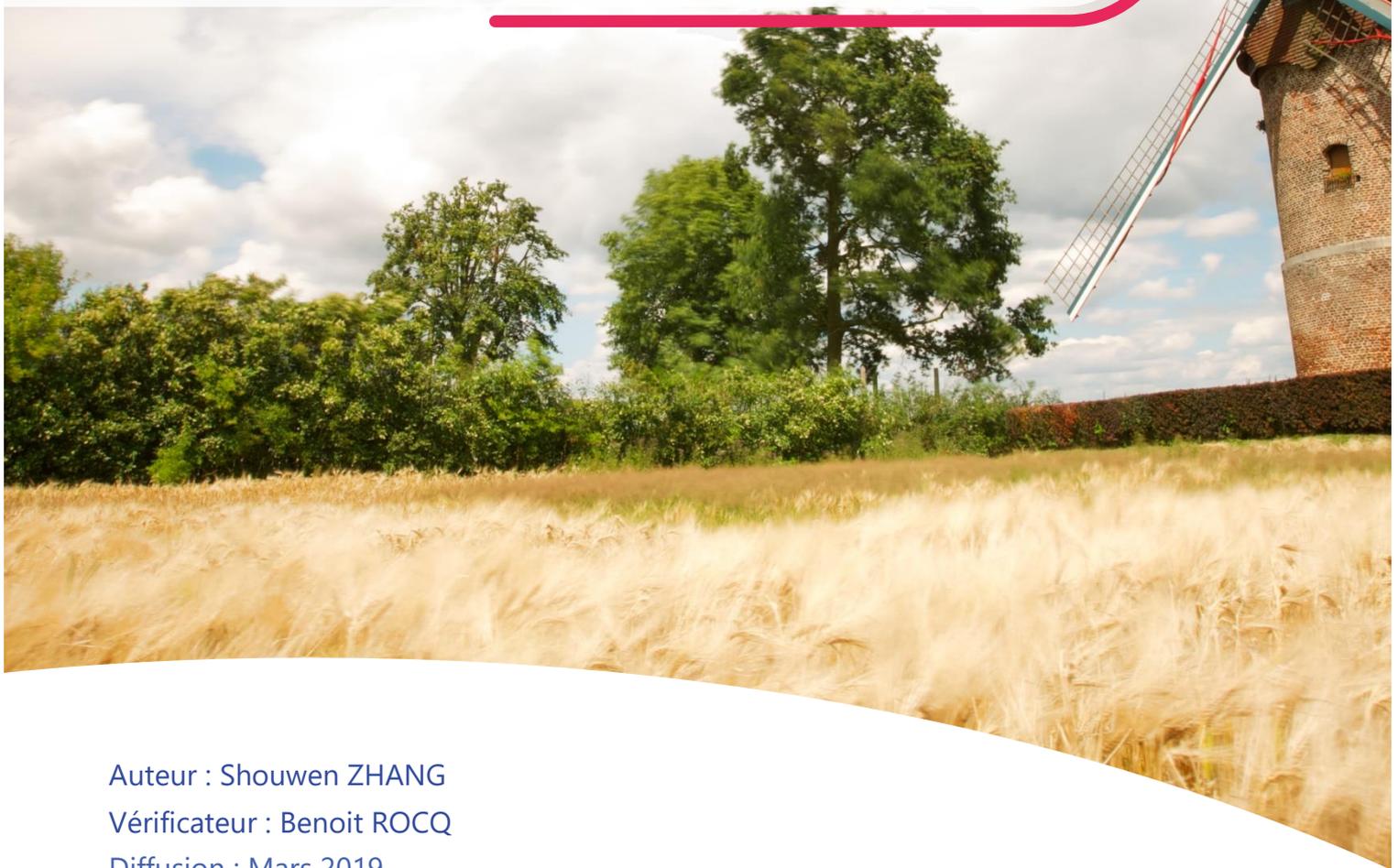


RAPPORT D'ETUDE

Evaluation de l'origine géographique des particules PM10 à Nogent-sur-Oise

Etude menée en 2013-2016



Auteur : Shouwen ZHANG
Vérificateur : Benoit ROCQ
Diffusion : Mars 2019

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 au 31 décembre 2019 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.

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°02/2016/SZ/V0**. 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	Benoît Rocq	Directeur Adjoint	

Version du document : V0 basé sur trame vierge : EN-ETU-20

Date d'application : 11 janvier 2018

Sommaire

1. Synthèse de l'étude.....	7
2. Enjeux et objectifs de l'étude	8
3. Contexte environnemental	9
3.1. Zone d'étude : Nogent-sur-Oise	9
3.2. Emissions connues.....	10
4. Méthodologie	11
4.1. Les échelles spatiales	11
4.2. Introduction de l'outil ZeFir.....	12
4.3. Méthode d'analyse du vent.....	13
4.4. Méthode d'analyse des rétro-trajectoires.....	13
5. Résultats de l'étude	15
5.1. Sources identifiées par PMF	15
5.2. Analyse du vent	17
5.3. Analyses des rétro-trajectoires	36
6. Conclusion et perspectives.....	39



Annexes

Annexe 1 : Glossaire.....	41
Annexe 2 : Profils chimiques et séries temporelles des facteurs PMF	43
Annexe 3 : Localisation de la station de mesure et de la station météo	47
Annexe 4 : Sources biogénique primaire à Nogent-sur-Oise	47
Annexe 5 : Cartes CWT de certaines espèces mesurées.....	48
Annexe 6 : Vue satellitale d'un bloom de phytoplancton dans la mer du Nord (7 mai 2008)	49
Annexe 7 : 90.4 percentiles de la concentration journalière des particules PM10 en 2015	50
Annexe 8 : Concentration moyenne annuelle des particules PM10 en 2015	51

Illustrations

Figure 1 a) Géolocalisation de la station Nogent-sur-Oise ( : station de mesure ; ligne orange : voie de circulation ; ligne rouge : voie ferrée ; ligne bleue : canal) ; b) Photo de la station Nogent-sur-Oise.....	10
Figure 2 Répartition des sources d'émissions particules PM10 dans la communauté de l'agglomération (source: inventaire d'émissions par Atmo Hauts-de-France, version A2015_M2017_V1).....	10
Figure 3 La structure du fonctionnement ZeFir (Ligne orange : données de concentrations ; ligne grise : données de vent/trajectoire).	12
Figure 4 Répartition des sources des particules PM10 à Nogent-sur-Oise (2013-2016).....	15
Figure 5 Analyses NWR globales (2013-2016) pour chaque facteur	18
Figure 6 Analyses NWR saisonnières (Combustion de la biomasse)	20
Figure 7 Variation saisonnière de la température ambiante à Nogent-sur-Oise.....	20
Figure 8 Analyses NWR saisonnières (trafic routier primaire)	21
Figure 9 Variation saisonnière du facteur trafic routier primaire	21
Figure 10 Analyses NWR saisonnières (nitrate-rich)	22
Figure 11 Analyses NWR saisonnières (sulfate-rich)	23
Figure 12 Analyses NWR saisonnières (biogénique primaire).....	24
Figure 13 Analyses NWR saisonnières (biogénique secondaire marin).....	25
Figure 14 Analyses NWR saisonnières (sels marins).....	26
Figure 15 Analyses NWR saisonnières (poussières minérales/industrielles).....	27
Figure 16 Analyses NWR annuelles (nitrate-rich).....	28
Figure 17 Analyses NWR annuelles (sulfate-rich).....	29
Figure 18 Analyses NWR annuelles (combustion de la biomasse).....	30
Figure 19 Analyses NWR annuelles (trafic routier primaire)	31
Figure 20 Analyses NWR annuelles (sels marins)	32
Figure 21 Analyses NWR annuelles (Biogénique primaire)	33
Figure 22 Analyses NWR annuelles (biogénique secondaire marin)	34
Figure 23 Analyses NWR annuelles (poussières minérales/industrielles)	35
Figure 24 Cartes CWT globales (2013-2016) : nitrate-rich, sulfate-rich, sels marins et biogénique secondaire marin	37

Tableaux

Tableau 1 Echelle spatiale et temporelle définie dans les études précédentes et cette étude	11
Tableau 2 Paramètres utilisés dans le module NWR	13
Tableau 3 Exemple d'une trajectoire agrandie.....	14

1. Synthèse de l'étude

La recherche des sources de polluants atmosphériques est une étape importante pour comprendre les épisodes de pollutions et améliorer la qualité de l'air. Dans l'étude précédente « Programme CARA Nogent-sur-Oise 2013-2016 »¹, les huit sources principales des particules PM10 à Nogent-sur-Oise ont été identifiées et quantifiées. Cependant, cette étude ne permettait pas de répondre à la question suivante : **quelles sont les origines géographiques des particules ? Cette dernière question est abordée ici, sur cette même période grâce à l'utilisation d'un outil combinant les méthodes d'analyses du vent et des rétro-trajectoires.** Les résultats obtenus peuvent aider les décideurs à construire des plans d'action adaptés aux différentes échelles géographiques (locale, régionale et européenne).

Des sources de particules locales et éloignées

Les sources principales des particules PM10 à Nogent-sur-Oise peuvent être classées en 3 catégories selon leurs distributions spatiales :

- **2 sources locales** (la combustion de la biomasse, principalement liée au chauffage au bois et le trafic routier primaire),
- **2 sources régionales** (les biogéniques primaires et les poussières minérales/industrielles),
- **4 sources principalement liées à des processus de transport à longue distance** (le nitrate-rich, le sulfate-rich, le biogénique secondaire marin et les sels marins).

Les fractions secondaires nitrate-rich et le sulfate-rich ont des origines géographiques assez similaires en provenance notamment d'Europe centrale (Allemagne, Pologne et République tchèque), et aussi de la zone Benelux (la Belgique, les Pays-Bas et le Luxembourg). Les sels marins proviennent majoritairement de l'océan Atlantique nord. Les particules liées au biogénique secondaire marin trouvent leur origine principalement dans la mer du Nord.

L'évolution saisonnière des particules

Les origines géographiques et concentrations de chaque composé ont également été évaluées de façon saisonnière et inter-annuelle.

Les particules issues de la combustion de la biomasse (chauffage au bois) et les sels marins présentent une concentration maximale durant l'hiver.

Le facteur nitrate-rich se trouve principalement pendant la **période hiver-printemps.**

Les deux facteurs biogéniques sont abondants pendant la **période estivale.**

L'évolution pluriannuelle (2013-2016) des particules

Entre 2013 et 2016, le sulfate-rich semble montrer une tendance à la baisse ; ce qui pourrait être expliqué par la réduction d'émissions de dioxyde de soufre (SO₂) à l'échelle européenne.

Cependant, **les 3 facteurs locaux et régionaux, majoritairement anthropiques** : la combustion de la biomasse (chauffage au bois), le trafic routier primaire et les poussières minérales/industrielles représentent un **niveau stable pendant ces 4 ans.**

Ces 3 facteurs nécessitent un suivi dans le temps pour évaluer l'impact des actions locales visant à réduire leurs émissions importantes.

¹ Shouwen Zhang, "Programme CARA Nogent-Sur-Oise 2013-2016," Rapport d'étude (Atmo Hauts-de-France, Novembre 2018), http://www.atmo-hdf.fr/joomlafiles/docman-files/Rapport_et_synthese_etudes/rapport_complet_nogent_min.pdf.

2. Enjeux et objectifs de l'étude

Les particules atmosphériques sont composées d'un mélange de particules solides et de gouttelettes liquides présentes dans l'air. Les particules PM10 sont les particules inhalables, dont le diamètre est inférieur à 10 micromètres, présentant des effets avérés sur la santé à court terme (heures, jours) et à long terme (mois, années)². Par conséquent, la législation européenne fixe des limites sur les niveaux de particules et des objectifs pour l'amélioration de la qualité de l'air.

La région de Creil a dépassé régulièrement des seuils réglementaires pour les particules entre 2011 et 2013. Un Plan de Protection de l'Atmosphère (PPA) de la région de Creil a été approuvé par le Préfet de l'Oise en décembre 2015. Ce plan vise à prévenir de nouveaux dépassements, à diminuer les émissions et à améliorer la qualité de l'air.

Notre étude précédente « Programme CARA Nogent-sur-Oise 2013-2016 » a permis de caractériser la composition chimique des particules PM10, d'identifier et de quantifier les sources principales à l'aide d'un modèle statistique et de mieux comprendre les épisodes de pollution sur le site de Nogent-sur-Oise pendant la période 2013-2016.

L'analyse statistique avec le modèle PMF (*Positive Matrix Factorization*) a répondu aux questions suivantes : quelle sont les sources principales et comment contribuent-elles aux particules PM10 ? Cependant, cela n'est pas suffisant pour comprendre : d'où viennent ces polluants ? Est-ce qu'ils sont produits par les émissions locales ou sont-ils transportés à longue distance ? Si c'est une source lointaine, où est son origine géographique potentielle ?

Dans ce rapport, la recherche de l'origine géographique des sources permettra d'atteindre les objectifs ci-dessus :

- i) Identifier les échelles spatiales de chaque source : locale, régionale ou lointaine ;
- ii) Comprendre leurs variations temporelles (saisonnière et pluriannuelle) et spatiales ;
- iii) Aider aux décideurs locaux, régionaux et européennes à établir la stratégie et les actions réglementaires afin de réduire les particules atmosphériques.

² IARC (2018). Les cancers attribuables au mode de vie et à l'environnement en France métropolitaine. Lyon: International Agency for Research on Cancer. Accès à : http://gco.iarc.fr/resources/paf-france_fr.php, consulté le 03 Avril 2019.

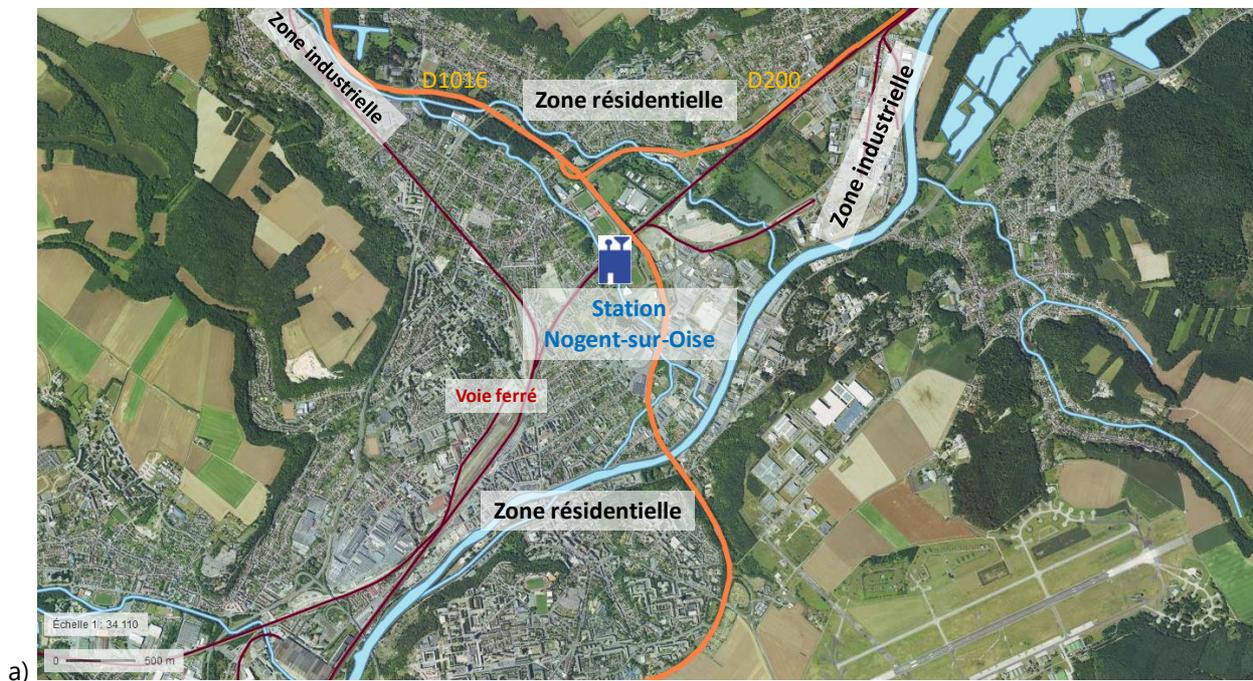
3. Contexte environnemental

3.1. Zone d'étude : Nogent-sur-Oise

Nogent-sur-Oise est une commune située dans le sud du département de l'Oise, en région Hauts-de-France. La ville est logée dans l'unité urbaine de Creil regroupant 116 662 habitants (2 627 hab./km²) et est la première unité urbaine du département de l'Oise. De plus, la ville est entourée par plusieurs agglomérations urbaines importantes : elle est à 48 km au nord de Paris, à 70 km au sud d'Amiens, à 33 km au sud-est de Beauvais, et à 37 km au nord-est de Pontoise.

La station de mesure (Longitude : 2° 28' 56" E ; Latitude : 49° 16' 36" N ; Altitude : 30 m) est située entre une zone industrielle au nord-est et des quartiers résidentiels (Figure 1a). Ceux-ci sont composés de maisons particulières aux alentours immédiats de la station, puis d'immeubles collectifs plus au sud. La voie de circulation la plus proche est la D1016 (voie rapide) à une distance d'environ 200 m et une intersection à 1,5 km très fréquentée entre la D1016 et la D200 (trafic > 15 000 véhicules/jour). On compte aussi une voie ferrée à 160 m au nord du site et un canal de transport fluvial au sud-est à 1 km. A 300 m au sud se trouve une zone d'activité commerciale, source d'une circulation automobile importante.

Les sources locales de pollution sont donc constituées d'un fond urbain important (chauffages résidentiels et circulation automobile) et des quelques industries voisines (dans les directions nord-est et nord-ouest).





b)

Figure 1 a) Géolocalisation de la station Nogent-sur-Oise ( : station de mesure ;  : voie de circulation ;  : ligne rouge ;  : canal) ; b) Photo de la station Nogent-sur-Oise

3.2. Emissions connues

Les sources d'émissions connues pour les particules PM10 dans la communauté de l'agglomération Creil Sud Oise (ACSO) sont représentées par secteur d'activité sur la Figure 2. Le secteur industriel est la source principale qui contribue à 34% des émissions de particules PM10. Le secteur résidentiel et le transport routier sont aussi des sources importantes, qui contribuent 24-25% de la masse émise. Les autres secteurs (agriculture, production d'énergie et les autres transports) représentent chacun environ 4-8% des émissions de particules PM10.

Répartition des sources d'émissions particules PM10

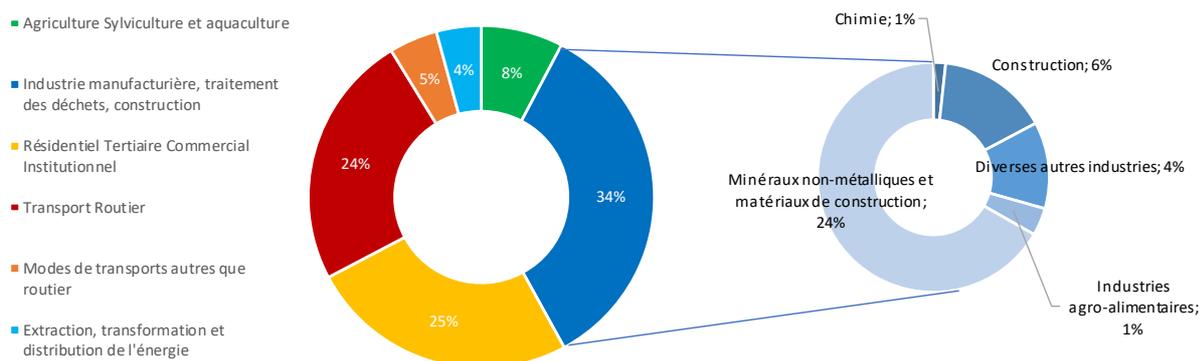


Figure 2 Répartition des sources d'émissions particules PM10 dans la communauté de l'agglomération (source : inventaire d'émissions par Atmo Hauts-de-France, version A2015_M2017_V1)

Un regard plus approfondi sur le secteur industriel montre que les minéraux non-métalliques et matériaux de construction dominent avec 24% des émissions de particules PM10 (e.g. la carrière). La construction (notamment chantiers, Bâtiments et Travaux Publics – BTP) et les autres types industries contribuent à 6% et

4% des émissions de particules PM10, respectivement. Le secteur chimie et l'industrie agro-alimentaire ne représentent que 1% chacun des émissions de PM10.

Ces répartitions d'émissions permettent de donner une vision globale sur les activités anthropiques qui contribuent aux concentrations de particules PM10. Il ne faut en revanche pas les confondre avec les concentrations de particules PM10 observées sur un site récepteur, qui sont fortement influencées par les conditions météorologiques, les polluants transportés sur de longues distances et les réactions physico-chimiques dans l'atmosphère.

4. Méthodologie

4.1. Les échelles spatiales

La dispersion d'un polluant atmosphérique peut être caractérisée par son temps de vie dans l'atmosphère et son échelle spatiale.

Actuellement, la classification des échelles spatiales des phénomènes atmosphériques suggérée par Orlanski, (1975)³ dans « *A rational subdivision of scales for atmospheric processes* » et « *An Introduction to Boundary Layer Meteorology* » par Stull (2012)⁴ est largement acceptée (Tableau 1).

Tableau 1 Echelle spatiale et temporelle définie dans les études précédentes et cette étude

Échelle spatiale	Échelle temporelle	Orlanski (1975)	Stull (2012)	Cette étude	
2 m	1 s	Micro- γ	Micro- δ	Échelle locale	Source locale
20 m	1 min		Micro		
200m	30 min				
2 km	1 h	Micro- β	Mésos	Échelle régionale	Source régionale
20 km		Mésos- γ			
200 km	1 jour	Mésos- β	Macro	Échelle continentale	Source lointaine
2000 km	1 semaine	Mésos- α			
10 000 km		Macro- β			
> 10 000 km	1 mois	Macro- α		Échelle planétaire	(Non concernée)

Les échelles spatiales des polluants atmosphériques peuvent être classées en 4 catégories : locale, régionale, continentale et planétaire.

- Les polluants à l'échelle locale sont des sources à proximité du site de mesure (< 2 km), comme les émissions industrielles, le trafic routier et le chauffage urbain.
- Les polluants à l'échelle régionale ont une influence sur quelques dizaines jusqu'aux centaines de kilomètres. Attention, ici la notion « régionale » ne signifie pas la division administrative du territoire, mais plutôt la taille de surface géographique.

³ Isidoro Orlanski, "A Rational Subdivision of Scales for Atmospheric Processes," *Bulletin of the American Meteorological Society* 56, no. 5 (1975): 527–30.

⁴ R.B. Stull, *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Atmospheric and Oceanographic Sciences Library (Springer Netherlands, 2012), <https://books.google.fr/books?id=2PjrCAAAQBAJ>.

- Les polluants à l'échelle continentale peuvent être transportés plus de mille kilomètres jusqu'aux dix mille kilomètres.
- Les polluants à l'échelle planétaire les plus connus sont les gaz de l'effet de serre, qui ont les impacts sur le changement climatique et sur la couche d'ozone stratosphérique. Mais ils ne sont pas évoqués dans cette étude.

Pour les sources des particules PM10 à Nogent-sur-Oise, on distingue les sources locales, régionales et lointaines qui correspondent à leur influence spatiale à différentes échelles indiquées dans le Tableau 1.

4.2. Introduction de l'outil ZeFir

ZeFir est un nouvel outil permettant d'effectuer des études sur les origines géographiques des polluants atmosphériques⁵. Il combine les méthodes d'analyses du vent et des trajectoires.

La structure de cet outil est résumée par la Figure 3 (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).

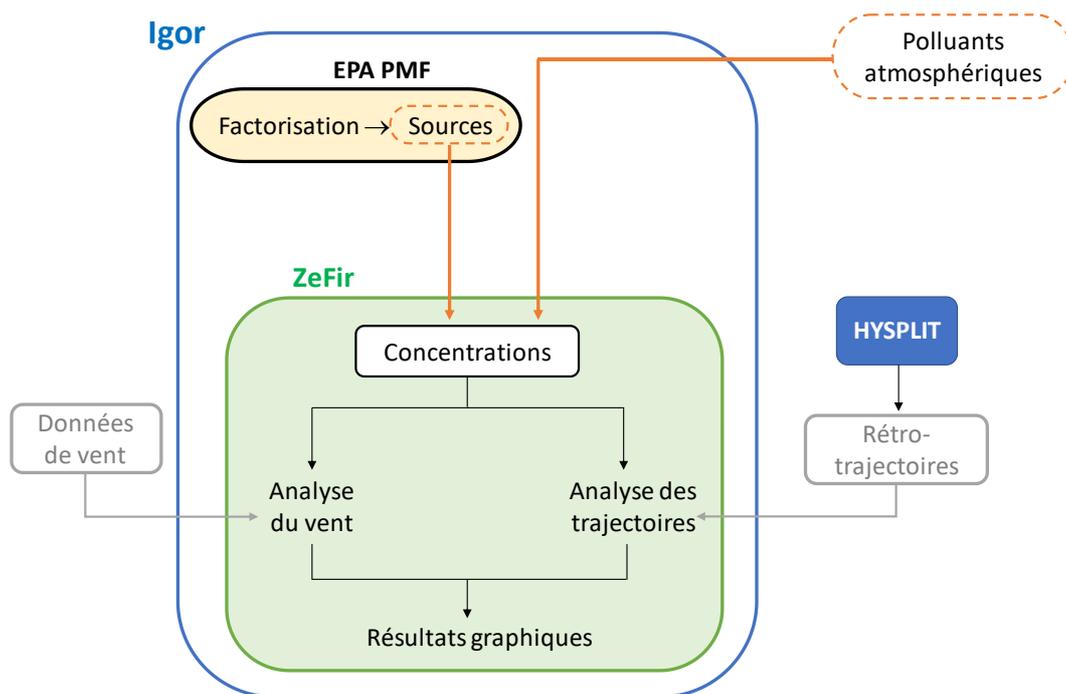


Figure 3 La structure du fonctionnement ZeFir (Ligne orange : données de concentrations ; ligne grise : données de vent/trajectoire). Adapté de J.-E. Petit et al., (2017)⁵

Dans cette étude, les concentrations de particules utilisées sont les sources identifiées par le modèle source-récepteur PMF (*Positive Matrix Factorization*) ou les espèces chimiques mesurées dans les filtres PM10. 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

⁵ 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>.

à Creil. Les données de rétro-trajectoires sont calculées avec le modèle HYSPLIT, qui est détaillé dans la section 4.4.

4.3. 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)⁶. 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 (1) :

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

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 :

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

$$K_2(x) = 0.75(1 - x^2) ; \quad -1 \leq x \leq 1 \quad (3)$$

Les paramètres utilisés dans l'analyse NWR sont présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2 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	28,23	7,24

4.4. Méthode d'analyse des rétro-trajectoires

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 distance⁷. Elles associent les concentrations mesurées avec les rétro-trajectoires 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 inconvénients⁸.

⁶ 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>.

⁷ 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>.

⁸ 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).

Dans cette étude, la méthode CWT a été utilisée qui est basée sur l'équation (4) :

$$\overline{C_{ij}} = \frac{1}{\tau_{ijk}} \cdot \sum_{k=1}^N C_k \cdot \tau_{ijk} \quad (4)$$

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 .

Pour chaque cellule (ij) d'une grille définie ($0,5^\circ \times 0,5^\circ$), 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 40°W – 40°E et latitude 28°N – 76°N . Un facteur de lissage gaussien de 15 a été appliqué aux résultats.

Les rétro-trajectoires sont calculées avec le modèle HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory)^{9,10}, 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 rétro-trajectoires 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. Au total, 5908 rétro-trajectoires ont été calculées pour la période 2013-2016.

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 (Tableau 3).

Tableau 3 Exemple d'une trajectoire agrandie

Données origines		Trajectoires ajoutées	Données agrandies	
Date	Conc.	(h)	Date	Conc.
06/01/2013 00:00:00	0,30	-12	05/01/2013 12:00:00	0,30
		-6	05/01/2013 18:00:00	0,30
		0	06/01/2013 00:00:00	0,30
		6	06/01/2013 06:00:00	0,30
		12	06/01/2013 12:00:00	0,30

⁹ 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>.

¹⁰ 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>.

5. Résultats de l'étude

5.1. Sources identifiées par PMF

Cette section est un résumé de l'étude précédente (« Programme CARA Nogent-sur-Oise 2013-2016 »), qui détermine les sources principales des particules PM10.

Les particules PM10 ont été prélevées sur filtres tous les jours et leurs concentrations massiques sont mesurées en continu en parallèle ; leurs compositions chimiques (carbone élémentaire/organique, cations et anions, sucres, métaux) ont été analysées 1 jour sur 3.

Les 32 espèces chimiques mesurées ont été utilisées dans l'analyse PMF (*Positive Matrix Factorization*) afin d'identifier et quantifier les sources principales des particules PM10 à Nogent-sur-Oise pendant 2013-2016. 8 facteurs (i.e. chaque facteur correspond à une source) ont été identifiés avec une estimation de leurs contributions aux particules PM10 par le modèle PMF :

- Combustion de la biomasse (12%),
- Trafic routier primaire (16%),
- Nitrate-rich (17%),
- Sulfate-rich (19%),
- Biogénique primaire (3%),
- Biogénique secondaire marin (5%),
- Poussières minérales/industries (19%) et
- Sels marins (8%).

**Répartition des sources des particules PM10
(2013-2016)
Nogent-sur-Oise**

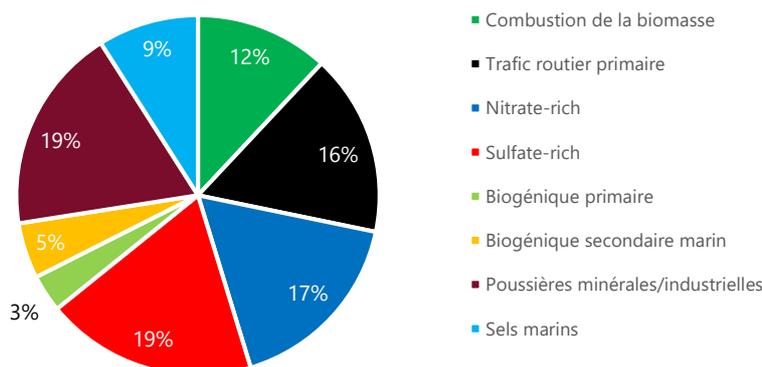


Figure 4 Répartition des sources des particules PM10 à Nogent-sur-Oise (2013-2016)

Ces sources ont été identifiées à partir de leurs profils chimiques et avec des traceurs spécifiques, qui sont documentés dans la littérature scientifique et qui seront discutés en détail dans cette section. Leurs séries temporelles sont également utilisées pour confirmer ces facteurs. Leurs profils chimiques et leurs séries temporelles sont présentés dans l'Annexe 2.

Combustion de la biomasse (chauffage au bois)

Ce facteur est identifié par la présence de deux traceurs majeurs de la combustion de la biomasse : le lévoglucosan et le mannosan, avec des contributions importantes de carbone organique, de potassium et de rubidium.

Trafic routier primaire

Ce facteur est caractérisé par la forte présence d'EC (carbone élémentaire), qui est émis par la combustion de combustibles fossiles. Ce facteur trafic routier primaire comprend également différents métaux, notamment Baryum (Ba), Cuivre (Cu), Fer (Fe), Molybdène (Mo), Plomb (Pb), Antimoine (Sb) et Zinc (Zn), qui sont émis par l'abrasion de certaines pièces mécaniques des véhicules, des pneus et des freins. En conséquence, ce facteur est considéré comme une combinaison des émissions du trafic à l'échappement et hors échappement.

Nitrate-rich

Ce facteur enrichit en particules secondaires de nitrate d'ammonium. Il est caractérisé par la forte présence de nitrate NO_3^- (73% de la masse de cette espèce) et d'ammonium NH_4^+ (70%), indiquant la présence du nitrate sous forme de nitrate d'ammonium (NH_4NO_3). Il est considéré comme une source secondaire qui est formée dans l'atmosphère à partir de précurseurs gazeux azotés (NO_x et NH_3).

Sulfate-rich

Ce facteur est caractérisé par la présence de sulfates SO_4^{2-} (54% de sa masse) et NH_4^+ (28%). Le ratio molaire NH_4/SO_4 environ égal à 2 confirme la présence de sulfate sous forme de sulfate d'ammonium ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) et issu de la combinaison entre l'ammoniac (NH_3) et les produits d'oxydation du dioxyde de soufre (SO_2). Une contribution importante de carbone organique l'OC (23%) est également observée dans ce facteur. Elle est probablement liée à la formation d'aérosols organiques secondaires (AOS) par des processus assez similaires à ceux conduisant à la formation du sulfate d'ammonium.

Biogénique primaire

Selon les études scientifiques^{11,12}, ce facteur est considéré comme lié aux spores fongiques des plantes et aux émissions de pollens. Il est dominé par la présence des polyols (100%) avec la présence d'une partie d'OC (5%) et une fraction de potassium (14%).

Biogénique secondaire marin

Ce facteur est caractérisé par la présence d'acide méthylsulfonique (MSA) (100%). Celui-ci est produit par l'oxydation du DMS (sulfure de diméthyle), qui est émis dans l'atmosphère par le phytoplancton marin.

Poussières minérales/industrielles

Ce facteur est caractérisé par la présence des éléments de la croûte terrestre, tels que l'aluminium Al (77%), le calcium Ca (72%), le fer Fe (46%). Cependant, l'activité des carrières locales et régionales est aussi une source importante pour ces composés minéraux (voir section 3.2).

Ce facteur contient également les métaux remis en suspension et émis par l'usure des pneus et des freins, tels que le baryum Ba, le cobalt Co, le cuivre Cu, le manganèse Mn et le zinc Zn. La présence de certains métaux

¹¹ D. H. LEWIS and D. C. SMITH, "SUGAR ALCOHOLS (POLYOLS) IN FUNGI AND GREEN PLANTS," *New Phytologist* 66, no. 2 (April 1, 1967): 185–204, <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1967.tb05998.x>.

¹² Heriberto Véléz, Norman J. Glassbrook, and Margaret E. Daub, "Mannitol Metabolism in the Phytopathogenic Fungus *Alternaria Alternata*," *Fungal Genetics and Biology* 44, no. 4 (April 1, 2007): 258–68, <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2006.09.008>.

traceurs de sources industrielles, tels que l'arsenic As, le cadmium Cd, le cobalt Co, le nickel Ni, le plomb Pb, le rubidium Rb et le vanadium V indique une contribution de sources industrielles à ce facteur. De ce fait, ce facteur « poussières minérales/industrielles » telles qu'estimées par la PMF contient d'une part des minéraux naturels, et d'autre part de poussières anthropiques (carrières, trafic et industrielles). Bien que nous ne puissions pas donner une proportion précise pour chaque source spécifique dans cette étude.

Sels marins

Les sels marins sont principalement constitués de chlorure de sodium (NaCl). Ce facteur est caractérisé par la prédominance de chlorure Cl⁻ (82%), Na⁺ (80%) et Mg²⁺ (66%). La faible présence du nitrate NO₃⁻ (4%) et du sulfate SO₄²⁻ (6%) indique les réactions entre NaCl, l'acide sulfurique H₂SO₄ et l'acide nitrique HNO₃ conduisant à la formation de Na₂SO₄ et NaNO₃. Ce facteur, lié aux embruns marins, peut ainsi contenir des sels marins frais (NaCl et MgCl₂) en majorité et une petite fraction des sels marins vieillis (Na₂SO₄ et NaNO₃).

5.2. Analyse du vent

Cette section présente l'analyse du vent par la méthode NWR (*Non-parametric wind regression*) pour les huit facteurs identifiés par la méthode PMF. 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 Creil (Annexe 3).

Dans un premier temps, les analyses NWR sont effectuées pour la période globale (2013-2016). Dans la suite, les analyses saisonnières pour chaque facteur sont présentées. Enfin, les évolutions annuelles sont présentées uniquement pour les facteurs qui ont une variation pluriannuelle significative.

5.2.1. Analyses NWR globales

Les analyses NWR globales (sur la période 2013-2016) pour chaque facteur sont présentées sur la Figure 5.

La direction du vent signifie la direction d'où vient le vent : un vent de nord, c'est de l'air qui nous vient du 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. 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, 0-1,4 µg/m³ pour le facteur biogénique primaire et 0-12 µg/m³ pour le facteur combustion de la biomasse). La couleur de l'échelle correspond à la concentration massique (µg/m³) de ce facteur : le rouge correspond à la concentration la plus élevée et le bleu à la plus faible.

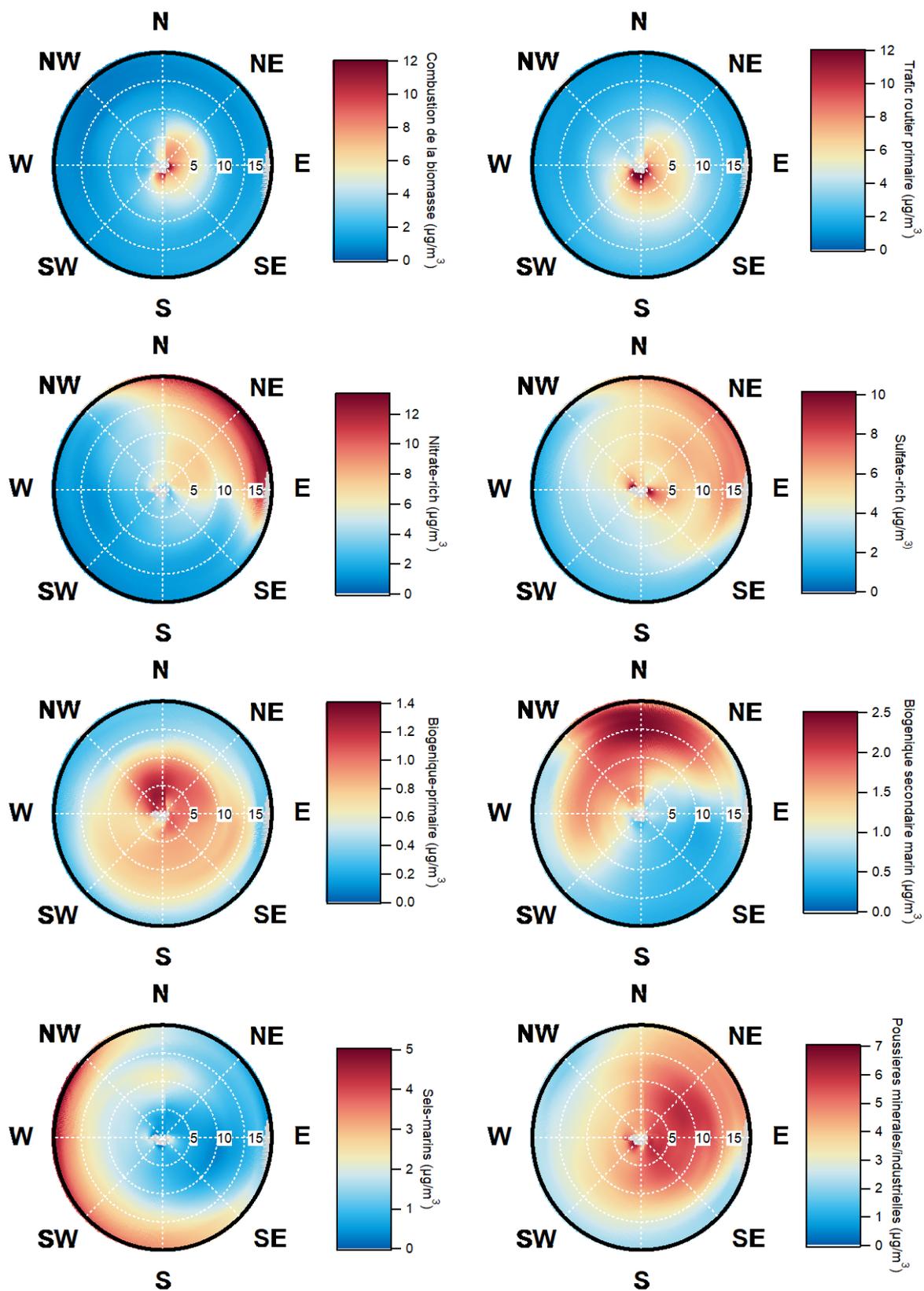


Figure 5 Analyses NWR globales (2013-2016) pour chaque facteur

La combustion de la biomasse et le trafic routier primaire montrent que leurs concentrations élevées ($> 12 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sont associées à de très faibles vitesses du vent ($< 3 \text{ km}/\text{h}$). Au-delà de $10 \text{ km}/\text{h}$, les concentrations sont négligeables ($< 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$). En conséquence, ces deux facteurs **sont considérés comme des sources locales**.

Le facteur nitrate-rich se trouve principalement dans les directions N-NE-E. Sa concentration maximale ($> 12 \mu\text{g}/\text{m}^3$) est liée au vent fort ($> 15 \text{ km}/\text{h}$), particulièrement dans les directions NE-E. **Le facteur sulfate-rich** montre que sa concentration élevée se trouve dans deux conditions différentes : une source associée avec les très faibles vitesses du vent ($< 3 \text{ km}/\text{h}$) et une source associée avec le vent fort ($> 15 \text{ km}/\text{h}$) dans les directions N-NE-E. **Le facteur nitrate-rich et le facteur sulfate-rich sont considérés comme des sources lointaines**.

Le facteur biogénique primaire montre une concentration importante liée au vent entre $0-10 \text{ km}/\text{h}$ dans les directions NW-N. En même temps, il présente un niveau de fond ($0,6-0,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) dans toute la direction avec la vitesse du vent inférieur à $15 \text{ km}/\text{h}$. **Il est considéré comme une source locale mais aussi influencé par la végétation régionale**. En revanche, **le facteur biogénique secondaire marin** est plutôt lié au vent fort ($15-20 \text{ km}/\text{h}$) autour des directions NW-N-NE. **Il est considéré comme une source lointaine**. La concentration massique de ces deux facteurs biogéniques est très faible ($< 3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) comparée aux autres facteurs.

Les sels marins sont présents uniquement avec le vent fort ($> 20 \text{ km}/\text{h}$) dans les directions NW-SW-SE. **Il n'existe pas de source locale pour ce facteur qui est cohérent avec sa source d'origine : les embruns marins**. La distance entre Nogent-sur-Oise et le bord de la mer le plus proche est de 115 km .

Les poussières minérales représentent un niveau de fond ($3-4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) dans toutes les directions. Sa concentration plus élevée ($5-7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se trouve dans les directions NE-E-SE. La zone industrielle se situe dans la direction NE et la voie rapide D1016 se situe dans les directions E-SE. Comme déjà discuté dans la section 5.1, **ce facteur est un mélange de minéraux terrestres** (toute la direction) **et de poussières anthropiques** (industrielles et remises en suspensions par le trafic routier).

En résumé, les sources principales des particules PM₁₀ à Nogent-sur-Oise peuvent être classées en 3 catégories selon des analyses NWR : **2 sources locales** (combustion de la biomasse et trafic routier primaire), **2 sources régionales** (biogéniques primaires et poussières minérales) et **4 sources** principalement **transfrontières** (nitrate-rich, sulfate-rich, biogénique secondaire et sels marins).

5.2.2. Analyses NWR saisonnières

Dans cette partie, les analyses NWR sont effectuées par saison pour chaque facteur. Chaque saison correspond à la moyenne de données des 4 années de la période d'étude (2013-2016).

Combustion de la biomasse

Comme déjà discuté dans les sections ci-dessus, **le facteur combustion de la biomasse est principalement lié au chauffage au bois et est considéré comme une source locale**. Les analyses NWR de ce facteur montrent une variation saisonnière très significative (Figure 6). L'échelle de la concentration est identique pour les 4 saisons afin d'avoir une meilleure lecture.

En hiver, sa concentration maximum atteint $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne journalière. L'analyse hivernale montre que cette source se trouve dans toutes les directions mais un peu moins à l'ouest, où il y a peu de zones résidentielles. Les directions NW-N-NE sont les plus influencées et correspondent aux zones avec des maisons individuelles, qui utilisent plus le chauffage au bois que les résidences collectives situées dans le sud. Entre le printemps et l'automne, sa concentration diminue fortement avec l'augmentation de la température (Figure 7). En été, sa concentration est proche de zéro.

En résumé, la combustion de la biomasse est une source locale, plutôt au nord de la station de Nogent-sur-Oise, qui contribue fortement à la masse des particules PM10 à Nogent-sur-Oise pendant l'hiver.

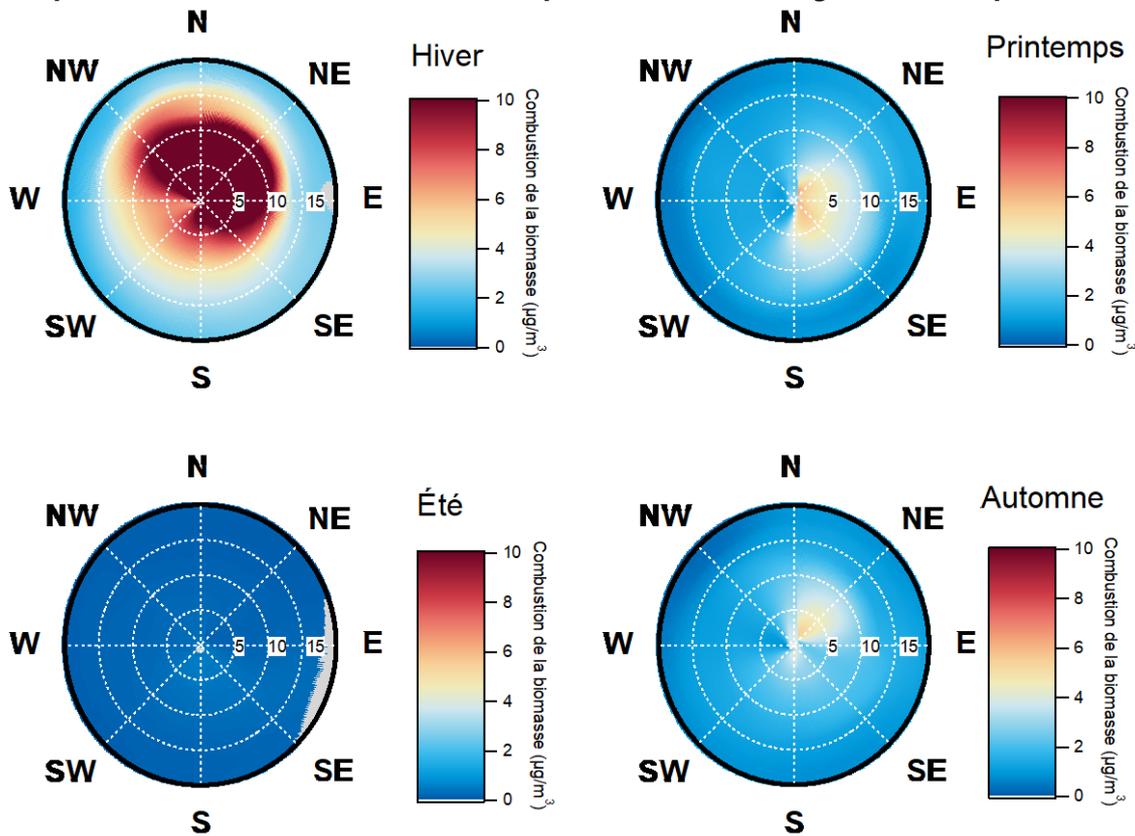


Figure 6 Analyses NWR saisonnières (Combustion de la biomasse)

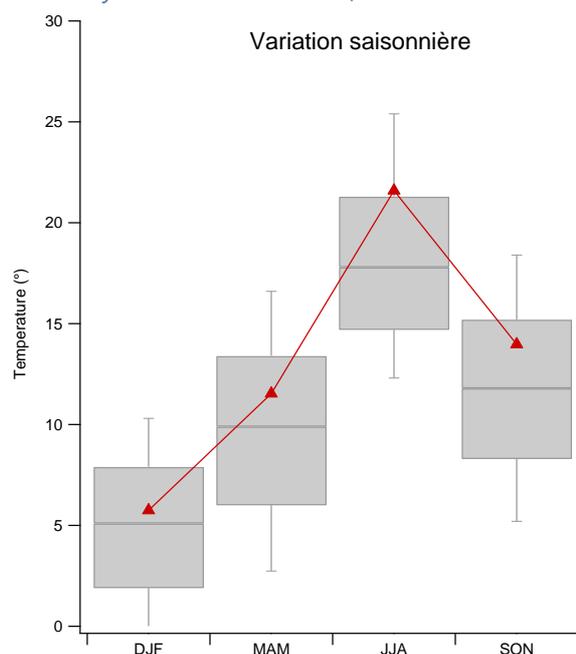


Figure 7 Variation saisonnière de la température ambiante à Nogent-sur-Oise

Trafic routier primaire

Le trafic routier primaire est aussi considéré comme une source locale. Sa concentration est similaire en hiver et au printemps, plus faible en été et plus élevée en automne (Figure 8). Pour l'instant, la cause de sa concentration élevée en automne reste difficile à expliquer (Figure 9). On suppose qu'elle est probablement liée aux conditions atmosphériques plus stables et donc peu de dispersion des polluants locaux.

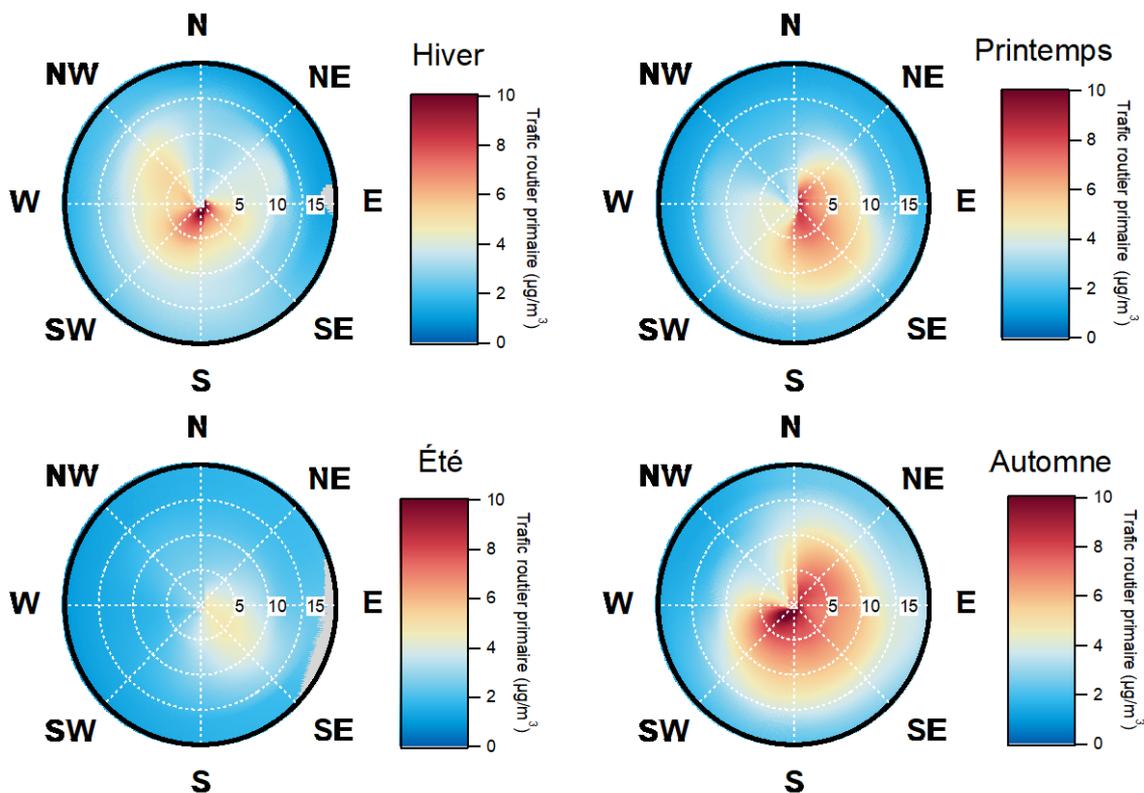


Figure 8 Analyses NWR saisonnières (trafic routier primaire)

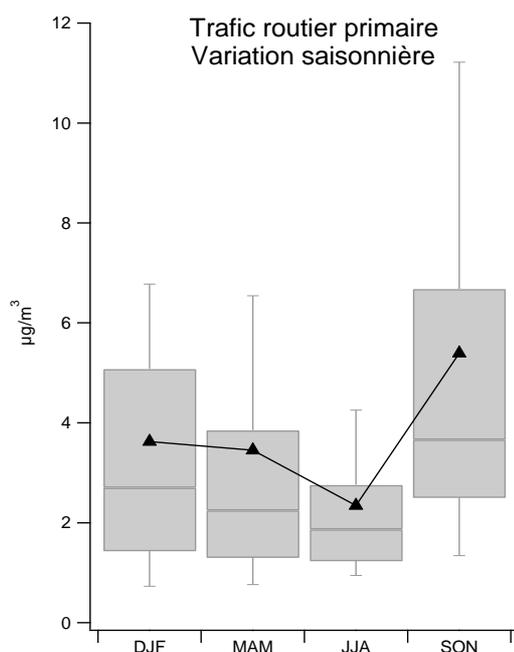


Figure 9 Variation saisonnière du facteur trafic routier primaire

Nitrate-rich

L'analyse saisonnière montre que la concentration de ce facteur est plus élevée en période hivernale et printanière. La formation de nitrate d'ammonium particulaire est fonction des conditions météorologiques et des émissions d'oxydes d'azote NO_x et d'ammoniac NH_3 . En hiver et notamment au printemps (périodes de fortes émissions liées aux épandages agricoles), sous des conditions anticycloniques (froides et globalement ensoleillées), le nitrate d'ammonium se forme en quantité importante en phase particulaire.

En hiver, les directions principales du nitrate-rich lointaine (quand la vitesse du vent > 15 km/h) sont de N-NE-E. Au printemps, la forte concentration est observée vers les directions NE-SE. Les analyses NWR saisonnières indiquent qu'il existe aussi des concentrations importantes liées aux vents faibles/moyens (0-10 km/h) dans les directions N-NE. Ces phénomènes peuvent être expliqués par une plus grande importance de situations anticycloniques stables. Une fois les polluants lointains arrivés sur le site de mesure, le vent faible et la forte stabilité atmosphérique favorisent la stagnation des polluants. A noter néanmoins, que les fortes concentrations observées pour des vents faibles suggèrent également l'existence de processus de formation de nitrate d'ammonium aux échelles locales et régionales.

Ce facteur n'apparaît pas en été à cause de sa propriété semi-volatile : il se volatilise en phase gazeuse quand la température est élevée. En automne, il réapparaît avec une faible concentration quand la température ambiante est plus basse.

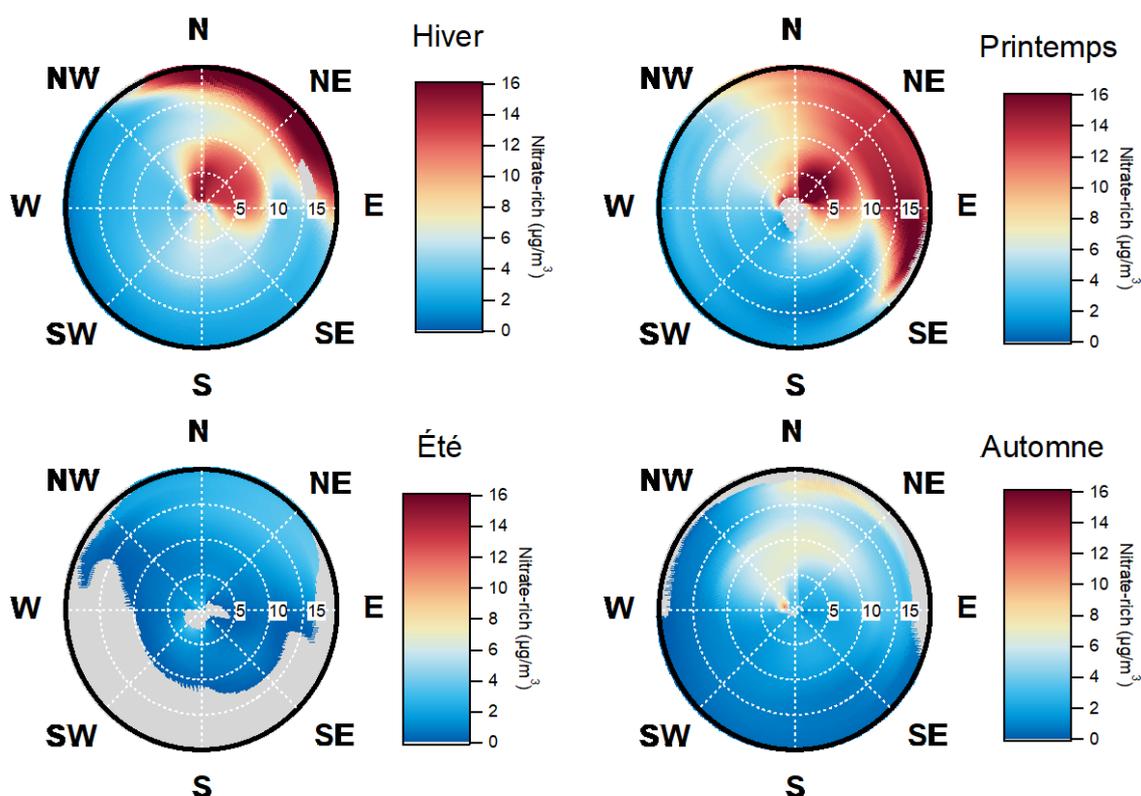


Figure 10 Analyses NWR saisonnières (nitrate-rich)

Sulfate-rich

Le facteur sulfate-rich est présent sur les 4 saisons.

Le sulfate d'ammonium provient de la combinaison entre l'ammoniac (NH_3 , principalement émis par les activités agricoles) et les produits d'oxydation du dioxyde de soufre SO_2 . La source anthropique principale de SO_2 est la combustion des combustibles fossiles contenant du soufre, par exemple, la production d'électricité, le chauffage, ou les transports (e.g. maritime). Concernant les sources naturelles, les émissions volcaniques sont généralement riches en SO_2 . Par ailleurs, la décomposition atmosphérique du sulfure de diméthyle (DMS), produit en particulier par le phytoplancton marin, correspond à une autre source importante de SO_2 .

En hiver, des concentrations importantes sont liées aux deux conditions différentes : vents faibles (0-5 km/h) dans les directions E-SE et vents forts (~ 15 km/h) dans les directions N-NE-E. Ce phénomène est identique au facteur nitrate-rich. Les polluants lointains sont arrivés sur le site de mesure avec le vent fort. Dans les heures/jours suivants, les situations atmosphériques stables (vent faible) favorisent l'accumulation des polluants près du sol. En même temps, la source anthropique de SO_2 régionale pourrait contribuer à la formation de sulfate local/régional.

Au printemps, la concentration élevée du sulfate-rich n'est associée qu'à des vents forts entre les directions N-NE-E-SE. On suppose qu'il pourrait venir de loin.

En été, il est associé à toutes les vitesses du vent, notamment entre les directions NE-SE. Il est probablement dû à la forte émission de sulfure de diméthyle (DMS) par le phytoplancton marin quand la température est plus élevée et l'ensoleillement est plus intense durant cette période.

En automne, sa concentration est plus faible par rapport aux autres saisons, car il y a moins de sources anthropiques (chauffage au charbon) et moins de sources naturelles (émissions marines).

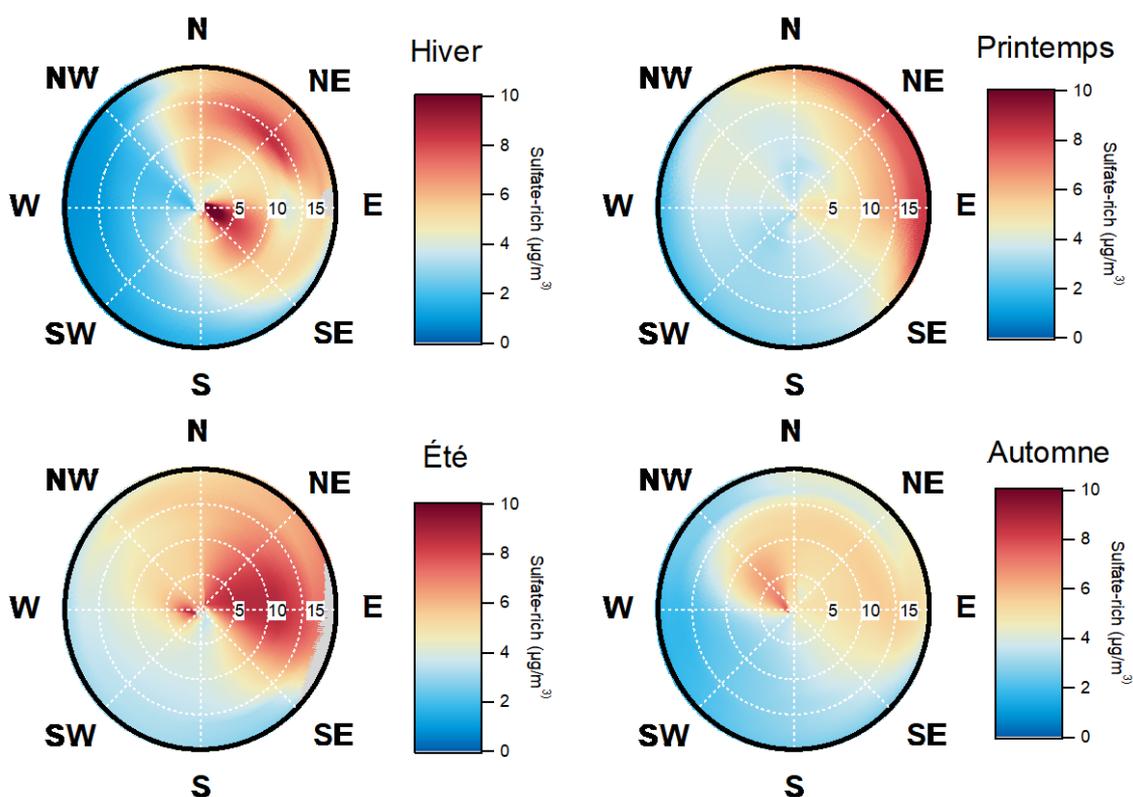


Figure 11 Analyses NWR saisonnières (sulfate-rich)

□ Biogénique primaire

Le facteur biogénique primaire est considéré comme une source primaire, qui est émis par les végétations locales et régionales.

En hiver et au printemps, la concentration reste très faible et très locale quand les activités biogéniques sont faibles.

En été, les particules biogéniques primaires se trouvent dans toutes les directions et toutes les vitesses du vent. Le parc naturel régional Oise-Pays de France se situe dans la direction du sud, qui couvre une superficie de 60 000 hectares dont 20 000 hectares de forêts (Annexe 4a). Il pourrait être une source importante des émissions biogéniques en été. La plus forte concentration est observée dans les directions N-NE-E, qui est associée au vent plus faible. Elle pourrait être liée à la présence de trois grands terrains de football à côté du site dans cette direction (Annexe 4b).

En automne, sa concentration est moins importante qu'en été et très homogène dans la distribution spatiale, notamment dans la direction du parc naturel régional.

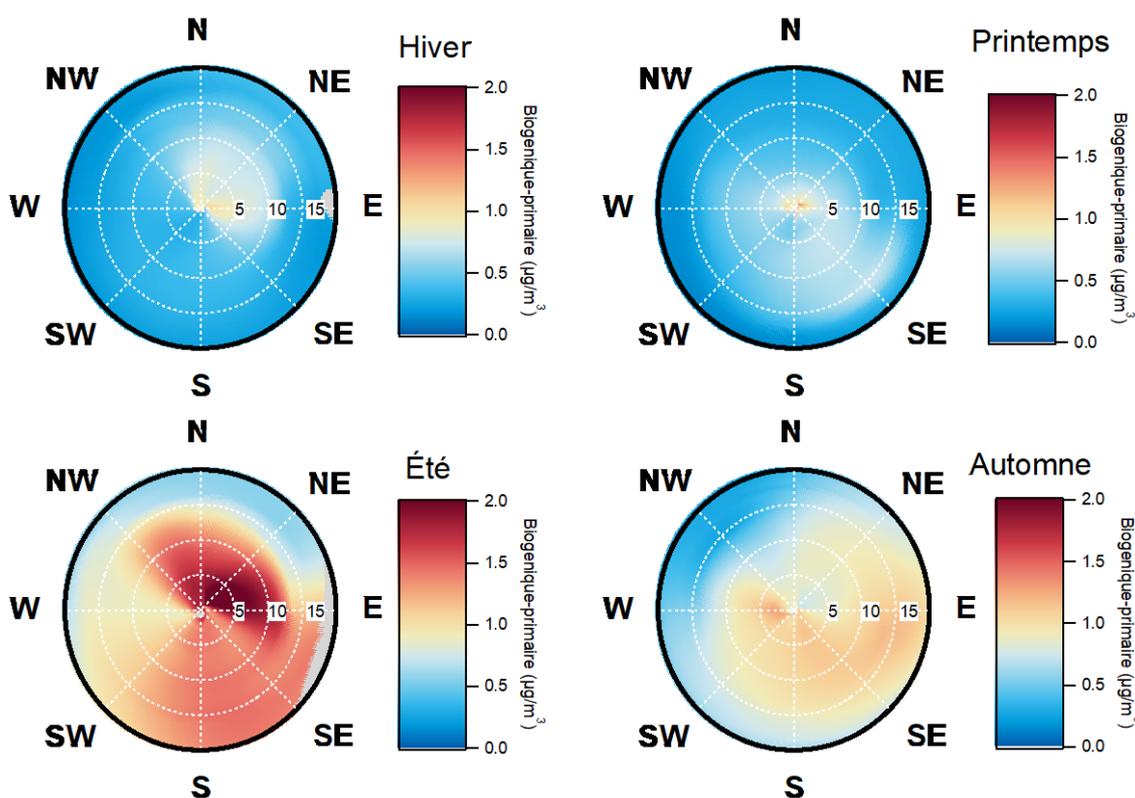


Figure 12 Analyses NWR saisonnières (biogénique primaire)

☐ Biogénique secondaire marin

Contrairement au facteur biogénique primaire, **le facteur biogénique secondaire marin est une source secondaire et lointaine** qui est transporté par les masses d'air avec de fortes vitesses.

En hiver et automne, sa concentration est très faible à cause de faibles activités biogéniques marines (phytoplancton).

Au printemps, il apparait dans les directions NW-N avec le vent 10-20 km/h.

En été, sa concentration devient très élevée sous conditions météorologiques favorables (température élevée et ensoleillement intense), surtout entre les directions NW-N-NE et liée au vent fort (> 15 km/h).

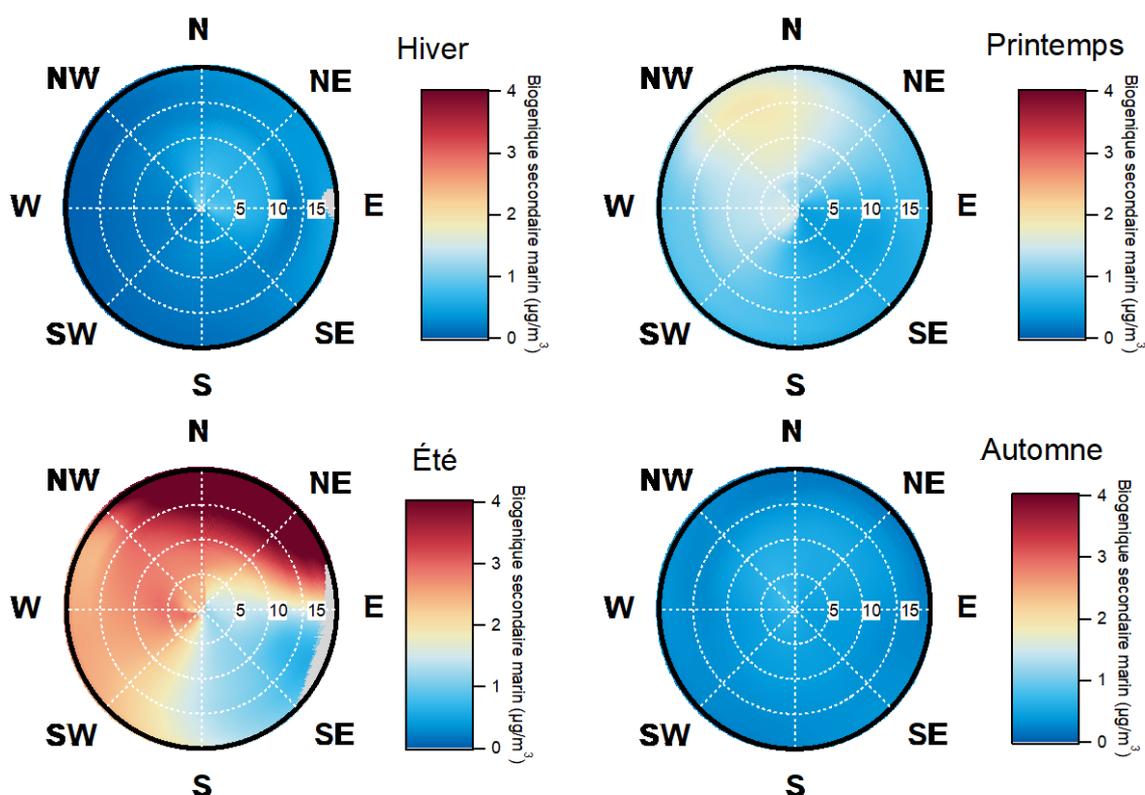


Figure 13 Analyses NWR saisonnières (biogénique secondaire marin)

☐ Sels marins

Les sels marins sont considérés comme une source lointaine qui sont émis par les embruns marins et sont transportés vers le continent par les masses d'air océaniques.

En hiver, ils sont associés avec le vent fort (> 20 km/h) autour de la direction ouest, mais également une forte concentration associée avec le vent moyen (5-15 km/h) dans les directions NW-N. L'explication est similaire aux autres facteurs lointains : nitrate-rich et sulfate-rich. Les sels marins s'accumulent localement avec les situations stables de l'atmosphère.

Au printemps et en automne, sa concentration importante est uniquement liée au vent fort (>20 km/h) dans le quadrant ouest.

En été, sa contribution est négligeable à cause de processus photochimiques qui éliminent le chlorure de sodium NaCl particulaire et la faible vitesse du vent océanique.

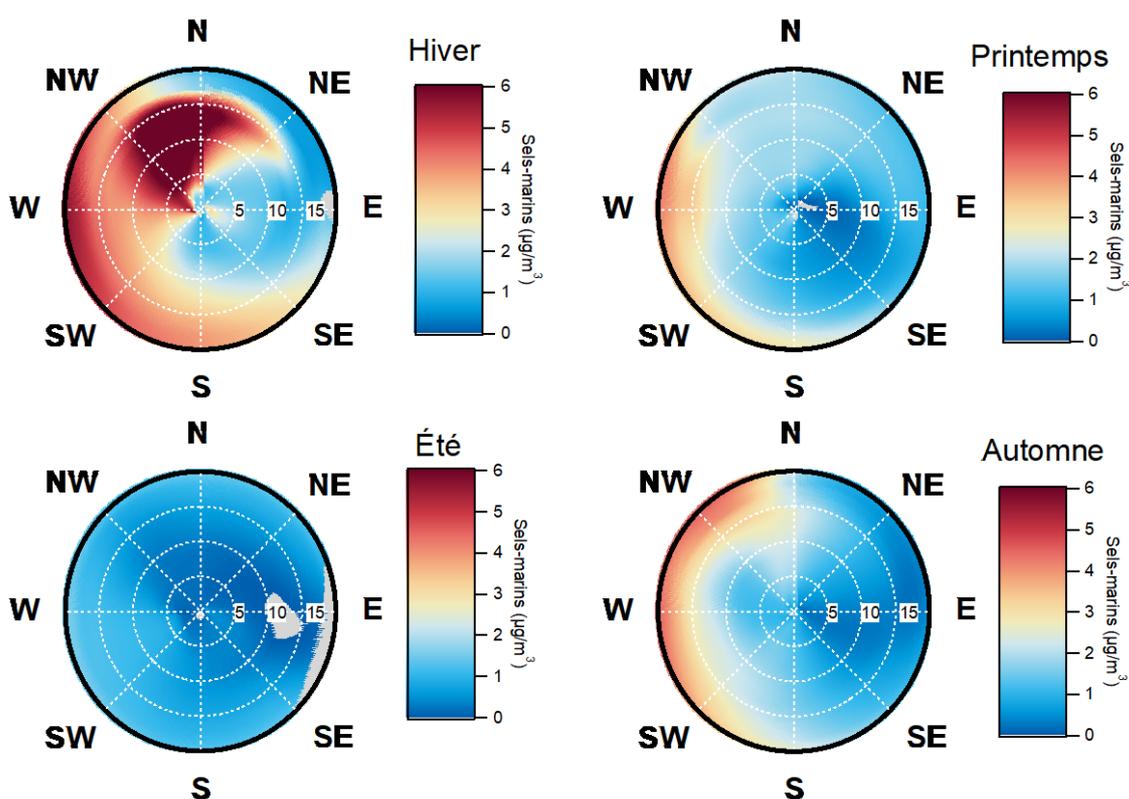


Figure 14 Analyses NWR saisonnières (sels marins)

Poussières minérales/industrielles

Le facteur poussières minérales/industrielles est une source mélangée des poussières minérales naturelles, des poussières industrielles et les émissions trafic remises en suspension.

En hiver, elles sont très faibles en concentration et montrent une origine locale.

Les concentrations élevées sont trouvées du printemps à l'automne avec une distribution spatiale similaire, qui sont principalement dues aux conditions météorologiques plus favorables à la remise en suspension de poussières locales et régionales.

De plus, la couche d'air saharien se forme dans la même période, qui est une masse d'air chargée de poussières du désert du Sahara. Ces particules sont maintenues en hauteur dans les fines gouttelettes, qui permet de traverser les continents pour arriver en France.

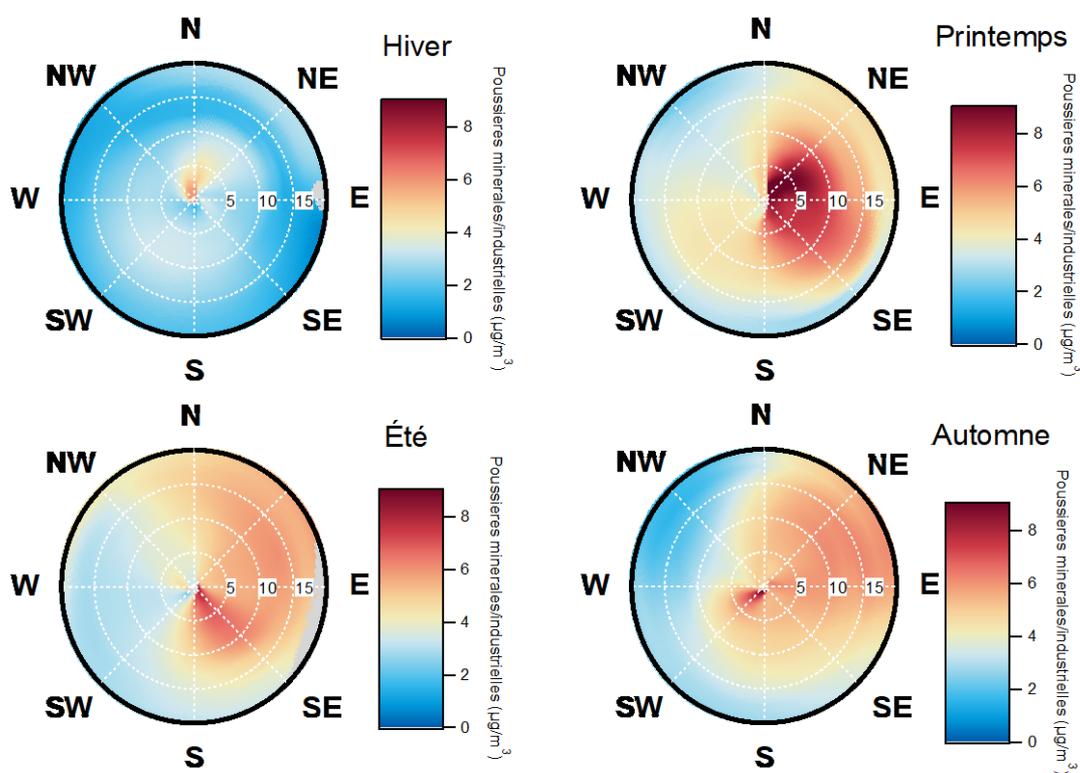


Figure 15 Analyses NWR saisonnières (poussières minérales/industrielles)

5.2.3. Analyses NWR interannuelles

☐ Nitrate-rich

Sur les quatre années de la période d'étude, la concentration du nitrate-rich la plus élevée est enregistrée en 2013. Elle est associée avec les vents plus de 15 km/h dans la direction est.

En 2014, sa concentration est beaucoup moins importante qu'en 2013 et plutôt liée au vent faible (< 10 km/h).

En 2015, sa concentration élevée se trouve principalement dans les directions N-NE.

En 2016, les plus fortes concentrations sont observées avec des directions N-NE-E et des vents de plus de 15 km/h.

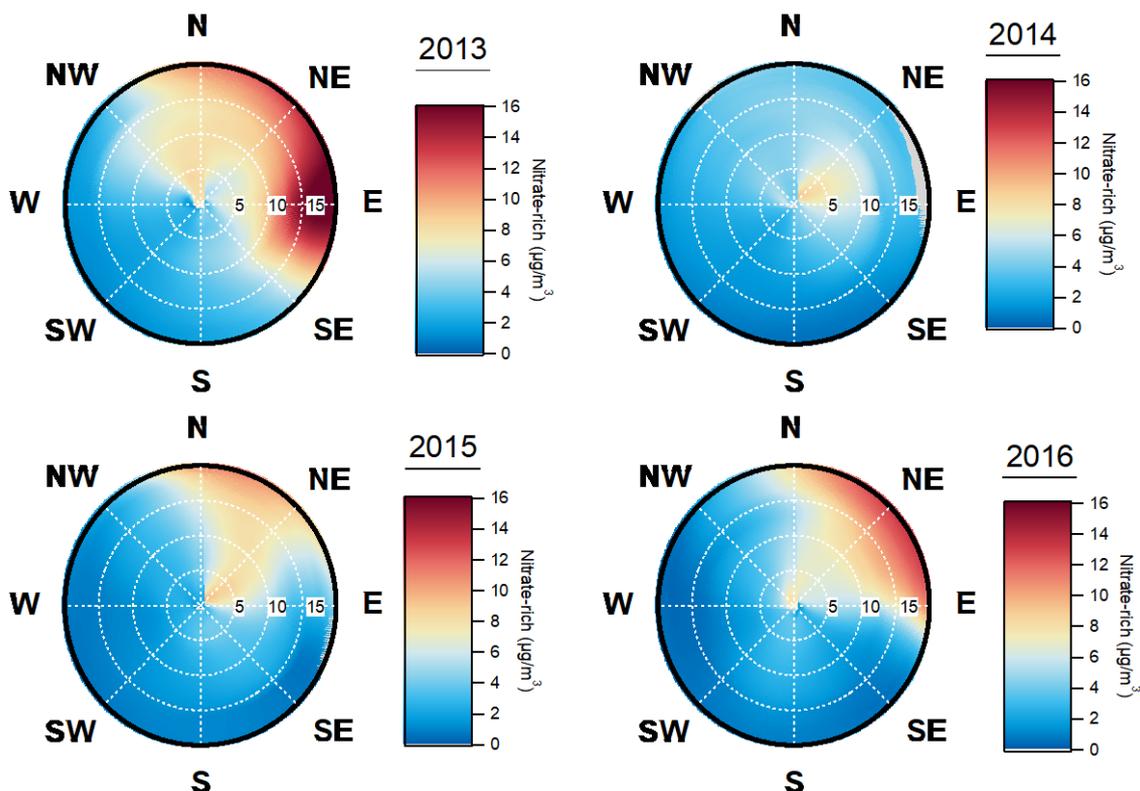


Figure 16 Analyses NWR annuelles (nitrate-rich)

Sulfate-rich

Les analyses NWR du sulfate-rich montrent une décroissance entre 2013 et 2016. Ainsi :

En 2013, le sulfate-rich présente une très forte concentration ($>10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en général, particulièrement dans les directions NE-E-SE.

En 2014, le niveau de concentration du sulfate-rich a largement diminué vers $4-6 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En 2015, il est principalement associé au vent autour de 15 km/h , de directions NW-NE-SE. Mais la concentration reste faible.

En 2016, le sulfate-rich est plutôt lié au vent fort (20 km/h) dans les directions NE-E-SE.

La diminution du facteur sulfate-rich, pendant ces 4 ans, semble partiellement liée aux effets bénéfiques de la législation européenne et française appliquées pour réduire les émissions de dioxyde de soufre SO_2 sur la concentration du sulfate particulaire.

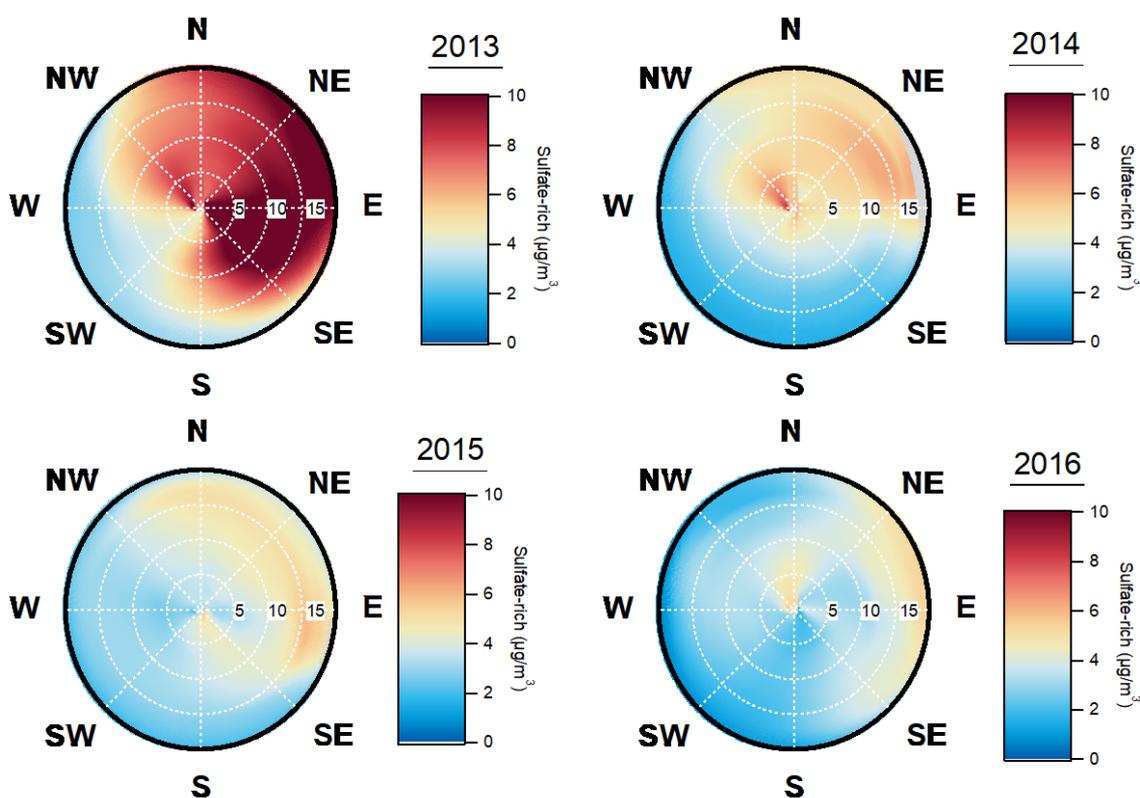


Figure 17 Analyses NWR annuelles (sulfate-rich)

☐ Combustion de la biomasse

Le facteur combustion de la biomasse est une source locale qui est liée au chauffage au bois résidentiel. En 2013, la température de l'hiver est la plus basse (2,8°C) comparée aux autres années (4,4-7°C). En conséquence, la concentration de ce facteur est la plus importante cette année-là. En 2014 et 2015, la combustion de la biomasse a légèrement diminué par rapport à l'année 2013. Mais en 2016, sa concentration remonte à un niveau similaire à 2013. Elle est probablement liée à la température un peu plus basse à l'automne 2016 (8°C) que les autres années (9,3-10°C).

Comme indiqué dans le rapport précédent, la combustion de la biomasse contribue à hauteur de 37% des particules PM10 pendant les épisodes hivernaux. La concentration de ce facteur ne montre pas une variation significative annuelle, qui est légèrement influencée par la température locale.

De ce fait, il est nécessaire de renforcer et contrôler les actions mises en place pour réduire ces émissions.

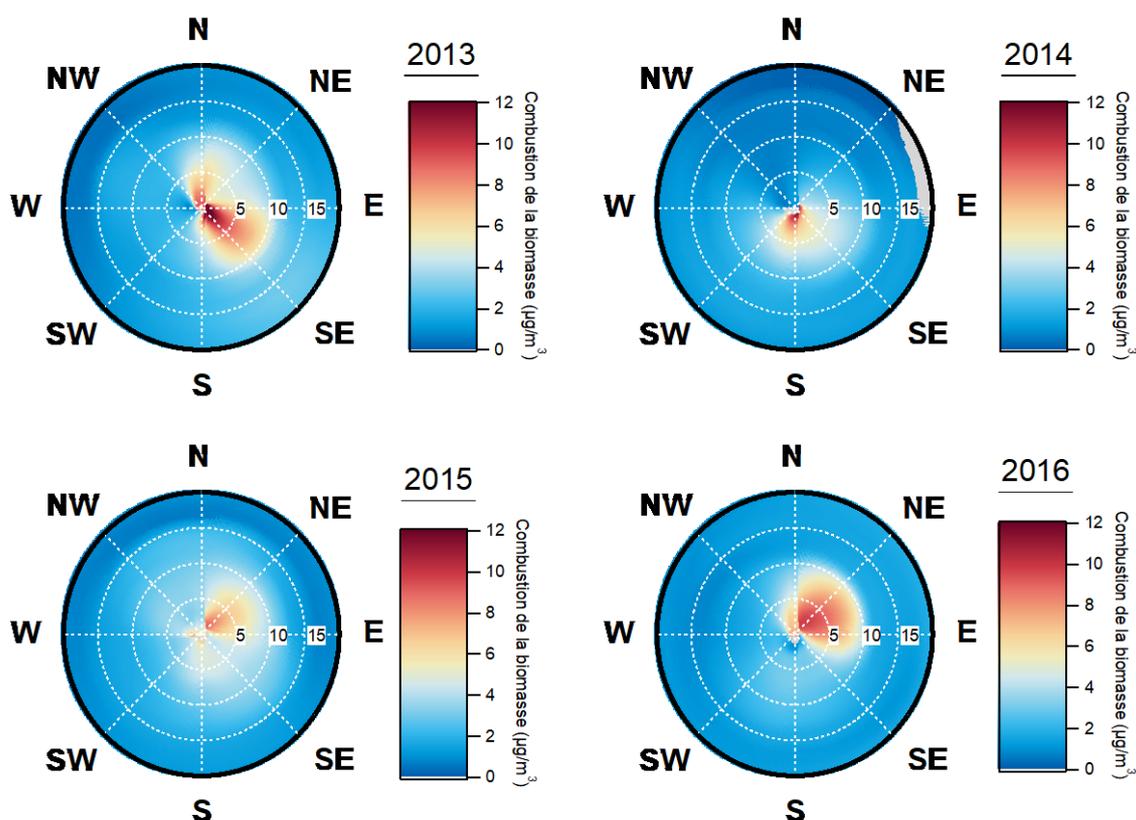


Figure 18 Analyses NWR annuelles (combustion de la biomasse)

Trafic routier primaire

Le trafic routier primaire est aussi une source locale qui contribue à 16% des particules PM10 en moyenne entre 2013-2016. En même temps, le trafic routier peut émettre les polluants gazeux, comme les oxydes d'azote NOx et les composés organiques volatils (COV), qui peuvent être transformés ensuite en particules secondaires dans l'atmosphère. Ils ne sont pas pris en compte dans ce facteur.

Sa concentration est assez stable pendant ces 4 ans : plus élevée en 2014 et un peu plus faible en 2016. Ces variations sont supposées en lien avec les conditions météorologiques locales. En 2014, le vent du sud est dominant sur la zone urbaine de Creil, qui pourrait apporter les émissions trafic importantes.

Dans le cadre du PPA (Plan de protection de l'atmosphère) de la région de Creil, le plan de déplacement urbain (PDU) a fixé un objectif de réduction de 15% des émissions de particules du secteur des transports sur une durée de cinq ans. Il est nécessaire de suivre l'évolution de ce facteur dans les années suivantes, ce qui permet d'évaluer les impacts des actions réglementaires.

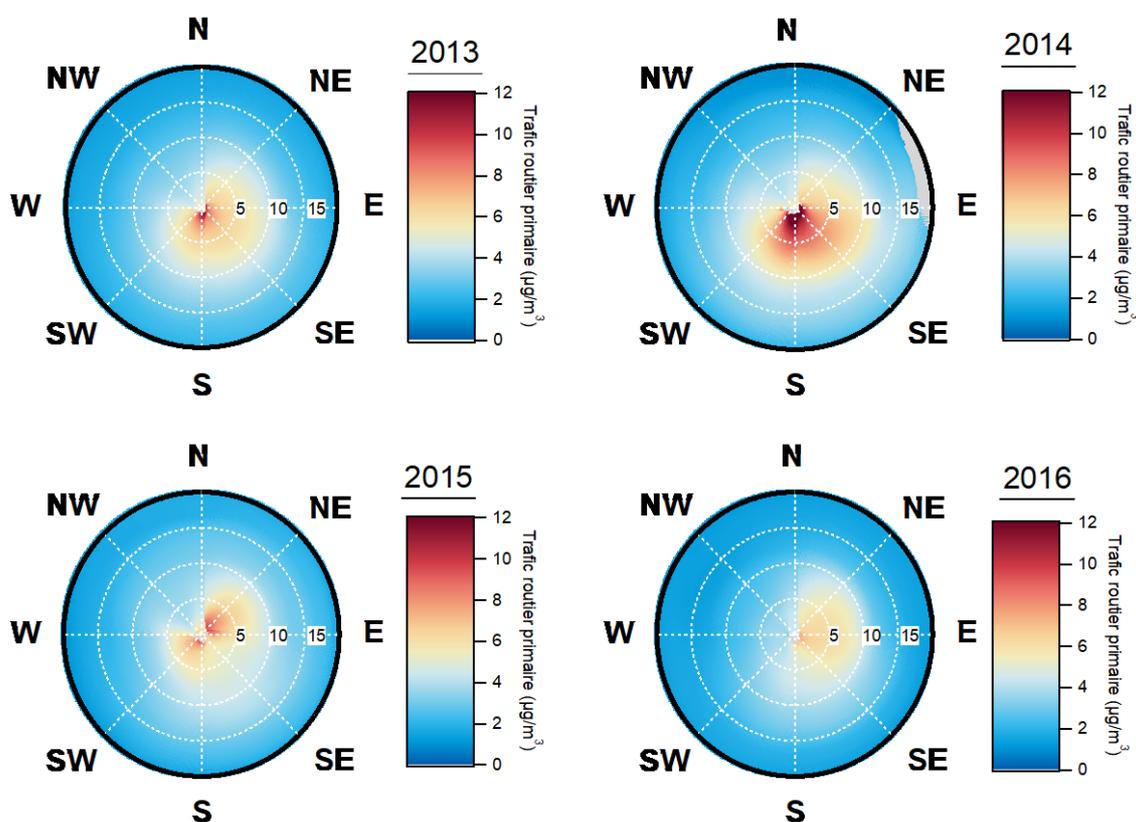


Figure 19 Analyses NWR annuelles (trafic routier primaire)

Sels marins

Les sels marins sont une source naturelle qui sont émis par les embruns marins. Ils sont produits et transportés de l'océan vers le continent en présence du vent fort (> 15 km/h) et notamment pendant la période hivernale (voir la section 5.2.2).

Il y a peu de variation annuelle de ce facteur pendant la période d'étude et il contribue environ 9% des particules PM10 mesurées.

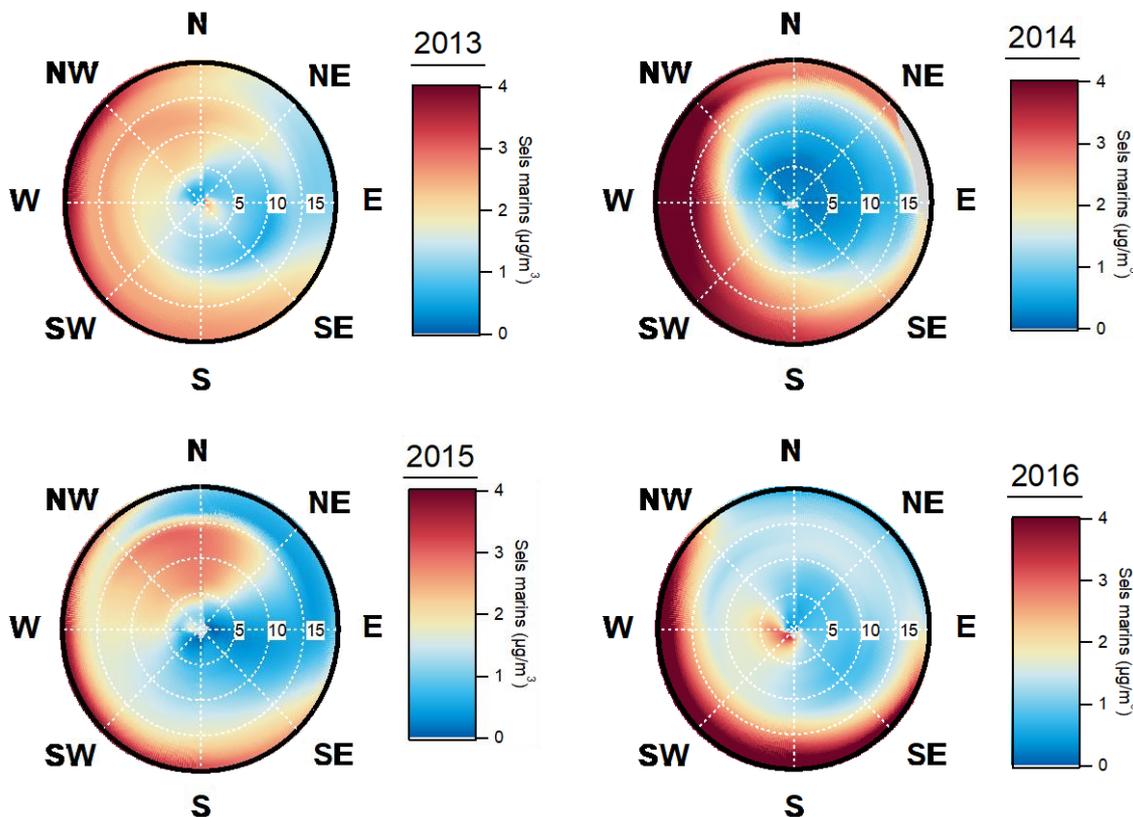


Figure 20 Analyses NWR annuelles (sels marins)

Biogénique primaire

Le facteur biogénique primaire est une source naturelle et biogénique. Sa concentration dépend fortement de l'activité biologique de la végétation. **Il représente peu de variation annuelle et une faible concentration en moyenne ($< 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$).**

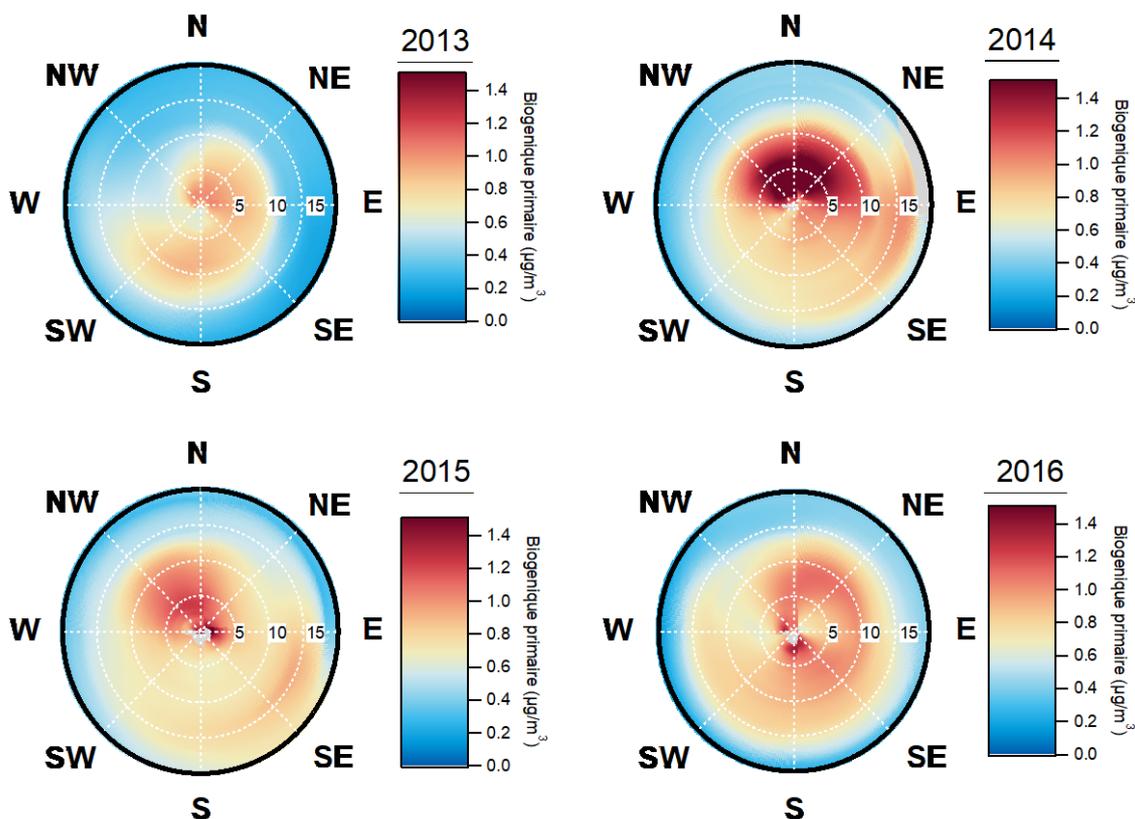


Figure 21 Analyses NWR annuelles (Biogénique primaire)

☐ Biogénique secondaire marin

Le facteur biogénique secondaire marin est une source naturelle et lointaine. Comme les sels marins, il est transporté par les masses d'air océaniques vers le continent.

Ce facteur ne montre pas une variation annuelle significative. Sa concentration dépend de la température et l'ensoleillement de l'océan et les trajectoires associées. Il contribue environ 5% de la masse des particules PM10 mesurées.

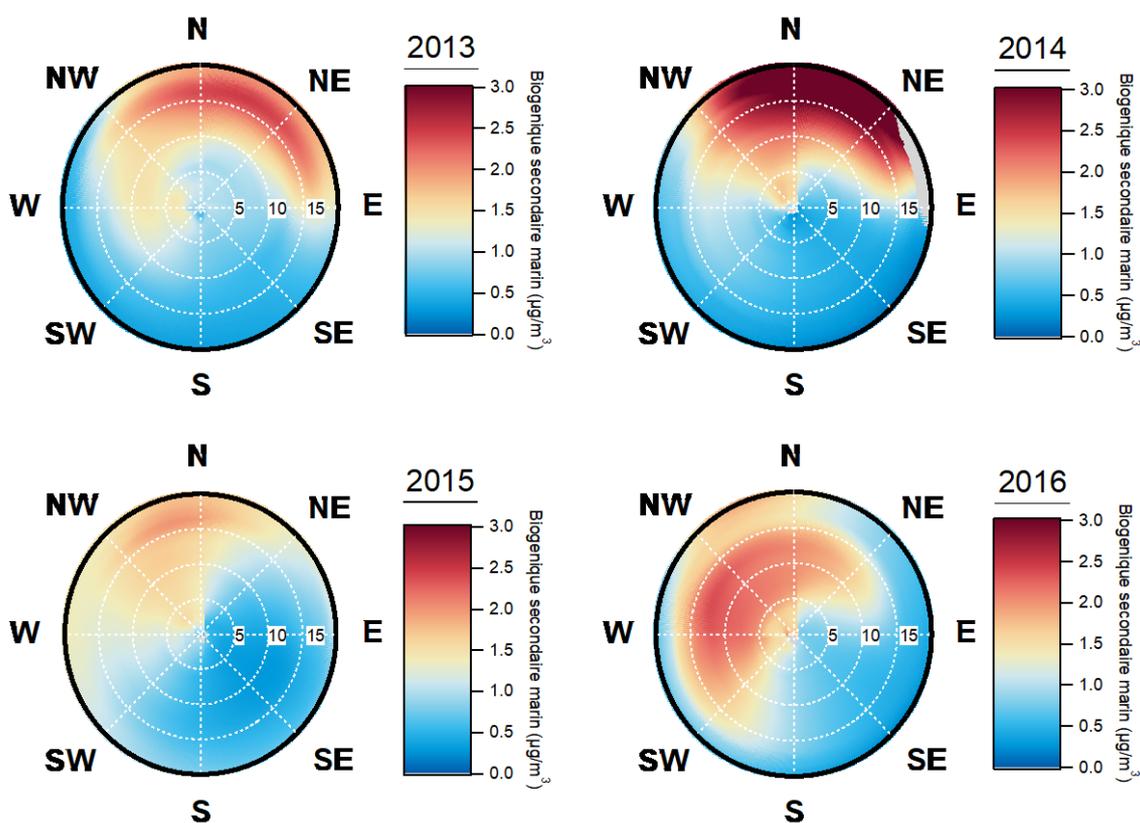


Figure 22 Analyses NWR annuelles (biogénique secondaire marin)

Poussières minérales/industrielles

Comme déjà discuté dans la section 5.1, ce facteur est un mélange de source naturelle (poussières minérales) et humaine (poussières industrielles).

Ce facteur ne présente pas une variation annuelle significative. Sa concentration dépend des conditions météorologiques locales (direction et vitesse du vent, précipitation...). Il contribue environ 19% des particules PM10 en moyenne.

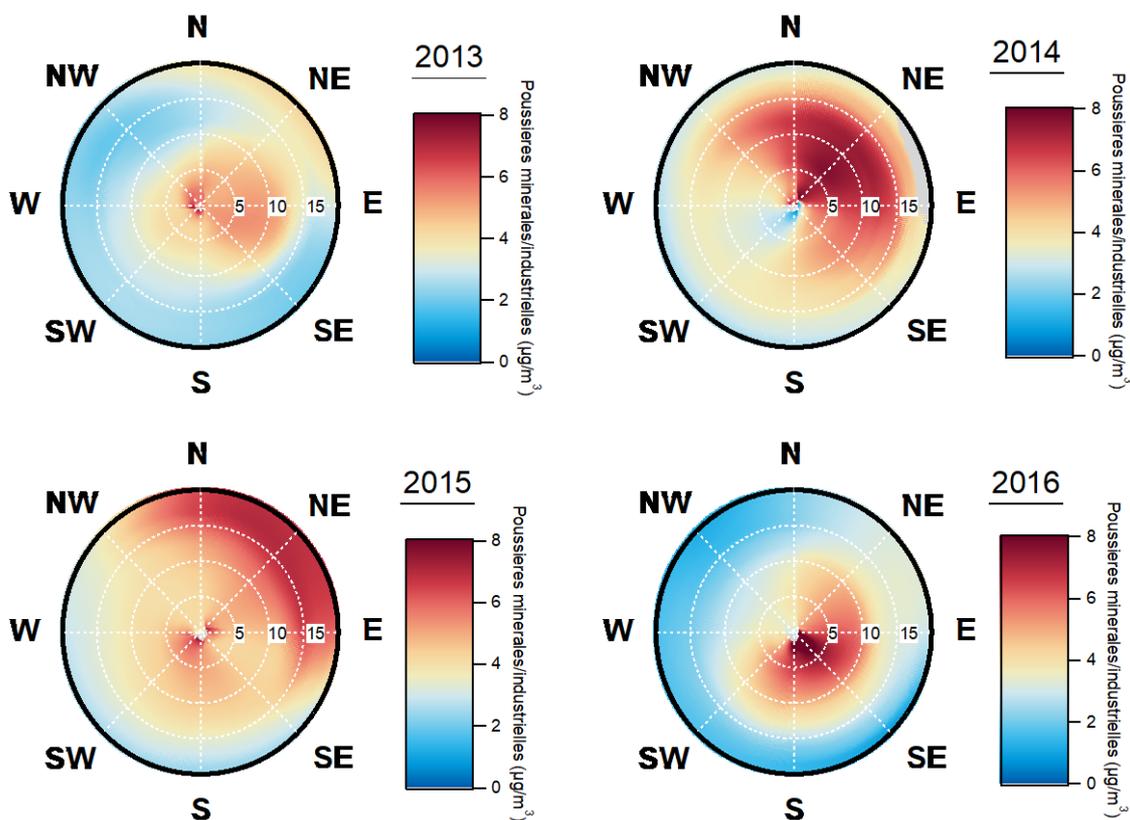
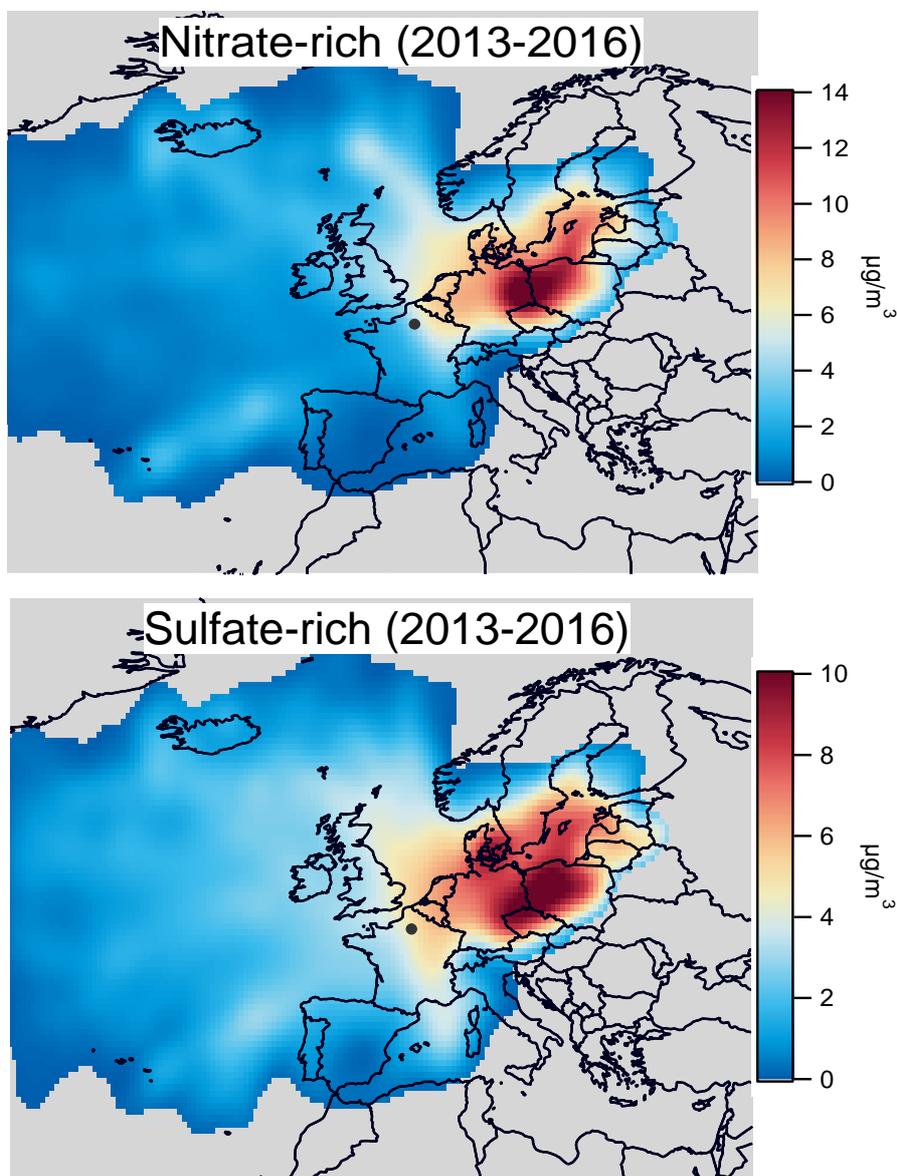


Figure 23 Analyses NWR annuelles (poussières minérales/industrielles)

En résumé, le facteur sulfate-rich montre une diminution significative entre 2013 et 2016, ce qui pourrait être traduit par la réduction de son précurseur gazeux, le dioxyde de soufre SO_2 . Le facteur nitrate-rich entre 2014 et 2016 est beaucoup moins élevé qu'en année 2013, mais il y a peu d'évolution entre 2014-2016. **Les 3 facteurs naturels : les sels marins, les biogéniques primaire et secondaire ne montrent pas une variation significative annuelle et leurs contributions aux PM10 sont assez faibles** (entre 3-9% pour chaque facteur). **Les 3 facteurs anthropiques : la combustion de la biomasse (chauffage au bois), le trafic routier primaire et les poussières minérales/industrielles représentent un niveau stable pendant ces 4 ans.** Ces 3 facteurs nécessitent un suivi dans le temps pour évaluer l'impact des actions locales visant à réduire ces sources d'émissions importantes.

5.3. Analyses des rétro-trajectoires

4 facteurs sont considérés comme principalement liés aux transports à longue distance selon les analyses NWR (voir section 5.2) : nitrate-rich, sulfate-rich, sels marins et biogénique secondaire marin. Ainsi, leurs retro-trajectoires seront analysées pour chercher leurs origines géographiques à une échelle plus grande en utilisant les trajectoires totales pendant les 4 ans analysées par la méthode CWT dans la Figure 24.



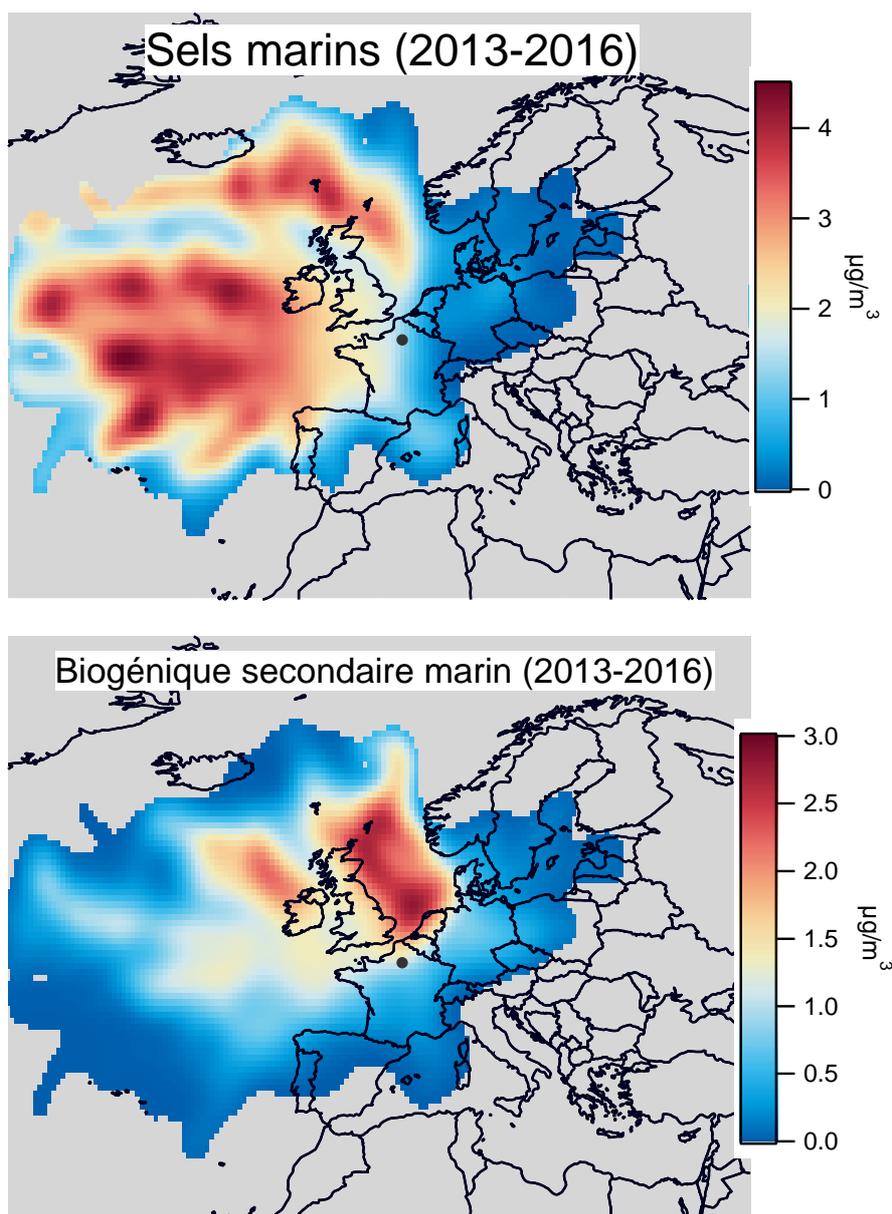


Figure 24 Cartes CWT globales (2013-2016) : nitrate-rich, sulfate-rich, sels marins et biogénique secondaire marin

Le nitrate-rich et le sulfate-rich ont des sources d'origines géographiques assez similaires ; le nitrate-rich provient principalement de l'est de l'Allemagne et de l'ouest de la Pologne. Le sulfate-rich provient notamment de la Pologne, l'est de l'Allemagne et aussi le nord de la République tchèque.

Ces pays utilisent massivement du charbon dans la production d'énergie primaire.

L'Allemagne est très marquée par sa consommation de charbon, qui représente environ 45% (19% de charbon et 26% de lignite) de sa production d'électricité¹³. L'Allemagne est aussi le premier producteur mondial de

¹³ Hans-Wilhelm Schiffer, "The Flexibility of German Coal-Fired Power Plants Amid Increased Renewables," *Cornerstone*, December 2014, <http://cornerstonemag.net/the-flexibility-of-german-coal-fired-power-plants-amid-increased-renewables/>.

lignite, qui est extrait dans l'ouest et l'est du pays, principalement en régions Rhénanie du Nord-Westphalie, Saxe et Brandebourg¹⁴. Les centrales à lignite sont situées près des sites d'extraction.

La Pologne est le deuxième plus gros consommateur de charbon en Europe après l'Allemagne. La centrale thermique au charbon (Bełchatów) située dans le centre-sud de la Pologne, est la centrale thermique la plus puissante d'Europe avec une capacité de 5 472 MW¹⁵.

En République tchèque, les centrales à charbon sont dominées (60%) dans la production d'électricité¹⁶. La centrale thermique de Pruněřov est la plus puissante du pays avec une capacité de 1 500 MW, située au nord-est du pays et proche de la frontière allemande.

Ces installations peuvent produire de grandes quantités 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 sulfate d'ammonium (NH₄(SO₄)₂) et nitrate d'ammonium (NH₄NO₃). Ces particules inorganiques secondaires peuvent être transportées par les masses d'air continentales et arrivent sur notre site de mesure à Nogent-sur-Oise.

Selon le rapport du IPCC, les sels marins sont émis 3 300 Tg/an de l'océan à l'atmosphère à l'échelle mondiale¹⁷. **Les sels marins observés à Nogent-sur-Oise proviennent majoritairement de l'océan Atlantique nord, et aussi de la mer de Norvège et de la mer du Nord.** Ces observations sont cohérentes avec une étude de la concentration des sels marins sur le continent européen¹⁸.

Le biogénique secondaire marin provient principalement de la mer du Nord (côté est du Royaume-Uni et au-dessus du Pays-Bas) **et de l'océan Atlantique Nord** (au-dessus d'Irlande). Une vue satellitale d'un bloom de phytoplancton dans la mer du Nord est présentée dans l'Annexe 6. L'origine géographique du biogénique secondaire marin est plus prêt en termes de distance par rapport aux sels marins.

Leurs variations saisonnières et interannuelles ne sont pas présentées dans ce rapport à cause du nombre des rétro-trajectoires insuffisantes pour une analyse statistique robuste.

¹⁴ Kerstine Appunn, "Germany's Three Lignite Mining Regions," *Clean Energy Wire*, August 2018, <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/germanys-three-lignite-mining-regions>.

¹⁵ "Moc Elektrowni Bełchatów wzrosła do 5 472 MW," March 20, 2017, <https://elbelchatow.pgegiel.pl/Aktualnosci/Moc-Elektrowni-Belchatow-wzrosla-do-5-472-MW>.

¹⁶ IEA, "Energy Policies of IEA Countries: Czech Republic The 2010 Review," 2010, https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CzechRep2010_free.pdf.

¹⁷ IPCC, "IPCC Third Assessment Report (TAR), Climate Change 2001," 2001.

¹⁸ 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>.

6. Conclusion et perspectives

Dans ce rapport, les origines géographiques des sources principales des particules PM10 à Nogent-sur-Oise sont étudiées avec l'outil Zefir, qui combine les méthodes d'analyses du vent et des trajectoires.

Dans un premier temps, les analyses du vent ont été effectuées basées sur la méthode NWR (*Non parametric wind regression*) pour les huit facteurs. Ces analyses permettent de distinguer les sources locales associées avec les vents faibles (<5 km/h), les sources régionales associées avec les vents moyens (5-15 km) et les sources lointaines associées majoritairement avec les vents forts (> 20 km/h). Ensuite, les analyses des rétro-trajectoires sont effectuées pour les sources lointaines basées sur la méthode CWT (*Concentration-Weighted Trajectory*).

Les origines locales, liées aux activités humaines

Les 3 facteurs les plus locaux et essentiellement anthropiques : la combustion de la biomasse (chauffage au bois), le trafic routier primaire et les poussières minérales/industrielles représentent un niveau stable pendant ces 4 ans. Ils contribuent ensemble à environ 50% des particules PM10 mesurées. De plus, la combustion de la biomasse est une source importante des HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques), qui sont considérés cancérogènes. Les 2 dernières sources (trafic et industrielle) peuvent émettre les différents métaux lourds qui sont toxiques pour l'homme. Ces 3 facteurs nécessitent un suivi dans le temps pour évaluer l'impact des actions locales visant à réduire ces sources d'émissions importantes.

Les origines lointaines des particules à Nogent sur Oise mais voire aussi locales

Le nitrate-rich et le sulfate-rich sont considérés comme les sources secondaires, principalement liées à des émissions anthropiques et à des phénomènes de transport à longue distance. Ces facteurs ont des origines géographiques assez similaires en provenance notamment d'Europe centrale (Allemagne, Pologne et la République tchèque) et de la zone Benelux (la Belgique, les Pays-Bas et le Luxembourg). A noter néanmoins que l'existence de processus de formation de nitrate d'ammonium et de sulfate d'ammonium aux échelles locales et régionales ne peut être exclue. Le nitrate-rich est surtout présent l'hiver et au printemps ; le sulfate-rich est présent sur les 4 saisons.

La concentration du sulfate-rich montre une décroissance significative et sa contribution aux particules PM10 a été diminuée de 26% à 15% entre 2013 et 2016. On suppose que cette diminution est liée à la réduction des émissions de dioxyde de soufre SO₂ à l'échelle européenne. Un renforcement des réglementations européennes et françaises sur les émissions d'oxydes d'azote NO_x et d'ammoniac NH₃ semble encore nécessaire à la diminution des concentrations de nitrate d'ammonium, et donc de la source de nitrate-rich .

Les origines naturelles locales et lointaines

Les 3 facteurs purement naturels (les sels marins, le biogénique primaire et le biogénique secondaire marin) contribuent ensemble à environ 17 % des particules PM10. Les sels marins proviennent majoritairement de l'océan Atlantique Nord et présentent une concentration maximale durant l'hiver. Les deux facteurs biogéniques (primaire et secondaire) sont abondants pendant l'été. Le facteur biogénique secondaire marin est principalement issu d'émissions en provenance de la mer du Nord.

Quelques précautions à prendre

Il est important de souligner qu'il y a quelques limites dans cette étude d'origine géographique des sources particules PM10. D'abord, la vitesse du vent ne peut pas être directement convertie en distance. La distinction des sources locales et régionales doit toujours prendre en compte l'analyse du vent, les connaissances des émissions et les références bibliographiques. En outre, pour les sources lointaines, des rétro-trajectoires d'une durée de 72h ont été choisies pour éviter trop d'incertitude dans leurs calculs et être cohérentes avec la durée de vie de certains polluants, ce qui peut conduire à la sous-estimation de l'influence de zones d'émission très lointaines.

En perspective

Une analyse PMF sera effectuée à nouveau pour prendre en compte la période 2013-2017 à Nogent-sur-Oise. Les analyses des rétro-trajectoires saisonnières et interannuelles pour les sources liées aux transports à longue distance seront également présentées dans la prochaine étude. De plus, les conditions météorologiques comme la précipitation et l'altitude de masse d'air peuvent être intégrées pour améliorer ces analyses de rétro-trajectoires. Enfin, ce rapport se limite au site de Nogent-sur-Oise. Dans l'avenir, l'étude sur plusieurs sites simultanément pourrait aider à affiner l'analyse des origines géographiques des particules pour l'ensemble de la région Hauts-de-France.

Annexes

Annexe 1 : Glossaire

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

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

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

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

AOS : Aérosol Organique Secondaire

As : arsenic.

Ba : Baryum

BTEX : Benzène, Toluène, Ethylbenzène, Xylènes

Cd : Cadmium.

Cl : Chlorure

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

DMS : Sulfure de diméthyle

EC : Carbone élémentaire

EEA : European Environment Agency

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

EPCI : Etablissement Public de Coopération Intercommunale.

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

Fe : Fer

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

Mg : Magnésium

Mn : Manganèse

Mo : Molybdène

MSA : Acide méthylsulfonique

Na : Sodium

Ni : Nickel

NH₃ : Ammoniac

NH₄⁺ : Ammonium

NO₂ : Dioxyde d'azote

NO₃⁻ : Nitrate

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.

OC : Carbone organique

Pb : Plomb

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.

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.

Rb : Rubidium

Sb : Antimoine

SO₂ : Dioxyde de soufre.

SO₄²⁻ : Sulfate

V : Vanadium

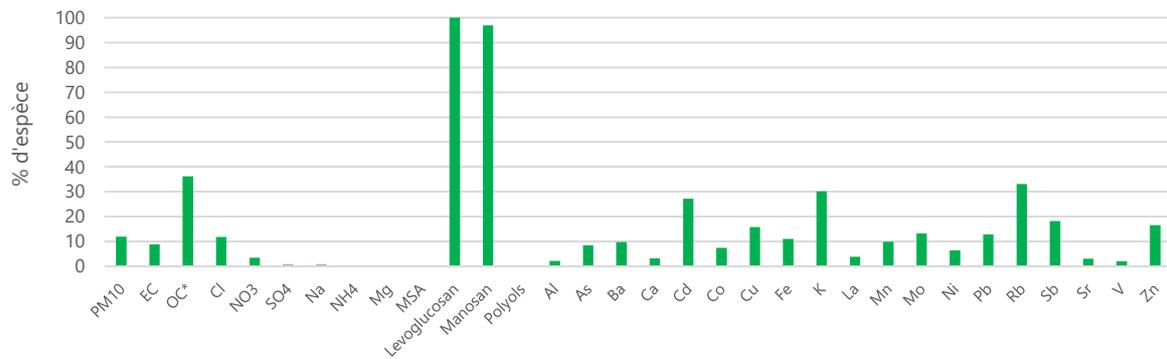
Valeur cible : Niveau à atteindre, dans la mesure du possible, dans un délai donné, et fixé afin d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine ou l'environnement dans son ensemble.

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.

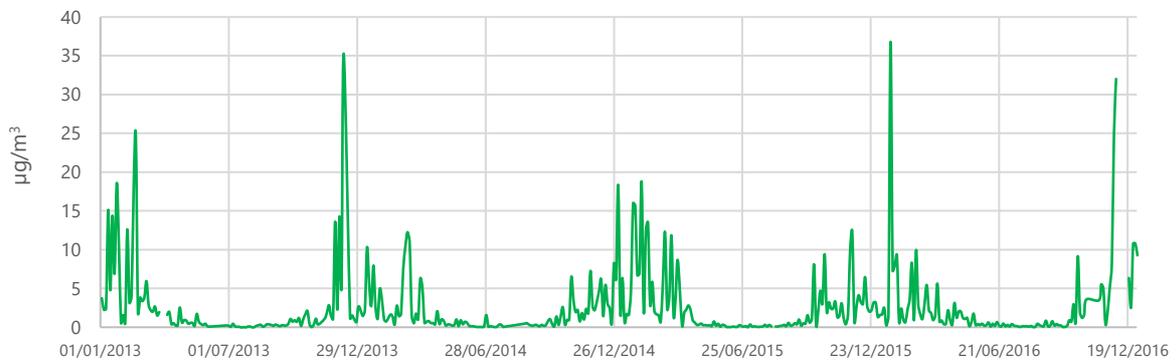
Zn : Zinc

Annexe 2 : Profils chimiques et séries temporelles des facteurs PMF

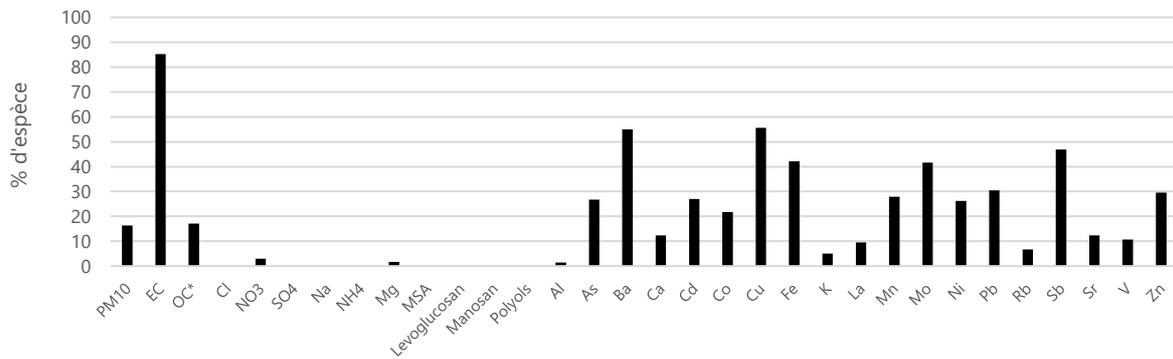
Combustion de la biomasse



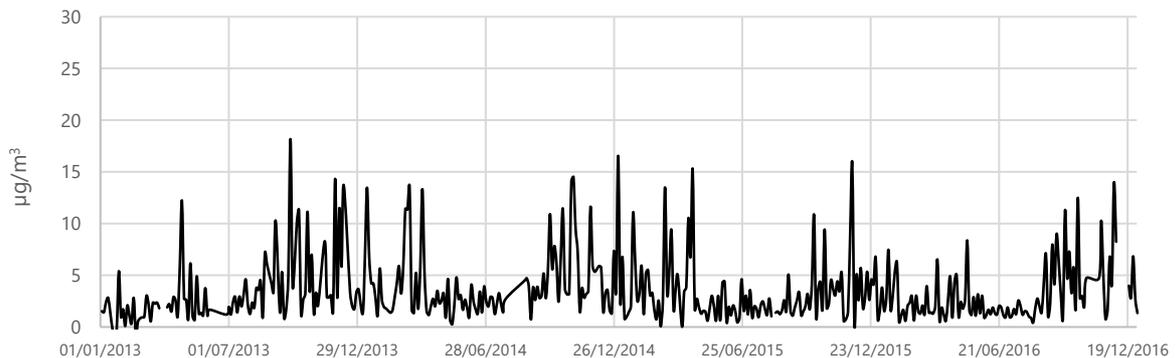
Combustion de la biomasse



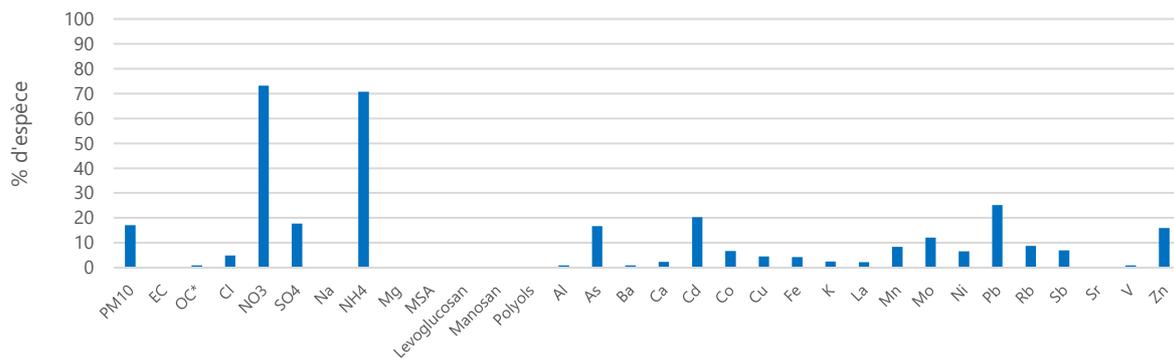
Trafic routier primaire



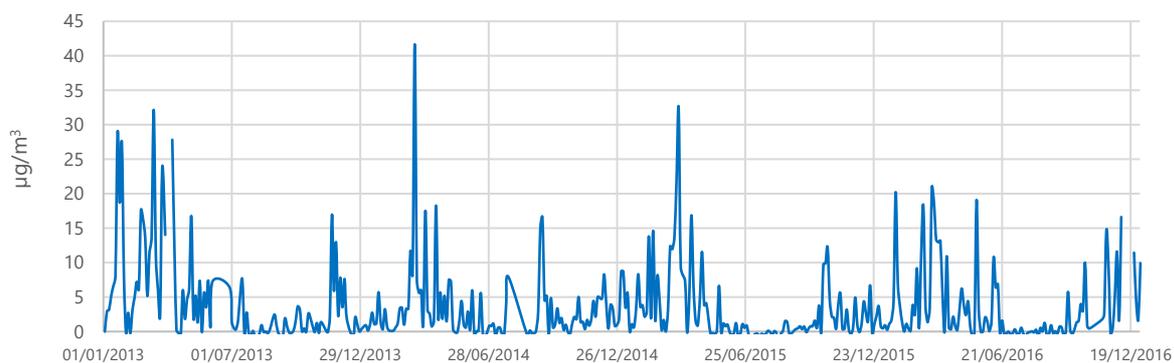
Trafic routier primaire



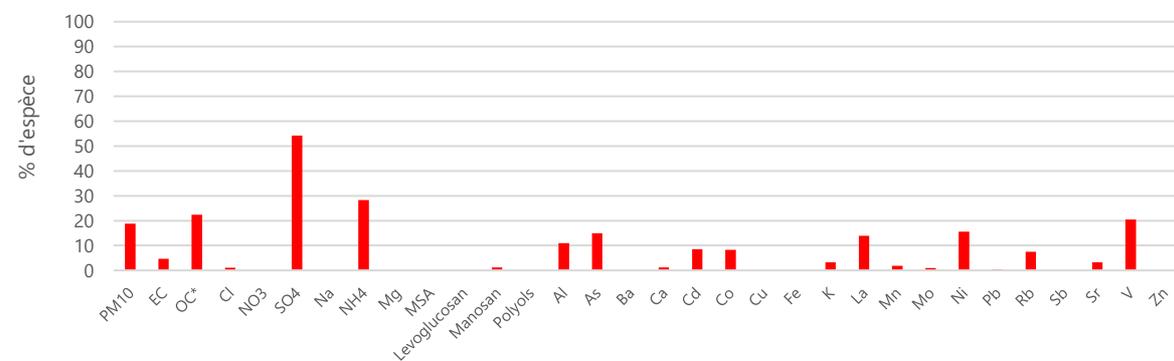
Nitrate-rich



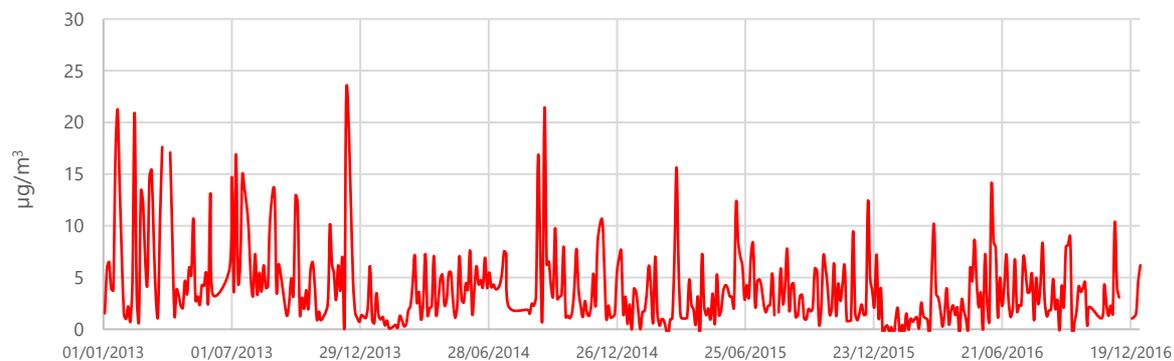
Nitrate-rich



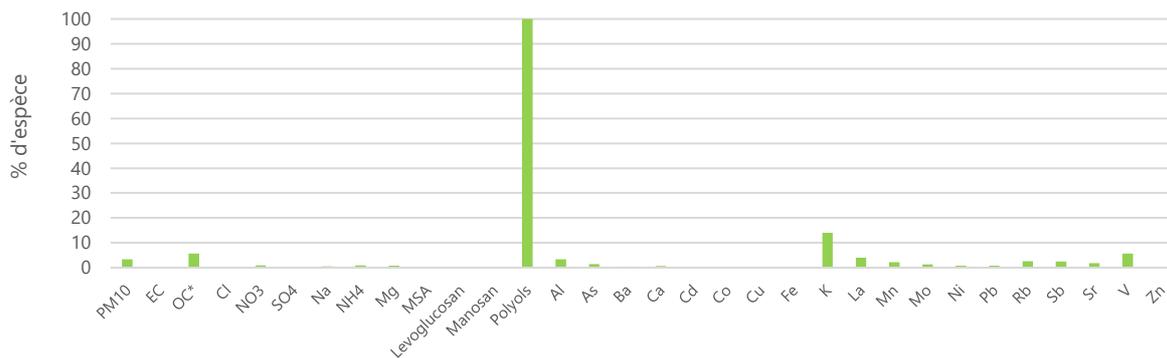
Sulfate-rich



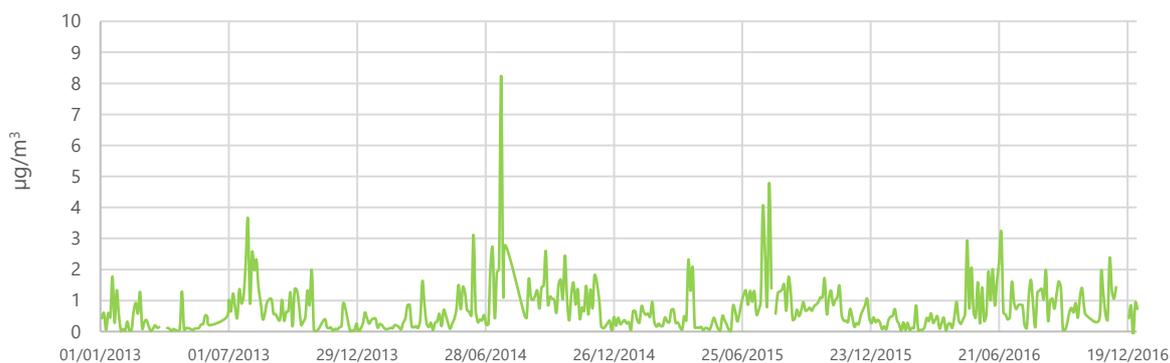
Sulfate-rich



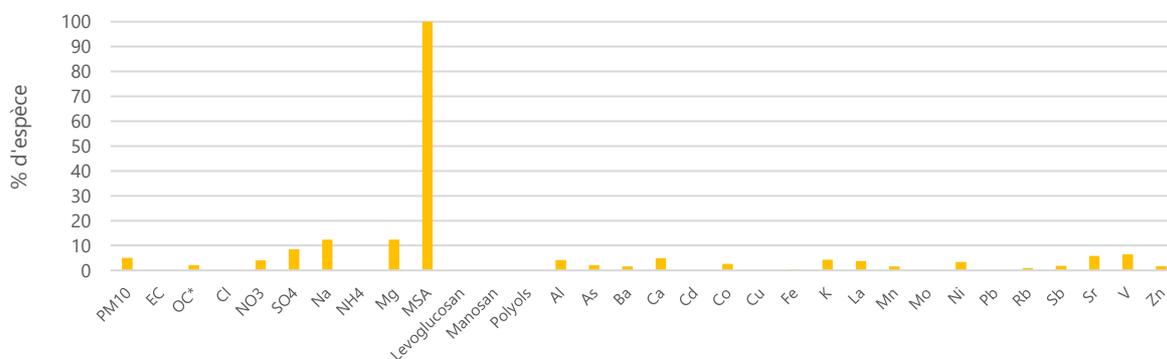
Biogénique primaire



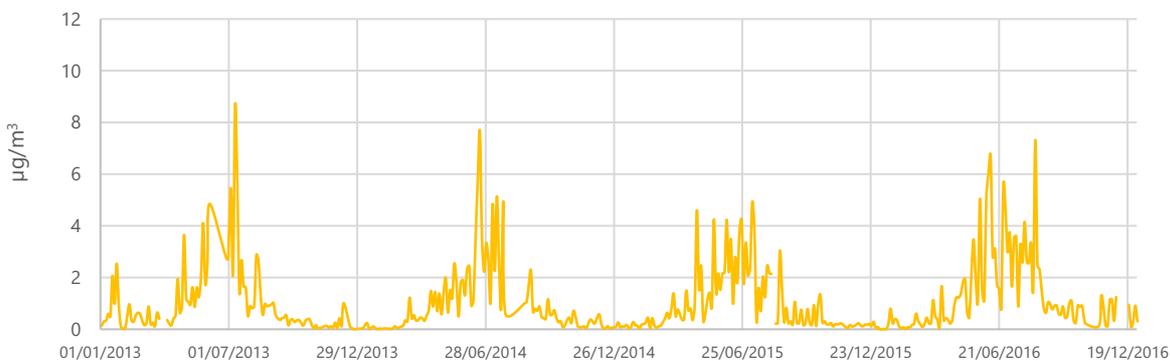
Biogénique primaire



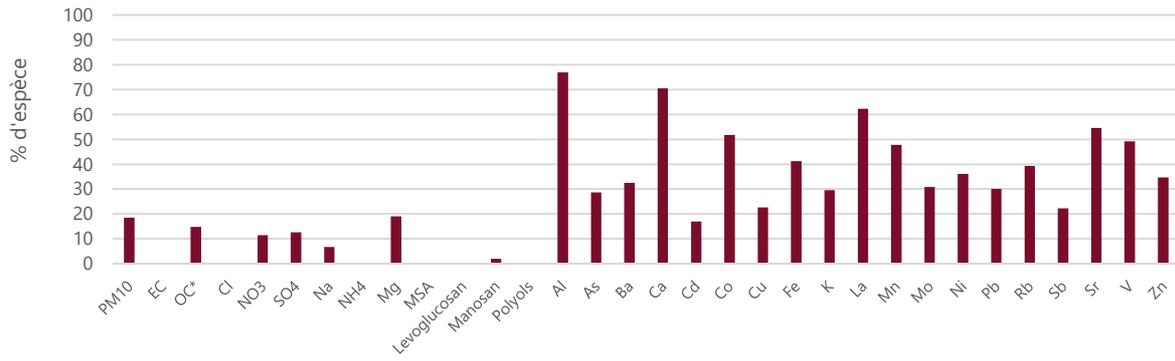
Biogénique secondaire marin



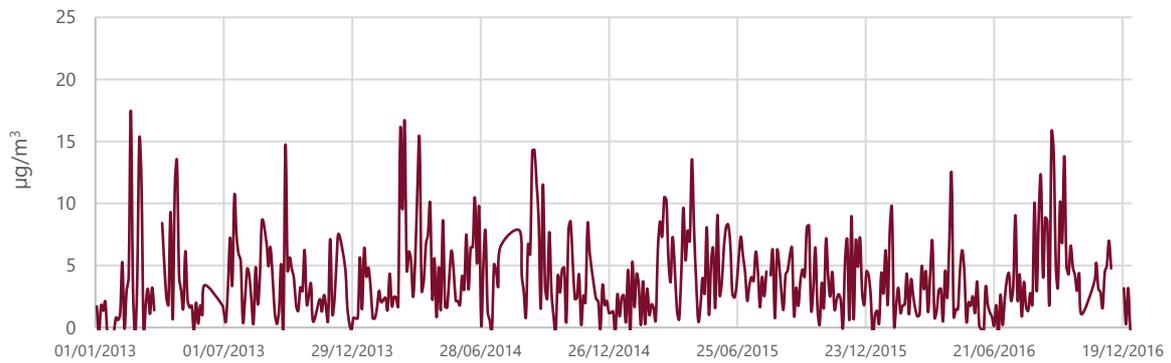
Biogénique secondaire marin



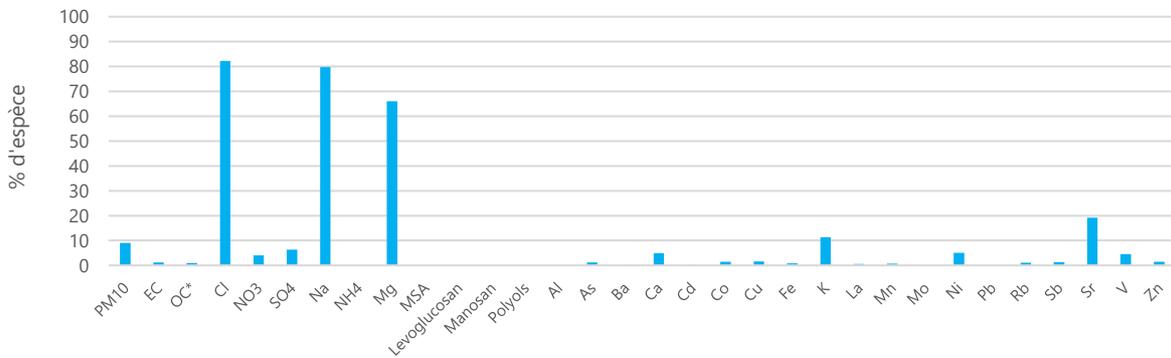
Poussières minérales/industrielles



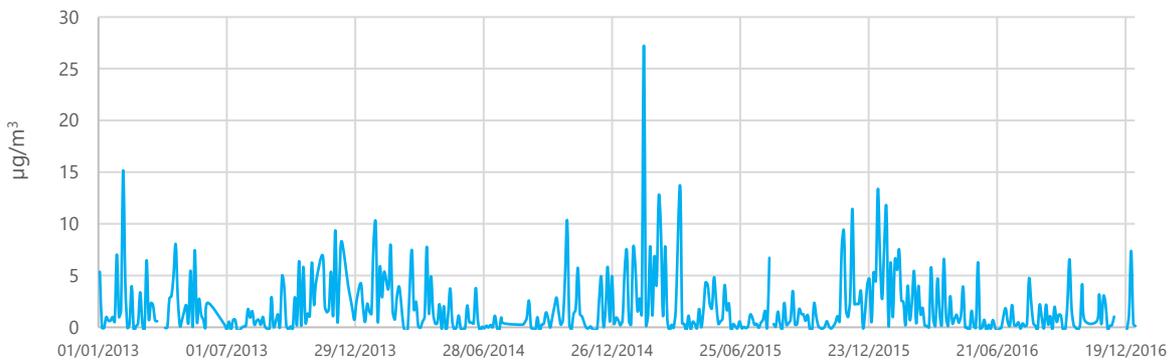
Poussières minérales/industriels



Sels marins



Sels marins



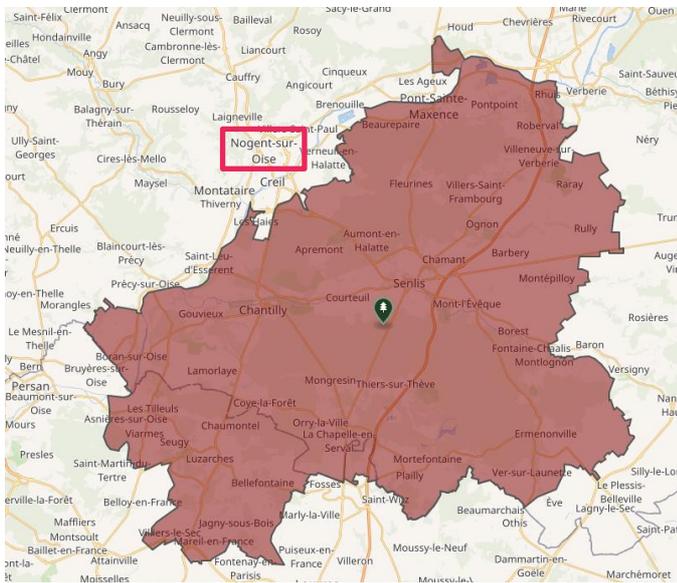
Annexe 3 : Localisation de la station de mesure et de la station météo



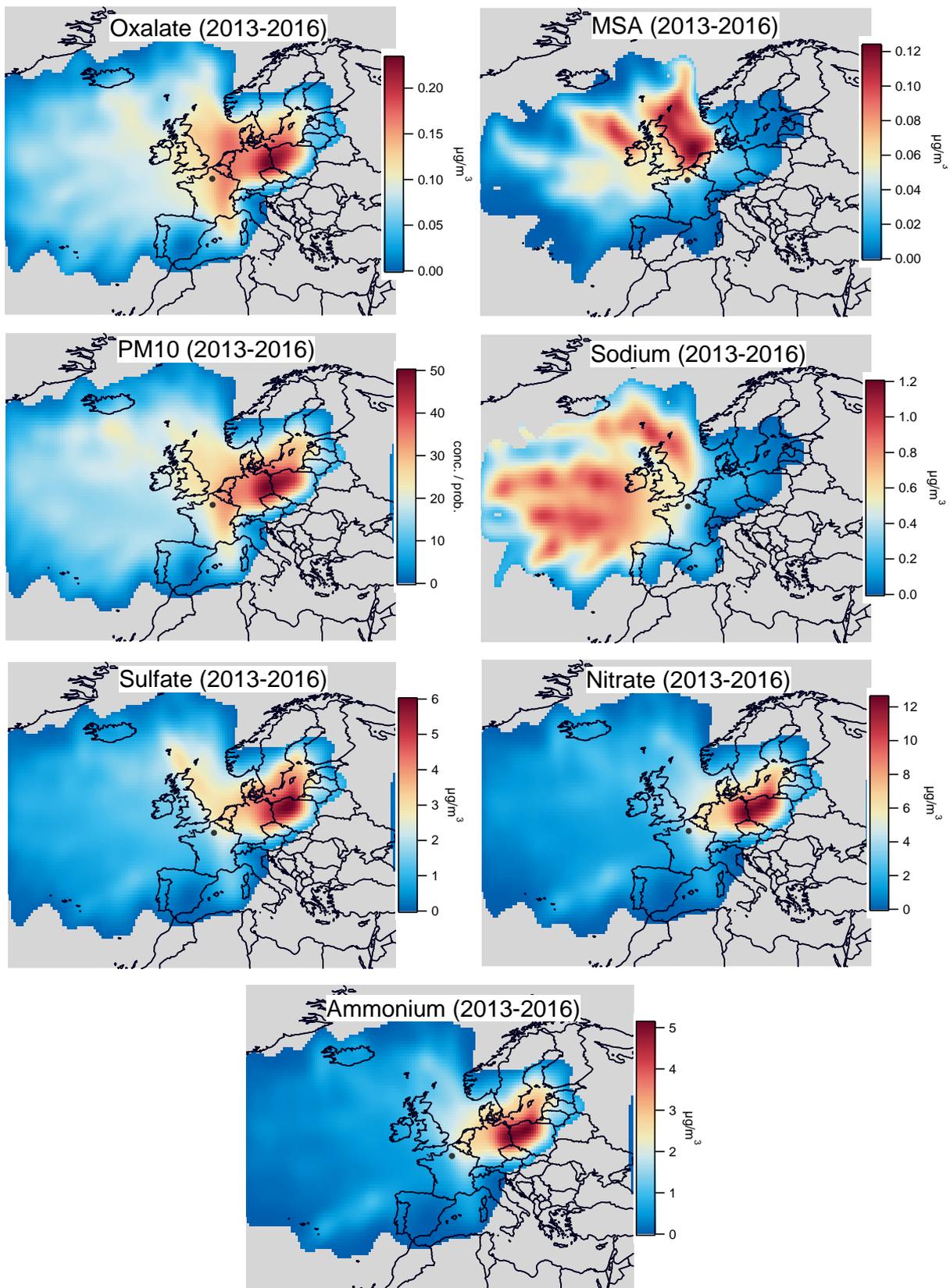
(source : Google Maps 2018)

Annexe 4 : Sources biogénique primaire à Nogent-sur-Oise

a) Parc naturel régional Oise-Pays de France ; b) Trois terrains de football à côté du site de mesure



Annexe 5 : Cartes CWT de certaines espèces mesurées

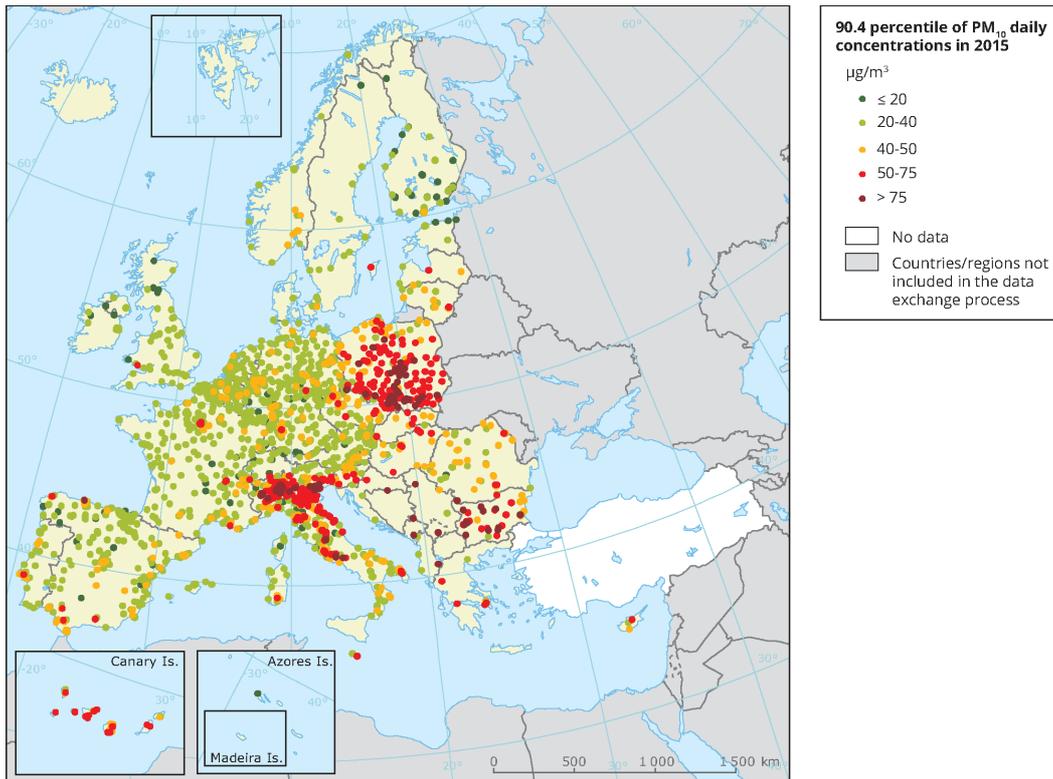


Annexe 6 : Vue satellitale d'un bloom de phytoplancton dans la mer du Nord (7 mai 2008)



(Source : [http://www.esa.int/Our Activities/Observing the Earth/Earth from Space A blooming North Sea](http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Earth_from_Space/A_blooming_North_Sea))

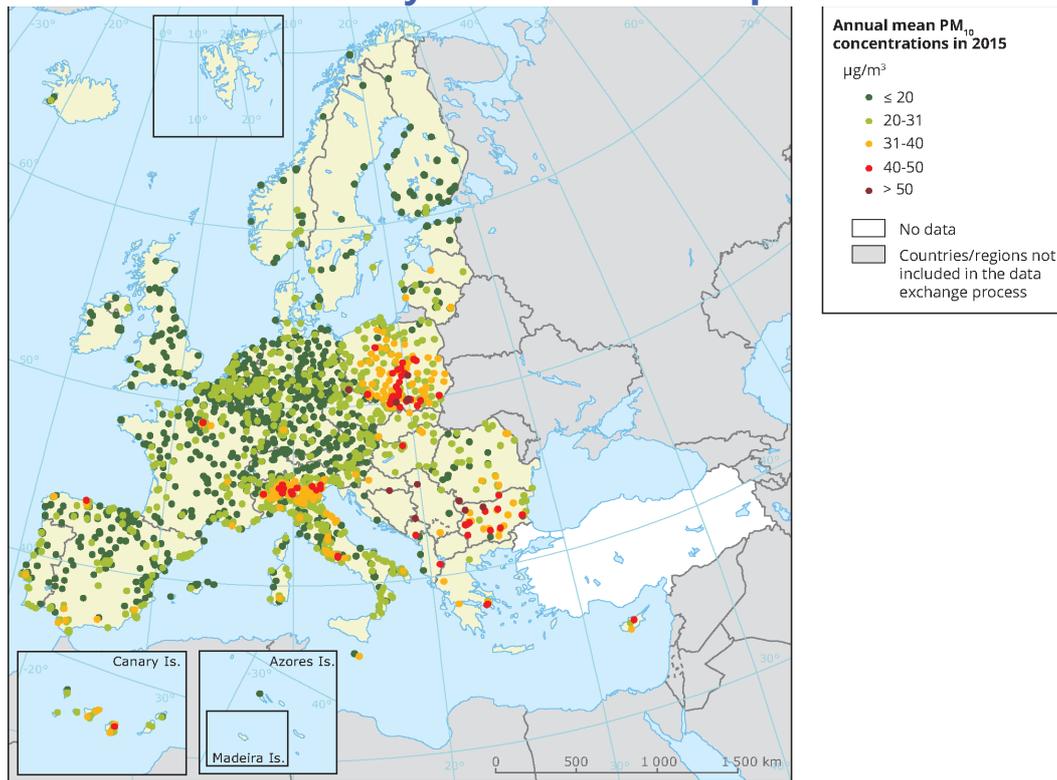
Annexe 7 : 90.4 percentiles de la concentration journalière des particules PM10 en 2015



Sources : European Environment Agency (EEA)

<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/90-4-percentile-of-pm10-2>

Annexe 8 : Concentration moyenne annuelle des particules PM10 en 2015



Sources : European Environment Agency (EEA)

<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/annual-mean-pm10-concentrations-in>

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

Atmo Hauts-de-France

Observatoire de l'Air

55, place Rihour

59044 Lille Cedex

