

# RAPPORT D'ETUDE

Surveillance des particules ultrafines dans la région

Hauts-de-France

Rapport N°02/2019/SZ/01

Etude menée en 2019

Auteur : Shouwen ZHANG

Vérificateur : Nathalie DUFOUR

Diffusion : 7 Décembre 2020



# 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<sup>er</sup> 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](http://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

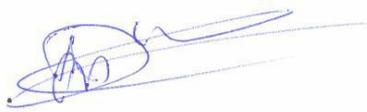
Atmo Hauts-de-France n'est en aucune façon responsable des interprétations et travaux intellectuels, publications diverses ou de toute œuvre utilisant ses mesures et ses rapports d'études pour lesquels aucun accord préalable n'aurait été donné.

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°02/2019/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](mailto: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
<b>Approbation</b>	Nathalie Dufour	Responsable du Service Etudes	

**Version du document : V2 basé sur trame vierge : EN-ETU-20**

**Date d'application : 01/01/2020**

# Sommaire

<b>1. Synthèse de l'étude.....</b>	<b>6</b>
<b>2. Enjeux et objectifs de l'étude .....</b>	<b>8</b>
2.1. Introduction PUF .....	8
2.2. Stratégie régionale et nationale .....	9
2.3. Objectifs.....	10
<b>3. Matériels et méthodes.....</b>	<b>11</b>
3.1. Stations de mesures .....	11
3.2. Instrumentation .....	12
3.3. Analyse du vent par la méthode NWR.....	14
<b>4. Contexte environnemental .....</b>	<b>15</b>
4.1. Stations de mesure .....	15
4.2. Contexte météorologique.....	17
<b>5. Résultats de l'étude .....</b>	<b>19</b>
5.1. Concentration en nombre et distribution en tailles de particules.....	19
5.2. Corrélation avec les autres polluants.....	23
5.3. Influence du trafic routier .....	25
5.4. Source portuaire .....	30
5.5. Source industrielle .....	34
5.6. Formation de nouvelles particules.....	36
5.7. Influence du chauffage au bois.....	37
<b>6. Conclusion et perspectives.....</b>	<b>39</b>

# Annexes

<b>Annexe 1 : Glossaire.....</b>	<b>41</b>
<b>Annexe 2 : Concentration en nombre des PUF moyenne dans les autres stations en France .....</b>	<b>42</b>

## Tableaux

Tableau 1 Sources principales des PUF pour les sites étudiés (non quantitative).....	7
Tableau 2 Période de mesure des PUF en Région Hauts-de-France en 2019.....	12
Tableau 3 La comparaison des méthodes MPSS et UFP 3031 .....	13
Tableau 4 Localisation, influence et mesures en parallèle pour ces 4 sites .....	16
Tableau 5 Température et humidité relative durant les campagnes de mesure effectuées en 2019 .....	17
Tableau 6 Coefficient de détermination ( $R^2$ ) entre les PUF totales et les autres polluants à Lille Leeds .....	23
Tableau 7 Le coefficient de détermination ( $R^2$ ) entre PUF totales et les autres polluants à Calais ..	23
Tableau 8 Le coefficient de détermination ( $R^2$ ) entre PUF totales et les autres polluants à Valenciennes.....	24
Tableau 9 Le coefficient de détermination ( $R^2$ ) entre PUF totales et les autres polluants à Dunkerque Port.....	24
Tableau 10 Sources principales des PUF pour les sites étudiés (non quantitative).....	40

## Illustrations

Figure 1 Distribution des tailles de PUF pour différents sites étudiés en 2018-2019 .....	6
Figure 2 Points de mesures PUF dans la région Hauts-de-France en 2019 .....	11
Figure 3 Photo et schéma d'installation d'UFP 3031 (source : manuel UFP 3031, version 2011) .....	13
Figure 4 Photo d'Aéthalomètre AE33 (Source : AE33 Manual Version 1.54, Mars 2016).....	14
Figure 5 Exemple d'une rose de pollution obtenue par la méthode NWR .....	14
Figure 6 Cartes géographiques pour les 4 sites étudiés (source : géoportail 2020).....	15
Figure 7 Roses du vent pendant les périodes d'étude pour ces 4 sites (direction du vent en degrés, avec le 0° correspondant au nord : 0-359° ; fréquence du vent : pourcentage dans les axes x et y ; vitesse du vent : indiqué en différente couleur) .....	18
Figure 8 Concentration moyenne en nombre de particules pour tous les sites étudiés (2018-2019) .....	19
Figure 9 Distribution des tailles de particules pour tous les sites étudiés (2018-2019) .....	20
Figure 10 Concentration en nombre des PUF et distribution en tailles des particules à Lille en 2019 .....	21
Figure 11 Concentration en nombre des PUF et distribution en tailles des particules à Calais en 2019 .....	21

Figure 12 Concentration en nombre des PUF et distribution en tailles des particules à Valenciennes en 2019.....	22
Figure 13 Concentration en nombre des PUF et distribution en tailles des particules à Dunkerque Port en 2019 .....	22
Figure 14 Rose de pollution pour les PUF, le BC <sub>ff</sub> , le NO et le NO <sub>2</sub> à Lille en 2019 .....	26
Figure 15 Variation journalière des PUF totales et BC <sub>ff</sub> à Lille (l'année 2019 et automne 2019).....	26
Figure 16 Rose de pollution des PUF à Lille en 2018 et 2019 .....	26
Figure 17 Distribution en taille des PUF à Lille (2018 et 2019).....	27
Figure 18 Rose de pollution pour les PUF, le BC <sub>ff</sub> , le NO et le NO <sub>2</sub> à Valenciennes.....	28
Figure 19 Variation journalière des PUF totales et BC <sub>ff</sub> à Valenciennes (2 phases de mesures et automne 2019) .....	28
Figure 20 Rose des vents et rose de pollution pour les PUF, le BC <sub>ff</sub> , et PM <sub>2.5</sub> à Calais (automne 2019) .....	29
Figure 21 Variation journalière des PUF totales et BC <sub>ff</sub> à Calais (automne 2019).....	29
Figure 22 Rose des vents et rose de pollution pour les PUF, le BC <sub>ff</sub> , PM <sub>2.5</sub> et PM <sub>10</sub> à Calais (printemps 2019).....	30
Figure 23 Rose de pollution pour les particules entre 20-800 nm.....	31
Figure 24 Rose des vents et PUF mesurées du 10/04/2019 à Calais .....	31
Figure 25 Rose des vents et roses de pollution pour les PUF totales (carte à différente échelle : 500 m et 50 m) et le BC <sub>ff</sub> à Dunkerque Port en été 2019.....	32
Figure 26 Rose de pollution pour les particules entre 20-800 nm.....	33
Figure 27 PUF, direction et vitesse du vent le 23/07/2019 à Dunkerque Port.....	33
Figure 28 Rose des vents et rose de pollution pour les PUF et le BC <sub>ff</sub> à Dunkerque Port en hiver 2019.....	34
Figure 29 Rose de pollution pour les PUF entre 20-800 nm.....	35
Figure 30 PUF, direction et vitesse du vent du 12/12/2019 à Dunkerque Port .....	35
Figure 31 Variation journalière des PUF 20-30 nm pour 4 saisons en 2019.....	36
Figure 32 Événement de la formation de nouvelles particules à Lille (04/07/2019).....	37
Figure 33 Variation journalière des PUF 100-200 nm et du BC <sub>wb</sub> pendant la période froide (automne ou hiver) 2019.....	38

# 1. Synthèse de l'étude

Les particules ultrafines (PUF) sont définies comme l'ensemble des particules ayant un diamètre aérodynamique égal ou inférieur à 100 nanomètres (nm) ou 0,1 micromètres ( $\mu\text{m}$ ). Les PUF dans l'atmosphère peuvent constituer un risque pour la santé humaine et ont un impact important sur le climat.

En 2017, la stratégie de surveillance des particules ultrafines a été définie dans la région Hauts-de-France pour la période 2017-2021. Cette étude PUF en 2019 est la continuité d'une première étude PUF réalisée en 2018 et s'inscrit dans le plan d'actions (axe 1) du PRSQA (Programme Régional de Surveillance de la Qualité de l'Air). Cette étude est cofinancée par la DREAL (direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement) et la Région Hauts-de-France.

Les PUF sont surveillées en continu grâce à une station fixe située à Lille-Leeds depuis 2018. Pour mieux comprendre la variation des particules ultrafines dans le temps et dans les différentes typologies de la région Hauts-de-France, des campagnes d'observation de courte durée (2 fois 4 semaines) ont été réalisées sur 6 autres points de mesures avec des environnements différents (trafic, urbain, industriel/portuaire et rural) en 2018-2019.

La concentration en nombre et la distribution par taille des particules ont été mesurées par un analyseur UFP 3031 (TSI, USA) sur une gamme allant de 20 à 800 nm. D'autres paramètres chimiques (black carbon, particules PM10/PM2.5, oxydes d'azote, ozone...) et météorologiques (direction et vitesse du vent, humidité relative, température...) ont été suivis en parallèle.

Les résultats obtenus indiquent que les concentrations moyennes des PUF varient entre 4500 – 9200 particules par centimètre cube d'air en région Hauts-de-France pendant les périodes étudiées. Les sites en proximité des sources d'émissions (industrielle, portuaire et trafic) montrent une concentration plus élevée que les sites de type fond urbain et rural. La distribution des particules par taille montre deux groupes principaux : le plus important avec des particules de diamètre compris entre 20 et 50 nm, notamment pour les sites industriels/portuaires ; le deuxième groupe, avec des particules comprises entre 100 et 200 nm, qui est plus élevé pour les sites trafic et industriel.

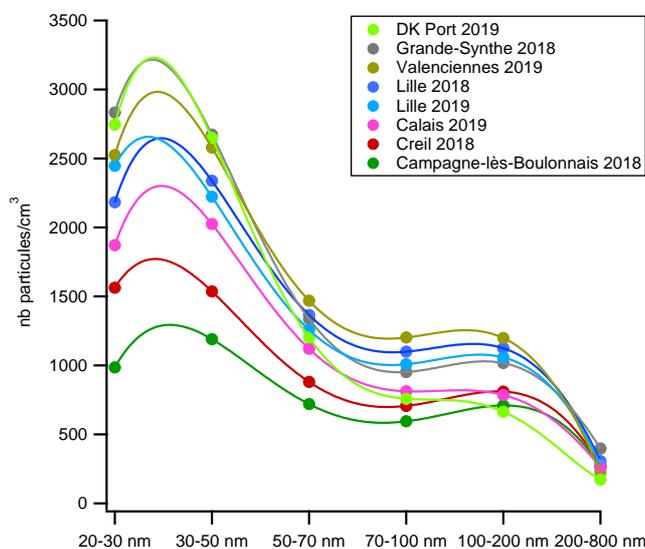


Figure 1 Distribution des tailles de PUF pour différents sites étudiés en 2018-2019

Les PUF peuvent être émises directement dans l’atmosphère par diverses sources : trafic, combustion de la biomasse, processus industriels... Ce sont alors des PUF dites primaires. D’autres types de PUF peuvent être également formés dans l’atmosphère à partir d’autres polluants gazeux (formation de nouvelles particules) ; on parle alors de PUF secondaires.

Les sources principales des PUF des 7 sites ont été recherchées et sont résumées dans le tableau ci-dessous. Le nombre d’étoiles représente l’importance de source pour chaque site de façon qualitative (non quantitative). Le trafic est la source principale de PUF en proximité automobile et en milieu urbain (Lille, Valenciennes, Creil et Calais). En période estivale, la formation de nouvelles particules est une source importante pour les PUF les plus fines (20-30 nm) pour tous les sites, notamment à Campagne-lès-Boulonnais et à Grande-Synthe. Le chauffage au bois est une source de PUF entre 100 et 200 nm en période hivernale pour tous les sites. Les émissions industrielles/portuaires sont les sources principales des PUF à Grande-Synthe, Calais et Dunkerque Port.

En résumé, les PUF dans la région proviennent de différentes sources. Dans la région, on mesure environ 5000 particules par centimètre cube d’air (niveau de fond régional). Les sites à proximité du trafic et de l’industrie sont exposés à un niveau double par rapport au niveau de fond.

*Tableau 1 Sources principales des PUF pour les sites étudiés (non quantitative)*

Station	Source			
	PUF primaires			PUF secondaires
	Trafic	Chauffage au bois	Industrie/portuaire	Formation de nouvelles particules
<b>Lille Leeds</b>	***	**		*
<b>Creil</b>	**	**		*
<b>Grande-Synthe</b>	*	*	***	**
<b>Campagne-lès-B</b>		**		**
<b>Calais</b>	**	*	***	*
<b>Dunkerque Port</b>	*	*	***	*
<b>Valenciennes trafic</b>	***	**		*

En 2020, une collaboration dans le cadre du projet BePoPi avec les partenaires santé (CHU d’Amiens) permettra de mieux comprendre les impacts sanitaires des PUF à Amiens (résultats de l’étude prévus en 2021).

## 2. Enjeux et objectifs de l'étude

### 2.1. Introduction PUF

#### 2.1.1. Définition

Les particules atmosphériques sont constituées de matière solide et/ou liquide en suspension dans l'air, qui sont souvent désignées par l'abréviation **PM** (*Particulate Matter* en l'anglais). Selon la taille des particules, les particules atmosphériques peuvent être classées comme « PM10 », « PM2,5 » ou « PM1 », dont le diamètre est inférieur à 10, 2,5 et 1 micromètre(s), respectivement.

La particule ultrafine, est « une particule d'un diamètre nominal inférieur à 100 nm environ », définie par l'organisation internationale de normalisation (ISO/TC 146/SC 2/WG1 N320). Comme les particules ultrafines (PUF) ont peu de masse, leurs concentrations sont souvent exprimées en nombre de particules (PNC : *Particle Number Concentration*) par unité de volume d'air (e.g. par centimètre cube). A l'heure actuelle, il n'existe pas d'instrument qui mesure uniquement le PNC pour les particules inférieures à 100 nm, mais plutôt dans la gamme submicronique (diamètre < 1 µm). **Dans ce rapport, le terme « PUF » signifie à la concentration en nombre de particules submicroniques.**

Les PUF ne constituent qu'une petite fraction de la masse de particules en suspension (en microgramme) ; par exemple, un million de particules de diamètre 10 nm ont une masse équivalente à une seule particule de diamètre 1 µm de même densité. Mais elles représentent 80%-90% de la concentration en nombre de particules dans un environnement urbain<sup>1</sup>.

#### 2.1.2. Sources

Les particules ultrafines dans l'atmosphère sont composées de particules primaires, émises par des activités anthropiques et des sources naturelles, et de particules secondaires formées à partir des processus de conversion de gaz en particules, notamment la nucléation et la condensation<sup>2</sup>. Les PUF primaires proviennent principalement de l'échappement de moteur (véhicules, bateaux, avions...) <sup>3,4,5</sup>, des processus industriels<sup>6</sup>, de la transformation d'énergie<sup>7</sup>, et de la combustion de biomasse<sup>8</sup>.

---

<sup>1</sup> L. Morawska et al., "Comprehensive Characterization of Aerosols in a Subtropical Urban Atmosphere: Particle Size Distribution and Correlation with Gaseous Pollutants," *Atmospheric Environment* 32, no. 14–15 (August 1, 1998): 2467–78, [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00023-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00023-5).

<sup>2</sup> Markku Kulmala and Veli-Matti Kerminen, "On the Formation and Growth of Atmospheric Nanoparticles," *17th International Conference on Nucleation and Atmospheric Aerosols* 90, no. 2 (November 1, 2008): 132–50, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.01.005>.

<sup>3</sup> Yifang Zhu et al., "Concentration and Size Distribution of Ultrafine Particles Near a Major Highway," *Journal of the Air & Waste Management Association* 52, no. 9 (September 1, 2002): 1032–42, <https://doi.org/10.1080/10473289.2002.10470842>.

<sup>4</sup> Yenny González et al., "Ultrafine Particles Pollution in Urban Coastal Air Due to Ship Emissions," *Atmospheric Environment* 45, no. 28 (September 2011): 4907–14, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.06.002>.

<sup>5</sup> Dane Westerdahl et al., "The Los Angeles International Airport as a Source of Ultrafine Particles and Other Pollutants to Nearby Communities," *Atmospheric Environment* 42, no. 13 (April 2008): 3143–55, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.09.006>.

<sup>6</sup> Karine Elihn and Peter Berg, "Ultrafine Particle Characteristics in Seven Industrial Plants," *Annals of Work Exposures and Health* 53, no. 5 (May 15, 2009): 475–84, <https://doi.org/10.1093/annhyg/mep033>.

<sup>7</sup> Yungang Wang et al., "Long-Term Study of Urban Ultrafine Particles and Other Pollutants," *Air Pollution and Health: Bridging the Gap from Sources-to-Health Outcomes* 45, no. 40 (December 1, 2011): 7672–80, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.08.022>.

<sup>8</sup> J. Rissler et al., "Size Distribution and Hygroscopic Properties of Aerosol Particles from Dry-Season Biomass Burning in Amazonia," *Atmos. Chem. Phys.* 6, no. 2 (February 9, 2006): 471–91, <https://doi.org/10.5194/acp-6-471-2006>.

### 2.1.3. Effets Sanitaires

La législation actuelle sur la qualité de l'air se concentre sur la surveillance et la réduction des concentrations massiques ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de particules en suspension dans l'air. Cependant, des recherches toxicologiques et épidémiologiques récentes suggèrent que le nombre de particules peut avoir un meilleur lien avec les effets sur la santé que la concentration massique<sup>9</sup>.

Les particules ultrafines (PUF) dans l'atmosphère peuvent constituer un risque pour la santé.

En raison de leur très petite taille, les PUF peuvent pénétrer profondément dans le poumon, le réseau sanguin et potentiellement dans tous les organes du corps. Elles peuvent provoquer l'inflammation et des maladies cardiovasculaires et respiratoires<sup>10,11</sup>.

De plus, les PUF ont une surface spécifique plus grande que les grosses particules, qui pourrait :

- 1) adsorber ou condenser plus de polluants atmosphériques toxiques ;
- 2) favoriser les interactions biologiques avec les cellules pulmonaires<sup>12</sup>.

Les études épidémiologiques à court terme ont observé les associations positives mais non statistiquement significatives entre les expositions des PUF et la mortalité respiratoire<sup>13,14</sup>. Cependant, on ne sait pas encore si ces résultats sont uniquement associés aux PUF, ou à une combinaison d'autres fractions de particules ou encore d'autres polluants associés avec des PUF<sup>15</sup>.

## 2.2. Stratégie régionale et nationale

En 2017, Atmo a défini la stratégie de surveillance des particules ultrafines dans la région Hauts-de-France pour la période 2017-2021<sup>16</sup>. Ce document présente l'état de l'art sur les particules ultrafines dans un premier temps ; les enjeux et les objectifs dans la région Hauts-de-France, le plan d'actions, et la proposition des sites de mesure sont définis dans la deuxième partie. Le premier rapport PUF a été publié en 2019. Il exploite les mesures réalisées en région en 2018. Cette étude PUF en 2019 est la continuité de l'étude réalisée en 2018 et s'inscrit dans le plan d'actions (axe 1) du PRSQA (Programme Régional de Surveillance de la Qualité de l'Air). Cette étude est cofinancée par la DREAL (direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement) et la Région Hauts-de-France.

---

<sup>9</sup> K Donaldson et al., "Ultrafine Particles," *Occupational and Environmental Medicine* 58, no. 3 (March 1, 2001): 211, <https://doi.org/10.1136/oem.58.3.211>.

<sup>10</sup> Günter Oberdörster, "Pulmonary Effects of Inhaled Ultrafine Particles," *International Archives of Occupational and Environmental Health* 74 (January 1, 2001): 1–8, <https://doi.org/10.1007/s004200000185>.

<sup>11</sup> Delfino Ralph J., Sioutas Constantinos, and Malik Shaista, "Potential Role of Ultrafine Particles in Associations between Airborne Particle Mass and Cardiovascular Health," *Environmental Health Perspectives* 113, no. 8 (August 1, 2005): 934–46, <https://doi.org/10.1289/ehp.7938>.

<sup>12</sup> Chia-Pin Chio and Chung-Min Liao, "Assessment of Atmospheric Ultrafine Carbon Particle-Induced Human Health Risk Based on Surface Area Dosimetry," *Atmospheric Environment* 42, no. 37 (December 1, 2008): 8575–84, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.08.027>.

<sup>13</sup> Stefanie Lanzinger et al., "Associations between Ultrafine and Fine Particles and Mortality in Five Central European Cities — Results from the UFIREG Study," *Environment International* 88 (March 1, 2016): 44–52, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.12.006>.

<sup>14</sup> Evangelia Samoli et al., "Exposure to Ultrafine Particles and Respiratory Hospitalisations in Five European Cities," *European Respiratory Journal* 48, no. 3 (August 31, 2016): 674, <https://doi.org/10.1183/13993003.02108-2015>.

<sup>15</sup> Richard W Baldauf et al., "Ultrafine Particle Metrics and Research Considerations: Review of the 2015 UFP Workshop," ed. Doug Brugge, *International Journal of Environmental Research and Public Health* 13, no. 11 (November 2016): 1054, <https://doi.org/10.3390/ijerph13111054>.

<sup>16</sup> Atmo Hauts-de-France, "Stratégie « particules Ultrafines » Pour La Région Hauts-de-France (2017-2021)" (N°01/2017/SZ, June 2017).

En juin 2018, l'ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) a inscrit les PUF et le black carbone (ou le carbone suie) parmi les 13 polluants émergents prioritaires pour une surveillance à venir dans l'air ambiant. Selon le communiqué de presse du MTES (Ministère de la Transition écologique et solidaire) du 28 juin 2018, le Gouvernement renforcera les modalités de surveillance des concentrations dans l'air pour ces polluants « non réglementés » (le 1,3-butadiène, les particules ultrafines et le carbone suie).

Actuellement, il n'existe pas de valeurs limites de référence pour ces polluants. Mais le groupe de travail national envisage des programmes de recherche avec l'ANSES visant à mieux caractériser la toxicologie des PUF et établir une/des valeurs toxicologiques de référence (VTR) afin de pouvoir disposer à l'avenir de valeurs de référence.

En 2020, une stratégie de surveillance nationale PUF est en cours, avec pour objectif d'alimenter les études sur leurs impacts sanitaires et la définition de valeurs de référence.

## 2.3. Objectifs

Comme définie dans la stratégie régionale, la surveillance des particules ultrafines s'inscrit dans les actions d'Atmo Hauts-de-France menées pour l'amélioration des connaissances sur les particules.

Les objectifs principaux de cette étude sont :

- Mettre en œuvre la stratégie de surveillance des PUF pour la région Hauts-de-France définie en 2017.
- Documenter et comparer le niveau de concentration et la distribution de taille des PUF sur différents points de mesures du territoire pour les campagnes réalisées en 2018-2019.
- Comprendre l'évaluation temporelle (journalière, saisonnière) des PUF.
- Identifier des sources potentielles des particules ultrafines dans la région.
- Mieux comprendre la formation des particules secondaires dans la région.

# 3. Matériels et méthodes

## 3.1. Stations de mesures

### 3.1.1. Localisation des stations

Depuis 2018, la surveillance des particules ultrafines est pérennisée sur une station trafic à Lille (Lille Leeds). En parallèle, 6 campagnes d'observation de courte durée ont été réalisées en 2018 et 2019.

Ces sites de mesures ont été choisis selon la stratégie PUF Atmo Hauts-de-France (2017-2021) avec différentes typologies dans la région : trafic (Valenciennes Wallon), industrielle (Grande-Synthe, Dunkerque Port), port (Calais Berthelot, Dunkerque Port), urbaine (Creil) et rurale (Campagne-lès-Boulonnais). Pour chaque typologie, la campagne de mesure a été effectuée 2 fois (minimum 4 semaines chaque fois) dans l'année pour avoir une bonne représentativité, notamment météorologique.

Leurs localisations et les années de mesures correspondantes ont présentées sur la Figure 2.

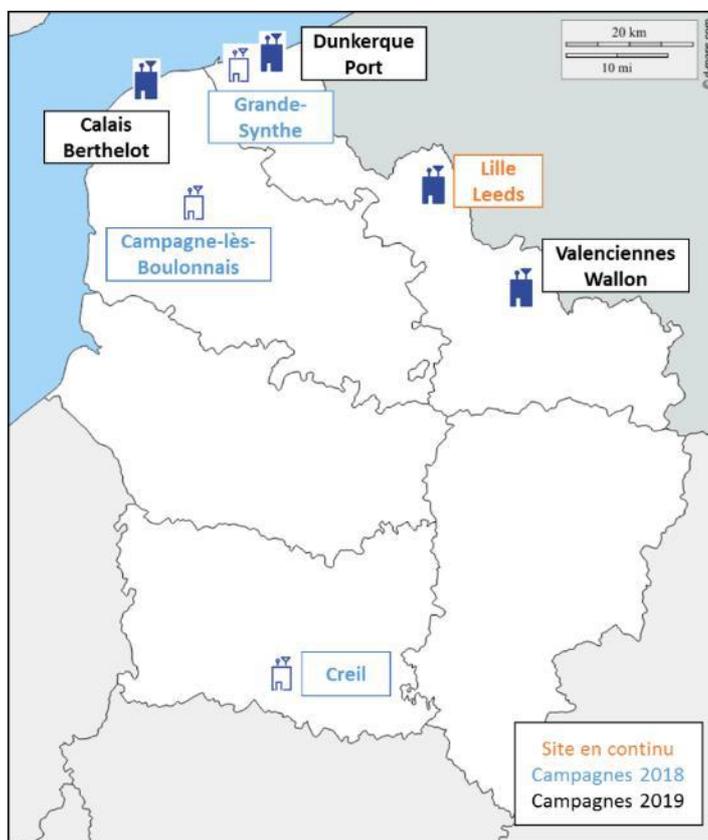


Figure 2 Points de mesures PUF dans la région Hauts-de-France en 2019

### 3.1.2. Période de mesures

La période de mesure en 2019 pour chaque campagne est indiquée dans le Tableau 2.

Tableau 2 Période de mesure des PUF en Région Hauts-de-France en 2019

	2019											
	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Lille Leeds												
Calais Berthelot												
Valenciennes Wallon												
Dunkerque Port												

### 3.1.3. Résolution temporelle

Les données des polluants (PUF et autres polluants) sont toutes moyennées au pas de temps horaire à partir des données d'origine quart horaire. Les données météorologiques, fournies par les stations Météo-France, sont déjà en moyenne horaire.

## 3.2. Instrumentation

### 3.2.1. UFP 3031

Le granulomètre de type UFP 3031 a été développé par la société TOPAS dans le cadre du projet européen UFIPOLNET. Cet appareil est commercialisé par la société TSI, la production étant assurée par la société TOPAS (Allemagne). Il a été choisi par l'ensemble des membres du Groupe de Travail PUF en France pour des raisons de surveillance harmonisée. Mais récemment, d'autres instrumentations comme le CPC (condensation particle counter) ou le MPSS (Mobility particle size spectrometers) ont aussi été utilisées dans les autres AASQAs (Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air).

L'UFP 3031 a été spécifiquement conçu pour les réseaux de surveillance en continu à long terme. Cet instrument est constitué de deux parties, d'une part le tri des particules par classe de taille et d'autre part leur dénombrement par un électromètre.

Ses caractéristiques principales sont :

- Mesure de la concentration en nombre de particules entre 20 nm et 800nm ;
- Mesure de la granulométrie de particules par six canaux de taille : (20-30nm ; 30-50nm ; 50-70nm ; 70-100nm ; 100-200nm ; 200-800nm).

Un MPSS est l'appareil qui permet de répondre à la méthode référence pour déterminer la distribution granulométrique de particules en air ambiant (XP CEN/TS 17434, Juillet 2020).

Les avantages de cet instrument par rapport un MPSS classique sont : 1) il utilise un chargeur à effet couronne au lieu d'une source radioactive, donc ne requiert aucune licence spéciale pour le déplacement ; 2) le comptage des particules est effectué par un électromètre à la place d'un compteur à noyaux de condensation, évitant l'utilisation de butanol. Mais ses limites principales sont : 1) ne pas fournir les informations pour les particules inférieures à 20 nm, qui sont très importantes en nombre ; 2) n'est pas une méthode normalisée par le CEN (Comité européen de normalisation) ; 3) moins de nombre de canaux par rapport un MPSS classique.

Tableau 3 La comparaison des méthodes MPSS et UFP 3031

	MPSS	UFP 3031
<b>Source radioactive</b>	<b>(-)</b> Certains modèles utilisent une source radioactive ; besoin d'une licence spéciale pour le déplacer	<b>(+)</b> Pas de source radioactive
<b>Fluide de travail</b>	<b>(-)</b> Butanol (Besoin d'une maintenance plus fréquente)	<b>(+)</b> Pas de fluide de travail
<b>Limite de détection</b>	<b>(+)</b> 7 nm	<b>(-)</b> 20 nm
<b>Normalisation</b>	<b>(+)</b> Méthode normalisée par le CEN	<b>(-)</b> Pas de normalisation
<b>Nombre de canaux</b>	<b>(+)</b> 64	<b>(-)</b> 6

Il existe un guide « recommandations techniques pour l'utilisation du granulomètre UFP 3031 » rédigé par le LCSQA (Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air), qui apporte des recommandations nécessaires à la mise en œuvre de cet appareil, basées sur le retour d'expériences des utilisateurs français.

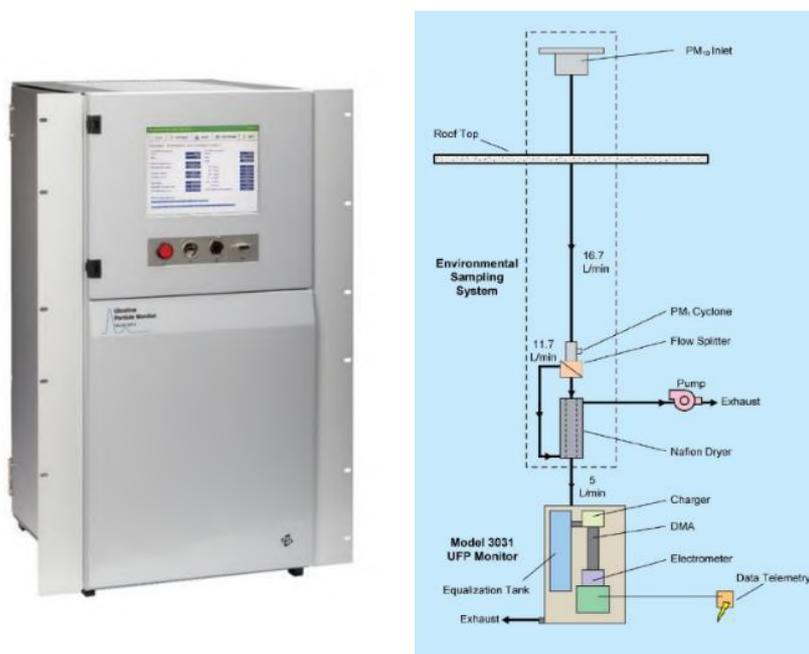


Figure 3 Photo et schéma d'installation d'UFP 3031 (source : manuel UFP 3031, version 2011)

### 3.2.2. Aéthalomètre AE33

Le black carbone (carbone suie), ou « Carbone Élémentaire (EC) » est produit par la combustion incomplète de combustibles fossiles et de biomasse, qui provient principalement du trafic (routier, maritime, aérien...), de l'industrie, du chauffage résidentiel, des centrales thermiques et autres types de combustion.

L'Aéthalomètre AE33 est un instrument qui donne la concentration équivalente de black carbon (BC) en mesurant l'absorption de la lumière sur une bande filtrante chargée de particules. L'AE33 mesure l'absorption optique à sept longueurs entre 370 et 950 nm.

Les données obtenues à partir de la longueur d'onde 880 nm sont utilisées pour calculer la concentration de BC. Les autres longueurs d'onde peuvent être utilisées pour estimer les contributions des différentes sources de black carbon :  $BC_{ff}$  (BC lié à la combustion de carburants fossiles) et  $BC_{wb}$  (BC lié à la combustion de biomasse).



Figure 4 Photo d'Aéthalomètre AE33 (Source : AE33 Manual Version 1.54, Mars 2016)

### 3.3. Analyse du vent par la méthode NWR

Les roses de pollution dans cette étude sont basées sur la méthode NWR (*Non-parametric wind regression*) et réalisées par le logiciel Zefir<sup>17</sup>. 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 concentration associée avec le vent < 1 m/s n'est pas prise en compte, car la direction du vent n'est pas représentative.

Un exemple est donné ci-dessous pour illustrer la rose de pollution obtenue par la méthode NWR. La concentration du  $BC_{ff}$  (black carbon lié à la combustion de carburants fossiles) est présentée en échelle de couleur (rouge pour la concentration plus élevée et bleu pour la concentration plus faible). La direction du vent est indiquée par N (nord), S (sud), E (est), et W (ouest). La vitesse du vent est indiquée dans l'axe du graphe (entre 0-20 km/h). Dans cette illustration, on peut voir que la concentration la plus importante de  $BC_{ff}$  se trouve dans les directions N-NE-E, associée avec les vents inférieures à 5 km/h.

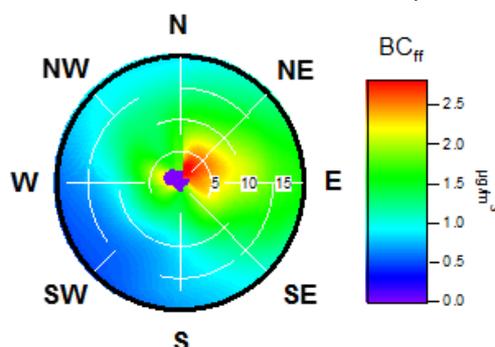


Figure 5 Exemple d'une rose de pollution obtenue par la méthode NWR

<sup>17</sup> 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>.

# 4. Contexte environnemental

## 4.1. Stations de mesure

Les quatre stations de mesure en 2019 ont été installées à Lille, Calais, Valenciennes et Dunkerque Port. Leurs localisations et les influences sont présentées en Figure 6.

La station de Lille Leeds est une station urbaine sous influence trafic, qui est bordée par l'autoroute (D651), la route nationale (D5) et la route départementale (D670) dans les directions nord, nord-est et est. La gare Lille-Europe se situe dans la direction sud et le parc Matisse se situe dans la direction ouest. La station est également sous l'influence urbaine de fond à Lille (trafic, résidentiel...).

La station Calais Berthelot est une station sous l'influence urbain de fond (trafic, résidentiel...) et des activités portuaires dans la direction nord-est avec une distance de 3 km.

La station Valenciennes Wallon est une station urbaine sous influence trafic, située à côté de la place République. Elle est impactée par les routes départementales (D169 et D44) et aussi les sources résidentielles de la ville.

La station Dunkerque Port se situe à côté d'une écluse (~50 m) pour l'entrée et la sortie des bateaux. La zone industrielle se trouve dans les directions est et sud-est du site (~3 km).

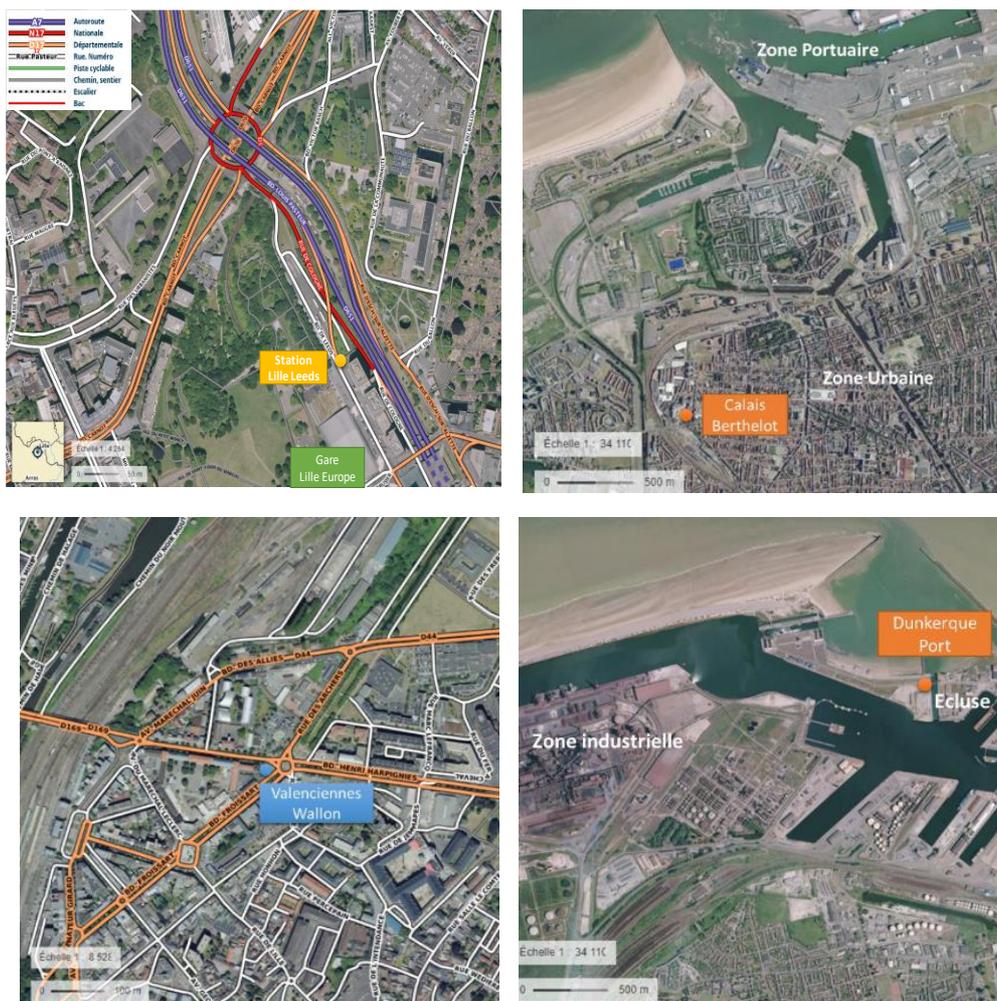


Figure 6 Cartes géographiques pour les 4 sites étudiés (source : géoportail 2020)

Les mesures en parallèle des PUF sur ces stations sont indiquées dans le Tableau 4. Les PM10, PM2.5, les NOx et le black carbon sont également mesurés pour mieux comprendre les sources des PUF et leurs liens avec autres polluants.

Cet ensemble de sites a été choisi afin de caractériser les particules ultrafines sur divers environnements du territoire en complémentarité de l'étude 2018. D'autre part, chacun de ces sites est influencé par des émissions et des conditions météorologiques qui lui sont propres.

*Tableau 4 Localisation, influence et mesures en parallèle pour ces 4 sites*

<b>Station</b>	<b>Localisation</b>	<b>Influence</b>	<b>Mesures en parallèle</b>
<b>Lille Leeds</b>	Urbain	Trafic	PM10/PM2.5 NO/NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> BTX BC
<b>Calais Berthelot</b>	Urbain	Portuaire	PM10/PM2.5 BC
<b>Valenciennes Wallon</b>	Urbain	Trafic	PM10/PM2.5 NO/NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> BC
<b>Dunkerque Port</b>	Urbain	Portuaire/ Industrielle	PM10/PM2.5 BC Paramètres météos

## 4.2. Contexte météorologique

Les données météorologiques (en résolution horaire) utilisées dans cette étude sont mesurées par les stations Météo France à proximité de chaque station (sauf pour la station Dunkerque Port qui dispose d'un mât météorologique d'Atmo Hauts-de-France). Le Tableau 5 résume la température et l'humidité relative pour l'ensemble des stations en différentes périodes de mesures : 4 saisons pour Lille Leeds et chaque phase pour les autres sites.

La période d'étude de la station Lille Leeds (une année civile complète), montre une température minimale à -7,2°C en hiver et maximale à 41,4°C en été. Son humidité relative est comprise entre 18 et 100%, avec une moyenne à 77%. Les valeurs mesurées en 2019 sont proches des observations en 2018.

A Calais et à Valenciennes, la première phase a eu lieu en printemps et la deuxième phase s'est déroulée en automne. L'humidité relative moyenne en automne à Valenciennes est un peu plus élevée (89%) que les autres sites sur la période similaire.

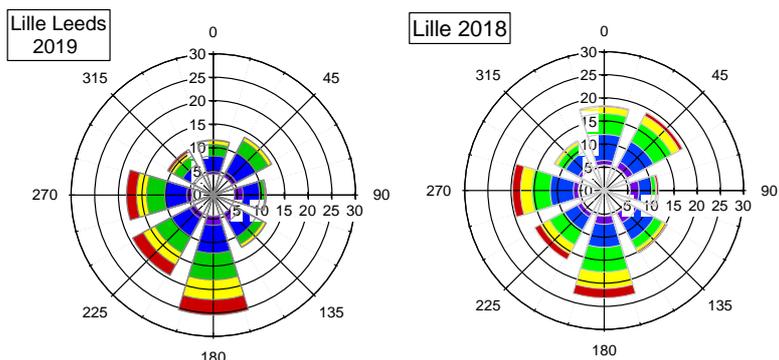
Les deux campagnes de mesures à Dunkerque Port ont eu lieu en été et en hiver 2019. La température maximale a atteint 39,4°C en été.

Tableau 5 Température et humidité relative durant les campagnes de mesure effectuées en 2019

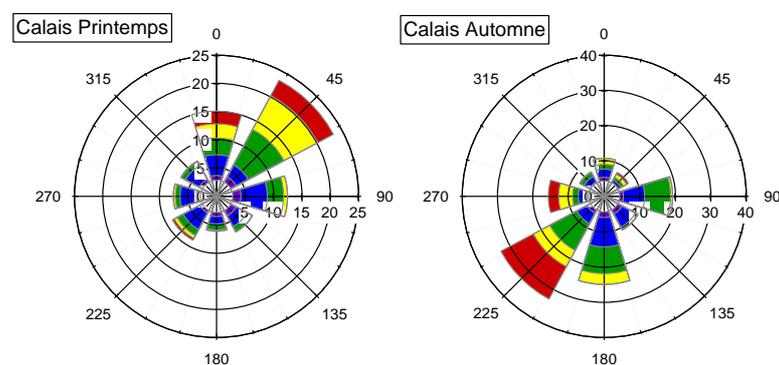
Stations et périodes		Température (°C)			Humidité relative (%)		
		Min	Moyenne	Max	Min	Moyenne	Max
<b>Lille Leeds</b>	<b>2019</b>	-7.2	11.6	41.4	18	77	100
	Hiver	<b>-7.2</b>	5.5	15.3	50	87	100
	Printemps	-1.0	9.0	25.6	23	75	100
	Été	2.8	15.6	<b>41.4</b>	18	69	99
	Automne	1.9	15.8	33.5	27	75	99
<b>Calais</b>	Phase 1	-0.9	9.7	24.3	33	77	97
	Phase 2	2.3	12.3	20.8	51	85	98
<b>Valenciennes</b>	Phase 1	1.4	13.7	30.6	31	74	100
	Phase 2	-3.4	5.8	12.5	64	<b>89</b>	100
<b>Dunkerque Port</b>	Phase 1	13.6	19.2	<b>39.4</b>	21	71	91
	Phase 2	1.2	7.6	13.3	53	80	94

Les roses du vent correspondant à chaque phase de mesure pour ces 4 sites sont présentées sur la Figure 7. Les vents inférieurs à 1 m/s ne sont pas pris en compte car leur direction est entachée de trop d'incertitude.

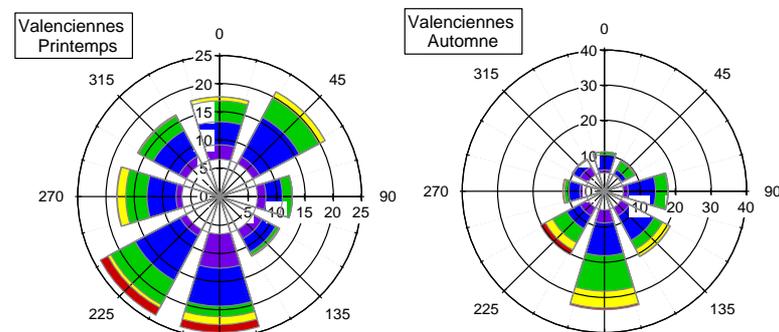
En 2019, le vent à Lille provient majoritairement du sud (25%), du sud-ouest (20%) et de l'ouest (18%) avec une vitesse supérieure à 4 m/s. Les vents des autres directions sont moins fréquents avec une vitesse plus faible (peu de vents > 4 m/s). La rose des vents en 2019 à Lille est similaire à celle de 2018 avec un peu moins de vent du nord et du nord-est.



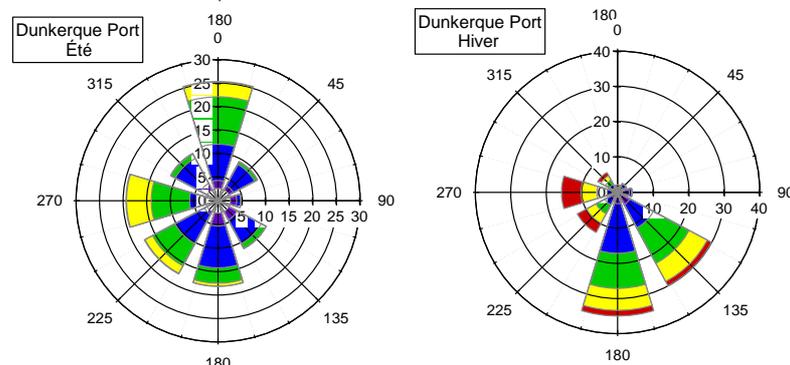
A Calais, le vent printanier provient principalement du nord-est (23%) et du nord (15%) avec une vitesse élevée (>6 m/s). En revanche, le vent d'automne est dominé par la direction du sud-ouest (> 30%) avec une vitesse plus importante (>8 m/s).



A Valenciennes, le vent printanier provient de toutes les directions, sauf l'est et le sud-est. La vitesse principale est entre 1-4 m/s. En automne, le vent du sud a dominé (>30%) avec une vitesse entre 2 et 6 m/s.



A Dunkerque Port, les roses des vents durant les deux saisons sont très différentes. En été, le vent provient principalement du nord (25%) avec une vitesse 2-6 m/s. En hiver, les vents du sud (>30%) et du sud-est (30%) dominent avec une vitesse plus élevée (4-8 m/s).



Vitesse du vent

1-2 m/s 2-4 m/s 4-6 m/s 6-8 m/s >8 m/s

Figure 7 Roses du vent pendant les périodes d'étude pour ces 4 sites (direction du vent en degrés, avec le 0° correspondant au nord : 0-359° ; fréquence du vent : pourcentage dans les axes x et y ; vitesse du vent : indiqué en différente couleur)

## 5. Résultats de l'étude

Dans un premier temps, les campagnes effectuées en 2019 sont présentées et comparées aux résultats obtenus en 2018. Les campagnes de mesures en 2018 (Lille 2018, Grande-Synthe, Creil et Campagne-lès-Bouloonnais) sont déjà exploitées dans le rapport précédant<sup>18</sup>.

Ensuite, les 4 campagnes réalisées en 2019 sont présentées en fonction de leurs typologies et influences d'émissions.

### 5.1. Concentration en nombre et distribution en tailles de particules

Dans un premier temps, la concentration en nombre totale est comparée pour tous sites étudiés en 2018-2019 (Figure 8). Cette concentration moyenne est la somme des particules mesurées par l'UFP 3031 dans les six classes de taille. La période d'étude de chaque site est indiquée dans la section 3.1.2. Elle n'est pas identique pour chaque site mais cette comparaison de concentrations nous permet d'avoir une première idée du nombre de particules moyen sur différents points territoriaux.

Le site trafic de Valenciennes et le site industriel de Grande-Synthe montrent un niveau plus élevé : ~ 9200 particules par centimètre cube. Le site trafic à Lille montre une concentration similaire pour ces deux années : 8416 et 8270 particules par centimètre cube en 2018 et 2019, respectivement. Le site portuaire/industriel à Dunkerque montre un niveau plus élevé que l'autre site portuaire à Calais durant cette étude, 8189 contre 6877 particules par centimètre cube. Le site urbain de Creil et le site rural de Campagne-lès-Bouloonnais présentent une concentration moyenne plus faibles, autour de 5800 et 4500 particules par centimètre cube, respectivement.

Ces niveaux sont comparables avec les autres stations de surveillance en France (Annexe 2) : plus de 10 000 particules/cm<sup>3</sup> pour le site trafic à Grenoble, et d'environ 5500 particules/cm<sup>3</sup> pour les sites de type fond urbain.

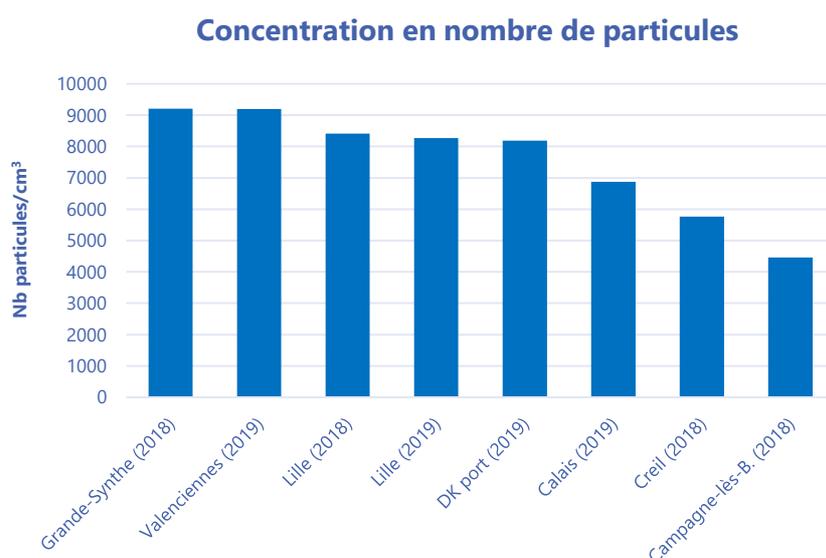


Figure 8 Concentration moyenne en nombre de particules pour tous les sites étudiés (2018-2019)

<sup>18</sup> Atmo HdF, "Surveillance Des Particules Ultrafines Dans La Région Hauts-de-France," October 2019, [https://www.atmo-hdf.fr/joomlatools-files/docman-files/Rapport\\_et\\_synthese\\_etudes/Rapport\\_PUF2018.pdf](https://www.atmo-hdf.fr/joomlatools-files/docman-files/Rapport_et_synthese_etudes/Rapport_PUF2018.pdf).

La distribution en tailles de particules pour tous sites étudiés en 2018-2019 est présentée dans la Figure 9. Il s'agit d'une distribution bimodale pour la plupart des sites. Le premier pic se trouve entre 20-50 nm et présente une concentration plus élevée, notamment pour les sites industriels/portuaires et les sites trafics. Les sites industriels/portuaires ( $> 3000 \text{ p/cm}^3$ ) présentent un niveau 3 fois plus élevé que le site rural ( $\sim 1000 \text{ p/cm}^3$ ) pour ces tailles de particules. Le deuxième pic se situe entre 100-200 nm. L'intensité du pic est beaucoup plus faible que le pic 20-50 nm et les différences entre ces sites sont moins remarquables ( $700\text{-}1200 \text{ particules/cm}^3$ ). A noter que à Dunkerque Port, le niveau à 100-200 nm est très faible (proche du niveau à Campagne-lès-Boulonnais) comparé à sa fraction 20-50 nm très élevée.

La classe 200-800 nm ne montre pas une différence significative entre ces sites de mesures.

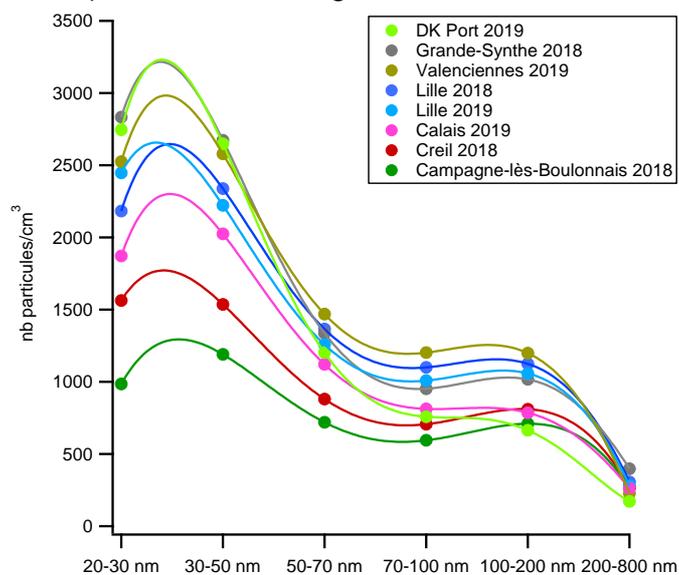


Figure 9 Distribution des tailles de particules pour tous les sites étudiés (2018-2019)

### 5.1.1. Lille Leeds (trafic)

La variation saisonnière pour la concentration en nombre et la distribution en taille sont présentées dans la Figure 10. Les PUF ne montrent pas une variation saisonnière significative alors que les conditions météorologiques peuvent être très variables (Cf. section 4.2).

Elles sont un peu plus importantes en hiver (~ 9000 particules/cm<sup>3</sup>) et un peu moins élevées en automne (~7500 particules/cm<sup>3</sup>) pour l'année 2019. La distribution en taille montre que les fractions plus fines (20-50 nm) sont un peu plus élevées en été. Et la classe de taille 100-200 nm est plus importante en hiver que les autres saisons.

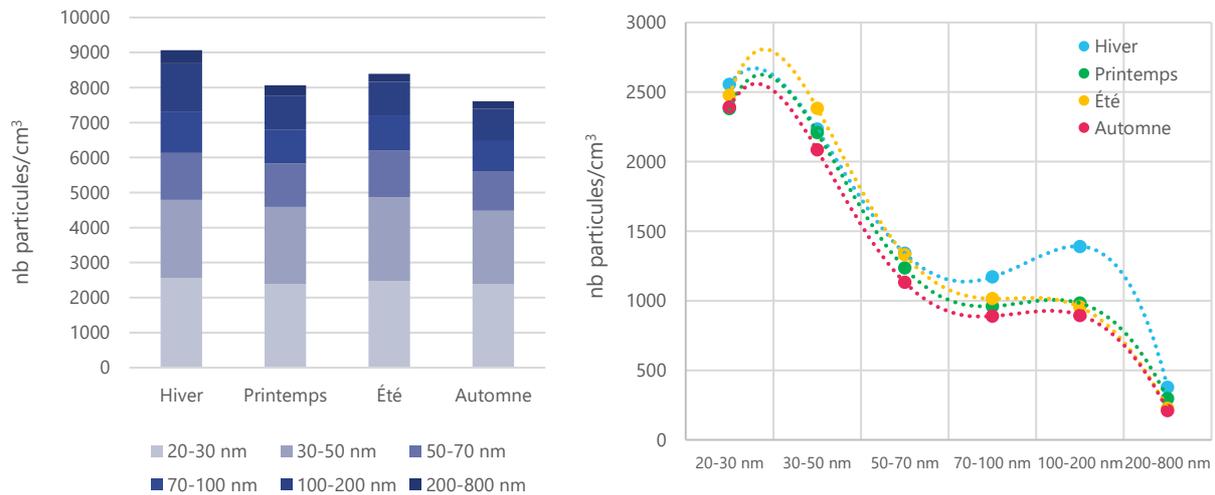


Figure 10 Concentration en nombre des PUF et distribution en tailles des particules à Lille en 2019

### 5.1.2. Calais (port)

Les deux campagnes de mesures à Calais ont été réalisées au printemps (avril) et en automne (octobre).

La concentration des PUF totales en moyenne présente une différence significative pour ces deux saisons, qui est à 8300 particules/cm<sup>3</sup> au printemps et autour de 5000 particules/cm<sup>3</sup> en automne.

La distribution en tailles de particules est également présentée dans la Figure 11. La concentration en nombre est plus élevée au printemps pour toutes les tailles, notamment pour les fractions plus fines (20-50 nm).

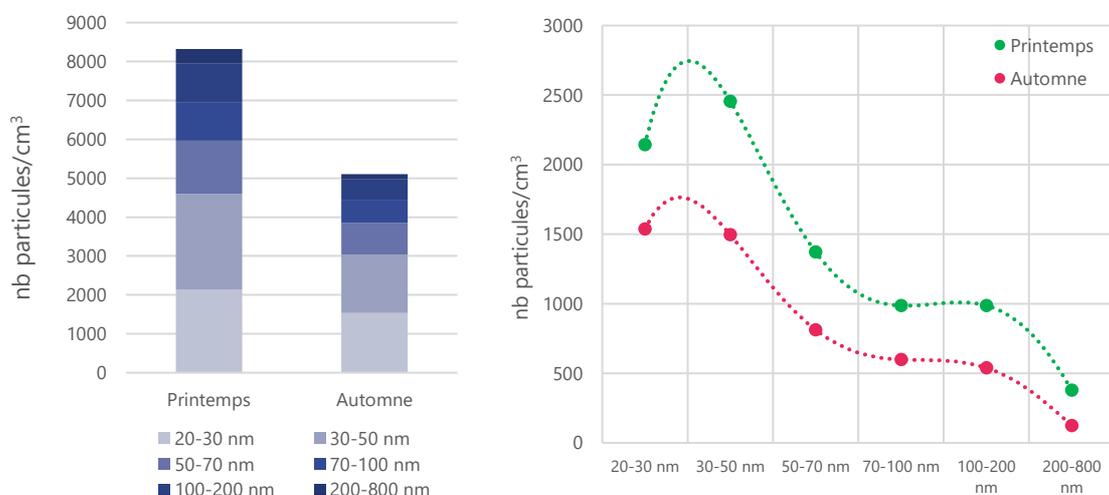


Figure 11 Concentration en nombre des PUF et distribution en tailles des particules à Calais en 2019

### 5.1.3. Valenciennes (trafic)

Les deux campagnes de mesures à Valenciennes ont été réalisées en mois de mai et en mois de novembre.

La différence entre deux saisons est moins importante à Valenciennes qu'à Calais. La concentration totale des PUF varie entre 8300-10 000 particules/cm<sup>3</sup> ; elle est plus élevée en automne. La distribution en tailles de particules pour ces deux saisons est aussi très similaire.

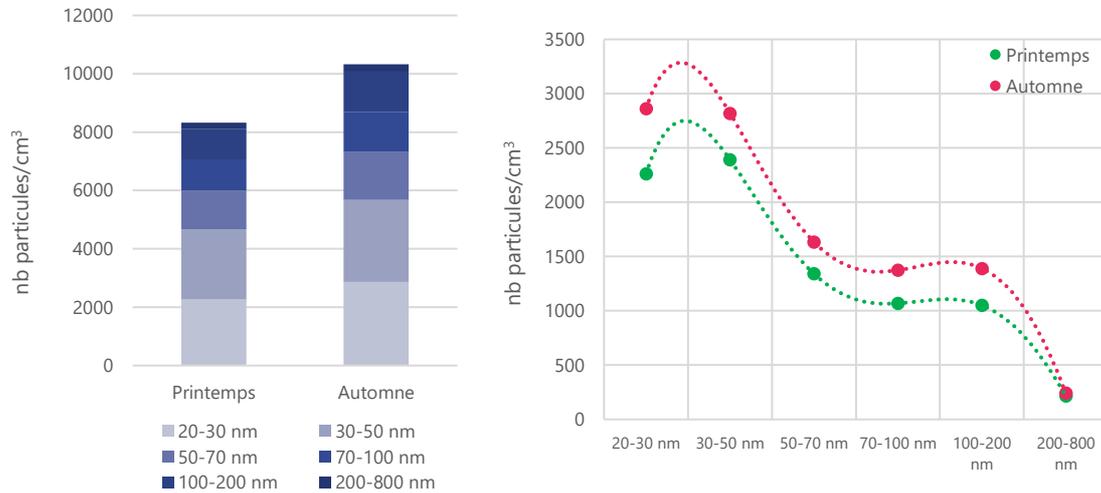


Figure 12 Concentration en nombre des PUF et distribution en tailles des particules à Valenciennes en 2019

### 5.1.4. Dunkerque Port (port/indus)

La concentration totale mesurée en hiver (~9500 particules/cm<sup>3</sup>) est plus importante qu'en été (~6600 particules/cm<sup>3</sup>) à Dunkerque Port. La distribution en tailles de particules montre un niveau similaire pour les PUF entre 50- 800 nm. Les particules entre 20-50 nm font la différence entre les deux saisons ; elles sont beaucoup plus importantes en hiver.

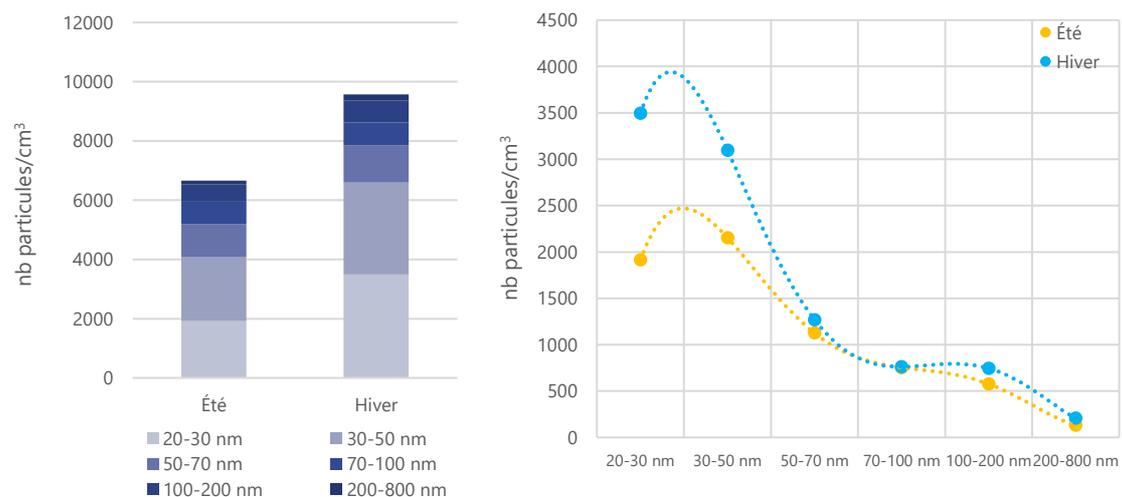


Figure 13 Concentration en nombre des PUF et distribution en tailles des particules à Dunkerque Port en 2019

## 5.2. Corrélation avec les autres polluants

Le coefficient de détermination ( $R^2$ ) entre les PUF totales et les autres polluants mesurés en parallèle pour chaque site est présenté dans les Tableaux 6 à 9. Les valeurs  $R^2$  plus importantes ( $>0.7$ ) sont mises en gras. Pour Lille, les corrélations pour l'année 2019 et les quatre saisons sont présentées séparément. Pour les 3 observations de courte durée, les corrélations pour les données totales et par phase de mesure sont présentées. La température et les conditions du vent (direction et vitesse) correspondant à chaque période de mesure sont déjà discutées dans la section 4.2.

### 5.2.1. Lille Leeds (trafic)

En hiver et automne, les PUF totales montrent une bonne corrélation avec le black carbon (BC), BC lié à la combustion de fioul fossile ( $BC_{ff}$ ), et les oxydes d'azote ( $NO_x$ ) à Lille. On suppose que les émissions liées au trafic sont une source importante des PUF mesurées à Lille Leeds, notamment pour la période froide. En automne, le  $BC_{wb}$  montre une corrélation plus forte ( $R^2=0.58$ ) avec les PUF que les autres saisons, indiquant ainsi que le chauffage au bois peut aussi contribuer aux PUF hivernales.

En période printanière/estivale, la corrélation entre  $BC_{ff}$  et PUF est beaucoup plus faible. On suppose qu'il y a d'autres sources qui contribuent aux concentrations de PUF mesurées hors trafic.

Tableau 6 Coefficient de détermination ( $R^2$ ) entre les PUF totales et les autres polluants à Lille Leeds

	$R^2$							
Lille Leeds	BC	$BC_{wb}$	$BC_{ff}$	NO	$NO_2$	$NO_x$	PM2.5	PM10
PUF (2019)	0.60	0.34	0.61	0.53	0.62	0.64	0.24	/
Hiver	<b>0.75</b>	0.41	<b>0.76</b>	<b>0.72</b>	<b>0.73</b>	<b>0.80</b>	0.36	/
Printemps	0.56	0.35	0.55	0.43	0.62	0.58	0.15	/
Été	0.30	0.24	0.30	0.24	0.43	0.38	0.14	/
Automne	<b>0.74</b>	0.58	<b>0.72</b>	0.65	0.69	<b>0.75</b>	0.40	/

### 5.2.1. Calais (port)

A Calais, les PUF sont bien corrélées avec le black carbon (BC) et sa source liée au trafic ( $BC_{ff}$ ) en automne. Ces résultats indiquent le trafic routier est une source importante des PUF mesurées à Calais pendant cette période. Au printemps, les corrélations entre les PUF et autres polluants sont plus faibles. Une recherche plus approfondie est nécessaire pour bien identifier les sources des PUF au printemps, et sera présentée dans les sections suivantes.

Tableau 7 Le coefficient de détermination ( $R^2$ ) entre PUF totales et les autres polluants à Calais

	$R^2$							
Calais	BC	$BC_{wb}$	$BC_{ff}$	NO	$NO_2$	$NO_x$	PM2.5	PM10
PUF (totales)	0.46	0.36	0.45	/	/	/	0.24	0.29
Printemps	0.33	0.26	0.30	/	/	/	0.13	0.21
Automne	<b>0.70</b>	0.57	<b>0.70</b>	/	/	/	0.39	0.27

### 5.2.1. Valenciennes (trafic)

A Valenciennes, les PUF montrent une forte corrélation avec les traceurs trafic (BC, BC<sub>ff</sub>, NO, NO<sub>2</sub> et NO<sub>x</sub>), notamment pour la campagne en automne. Les PUF montrent également une bonne corrélation avec le BC<sub>wb</sub> (BC lié au chauffage au bois) en automne.

Au printemps, les corrélations entre les PUF et autres polluants sont plus faibles, et pourraient être expliquées par la présence des autres sources PUF hors trafic en cette période.

Tableau 8 Le coefficient de détermination (R<sup>2</sup>) entre PUF totales et les autres polluants à Valenciennes

R <sup>2</sup>								
Valenciennes	BC	BC <sub>wb</sub>	BC <sub>ff</sub>	NO	NO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	PM2.5	PM10
PUF (totales)	<b>0.74</b>	0.58	<b>0.70</b>	0.64	0.62	0.68	0.15	0.28
Printemps	0.45	0.25	0.42	0.19	0.44	0.29	0.004	0.08
Automne	<b>0.81</b>	0.68	<b>0.78</b>	<b>0.77</b>	<b>0.70</b>	<b>0.80</b>	0.33	0.55

### 5.2.1. Dunkerque Port (port/Indus)

La station à Dunkerque Port est une station sous multi-influences, impactée par les activités portuaires, industrielles et résidentielles. Les PUF montrent une faible corrélation avec tous les polluants co-mesurés, indiquant la complexité des sources PUF sur ce site. Une analyse plus approfondie sera effectuée dans les sections suivantes.

Tableau 9 Le coefficient de détermination (R<sup>2</sup>) entre PUF totales et les autres polluants à Dunkerque Port

R <sup>2</sup>								
Dunkerque Port	BC	BC <sub>wb</sub>	BC <sub>ff</sub>	NO	NO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	PM2.5	PM10
PUF (totales)	0.06	0.10	0.04	/	/	/	0.10	/
Été	0.08	0.28	0.06	/	/	/	0.10	/
Hiver	0.03	0.07	0.03	/	/	/	0.08	0.23

## 5.3. Influence du trafic routier

Selon la littérature, le trafic routier est une source majeure de PUF dans le milieu urbain<sup>19</sup>. Dans cette partie, l'influence du trafic sur les particules ultrafines est étudiée pour les 2 sites proximité automobile (Lille et Valenciennes) et aussi sur un site urbain sous influence portuaire (Calais). A Lille, les mesures pendant 2018 et 2019 sont comparés.

Les polluants liés aux émissions du trafic seront étudiés en parallèle : il s'agit du Black Carbone lié au trafic ( $BC_{ff}$ ), du NO et du  $NO_2$ .

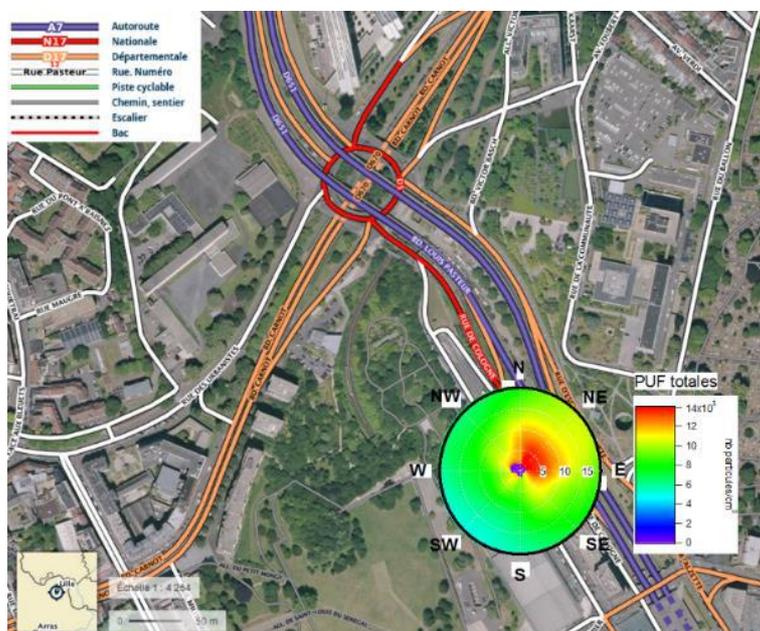
### 5.3.1. Lille Leeds

Les roses de pollution à Lille Leeds sont présentées dans la Figure 14. Les PUF montrent une concentration plus élevée dans les directions N-NE-E ( $> 14\ 000$  particules/cm<sup>3</sup>), correspondant bien à la direction du boulevard périphérique de Lille (D651 et D670). La concentration moyenne ( $\sim 8\ 000$  particules/cm<sup>3</sup>) se retrouve quant à elle dans toutes les directions et pour toutes les vitesses du vent. Cette concentration correspond au niveau de fond à Lille en zone urbaine. La plus faible concentration ( $\sim 4\ 000$  particules/cm<sup>3</sup>) se trouve dans les directions W-SW, où se trouve le parc Matisse.

Les 3 polluants liés aux émissions trafic ( $BC_{ff}$ , NO et  $NO_2$ ) montrent une direction similaire aux PUF.

Le  $BC_{ff}$  et le NO présentent toutefois une influence plus locale du trafic. Leurs concentrations réduisent largement dans les quadrants gauches, à l'opposé du boulevard périphérique.

Le  $NO_2$  montre une distribution similaire aux PUF : une concentration élevée ( $> 50\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) correspondant au trafic local et un niveau de fond ( $\sim 30\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) dans toute la zone urbaine.



<sup>19</sup> Ji Ping Shi, A.A. Khan, and Roy M. Harrison, "Measurements of Ultrafine Particle Concentration and Size Distribution in the Urban Atmosphere," *Science of The Total Environment* 235, no. 1 (September 1, 1999): 51–64, [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(99\)00189-8](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00189-8).

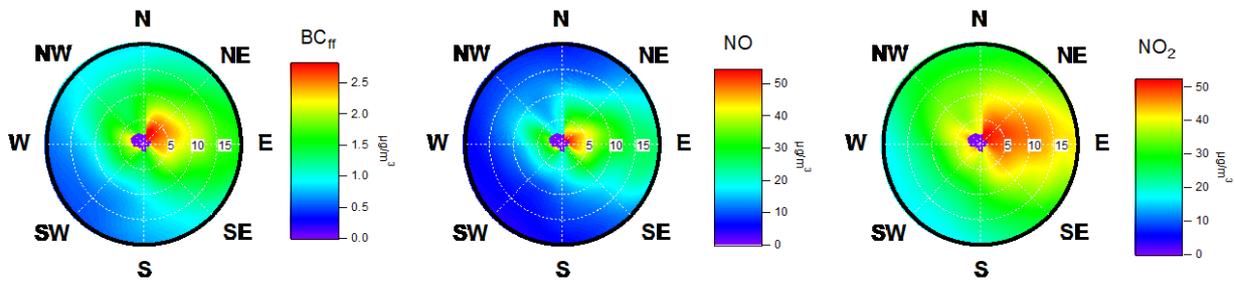


Figure 14 Rose de pollution pour les PUF, le BC<sub>ff</sub>, le NO et le NO<sub>2</sub> à Lille en 2019

Dans la Figure 15, les cycles journaliers des PUF et du BC<sub>ff</sub> montrent une variation très similaire : les deux pics liés à l'heure de pointe du trafic du matin et du soir. Cependant les PUF en fin de soirée sont un peu plus importantes que le BC<sub>ff</sub>. Ce phénomène pourrait être expliqué par des PUF provenant d'autres sources que le trafic (e.g. chauffage résidentiel).

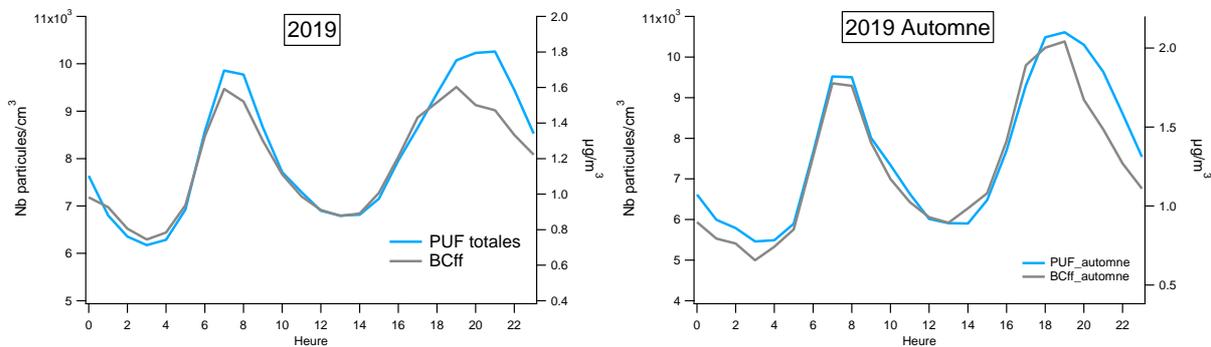


Figure 15 Variation journalière des PUF totales et BC<sub>ff</sub> à Lille (l'année 2019 et automne 2019)

## Comparaison 2018 et 2019 à Lille

Les roses de pollution des PUF totales à Lille en 2018 et 2019 sont très similaires aux niveaux de concentration et de directions principales. La distribution en tailles des particules montre aussi une distribution semblable pour toutes les tailles de particules. Ces résultats confirment que le trafic routier est la source majeure des PUF mesurées à Lille et son niveau reste stable pendant ces deux dernières années.

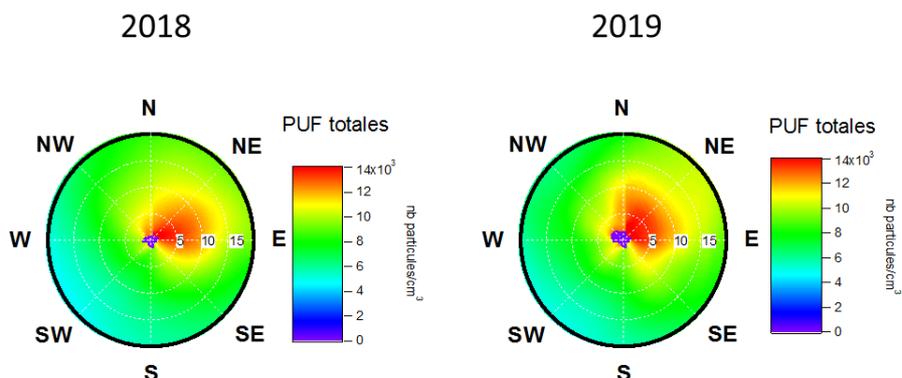


Figure 16 Rose de pollution des PUF à Lille en 2018 et 2019

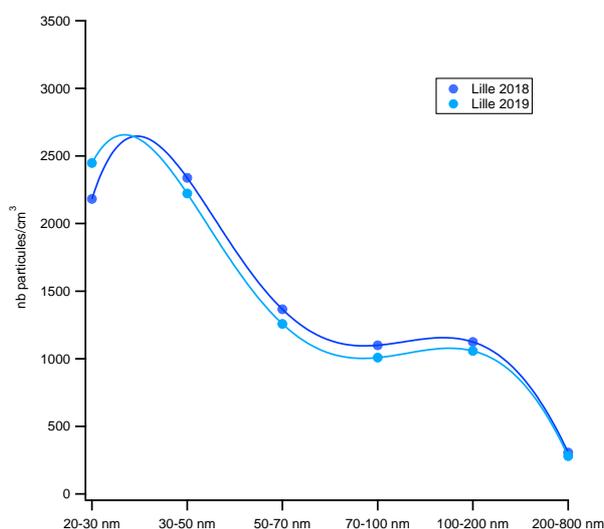


Figure 17 Distribution en taille des PUF à Lille (2018 et 2019)

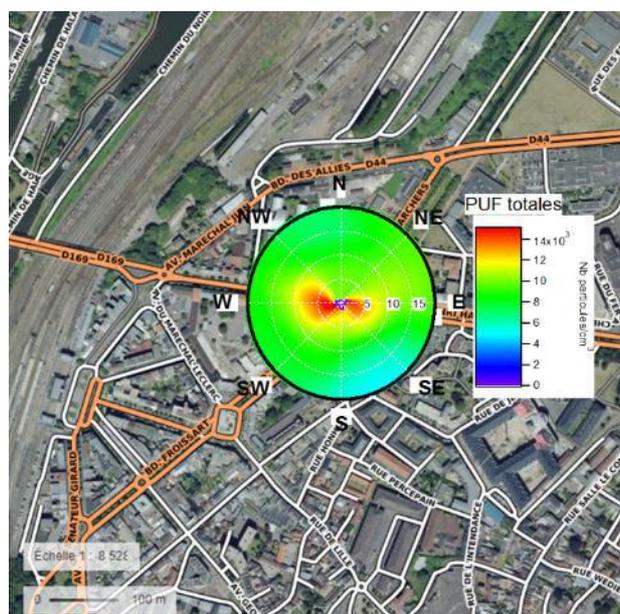
### 5.3.2. Valenciennes

Les roses de pollution (PUF,  $BC_{ff}$ ,  $NO$  et  $NO_2$ ) à Valenciennes sont présentées dans la Figure 18. La concentration des PUF plus élevée se trouve dans l'axe Est-Ouest ( $> 14\ 000$  particules/cm<sup>3</sup>), correspondant bien à la route départementale (D169). La concentration moyenne ( $\sim 8\ 000$  particules/cm<sup>3</sup>) se retrouve quant à elle dans toutes les directions et pour toutes les vitesses du vent. Cette concentration correspond au niveau de fond à Valenciennes.

La rose du  $BC_{ff}$  est très semblable celle des PUF, une forte concentration ( $> 4\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) dans l'axe Est-Ouest et une concentration de fond qui représente le niveau dans la zone urbaine ( $\sim 2\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Le  $NO$  présente une direction similaire que les PUF, mais avec une distribution plus locale.

Le  $NO_2$  montre une concentration élevée ( $> 60\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) correspondant au trafic local dans la direction ouest et un niveau de fond ( $30\text{-}40\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) dans toute la zone urbaine.



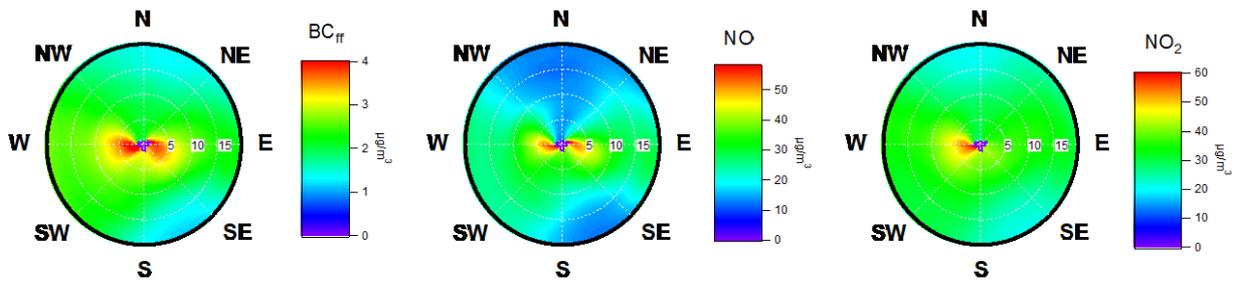


Figure 18 Rose de pollution pour les PUF, le BC<sub>ff</sub>, le NO et le NO<sub>2</sub> à Valenciennes

Dans la Figure 19, le cycle journalier des PUF et du BC<sub>ff</sub> montre une variation très similaire : les deux pics liés à l'heure de pointe du trafic du matin et du soir. Cependant les PUF du matin sont un peu plus importantes que le BC<sub>ff</sub>. Ce phénomène pourrait être expliqué par les émissions des PUF primaires par d'autres sources que le trafic (e.g. chauffage résidentiel) ou la formation des PUF secondaires.

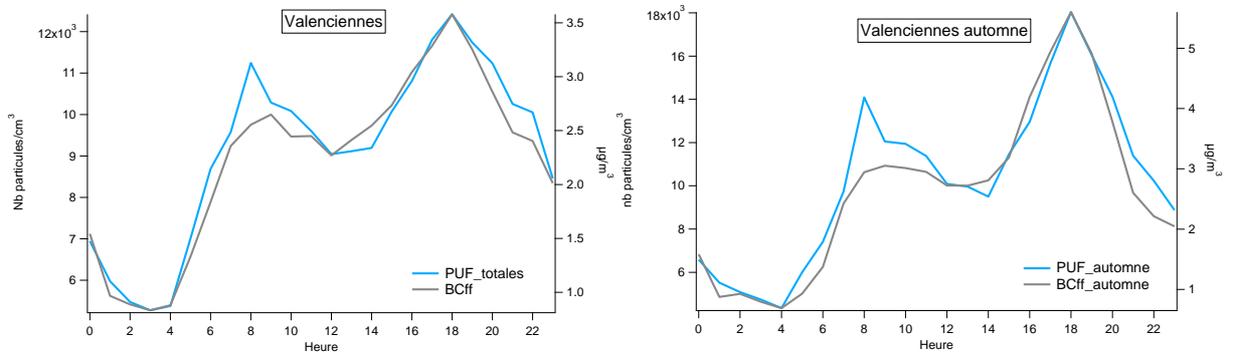


Figure 19 Variation journalière des PUF totales et BC<sub>ff</sub> à Valenciennes (2 phases de mesures et automne 2019)

### 5.3.3. Calais (automne 2019)

En automne 2019, le vent provient principalement de la direction sud-ouest avec une vitesse très élevée (>8m/s). Néanmoins, les PUF observées à Calais en automne 2019 montrent une concentration très importante (> 12 000 p/cm<sup>3</sup>) dans la direction sud-est, où se situe la Boulevard Gambetta. Le Black carbon lié au trafic (BC<sub>ff</sub>) montre également une rose très similaire aux PUF totales. Les PM2.5 sont associées non seulement avec les sources très locales (vent < 5 km/h), mais aussi avec les sources plus lointaines (5-15 km/h) dans les directions est/sud-est.

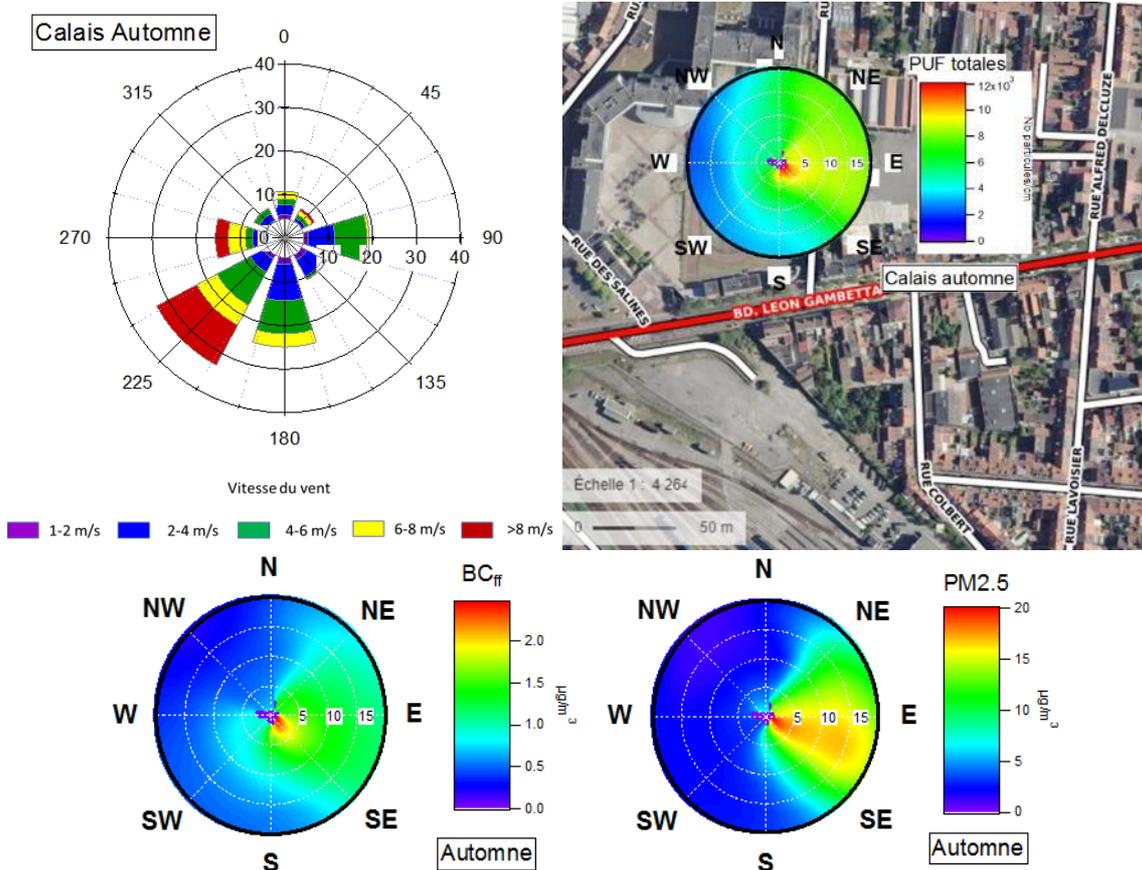


Figure 20 Rose des vents et rose de pollution pour les PUF, le BC<sub>ff</sub> et PM2.5 à Calais (automne 2019)

Le profil journalier des PUF et du BC<sub>ff</sub> confirme que le trafic routier est la source majeure des PUF mesurées à Calais en automne 2019.

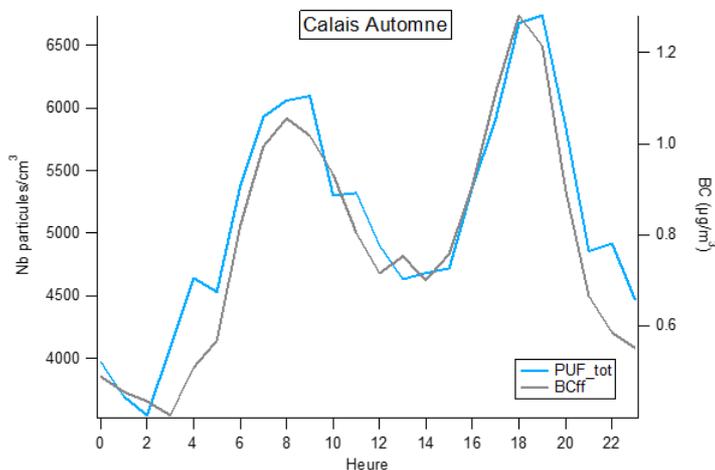


Figure 21 Variation journalière des PUF totales et BC<sub>ff</sub> à Calais (automne 2019)

## 5.4. Source portuaire

### 5.4.1. Calais (printemps)

Au printemps 2019, le vent provient principalement de la direction nord-est avec une vitesse assez élevée (> 6 m/s). Les PUF totales mesurées pendant cette campagne proviennent majoritairement de la zone portuaire et sont associées avec toutes les vitesses du vent. Ce constat est donc très différent de la période d'automne étudiée juste précédemment et qui montrait une influence trafic. Les  $BC_{ff}$ ,  $PM_{2.5}$  et  $PM_{10}$  présentent 2 directions distincts : une concentration plus élevée dans les direction ouest et nord-ouest ; et une concentration moins importante dans la direction nord-est.

On suppose que les transports maritimes contribuent à la majorité des PUF mesurées sur cette période, et à une partie des  $BC_{ff}$ ,  $PM_{2.5}$  et  $PM_{10}$  mesurées.

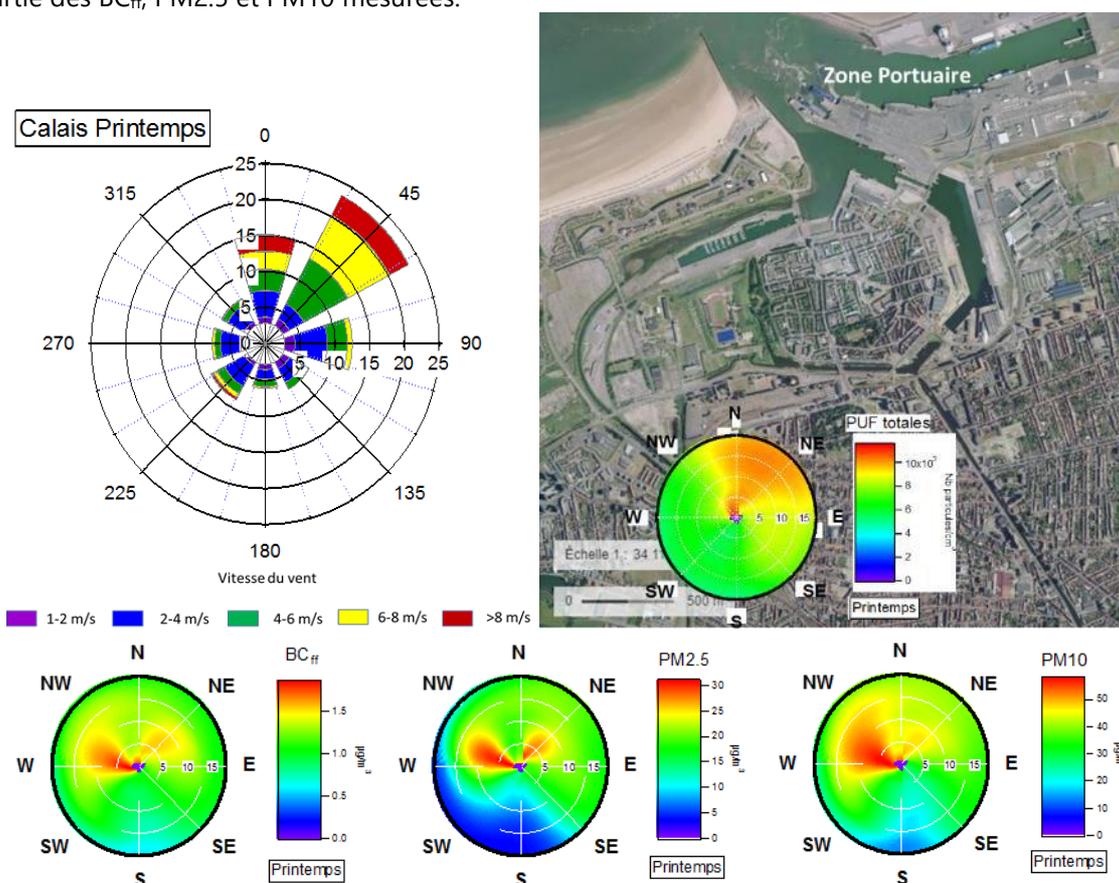
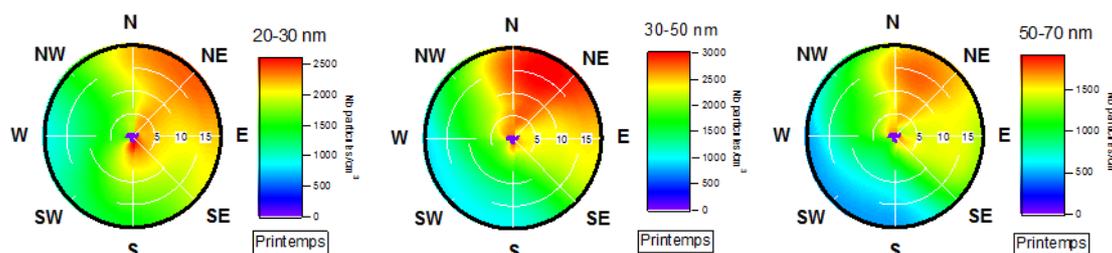


Figure 22 Rose des vents et rose de pollution pour les PUF, le  $BC_{ff}$ ,  $PM_{2.5}$  et  $PM_{10}$  à Calais (printemps 2019)

Les roses de pollution pour 6 classes de tailles montrent que les PUF provenant de la zone portuaire se trouvent majoritairement dans les tailles 20-70 nm, notamment dans la classe 30-50 nm. En revanche, la rose de pollution de la classe 200-800 nm ressemble à celle de  $PM_{2.5}$ , dont les particules plus grosses.



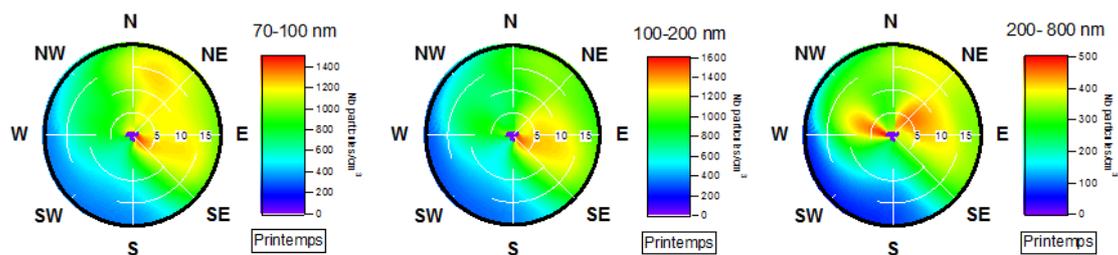


Figure 23 Rose de pollution pour les particules entre 20-800 nm

Une étude de cas est donnée dans la Figure 24. Le vent du 10/04/2019 à Calais provient principalement de la direction nord-est avec une vitesse supérieure à 6 m/s. Les PUF entre 20 et 70 nm montrent plusieurs pics élevés ( $> 7000$  particules/cm<sup>3</sup>) pendant cette jour journée. On suppose que les PUF observées sont principalement émises par la zone portuaire à Calais. Le vent fort favorise la dispersion des PUF en hauteur (e.g. cheminée du bateau) jusqu'à la station de mesure. Les concentrations des PUF sont plus faibles en milieu de la journée ; ceci est probablement lié à la hauteur de la couche limite et la vitesse du vent plus importantes, qui favorisent la dispersion des PUF.

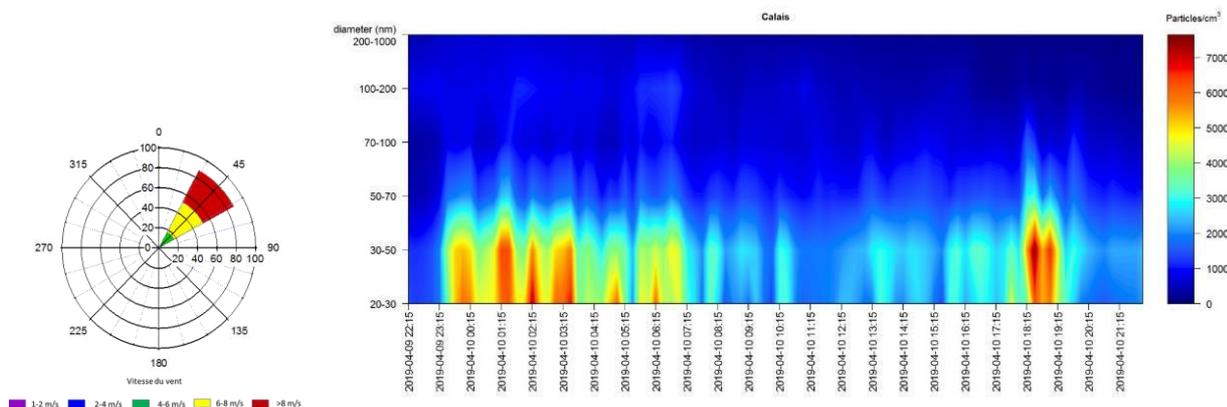


Figure 24 Rose des vents et PUF mesurées du 10/04/2019 à Calais

### 5.4.2. Dunkerque Port (été)

Le vent pendant la campagne estivale à Dunkerque Port provient principalement de la direction nord (25%). Les vents d'ouest, du sud et du sud-ouest représentent environ 15-20% chacun. Les vents provenant des autres directions sont beaucoup moins fréquents.

La concentration la plus élevée des PUF ( $> 16\ 000$  particules/cm<sup>3</sup>) se trouve dans la direction est et est associée avec un vent entre 5-15 km/h. L'écluse pour le passage des bateaux se situe au sud-est de la station avec une distance de 50 m. Les PUF totales montrent une concentration de fond ( $\sim 8000$  particules/cm<sup>3</sup>) dans l'axe est-ouest, où se situe la zone industrielle (ouest) et le passage des bateaux (est). Les PUF dans les directions NW/N/S sont beaucoup plus faibles en concentration ( $< 4000$  particules/cm<sup>3</sup>).

Le BC<sub>ff</sub> présente une source locale associée avec le vent faible ( $> 5$  km/h) dans les directions SE/E qui correspond à la Route de l'Ecluse Watier.

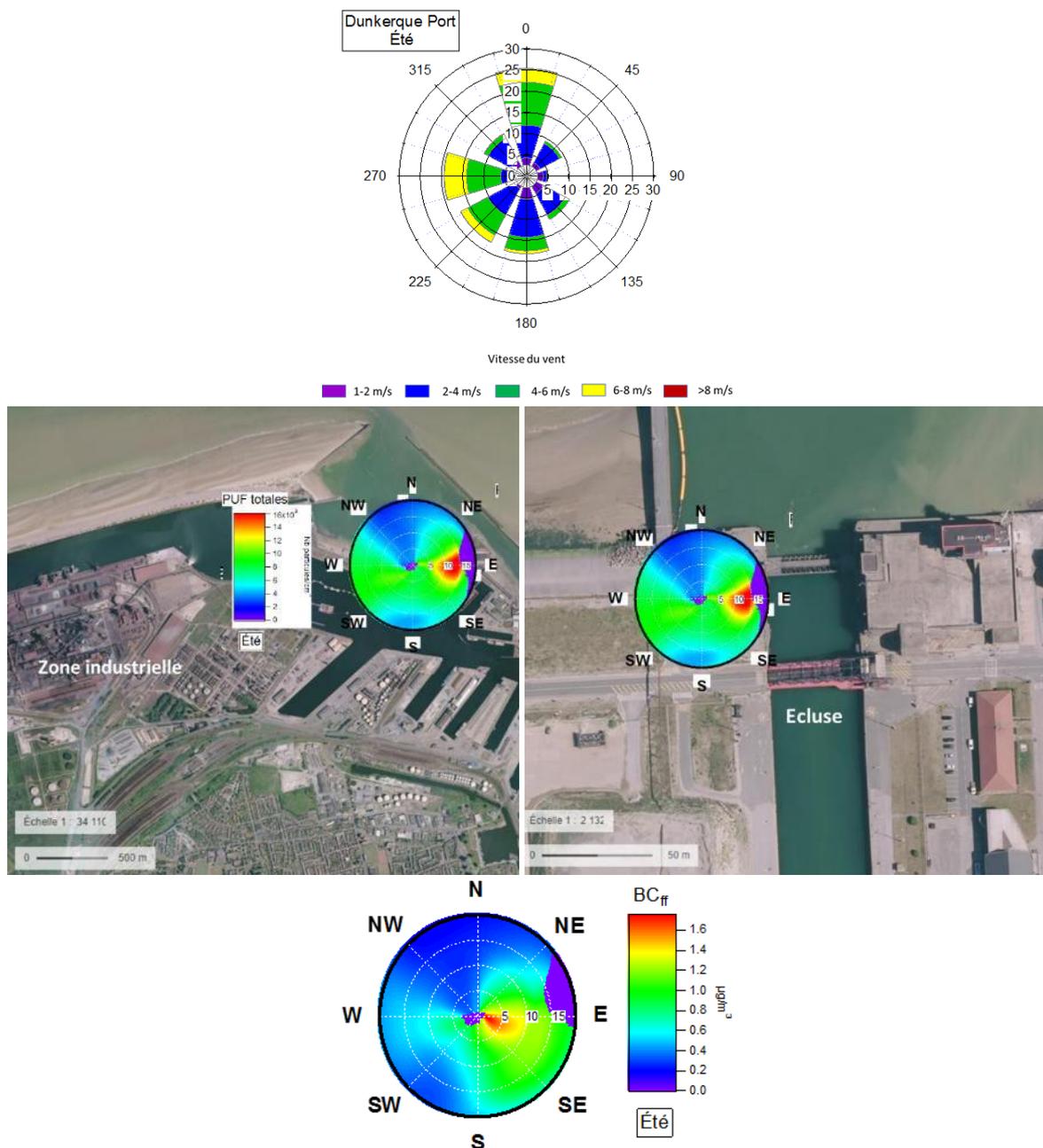
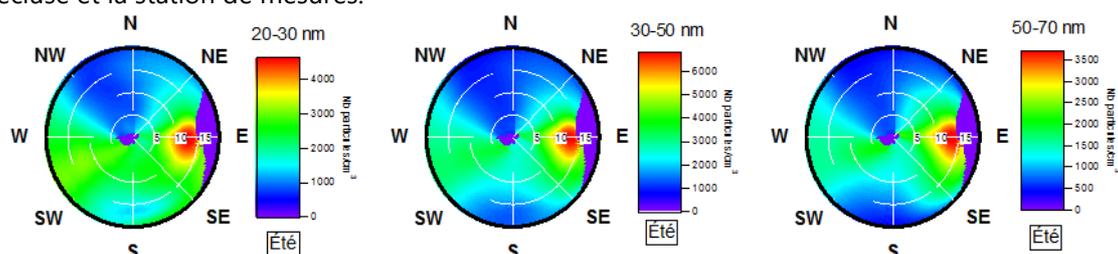


Figure 25 Rose des vents et roses de pollution pour les PUF totales (carte à différente échelle : 500 m et 50 m) et le  $BC_{ff}$  à Dunkerque Port en été 2019

Les roses de pollution pour les PUF entre 20-800 nm indiquent toutes les 2 des sources distinctes : une concentration plus élevée dans la direction d'écluse (Est) et une concentration moins importante dans la direction de la zone industrielle (NW/W/SW). Contrairement à Calais, les PUF liées aux passages des bateaux se trouvent dans toutes les tailles de particules, ce qui pourrait être expliqué par la distance plus courte (~50 m) entre l'écluse et la station de mesures.



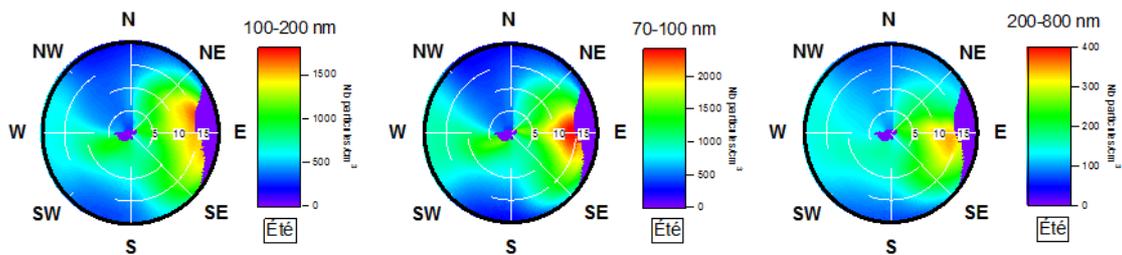


Figure 26 Rose de pollution pour les particules entre 20-800 nm

Une étude de cas le 23/07/2019 montre qu'un passage du bateau a généré des PUF en forte concentration (> 15 000 particules/cm<sup>3</sup>) entre 6h et 7h du matin. Un deuxième pic a été observé fin de la nuit (23h-24h). Ces pics des PUF liés aux bateaux sont observés quand le vent vient de la direction d'écluse (90°-135°).

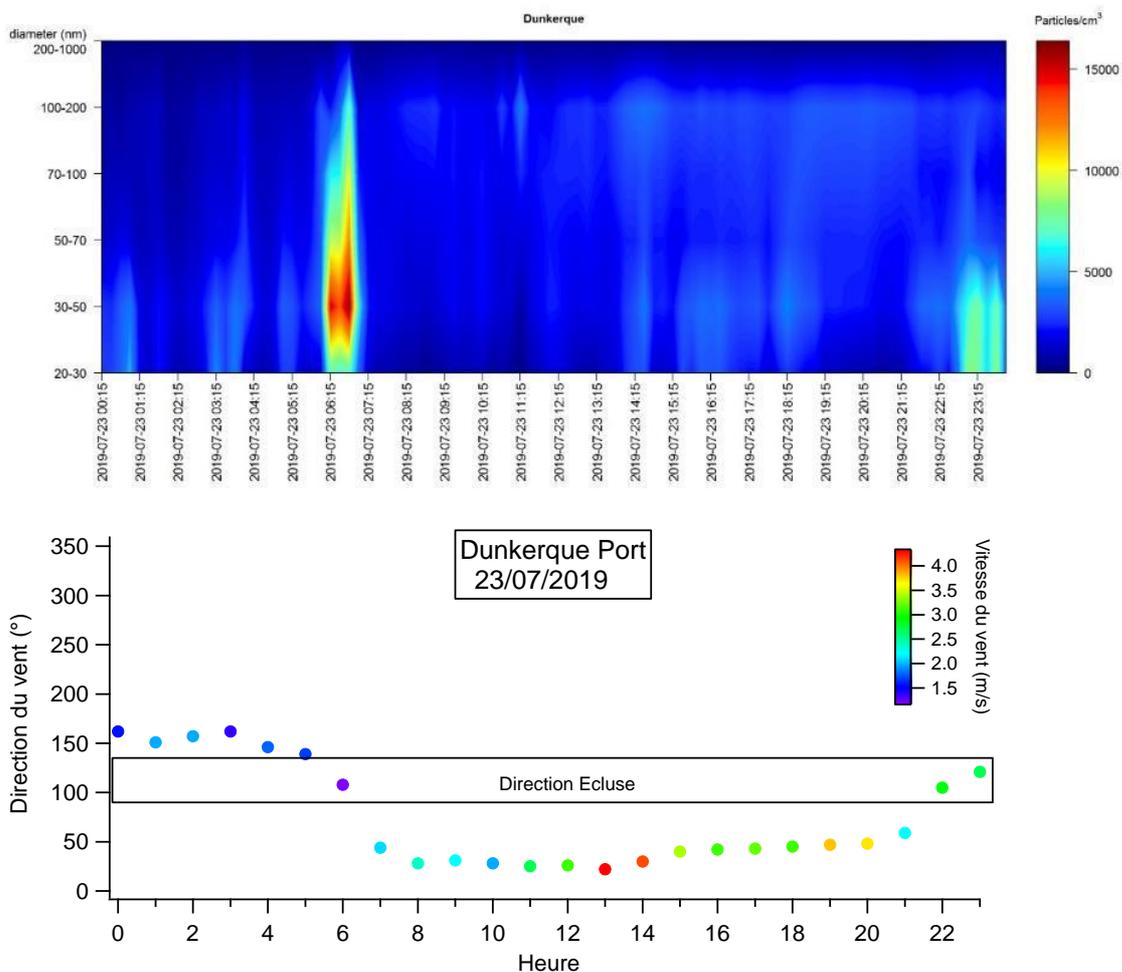


Figure 27 PUF, direction et vitesse du vent le 23/07/2019 à Dunkerque Port

## 5.5. Source industrielle

### 5.5.1. Dunkerque Port (hiver)

En hiver, le vent est dominé par le vent du sud (35%) et du sud-est (30%) avec une vitesse entre 2-8 m/s. Le vent provient de la direction ouest et sud-ouest et est beaucoup moins fréquent (15% et 12%), mais avec une vitesse plus élevée ( $> 6$  m/s). La rose des PUF totales montre une concentration très élevée ( $> 16\ 000$  particules/cm<sup>3</sup>) dans les directions W/SW associée avec les vents 15-20 km/h. Elles sont probablement émises par les activités industrielles dans ces directions. Par contre, le BC<sub>ff</sub> montre une source trafic provenant de la Route de l'Écluse Watier.

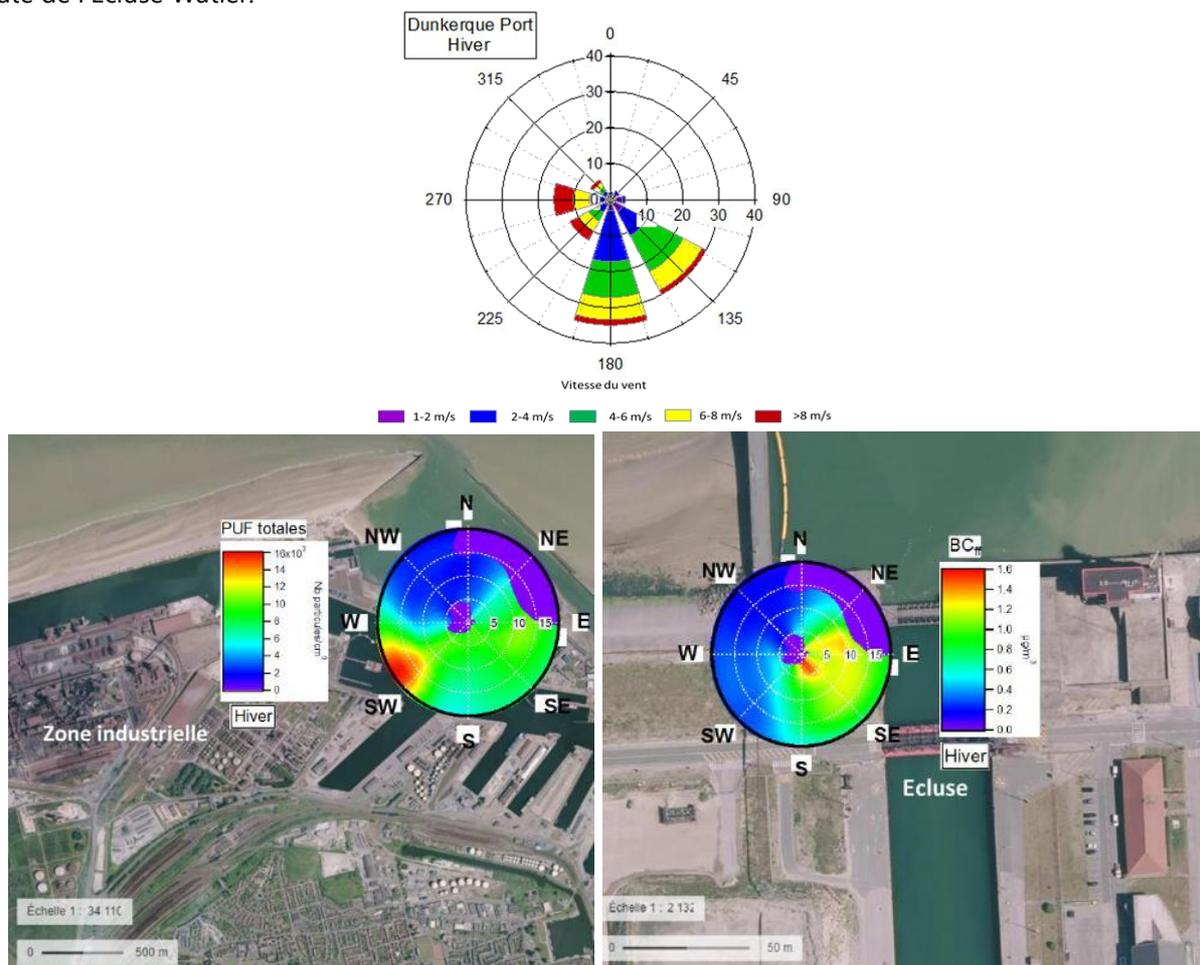


Figure 28 Rose des vents et rose de pollution pour les PUF et le BC<sub>ff</sub> à Dunkerque Port en hiver 2019

Les roses de pollution pour différentes tailles de particules indiquent que les sources industrielles contribuent principalement dans les fractions les plus fines des PUF (20-70nm). Les PUF entre 50-100 nm montrent aussi une influence d'écluse dans la direction Est. A partir de 100 nm, les roses des PUF ressemblent à celle du BC<sub>ff</sub>, indiquant une contribution importante par le trafic routier.

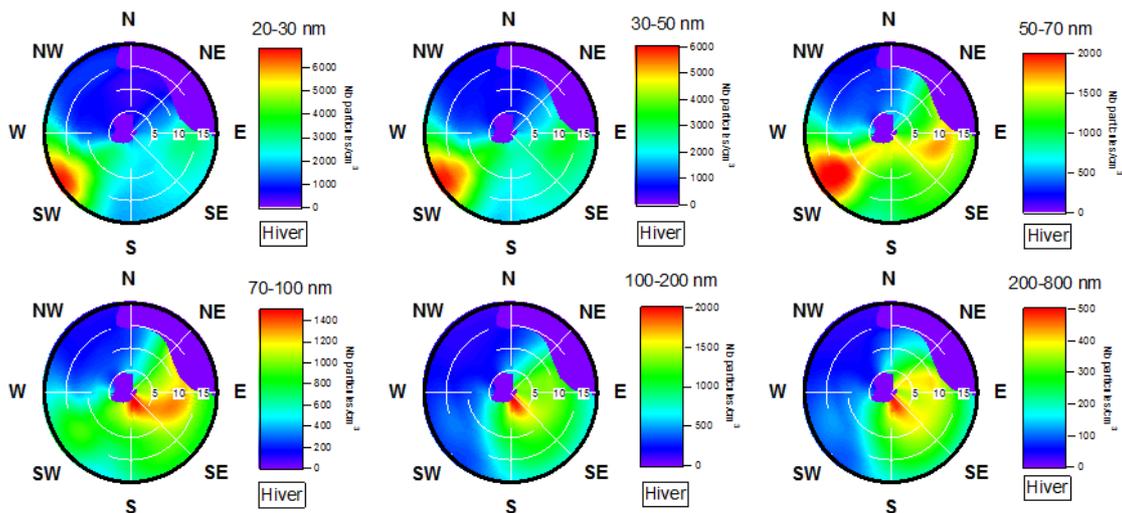


Figure 29 Rose de pollution pour les PUF entre 20-800 nm

Le 23/12/2019, le vent provient principalement de la zone industrielle (225°- 275°) et plusieurs pics de PUF sont observés durant cette journée. Les concentrations importantes (> 50 000 particules/cm<sup>3</sup>) se trouvent dans les PUF tailles plus petites (20-50 nm).

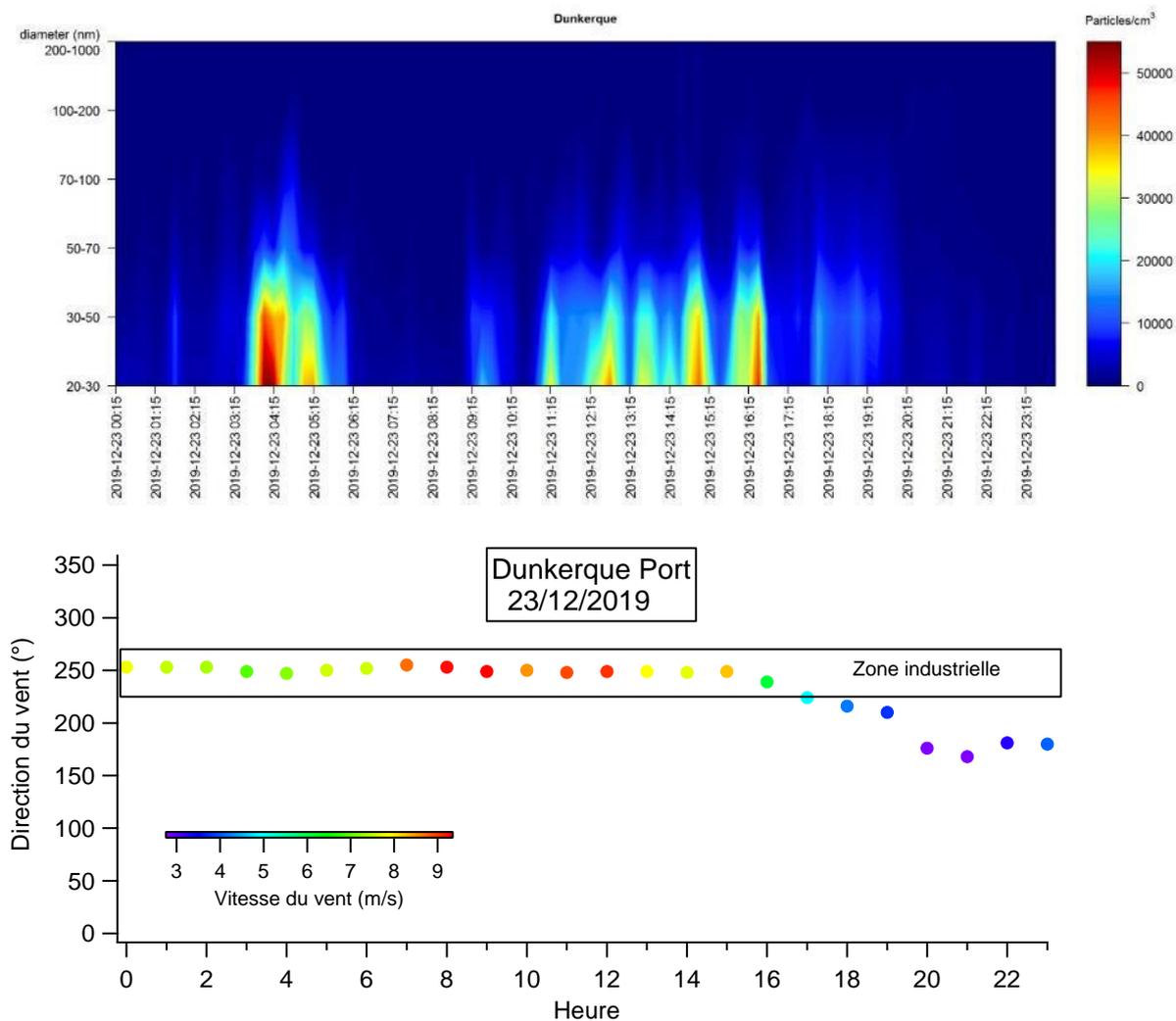


Figure 30 PUF, direction et vitesse du vent du 23/12/2019 à Dunkerque Port

## 5.6. Formation de nouvelles particules

La formation de nouvelles particules est également considérée comme une source importante de PUF<sup>20</sup> en air ambiant. Les études sur la formation et la croissance de particules atmosphériques nécessitent des mesures de particules en mode de nucléation (3-25 nm)<sup>21</sup>. Notre appareil UFP 3031 ne peut mesurer les PUF qu'à partir de 20 nm. Aussi, dans cette étude, le canal 20-30 nm est utilisé pour estimer la formation de nouvelles particules avec quelques limites : i) pas d'observation pour la nucléation sous 20 nm ; ii) une large sous-estimation en concentration des PUF par ce type de source car les PUF inférieures à 20 nm sont beaucoup plus importantes en nombre.

A Lille, la variation journalière des PUF 20-30 nm pour 4 saisons en 2019 est présentée sur la Figure 31. Pour les saisons froides (hiver, automne et printemps), 2 pics significatifs liés au trafic matin et soir sont observés. En été, un pic entre 12h et 16h apparaît ; il est très probablement dû à la formation de nouvelles particules avec des forts ensoleillements et des températures élevées.

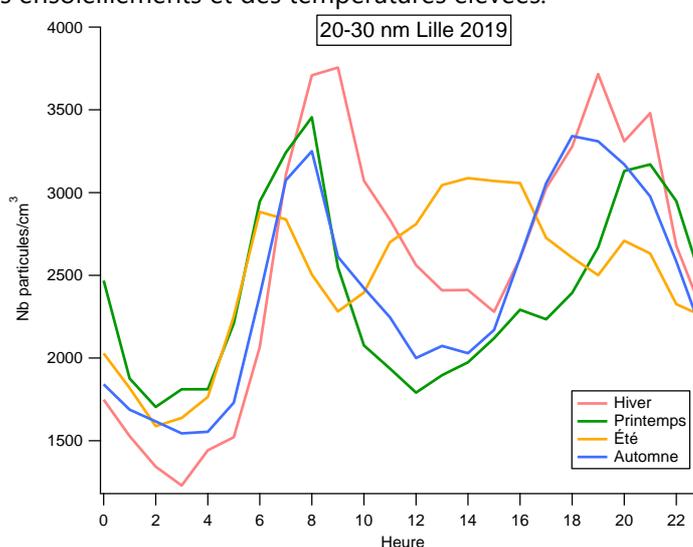


Figure 31 Variation journalière des PUF 20-30 nm pour 4 saisons en 2019

Le 04/07/2019, on observe un événement de la formation de nouvelles particules à partir de midi : une forte concentration ( $> 12\,000$  particules/cm<sup>3</sup>) est observée pour les plus petites tailles (20-30 nm), et ensuite une croissance de tailles de particules dans l'après-midi. Cet événement montre une croissance de particules sous la forme « banane », qui est typique et déjà observée dans la littérature<sup>22</sup>.

La formation de nouvelles particules sur les autres sites sont moins remarquables qu'à Lille ; ceci est probablement dû : i) aux périodes de mesures sont relativement courtes (4 semaines par phase, 2 phases au total) ; ii) aux conditions météorologiques qui ne favorisent pas le processus de nucléation (par exemple, faible ensoleillement pendant la campagne) ; iii) au fait qu'il est difficile à distinguer ces événements et d'autres sources sur les sites sous multi-influents (e.g. émissions industrielles).

<sup>20</sup> M. Brines et al., "Traffic and Nucleation Events as Main Sources of Ultrafine Particles in High-Insolation Developed World Cities," *Atmos. Chem. Phys.* 15, no. 10 (May 28, 2015): 5929–45, <https://doi.org/10.5194/acp-15-5929-2015>.

<sup>21</sup> Miikka Dal Maso et al., "Formation and Growth of Fresh Atmospheric Aerosols: Eight Years of Aerosol Size Distribution Data from SMEAR II, Hyytiälä, Finland," *Boreal Environment Research* 10 (October 24, 2005): 323–36.

<sup>22</sup> Manninen, H.E. et al., "EUCAARI Ion Spectrometer Measurements at 12 European Sites - Analysis of New Particle Formation Events," *Atmospheric Chemistry and Physics* 10 (2010): 7907–27, <https://doi.org/10.5194/acp-10-7907-2010>.

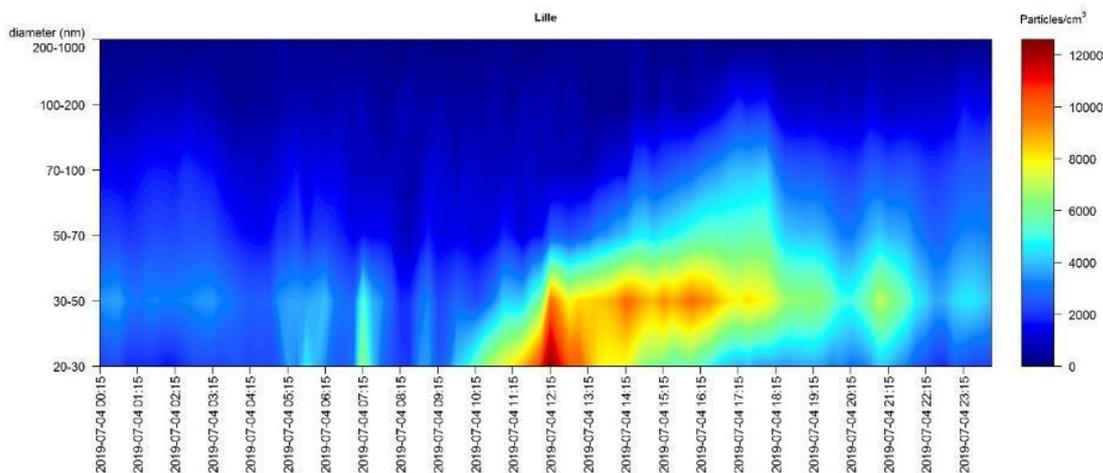


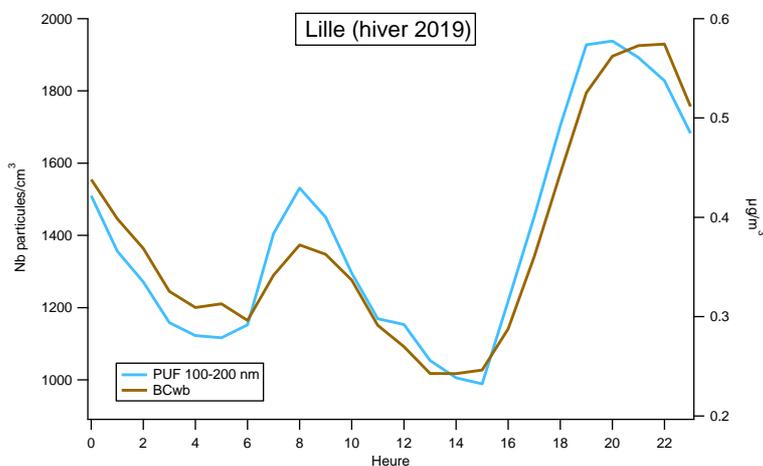
Figure 32 Événement de la formation de nouvelles particules à Lille (04/07/2019)

## 5.7. Influence du chauffage au bois

Les PUF entre 100-200 nm sont considérées comme des traceurs de la combustion de biomasse dans notre rapport étude précédent<sup>23</sup>. Néanmoins, certaines études montrent que la combustion de la biomasse peut émettre des PUF plus petites (20-50 nm). Dans cette section, les PUF sont étudiées au regard de la fraction du black carbon lié à la combustion de biomasse ( $BC_{wb}$ ).

La variation journalière des PUF 100-200 nm est comparée avec celle du  $BC_{wb}$  en automne/hiver pour les 4 sites d'étude (Figure 33 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Les deux paramètres montrent une variation très similaire : augmentation de la concentration importante dans la soirée et un pic du matin moins important, qui correspondent bien aux heures de l'utilisation du chauffage. Les niveaux des PUF 100-200 nm et du  $BC_{wb}$  à Lille et à Valenciennes sont plus importants que les autres 2 sites (Calais et Dunkerque).

Les différents niveaux entre les PUF et  $BC_{wb}$  pourraient être expliqués par : i) il existe d'autres sources que le chauffage au bois pour les PUF 100-200 nm (e.g. trafic routier) ; ii) la combustion de la biomasse peut émettre les PUF hors la gamme 100-200 nm ; iii) les incertitudes de mesures sur les faibles concentrations.



<sup>23</sup> Atmo HdF, "Surveillance Des Particules Ultrafines Dans La Région Hauts-de-France."

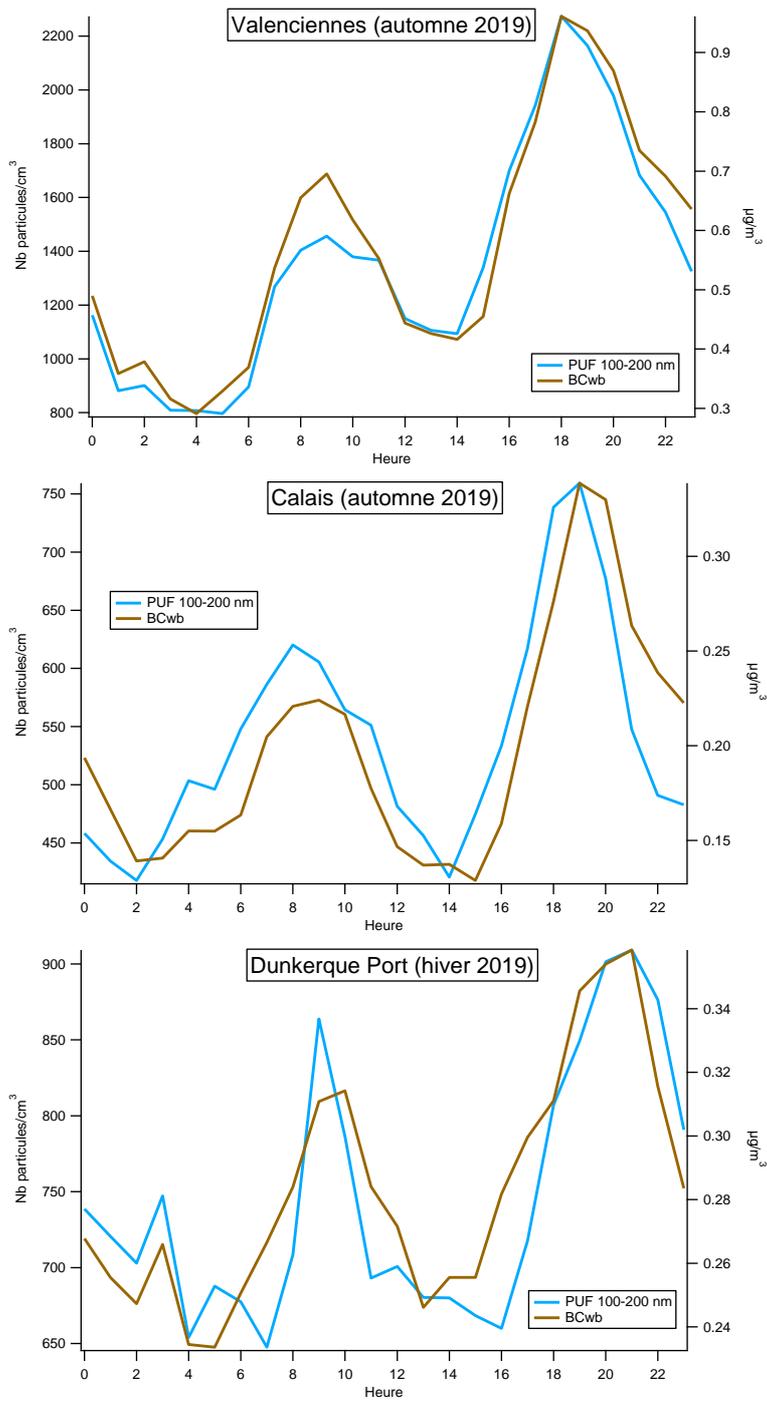


Figure 33 Variation journalière des PUF 100-200 nm et du BCwb pendant la période froide (automne ou hiver) 2019

## 6. Conclusion et perspectives

Cette étude présente la concentration totale des particules ultrafines et leur granulométrie dans la région Hauts-de-France en 2018-2019. Les mesures des PUF sont effectuées sur un site trafic à Lille en continu (depuis 2018) et 6 sites (Creil, Grande-Synthe, Campagne-lès-Bouloonnais, Calais, Valenciennes et Dunkerque Port) d'observation courte durée (2x4 semaines). Ce rapport compare les niveaux des PUF mesurées en 2018 et 2019 et focalise sur les résultats obtenus en 2019.

La concentration en nombre des PUF en moyenne varie entre 4000 et 10 000 particules/cm<sup>3</sup>. Elle est plus faible dans un environnement rural et plus élevée pour les sites à proximité des sources d'émission (trafic ou industrielle/portuaire).

Six classes de tailles de particules (20-30 nm, 30-50nm, 50-70 nm, 70-100 nm, 100-200 nm et 200-800 nm) sont étudiés pour comprendre les sources et les processus de formation de particules ultrafines. Les sources principales des PUF identifiées sont :

- Trafic routier : la source principale dans les sites urbains. Ce sont les PUF primaires.
- Formation de nouvelles particules : la formation de nouvelles particules se produit souvent en période estivale avec un fort ensoleillement qui favorise les réactions photochimiques. Les particules nouvellement formées se trouvent dans la classe 20-30 nm (limite de détection de l'instrument). Ce sont des particules secondaires qui se forment dans l'atmosphère à partir des précurseurs gazeux.
- Industrielle/portuaire : Ce sont les PUF primaires émises par les activités industrielles ou/et portuaires.
- Chauffage au bois : le chauffage au bois pourrait contribuer une quantité importante des particules entre 100-200 nm en période froide. Mais les autres sources (e.g. trafic routier) pourraient aussi contribuer à cette classe de PUF.

A Lille et Valenciennes, le trafic routier est la source principale des PUF. Le chauffage au bois peut aussi contribuer aux PUF 100-200 nm pendant la période froide. En été, la formation des nouvelles particules est une source importante en lien avec les réactions photochimiques dans l'atmosphère.

A Calais et à Dunkerque Port, les PUF mesurées présentent une saisonnalité en fonction de la direction et de la vitesse du vent. A Calais, les PUF sont émises par le trafic routier en automne et par des activités portuaires au printemps. A Dunkerque Port, les PUF sont principalement dues aux passages de bateaux en été et aux émissions industrielles en hiver. La formation des nouvelles particules et le chauffage au bois pourraient aussi contribuer aux PUF pour ces deux sites.

Tableau 10 Sources principales des PUF pour les sites étudiés (non quantitative)

Station	Source			
	PUF primaires			PUF secondaires
	Trafic	Chauffage au bois	Industrie/portuaire	Formation de nouvelles particules
Lille Leeds	***	**		*
Creil	**	**		*
Grande-Synthe	*	*	***	**
Campagne-lès-B		**		**
Calais	**	*	***	*
Dunkerque Port	*	*	***	*
Valenciennes trafic	***	**		*

En juin 2019, Atmo Hauts-de-France a organisé un exercice d'intercomparaison de différentes technologies mesurant les PUF en air ambiant. 8 organismes ont participé avec 9 instruments incluant 3 CPC (Condensation particle counter), 4 MPSS (Mobility particle size spectrometers) et 2 UFP 3031. L'ensemble des résultats obtenus pourrait aider au choix instrumental pour une surveillance nationale à long terme<sup>24</sup>.

En 2020, une collaboration dans le cadre du projet BePoPi avec les partenaires santé permettra de mieux comprendre les impacts sanitaires des PUF à Amiens (résultats prévus en 2021).

<sup>24</sup> Atmo HdF, "Intercomparaison de Dispositifs de Mesure En Continu Des Particules Ultrafines En Air Ambiant," September 2020, [https://www.atmo-hdf.fr/joomlatools-files/docman-files/Rapport\\_et\\_synthese\\_etudes/2020/Rapport\\_Intercomp\\_PUF\\_2019\\_VF.pdf](https://www.atmo-hdf.fr/joomlatools-files/docman-files/Rapport_et_synthese_etudes/2020/Rapport_Intercomp_PUF_2019_VF.pdf).

# Annexes

## Annexe 1 : Glossaire

**µg/m<sup>3</sup>** : 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.

**nm** : nanomètre.  $1 \text{ nm} = 0,001 \mu\text{m} = 10^{-9} \text{ m}$ .

**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.

**BC** : Black Carbon, ou carbone suie.

**BC<sub>ff</sub>** : Black Carbon lié à la combustion de carburants fossiles.

**BC<sub>wb</sub>** : Black Carbon lié à la combustion de biomasse.

**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...).

**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 biomasse...).

**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 : SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> et PM<sub>10</sub>.

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

**NO<sub>2</sub>** : dioxyde d'azote.

**NO<sub>x</sub>** : oxydes d'azote.

**O<sub>3</sub>** : ozone.

**PM<sub>10</sub>** : particules en suspension de taille inférieure ou égale à 10 µm.

**PM<sub>2.5</sub>** : particules en suspension de taille inférieure ou égale à 2,5 µm.

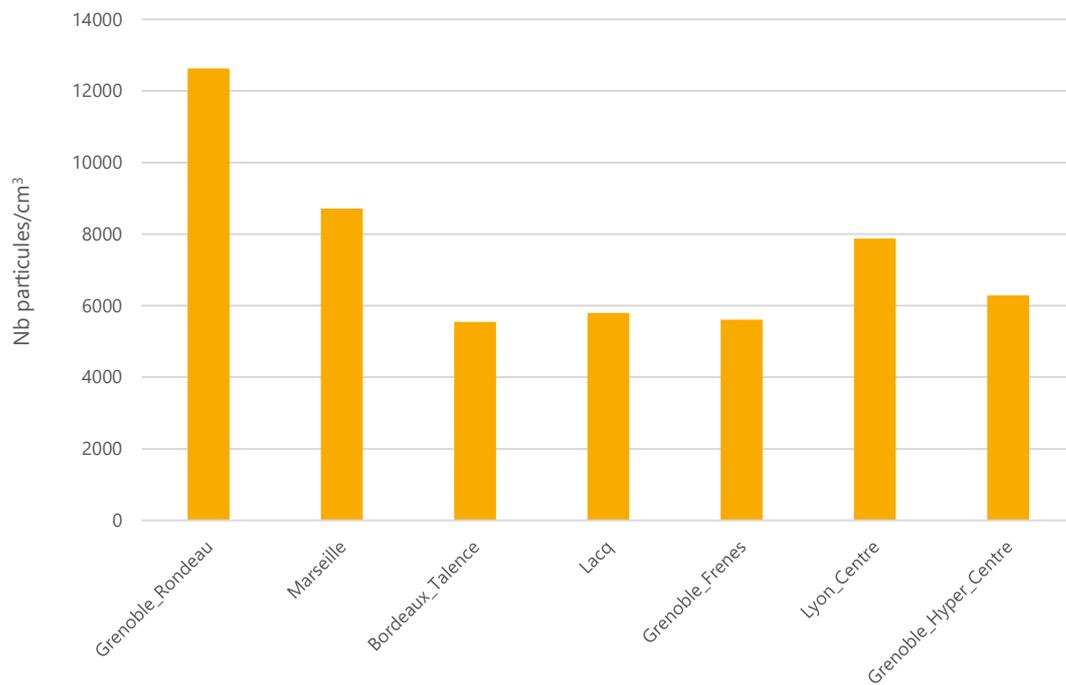
**Polluant primaire** : polluant directement émis par une source donnée.

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

**PUF** : Particules ultrafines

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

## Annexe 2 : Concentration en nombre des PUF moyenne dans les autres stations en France



Les données à Marseille, Talence et Lacq sont les valeurs en moyenne en 2018.

Les données à Grenoble et Lyon sont les valeurs en moyenne entre 2015-2016.



RETROUVEZ TOUTES  
NOS **PUBLICATIONS** SUR :  
[www.atmo-hdf.fr](http://www.atmo-hdf.fr)

**Atmo Hauts-de-France**

Observatoire de l'Air

199, rue Colbert – Bâtiment Douai

59000 Lille

