ces deux épisodes sont dominés par les sources anthropiques.

Par contre, les ratios sont un peu plus faibles (0.54-0.69) pour l'épisode du 31 mars au 01 avril.

Les ratios PM1/PM10 au Havre et à Ailly ont montré la même tendance que les ratios PM2.5/PM10, les valeurs sont élevées pour le 2 mars et le 21 avril.

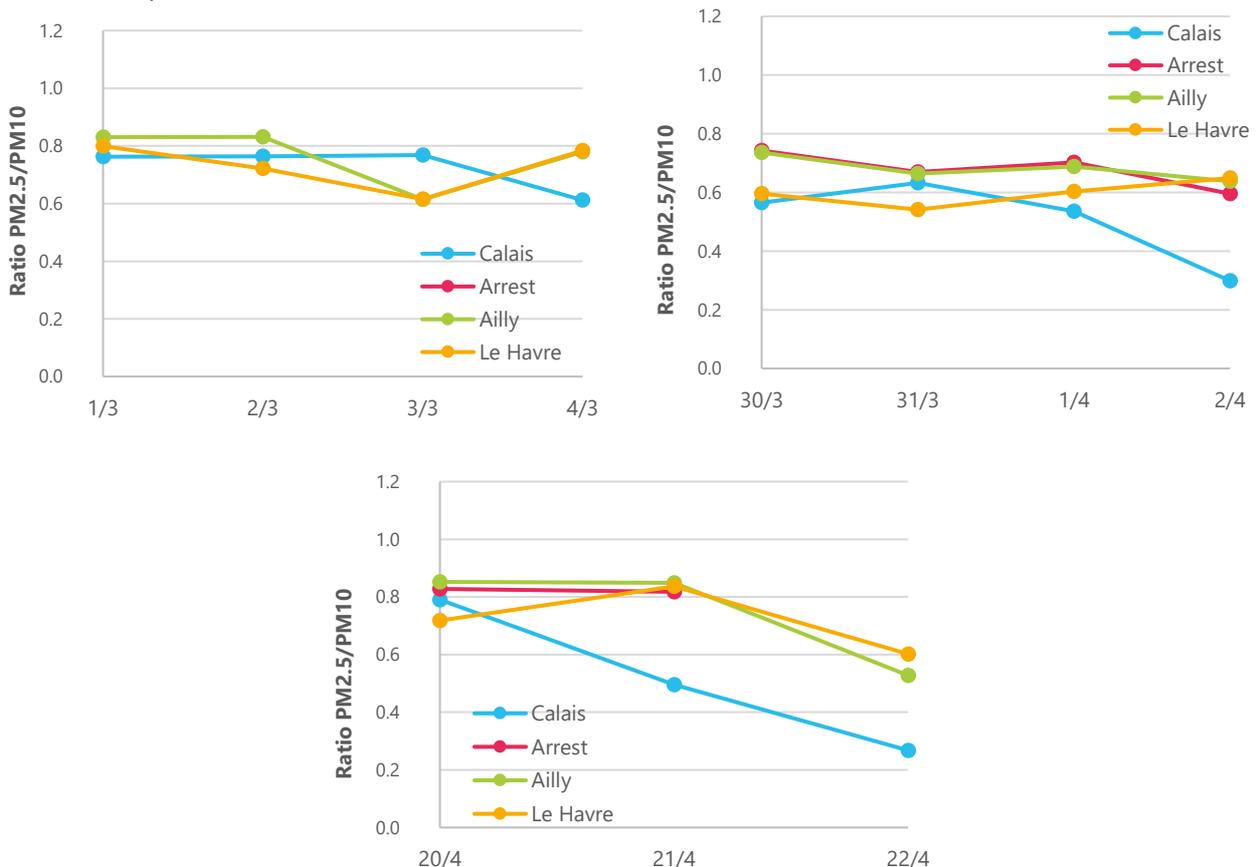
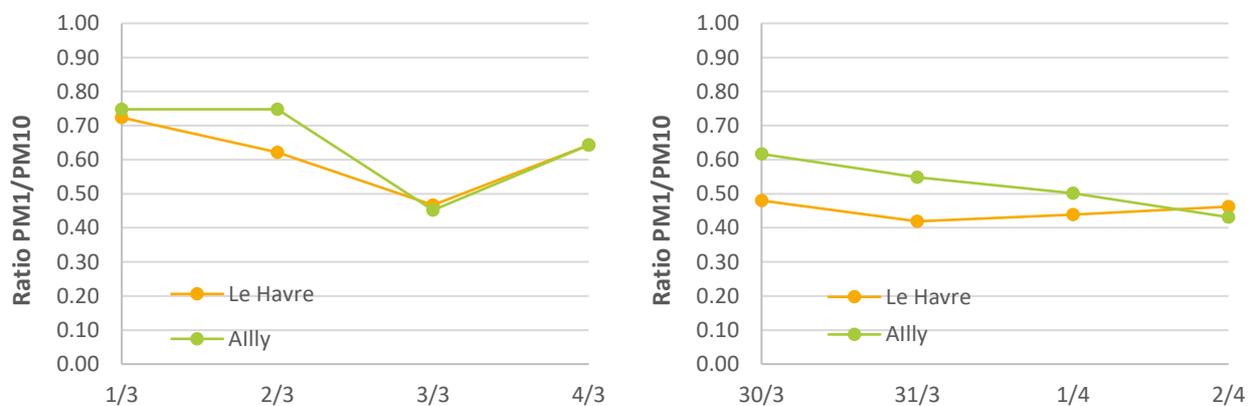


Figure 77 : Ratio PM2.5/PM10 pendant les périodes de pollution



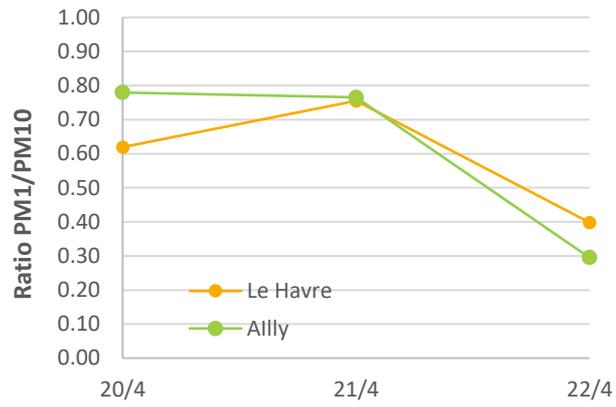
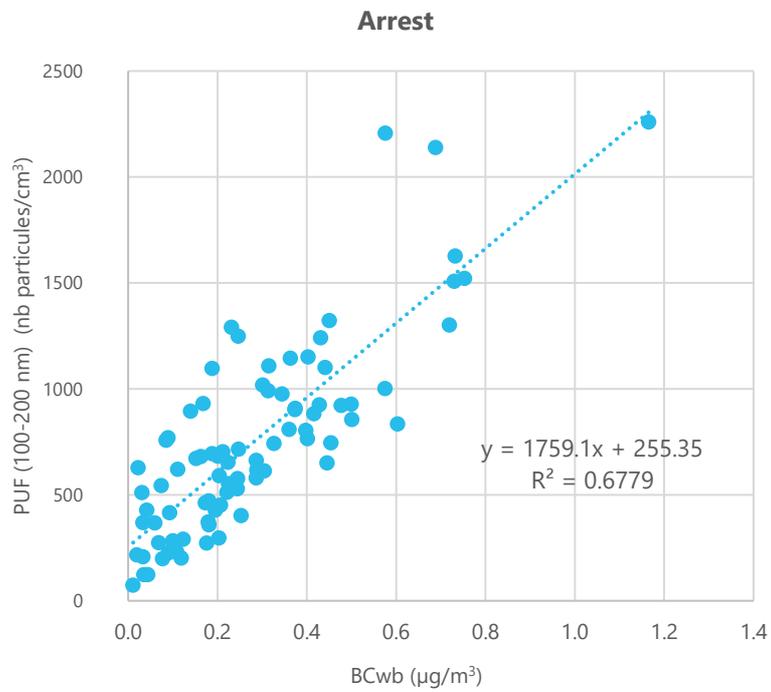


Figure 78 : Ratio PM1/PM10 pendant les périodes de pollution

Annexe 6 : PUF (100-200 nm) et BCwb



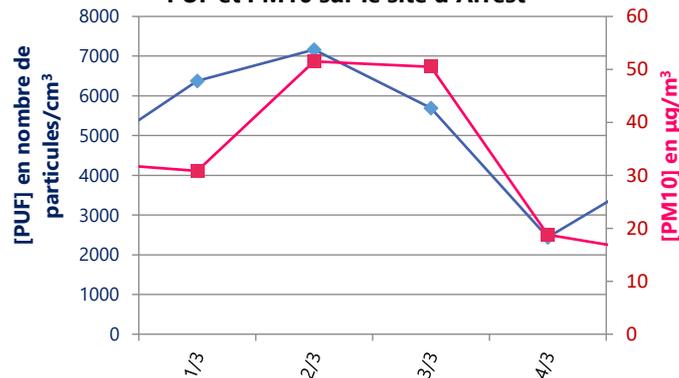
Annexe 7 : Particules ultrafines

Zoom sur l'épisode de pollution

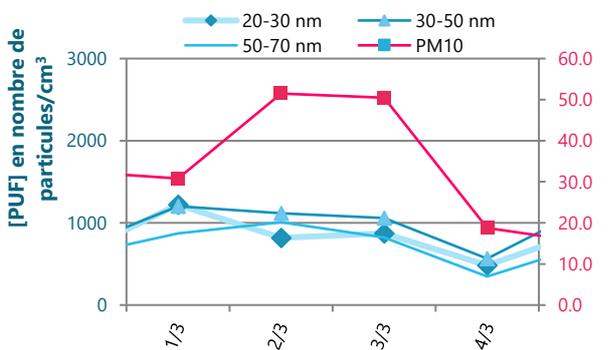
Episode du 2 au 3 mars

Les PUF totales montrent une concentration importante (> 7000 particules/cm³) le 2 mars comme les PM10, mais moins élevées le 3 mars (5690 particules/cm³). Pour les PUF les plus petites (20-70 nm), elles ne varient pas la même façon que les particules PM10 pendant cet épisode de pollution. En revanche, les particules entre 100 et 200 nm montrent un pic significatif le 2 mars. Ceci indique une forte influence par la combustion de biomasse pour ce jour.

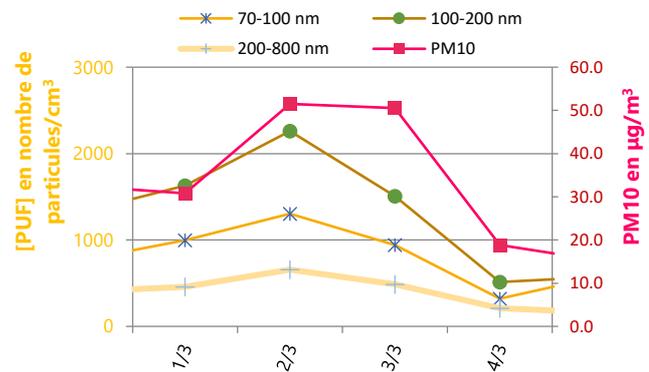
Comparaison des évolutions journalières de PUF et PM10 sur le site d'Arrest



Comparaison des évolutions journalières de PUF et PM10 sur le site d'Arrest



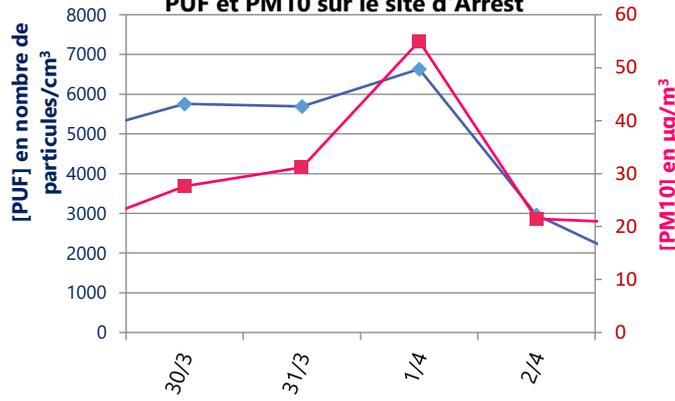
Comparaison des évolutions journalières de PUF et PM10 sur le site d'Arrest



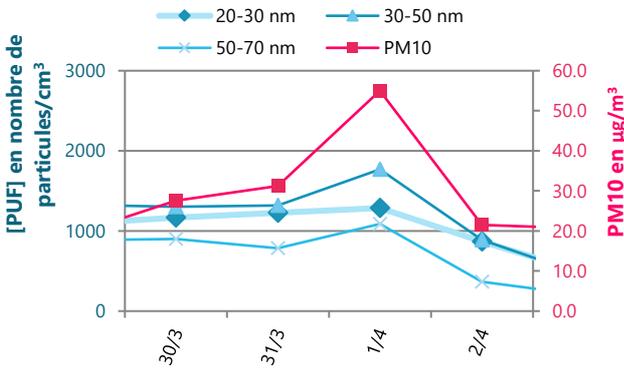
Episode du 31 mars au 1 avril

Le 1^{er} avril, les PUF totales augmentent de manière moins importante que les PM10. Contrairement à l'épisode précédent, les fractions fines 20-70 nm montrent une augmentation plus importante que les grosses fractions (70 nm – 800 nm).

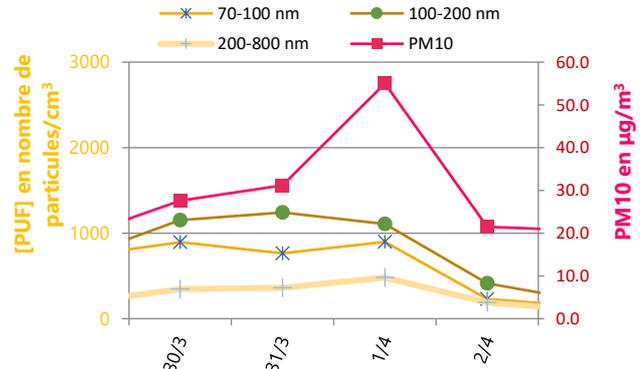
Comparaison des évolutions journalières de PUF et PM10 sur le site d'Arrest



Comparaison des évolutions journalières de PUF et PM10 sur le site d'Arrest

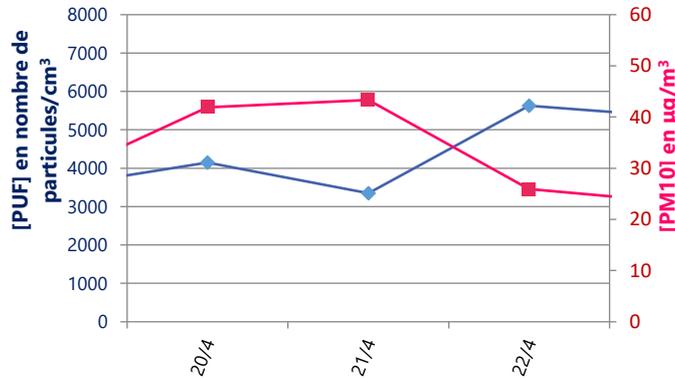


Comparaison des évolutions journalières de PUF et PM10 sur le site d'Arrest

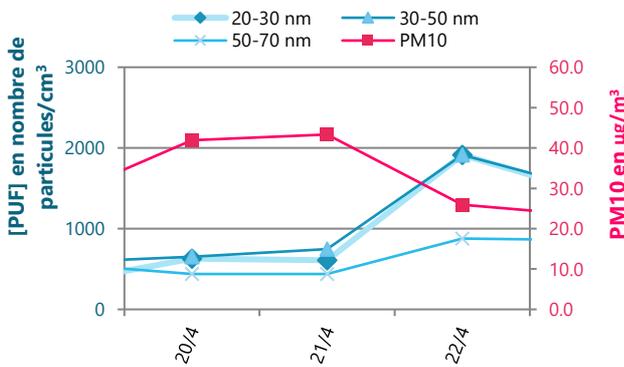


Pour l'épisode 21 avril, il n'y a pas de corrélation significative observée entre les PUF et les PM10.

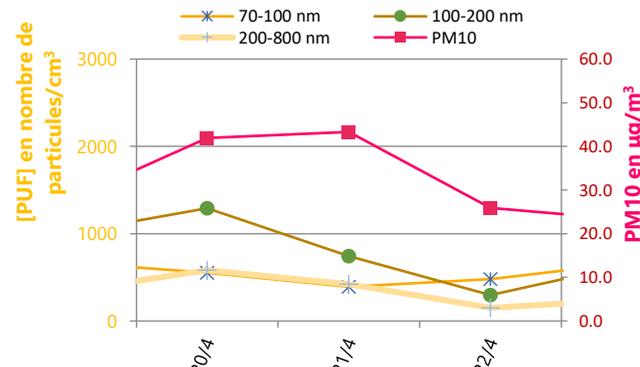
Comparaison des évolutions journalières de PUF et PM10 sur le site d'Arrest



Comparaison des évolutions journalières de PUF et PM10 sur le site d'Arrest

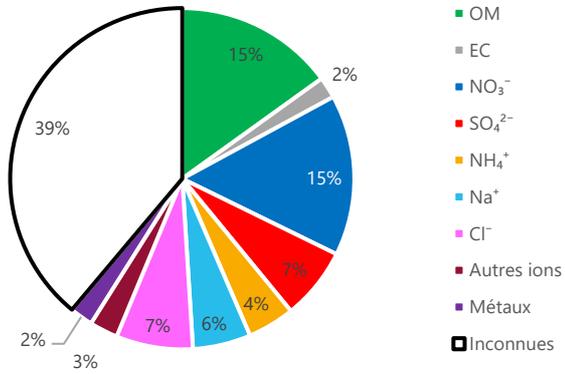


Comparaison des évolutions journalières de PUF et PM10 sur le site d'Arrest

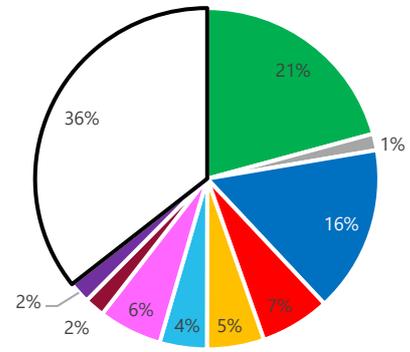


Annexe 8 : Composition chimique moyenne pour 4 sites étudiés (avec « masse inconnues »)

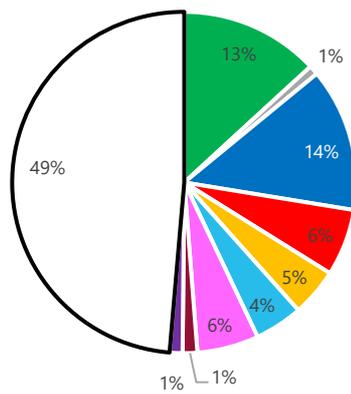
Calais (11/02 - 16/06)



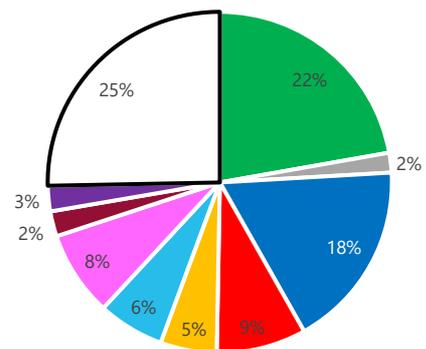
Arrest (11/02 - 16/06)



Ailly (11/02 - 16/06)



Le Havre (11/02 - 16/06)



Annexe 9 : PM10 reconstituées

Méthode 1 : $PM = 1.8 \times [OC] + [EC] + [sea\ salt] + [nss-SO_4^{2-}] + [NO_3^-] + [NH_4^+] + [dust] + [non\ dust]$

nss-SO₄²⁻ (Seinfeld and Pandis, 1998)

$$[nss-SO_4^{2-}] = [SO_4^{2-}] - 0.252 \times [Na^+]$$

Sea salt

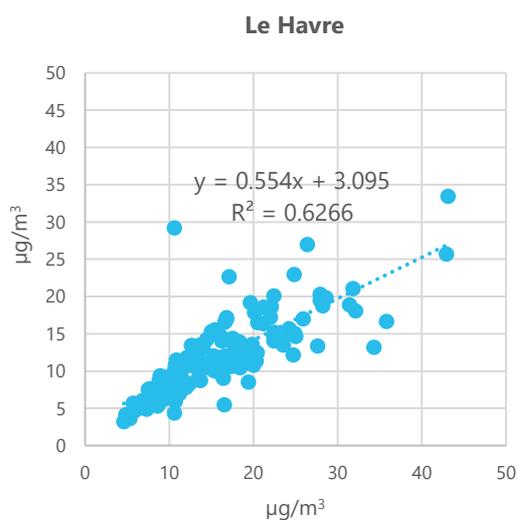
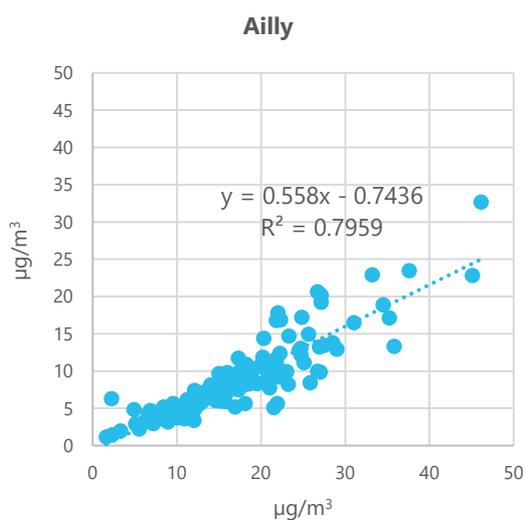
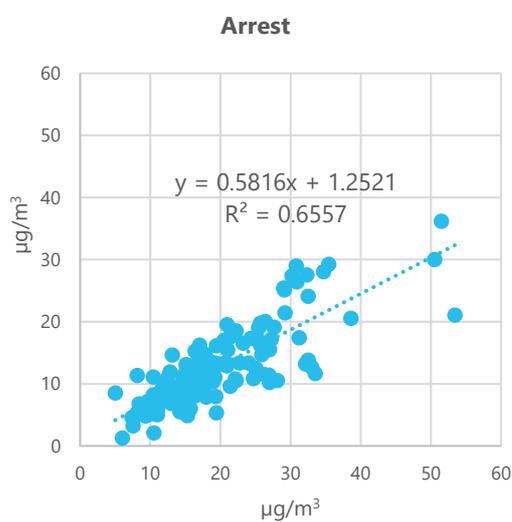
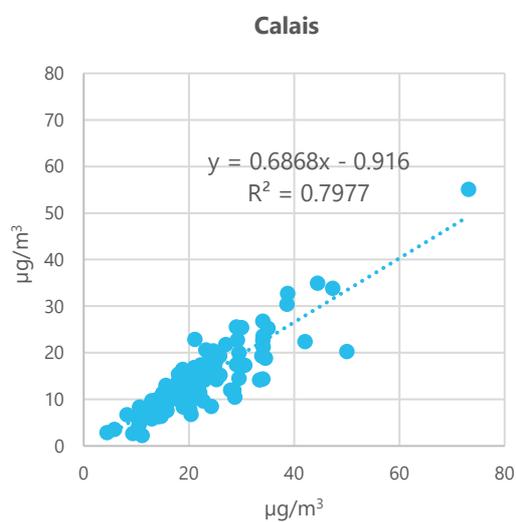
$$[sea\ salt] = [Cl^-] + 1.47[Na^+]$$

Dust

$$[dust] = 5.6 \times ([Ca^{2+}] - [Na^+]/26)$$

Non-dust (Salameh et al. 2015)

$$[non\ dust] = [Cu] + [Ni] + [Pb] + [V] + [Zn]$$



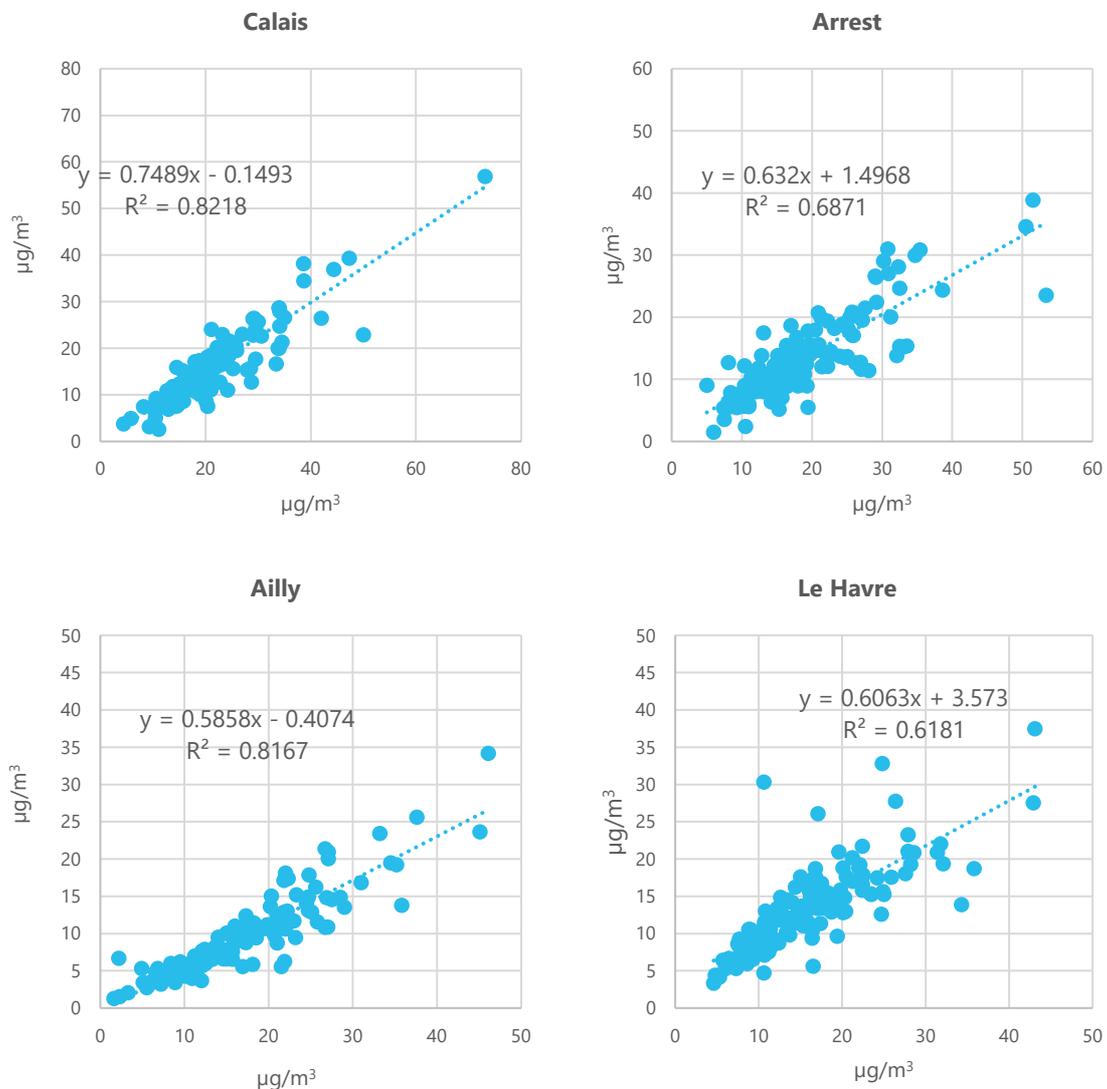
Méthode 2 :

Cette somme peut ensuite être comparée à la concentration totale mesurée par d'autres méthodes. La méthode du bouclage chimique est décrite par Waked et al. (2014) et a déjà été employée par Atmo Hauts-de-France. L'équation utilisée pour le bouclage chimique est la suivante :

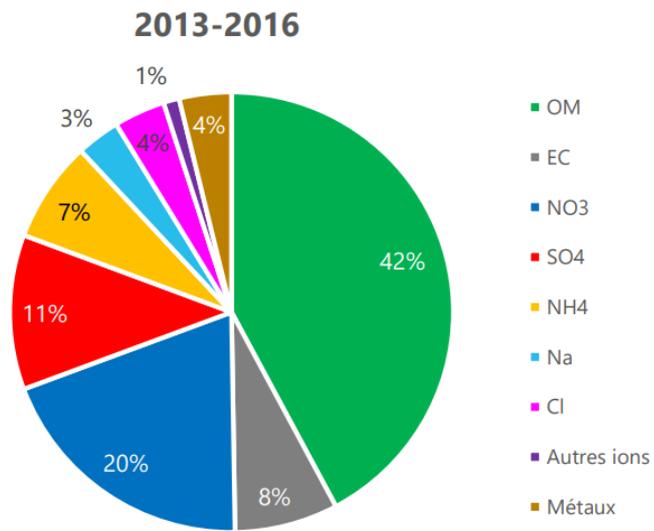
$$\text{PM}_{10} \text{ reconstituées} = \text{EC} + f \times \text{OC} + 3 \times \text{Na}^+ + 10 \times \text{Ca}^{2+} + \text{NO}_3^- + \text{nssSO}_4^{2-} + \text{NH}_4^+$$

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. **f** est un facteur qui permet, à partir de la concentration en carbone organique (OC), d'estimer la concentration en matière organique (OM). La valeur de **1,75** a été choisie pour les 4 sites (typologie urbaine/périurbaine) en accord avec la méthodologie décrite par Turpin et Lim (2001).

Les pentes et R² sont optimisés pour tous les sites avec la méthode 2.



Annexe 10 : Composition chimique moyenne des PM10 (Nogent-sur-Oise). 2013 - 2016



Annexe 11 : 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 Seuil 3 : 360 µg/m ³ (moyenne horaire)
Dioxyde d'azote (NO2)	40 µg/m ³ en moyenne annuelle			200 µg/m ³ (moyenne horaire)	400 µg/m ³ pendant 3h consécutives ou Persistance : 200 µg/m ³ plus de 2 jours consécutifs (J-1, J et J+1) (moyenne horaire)
	200 µg/m ³ en moyenne horaire à ne pas dépasser plus de 18 heures/an				
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.atmonormandie.fr

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

contact@atmonormandie.fr

