

RAPPORT D'ETUDE

Caractérisation des particules PM2.5 à la Métropole
Européenne de Lille (MEL)

N° 01/2024/EST/V0

Etude menée en 2023-2024



Auteurs : Evdokia STRATIGOU

Relecteur : Arabelle PATRON-ANQUEZ

Diffusion : juillet 2025



Direction régionale de l'environnement,
de l'aménagement et du logement

Avant-propos

Atmo Hauts-de-France est une association de type « loi 1901 » agréée par le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire (décret 2007-397 du 22 mai 2007) au même titre que l'ensemble des structures chargées de la surveillance de la qualité de l'air, formant le réseau national ATMO. Ses missions s'exercent dans le cadre de la loi sur l'air du 30 décembre 1996. Atmo Hauts-de-France est agréée du 1^{er} janvier 2023 au 31 décembre 2025, au titre de l'article L.221-3 du Code de l'environnement.

Conditions de diffusion

Atmo Hauts-de-France communique publiquement sur les informations issues de ses différents travaux et garantit la transparence de l'information sur le résultat de ses travaux. A ce titre, les rapports d'études sont librement disponibles sur le site www.atmo-hdf.fr.

Responsabilités

Les données contenues dans ce document restent la propriété intellectuelle d'Atmo Hauts-de-France. Ces données ne sont pas rediffusées en cas de modification ultérieure. Les résultats sont analysés selon les objectifs de l'étude, le contexte et le cadre réglementaire des différentes phases de mesures, les financements attribués à l'étude et les connaissances métrologiques disponibles.

Avertissement

Atmo Hauts-de-France n'est en aucune façon responsable des interprétations et travaux intellectuels, publications diverses ou de toute œuvre utilisant ses mesures et ses rapports d'études pour lesquels aucun accord préalable n'aurait été donné.

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 – Rapport N°01/2024/EST/V1**.

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

- depuis le formulaire de contact disponible à l'adresse <http://www.atmo-hdf.fr/contact.html>
- par mail : contact@atmo-hdf.fr
- par téléphone : 03 59 08 37 30

Réclamations

Les réclamations sur la non-conformité de l'étude doivent être formulées par écrit dans les huit jours de la livraison des résultats. Il appartient au partenaire de fournir toute justification quant à la réalité des vices ou anomalies constatées. Il devra laisser à Atmo Hauts-de-France toute facilité pour procéder à la constatation de ces vices pour y apporter éventuellement remède. En cas de litige, un accord amiable sera privilégié. Dans le cas où une solution n'est pas trouvée la résolution s'effectuera sous l'arbitrage des autorités compétentes.

	Nom	Qualité	Visa
Approbation	Arabelle Patron-Anquez	Responsable du service Etudes	

Version du document : V3 basé sur trame vierge : EN-ETU-20

Date d'application : 01/01/2021

Sommaire

Sommaire	3
Illustrations	5
1. Synthèse de l'étude.....	6
2. Enjeux et objectifs de l'étude	11
3. Introduction : les particules atmosphériques	13
3.1. Granulométrie des particules.....	13
3.2. Origines et composition chimique des particules	13
3.3. Impacts environnementaux et sanitaires	15
4. Matériels et méthodes.....	16
4.1. Stations de mesure et polluants mesurés.....	16
4.2. Techniques de mesure	17
4.3. Modèle source récepteur	17
4.4. Analyse du potentiel oxydant.....	17
5. Contexte environnemental	19
5.1. Émissions connues.....	19
5.1.1. Différence entre émissions et concentrations.....	19
5.1.2. Émissions à proximité des sites de mesure	20
5.2. Épisodes de pollution	22
6. Résultats de l'étude	23
6.1. Identification des sources	23
6.1.1. Répartition globale	26
6.1.2. Répartition saisonnière par source.....	27
6.2. Géolocalisation de sources.....	32
6.3. Potentiel Oxydant	39
6.3.1. Evolution temporelle et saisonnière du PO	39
6.3.2. Les sources des particules responsables du PO.....	42
6.4. Actions proposées	45
6.5. Episodes de pollution	46
7. Conclusion et perspectives.....	50



Annexes

Annexe 1 : Glossaire	53
Annexe 2 : Techniques de mesures et laboratoires d'analyse	55
Annexe 3 : Limite de detection	57
Annexe 4 : Modèle source récepteur	58
Annexe 5 : Analyse du vent et des rétrotrajectoires	61
Annexe 6 : Fiche émission PM25 de la Métropole Européenne de Lille (année 2021)	64
Annexe 7 : Validation de méthode PMF	65
Annexe 8 : Profil chimique et série temporelle des facteurs identifiés	66
Annexe 9 : Tableau des valeurs réglementaires des particules en air ambiant : Directive 2008 et Directive 2030	75

Illustrations

Figure 1 : Sources principales influencent les concentrations de PM2.5.....	7
Figure 2 : Contribution moyenne des principaux facteurs constitutifs des PM2.5 sur le territoire de la MEL en 2023-2024 (par analyse PMF)	8
Figure 3 : Répartition saisonnière des principaux facteurs constitutifs des PM2.5 sur le territoire de la MEL en 2023-2024...	9
Figure 4 : Illustration de la taille des particules PM10 et PM2.5. Source : U.S. EPA	13
Figure 5 : Principaux polluants atmosphériques (source : Atmo Hauts-de-France).....	14
Figure 6 : Station de mesures sélectionnée pour cette étude.....	16
Figure 7 : Relation entre les émissions et les concentrations de polluants atmosphériques.....	19
Figure 8 : Carte d'émissions des PM2.5 par commune à la MEL en 2021.....	20
Figure 9 : Émissions de particules PM2.5 et leur répartition par secteur d'activité à la MEL.....	20
Figure 10 : Principales ICPE (installations classées pour la protection de l'environnement) situées à proximité du site de mesure MN8 (Tourcoing-Houpline). Sont identifiées les ICPE soumises à autorisation (en violet), les ICPE soumises à enregistrement (en cyan) et les ICPE non-classées (en noir).....	21
Figure 11 : Bilan des épisodes de pollution constatés qui ont touché les Hauts-de-France en 2023, par département.....	22
Figure 12 : Sources principales influencent les concentrations de PM2.5.....	25
Figure 13 : Contribution moyenne des principaux facteurs constitutifs des PM2.5 sur le territoire de la MEL en 2023-2024 (par analyse PMF).....	26
Figure 14 : Variation saisonnière de la source « industrie et poussières minérales »	27
Figure 15 : Variation saisonnière de la source « combustion de biomasse »	27
Figure 16 : Variation saisonnière de la source « Nitrate-rich »	28
Figure 17 : Variation saisonnière de la source « Sel marins frais »	28
Figure 18 : Variation saisonnière de la source « Trafic routier primaire »	29
Figure 19 : Variation saisonnière de la source « Sulfate-rich et combustion de fuel lourd »	29
Figure 20 : Variation saisonnière de la source « Biogénique secondaire marin et impact trafic maritime ».....	30
Figure 21 : Variation saisonnière de la source « Organique secondaire vieilli ».....	30
Figure 22 : Sources géographiques des particules PM2.5 à la MEL	33
Figure 23 : Rose de pollution pour 2 sources locales : combustion de biomasse (gauche) et trafic routier primaire (droite) (échelles variables)	34
Figure 24 : Rose de pollution pour les 2 sources lointaines : sels marins frais (gauche) et Biogénique secondaire marin avec un impact du trafic maritime (droite) (échelles variables).....	34
Figure 25 : Carte d'origine géographique des sources Sels marins frais et Biogénique secondaire marin et impact maritime.	35
Figure 26 : Rose de pollution pour quatre sources mélangées : (a) nitrate-rich, (b) industrie et poussières minérales (c) organique secondaire vieilli et (d) combustion de fuel lourd.....	36
Figure 27 : Carte d'origine géographique des sources Nitrate-rich, Organique secondaire vieilli, Combustion de fuel lourd, et d'industrie et poussières minérales	37
Figure 28. Evolution temporelle du $PO_{V^{AA}}$, $PO_{V^{DTT}}$ et de la concentration massique des $PM_{2.5}$ en $\mu g/m^3$ sur le site de Lille Métropole.....	39
Figure 29. Comparaison des niveaux de $PO_{V^{AA}}$, $PO_{V^{DTT}}$ et $PM_{2.5}$ en fonction de la saison. NB : saison chaude = mai, juin, juillet, août, septembre, octobre ; saison froide = novembre, décembre, janvier, février, mars, avril.....	39
Figure 30 : Comparaison des niveaux de $PO_{m^{AA}}$ et $PO_{m^{DTT}}$ en fonction de la saison. NB : saison chaude = mai, juin, juillet, août, septembre, octobre ; saison froide = novembre, décembre, janvier, février, mars, avril	40
Figure 31 : Comparaison des mesures médianes de la concentration massique et des médianes (Q1-Q3) du $PO_{V^{AA}}$ et $PO_{V^{DTT}}$ de Lille par rapport aux valeurs obtenues dans différentes typologies de sites. Les valeurs médianes des concentrations massiques des $PM_{2.5}$ associées sont indiquées par les points et l'échelle de droite. NB : Vallée urbaine = 1 site ; Trafic = 1 site ; Urbain = 7 sites ; Vallée rurale = 1 site ; Péri-urbain = 1 site ; Rural = 5 sites	41
Figure 32 : Contribution moyenne et variabilité (95% d'intervalle de confiance) sur l'année des différentes sources d'émission des PM aux PO^{AA} et PO^{DTT} volumique à Lille	43
Figure 33 : données ACSM des AASQA, consultées le 23/05/2023.....	46
Figure 34 : Concentrations journalières en PM10 et PM2.5 modélisées par la plateforme PREV'AIR du 22/05/2023	47
Figure 35 : Séries temporelles des différents facteurs à Lille, zoom sur la période étudiée.....	47
Figure 36 : données ACSM à Calais, consultées le 10/09/2023.....	48
Figure 37 : Concentrations journalières en PM10 et PM2.5 modélisées par la plateforme PREV'AIR du 09/09/2023	48
Figure 38 : Séries temporelles des différents facteurs à Lille, zoom sur la période étudiée.....	49
Tableau 1. Détail des sites et typologies de la base de données du PO des $PM_{2.5}$ de l'IGE	40
Tableau 2. PO^{AA} et PO^{DTT} intrinsèques à Lille et aux 15 sites en France (moyenne $\pm$ écart type)	42

1. Synthèse de l'étude

Cette étude a été réalisée dans le cadre du programme CARA (caractérisation chimique des particules) d'Atmo Hauts-de-France et financée en partie par la Métropole Européenne de Lille (MEL) et par la Direction Régionale Environnement Aménagement Logement (DREAL) au titre du Plan Régional Santé Environnement. Son objectif est de caractériser les particules de taille inférieure à 2.5 μm (PM2.5) sur le territoire de la MEL et d'identifier leur impact sur la santé avec le potentiel oxydant, afin de définir les enjeux plus précis du territoire sur la question des particules en lien avec les politiques publiques.

Nous tenons à remercier l'équipe de l'IGE (Institut des Géosciences de l'Environnement) et plus précisément Thuy-Vy NGUYEN, Gaëlle UZU et Jean-Luc JAFFREZO pour leur implication dans l'analyse du potentiel oxydant dans le cadre de cette étude, ainsi que pour la rédaction de la section correspondante. La collaboration avec cette équipe de recherche nous permet d'approfondir nos connaissances et de mieux comprendre les impacts sanitaires associés.

L'étude porte sur les mesures de la période du 3 avril 2023 au 1^{er} avril 2024 sur la station urbaine de fond d'Atmo Hauts-de-France de Tourcoing Houpline (MN8).

Introduction

Les particules fines (PM2.5) ont un diamètre inférieur à 2.5 micromètres (2.5 μm) et peuvent être d'origine naturelle ou humaine. Plus les particules sont fines, plus elles pénètrent profondément dans les voies respiratoires. Les particules PM2.5 ont un impact sanitaire plus important que les particules PM10. Elles peuvent irriter et altérer la fonction respiratoire. Certaines particules ont des propriétés mutagènes et cancérogènes du fait de leur propension à adsorber certains polluants, dont les métaux lourds.

Pour les particules fines (PM2.5), on distingue :

- ✚ Les particules primaires, directement émises dans l'atmosphère. Elles sont majoritairement issues de toutes les combustions incomplètes liées aux activités anthropiques.
- ✚ Les particules secondaires, formées dans l'atmosphère par des réactions physico-chimiques d'espèces dites précurseurs.

Identification des sources de particules PM2.5.

Dans cette section, **8 sources identifiées** par le modèle PMF dont 5 sources principalement primaires et 3 sources secondaires sont présentées. Leur empreinte chimique (profil) pour chaque source est montrée en détail dans l'Annexe 8.

La variation saisonnière sera également discutée, avec une analyse de la saisonnalité comme suivant : hiver (déc 2023-jan 2024-fev 2024), printemps (mar 2023-avr 2023-mai 2023+mar 2024), été (juin 2023-juil 2023-août 2023), automne (sep 2023-oct 2023-nov 2023).

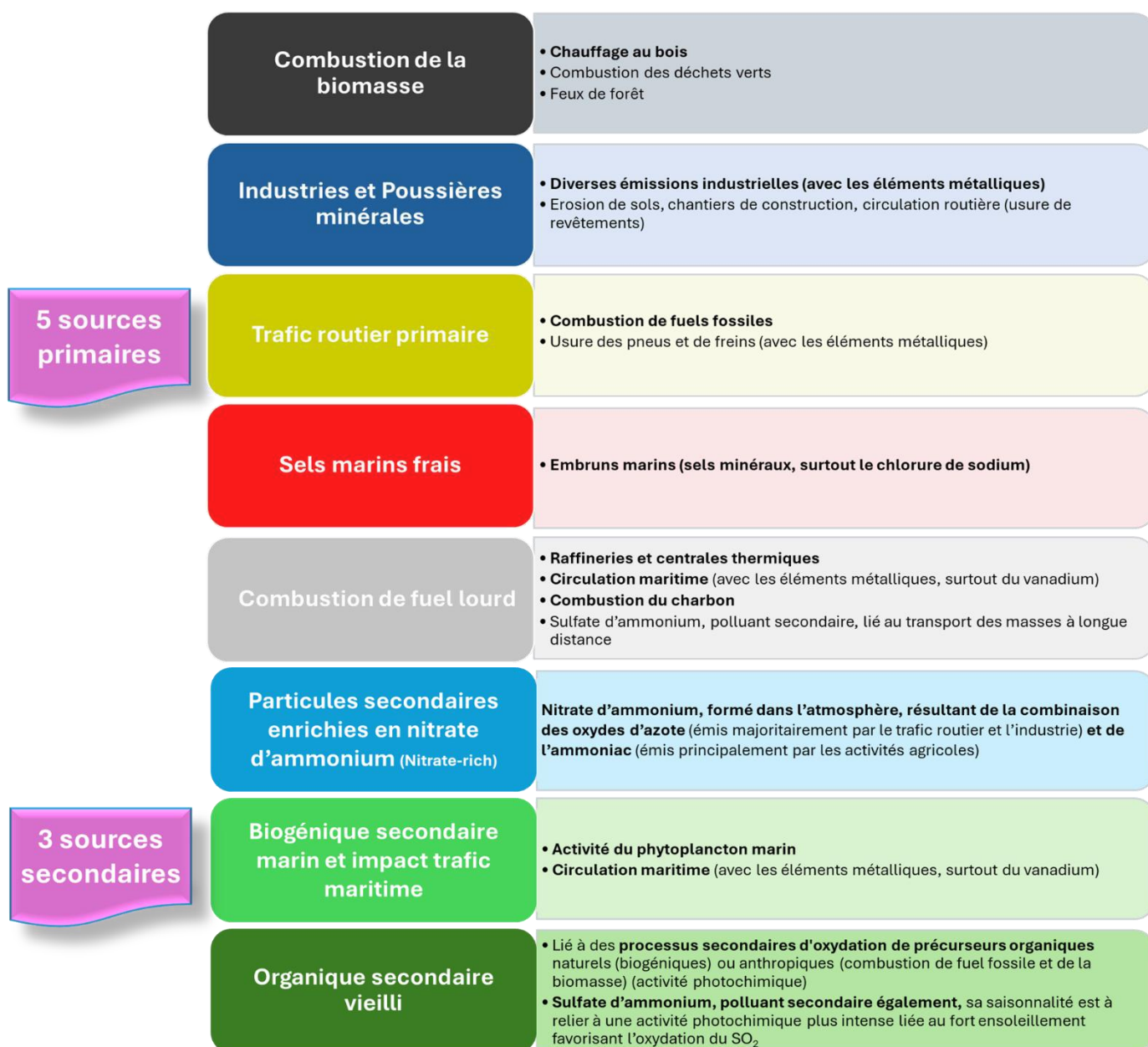


Figure 1 : Sources principales influencent les concentrations de PM2.5.

La contribution globale des sources est présentée ci-dessus :

Les **particules secondaires inorganiques** (« nitrate-rich ») et la **combustion de la biomasse** sont les deux sources les plus importantes, avec **21%** et **16%** de contribution respectivement. Ces deux sources ont été identifiées également dans la fraction PM10 pendant l'étude menée en 2019-2020, avec une contribution de 20% et 13% respectivement.

Les deux sources de **particules secondaires (biogéniques et organiques)** contribuent de manière équilibrée, chacune représentant environ la moitié de leur contribution totale, soit **26%** des particules PM2.5 mesurées. Ces deux facteurs n'ont pas été identifiés sur la fraction PM10.

Une contribution de **11%** a été observée pour la « **Combustion de fuel lourd** ». Ce facteur a été impacté par l'apport de masses d'air lointaines (contribution du sulfate d'ammonium ~30% sur le facteur qui correspondait

à 3% de la masse totale de PM2.5). La contribution du facteur liée à l'import des masses lointaines identifiée dans la fraction PM10 a été estimée à 15%. En revanche, la contribution de la combustion du fuel lourd n'avait pas clairement identifiée sur la fraction PM10.

Le **trafic routier primaire** et les **industries et poussières minérales** contribuent à **9%** chacun sur les PM2.5. Ces deux facteurs ont été également identifiés sur la fraction PM10, avec une contribution de 9% et 23%. Sur la fraction PM10, la contribution de poussières minérales est plus évidente, ainsi pendant l'étude de la caractérisation chimique des PM10 il a été possible de distinguer 2 facteurs distincts : la contribution des industrielles (3%) et celle des poussières (20%). Néanmoins, sur la fraction PM2.5 la contribution de l'industrie est mieux observée parce que les poussières minérales contribuent moins sur cette fraction (essentiellement des grosses particules).

Les **sels marins frais**, quant à eux, contribuent à **8%** des particules PM2.5 en moyenne, avec une contribution similaire à 8% dans la fraction PM10.

La description de chaque source et leur variation saisonnière sont présentées dans la section suivante.

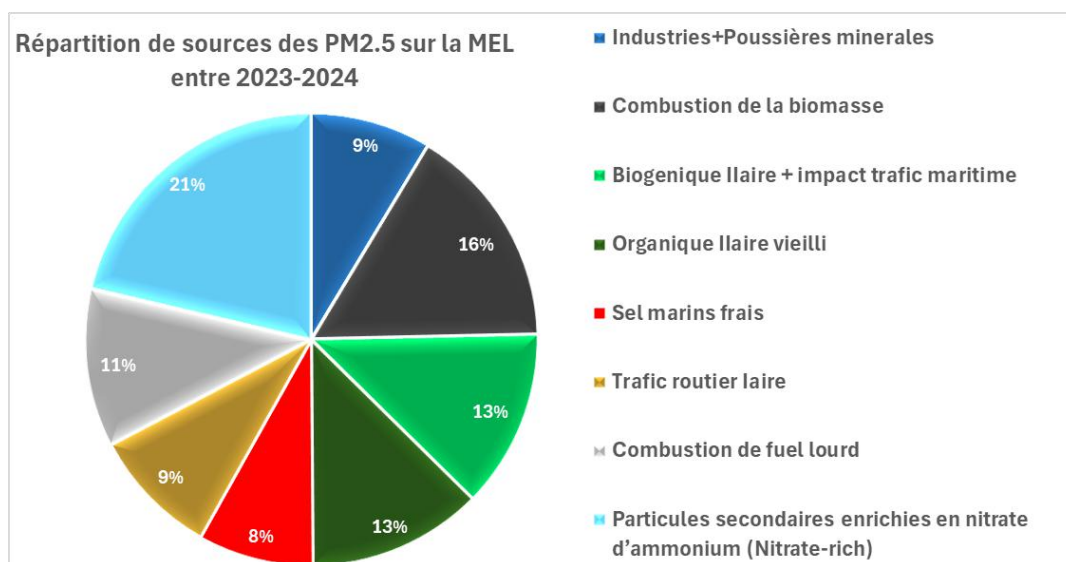


Figure 2 : Contribution moyenne des principaux facteurs constitutifs des PM2.5 sur le territoire de la MEL en 2023-2024 (par analyse PMF)

La contribution saisonnière des sources est présentée ci-dessus :

- En **hiver**, la combustion de biomasse, dont le chauffage au bois, est la source principale.
- Au **printemps**, les particules secondaires enrichies en nitrate d'ammonium (Nitrate-rich) sont le constituant dominant. Le nitrate d'ammonium se forme dans l'atmosphère par réaction chimique entre l'ammoniac (NH_3), essentiellement émis lors des épandages d'engrais, et les oxydes d'azote (NO_x), majoritairement dus aux phénomènes de combustion et notamment des gaz d'échappement du trafic routier.
- En **été**, les PM2.5 sont dominées par les deux sources secondaires : (i) les particules secondaires biogéniques (liées à l'oxydation du DMS émis par le phytoplancton marin), avec un impact du trafic maritime, et (ii) les particules secondaires organiques vieilles (liées à l'oxydation des composés organiques émis par des sources naturelles et anthropiques ; liés également à l'import des masses).
- En **automne**, la répartition des sources est homogène.

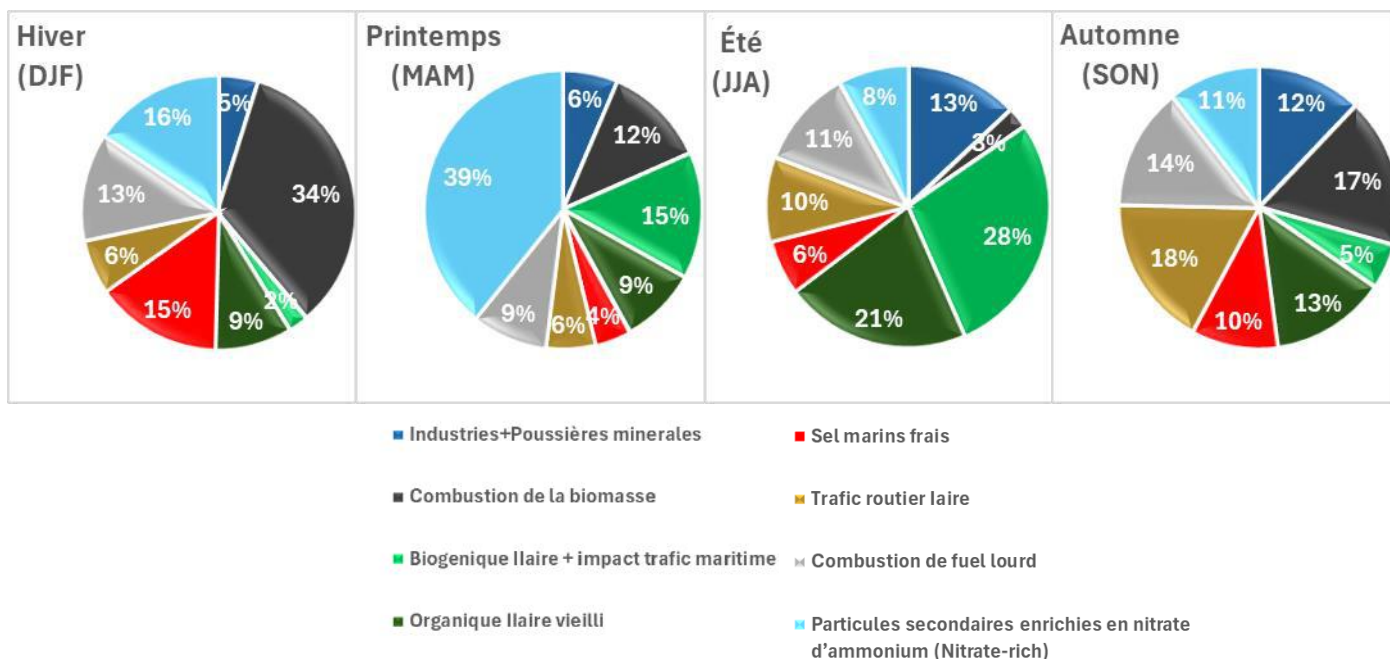


Figure 3 : Répartition saisonnière des principaux facteurs constitutifs des PM2.5 sur le territoire de la MEL en 2023-2024.

Impact des PM2.5 sur la santé – analyse potentiel oxydant.

L'impact des PM2.5 sur la santé a pu être identifié par **l'analyse du potentiel oxydant (PO)**. Le potentiel oxydant est une métrique récente de l'exposition à la pollution particulaire. Il s'agit d'une mesure de la capacité de certaines substances dans l'air (comme les particules) à réagir avec d'autres molécules (comme celles dans notre corps), et à provoquer des effets d'oxydation. Quand ces substances pénètrent dans notre organisme, elles peuvent endommager nos cellules, de la même façon que l'oxygène peut faire rouiller du métal.

Les résultats ont montré qu'à Lille, les sources les plus promptes à créer du stress oxydant pulmonaire sont principalement d'origine anthropique (primaires ou secondaires) :

- Chauffage au bois
- Particules secondaires (inorganiques et organiques)
- Trafic routier
- Industrie/Portuaire

Etude de cas

Actuellement, il n'y pas une valeur limite pour cette taille des particules, en revanche la directive relative à la qualité de l'air de 2030 fixe une valeur de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle et une valeur de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne journalière pour 2030.

Pendant cette étude, en restant alignés avec la directive actuelle, les dépassements de **la valeur limite journalière des PM10 ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne journalière)** ont été étudiés. **Cette valeur a été dépassée 2 jours** dans le département du Nord en 2023 : dans le Dunkerquois et à Maubeuge le 22 mai 2023 (épisode pas prévu mais constaté le lendemain, avec une contribution 71% des PM2.5 aux PM10) et à Dunkerque et à Calais le 09 septembre 2023 (contribution 71% des PM2.5 aux PM10). L'étude de l'épisode de pollution du mois de mai met en évidence le potentiel impact du trafic maritime, mais aussi l'augmentation de la matière organique (sources primaires et secondaires). En revanche, la hausse automnale de la concentration des PM10 est due à la source secondaire « nitrate-rich », c'est-à-dire une forte contribution des particules secondaires enrichies en nitrate d'ammonium ainsi que l'import de masses chargées des polluants de l'épisode parisien.

Cependant, ces épisodes n'ont pas pu être analysés concernant la composition chimique des PM2.5 (pas de prélèvement sur filtre).

C'est qu'il faut retenir :

Hiver

Des sources anthropiques et locales importantes : Combustion de biomasse (34%) + trafic routier (6%) = 40% des PM2.5.

Ces deux sources ont un impact important sur la santé en créant du stress oxydant pulmonaire.

 **Renouveler les appareils de chauffage au bois et limiter le trafic routier**

Printemps

Des sources secondaires (particules secondaires enrichies en nitrate d'ammonium) : en lien avec les activités agricoles (épandages printaniers) = 39% des PM2.5.

Cette source a été identifiée comme une source importante pour créer du stress oxydant pulmonaire.

 **Limitier les émissions des espèces précurseurs (ammoniac et les sources agricoles / oxydes d'azote et les sources trafic)**

 **Mieux évaluer la part de la contribution locale vs la contribution longue distance pour mieux estimer/évaluer les leviers**

Eté

Des sources secondaires principalement : Biogénique secondaire et impact trafic maritime (28%) + organique secondaire vieilli (21%) = 49% des PM2.5.

Ces deux sources peuvent créer un stress oxydant pulmonaire.

 **Approfondir les connaissances autour des composés organiques pour mieux estimer/évaluer les leviers**

 **Limitier le trafic routier pour réduire la contribution par la combustion du fuel fossile.**

Automne

Répartition des sources homogène : Combustion de biomasse (17%) + trafic routier (18%) + secondaire biogénique et organique (5% + 13%) + nitrate rich (11%) + industrie et combustion fuel lourd (12% + 14%).

Ces sources ont été reconnues comme un facteur majeur de stress oxydant au niveau pulmonaire.

 **Renouveler les appareils de chauffage au bois et limiter le trafic routier.**

La section précédente offrait une vue d'ensemble synthétique des principaux résultats de l'étude. Les pages suivantes présentent une approche plus approfondie et détaillée de ces résultats, qui vise à fournir une compréhension plus complète des analyses menées, des méthodes utilisées et des conclusions obtenues.

2. Enjeux et objectifs de l'étude

Le programme CARA (caractérisation chimique des particules) a été mis en place en 2008 par le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA), afin d'améliorer la compréhension des sources et causes des épisodes de pollution aux particules, ainsi que des concentrations observées en dehors de ces épisodes. Les objectifs actuels de ce programme sont¹:

- **Déterminer les sources** qui contribuent le plus à la pollution particulaire, tant en « situation normale » que lors des épisodes de pollution, afin d'aider à l'élaboration de plans d'actions adaptés.
- **Apporter un appui technique et scientifique** aux associations agréées pour la surveillance de la qualité de l'air (AASQA) dans la mise en œuvre de campagnes de spéciation chimique des particules sur leurs territoires, y compris par des mesures automatiques.
- **Élaborer des guides méthodologiques et des protocoles d'assurance et de contrôle de qualité** portant sur différentes techniques pertinentes à la spéciation chimique des particules et à l'étude de leurs sources.
- **Assurer un retour d'expérience et une veille scientifique** sur les méthodologies et projets visant l'amélioration des connaissances relatives à la pollution particulaire.
- **Réaliser des études de comparaisons inter-laboratoires** portant sur la mesure des espèces chimiques.
- **Optimiser les modèles de chimie-transport** via une comparaison des mesures aux sorties de ces modèles, afin de permettre une meilleure anticipation des épisodes de pollution particulaire.

Les niveaux de PM10 et PM2.5 sont relativement élevés dans la région Hauts-de-France, une problématique présente sur le territoire depuis plusieurs années.

Depuis 2012, dans le cadre du programme CARA, les particules PM10 sont prélevées sur des filtres en plusieurs points de la région Hauts-de-France. La composition chimique des particules ainsi prélevées est ensuite analysée par différents laboratoires. Les études sur le site de Nogent-sur-Oise pendant la période 2013–2016 et sur 4 sites de la région en 2018 sont déjà publiées ainsi que la caractérisation des particules des PM10 sur le territoire de la Métropole Européenne de Lille ^{2,3,4}.

La présente étude porte sur la suite du programme CARA d'Atmo Hauts-de-France effectuées en 2023-2024, avec un zoom sur l'agglomération lilloise. Elle est financée en partie par la **Métropole Européenne de Lille (MEL)** et par la Direction Régionale Environnement Aménagement Logement (DREAL) au titre du Plan Régional Santé Environnement. Les particules PM2.5 font partie de la fraction PM10 avec une contribution assez importante (~65%). De plus, les particules PM2.5 étant plus petites, elles pénètrent dans les voies respiratoires inférieures, en posant un risque plus élevé pour la santé. Cette étude permet donc de mieux connaître les sources des particules PM2.5 mesurées sur le territoire de la MEL et leur provenance, ainsi que leur impact

¹ Olivier FAVEZ et al., "Bilan Des Travaux 2017 Du Programme CARA," 2018, <https://www.lcsqa.org/system/files/rapport/LCSQA2017-bilan%20prog%20CARA%202017.pdf>.

² Atmo Hdf, "Programme CARA Nogent-Sur-Oise 2013-2016," Rapport d'étude (Atmo Hauts-de-France, November 2018), http://www.atmo-hdf.fr/joomlatools-files/docman-files/Rapport_et_synthese_etudes/rapport_complet_nogent_min.pdf.

³ Atmo Hdf, "Caractérisation des particules PM10 sur la Métropole Européenne de Lille – 2022", <https://www.atmo-hdf.fr/publications/etude-caracterisation-des-particules-pm10-sur-la-metropole-europeenne-de-lille-2022>

⁴ Atmo Hdf, "Caractérisation Des Particules PM10 Dans La Région Hauts-de-France," March 2019, https://www.atmo-hdf.fr/joomlatools-files/docman-files/Rapport_et_synthese_etudes/Rapport_CARA_2018_VF.pdf.

sanitaire. Elle vise à fournir des éléments de compréhension pour aider les élus dans leurs prises de décision afin de réduire la pollution issue des particules. Les objectifs de cette étude peuvent se décliner de la façon suivante :

- Identifier les **sources principales** des particules PM2.5 (trafic primaire, chauffage au bois, polluants secondaires...) et leurs **évolutions temporelles** (saisonnnières, en cas d'épisode...),
- Comprendre la **provenance géographique** des particules (locale, régionale ou lointaine),
- Identifier leur **impact sanitaire**, notamment par l'analyse de leur potentiel oxydant,
- **Définir les enjeux plus précis du territoire** sur la question des particules,
- **Identifier les leviers d'actions** du territoire sur ce sujet en lien avec les politiques publiques (PPA, PCAET notamment),
- Aider à l'évaluation des actions menées (en lien avec projet **Prime Air**, **ZFE...**),
- **Avoir un livrable clair et accessible, en adéquation avec les terminologies du PCAET.**

3. Introduction : les particules atmosphériques

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".

3.1. Granulométrie des particules

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 à 1 μm , respectivement. La figure suivante illustre la taille des particules atmosphériques en les comparant à un cheveu humain (50 à 70 μm).

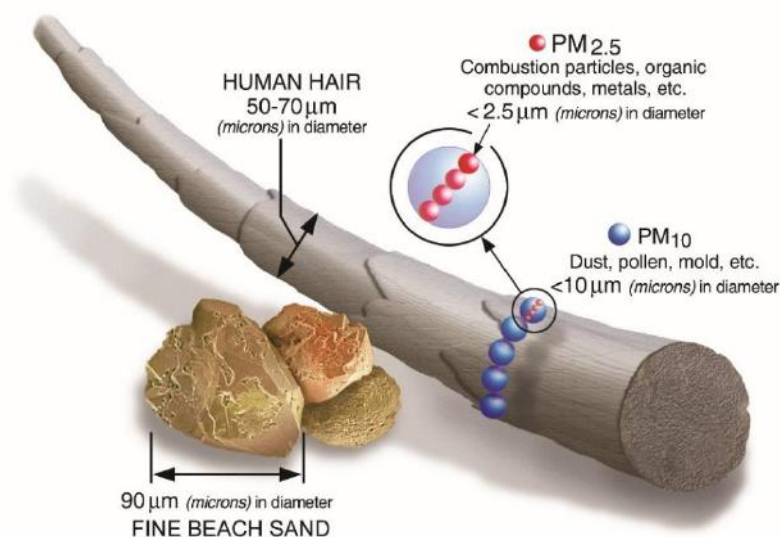


Figure 4 : Illustration de la taille des particules PM10 et PM2.5. Source : U.S. EPA⁵

3.2. Origines et composition chimique des particules

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 du désert, 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

⁵ https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-09/pm2.5_scale_graphic-color_2.jpg, consulté le 30/10/2024.

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 5) selon leurs 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 5 : Principaux polluants atmosphériques (source : Atmo Hauts-de-France)

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 :

- **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), et 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).

3.3. Impacts environnementaux et sanitaires

L'exposition aux particules est associée à des maladies respiratoires et cardiovasculaires⁶ et à un risque accru de développer un cancer. Ces effets peuvent être exacerbés pour certaines populations considérées comme sensibles (jeunes enfants, personnes âgées, personnes asthmatiques, etc.).

L'influence des particules sur le climat est complexe. Les particules peuvent influencer le climat de manière directe en interagissant avec les rayonnements solaires et terrestres. Elles peuvent également influencer le climat de manière plus indirecte, par exemple en participant à la formation de nuages. Certains composés, principalement le carbone élémentaire, ont un effet réchauffant sur le climat. En revanche, dans leur ensemble, les particules ont un effet refroidissant. L'incertitude sur ces estimations est élevée⁷.

Les caractéristiques des particules atmosphériques sont très diverses, notamment en termes de composition chimique, de taille, et des propriétés de leur surface qui sont responsables de leur réactivité. La concentration massique des particules, qui est le paramètre actuellement réglementé, ne peut donc pas seule rendre compte de cette diversité, bien qu'elle permette d'avoir une première approche de l'exposition des populations facile à mettre en œuvre.

Les études épidémiologiques ont montré qu'un des mécanismes principaux d'action des particules sur la santé humaine était lié à un déséquilibre entre les espèces oxydantes (réactives) portées par les particules et les antioxydants naturellement présents dans nos poumons. Ce phénomène, appelé stress oxydant, est à l'état normal lorsque l'équilibre est maintenu entre les 2 familles chimiques, mais susceptible d'entraîner des impacts sur la santé lorsque la balance n'est plus en faveur des défenses antioxydantes de l'organisme. L'analyse du potentiel oxydant (PO) des PM a donc été développée pour mesurer la capacité d'un échantillon de particules à générer un stress oxydant dans le milieu pulmonaire, en déterminant la vitesse de consommation chimique d'une quantité d'antioxydants par cet échantillon. Dans la mesure où plusieurs types d'antioxydants coexistent dans nos poumons, plusieurs tests existent donc pour mesurer ce PO. De plus, les protocoles utilisés par les différents laboratoires ne sont pas encore standardisés, et l'IGE conduit actuellement des travaux internationaux en ce sens pour homogénéiser les pratiques avec les principaux laboratoires de recherche européens dans le domaine.

⁶ C. Arden Pope and Douglas W. Dockery, "Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines That Connect," *Journal of the Air & Waste Management Association* 56, no. 6 (June 1, 2006): 709–42, <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>.

⁷ T. F. Stocker et al., 2013: Technical Summary. Dans: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

4. Matériels et méthodes

4.1. Stations de mesure et polluants mesurés

Lille est la préfecture du département du Nord. Cette ville est située à une dizaine de kilomètres de la frontière franco-belge. La Métropole Européenne de Lille (MEL) est constituée de Lille et de 94 autres communes, formant ainsi une agglomération de 1 146 200 habitants. La densité moyenne de population à Lille est de 6 684 hab/km², pour une superficie d'environ 35 km². La station de Tourcoing Houpline (MN8) est une station urbaine qui mesure la pollution de fond. Elle mesure les polluants réglementés suivants : NO₂, ozone, PM2.5, et PM10. Elle mesure également quelques polluants complémentaires : le carbone suie (black carbon), le NO et les PM1. En 2024, un compteur des particules PUF a été installé également sur cette station.

Cette étude porte sur les mesures de PM2.5 effectuées entre le **3 avril 2023 et le 01 avril 2024**.



Figure 6 : Station de mesures sélectionnée pour cette étude

4.2. Techniques de mesure

Du 3 avril 2023 au 1^{er} avril 2024, les particules PM_{2.5} ont été mesurées de deux manières différentes : **mesures en continu** et **mesures avec analyse différée**.

La concentration massique des PM_{2.5} (sans distinction de leur composition) est mesurée **en continu** par un analyseur automatique (Annexe 2) qui utilise le principe de la détection optique de la lumière diffusée par les aérosols, qui fournit des mesures simultanées des fractions PM₁, PM_{2.5}, PM₄ et PM₁₀, TSP et du comptage en nombre.

De plus, les PM_{2.5} sont prélevées toutes les 24 heures sur des filtres en quartz par un préleveur haut débit (Annexe 2). Les prélèvements sont analysés en laboratoire.

Les filtres à analyser par les laboratoires sont sélectionnés selon les critères suivants :

- Un filtre sur six (i.e. un jour de prélèvement sur six) est systématiquement analysé.
- Si la concentration massique journalière des PM_{2.5} telle que mesurée par l'analyseur automatique est supérieure à 25 µg/m³, alors le filtre de cette journée est analysé.

4.3. Modèle source récepteur

Le modèle PMF (Positive Matrix Factorization) est une méthode d'analyse factorielle multivariée qui permet d'identifier et de répartir les sources de polluants atmosphériques, à partir de la concentration des espèces chimiques observées.

Le principe de la méthode PMF, les espèces chimiques retenues, le pré-traitement des données, les incertitudes et les contraintes appliquées ainsi que la méthode d'analyse des vents sont décrits en Annexes 4 et 5.

4.4. Analyse du potentiel oxydant

L'analyse du PO est réalisée en mettant en contact les particules atmosphériques d'un échantillon et un fluide pulmonaire reconstitué, contenant des antioxydants dans des conditions physiologiques (37°C, pH = 7.4). La vitesse de consommation des antioxydants par les PM est ensuite suivie pendant 30 minutes. Plus les vitesses de consommation sont élevées, plus les particules sont oxydantes pour le milieu pulmonaire. Les tests réalisés dans le cadre du programme CAMEL sont les tests au dithiothréitol (DTT) et à l'acide ascorbique (AA), qui sont deux tests complémentaires les plus utilisés, représentatifs de différentes familles d'espèces chimiques antioxydantes de nos poumons. **A noter que, quel que soit le test réalisé, une source qui présente une contribution importante sur un des deux antioxydants (ou leur combinaison), implique une capacité de cette source à créer un stress oxydant.**

- Test DTT : Le Dithiothréitol (**DTT**) est un composé utilisé pour représenter l'ensemble d'une famille d'antioxydant pulmonaires, appelés des thiols. Ce test présente une **sensibilité** équivalente pour de **nombreuses espèces chimiques contenues dans les particules** (il réagit avec plusieurs composés réactifs qui peuvent être présentes sur les particules), et peut être considéré comme un **test assez généraliste**.
- Test AA : L'acide ascorbique (**AA**) est un antioxydant naturellement présent dans les poumons humains et il est utilisé en tant que tel. Ce test est **plus sensible à certaines espèces chimiques spécifiques existantes dans les PM**, comme les métaux.

Le PO (quel que soit le test réalisé) est donc une mesure de vitesse de réaction chimique et est reporté en quantité d'antioxydant (exprimé en milliardième de moles de produit) consommé par minute, avec une unité de nmol/min de AA ou DTT. Les mesures atmosphériques peuvent être exprimées soit par mètre cube d'air (noté alors PO par volume, ou **PO_v**), **représentant l'exposition humaine par inhalation de l'air échantillonné**, soit par la masse de particules (millionième de gramme de particule (µg), noté PO massique ou **PO_m**), **représentant alors la réactivité spécifique des particules de l'échantillon d'air**. On l'appelle « PO intrinsèque ».

On retiendra qu'il n'existe pas actuellement de valeurs guide ou de valeurs réglementées pour la mesure du PO. Cependant, le très grand nombre d'analyses qui ont été réalisées à l'IGE dans le cadre de nombreux projets de recherche et d'études (dont beaucoup avec des AASQA en France) ces 10 dernières années, permettent d'obtenir une vaste base de données en Europe, comportant de nombreux échantillons sur différentes typologies de sites. Avec cette base de données, nous sommes à même de proposer des comparaisons avec les valeurs moyennes et les valeurs extrêmes rencontrées sur ces différentes typologies de sites, pour les nouvelles études qui sont maintenant entreprises.

5. Contexte environnemental

5.1. Émissions connues

5.1.1. Différence entre émissions et concentrations

Les émissions de polluants sont les quantités de polluants directement rejetées dans l'atmosphère par les activités humaines ou par des sources naturelles (voir section 3). Les émissions de polluants s'expriment en masse de polluant émise par unité de temps, généralement en tonnes par an.

Les émissions de polluants sont à ne pas confondre avec les concentrations atmosphériques de polluants. Ces concentrations caractérisent la qualité de l'air que l'on respire, et s'expriment 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 le sol et dans l'eau. La figure suivante illustre la relation entre émissions et concentrations de polluants.

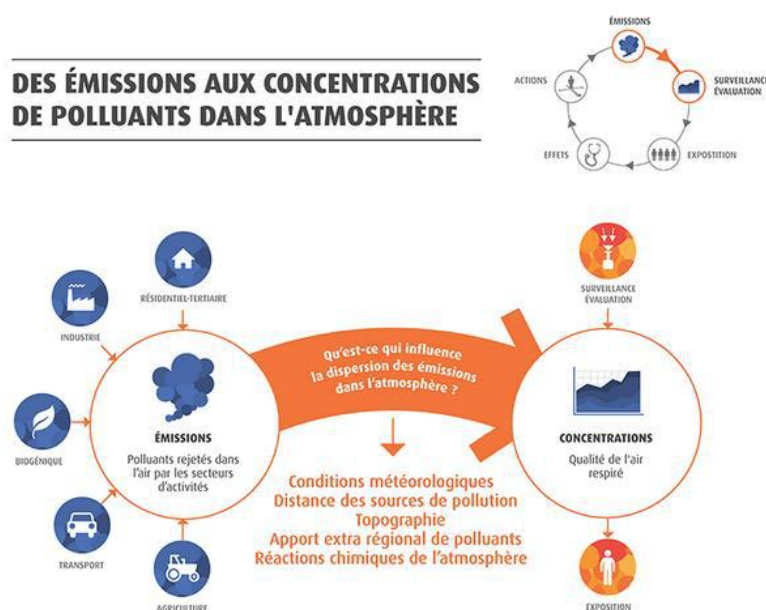


Figure 7 : Relation entre les émissions et les concentrations de polluants atmosphériques

5.1.2. Émissions à proximité des sites de mesure

D'après la dernière version d'inventaire Atmo HdF M2023_v1, les émissions des PM2.5 réparties par commune sur le territoire de la MEL pour l'année 2021 sont présentées sur la figure suivante.

Emissions des PM2.5 réparties par commune sur le territoire en 2021 (en tonnes)

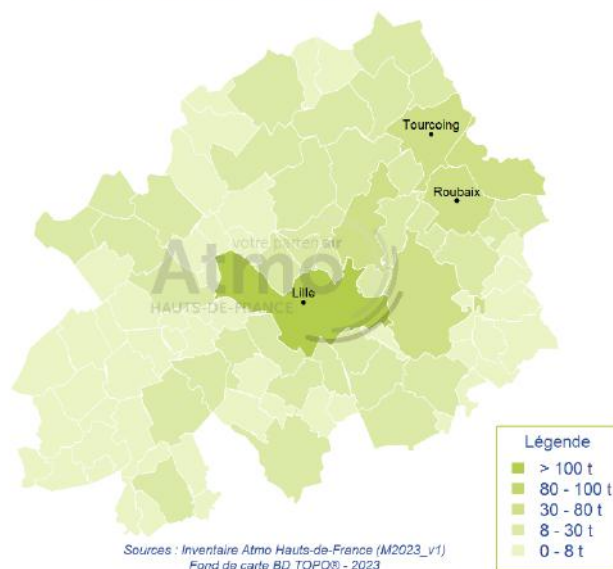


Figure 8 : Carte d'émissions des PM2.5 par commune à la MEL en 2021.

Quelques chiffres clés sur les émissions des PM2.5 à la MEL :

- La MEL représente **7.4 %** des PM2.5 régionales
- La densité d'émissions par habitant est de 0.8 kg par habitant, soit **2.7 fois moins** qu'en région
- La densité d'émissions par km² est de 1 444.2 kg par km², soit **3.5 fois plus** qu'en région
- **La commune de Lille** émet plus de particules PM2.5 que les autres communes (> 100 t/an)

Les émissions des PM2.5 de la MEL présentées ci-dessus sont expliquées majoritairement par **3 grands secteurs d'émissions** : Résidentiel – Tertiaire, Transports et Industrie, déchets, énergie, construction.

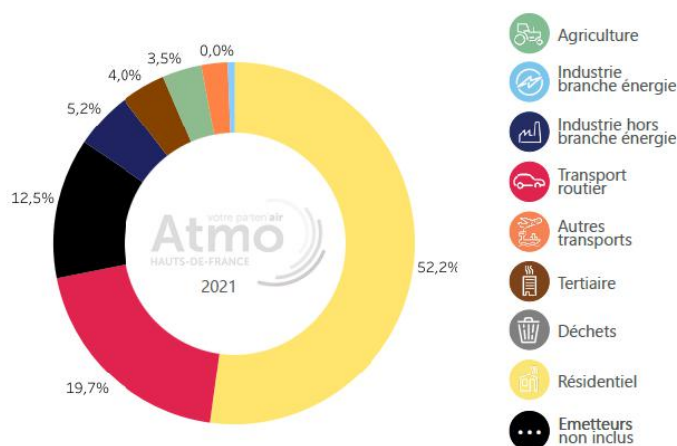


Figure 9 : Émissions de particules PM2.5 et leur répartition par secteur d'activité à la MEL

Les données d'émissions ont été extraites de la version Atmo HdF M2023_v1 de l'inventaire d'Atmo Hauts-de-France

Le secteur **résidentiel-tertiaire** est le premier contributeur d'émissions de PM2.5 de la MEL, qui émet à la hauteur de **53%**. Le **secteur des transports** prend la 2^{ème} place et il représente environ **20%** d'émissions de PM2.5 pour la MEL.

Les émissions industrielles contribuent à hauteur de **5%** des émissions de PM2.5 pour la MEL.

Enfin, une fraction de **13%** (indiquée comme « émetteurs non-inclus »), est liée aux particules déjà émises par des sources différentes (industrie, chauffage au bois, agriculture) qui sont déjà comptabilisées dans un autre secteur. Ces particules sont déposées au sol et remises en suspension lors du passage des véhicules sur les voies pour le territoire de la MEL.

En résumé, les deux grands secteurs **résidentiel-tertiaire** et **transports** contribuent jusqu'à **73%** des émissions primaires de PM2.5 du territoire de la MEL. Les plans d'actions et les mesures à mettre en place sur ces deux secteurs permettront de diminuer d'abord les émissions primaires (PM et NOx) et éventuellement les polluants secondaires.

Les sites industriels, les principaux axes routiers, les zones densément habitées, et les espaces plus ruraux situés autour de sites de mesure étudiés ici sont présentés sur la figure ci-dessous.

La station de Tourcoing est située dans un quartier résidentiel et commercial (environ 6 600 habitants), de la périphérie de Tourcoing. Relativement peu d'industries se trouvent à proximité de ce site de mesure.

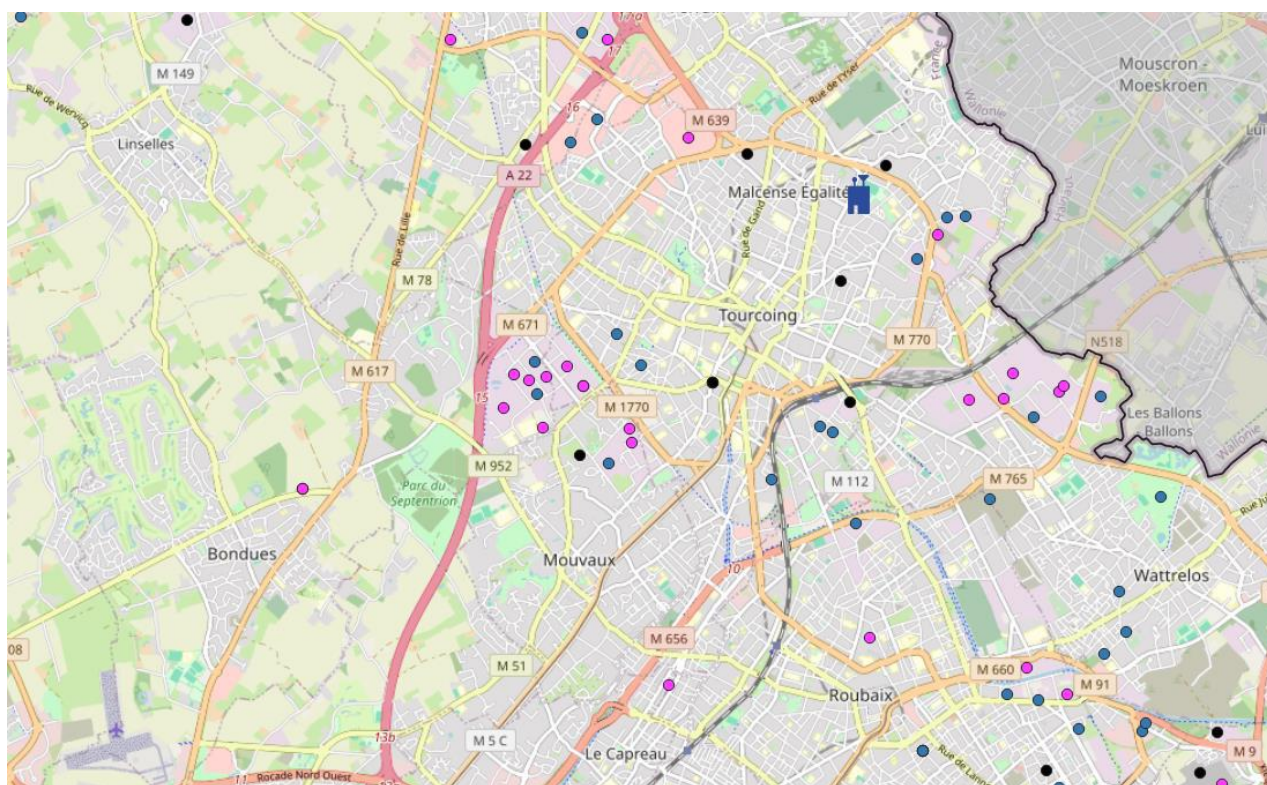


Figure 10 : Principales ICPE (installations classées pour la protection de l'environnement) situées à proximité du site de mesure MN8 (Tourcoing-Houpline). Sont identifiées les ICPE soumises à autorisation (en violet), les ICPE soumises à enregistrement (en cyan) et les ICPE non-classées (en noir).

5.2. Épisodes 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 (pourcentage de surface de la zone ou pourcentage de population impactés, niveau réglementaire franchi, durée de l'épisode, etc.).

Deux seuils réglementaires sont définis⁸ :

- Le **seuil d'information et de recommandation** (IR) est « un 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 et qui rend nécessaire l'émission d'informations immédiates et adéquates à destination de ces groupes et des recommandations pour réduire certaines émissions ».
- Le **seuil d'alerte** est « un niveau au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé de l'ensemble de la population ou de dégradation de l'environnement, justifiant l'intervention de mesures d'urgence ».

Actuellement, il n'y pas une valeur limite journalière pour des particules PM2.5, en revanche la directive de l'air de 2030 fixe une valeur de 10 µg/m³ en moyenne annuelle et une valeur de 25 µg/m³ en moyenne journalière pour 2030 à ne pas dépasser plus de 18 fois.

Pour les PM10, le seuil d'information et de recommandation est de 50 µg/m³ en moyenne journalière. Le seuil d'alerte est de 80 µg/m³, en moyenne journalière également. La figure suivante liste les épisodes de pollution en PM10 qui ont été constatés en région Hauts-de-France sur la période d'étude.

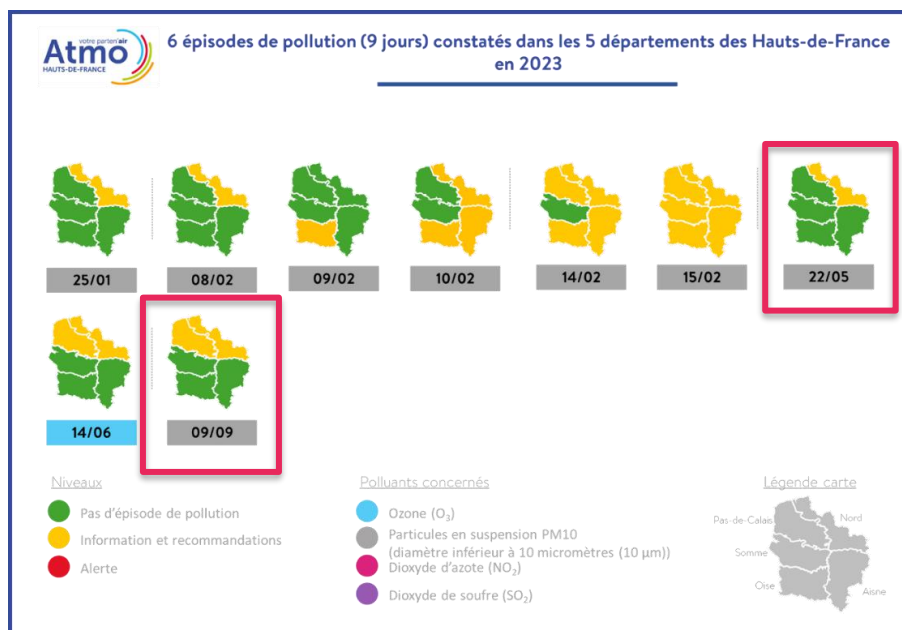


Figure 11 : Bilan des épisodes de pollution constatés qui ont touché les Hauts-de-France en 2023, par département.

Source : <https://www.atmo-hdf.fr/episodes-de-pollution/historique>.

Au total, sur la période étudiée, on compte **2 épisodes de pollution** en particules PM10 dans le Nord en 2023 et aucun jour en 2024. A noter que pendant cette période, un épisode d'ozone a été également constaté. La station étudiée (MN8) **n'a pas enregistré de dépassements du seuil d'information et de recommandations.**

⁸ Article R221-1 du Code de l'environnement (Modifié par Décret n°2010-1250 du 21 octobre 2010 - art. 1).

6. Résultats de l'étude

6.1. Identification des sources

Dans cette section, **8 sources identifiées** par le modèle PMF dont 5 sources principalement primaires et 3 sources secondaires sont présentées. Leur empreinte chimique (profil) pour chaque source est montrée en détail dans l'Annexe 8.

La variation saisonnière sera également discutée, avec une analyse de la saisonnalité comme suivant : hiver (déc 2023-jan 2024-fev 2024), printemps (mar 2023-avr 2023-mai 2023+mar 2024), été (juin 2023-juil 2023-août 2023), automne (sep 2023-oct 2023-nov 2023).

Combustion de biomasse

Cette **source primaire** est caractérisée par la présence significative du traceur « lévoglucosan » mais aussi du « mannosan » et « galactosan » avec des proportions importantes de carbone organique (OC), de carbone élémentaire (EC) et de potassium (K^+). La combustion de biomasse, correspond principalement **au chauffage au bois résidentiel** sur le territoire de la MEL. Elle peut également identifier les feux de forêt ou la combustion de déchets verts, bien que dans une moindre mesure pour cette taille de particules.

Industries et Poussières minérales

Cette **source primaire** a été caractérisée principalement par la présence importante des éléments métalliques ou métalloïdes tels Al, Co, Fe, Li, Ni, Sr, Th, Tl, U qui sont fréquemment observés au sein de diverses **émissions industrielles**. De plus, les éléments minéraux et métalliques, tels que Ca^{2+} , Al, Fe, Mn, Ti, Zn, sont attribués souvent à une signature des processus de **remise en suspension des poussières** (érosion des sols, les chantiers de construction, la circulation routière, les aires de stationnement) ainsi qu'une origine terrigène. Finalement, les éléments tels que le Ba, Co et Mn sont émis par **l'usure des pneus et des freins**.

Trafic routier primaire

Cette source **primaire** est caractérisée par la forte présence de Carbone élémentaire (EC), majoritairement émis par les combustions de fuels fossiles. Elle contient également différents éléments métalliques tels que le Baryum (Ba), le Cuivre (Cu), le Fer (Fe), le Plomb (Pb), l'Étain (Sn), l'Uranium (U) et le Zinc (Zn). Ces éléments métalliques peuvent être émis par l'usure de certaines pièces mécaniques des véhicules, ou des pneus et des freins. Cette source combine donc des émissions **à l'échappement** ainsi qu'une partie des émissions **hors-échappement** (usure).

Sels marins frais

Cette source **primaire** est caractérisée par la prédominance de Chlorure (Cl^-), Sodium (Na^+), et Magnésium (Mg^{2+}) qui sont des composés majeurs de **l'eau de mer**.

Combustion de fuel lourd

Cette source principalement **primaire** est caractérisée par la forte présence du V, du Cs et du Tl ainsi que du OC. Ces éléments peuvent être liés à la combustion du fioul lourd par les **raffineries et les centrales thermiques** (combustion du charbon) et liés aux émissions de la **circulation maritime**. De plus, la présence du SO_4^{2-} et NH_4^+ montre un impact de transport des masses à longue distance (sous forme sulfate d'ammonium). La présence de OC est également liée à la formation d'aérosols organiques secondaires par des

processus de réactions photochimiques et de conversion gaz-particules assez similaires à ceux conduisant à la formation du sulfate d'ammonium.

Nitrate-rich (aérosols secondaires inorganiques (SIA) enrichis en nitrate d'ammonium)

Cette source **secondaire** est caractérisée par la forte présence d'ions nitrate (NO_3^-) et ammonium (NH_4^+) indiquant la présence du nitrate sous forme de nitrate d'ammonium (NH_4NO_3). Ce facteur est issu d'une source secondaire qui n'est pas émise directement dans l'air. Le nitrate d'ammonium peut être formé localement ou être transporté sur de grandes distances. Le nitrate d'ammonium est un polluant formé dans l'atmosphère, résultant de la combinaison d'oxydes d'azote (émis majoritairement par le **trafic routier** et **l'industrie**) et d'ammoniac (émis principalement par les **activités agricoles**).

Biogénique secondaire marin et impact trafic maritime

Cette source majoritairement **secondaire** est caractérisée essentiellement par la présence de l'Acide Méthane Sulfonique (MSA) et du SO_4^{2-} , ces deux espèces pouvant provenir de l'oxydation du diméthylsulfure (DMS) **émis par le phytoplancton marin**. Il est à noter que ce facteur présente également des proportions importantes d'éléments tels que le V indiquant un mélange avec la source combustion de fuel lourd issu du **transport maritime** (source primaire).

Organique secondaire vieilli (aérosols secondaires organiques (SOA))

Cette source **secondaire** est caractérisée essentiellement par la présence d'Oxalate ($\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$), de carbone organique (OC), de sulfate (SO_4^{2-}) et d'ammonium (NH_4^+), sous forme de sulfate d'ammonium. Les sources d'oxalate sont principalement issues de **l'oxydation des composés organiques**, souvent par photochimie dans l'atmosphère. Ces réactions, stimulées par la lumière solaire, transforment des précurseurs organiques en oxalate. Une partie de l'oxalate peut également provenir de **processus secondaires liés aux émissions biogéniques (sources naturelles) et à la combustion de fuel fossile et de la biomasse (sources anthropiques)**. La présence de sulfate d'ammonium, qui est un polluant secondaire, est à relier à un **apport de masses d'air** lointaines, alors que les concentrations de carbone organique (OC) sont liées à la formation **d'aérosols organiques secondaires (AOS)** par des processus de réaction photochimiques.

En résumé :

	Facteur	Source
5 sources primaires	Combustion de la biomasse	• Chauffage au bois • Combustion des déchets verts • Feux de forêt
	Industries et Poussières minérales	• Diverses émissions industrielles (avec les éléments métalliques) • Erosion de sols, chantiers de construction, circulation routière (usure de revêtements)
	Trafic routier primaire	• Combustion de fuels fossiles • Usure des pneus et de freins (avec les éléments métalliques)
	Sels marins frais	• Embruns marins (sels minéraux, surtout le chlorure de sodium)
	Combustion de fuel lourd	• Raffineries et centrales thermiques • Circulation maritime (avec les éléments métalliques, surtout du vanadium) • Combustion du charbon • Sulfate d'ammonium, polluant secondaire, lié au transport des masses à longue distance
3 sources secondaires	Particules secondaires enrichies en nitrate d'ammonium (Nitrate-rich)	Nitrate d'ammonium, formé dans l'atmosphère, résultant de la combinaison des oxydes d'azote (émis majoritairement par le trafic routier et l'industrie) et de l'ammoniac (émis principalement par les activités agricoles)
	Biogénique secondaire marin et impact trafic maritime	• Activité du phytoplancton marin • Circulation maritime (avec les éléments métalliques, surtout du vanadium)
	Organique secondaire vieilli	• Lié à des processus secondaires d'oxydation de précurseurs organiques naturels (biogéniques) ou anthropiques (combustion de fuel fossile et de la biomasse) (activité photochimique) • Sulfate d'ammonium, polluant secondaire également, sa saisonnalité est à relier à une activité photochimique plus intense liée au fort ensoleillement favorisant l'oxydation du SO₂

Figure 12 : Sources principales influencent les concentrations de PM2.5

6.1.1. Répartition globale

Les **particules secondaires inorganiques** (« nitrate-rich ») et la **combustion de la biomasse** sont les deux sources les plus importantes, avec **21%** et **16%** de contribution respectivement. Ces deux sources ont été identifiées également dans la fraction PM10 pendant l'étude menée en 2019-2020, avec une contribution de 20% et 13% respectivement.

Les deux sources de **particules secondaires (biogéniques et organiques)** contribuent de manière équilibrée, chacune représentant environ la moitié de leur contribution totale, soit **26%** des particules PM2.5 mesurées. Ces deux facteurs n'ont pas été identifiés sur la fraction PM10.

Une contribution de **11%** a été observée pour la « **Combustion de fuel lourd** ». Ce facteur a été impacté par l'apport de masses d'air lointaines (contribution du sulfate d'ammonium ~30% sur le facteur qui correspondait à 3% de la masse totale de PM2.5). La contribution du facteur liée à l'import des masses lointaines identifiée dans la fraction PM10 a été estimée à 15%. En revanche, la contribution de la combustion du fuel lourd n'avait pas clairement identifiée sur la fraction PM10.

Le **trafic routier primaire** et les **industries et poussières minérales** contribuent à **9%** chacun sur les PM2.5. Ces deux facteurs ont été également identifiés sur la fraction PM10, avec une contribution de 9% et 23%. Sur la fraction PM10, la contribution de poussières minérales est plus évidente, ainsi pendant l'étude de la caractérisation chimique des PM10 il a été possible de distinguer 2 facteurs distincts : la contribution des industrielles (3%) et celle des poussières (20%). Néanmoins, sur la fraction PM2.5 la contribution de l'industrie est mieux observée parce que les poussières minérales contribuent moins sur cette fraction (essentiellement des grosses particules).

Les **sels marins frais**, quant à eux, contribuent à **8%** des particules PM2.5 en moyenne, avec une contribution similaire à 8% dans la fraction PM10.

La description de chaque source et leur variation saisonnière sont présentées dans la section suivante.

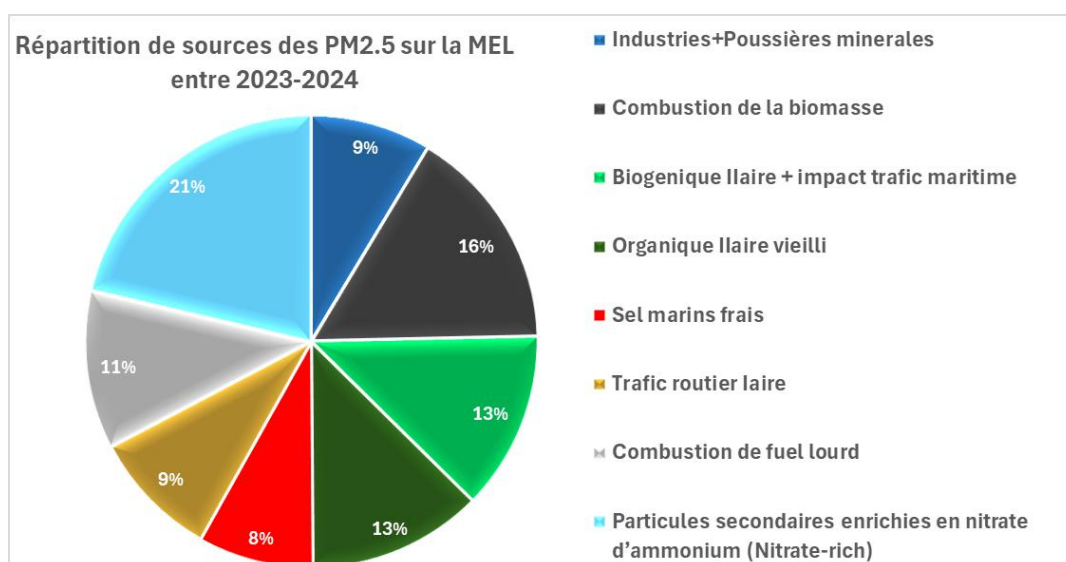


Figure 13 : Contribution moyenne des principaux facteurs constitutifs des PM2.5 sur le territoire de la MEL en 2023-2024 (par analyse PMF)

6.1.2. Répartition saisonnière par source

Industries et Poussières minérales

Les concentrations de cette source industrie sont en général également réparties pendant les 3 saisons de printemps, été et automne (vitesse de vent autour de 15 km/h) et elles sont un peu plus faibles durant l'hiver (vitesse de vent autour de 19 km/h) en raison de meilleures conditions de dispersion.

Ce qu'il faut retenir de la source industrielle et poussières minérales

- Sources anthropiques primaires
- Faible contribution toute l'année ($<1 \mu\text{g}/\text{m}^3$)
- Cette source reste à surveiller car composée d'éléments métalliques qui, malgré leurs faibles concentrations, représentent un risque sanitaire
- Actions proposées Peu d'actions locales pour la partie industrielle ; Limiter le nombre de véhicules en circulation, qui permet de réduire la remise en suspension des poussières par la circulation

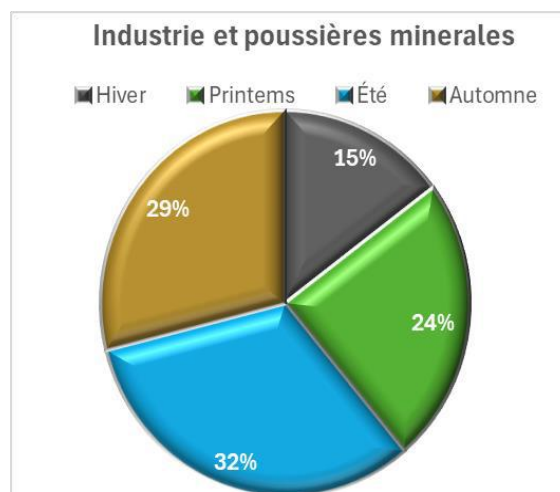


Figure 14 : Variation saisonnière de la source « industrie et poussières minérales »

Combustion de biomasse

Sa concentration est plus élevée en période froide : Hiver (décembre 2023 – février 2024) ($3.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Son niveau est négligeable au cours d'été ($0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Ce qu'il faut retenir de la source de la combustion de biomasse

- Sources anthropiques primaires
- Concentration élevée en hiver : $3.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne
- Pas/peu de contribution en été, concentrations représentent un risque sanitaire
- Actions proposées : poursuivre les actions visant le renouvellement des appareils de chauffage au bois

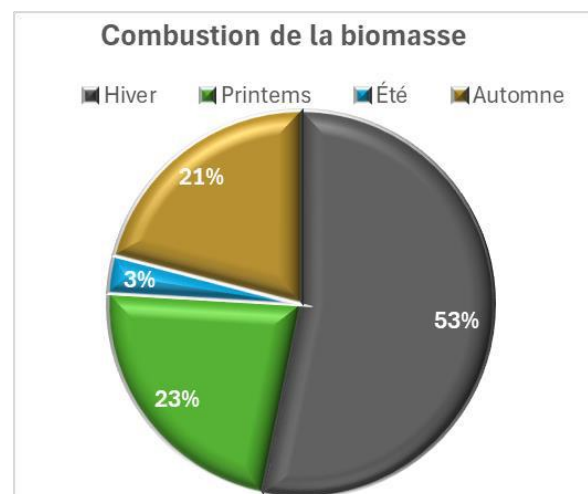


Figure 15 : Variation saisonnière de la source « combustion de biomasse »

☐ Nitrate-rich (aérosols secondaires enrichis en nitrate d'ammonium)

Sa concentration est 4-5 fois plus importante **au printemps** qu'au cours des autres saisons (**5.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** contre 0.7 à 1.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Il est influencé par les conditions météorologiques, par exemple, une forte humidité et une faible température favorisent la formation des particules composées de nitrate d'ammonium.

Ce qu'il faut retenir pour les aérosols enrichis en nitrate d'ammonium

- Polluant secondaire, formé à partir de l'ammoniac et les oxydes d'azote
- Sources lointaines (principalement) et locales (partiellement)
- Concentration très élevée au printemps : 5.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne
- Importance de l'ammoniac dans la formation du nitrate d'ammonium
- Actions proposées localement : réduire les émissions de NH_3 (agriculture)

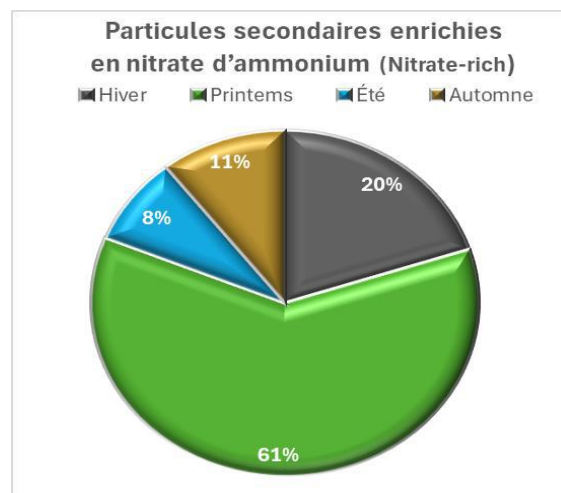


Figure 16 : Variation saisonnière de la source « Nitrate-rich »

☐ Sels marins frais

Leur présence est beaucoup plus importante en hiver que lors des autres saisons (jusqu'à 2 fois plus). En effet, la vitesse des vents est généralement plus élevée en hiver, ce qui permet de générer/transporter plus de sels marins frais.

Ce qu'il faut retenir des sels marins

- Sources primaires naturelles
- Pas d'actions locales à mettre en place

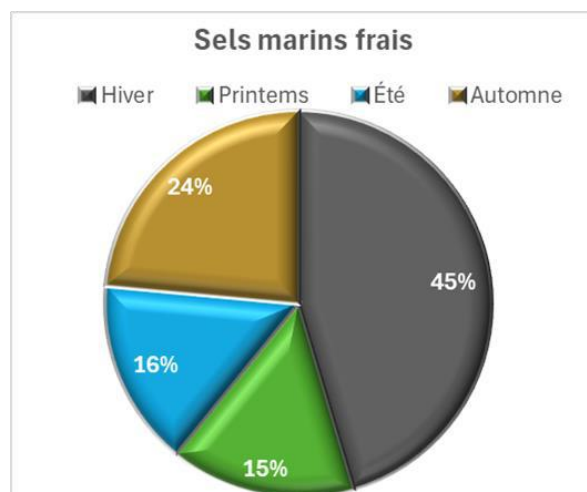


Figure 17 : Variation saisonnière de la source « Sels marins frais »

Trafic routier primaire

Son niveau est légèrement plus élevé en automne en lien avec l'usage plus fréquent de la voiture et les surémissions du moteur en période froide expliquent la hausse de concentration de cette source. De plus, en hiver 2023, les conditions météorologiques (précipitations) ont pu favoriser la dispersion de polluants.

Ce qu'il faut retenir du trafic routier primaire

- Sources anthropiques primaires
- Concentration élevée en automne : $1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- Actions possibles : limitation du nombre de véhicules en circulation via la ZFE ou encore le report modal

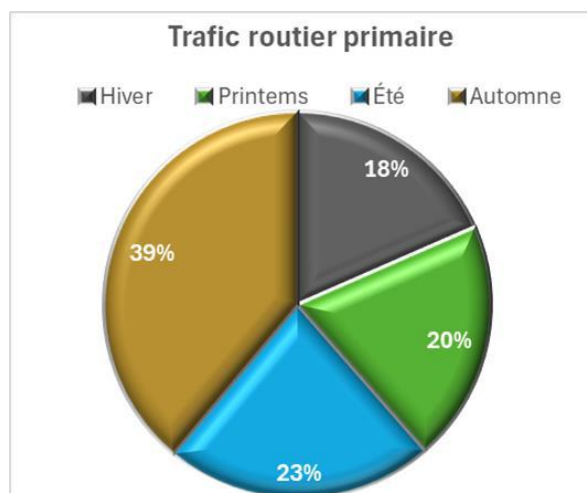


Figure 18 : Variation saisonnière de la source « Trafic routier primaire »

Combustion de fuel lourd

Cette source est répartie à peu près équitablement pendant l'année.

Ce qu'il faut retenir pour la combustion de fuel lourd

- Sources anthropiques principalement primaires
- Concentrations entre 1.0 et $1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pendant toute l'année
- Peu d'actions locales à mettre en place

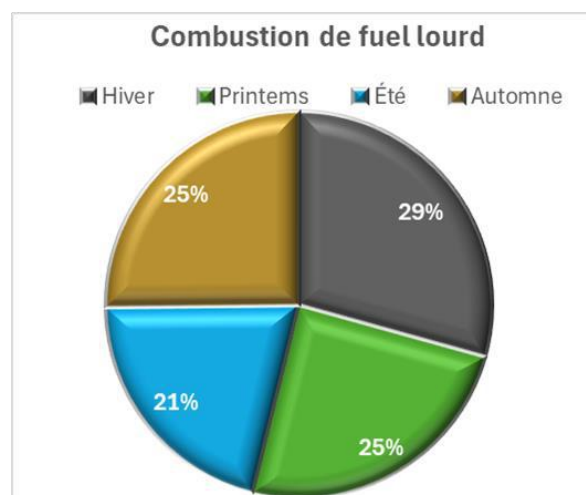


Figure 19 : Variation saisonnière de la source « Sulfate-rich et combustion de fuel lourd »

Biogénique secondaire marin et impact trafic maritime

Cette source est plus importante en été liée à l'importance des émissions biogéniques par le phytoplancton ainsi qu'avec la circulation maritime plus importante à cette période de l'année. Le rayonnement solaire favorise les émissions et l'oxydation photochimique du DMS.

Ce qu'il faut retenir pour la source biogénique secondaire marin et impact trafic maritime

- Sources naturelles et anthropiques, majoritairement secondaire avec impact d'une source primaire
- Concentration élevée en été : 2.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne
- Peu d'actions locales à mettre en place

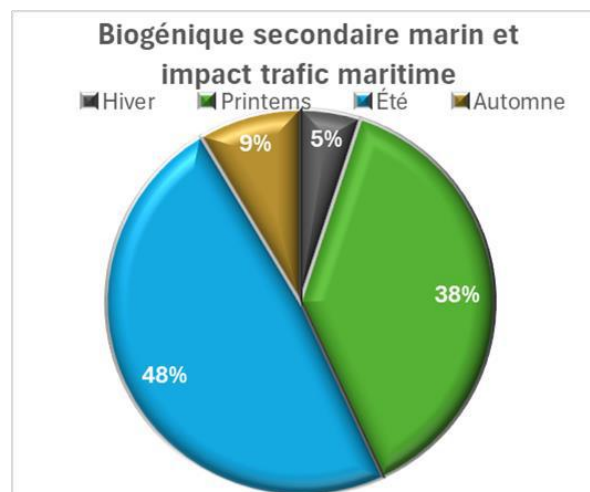


Figure 20 : Variation saisonnière de la source « Biogénique secondaire marin et impact trafic maritime »

Organique secondaire vieilli

Cette source est légèrement plus importante en été et plus faible en hiver. Ce cycle saisonnier est à relier à une activité **photochimique plus intense** liée au fort ensoleillement favorisant **l'oxydation des composés organiques**. Ce polluant présente une double origine, à la fois naturelle et anthropique, et il peut être en plus importé. Ce facteur peut être donc lié à une **masse d'air âgée** et donc dû au **transport longue distance** de masses d'air.

Ce qu'il faut retenir pour les aérosols organiques secondaires vieillis

- Polluant secondaire, formé à partir d'oxydation de composés organiques
- Sources lointaines et locales
- Concentration élevée en été : 1.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne
- Actions possibles :
 - Pour la partie importée, peu d'actions locales à mettre en place
 - Pour la partie locale, approfondir les connaissances autour des composés organiques, mettre en place les ZFE et limiter le nombre de véhicules en circulation, qui permet de réduire la contribution par la combustion du fuel fossile, poursuivre les actions visant le renouvellement des appareils de chauffage au bois qui permet de réduire la contribution par la combustion du chauffage au bois

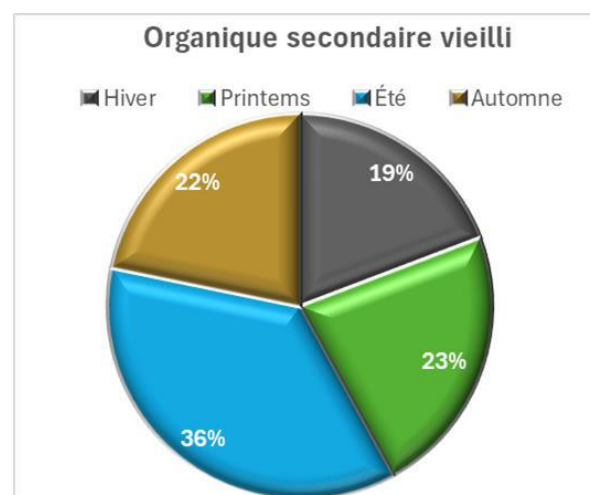


Figure 21 : Variation saisonnière de la source « Organique secondaire vieilli »

Identification des sources à partir des analyses chimiques et statistiques :

Validation de la méthode (bonne corrélation PM2.5 mesurées & modélisées)

8 Sources identifiées :

-  **5 sources primaires** (émises directement dans l'air) : industrie et poussières minérales, trafic routier, combustion de fuel lourd, combustion de biomasse, sels marins frais
 - 4 sources anthropiques
 - 1 source naturelle
-  **3 sources secondaires** (formées dans l'atmosphère à partir d'autres polluants) : nitrate-rich, biogénique secondaire marin et impact trafic maritime, organique secondaire vieilli

Leur variation saisonnière est très distincte selon leur origine et leur nature. Des actions peuvent être mises en place localement pour réduire les sources primaires.

Les sources sont analysées par la suite **au regard des direction et vitesse du vent** pour **déterminer leur origine** : locale ou lointaine

Hiver

Des sources anthropiques et locales importantes : Combustion de biomasse (34%) + trafic routier (6%) = 40% des PM2.5

 **Renouveler les appareils de chauffage au bois et limiter le trafic routier**

Printemps

Des sources secondaires (particules secondaires enrichies en nitrate d'ammonium) : en lien avec les activités agricoles (épandages printaniers) = 39% des PM2.5

-  **Limitier les émissions des espèces précurseurs (ammoniac et les sources agricoles / oxydes d'azote et les sources trafic)**
-  **Mieux évaluer la part de la contribution locale vs la contribution longue distance pour mieux estimer/évaluer les leviers**

Eté

Des sources secondaires principalement : Biogénique secondaire et impact trafic maritime (28%) + organique secondaire vieilli (21%) = 49% des PM2.5

-  **Approfondir les connaissances autour des composés organiques pour mieux estimer/évaluer les leviers**
-  **Limitier le trafic routier pour réduire la contribution par la combustion du fuel fossile,**
-  **Poursuivre les actions visant le renouvellement des appareils de chauffage au bois pour réduire la contribution par la combustion du chauffage au bois**

Automne

Répartition des sources homogène : Combustion de biomasse (17%) + trafic routier (18%) + secondaire biogénique et organique (5% + 13%) + nitrate rich (11%) + industrie et combustion fuel lourd (12% + 14%)

-  **Les mesures à mettre en place : renouvellement des appareils de chauffage au bois et limiter le trafic routier**

6.2. Géolocalisation de sources

Cette section présente les **roses de pollution** réalisées par la méthode NWR (Non-parametric wind regression) pour les huit sources identifiées. Ici, la direction et la vitesse du vent sont les valeurs en moyennes journalières, qui sont calculées à partir des données horaires mesurées par la station Météo France à Lesquin.

La direction du vent signifie la direction d'où vient le vent : un vent de nord, correspond à une masse d'air qui nous arrive du secteur nord et souffle vers le sud. La direction du vent est indiquée par son abréviation : N (direction du vent de Nord, 0°), NE (Nord-est, 45°), E (Est, 90°), SE (Sud-est, 135°), S (Sud, 180°), SW (Sud-ouest, 225°), W (Ouest, 270°) et NW (Nord-ouest, 315°).

La vitesse du vent est indiquée dans les rayons du cercle, en fonction de la distance du centre, qui correspond à 0, 5, 10, 15 et 20 km/h. Tous les vents de plus de 20 km/h sont classés dans la catégorie 20 km/h et plus. Quand la vitesse du vent est très faible (0-5 km/h), la direction du vent reste peu représentative.

L'échelle de la concentration pour chaque facteur n'est pas identique, elle varie en fonction de la concentration moyenne de ce facteur (par exemple, 0-4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour la combustion de la biomasse contre 0-7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour nitrate-rich). La couleur de l'échelle correspond à la concentration massique ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de cette source : le rouge correspond à la concentration la plus élevée et le bleu à la plus faible.

66

Guide de lecture d'une rose de pollution

- La rose de pollution associe une concentration mesurée à une direction et une vitesse de vent
- Les directions sont indiquées en abréviation, c'est la direction d'où vient le vent,
- La vitesse des vents est indiquée en km/h par les cercles concentriques par pas de 5km/h,
- Les couleurs indiquent la concentration de la source : du bleu au rouge respectivement pour des concentrations minimales à maximales.
- L'échelle varie selon la source
- Une tâche rouge au centre du graphique indique une contribution locale importante ; une tâche rouge en périphérie du graphique indique une contribution lointaine importante

99

De plus, une **analyse combinée avec les rétrotrajectoires** a été faite pour les sources identifiées comme lointaines. Plusieurs méthodes sont souvent utilisées pour évaluer le transport des polluants atmosphériques à longue distance⁹. Elles associent les concentrations mesurées avec les rétrotrajectoires et le temps de résidence des masses d'air, qui permettent de définir l'origine géographique des polluants observés sur un site récepteur. Dans cette étude, la méthode CWT (Concentration-Weighted Trajectory) a été utilisée (plus de détails en Annexe 5).

En résumé, les principales sources des particules PM2.5 à la MEL peuvent être classées en 3 catégories selon des analyses des vents et de rétrotrajectoire : 2 sources locales (combustion de la biomasse, trafic routier primaire), 2 sources principalement lointaines (sels marins frais et biogénique secondaire marin avec impact trafic maritime), et 4 sources mélangées (locale et lointaine : nitrate-rich, industrie et poussières minérales, organique secondaire vieilli et combustion de fuel lourd).

⁹ Zoë L. Fleming, Paul S. Monks, and Alistair J. Manning, "Review: Untangling the Influence of Air-Mass History in Interpreting Observed Atmospheric Composition," *Atmospheric Research* 104–105 (February 1, 2012): 1–39, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.09.009>.

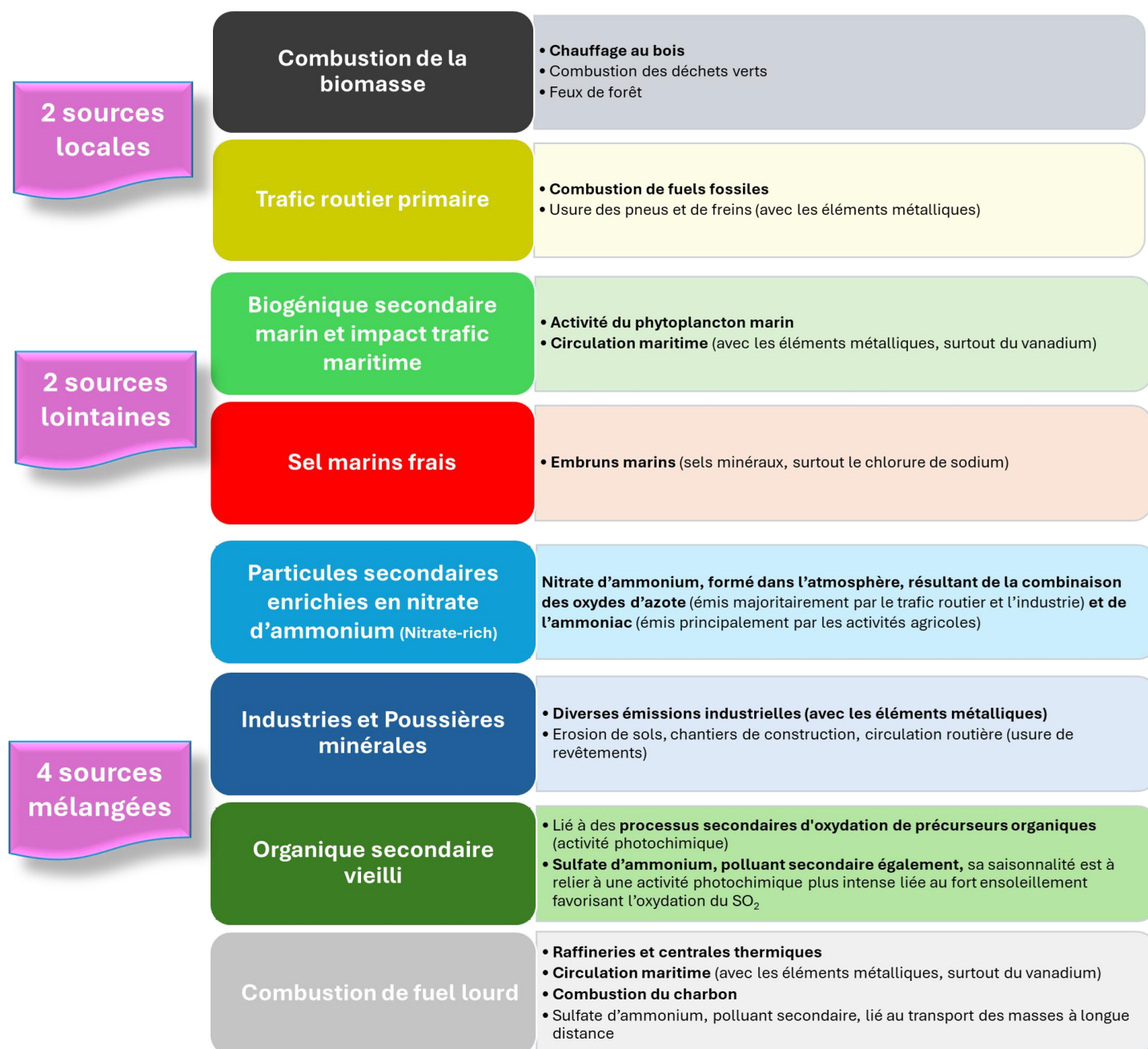


Figure 22 : Sources géographiques des particules PM2.5 à la MEL

☐ Sources locales (2)

La combustion de la biomasse et le trafic routier primaire montrent que leurs concentrations élevées sont associées aux faibles vitesses du vent (5 - 10 km/h). Au-delà de 10 km/h, les concentrations sont négligeables pour ces deux sources.

En conséquence, ces deux sources sont considérées comme d'origines locales.

Des actions locales sur ces sources permettront de réduire leur concentration.

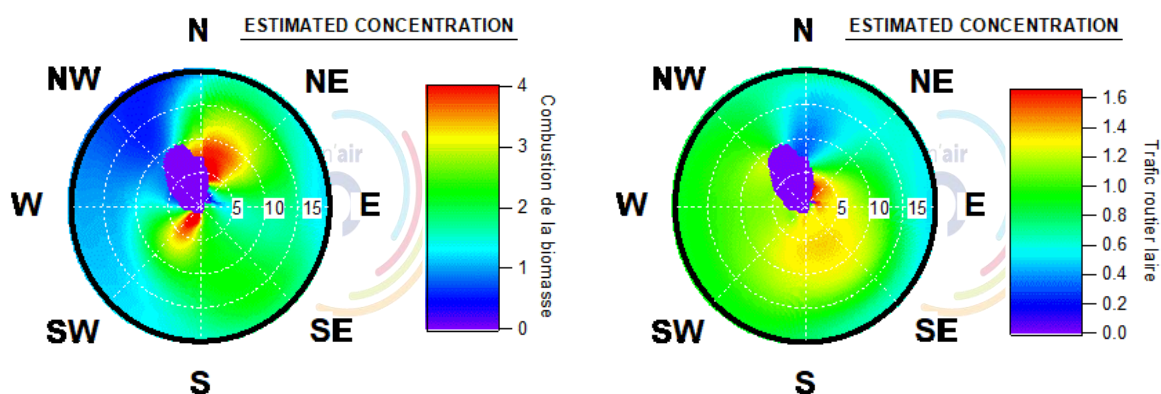


Figure 23 : Rose de pollution pour 2 sources locales : combustion de biomasse (gauche) et trafic routier primaire (droite) (échelles variables)

☐ Sources lointaines (2)

Le facteur « Biogénique secondaire marin et impact trafic maritime » montre des concentrations élevées dans les directions de Nord-Ouest à Est.

Les **sels marins frais** sont présents avec le vent fort (> 20 km/h) dans la direction de l'Ouest. Une trace des concentrations hautes se trouve également dans la direction Est. Il n'existe pas de source locale sur la métropole pour ce facteur, ce qui est cohérent avec sa source d'origine : les embruns marins. Les traces des sel venants de la direction Est peuvent être expliquées par une source secondaire caractérisée par des masses d'air plus âgées, qui peuvent effectivement venir de toutes de directions.

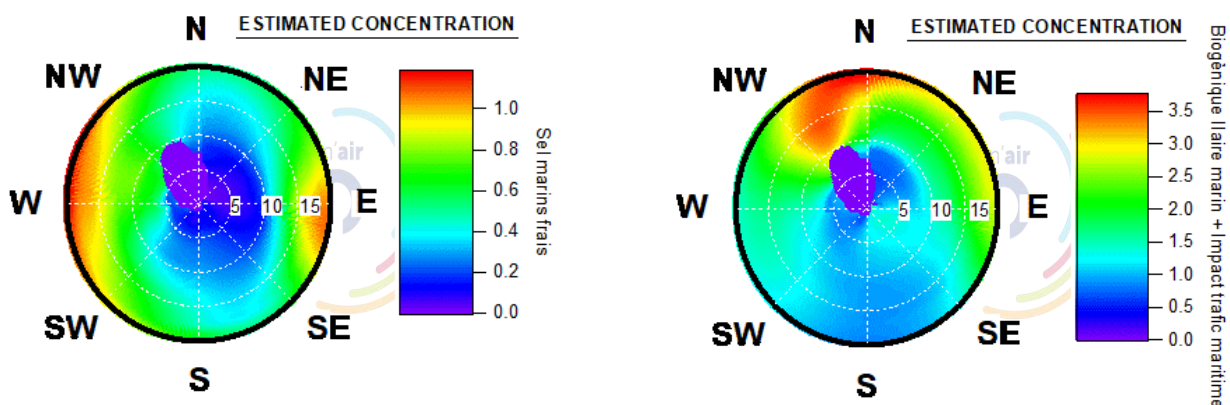


Figure 24 : Rose de pollution pour les 2 sources lointaines : sels marins frais (gauche) et Biogénique secondaire marin avec un impact du trafic maritime (droite) (échelles variables)

Ces 2 sources sont considérées comme des sources lointaines, une analyse combinée avec les rétrotrajectoires est présentée ci-dessous.

Selon le rapport du IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), les sels marins représentent une émission de 3 300 Tg/an, des océans vers l'atmosphère à l'échelle mondiale.

Les sels marins frais observés sur le territoire de la MEL proviennent majoritairement de **de la Mer Celtique et de l'océan Atlantique nord**. Ces observations sont cohérentes avec d'autres études¹⁰¹¹.

En ce qui concerne les **aérosols biogéniques secondaires** marins avec l'impact du trafic maritime, ce facteur provient majoritairement **de la Mer du Nord** une zone bien connue pour son activité phytoplanctonique intense, notamment en été¹⁰. L'impact du trafic maritime est également mis en évidence dans le graphique, en lien avec la présence du port de Rotterdam et, de manière moins marquée, au nord de Dunkerque (nord-ouest du site de Tourcoing).

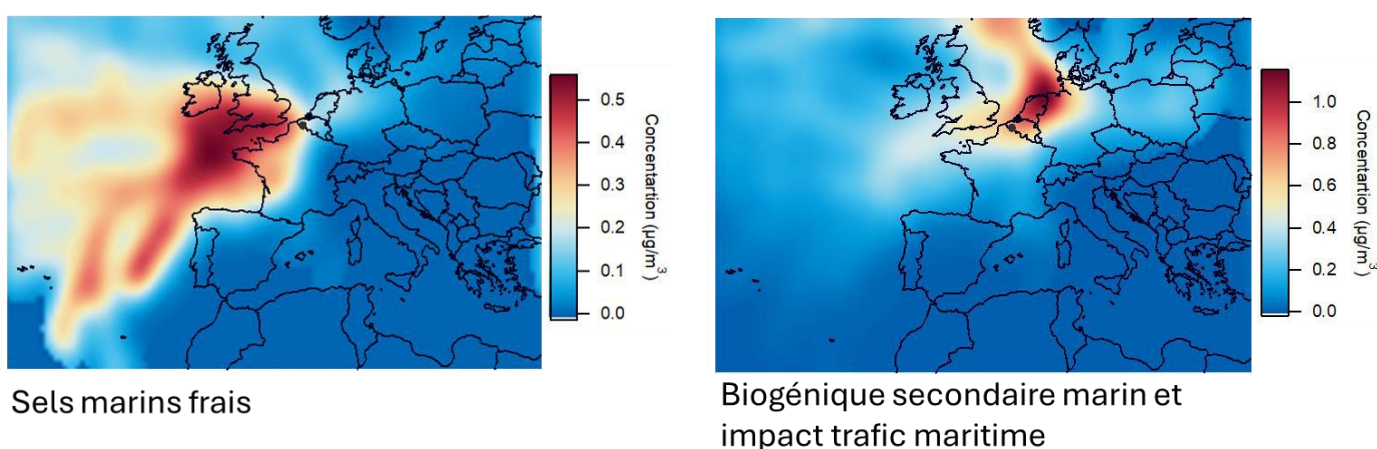


Figure 25 : Carte d'origine géographique des sources Sels marins frais et Biogénique secondaire marin et impact maritime.

▣ Sources mélangées (4)

Le **Nitrate-rich** montre des concentrations élevées dans les directions de Nord à Est (N-NE-E). Cette source montre aussi une concentration très importante avec les vents faibles (<5 km/h) du secteur Sud à Sud-Est. Pour rappel, cette source est dominée par le composé nitrate d'ammonium, qui se forme dans l'atmosphère par réaction entre l'ammoniac, et les oxydes d'azote. En Hauts-de-France, elles sont particulièrement présentes au printemps, lors des périodes d'épandages agricoles. En résumé, cette source peut être **formée à l'échelle régionale mais également être transportée sur le territoire de la MEL** par les masses d'air chargées. Elle combine donc des sources régionales et des sources éloignées.

La source liée aux **industries et aux poussières minérales** représente un niveau de fond ($\sim 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) dans la moitié nord. Les concentrations plus élevées ($\sim 3\text{--}4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se trouvent avec les vents modérés ($\sim 10\text{km}/\text{h}$). Cette source est un mélange de poussières anthropiques (érosion du sol, chantiers et remise en suspension par le

¹⁰ Diogo Oliveira, thèses 2017 : Identification des principales sources et origines géographiques de PM10 dans le nord de la France

¹¹ A.M.M. Manders et al., "Sea Salt Concentrations across the European Continent," Atmospheric Environment 44, no. 20 (June 1, 2010): 2434–42, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.03.028>.

trafic routier) et éventuellement des éléments fréquemment observés au sein de diverses émissions industrielles. **Elle combine donc des sources locales et des sources éloignées.**

La troisième source mélangée concerne celle liée aux particules **secondaires organiques vieilles**. Comme il a été discuté sur la section 6.1, cette source est principalement issue de l'oxydation des composés organiques, souvent par photochimie dans l'atmosphère, ainsi que de processus secondaires liés aux émissions biogéniques (sources naturelles) et à la combustion de fuel fossile et de la biomasse (sources anthropiques).

Elle combine donc plusieurs sources locales potentielles ainsi que des sources éloignées.

La source liée au « **Combustion fuel lourd** » montre des concentrations élevées dans les directions de Nord-Ouest à Est, mais aussi dans une moindre intensité, du secteur sud-ouest. Ce facteur est lié principalement aux émissions de **raffineries et les centrales thermiques** et de la **circulation maritime**, mais aussi aux masses transportées (sous forme sulfate d'ammonium).

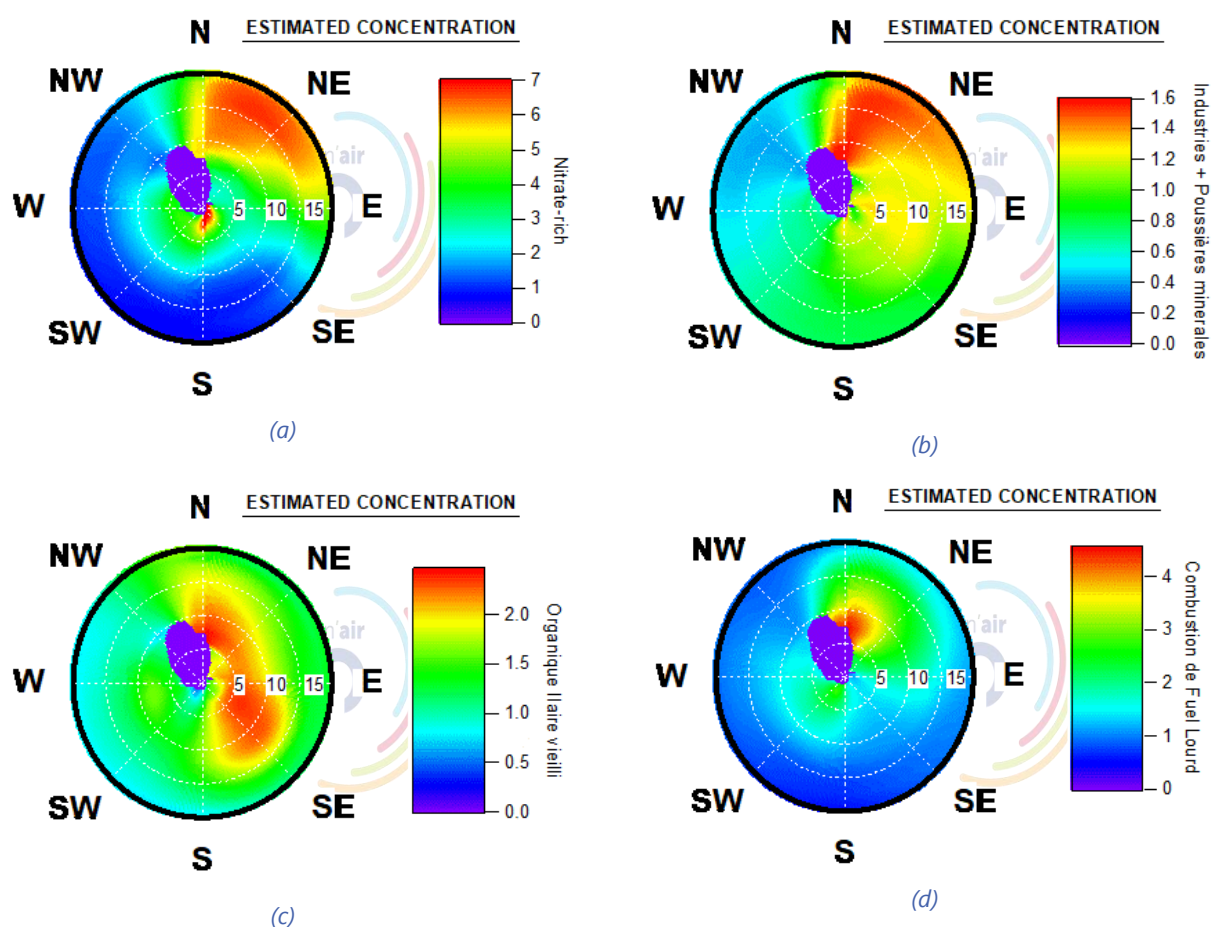


Figure 26 : Rose de pollution pour quatre sources mélangées : (a) nitrate-rich, (b) industrie et poussières minérales (c) organique secondaire vieilli et (d) combustion de fuel lourd.

Ces 4 sources sont considérées comme des sources mélangées, une analyse combinée avec les rétrotrajectoires est présentée ci-dessous.

Les concentrations les plus élevées de **Nitrate-rich** (lié aux particules inorganiques secondaires, SIA) proviennent principalement de la zone **Benelux, et l'est de l'Allemagne**. Le facteur **industrie et poussières minérales** montre aussi une origine de cette direction, parmi d'autres (**Pologne**). Ces pays utilisent massivement du **charbon dans la production d'énergie primaire**. Ces installations peuvent produire de grandes quantités de **d'oxydes d'azote NO_x et de dioxyde de soufre SO₂**, qui ensuite réagissent avec le gaz **ammoniac NH₃** dans l'atmosphère pour former les **particules secondaires** (comme le nitrate d'ammonium

NH_4NO_3). Ces particules inorganiques secondaires peuvent être **transportées** par les masses d'air continentales sur **de longues distances**, comme pour certains métaux observés dans ce facteur. Le **nitrate d'ammonium** peut, néanmoins, être **formé localement** (à l'échelle régionale), notamment en **période d'épandage (printemps)**.

Les **métaux, ainsi que les fuels lourds**, sont également **émis localement** par l'activité industrielle du secteur Dunkerquois, ce qui marque les concentrations élevées (coloration orange/rouge) de ce secteur pour les facteurs « **Industrie et poussières minérales** » et « **Combustion de fuel lourd** ». Les concentrations élevées de ces deux facteurs sont aussi observées sous le secteur de l'Europe de l'Est.

Finalement, la source liée aux particules **organiques secondaires vieillis** (SOA) provient principalement de la **Pologne**, potentiellement en lien avec l'utilisation du charbon dans la production d'énergie primaire. Ce facteur montre aussi une origine plus locale, en lien avec **l'oxydation des composés organiques émis localement**.

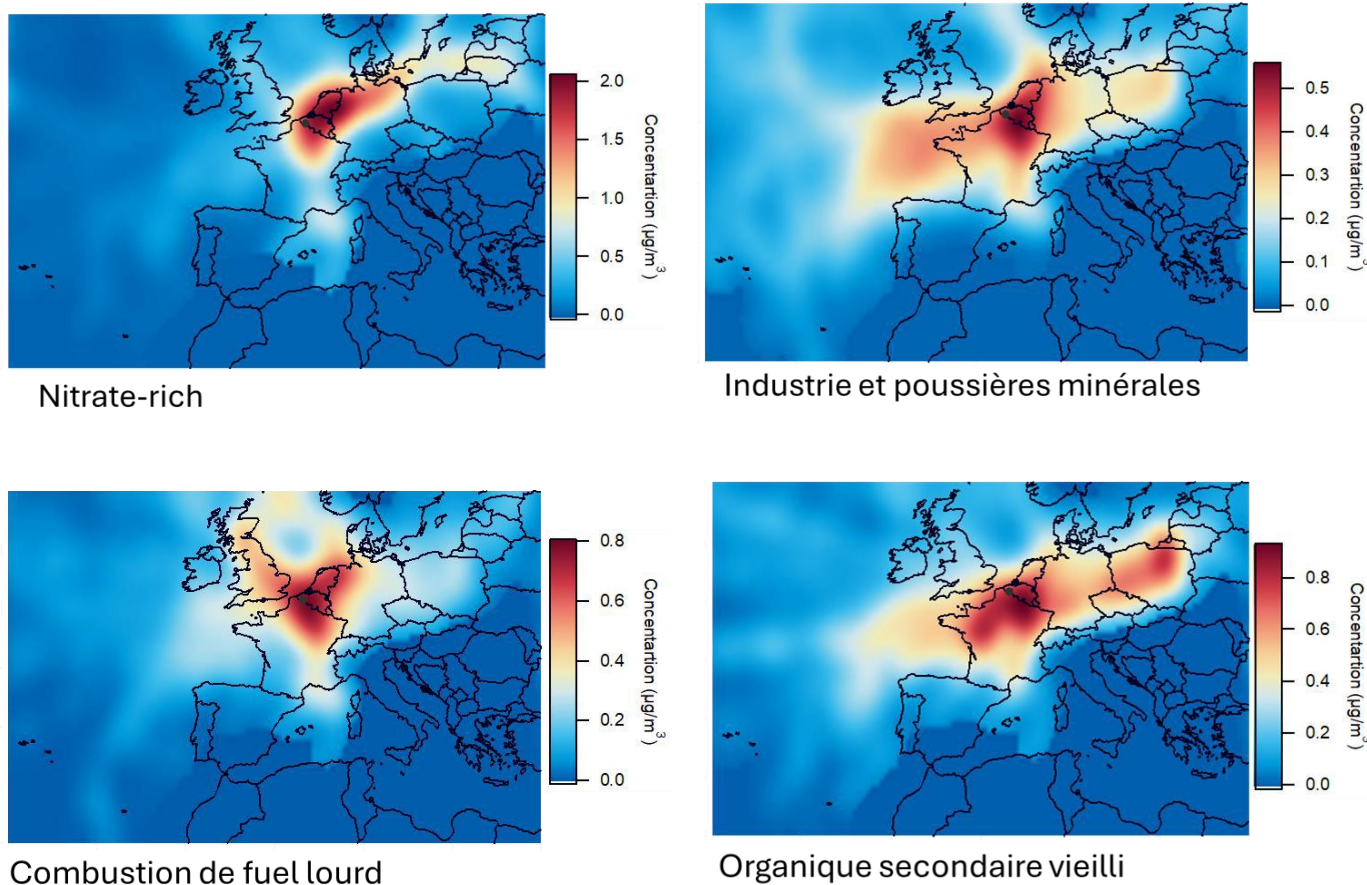


Figure 27 : Carte d'origine géographique des sources Nitrate-rich, Organique secondaire vieilli, Combustion de fuel lourd, et d'industrie et poussières minérales

Les sources principales des particules PM2.5 sur la MEL peuvent être classées en 3 catégories selon l'analyse des vents et des retro-trajectoires :

 **2 sources locales** (combustion de la biomasse et trafic routier primaire)

 **2 sources lointaines** (sels marins frais et biogénique secondaire marin avec impact trafic maritime).

- La Mer Celtique et l'océan Atlantique Nord sont l'origine de sels marins frais
- La Mer du Nord pour les particules biogéniques secondaires.
- L'impact du trafic maritime est observé sur la Mer du Nord, ainsi qu'au nord du secteur Dunkerquois.

 **4 sources mélangées** (locale et lointaine : nitrate-rich, industries et poussières minérales, combustion du fuel lourd et organiques secondaires vieillis). Plusieurs secteurs lointains ont été identifiés :

- La zone Benelux et l'Europe de l'Est,
- Impact légèrement plus important de l'est de l'Allemagne et la Pologne pour le facteur « industries et poussières minérales » et les particules « organiques secondaires vieillis »

6.3. Potentiel Oxydant

6.3.1. Evolution temporelle et saisonnière du PO

Les mesures de PO ont été réalisées sur l'ensemble de la campagne de mesure dans la métropole de Lille, qui a eu lieu d'avril 2023 à avril 2024.

La figure suivante montre les évolutions des mesures de PO par unité de volume d'air sur l'ensemble de la période, en comparaison avec les mesures de masse des PM_{2.5}.

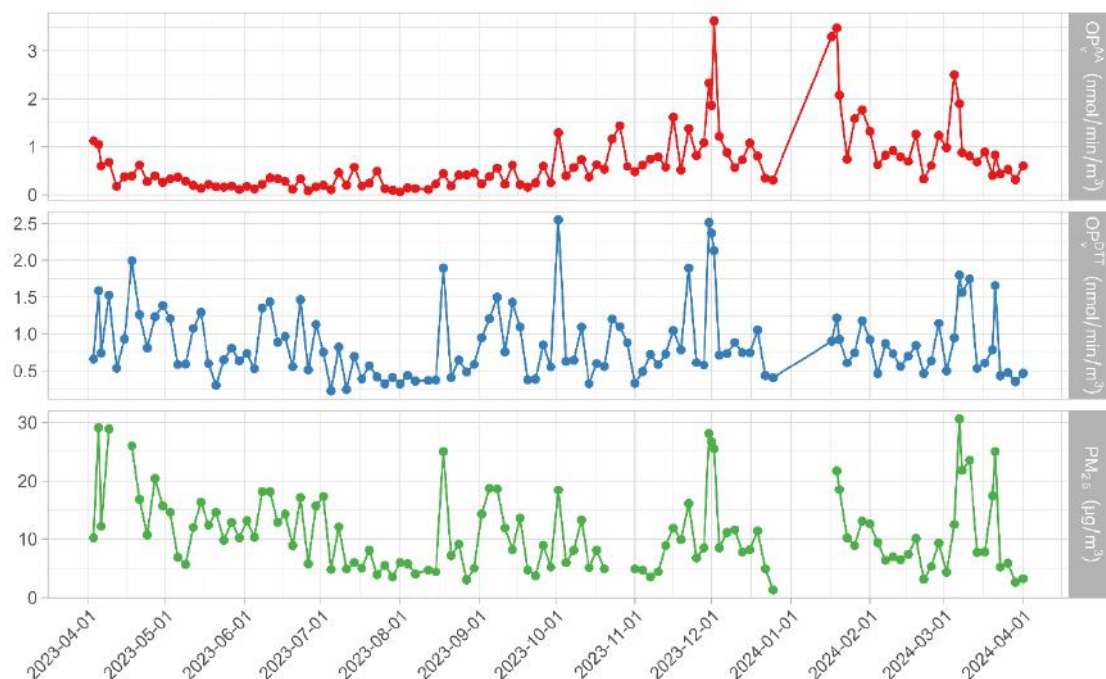


Figure 28. Evolution temporelle du PO_V^{AA}, PO_V^{DTT} et de la concentration massique des PM_{2.5} en µg/m³ sur le site de Lille Métropole.

Cette figure ne montre pas de variabilité saisonnière marquée pour le PO_V^{DTT}, avec des évolutions qui sont très similaires à celles des PM_{2.5}. Cependant, le PO_V^{AA} montre des valeurs plus hautes en période froide (période novembre – avril) par rapport à la période chaude, comme détaillé sur la Figure 29 qui présente les moyennes et la variabilité sur ces 2 périodes pour ces mesures.

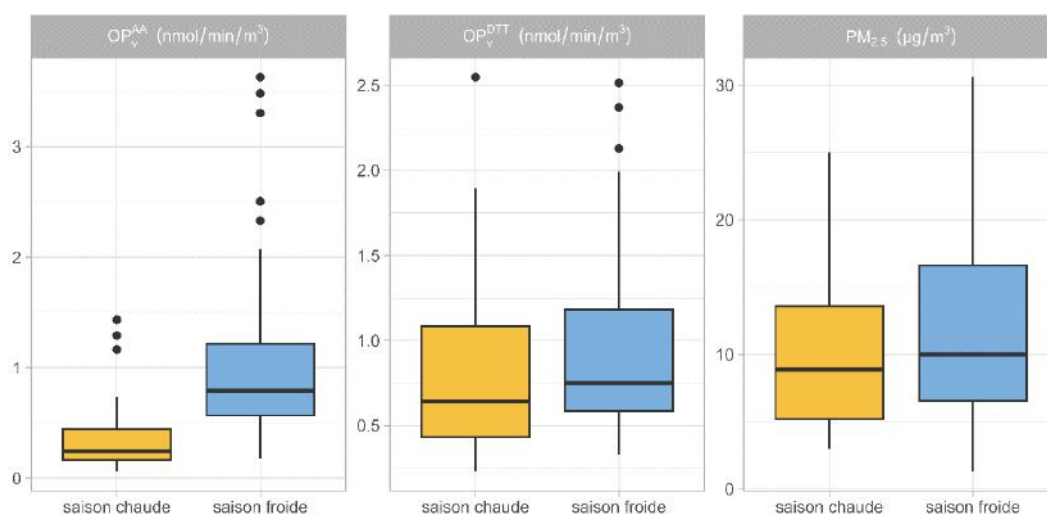


Figure 29. Comparaison des niveaux de PO_V^{AA}, PO_V^{DTT} et PM_{2.5} en fonction de la saison. NB : saison chaude = mai, juin, juillet, août, septembre, octobre ; saison froide = novembre, décembre, janvier, février, mars, avril.

Le PO_v^{DTT} (PO_v représente l'exposition humaine par inhalation de l'air échantillonné) **varie** donc **au cours de l'année sous l'influence des évolutions des concentrations massiques des PM**, avec un PO intrinsèque (PO_m représente la réactivité spécifique des particules de l'échantillon d'air), qui évolue peu. En revanche, la variabilité du PO_v^{AA} indique que cette mesure **est influencée par un changement de nature des particules en période froide**, qui sont plus oxydantes à cette période. Ces observations sont confirmées par la figure 30 qui montre les PO intrinsèques moyens sur les 2 périodes pour les 2 tests. Cette observation est à rapprocher des évolutions des sources d'émissions des PM, qui font varier la composition chimique globale dans l'atmosphère aux cours des saisons (section 6.3.2).

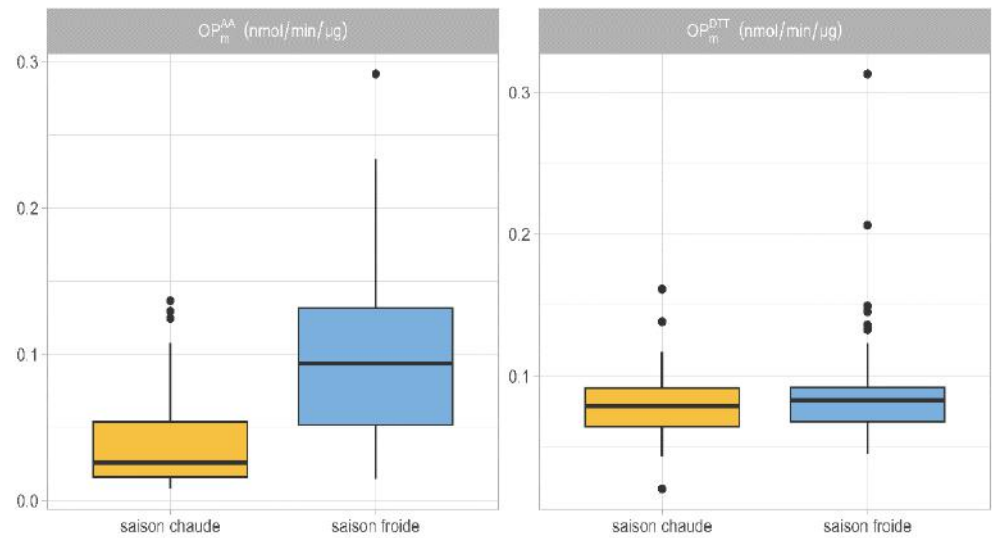


Figure 30 : Comparaison des niveaux de PO_m^{AA} et PO_m^{DTT} en fonction de la saison. NB : saison chaude = mai, juin, juillet, août, septembre, octobre ; saison froide = novembre, décembre, janvier, février, mars, avril.

Bien qu'il n'existe actuellement pas de valeurs seuil pour le potentiel oxydant, la base de données de l'IGE permet de comparer les niveaux de PO_v^{AA} et PO_v^{DTT} mesurés à Lille par rapport aux valeurs typiques du PO des $PM_{2.5}$ mesurés dans différentes typologies de sites (Figure 31). La plupart des analyses réalisées à l'IGE sont faites sur la fraction PM_{10} , mais seize sites appartenant à cinq typologies différentes (total d'environ 3000 échantillons) ont été analysés dans les $PM_{2.5}$ (Tableau 1), durant a minima une année complète, et parfois plusieurs années complètes (Bern, Barcelone, Paris, Zurich, Magadino, OPE).

Tableau 1. Détail des sites et typologies de la base de données du PO des $PM_{2.5}$ de l'IGE.

Typologies	Sites	Nombre d'échantillons
Vallée Urbaine	Sarajevo	103
Trafic	Bern	644
Urbain	Zurich, Barcelone, Lille, Paris (LCPP), Paris (Les Halles), Athènes, Budapest	1656
Vallée rurale	Magadino	153
Péri-urbain	Basel	90
Rural	Payerne, Montseny, OPE, Peyrusse, Revin	423

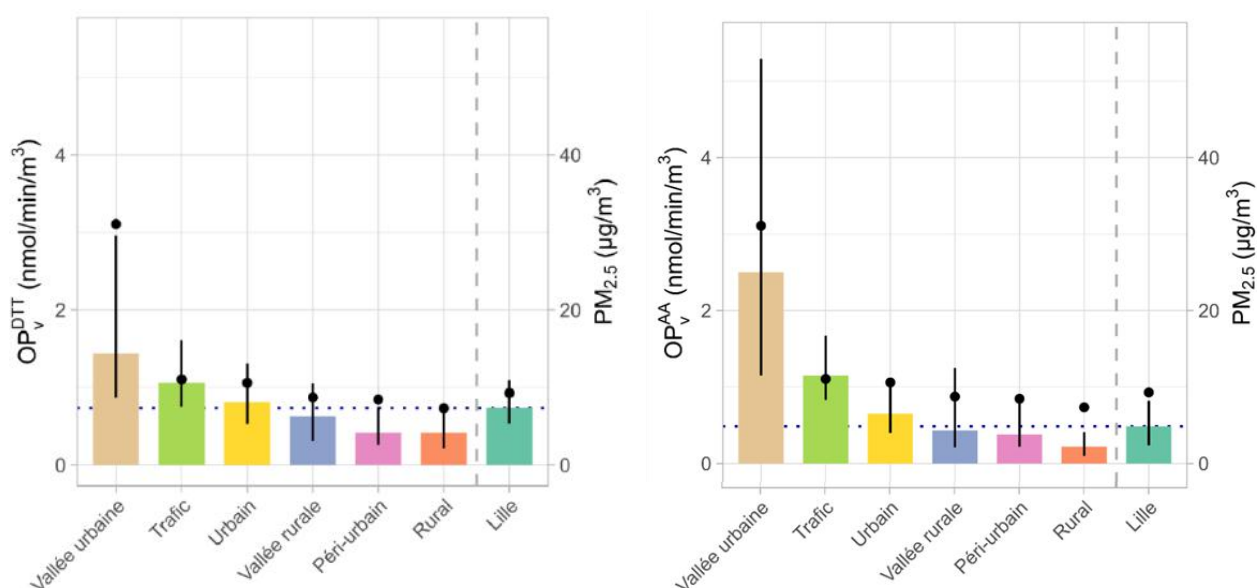


Figure 31 : Comparaison des mesures médianes de la concentration massique et des médianes (Q1-Q3) du PO_v^{AA} et PO_v^{DTT} de Lille par rapport aux valeurs obtenues dans différentes typologies de sites. Les valeurs médianes des concentrations massiques des $PM_{2.5}$ associées sont indiquées par les points et l'échelle de droite. NB : Vallée urbaine = 1 site ; Trafic = 1 site ; Urbain = 7 sites ; Vallée rurale = 1 site ; Péri-urbain = 1 site ; Rural = 5 sites

Les valeurs médianes (avec leurs valeurs des quartiles Q1-Q3) obtenues à Lille sont de 0.49 et 0.74 nmol/min/m³, respectivement pour le PO_v^{AA} et le PO_v^{DTT} . Les niveaux de PO_v^{AA} sont donc légèrement plus faibles que ceux obtenus dans les sites urbains classiques (0.65 nmol/min/m³), et plutôt comparables aux niveaux obtenus dans une vallée rurale (0.43 nmol/min/m³).

Les niveaux de PO_v^{DTT} sont quant à eux comparables à ceux obtenus dans des sites urbains classiques (0.81 nmol/min/m³). La Figure 31 montre également que, même si les concentrations médianes de $PM_{2.5}$ sont similaires sur les sites de type trafic et à Lille (proches de 10 µg/m³ en moyenne annuelle), les niveaux de PO_v^{AA} mettent en valeur une activité oxydante plus de deux fois supérieures sur des sites de type trafic que sur ce site dans la métropole de Lille. Cette constatation indique que la composition des PM, induites par les différentes sources d'émissions, peut faire varier le PO de façon importante à masses de PM égales.

6.3.2. Les sources des particules responsables du PO

Ainsi, il est maintenant possible **d’attribuer les contributions de PO apportées par chacune des sources de particules**. La méthode pour réaliser cette attribution du PO aux différentes sources a été décrite et développée dans de nombreuses publications de l’IGE¹², ainsi que dans des documents à destination des instances européennes en vue de l’intégration des mesures de PO dans la nouvelle directive sur la Qualité de l’air de 2024 (« Service Tools » RI Urbans, 2024¹³).

Ces méthodes mathématiques se basent donc sur les données obtenues par méthode PMF sur la contribution des différentes sources à la masse des PM, et visent en attribuer un PO intrinsèque à chacune des sources par des méthodes d’inversion qui permettent de reconstituer la série annuelle de mesures du PO. Le PO intrinsèque est calculé à l’aide de divers modèles statistiques, le meilleur modèle étant choisi en comparant la précision de chacun des modèles. Ce processus permet d’assurer la robustesse de l’identification du PO intrinsèque de chaque source. Appliquée à la série de CAMEL, cette méthode conduit aux résultats présentés sur le tableau 2 et la figure 32.

Tableau 2. POAA et PODTT intrinsèques à Lille et aux 15 sites en France (moyenne ± écart type)¹¹

	PO ^{AA} intrinsèque		PO ^{DTT} intrinsèque	
	Lille	15 sites Français*	Lille	15 sites Français*
Biogénique secondaire marin	-0.04	-0.02 ± 0.09	0.06	0.13 ± 0.3
Combustion de la biomasse	0.27	0.2 ± 0.1	0.10	0.13 ± 0.06
Nitrate-rich	0.01	0.01 ± 0.05	0.07	0.04 ± 0.05
Organique secondaire vieilli	0.003	x	0.06	x
Poussières minérales - Industrielle	0.06	0.04 ± 0.07	0.05	0.12 ± 0.06
Sels marins frais	0.04	0.06 ± 0.07	0.08	0.09 ± 0.17
Combustion de fuel lourd	0.03	0.01 ± 0.02	0.02	0.08 ± 0.08
Trafic routier primaire	0.07	0.16 ± 0.01	0.08	0.22 ± 0.07
* Nogent sur Oise, Talence, Aix-en-Provence, Marseille, Nice, Grenoble-urban background, Grenoble – peri urban, Grenoble-Hyper center, Chamonix, Marnaz, Passy, Port-de-Bouc, Roubaix, Strasbourg				

Le tableau 2 montre le PO intrinsèque (PO_m, représentant la réactivité spécifique des particules de l’échantillon d’air) de chacune des sources de particules à Lille et, pour comparaison avec la moyenne obtenue pour 15 sites de fond urbain en France (moyenne ± écart type). Le PO intrinsèque des sources à Lille est bien compris dans la fourchette du PO intrinsèque moyen des 15 sites en France, à l’exception de celui de la source « trafic » pour les 2 tests. Il est important de noter que les études menées sur 15 sites en France portent sur la fraction PM₁₀, alors qu’à Lille, c’est la fraction PM_{2.5} qui est prise en compte. La différence observée pour le PO intrinsèque du trafic est possiblement due au fait que les émissions indirectes véhiculaires liées au freinage (qui contiennent

¹² Weber S, Uzu G, Calas A, Chevrier F, Besombes JL, Charron A, Salameh D, I Jezek, Mocnik G, and Jaffrezo JL (2018) An apportionment method for the oxidative potential of atmospheric particulate matter sources: application to a one-year study in Chamonix, France. *Atmos. Chem. Phys.*, <https://doi.org/10.5194/acp-18-9617-2018>

Borlaza LJ, Weber S, Jaffrezo JL, Houdier S, Slama R, Rieux C, Albinet A, Micallet S, Trébuchon C, and Uzu G (2021) Disparities in PM₁₀ origins and oxidative potential at a city-scale (Grenoble, France) - Part II: Sources of PM₁₀ oxidative potential using multiple linear regression analysis and the predictive applicability of multilayer perceptron neural network analysis. *Atmos. Chem. Phys.*, 10.5194/acp-21-9719-2021
Weber S, Uzu G, Favez O, Borlaza L, Calas A, Salameh D, Chevrier F, Allard J, Besombes JL, Albinet A, Pontet S, Meshbah B, Gille G, Zhang S, Pallares C, Leoz-Garziandia E, and Jaffrezo JL (2021) Source apportionment of Oxidative Potential of atmospheric PM₁₀: synthesis of 15 yearly time series in urban areas in France. *Atmos. Chem. Phys.*, 10.5194/acp-2021-77

Dinh Ngoc Thuy V, Jaffrezo JL, Hough I, Dominutti PA, Salque G, Gilles G, Francony F, Patron-Anquez A, Favez O, and Uzu G (2024) Unveiling the optimal regression model for source apportionment of the oxidative potential of PM. *Atmos. Chem. Phys.*, 10.5194/egusphere-2024-361

¹³ https://riurbans.eu/wp-content/uploads/2024/11/ENV_GUIDANCE-DOCUMENT_ST4_OP_Definitive.pdf et https://riurbans.eu/wp-content/uploads/2024/08/ST11_SA_BC_UFP-PNSD_OP-VOCs.pdf (rédigés principalement par l’IGE pour la partie PO)

des métaux et conditionnent donc en grande partie les valeurs de PO) se trouvent principalement dans la fraction grossière (entre $PM_{2,5}$ et PM_{10}).

En principe, le PO intrinsèque des sources est assez homogène entre les sites en France, ce qui montre que **la réactivité spécifique des sources de PM est assez homogène à l'échelle nationale**. De même que pour les autres sites en France, le PO intrinsèque de la source « combustion de la biomasse » à Lille est le plus élevé, pour les 2 tests (0.27 et 0.1 nmol/min/ μ g pour le PO^{AA} et PO^{DTT} , respectivement). La seconde source la plus importante est celle du trafic routier primaire, avec 0.06 et 0.08 nmol/min/ μ g pour le PO^{AA} et PO^{DTT} , respectivement, alors que les particules inorganiques secondaires peuvent aussi être considérées comme un contributeur important (0.16 nmol/min/ μ g pour le PO^{DTT}). Par conséquent, à Lille comme ailleurs en France, **la source de la combustion de la biomasse et celle du trafic routier primaire, ainsi que les aérosols inorganiques secondaires sont les plus oxydantes pour les poumons par unité de masse émise**. Ces résultats doivent ensuite être pondérés par la concentration moyenne de chaque source sur l'année.

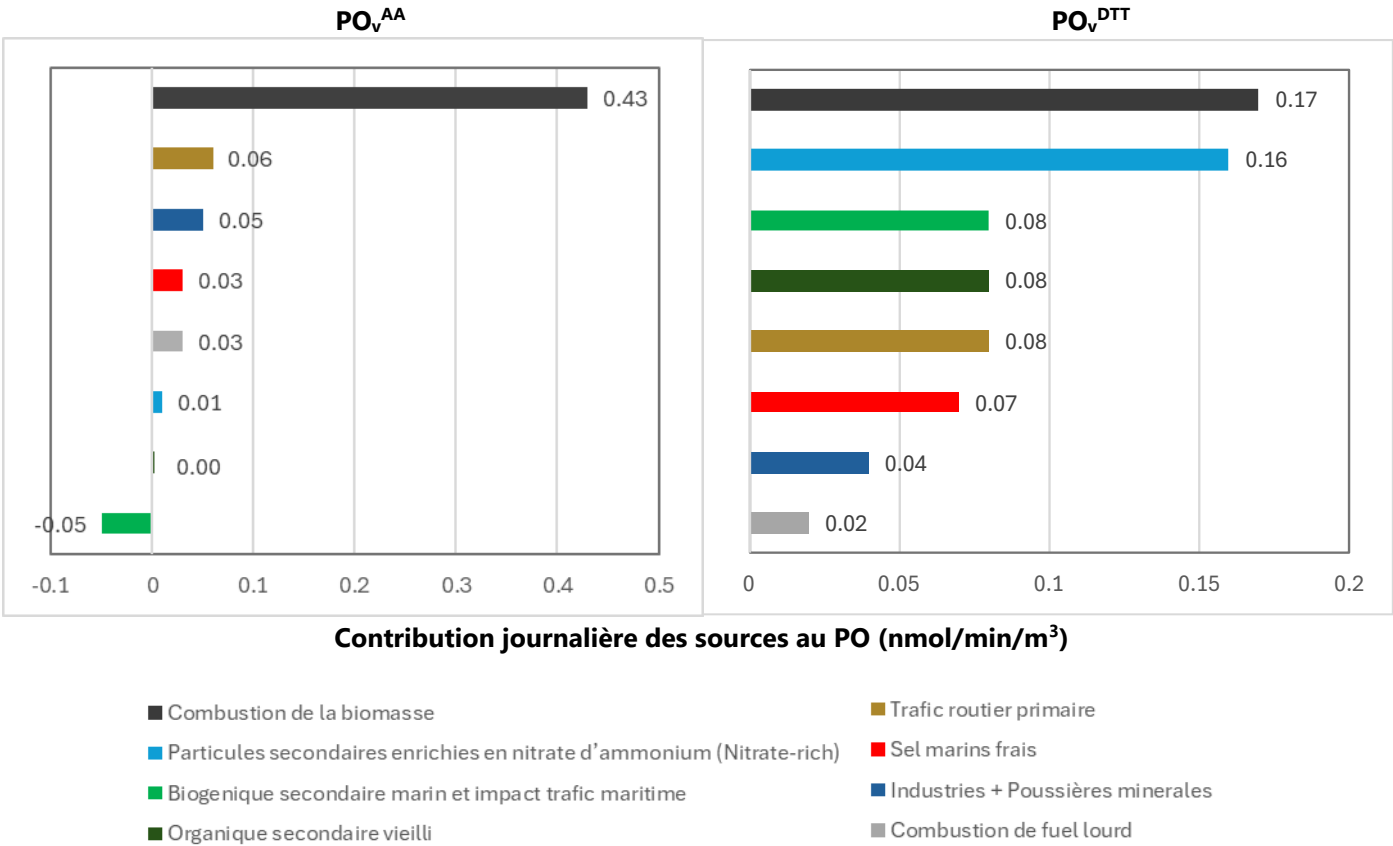


Figure 32 : Contribution moyenne et variabilité (95% d'intervalle de confiance) sur l'année des différentes sources d'émission des PM aux PO^{AA} et PO^{DTT} volumique à Lille.

La Figure 32 montre la contribution journalière moyenne des sources au PO^{AA} et PO^{DTT} (nmol/min/ m^3). Pour rappel, la contribution d'une source au potentiel oxydant (PO) signifie la capacité de cette source de générer un stress oxydant par m^3 d'air inhalé. Une source, dont la contribution au PO est plus importante (en utilisant l'un ou l'autre des deux tests), présente un risque plus élevé pour l'exposition de la santé.

La combustion de la biomasse contribue de manière significative aux deux tests de potentiel oxydant (PO), avec des moyennes respectives de 0,43 et 0,17 nmol/min/ m^3 pour le PO_v^{AA} et le PO_v^{DTT} . Bien que cette source soit saisonnière, son impact pondéré sur l'année reste le plus important en termes de capacité à induire un stress oxydant pulmonaire.

Lorsqu'on compare cette contribution au PO avec sa part relative dans la concentration massique, une perspective différente sur l'exposition aux sources d'émissions émerge. En effet, la contribution des sources

riches en nitrate (particules secondaires inorganiques, SIA) à la masse de PM est supérieure (21 %) à celle de la combustion de biomasse (16 %, chapitre 6.1.1). Cependant, comme mentionné, la combustion de la biomasse est la principale source de PO (tous tests confondus) avec une contribution 13 fois supérieure à celle de la source riche en nitrate pour le PO_v^{AA} , et 1,06 fois pour le PO_v^{DTT} . Cette divergence entre les contributions en termes de masse de PM et de PO souligne l'importance de combiner ces deux approches pour mieux évaluer l'exposition de la population.

Par ailleurs, sur le site de Lille, les contributions relatives des sources au PO_v^{AA} et au PO_v^{DTT} diffèrent, ce qui est possible car ses 2 familles d'anti-oxydants ne sont pas sensibles aux mêmes espèces. Alors que le PO_v^{AA} est fortement et principalement influencé par la combustion de biomasse, le PO_v^{DTT} montre une sensibilité à un éventail plus large de sources. Pour le PO_v^{AA} , les autres contributions proviennent de sources anthropiques, notamment le trafic routier primaire, les poussières minérales industrielles, et les émissions liées à la combustion de fuel lourd. À l'inverse, pour le PO_v^{DTT} , en plus des contributions significatives des sources anthropiques typiques (riches en nitrate, trafic routier primaire), des sources naturelles issues des émissions biogéniques marines secondaires ainsi que les sources organiques secondaires vieilles jouent un rôle important. En ce qui concerne les contributions biogéniques marines secondaires, qui sont rarement mentionnées dans la littérature, les résultats sont un peu surprenants et mériteraient d'être confirmés. Une hypothèse serait que cette contribution est liée plutôt à la fraction trafic maritime incluse dans ce facteur. Néanmoins, d'autres sources biogéniques primaires terrestres jouent également un rôle notable dans la génération de stress oxydant, consommant principalement l'antioxydant DTT, comme l'a déjà montré Samaké et al. (2017)¹⁴. Par ailleurs, la matière organique secondaire, étant influencée par un large éventail de sources (comme mentionné dans la section 6.1), pourrait avoir un impact sanitaire expliqué par ses différentes origines, notamment les sources anthropiques typiques.

Pour résumer, à Lille, les sources les plus promptes à créer du stress oxydant pulmonaire sont principalement d'origine anthropique (primaires ou secondaires) :

- **Chauffage au bois**
- **Particules secondaires (inorganiques et organiques)**
 - **Trafic routier**
 - **Industrie/Portuaire**

¹⁴ Samake, A., Uzu, G., Martins, J.M.F. et al. The unexpected role of bioaerosols in the Oxidative Potential of PM. *Sci Rep* **7**, 10978 (2017). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11178-0>

6.4. Actions proposées

Actions proposées / leviers :



Combustion de la biomasse : Correspond principalement au chauffage au bois résidentiel sur le territoire de la MEL.

- Poursuivre les actions visant le renouvellement des appareils de chauffage au bois.



Trafic routier : Émissions de NOx peuvent aussi contribuer localement à la formation de particules secondaires.

- Renouvellement progressif du parc automobile par des véhicules moins polluants (encouragé par des aides nationales et locales à l'achat de véhicules plus récents) pour réduire en partie les émissions de cette source.
- Limitation de l'usage de la voiture individuelle en ville via le développement de modes de transports doux (augmentation de l'offre de transport en commun, création/prolongation de pistes cyclables, incitation au co-voiturage, offre d'auto-partage...).
- Restrictions de circulation et baisses de vitesses en cas d'épisode de pollution.



Particules secondaires inorganiques (SIA), enrichis en nitrate d'ammonium : Actions à différentes échelles (européenne, nationale, expérimentation locale).

- Objectif vers une diminution de l'utilisation des engrais azotés de synthèse.
- Poursuivre la mise en place de bonnes pratiques comme l'enfouissement systématique des amendements liquides (lisiers...), l'ajustement de l'alimentation des animaux d'élevages, des pratiques d'élevages, de la gestion du stockage des déchets (couverture des fosses de lisiers...)
- Bien suivre les guides existants, comme celui de l'ADEME de 2020 (guide des bonnes pratiques agricoles pour l'amélioration de la qualité de l'air).



Particules secondaires organiques (SOA) : Actions à différentes échelles (européenne, nationale, expérimentation locale). Emissions des composés organiques.

- Approfondir les connaissances autour des sources des composés organiques.
- Réduire la contribution par la combustion du fuel fossile.
- Poursuivre les actions visant le renouvellement des appareils de chauffage au bois.



Trafic maritime et émissions industrielles : Émissions des NOx et SOx gaz qui participent au processus de formation du nitrate d'ammonium et du sulfate d'ammonium et favorisent la formation de particules en suspension associées aux SIA.

- Investissements permettant la réduction des PM, des NOx et des SOx dans le domaine de l'industrie et en particulier des secteurs du raffinage et de la production d'énergie.
- Réflexions sur la décarbonation de l'industrie.
- Utilisation de carburants de meilleure qualité comme cela est déjà le cas aux abords des ports et l'électrification progressive des quais.

6.5. Episodes de pollution

Pendant cette étude, **la valeur limite journalière des PM10 ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne journalière)** a été dépassée 2 jours (22/05/2023 et 09/09/2023) dans le département du Nord en 2023 et aucun jour en 2024. Actuellement, il n'y **pas une valeur limite pour PM2.5**, en revanche la directive de l'air de 2030 fixe une valeur de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle et une valeur de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne journalière pour 2030.

En restant alignés avec la directive actuelle, les cas de dépassement des PM10 ont été étudiés. Le dépassement concerne la journée du 22 mai 2023 dans le Dunkerquois et à Maubeuge et la journée du 09/09/2023 à Dunkerque et à Calais.

Le 22/05/2023

Le dépassement concerne la journée du 22 mai 2023 dans le Dunkerquois et à Maubeuge. Cet épisode n'a pas été prévu mais constaté le lendemain. La contribution des PM2.5 aux PM10 s'élèvent à 71%. L'étude de cet épisode de pollution montre que la hausse dans le Dunkerquois, semble isolée par rapport aux autres stations de mesures voisines. Il pourrait s'agir de particules issues d'échappements de bateaux ou d'activités de combustion près du port et/ou de formation de particules secondaires très localisée. À Maubeuge, la hausse devance fortement les mesures voisines (écart d'environ $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ avec la station voisine à Cartignies et les stations belges), cependant ces dernières observent la même tendance à la hausse. Il pourrait s'agir de formation de particules secondaires localisée sur cette région. Dans la figure suivante, on observe une part de matière organique (en vert) et nitrates (en bleu) non négligeables dans les PM1 mesurées par les différents ACSM à Reims (114 km de Maubeuge) et à Strasbourg (331 km de Maubeuge).



Figure 33 : données ACSM des AASQA, consultées le 23/05/2023

La carte du modèle PREV'AIR pour ce jour montre que cet épisode reste un phénomène à petite échelle avec l'import des masses chargées du secteur nord. Les mesures locales seraient efficaces contre ce type d'épisode printanier.

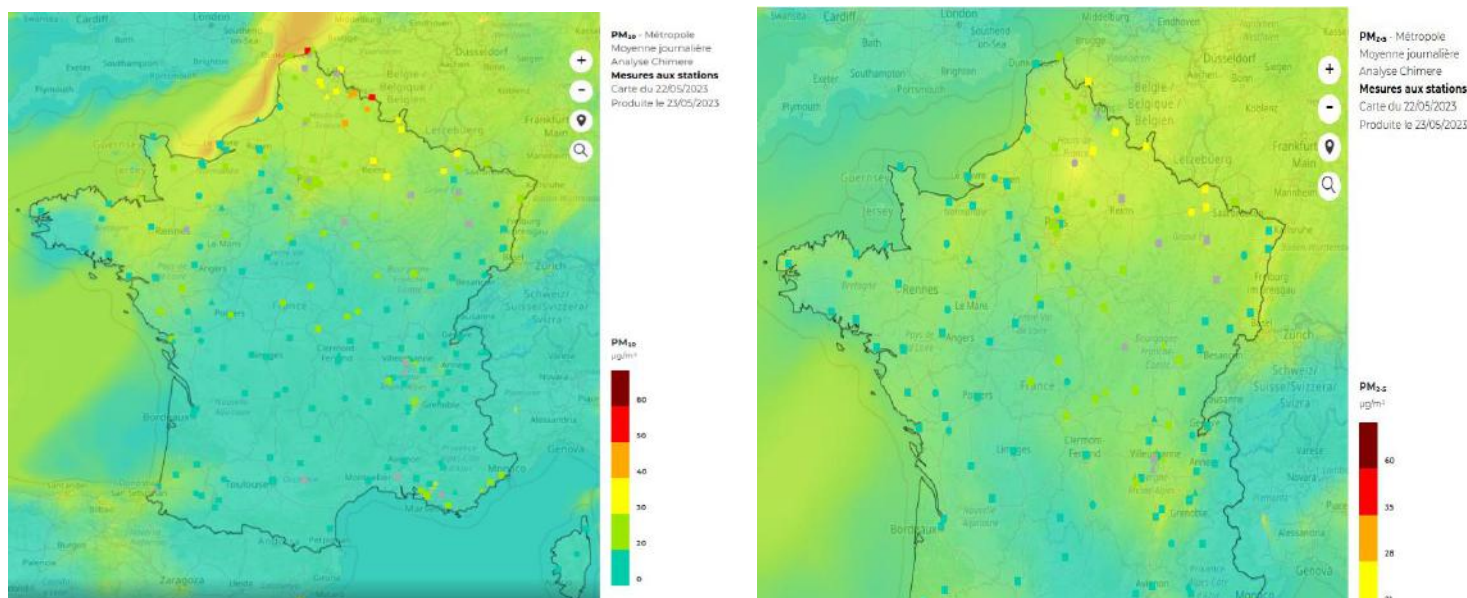


Figure 34 : Concentrations journalières en PM₁₀ et PM_{2.5} modélisées par la plateforme PREV'AIR du 22/05/2023

Ce dernier épisode n'a pas pu être analysé concernant la composition chimique des PM_{2.5} (pas de prélèvement sur filtre ce jour). Cependant, la série temporelle ainsi que les contributions de différentes sources (figures suivantes) montrent une augmentation des facteurs « Organique secondaire vieilli » (contribution 21% le 21/05/2023) et « Nitrate-rich » (contribution 28% le 21/05/2023) la veille, ainsi qu'une tendance à la hausse pour les particules biogéniques secondaires (de 30 à 37% entre 18 et 24/05/2023)

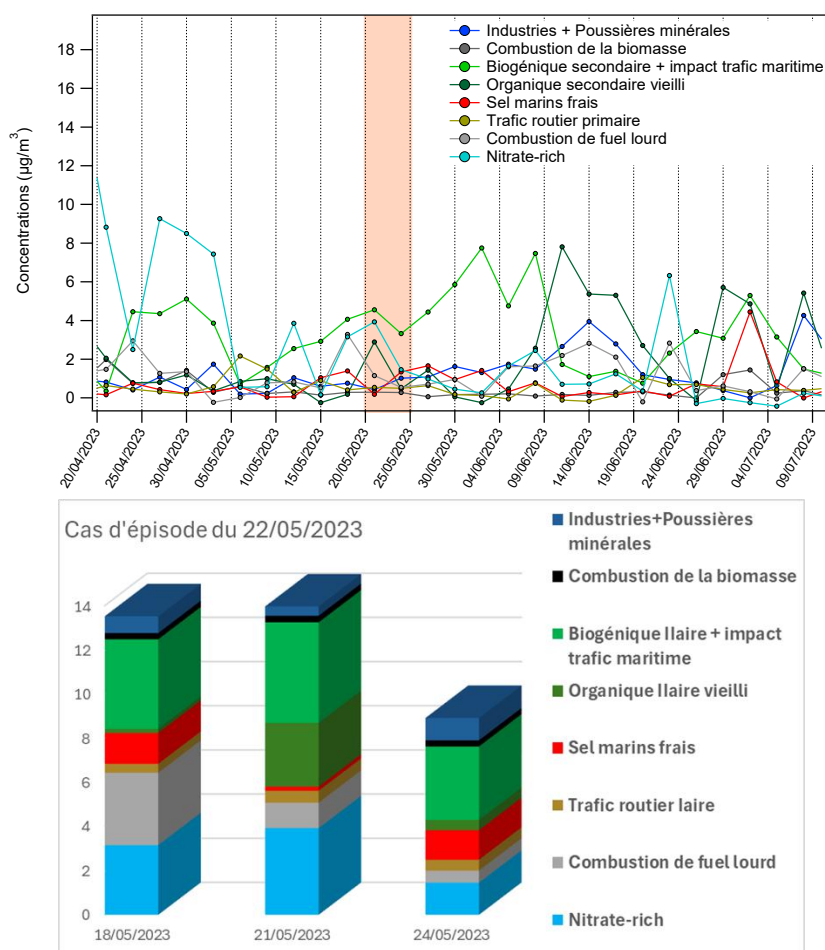


Figure 35 : Séries temporelles des différents facteurs à Lille, zoom sur la période étudiée

Le 09/09/2023

Un deuxième dépassement a été enregistré à Dunkerque et à Calais le 09 septembre 2023 (contribution 71% des PM2.5 sur PM10). En revanche, cette hausse automnale de la concentration des PM10 est due aux particules secondaires inorganiques (SIA) enrichies en nitrate d'ammonium (en bleu) ainsi que l'import de masses chargées des polluants (sulfate en rouge) de l'épisode parisien.

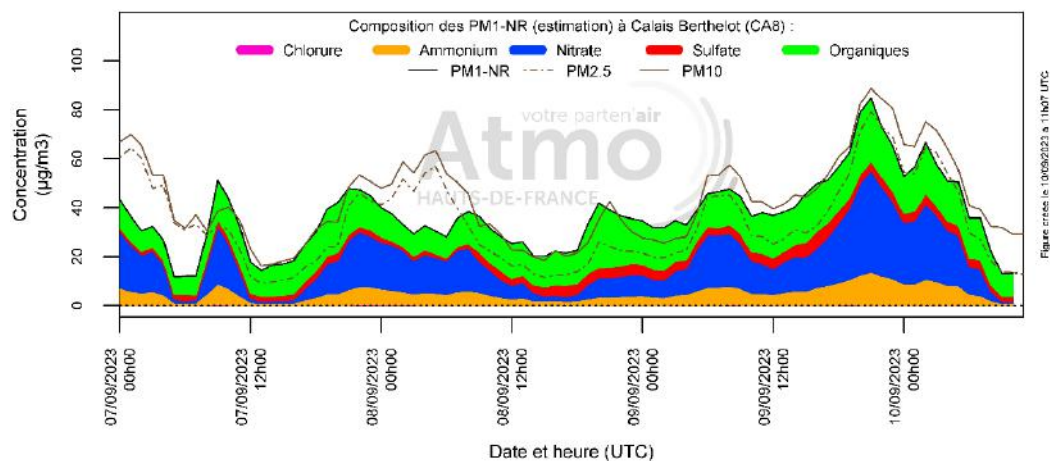


Figure 36 : données ACSM à Calais, consultées le 10/09/2023

La carte du modèle PREV'AIR pour ce jour montre que cet épisode reste un phénomène à plus grande échelle que celle du printemps. Les mesures locales ont une efficacité relative sur ce type d'épisode, nécessitant des actions de réduction plutôt à grande échelle (nationale).

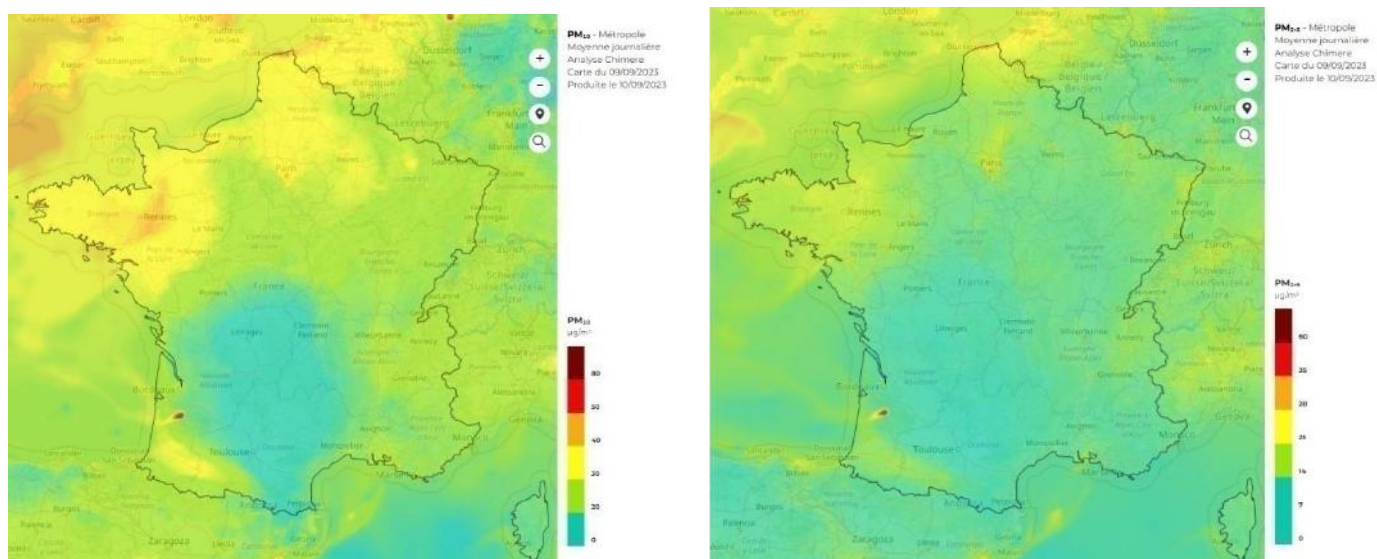


Figure 37 : Concentrations journalières en PM10 et PM2.5 modélisées par la plateforme PREV'AIR du 09/09/2023

Ce dernier épisode n'a pas pu être analysé concernant la composition chimique des PM2.5 (pas de prélèvement sur filtre ce jour). Cependant, la série temporelle ainsi que les contributions des différentes sources (figures suivantes) montrent une augmentation des facteurs « Organique secondaire vieilli » (31%) et « Nitrate-rich » (12%) pour la veille. De plus le facteur lié à la combustion de fuel lourd montre une contribution plus importante ce jour (22%).

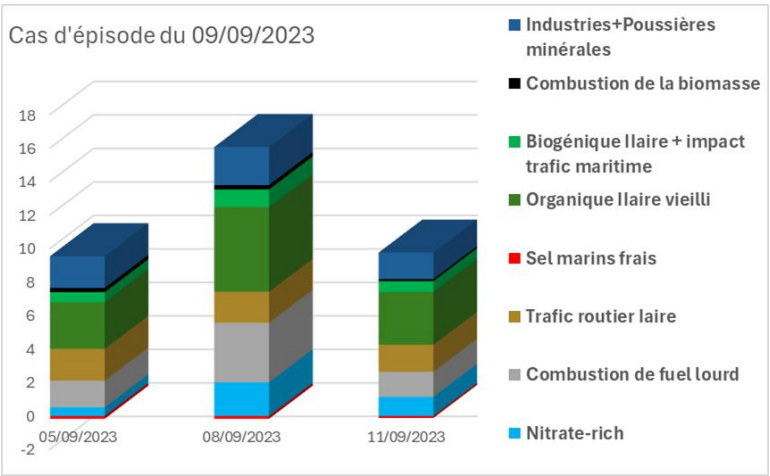
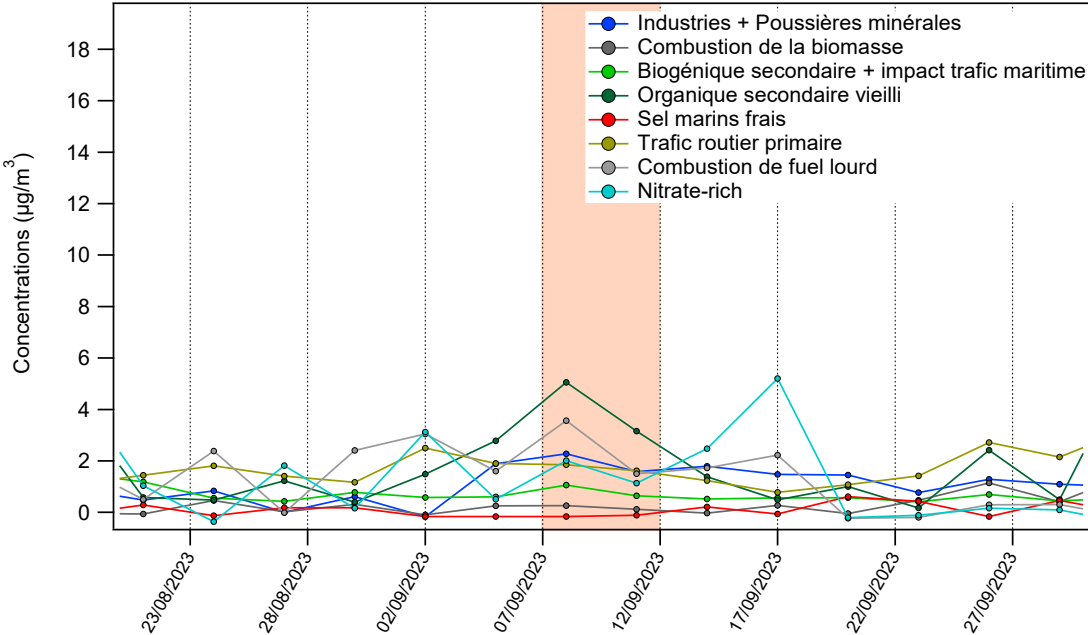


Figure 38 : Séries temporelles des différents facteurs à Lille, zoom sur la période étudiée.

7. Conclusion et perspectives

Cette étude a été réalisée dans le cadre du programme CARA d'Atmo Hauts-de-France (caractérisation chimique des particules) du 3 avril 2023 au 1^{er} avril 2024. Elle est financée en partie par la Métropole Européenne de Lille (MEL) et par la Direction Régionale Environnement Aménagement Logement (DREAL) au titre du Plan Régional Santé Environnement. L'objectif de l'étude est d'identifier les sources principales des particules PM2.5 observées sur le territoire de la MEL et de comprendre leur provenance géographique ainsi qu'identifier leur impact sur la santé avec le potentiel oxydant (la capacité des particules de créer un déséquilibre entre les espèces réactives adsorbées et les antioxydants naturellement présents dans nos poumons ; stress oxydant). Ce travail permet de définir les enjeux plus précis du territoire sur la question des particules et aider à évaluer la pertinence des actions menées (en lien avec la Prime Air, la ZFE...).

Pour la période d'étude, **huit sources** influençant les concentrations de PM2.5 mesurées à la MEL ont été identifiées (naturelles et anthropiques) :

- 5 sources principalement primaires
- 3 sources secondaires

Contribution globale et impact sur la santé

Leur contribution sur la concentration massique des PM2.5 ainsi que leur impact sur la santé sont présentés ci-dessus :

Combustion de la biomasse (chauffage au bois) :

- o Contribution globale à **16%**.
- o Impact sur la santé : **première source plus importante** pour créer un stress oxydant (réponse aux 2 tests généralisé et plus précis).

Industries et poussières minérales :

- o Contribution globale à **9%**.
- o Impact sur la santé : **source très importante** pour créer un stress oxydant (réponse au test plus précis).

Trafic routière primaire :

- o Contribution globale à **9%**.
- o Impact sur la santé : **troisième source plus importante** pour créer un stress oxydant (réponse aux 2 tests généralisé et plus précis).

Sel marins frais :

- o Contribution globale **8%**.
- o Impact sur la santé : **source de moindre importance** pour créer un stress oxydant.

Combustion de fuel lourd :

- o Contribution globale à **11%**.
- o Impact sur la santé : **source d'importance similaire** à celle de la biogénique secondaire et impact trafic maritime pour créer un stress oxydant (réponse au test plus généralisé).

Particules secondaires inorganiques :

- o Contribution globale à **21%**.
- o Impact sur la santé : **deuxième source plus importante** pour créer un stress oxydant (réponse au test plus généralisé).

Biogénique secondaire et impact trafic maritime :

- Contribution globale à **13%**.
- Impact sur la santé : **source de moindre importance** pour créer un stress oxydant, impact plutôt de la partie trafic maritime (réponse au test plus généralisé).

Organique secondaire vieilli :

- Contribution globale à **13%**.
- Impact sur la santé : **source d'importance similaire** à celle du biogénique secondaire et impact trafic maritime pour créer un stress oxydant (réponse au test plus généralisé).

Variation saisonnière et actions

Pour rappel, la contribution d'une source au potentiel oxydant (PO), signifie la capacité de cette source de générer un stress oxydant par m³ d'air inhalé. Une source, dont sa contribution au PO (en utilisant l'un ou l'autre des deux tests) est plus importante, présente un risque plus élevé pour l'exposition de la santé.

Hiver

En hiver, la combustion de biomasse, dont le **chauffage au bois**, est la source principale (34%). Cette source étant d'origine anthropique, il reste possible d'agir localement pour une diminution effective d'impact, en poursuivant les actions visant le renouvellement des appareils de chauffage au bois.

Printemps

En printemps, le Nitrate-rich est la source dominante, traduisant une contribution importante (39%) des **particules secondaires inorganiques (SIA) enrichies en nitrate d'ammonium** aux PM_{2.5}. Le nitrate d'ammonium se forme dans l'atmosphère par réaction chimique entre l'ammoniac (NH₃), essentiellement émis lors des épandages d'engrais et les oxydes d'azote (NO_x), majoritairement dus aux phénomènes de combustion et notamment des gaz d'échappement du trafic routier. A noter que la pollution secondaire issue de nitrate d'ammonium se présente souvent à l'échelle régionale voire continentale. Les mesures locales contribuent à une réduction des concentrations en nitrate d'ammonium. Des actions de réduction des émissions à l'échelle régionale voire nationale doivent compléter les mesures engagées localement pour parvenir à réduire les concentrations de ce polluant secondaire.

Été

Les concentrations en particules PM_{2.5} sont influencées par des **particules secondaires biogéniques** (liées à aux émissions du phytoplancton marin), ainsi que par les **émissions du trafic maritime** (source mélangée 28%). De plus, en été, on retrouve un impact important des **particules secondaires organiques vieilles** (21%). Cependant, une grande partie d'entre elles est d'origine lointaine, comme le trafic maritime, ou naturelle, telles que les émissions du phytoplancton marin. Ainsi, peu d'actions locales peuvent être mises en place. En revanche, la matière organique secondaire, influencée par un large éventail de sources, notamment anthropiques, offre néanmoins des possibilités d'interventions locales pour réduire son impact.

Automne

En automne, la **répartition des sources est homogène**, avec une contribution équilibrée entre 10% (sel marins frais) et 18% (trafic routier). A noter que pendant cette période, les particules biogéniques secondaires montrent une contribution plus faible à 5%.

Provenance géographique

Les sources principales des particules PM2.5 sur le territoire de la MEL peuvent être classées en 3 catégories selon des analyses des vents : **2 sources locales** (combustion de la biomasse et trafic routier primaire), **2 sources lointaines** (sels marins frais et biogénique secondaire avec impact trafic maritime), et **4 sources mélangées** (nitrate-rich, industries et poussières minérales, organique secondaire vieilli et combustion de seul lourd).

Les sels marins frais liés à la source d'origine des embruns marins proviennent majoritairement de la Mer Celtique et de l'océan Atlantique nord.

En ce qui concerne les **aérosols biogéniques secondaires** marins avec l'impact du trafic maritime, ce facteur provient majoritairement de la Mer du Nord, une zone bien connue pour son activité phytoplanctonique intense, notamment en été. L'impact du trafic maritime est également en lien avec la présence du port de Rotterdam et, de manière moins marquée, au nord de Dunkerque (nord-ouest du site de Tourcoing).

Le **Nitrate-rich** est source dominée par le composé nitrate d'ammonium, qui se forme dans l'atmosphère par réaction entre l'ammoniac, et les oxydes d'azote et elle est liée aux particules inorganiques secondaires. En Hauts-de-France, elles sont particulièrement présentes au printemps, lors des périodes d'épandages agricoles. En résumé, cette source peut être formée à l'échelle régionale mais également être transportée sur le territoire de la MEL par les masses d'air chargées. Elle combine donc des sources régionales (secteur agricole en période d'épandage) et des sources éloignées (zone Benelux, et l'est de l'Allemagne).

La source liée aux **industries et aux poussières minérales** est un mélange de poussières anthropiques (érosion du sol, chantiers et remise en suspension par le trafic routier) et éventuellement des éléments fréquemment observés au sein de diverses émissions industrielles. Elle combine donc des sources locales et des sources éloignées (zone Benelux, l'est de l'Allemagne et Pologne).

Les particules **secondaires organiques vieilles** sont principalement issues de l'oxydation des composés organiques. Cette source combine plusieurs sources locales potentielles (trafic, chauffage au bois etc...) ainsi que des sources éloignées (Pologne).

La source de la **combustion de fuel lourd** est liée principalement aux émissions de **raffineries, des centrales thermiques** et de la **circulation maritime**, mais aussi aux masses transportées par l'Europe de l'Est (sous forme sulfate d'ammonium).

Perspectives

En octobre 2024 une nouvelle directive pour la qualité de l'air ambiant a été adoptée, qui fixe de nouveaux objectifs à atteindre en 2030, dans le cadre de l'objectif européen « zéro pollution » à l'horizon 2050. Elle va dans la direction d'un renforcement des normes, en ajustant les valeurs limites qui rapprochent les recommandations sanitaires de l'OMS. Dans le cadre de cette directive, la surveillance des particules PM2.5 est renforcée. De plus, cette nouvelle directive implique des mesures des particules encore plus petites, c-à-d les particules ultrafines (PUF) avec un diamètre inférieur à 100nm (ou 0.1 µm). Dans le même cadre, Atmo HdF vise à renforcer la surveillance des particules ultrafines dans la région en passant d'une mesure fixe à 3 mesures fixes dans la région, 1 à Calais, et 2 points à Lille (site de fond et site sous influence trafic). De plus, dans le cadre du projet AQAH/FEDER, pour 2025, 6 points supplémentaires seront ajoutés dans la liste des mesures des PUF. Enfin, pour améliorer les connaissances et établir un état des lieux des particules dans les Hauts-de-France, Atmo HdF vise à étudier plus profondément la fraction PM1 des particules en 2025.

Annexe 1 : Glossaire

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

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

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

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

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

As : Arsenic.

B(a)P : Benzo(a)pyrène.

BTEX : Benzène, Toluène, Ethylbenzène, Xylènes.

Cd : Cadmium.

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

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

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

COVnM : Composés Organiques Volatils non Méthaniques.

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

Emissions : Rejets d'effluents gazeux ou particuliers 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.

Moyenne 8 heures glissantes : Moyenne calculée à partir des 8 dernières moyennes horaires toutes les heures. Le pas de temps est égal à 1 heure et l'intervalle est de 8 heures.

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

Ni : Nickel.

NH₃ : Ammoniac.

NO₂ : Dioxyde d'azote.

NO_x : Oxydes d'azote.

O₃ : Ozone.

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

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

Pb : Plomb.

PCAET : Plan climat-air-énergie territorial.

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

PM_{2.5} : Particules en suspension de taille inférieure ou égale à 2,5 µm.

Polluant primaire : Polluant directement émis par une source donnée.

PPA : Plan de protection de l'atmosphère.

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

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

SO₂ : Dioxyde de soufre.

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

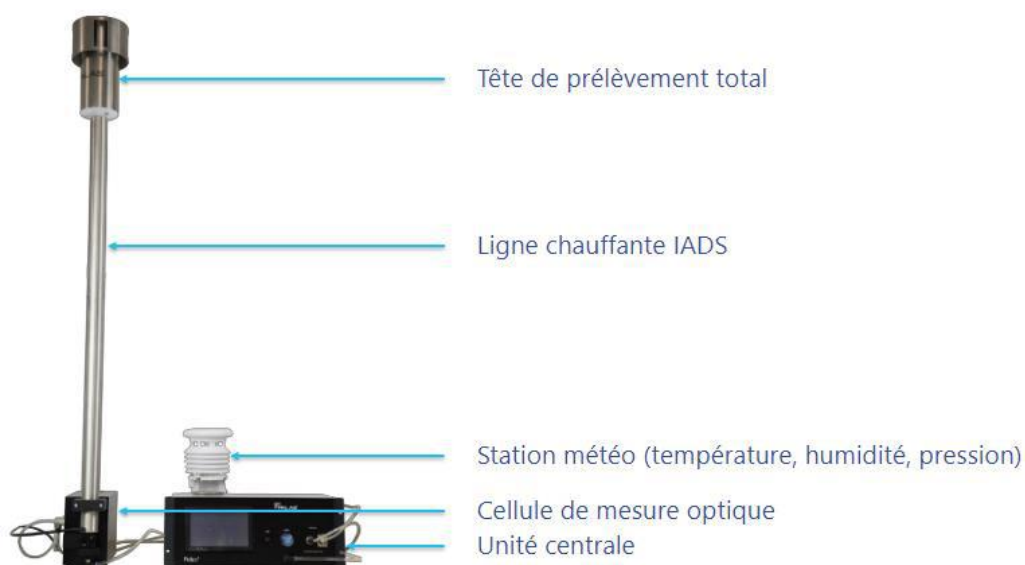
Valeur limite : Niveau à atteindre dans un délai donné et à ne pas dépasser, et fixé sur la base des connaissances scientifiques afin d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine ou sur l'environnement dans son ensemble.

ZFE : Zones à faibles émissions.

Annexe 2 : Techniques de mesures et laboratoires d'analyse

Mesures en continu

La concentration massique des PM_{2.5} (sans distinction de leur composition) est mesurée en continu par un analyseur FIDAS 200 (figure suivante). Le FIDAS 200 utilise le principe de la détection optique de la lumière diffusée par les aérosols. L'utilisation d'une source LED polychromatique détecte les aérosols de petite taille, présents en forte concentration et fournit une réponse univoque de la taille des aérosols en fonction de la lumière diffusée. Cet appareil permet d'obtenir des mesures simultanées des fractions PM₁, PM_{2.5}, PM₄ et PM₁₀, TSP et du comptage en nombre, avec un pas de temps minimum 1 sec. Les données exploitées dans le présent rapport sont en revanche les moyennes horaires, les moyennes journalières et mensuelles et sont calculées à partir de ces données quart-horaires. La méthode utilisée est certifiée par le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA) et elle a été validée par les mesures simultanées avec un TEOM-FDMS (mesure conforme à la norme NF EN 16450) et équivalente à la méthode de référence par pesée gravimétrique (norme NF EN 12341).



Analyseur FIDAS 200. Source : ADDAIR¹⁵

Mesures avec analyse différée

Les PM_{2.5} sont prélevées sur des filtres en quartz par un préleveur haut débit DA80 (débit = 30 L/min, photos sur la figure suivante). Les prélèvements durent chacun 24 heures et sont effectués tous les jours de minuit à minuit (temps universel – TU). Les filtres ainsi obtenus peuvent être poinçonnés et chaque poinçon est envoyé à un laboratoire qui analyse la composition chimique des particules prélevées sur le filtre. Les laboratoires et méthodes de quantification choisis pour chaque famille de composés à analyser sont listés dans l'annexe 4. Les concentrations ainsi mesurées sont des concentrations moyennes journalières.

Les filtres à analyser par les laboratoires sont sélectionnés selon les critères suivants :

- Un filtre sur six (i.e. un jour de prélèvement sur six) est systématiquement analysé.

¹⁵ Source : <https://www.addair.fr/aerosols/palas-aerosols/fidas-200-200e-200s/>

- Si la concentration massique journalière des PM_{2.5} telle que mesurée par FIDAS est supérieure à 25 µg/m³, alors les filtres de cette journée sont analysés.



Photos de préleveurs DA80 (intérieur et tête de prélèvement)

A noter que les ions et les sucres sont analysés par IGE (Institut des Géosciences de l'Environnement) pour les prélèvements en 2023-2024.

Laboratoires et méthodes de quantification de la composition chimique des PM_{2.5} prélevées sur filtres

Espèces mesurées	Méthode(s)	Laboratoire
OC/EC	TOT (analyse thermo-optique en transmission)	Airparif
Ions	IC (Chromatographie ionique)	IGE (Institut des Géosciences de l'Environnement)
Métaux	ICP-MS (inductively coupled plasma mass spectrometry) et ICP-AES (inductively coupled atomic emission spectrometry)	Institut Mines Telecom Nord-Europe
Sucres	HPLC-PAD (high performance liquid chromatography coupled to a pulsed amperometric detection)	IGE (Institut des Géosciences de l'Environnement)
PO	Méthode interne ¹⁶	IGE (Institut des Géosciences de l'Environnement)

¹⁶ Weber et al., 2021, *Source apportionment of atmospheric PM₁₀ oxidative potential: synthesis of 15 year-round urban datasets in France*, Atmospheric Chemistry and Physics, <https://doi.org/10.5194/acp-21-11353-2021>

Annexe 3 : Limite de detection

La limite de détection (LD) est définie comme 3 fois de l'écart type des échantillons blancs (σ_b) :

$$LD = 3 \times \sigma_b$$

On parle de « blanc » pour les filtres vierges qui n'ont pas été soumis à un flux d'air mais ont été manipulés exactement de la même manière que les autres échantillons, y compris le transport sur le terrain, la manipulation, le stockage et la procédure d'analyse. Les valeurs des blancs sont ensuite utilisées pour corriger et valider toutes les concentrations brutes obtenues à partir des méthodes analytiques. Si la concentration brute (C_i) est supérieure à au moins deux fois la concentration moyenne des blancs ($\overline{C_b}$), la concentration finale (C) est obtenue par la soustraction de la moyenne des blancs. En cas contraire, la concentration finale sera remplacé par LD/2.

Annexe 4 : Modèle source récepteur

Principe de la méthode

La méthode est basée sur l'équation :

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

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

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

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

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

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

Sélection des espèces chimiques

Les variables d'entrée (espèces chimiques) ont été sélectionnées selon les critères suivants :

- Les espèces chimiques présentent une faible fraction de valeurs inférieures à la limite de détection (les valeurs $> LD$ doivent représenter plus de 60%).
- Le ratio signal sur bruit (S/N ; S : Signal ; N : Bruit (Noise en Anglais)) est supérieur à 1. Le ratio S/N pour une espèce chimique j est calculé en utilisant l'équation :

$$\left(\frac{S}{N} \right)_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{ij}$$

La différence (d_{ij}) entre la concentration (x_{ij}) et l'incertitude (σ_{ij}) est calculée à partir de l'équation :

$$d_{ij} = \begin{cases} \left(\frac{x_{ij} - \sigma_{ij}}{\sigma_{ij}} \right) & \text{si } x_{ij} > \sigma_{ij} \\ 0 & \text{si } x_{ij} \leq \sigma_{ij} \end{cases}$$

Finalement, 44 espèces (OC, EC, MSA, Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Ox, Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , lévoglucosan, mannosan, galactosan, Ag, Al, As, Ba, Bi, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, La, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Rb, Sb, Se, Sn, Sr, Th, Ti, Tl, U, V, Zn) ont été utilisées dans la matrice d'entrée de la méthode PMF, y compris la concentration massique de $PM_{2.5}$ qui a été définie comme une variable totale.

Prétraitements des données

Un prétraitement statistique de la matrice des données est rendu nécessaire par la présence de valeurs inférieures à la limite de détection (LD), de valeurs manquantes, et de valeurs dites « extrêmes ». Les valeurs inférieures à la limite de détection sont remplacées par $LD/2$, comme recommandé par le guide d'utilisateur

du modèle EPA PMF 5.0. Les valeurs manquantes sont remplacées par un code « -999 » dans la matrice d'entrée, et le logiciel remplacera ces valeurs par la valeur médiane de cette espèce. Les valeurs extrêmes liées à des événements ponctuels, qui sont souvent mal reconstituées par la PMF, doivent être exclues du modèle.

Estimation d’incertitudes

Les incertitudes des différentes espèces d’entrée (ions, lévoglucosan, mannosan, galactosan) sont déterminées à partir de la méthode proposée par Gianini et al., (2012)¹⁷ :

$$\sigma_{ij} = \sqrt{(DL_j)^2 + (x_{ij} \times CV_j)^2 + (x_{ij} \times a)^2}$$

où DL_j est la limite de détection (3σ_{blancs}) ; x_{ij} est la concentration de l’espèce j à l’instant i ; CV_j est le coefficient de variation de l’espèce j ; et **a** est le coefficient de variation additionnel, qui représente les incertitudes supplémentaire selon la catégorie/famille d’espèces chimiques.

Les incertitudes des espèces OC/EC et des métaux ont été calculées à partir des incertitudes élargies fournisses par le laboratoire d’analyse.

Pour les valeurs inférieures à la limite de détection, une incertitude égale à 5/6 LD de cette espèce est utilisée (recommandation du guide d’utilisateur du modèle EPA PMF 5.0). Pour les valeurs manquantes et remplacées, une incertitude égale à 4 fois la moyenne géométrique est attribuée par le modèle.

Définition de contraintes

Dans cette étude, le logiciel EPA PMF 5.0 permet d’appliquer deux types de contraintes dans les solutions du modèle :

- Ratio : dans un même profil de source, le ratio entre deux espèces peut être défini par l'utilisateur ;
- Les contraintes sur les contributions d’une espèce chimique en utilisant le forçage doux (« soft pulling »), qui autorise une limite de changement dans la valeur de Q (%dQ = 0.5 par défaut) (équation 3).

Les contraintes imposées par utilisateurs peuvent exercer une influence subjective sur les solutions calculées par le modèle PMF. Dans cette étude, des contraintes chimiques spécifiques sont définies selon le guide LCSQA « Traitement harmonisé de jeux de données multi-sites pour l’étude de sources de PM par PMF » (2017). La liste des contraintes est présentée dans le Tableau suivant :

Contraintes chimiques spécifiques appliquées aux facteurs identifiés par la PMF

Facteur	Eléments	Type	Valeur
Combustion de la biomasse	Levoglucosan	Pull Up Maximally	% dQ = 0.50
	Mannosan	Pull Up Maximally	% dQ = 0.50
	Galactosan	Pull Up Maximally	% dQ = 0.50
Trafic routier	Levoglucosan	Set to Zero	0

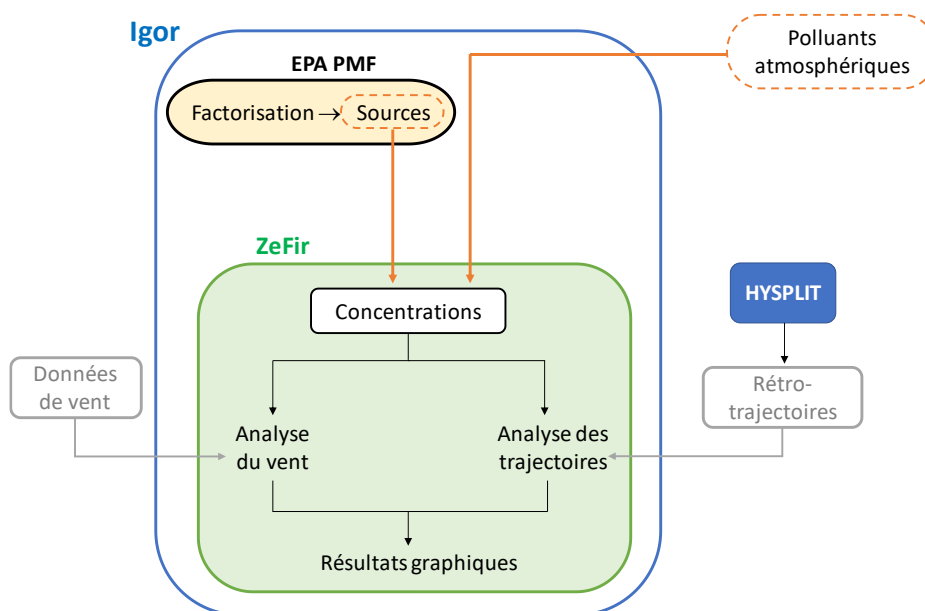
¹⁷ M.F.D. Gianini et al., "Chemical Composition of PM10 in Switzerland: An Analysis for 2008/2009 and Changes since 1998/1999," *Atmospheric Environment* 54 (July 1, 2012): 97–106, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.02.037>.

	Mannosan	Set to Zero	0
	Galactosan	Set to Zero	0
Sel marins frais	Mg/Na	Set to Value	0.119
Biogénique secondaire marin	Levogluconan	Set to Zero	0
	Mannosan	Set to Zero	0
	Galactosan	Set to Zero	0
	MSA	Pull Up Maximally	% dQ = 0.50
	EC	Pull Down Maximally	% dQ = 0.50
Sulfate-rich – Combustion de fuel lourd	Levogluconan	Set to Zero	0
	Mannosan	Set to Zero	0
	Galactosan	Set to Zero	0
	MSA	Set to Zero	0

Annexe 5 : Analyse du vent et des rétrotrajectoires

ZeFir est un nouvel outil permettant d'effectuer des études sur les origines géographiques des polluants atmosphériques¹⁸. Il combine les méthodes d'analyses du vent et des trajectoires.

La structure de cet outil est résumée par la figure suivante (Ligne orange : concentrations des polluants ; ligne grise : données de vent/trajectoires). Il est programmé via une interface d'analyse de données basée sur le logiciel Igor Pro (Wavemetrics).



La structure du fonctionnement ZeFir (Ligne orange : données de concentrations ; ligne grise : données de vent/trajectoire).
Adapté de J.-E. Petit et al., (2017)¹⁰

Dans cette étude, les concentrations de particules utilisées sont les sources identifiées par le modèle source-récepteur PMF (Positive Matrice Factorization) ou les espèces chimiques mesurées dans les filtres PM2.5. Ces concentrations ont une résolution temporelle de 24h. La direction et la vitesse du vent sont moyennées sur le même pas de temps que la concentration, à partir des données horaires mesurées par la station Météo-France à Lesquin. Les données de rétro-trajectoires sont calculées avec le modèle HYSPLIT.

Méthode d'analyse du vent

L'analyse du vent dans cette étude est basée sur la méthode NWR (Non-parametric wind regression), qui a été développée par Henry et al. (2009)¹⁹. Cette méthode permet de combiner la concentration des polluants avec la mesure de la vitesse et la direction du vent. Le principe est de lisser les données sur une grille très fine, afin d'avoir une concentration estimée pour chaque direction et vitesse du vent définie.

La méthode NWR est définie par l'équation :

¹⁸ 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 (February 1, 2017): 183–87, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.11.022>.

¹⁹ Ronald Henry et al., "Source Region Identification Using Kernel Smoothing," *Environmental Science & Technology* 43, no. 11 (June 1, 2009): 4090–97, <https://doi.org/10.1021/es8011723>.

$$E(\theta|v) = \frac{\sum_{i=1}^N K_1\left(\frac{\theta-W_i}{\sigma}\right) \cdot K_2\left(\frac{v-Y_i}{h}\right) \cdot C_i}{\sum_{i=1}^N K_1\left(\frac{\theta-W_i}{\sigma}\right) \cdot K_2\left(\frac{v-Y_i}{h}\right)}$$

E est la concentration estimée pour une direction du vent θ et une vitesse du vent v . W_i , Y_i , et C_i sont les données fournies par l'utilisateur, qui correspondent à la direction du vent, la vitesse du vent et la concentration du point i , respectivement. N est le nombre total des concentrations mesurées. σ et h sont les paramètres de lissage. K_1 et K_2 sont deux types de fonction kernel : K_1 la distribution Gaussien et K_2 de type Epanechnikov :

$$K_1(x) = (2\pi)^{-\frac{1}{2}} \cdot \exp(-0.5x^2) ; \quad -\infty < x < \infty$$

$$K_2(x) = 0.75(1 - x^2) ; \quad -1 \leq x \leq 1$$

Les paramètres utilisés dans l'analyse NWR sont présentés dans le Tableau suivant :

Paramètres utilisés dans le module NWR

Résolution de la direction du vent	Résolution de la vitesse du vent	Max de la vitesse du vent	Paramètre de lissage (θ)	Paramètres de lissage (v)
1°	0,25 km/h	20 km/h	27,64	7,13

Méthode d'analyse des rétrotrajectoires

PSCF (Potentiel source contribution function), CWT (Concentration-Weighted Trajectory) et CF (Concentration Field) sont les méthodes les plus souvent utilisées pour évaluer le transport des polluants atmosphériques à longue distance²⁰. Elles associent les concentrations mesurées avec les rétrotrajectoires et le temps de résidence des masses d'air, qui permettent de définir l'origine géographique des polluants observés sur un site récepteur. Chaque méthode présentait des avantages et des inconvénients²¹.

Dans cette étude, la méthode CWT a été utilisée qui est basée sur l'équation :

$$\overline{C_{ij}} = \frac{1}{\tau_{ijk}} \cdot \sum_{k=1}^N C_k \cdot \tau_{ijk}$$

Ici N est le nombre total des trajectoires, ij est l'indice pour une cellule de grille, k est l'indice d'une trajectoire. C_{ij} est la concentration observée sur le site récepteur à l'arrivée d'une trajectoire k . τ_{ijk} est le temps de résidence de cette trajectoire k dans la cellule ij .

²⁰ Zoë L. Fleming, Paul S. Monks, and Alistair J. Manning, "Review: Untangling the Influence of Air-Mass History in Interpreting Observed Atmospheric Composition," *Atmospheric Research* 104–105 (February 1, 2012): 1–39, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.09.009>.

²¹ Ying-Kuang Hsu, Thomas M. Holsen, and Philip K. Hopke, "Comparison of Hybrid Receptor Models to Locate PCB Sources in Chicago," *Atmospheric Environment* 37, no. 4 (February 1, 2003): 545–62, [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00886-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00886-5).

Pour chaque cellule (ij) d'une grille définie (0,5°×0,5°), la méthode estime une concentration potentielle d'une espèce chimique ou d'un facteur PMF. Les résultats sont tracés sur la carte mondiale entre longitude 30°W – 30°E et latitude 30°N – 60°N. Un facteur de lissage gaussien de 15 a été appliqué aux résultats.

Les rétrotrajectoires sont calculées avec le modèle HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory)^{22,23}, qui a été développé par le laboratoire ARL (Air Resources Laboratory) de l'Administration Nationale des Océans et de l'Atmosphère (NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration) aux Etats-Unis.

Dans cette étude, les données météorologiques GDAS (Global Data Assimilation System) avec la résolution de 1 degré ont été utilisées. Les rétrotrajectoires de 72h (trajectoire d'une masse d'air durant les 3 jours précédents) ont été calculées avec un pas de temps de 6 heures (dont 4 trajectoires par jour), arrivant à une altitude de 500 m. La durée de 72h a été choisie pour éviter trop d'incertitudes dans leurs calculs et être cohérent avec la durée de vie de certains polluants. Par conséquent, les sources plus anciennes que 72h ne sont pas prises en compte.

La concentration de chaque source est basée sur un pas de temps journalier, donc une résolution temporelle assez faible. Dans ce cas-là, une seule trajectoire correspondant à cette journée sera prise en compte. Avec ZeFir, il est possible d'agrandir le jeu de données en ajoutant plusieurs trajectoires pendant cette journée : par exemple à -12h, -6h, 0h, 6h et 12h, avec pour les 5 trajectoires la même concentration moyenne journalière associée.

Exemple d'une trajectoire agrandie

Données origines		Trajectoires ajutées	Données agrandies	
Date	Conc.	(h)	Date	Conc.
03/04/2023 00:00:00	4.85	-12	03/04/2023 12:00:00	4.85
		-6	03/04/2023 18:00:00	4.85
		0	03/04/2023 00:00:00	4.85
		6	03/04/2023 06:00:00	4.85
		12	03/04/2023 12:00:00	4.85

²² R. R. DRAXLER and G.D. Rolph, "HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model" (NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD, 2003), <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>.

²³ A. F. Stein et al., "NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System," *Bulletin of the American Meteorological Society* 96, no. 12 (May 4, 2015): 2059–77, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>.

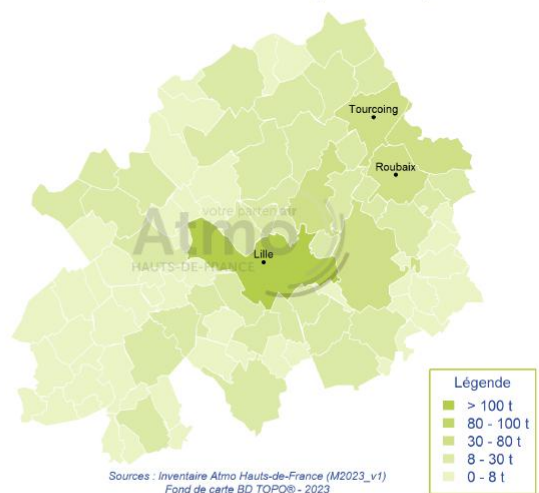
Annexe 6 : Fiche émission PM25 de la Métropole Européenne de Lille (année 2021)



Fiche émissions 2021 Métropole Européenne de Lille Particules PM2.5

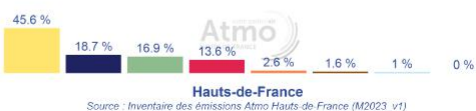


Emissions des PM2.5 réparties par communes
sur le territoire en 2021 (en tonnes)



Les émissions sont des quantités de polluants atmosphériques et gaz à effet de serre rejetées dans l'atmosphère par différentes sources.
Pour plus d'informations sur l'inventaire des émissions Atmo Hauts-de-France (M2023_v1), scannez le QR code ci-contre.

Répartition des émissions des PM2.5
par secteur d'activité en 2021 (en %)



Source : Inventaire des émissions Atmo Hauts-de-France (M2023_v1)



Les données d'inventaire sont sectorisées au format Plan Climat Air Energie Territorial (PCAET).
Huit secteurs d'activité sont ici représentés (hors émetteurs non inclus et UTCATF).

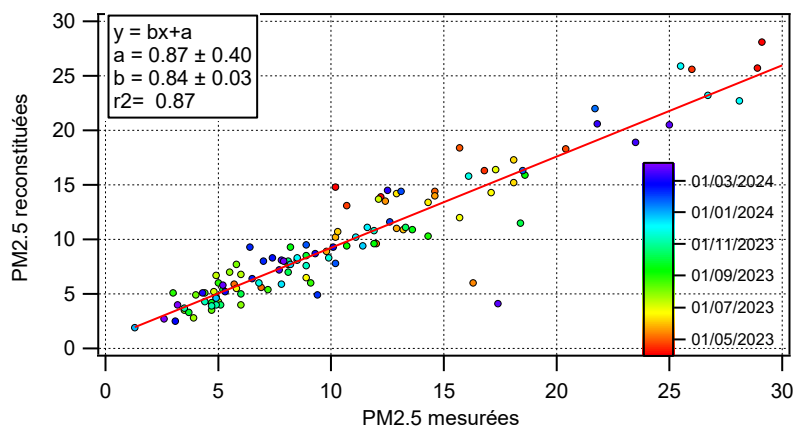
Evolution chronologique des émissions des PM2.5
totales sur le territoire (en kilotonnes)



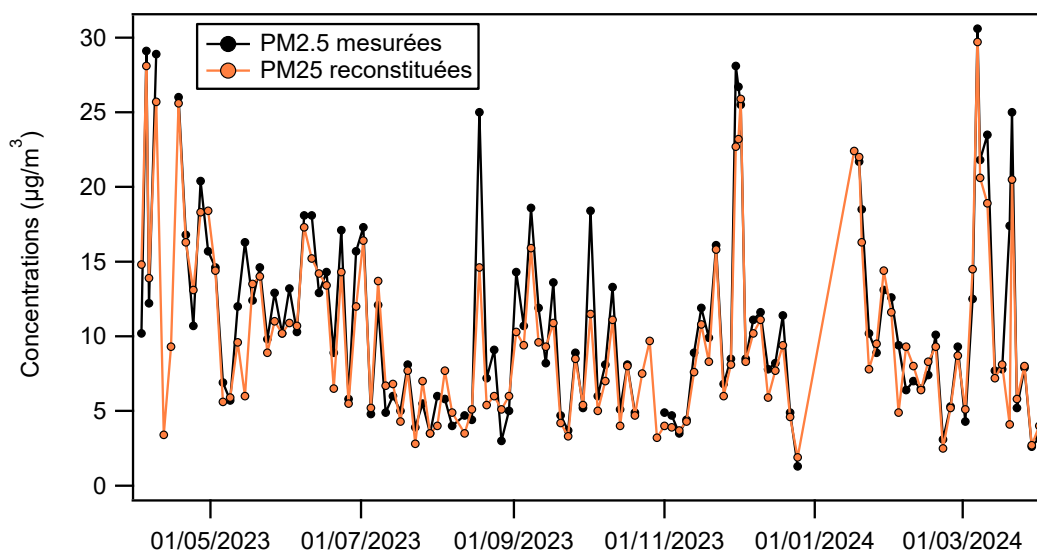
Annexe 7 : Validation de méthode PMF

Les PM2.5 mesurées dans l'air (axe X) et les PM2.5 reconstituées par le modèle PMF (axe Y) sont comparées dans la figure suivante. La corrélation est très bonne ($R^2 = 0.87$ et la **pente de droite = 0.84**). Les séries temporelles mesurées (noir) et modélisées (orange) sont présentées et les deux courbes superposent.

Ceci signifie un **bon fonctionnement du modèle PMF**, qui a bien estimé les PM2.5 mesurées sur la période d'étude.

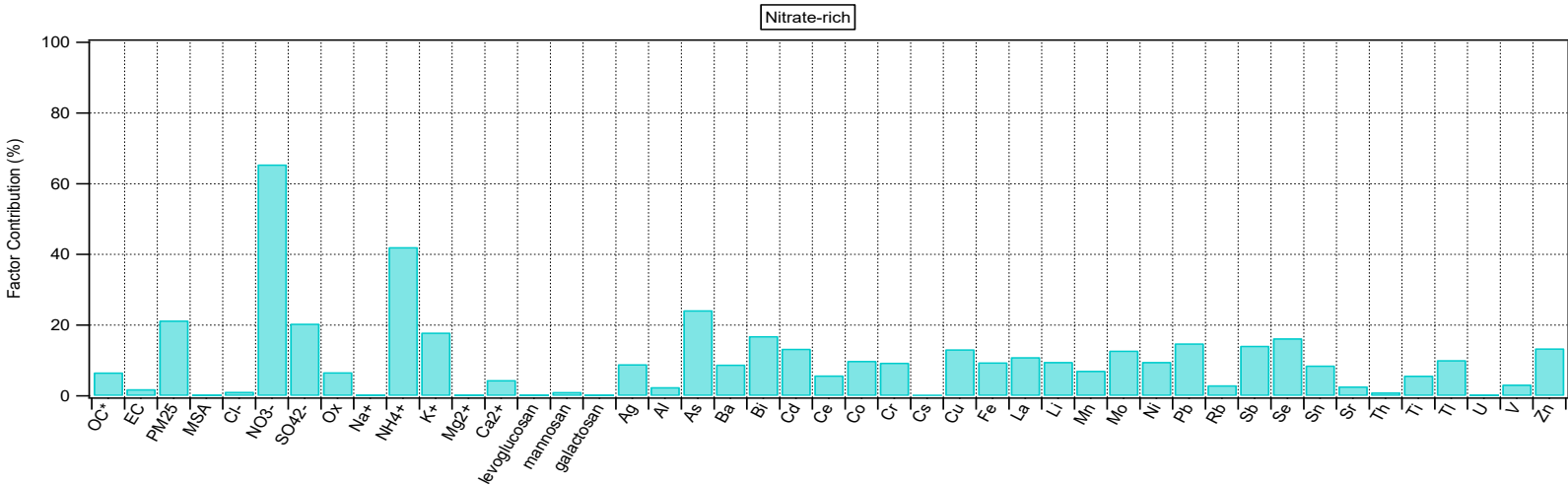


Corrélation entre les PM2.5 mesurées et les PM2.5 reconstituées par le modèle PMF

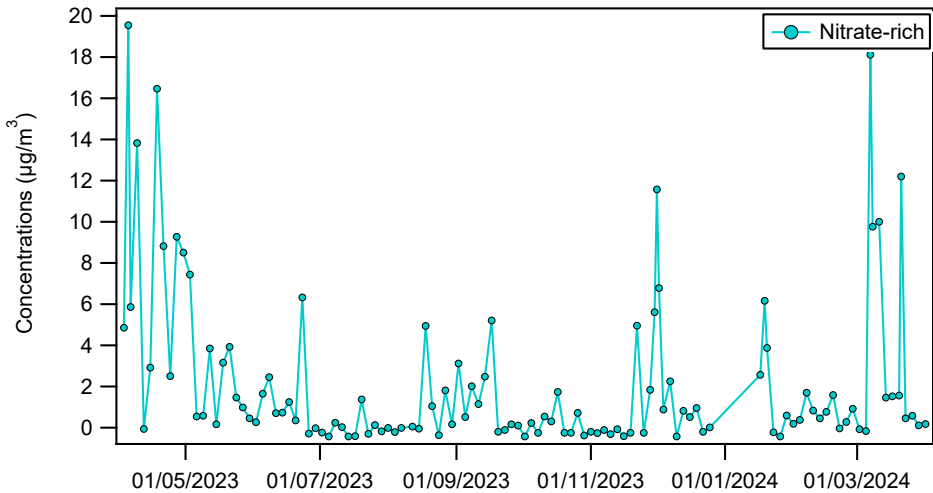


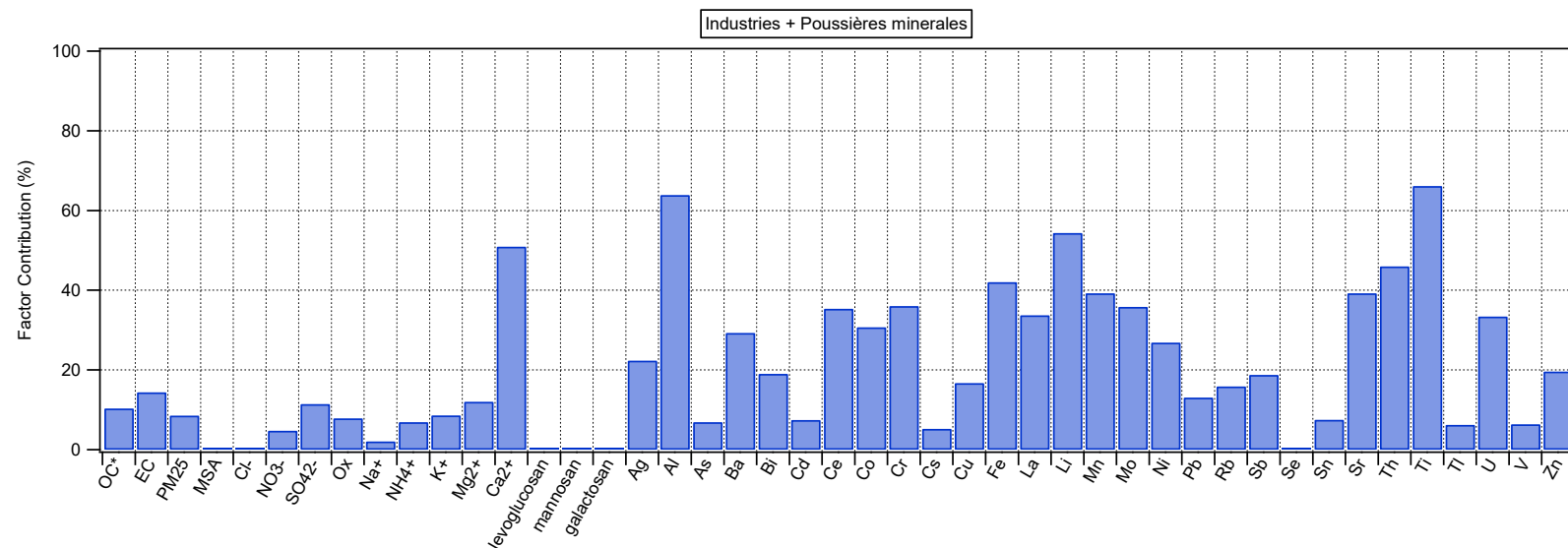
Séries temporelles des PM2.5 mesurées (noir) et reconstituées (orange) par le modèle PMF

Annexe 8 : Profil chimique et série temporelle des facteurs identifiés

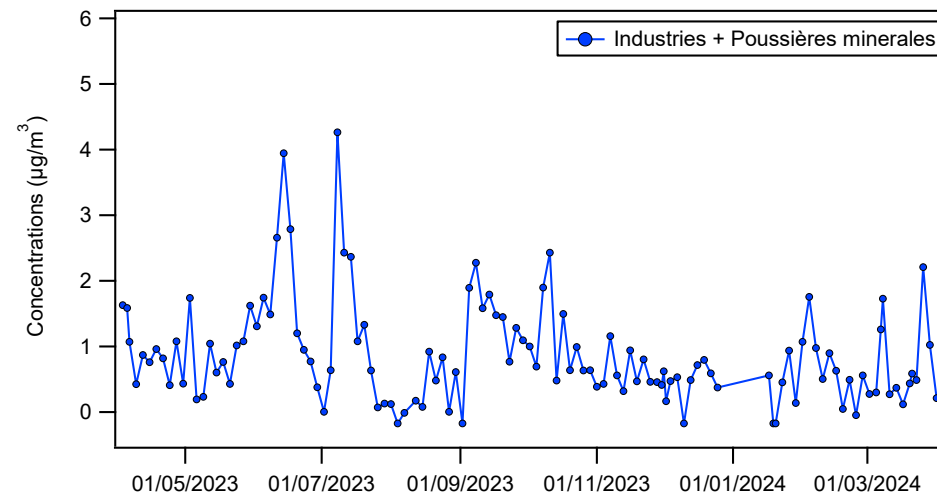


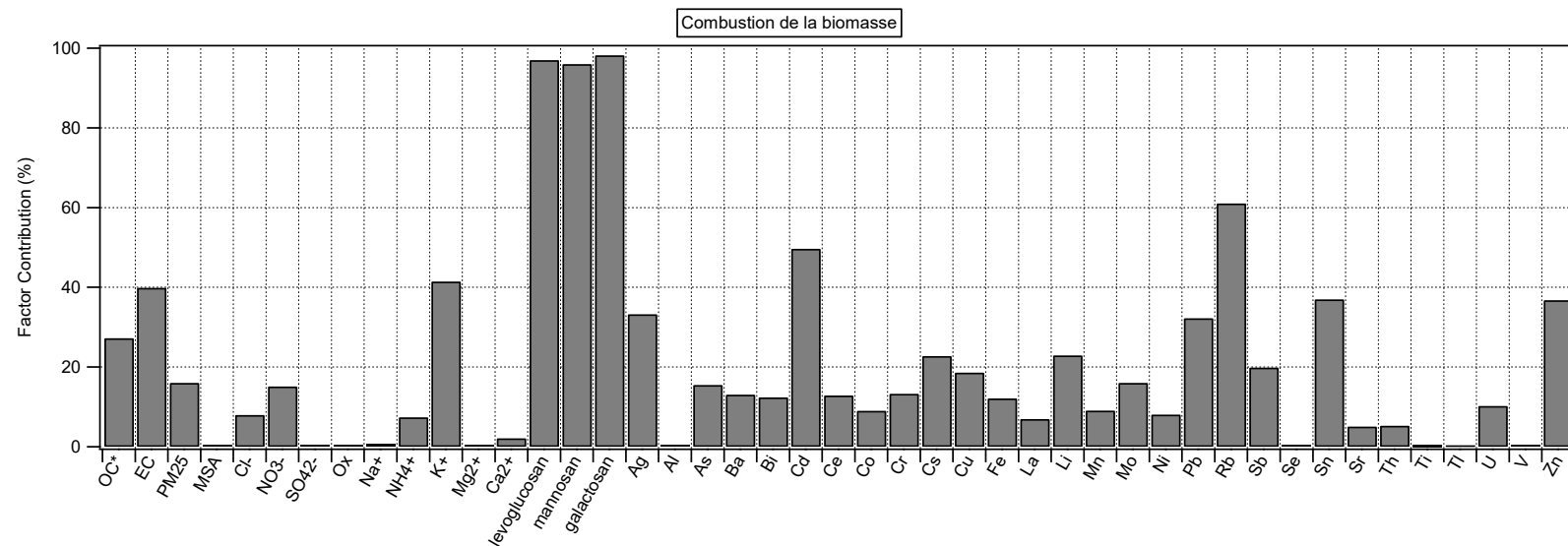
Nitrate-rich (aérosols secondaires enrichis en nitrate d’ammonium) : caractérisé par la forte présence de NO₃ et NH₄ indiquant la présence du nitrate sous forme de nitrate d’ammonium (NH₄NO₃).



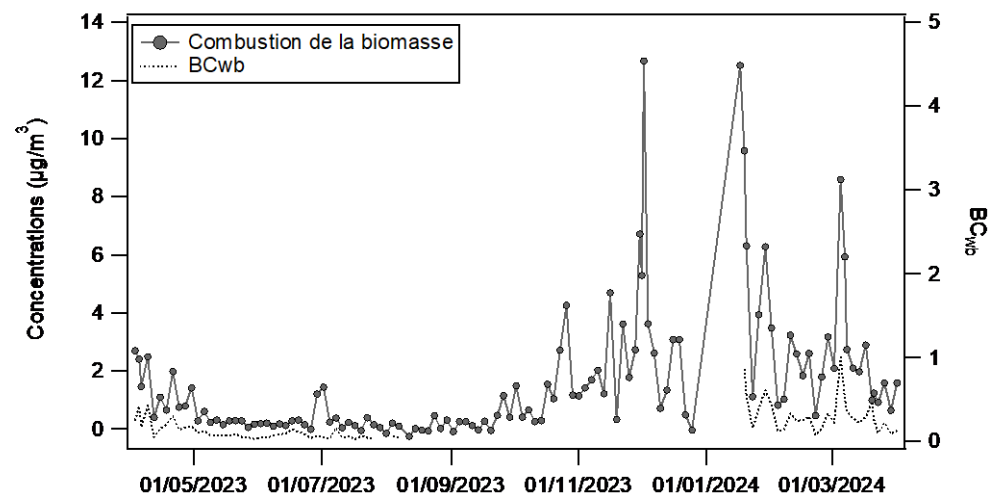


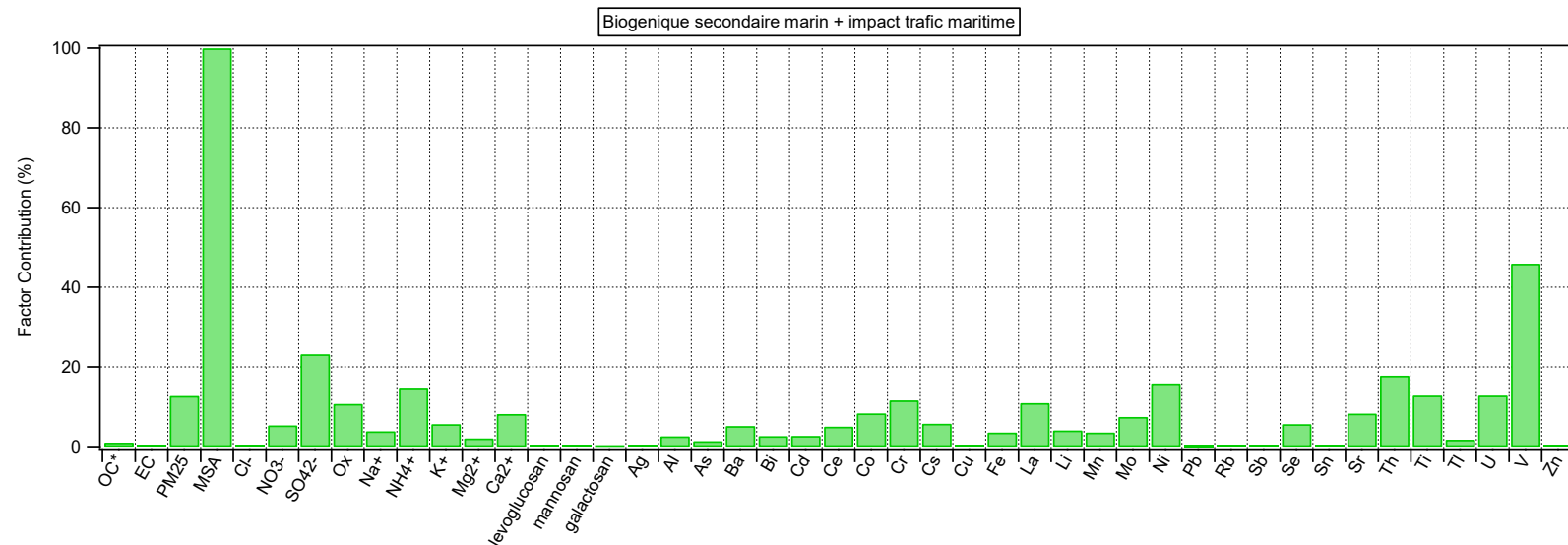
Industries et poussières minérales : ce facteur a été caractérisé principalement par la présence importante des éléments métalliques ou métalloïdes tels que Al, Co, Fe, Li, Ni, Sr, Th, Tl, U qui sont fréquemment observés au sein de diverses émissions industrielles. En plus, les éléments minéraux et métalliques, tels que Ca^{2+} , Al, Mn, Ti, Zn, sont attribués souvent à une signature des processus de remise en suspension des poussières (érosion des sols, les chantiers de construction, la circulation routière, les aires de stationnement), ainsi qu'une origine terrigène.



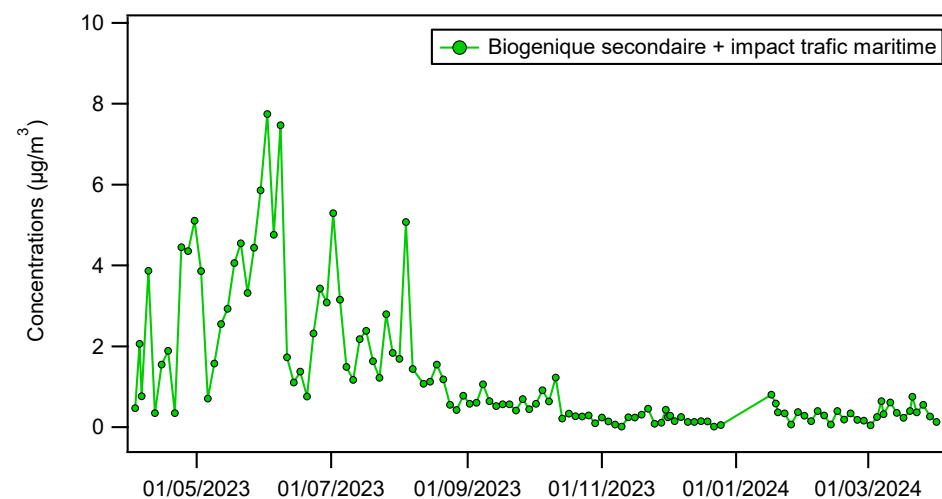


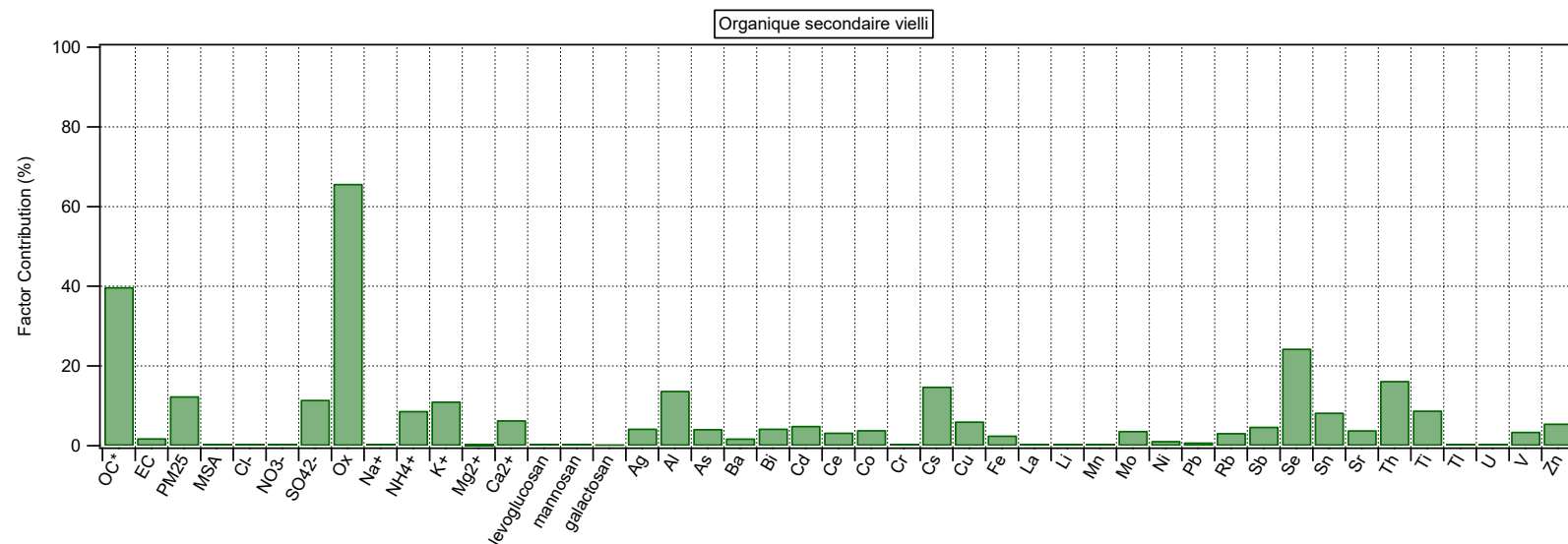
Combustion de la biomasse : Ce facteur est caractérisé par la présence de lévoglucosan, mannosan, galactosan et d'OC ainsi que du K⁺.



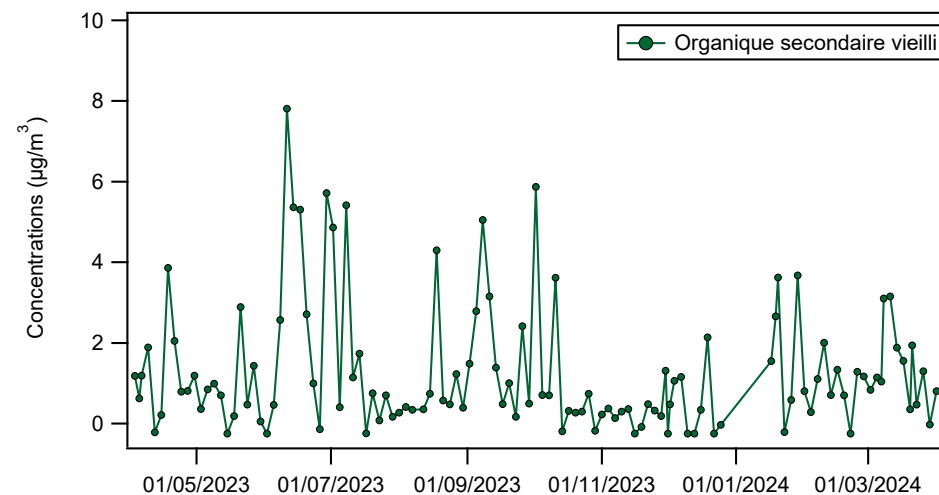


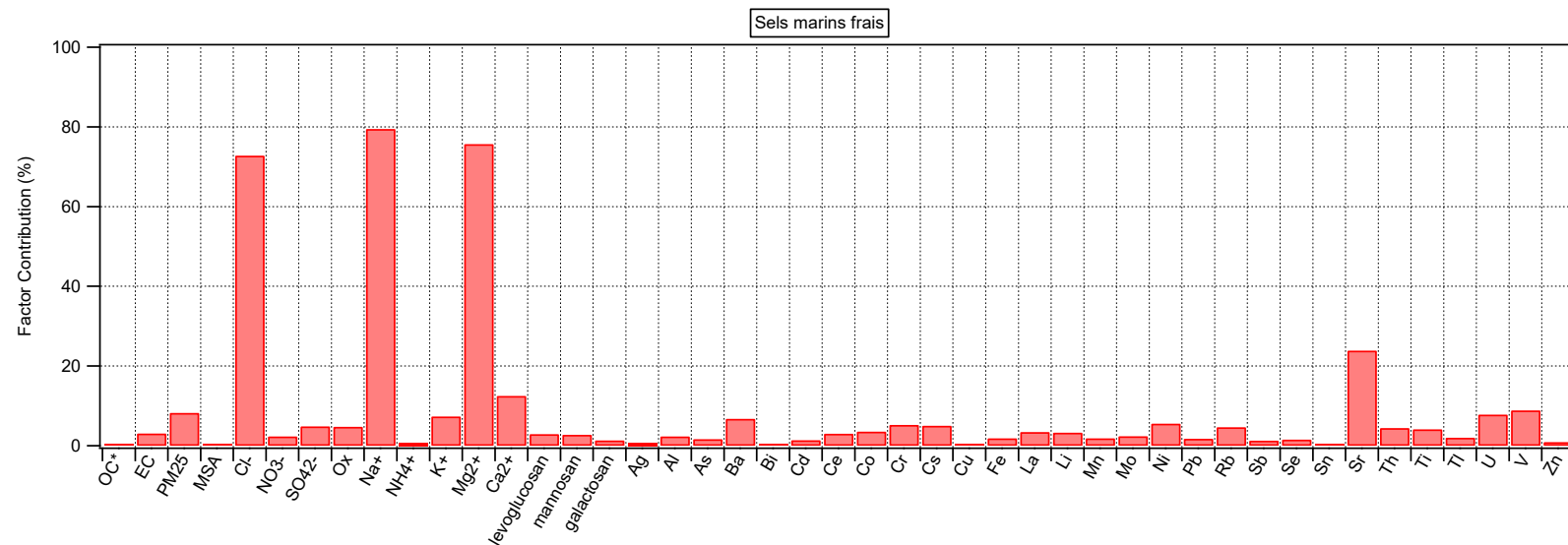
Biogénique secondaire marin et impact trafic maritime : ce facteur est caractérisé par la présence du MSA et du SO_4^{2-} , ces deux espèces pouvant provenir de l'oxydation du DMS émis par le phytoplancton marin. Il est à noter que ce facteur présente également des proportions importantes d'éléments tels que le V indiquant un mélange avec la source combustion de fuel lourd issu du transport maritime.



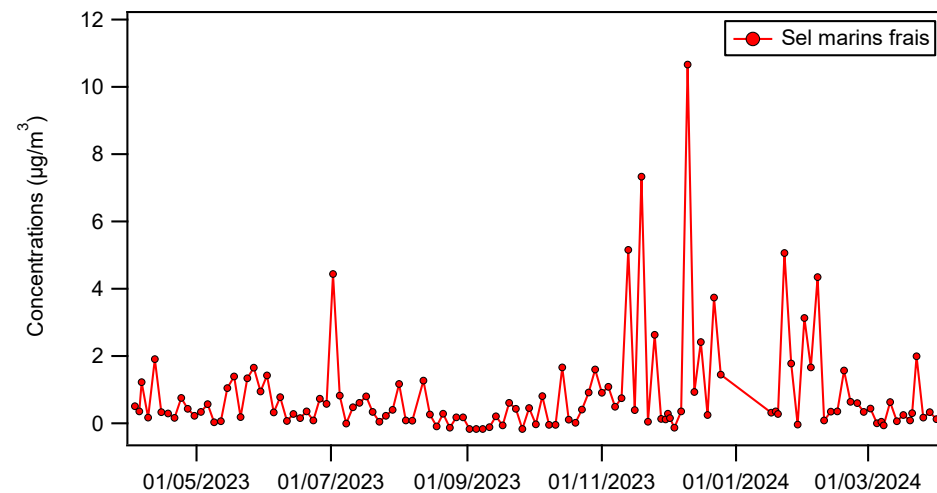


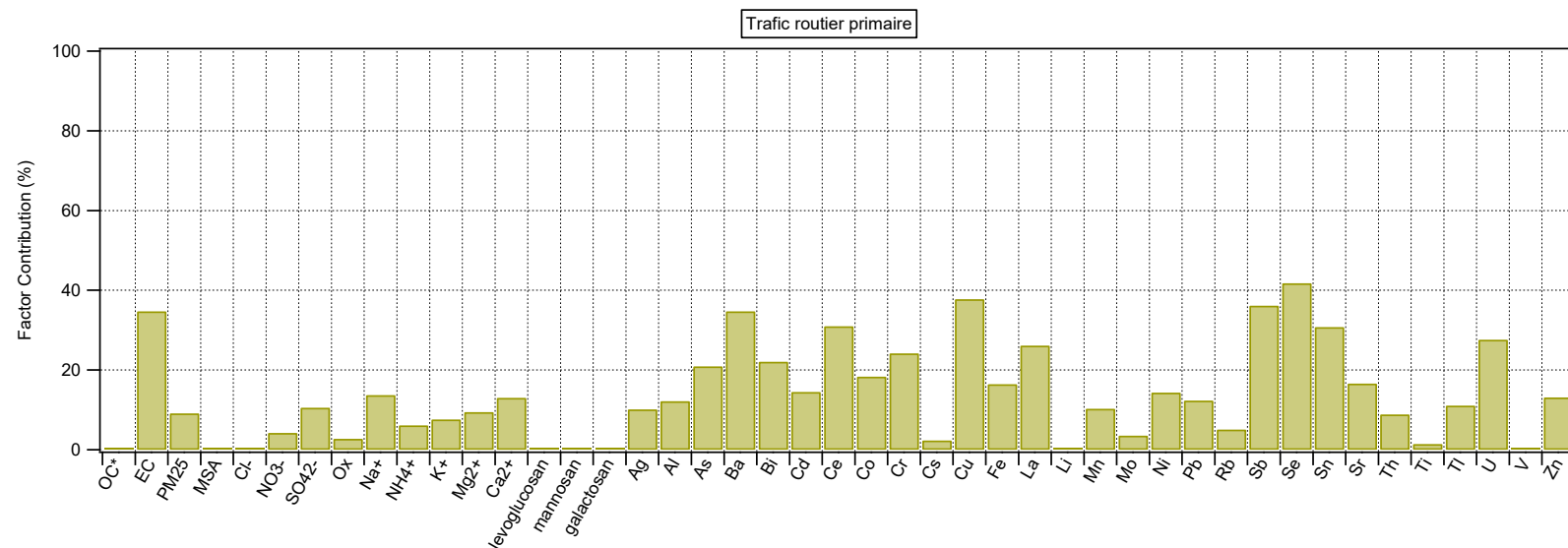
Organique secondaire vieilli : ce facteur est caractérisé par la présence d'oxalate et du OC. Les sources d'oxalate sont principalement issues de l'oxydation des composés organiques, souvent par photochimie dans l'atmosphère. Ces réactions, stimulées par la lumière solaire, transforment des précurseurs organiques en oxalate. Une partie de l'oxalate peut également provenir de processus secondaires liés aux émissions biogéniques (sources naturelles) et à la combustion de fuel fossile et de la biomasse (sources anthropiques). La présence de SO_4^{2+} , qui est un polluant secondaire, est à relier à un apport de masses d'air lointaines.



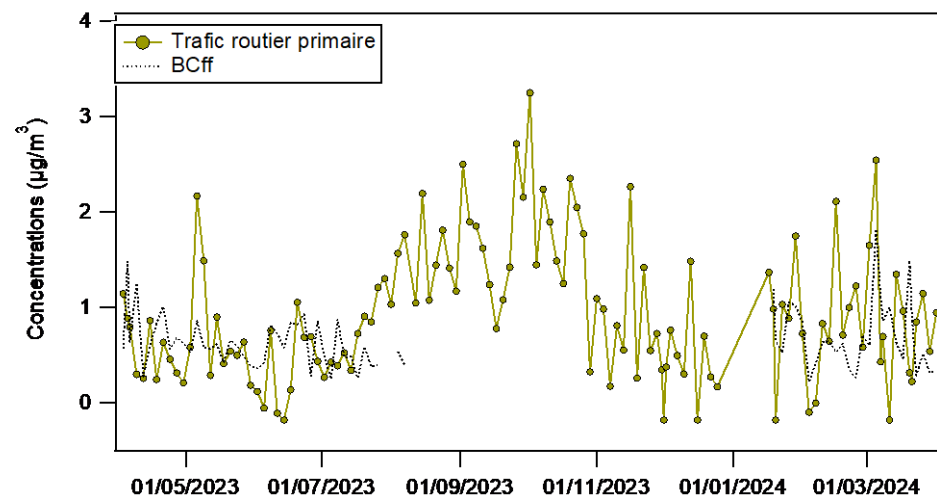


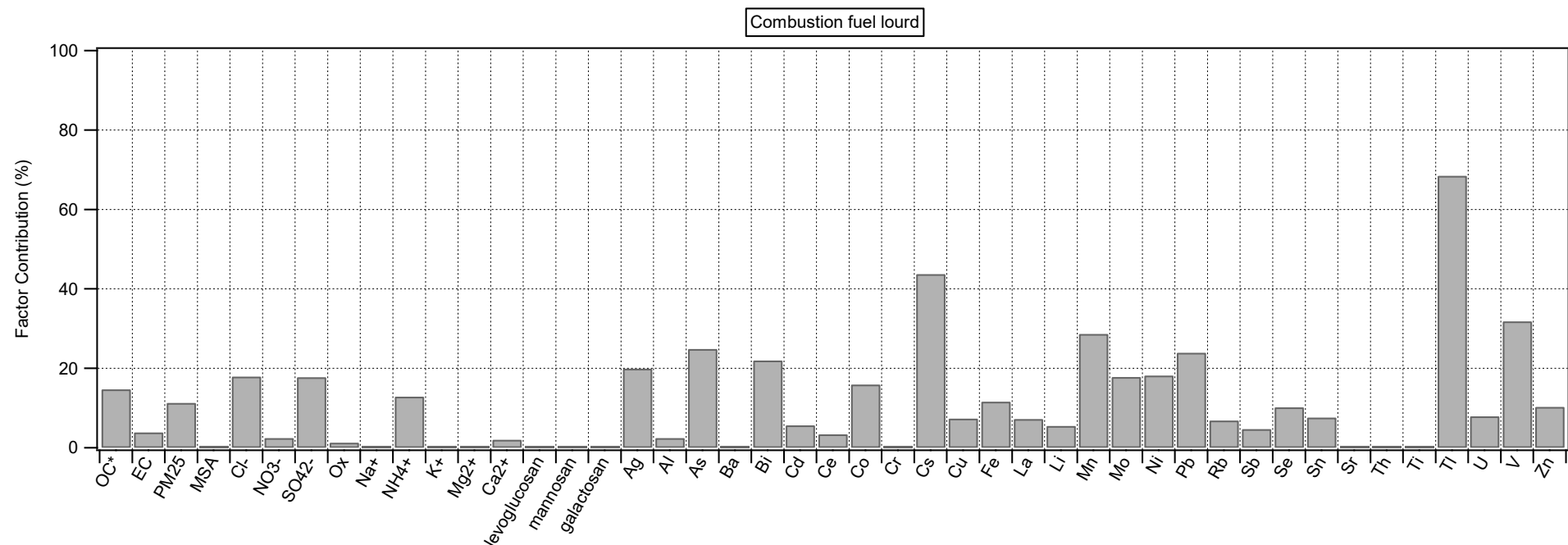
Sel marins frais : ce facteur est caractérisé par la prédominance de Cl^- , Na^+ et Mg^{2+} qui sont des composés majeurs de l'eau de mer.



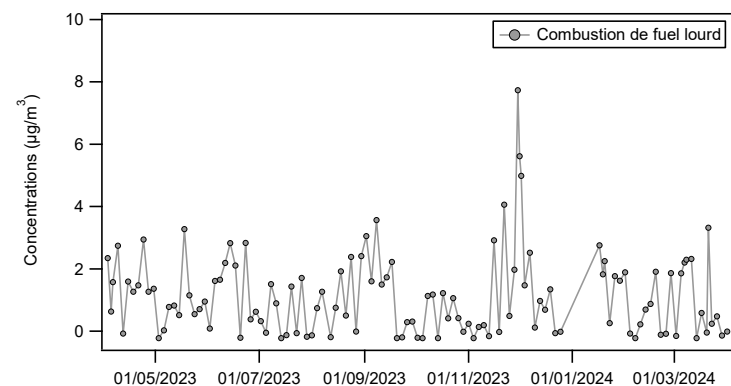


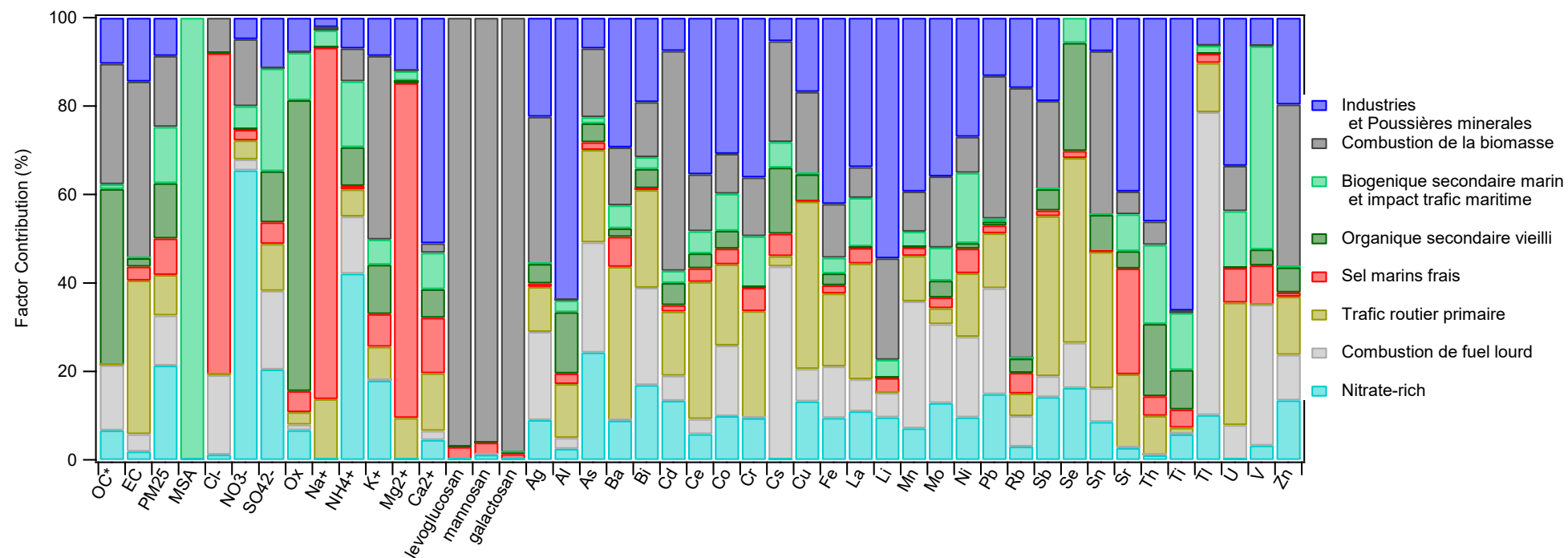
Trafic routier primaire : caractérisé par la forte présence d'EC (majoritairement émis par les combustions de fuels fossiles (hydrocarbures)) et des éléments métalliques qui peuvent être émis par l'usure de certaines pièces mécaniques des véhicules, ou des pneus et des freins. Ce facteur attribué au trafic routier combine donc des émissions véhiculaires à l'échappement ainsi qu'une partie des émissions hors-échappement.





Combustion de fuel lourd : Caractérisé par la présence du OC, V, du Cs et du Tl. Ces éléments peuvent être liés à la combustion du fioul lourd par les raffineries et les centrales thermiques (combustion du charbon) et liés aux émissions de la circulation maritime. De plus, la présence du sulfate d'ammonium, montre un impact de transport des masses lointaines, il est un polluant secondaire, sa saisonnalité est à relier à une activité photochimique plus intense liée au fort ensoleillement favorisant l'oxydation du SO₂. La présence de OC, est aussi liée à la formation d'aérosols organiques secondaires par des processus de réactions photochimiques et de conversion gaz-particules assez similaires à ceux conduisant à la formation du sulfate d'ammonium.





Annexe 9 : Tableau des valeurs réglementaires des particules en air ambiant : Directive 2008 et Directive 2030

Polluant	Norme	Valeur Limite	
		Exposition aiguë	Exposition chronique
		Moyenne journalière	Moyenne annuelle
Particules en suspension PM ₁₀	Directive 2008/50/EC	50 µg/m ³ à ne pas dépasser plus de 35 jours par an	40 µg/m ³
	Directive 2030	45 µg/m ³ à ne pas dépasser plus de 18 jours par an	20 µg/m ³
Particules en suspension PM _{2.5}	Directive 2008/50/EC	-	25 µg/m ³
	Directive 2030	25 µg/m ³ à ne pas dépasser plus de 18 jours par an	10 µg/m ³



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

Atmo Hauts-de-France

Observatoire de l'Air

199, rue Colbert – Bâtiment Douai

59000 Lille

