

STRATEGIE « PARTICULES ULTRAFINES » POUR LA REGION HAUTS-DE-FRANCE

2017-2021



Auteur : Shouwen ZHANG
Vérificateur : Nathalie DUFOUR
Diffusion : Juin 2017

Observatoire de l'Air
55, place Rihour
59044 Lille Cedex
Tél. : 03 59 08 37 30
contact@atmo-hdf.fr

Avant-propos

Atmo Hauts-de-France est une association de type « loi 1901 » agréée par le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire (décret 98-361 du 6 mai 1998) 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.

Suite à la réforme des régions introduite par la Nouvelle Organisation Territoriale de la République (loi NOTRe du 16 juillet 2015), les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air de la Picardie et du Nord – Pas-de-Calais ont fusionné le 1^{er} janvier 2017 pour former Atmo Hauts-de-France.

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°01/2017/SZ**.

Réclamations

Les réclamations sur la non-conformité de la livraison exécutée en regard de la commande 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, la résolution de celui-ci s'effectuera sous l'arbitrage des autorités compétentes.

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

	Nom	Qualité	Visa
Approbation	Nathalie Dufour	Responsable du Service Etudes	

Remerciements

Ce projet s'inscrit dans le cadre du Programme Régional de Surveillance de la Qualité de l'Air 2017-2021.
Il est financé par la région Hauts-de-France.

Atmo Hauts-de-France remercie LCSQA/INERIS pour les assistances « étude » (O. Le Bihan) et « technique » (M. Dalle) pour ce projet.

Sommaire

Glossaire	7
Résumé	8
1. Etat de l'art sur les particules ultrafines	9
1.1. Définition.....	9
1.2. Sources.....	10
1.3. Propriétés physiques et chimiques.....	14
1.4. Effets sanitaires et environnementaux.....	14
1.5. Le projet Européen UFIPOLNET.....	16
1.6. Groupe de Travail « PUF » en France.....	16
1.7. Instrumentation.....	21
2. Stratégie pour la région Hauts-de-France	23
2.1. Enjeux pour la région.....	23
2.2. Objectifs du projet.....	26
2.3. Proposition d'actions.....	29
2.4. Choix du site/mode de mesure.....	31
2.5. Aspect technique.....	33
3. Conclusion	34

Annexes

Annexe 1 : Illustrations représentant quelques formes de nano-objets	35
Annexe 2 : L'occupation du sol dans les hauts-de-France	35

Figures

Figure 1 Comparer la taille de PM _{0.1} avec PM _{2.5}	9
Figure 2 Les particules ultrafines dans un environnement urbain côtier.....	12
Figure 3 Comparaison de 4 stations de mesure : a) concentration en nombre moyenne et NO _x ; b) profil journalier pour 6 canaux de taille et NO _x	16
Figure 4 Sites de mesures PUF AASQA/LCSQA en France.....	17
Figure 5 Roses de pollutions PM _{2.5} et PUF (20-30 nm) sur un site proximité industriel.....	19
Figure 6 Episode de pollution liée aux incendies à Marseille.....	19
Figure 7 Episode de pollution PM ₁₀ du 24 et 25 novembre 2014 à Grenoble.....	20
Figure 8 Profils moyens journaliers 13/07-01/08/13 à site de Mourenx.....	20
Figure 9 UFP 3031 a) photo ; b) schéma d'installation.....	21
Figure 10 Evolution du nombre de jour en dépassement des niveaux réglementaires en région Hauts-de-France (PRSQA 2017-2021).....	24
Figure 11 La distribution de taille (moyenne) pour le 2-6 juin 2017 à la station Leeds (Lille) et la comparaison avec la littérature.....	26
Figure 12 Photos de la station Leeds et UFP 3031.....	31
Figure 13 Sites d'observation PUF proposés en région Hauts-de-France.....	32

Tableaux

Tableau 1 Définition des PM et leur effets sanitaires.....	9
Tableau 2 Principaux rejets industriels de poussières en Nord-Pas-de-Calais.....	11

Glossaire

AASQA : Associations Agréées pour la Surveillance de la Qualité de l'Air

ACSM : *Aerosol Chemical Speciation Monitor* (ACSM) mesure la concentration massique et la composition chimique en temps réel pour les aérosols submicroniques non réfractaires

AMS : *Aerosol mass spectrometer*, capable de fournir des informations quantitatives de taille, la concentration et la composition chimique en temps réel pour les aérosols submicroniques non réfractaires

ANSES : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

BC : Le Black Carbon (BC), également nommé "carbone suie", est un polluant de l'air émis lors de réactions de combustion.

BC_{ff} : BC liés à la combustion de combustibles fossiles

BC_{wb} : BC liés à la combustion de biomasse

BTEX : (Benzène, Toluène, Éthylbenzène et Xylènes) sont des composés organiques volatils mono-aromatiques, très toxiques et écotoxiques

CFA : Congrès Français sur les aérosols (congrès national)

CPC : Compteurs de Particules à Condensation (*Condensation Particle Counter*) mesurent le nombre total de particules fines et ultrafines

CS : Commission de suivi

EFCA : *International Symposium on Ultrafine Particles* (conférence internationale)

ESMERALDA : Plateforme étude multirégionales de l'atmosphère

GT : Groupe de travail

HAP : Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont une sous-famille des hydrocarbures aromatiques, et qui montrent une forte toxicité

INERIS : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques

JIQA : Journée Interdisciplinaire de la Qualité de l'Air (congrès national)

JTA : Journée Technique de l'Air

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

Modélisation : Permet de simuler la concentration d'un polluant dans un environnement donné, à un moment donné, à partir d'outils mathématiques

NH₄ : Ammonium

NO-NO₂ : (Di)Oxyde d'azote

O₃ : Ozone

Org : Composé organique

PM : Matières particulaires (*Particulate Matter* en Anglais), ce qui désignent les particules en suspension dans l'atmosphère

PM₁₀ : Les particules en suspension PM₁₀ sont des particules dont le diamètre est inférieur à 10 micromètres (poussières inhalables)

PM_{2.5} : les particules en suspension PM_{2.5} sont inférieures à 2.5 micromètres et pénètrent plus profondément dans l'appareil respiratoire

PM₁ : les particules en suspension PM₁ sont inférieures à 1 micromètre (particules très fines)

PM_{0.1} : les particules ultrafines (moins de 0,1 micromètres), qui elles peuvent pénétrer dans les vaisseaux sanguins

PNSQA : Plan National de Surveillance de la Qualité de l'Air

PRSQA : Programme Régionale Surveillance de la Qualité de l'Air

PUF : Particules ultrafines

SMPS : Le spectromètre de mobilité électrique (*Scanning Mobility Particle Sizer*) détecte les nanoparticules selon leur taille et permet une distribution granulométrique de l'aérosol en temps réel de la concentration en nombre.

SO₂ : Dioxyde de soufre

Résumé

Les particules en suspensions sont spécialement problématiques en Région Hauts-de-France en lien avec leurs effets sanitaires et des dépassements réglementaires réguliers. La réglementation actuelle pour les particules en suspension (PM₁₀ et PM_{2.5}) ne porte que sur les concentrations massiques (en µg/m³). Cependant, les études scientifiques des particules montrent qu'il est nécessaire de prendre en compte d'autres paramètres, comme la composition chimique, le nombre, la distribution de taille, la surface... qui permet de mieux comprendre les sources des particules, leurs évolutions dans l'atmosphère, et leurs impacts sanitaires et environnementaux.

Les particules ultrafines (PUF) sont définies comme l'ensemble des particules ayant un diamètre aérodynamique inférieur à 100 nm. Les PUF représentent une petite fraction de la masse de particules en suspension, mais dominant par le nombre et les surfaces des particules. Les particules ultrafines représentent 80% de la concentration en nombre de particules dans un environnement urbain¹. Pour instant, elles ne sont réglementées en air ambiant. Cependant, les PUF possèdent des effets sanitaires importants², notamment leur capacité de pénétration dans l'organisme en lien avec leur petite taille et leurs autres caractéristiques (plus grande surface spécifique, qui permet d'absorber plus de composés toxiques). Les études sont peu documentées sur ce sujet par rapport aux PM₁₀ et PM_{2.5}. Dans ce contexte, Atmo Hauts-de-France débute un projet « Particules Ultrafines 2016 » afin d'améliorer les connaissances sur les PUF dans la région Hauts-de-France.

Ce document consiste en deux grandes parties : 1) état de l'art sur les particules ultrafines ; 2) stratégie de surveillance des PUF pour la région Hauts-de-France. Dans la première partie, les sources, les propriétés physique et chimique, leurs effets sanitaires et environnementaux et les travaux déjà réalisés sont présentés. Dans la deuxième partie, sont définis : les enjeux et les objectifs dans la région Hauts-de-France, le plan d'actions, et la proposition des sites de mesure. La mesure des PUF joue un rôle non seulement dans le suivi d'un nouveau polluant émergent, mais également comme un outil/moyen pour identifier les sources des particules, aider à expliquer les épisodes de pollution, alimenter la modélisation et collaborer avec d'autres projets de territoires.

¹ 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.

² Valeria Belleudi et al., "Impact of Fine and Ultrafine Particles on Emergency Hospital Admissions for Cardiac and Respiratory Diseases," *Epidemiology* 21, no. 3 (2010): 414–23.

1. Etat de l'art sur les particules ultrafines

1.1. Définition

A l'heure actuelle, les valeurs réglementations pour les particules s'intéressent uniquement aux concentrations massiques. Mais les paramètres comme la concentration en nombre, la distribution granulométrique, et la composition chimique permettent de donner les informations plus complètes et une compréhension plus profonde sur les particules et leurs effets sanitaires. Les particules ultrafines (PUF) sont définies comme l'ensemble des particules ayant un diamètre aérodynamique égal ou inférieur à 100 nm (= 0.1 μm)³. Elles peuvent aussi être notées comme PM_{0.1}. Les différentes tailles de particules atmosphériques sont définies selon leurs effets de santé et résumés dans le Tableau 1. Les particules grossières contiennent principalement de la poussière, du sel de mer, du pollen mais aussi d'autres sources diverses. La durée de vie est relativement courte puisqu'elles tombent rapidement par la sédimentation. Les particules fines sont généralement plus représentatives de l'aérosol régional, car leur temps de séjour dans l'atmosphère est de quelques jours à quelques semaines. Les PUF ont un temps de séjour atmosphérique très court (<1 jour) à cause de leur taux de coagulation très élevé⁴. La Figure 1 montre la différence de taille de façon visuelle entre PM_{2.5} et PM_{0.1}.

Tableau 1 Définition des PM et leur effets sanitaires

Définition	PM _x : particules en suspension dans l'air d'un diamètre aérodynamique inférieur à x μm			
	PM₁₀ Particules grossières	PM_{2.5} Particules fines	PM₁ Particules très fines ou Particules submicroniques	PM_{0.1} Particules Ultrafines
Effets de santé	Pénétrer dans les bronches	Pénétrer dans les alvéoles pulmonaires	Passer la barrière alvéolo-capillaire	Franchir la paroi des vaisseaux sanguins

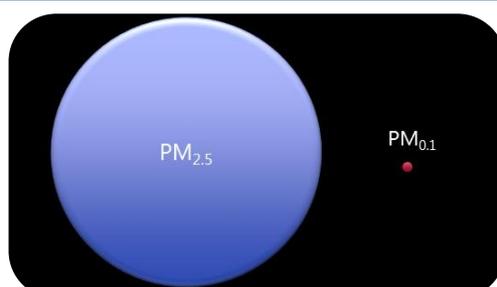


Figure 1 Comparer la taille de PM_{0.1} avec PM_{2.5}

Dans le domaine de la recherche, les termes « particules ultrafines » et « aérosol ultrafin » sont souvent utilisés pour désigner les PUF et sans différence significative entre les deux. Par contre, dans le domaine de nanotechnologies, le terme « nanoparticules » et « nanomatériaux » sont souvent utilisés et sont définis comme nano-objets à l'échelle « nanométrique ». La notion « nanométrique » a été défini par la norme ISO/TS 80004 pour désigner une échelle de longueur s'étendant approximativement de 1 nm à 100 nm⁵. Plus de détails sont présentés en Annexe 1.

³ Sumio Iijima, "Electron Microscopy of Small Particles," *Journal of Electron Microscopy* 34, no. 4 (1985): 249–65.

⁴ N. Bukowiecki et al., "Fine and Ultrafine Particles in the Zürich (Switzerland) Area Measured with a Mobile Laboratory: An Assessment of the Seasonal and Regional Variation throughout a Year," *Atmospheric Chemistry and Physics* 3, no. 5 (2003): 1477–1494.

⁵ "ISO/TS 80004-2:2015 Nanotechnologies -- Vocabulaire -- Partie 2: Nano-objets," June 2015.

1.2. Sources

Comme les autres particules atmosphériques, en fonction de leur mécanisme de formation, les PUF sont d'origine primaire ou secondaire⁶.

- Les PUF primaires sont les particules qui sont émises directement dans l'atmosphère et peuvent être à la fois d'origine naturelle ou anthropique.
- Les PUF secondaires se forment quant à elles dans l'atmosphère à partir de la nucléation et la condensation par les réactions gaz-particules. Il s'agit d'un processus relativement complexe qui implique la nucléation d'un cluster initial (< 1 nm) et sa croissance ultérieure à des tailles détectables (plusieurs nanomètres de diamètre) en raison de la condensation des vapeurs.

En fonction de leur source d'émissions, les PUF peuvent être d'origines naturelles ou anthropiques.

1.2.1. Sources naturelles

Les particules d'origine naturelle proviennent principalement de volcans, poussières minérales, sel marin, feux de forêt et pollens. D'une part, ces composés naturels se trouvent principalement dans les particules entre PM_{2,5} et PM₁₀. D'autre part, la zone de forêt et le milieu semi-naturel représentent une part d'occupation du sol inférieure à 10% dans la région Hauts-de-France (Annexe 2), c'est donc une source mineure par rapport sources anthropiques.

1.2.2. Sources anthropiques

On peut distinguer ces sources anthropiques en **deux sous catégories** : « **PUF intentionnelles** » et « **PUF non intentionnelles** ».

- « **PUF intentionnelles** » ou « **Nanoparticules** » / « **Nanomatériaux** » : les PUF sont fabriquées intentionnellement pour les utilisations dans les domaines très variés tels que la technologie, le bâtiment, l'automobile, l'emballage, la chimie, l'agro-alimentaire, l'énergie, la cosmétique ou la santé.
⁷Les entreprises déclarant une activité de nanomatériaux en France ne sont pas homogènes : 75% se trouvent sur 4 ex-régions : Île-de-France, Rhône-Alpes, Midi-Pyrénées et Aquitaine. Les départements du Nord et du Pas-de-Calais ne concernent que 2% d'offre et 4% de la demande des nanomatériaux. L'ex région Picardie ne représente quant à elle, que moins de 1% d'activité des nanomatériaux en France. L'évaluation des risques toxique et écotoxique spécifiques liés aux nanomatériaux reste un sujet émergent. En plus, ces nanoparticules contenues dans les nanomatériaux pourront être remise en suspension en air ambiant après l'incinération à la fin de leur vie.
- « **PUF non intentionnelles** » : elles sont émises non intentionnellement par les activités humaines comme les procédés industriels, la combustion de biomasse, l'échappement d'automobile et le toner d'imprimante. En zone urbaine, la source principale de PUF est le trafic automobile⁸.

⁶ JR Pierce et al., "Quantification of the Volatility of Secondary Organic Compounds in Ultrafine Particles during Nucleation Events," *Atmospheric Chemistry and Physics* 11, no. 17 (2011): 9019–36.

⁷ D&CONSULTANTS, "Les Réalités Industrielles Dans Le Domaine Des Nanomatériaux En France" (La direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services, 2012).

⁸ Prashant Kumar et al., "Ultrafine Particles in Cities," *Environment International* 66 (May 2014): 1–10.

☐ PUF non intentionnelles liées aux activités industrielles

Selon l'étude régionale par la DREAL, les rejets de poussières (sans prendre en compte la granulométrie) déclarés par les industries (435 entreprises) sont estimés à 4 517 tonnes en 2011. Les processus industriels concernent la sidérurgie, les cimenteries, la fabrication d'engrais, les installations de combustion et etc. Le Tableau 2 indique les six entreprises principales des émissions qui représentent 80 % du total déclaré en région (le centre thermique de Bouchain a cessé sa production en avril 2015). L'Arcelor Mittal représente 78% de rejet de poussières industriel en 2011.

Tableau 2 Principaux rejets industriels de poussières en Nord-Pas-de-Calais

Établissements	Commune	Poussières en tonnes par an			
		2008	2009	2010	2011
Arcelor Mittal Atlantique et Lorraine	Dunkerque	2 740	2 102	2 658	2 853
Aluminium Dunkerque Sa	Loon-Plage	232	248	245	209
SRD, Société de la Raffinerie de Dunkerque	Dunkerque	256	271	227	184
Cargill SAS	Haubourdin	169	123	150	166
EDF Centre de production thermique de Bouchain	Bouchain	373	350	364	109
E.ON, Centrale d'Hornaing	Hornaing	523	353	143	109
	TOTAL	4 292	3 450	3 788	3 630

(Source : Déclaration des 435 industriels à la DREAL Nord - Pas-de-Calais, au 30 avril 2012)

Remarque :

Il serait intéressant de mesurer les PUF dans la zone industrielle de Dunkerque, notamment l'influence des sources métallurgiques et sidérurgiques qui sont des sources importantes de rejets de poussières. Le SO₂ est également un bon traceur des émissions industrielles qui est émis par la combustion des combustibles fossiles contenant les composés soufrés. La conversion SO₂ gazeux à SO₄ particulaire est un processus potentiel important pour les aérosols secondaires. Le lien entre la source industrielle (SO₂) et les PUF de taille 20-30 nm a été observé par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes.

☐ PUF non intentionnelles liées aux moteurs

On peut différencier 3 types d'émission de moteur dans la région : automobiles, bateaux et avions.

✧ Automobiles

En milieu urbain, les émissions des véhicules à moteur sont généralement la source la plus importante de particules ultrafines^{9,10}. La majorité des particules provenant de l'échappement du véhicule se situe dans la gamme de **20 à 130 nm pour les moteurs diesel** et de **20 à 60 nm pour les moteurs à essence**^{11,12}.

⁹ 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. 1-3 (September 1, 1999): 51-64.

¹⁰ Kumar et al., "Ultrafine Particles in Cities."

¹¹ Lidia Morawska et al., "Submicrometer and Supermicrometer Particles from Diesel Vehicle Emissions," *Environmental Science & Technology* 32, no. 14 (July 1, 1998): 2033-42.

¹² Z. D. Ristovski et al., "Submicrometer and Supermicrometer Particulate Emission from Spark Ignition Vehicles," *Environmental Science & Technology* 32, no. 24 (December 1, 1998): 3845-52.

Les études précédentes ont montré que la concentration en nombre de particules ultrafines diminue de façon exponentielle avec la distance lorsque l'on s'écarte d'une l'autoroute^{13,14}.

Les particules fraîches émises par les échappements des véhicules ont une tendance à être bimodales, présentant **un mode de nucléation** (<20 nm) et **un mode carboné** (50 à 200 nm). Le mode de nucléation est principalement constitué de gouttelettes d'acide sulfurique, formées lors de la dilution et du refroidissement des gaz d'échappement et recouvertes par du sulfate condensé et/ou des hydrocarbures. Le mode carboné (50-200 nm) est principalement composé de suie, de matière organique absorbée et d'autres oligo-éléments formés dans le moteur et émis directement en phase solide¹⁵.

✧ Bateaux

Les émissions des bateaux sont connues comme l'une des sources de polluants les moins réglementées¹⁶. Les bateaux peuvent émettre des particules primaires et des précurseurs gazeux (e.g. COV et SO₂) qui forment les particules secondaires. Les particules primaires sont constituées par un mélange de carbone organique et élémentaire, le sulfate condensé en cendres et métaux traces (e.g. V et Ni)¹⁷. Les mesures par SMPS (*scanning mobility particle sizer*) indiquent que la grande majorité des particules primaires émises par les bateaux sont en mode ultrafin (<100 nm de diamètre)¹⁸.

Une étude suppose que les émissions des bateaux peuvent générer des particules ultrafines beaucoup plus élevées que les émissions par échappement des véhicules dans la zone côtière¹⁹.

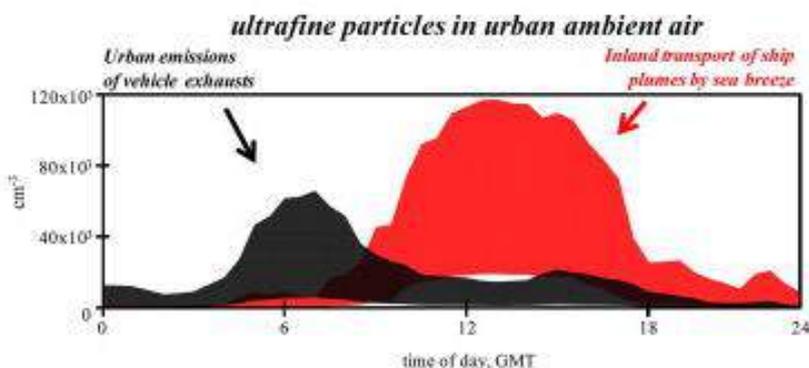


Figure 2 Les particules ultrafines dans un environnement urbain côtier²⁰

¹³ John G Watson et al., "Measurement System Evaluation for Upwind/Downwind Sampling of Fugitive Dust Emissions," *Aerosol and Air Quality Research* 11, no. 4 (2011): 331–50.

¹⁴ G.S.W. Hagler et al., "Ultrafine Particles near a Major Roadway in Raleigh, North Carolina: Downwind Attenuation and Correlation with Traffic-Related Pollutants," *Atmospheric Environment* 43, no. 6 (February 2009): 1229–34.

¹⁵ Sergio Rodríguez and Emilio Cuevas, "The Contributions of 'minimum Primary Emissions' and 'new Particle Formation Enhancements' to the Particle Number Concentration in Urban Air," *Journal of Aerosol Science* 38, no. 12 (December 2007): 1207–19.

¹⁶ Veronika Eyring et al., "Emissions from International Shipping: 1. The Last 50 Years," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 110, no. D17 (2005).

¹⁷ Mar Viana et al., "Chemical Tracers of Particulate Emissions from Commercial Shipping," *Environmental Science & Technology* 43, no. 19 (October 1, 2009): 7472–77.

¹⁸ Robert M. Healy et al., "Characterisation of Single Particles from in-Port Ship Emissions," *Atmospheric Environment* 43, no. 40 (December 2009): 6408–14.

¹⁹ Yenny González et al., "Ultrafine Particles Pollution in Urban Coastal Air due to Ship Emissions," *Atmospheric Environment* 45, no. 28 (September 2011): 4907–14.

²⁰ Ibid.

✧ Avions

Les aéroports contribuent aux émissions de PUF et d'autres polluants atmosphériques (HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques), COV, SO₂, et NO_x), qui influencent significativement la qualité de l'air sur les pistes des aéroports. Les études à *Los Angeles International Airport* ont observé un nombre maximal de PUF atteint 4,8 millions de particules/cm³ sous le vent d'une piste utilisée par les avions de décollage. La distribution en taille de particule est aussi différente : le site au vent (en amont) est dominé par des particules d'environ 90 nm tandis que les sites sous le vent sont dominés par des particules environ 10-15 nm^{21,22}. Le positionnement de la mesure est un paramètre très important. Sachant que l'aéroport est un milieu ouvert, le site de mesure doit être plus proche possible de la piste de décollage. En plus, les locaux intérieurs (i.g. salle d'attente) peuvent aussi être impactés par ces émissions.

☐ PUF non intentionnelles en air intérieur

Nous passons environ 80% de notre temps dans des espaces clos, tels que les habitations, les transports, les écoles, les hôpitaux, les bureaux, les commerces, les salles de sports, etc. La pollution de l'air intérieur est devenue une préoccupation quotidienne et une priorité pour l'État. Les sources de PUF en air intérieur sont nombreuses : par exemple, les activités de cuissons, le tabac, les matériaux de construction et mobilier, les produits pour le nettoyage et l'entretien, le système de chauffage et de refroidissement, la bougie, l'imprimante, etc. Les activités de cuisson sont identifiées comme une source majeure de PUF dans l'air intérieur, à la fois pour les personnes à la maison et pour les employés et les clients dans les restaurants²³. Les imprimantes laser et photocopieurs pourraient être une source importante des PUF dans les bureaux de travail²⁴. Ces sources ont des conséquences non négligeables sur notre santé. De même, les particules ultrafines de l'extérieure peuvent être transportées à l'intérieur, notamment pour les résidences situées à proximité du trafic dense.

Remarque :

Les sites de mesures doivent être le plus proche de sources d'émissions possible. Sinon, le risque de mesurer uniquement le niveau de fond augmente. Les différents types de moteurs et combustibles utilisés peuvent générer un nombre et des tailles de PUF différents. Pour l'heure, il y a très peu d'études réalisées sur les PUF émis par les bateaux et les avions. On peut ainsi envisager une station mobile pour mesurer ces types de sites proximité du port (Dunkerque, Calais) et de l'aéroport (Beauvais).

Pour mesurer PUF intérieures, Atmo HDF dispose un compteur P-Track® (TSI 8525) qui mesure la somme des PUF avec une taille compatible à un environnement intérieur.

²¹ 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.

²² Yifang Zhu et al., "Aircraft Emissions and Local Air Quality Impacts from Takeoff Activities at a Large International Airport," *Atmospheric Environment* 45, no. 36 (November 2011): 6526–33.

²³ Lance Wallace and Wayne Ott, "Personal Exposure to Ultrafine Particles," *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology* 21, no. 1 (2011): 20–30.

²⁴ Tao Tang et al., "Fine and Ultrafine Particles Emitted from Laser Printers as Indoor Air Contaminants in German Offices," *Environmental Science and Pollution Research* 19, no. 9 (2012): 3840–49.

1.3. Propriétés physiques et chimiques

Les particules ultrafines constituent une faible masse des PM (**1 à 8 %**) mais elles sont les plus nombreuses dans un volume donné et ont une surface réactive plus importante que celle des grosses particules. Il faut **un million** d'UFP (100 nm) pour égaler la masse d'une particule de 10 µm. Les particules ultrafines représentent **80%** de la concentration en nombre de particules dans un environnement urbain²⁵.

Dans la plupart des études, on s'intéresse à la concentration en nombre et la distribution en taille des PUF. La connaissance sur la composition chimique des PUF reste très limitée. La méthode classique utilise les impacteurs en cascade pour collecter les échantillons et ensuite déterminer leurs compositions chimiques²⁶.

Les spectromètres de masse à particule unique (*single particle mass spectrometers*) *in situ* sont des technologies émergentes pour la caractérisation chimique des PUF²⁷. La microscopie électronique permet de fournir une mesure directe de la taille, de la forme et de la composition élémentaire des particules ultrafines.

Dans la littérature, les PUF en air ambiant sont majoritairement composées de carbone organique, d'éléments-traces métalliques métaux (ETM), des sulfates, d'EC et parfois d'ammonium et de nitrate²⁸. Cette composition varie temporellement et spatialement en raison des sources (voir la partie sources), dont les émissions particules primaires et les précurseurs en phase gazeuse, du processus de formation concerné et des conditions météorologiques.

1.4. Effets sanitaires et environnementaux

Les PUF ont des impacts significatifs sur la santé et l'environnement, ce qui confirme la nécessité et l'intérêt de les surveiller dans le cadre du réseau nationale de la qualité de l'air.

1.4.1. Effets sanitaires

Les effets sanitaires liés aux PUF sont principalement étudiés de façon : 1) **épidémiologique** ; 2) **toxicologique**.

Les études épidémiologiques ont montré que les expositions aux PUF peuvent causer une augmentation de la mortalité et des hospitalisations pour des raisons cardio-respiratoires^{29,30}. Une étude récente estime l'augmentation de 10 000 particules/cm³ est associée à une augmentation de 4,27% d'hospitalisation liés aux maladies respiratoires³¹.

Les études toxicologiques cherchent à comprendre les mécanismes et le rôle potentiel des PUF chez l'homme ou chez l'animal. Plus les particules sont petites, plus elles pénètrent profondément dans les poumons. Les PUF ont une plus grande capacité de se déposer et se transférer dans autres parties du corps.

²⁵ Morawska et al., "Comprehensive Characterization of Aerosols in a Subtropical Urban Atmosphere: Particle Size Distribution and Correlation with Gaseous Pollutants."

²⁶ Glen R Cass et al., "The Chemical Composition of Atmospheric Ultrafine Particles," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 358, no. 1775 (October 15, 2000): 2581.

²⁷ Ann M. Middlebrook et al., "A Comparison of Particle Mass Spectrometers during the 1999 Atlanta Supersite Project," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 108, no. D7 (2003).

²⁸ Cass et al., "The Chemical Composition of Atmospheric Ultrafine Particles."

²⁹ Belleudi et al., "Impact of Fine and Ultrafine Particles on Emergency Hospital Admissions for Cardiac and Respiratory Diseases."

³⁰ Constantinos Sioutas, Ralph J. Delfino, and Manisha Singh, "Exposure Assessment for Atmospheric Ultrafine Particles (UFPs) and Implications in Epidemiologic Research," *Environmental Health Perspectives* 113, no. 8 (2005): 947–55.

³¹ 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.

Elles seraient aussi capables de franchir la paroi des vaisseaux sanguins, distribuées ensuite au niveau de l'organisme. Les PUFs peuvent être transportées dans les régions du cerveau par l'inhalation³². De nombreuses études *in vitro* ont mis en évidence que des PUF produisaient plus de radicaux libres que les particules plus grosses et provoquaient un stress oxydant plus important^{33,34}. De plus, les PUF ont une surface spécifique plus grande que les grosses particules, ce qui permet de porter plus de composés toxiques (e.g. HAP, métaux...).

Il reste encore beaucoup d'incertitudes sur le comportement des PUF dans l'organisme. Il sera également très important d'évaluer les effets à long terme, cancers, maladies neurodégénératives, etc.³⁵ De plus, les PUF sont fortement corrélées avec d'autres polluants et le risque n'est pas clairement distinguable aux fractions de grande taille telles que PM_{2.5} et PM₁₀.

1.4.2. Effets Environnementaux

Les particules ultrafines provenant de sources de combustion sont souvent hygroscopiques. Avec une humidité relative élevée, la condensation de l'eau augmente la taille des PUF, qui pourront modifier le bilan radiatif (noyau de concentration des nuages) et entraîner une dégradation de la visibilité et une contribution significative à la brume et au smog urbain.

Si on prend en compte leur composition chimique, les particules contenant du soufre peuvent endommager les matériaux de construction. Les particules toxiques peuvent également contaminer le sol, l'eau souterraine ou encore impacter l'écosystème. Cependant les effets environnementaux directement liés aux PUF restent à approfondir.

³² G. Oberdörster et al., "Translocation of Inhaled Ultrafine Particles to the Brain," *Inhalation Toxicology* 16, no. 6–7 (Jan. 1, 2004): 437–45.

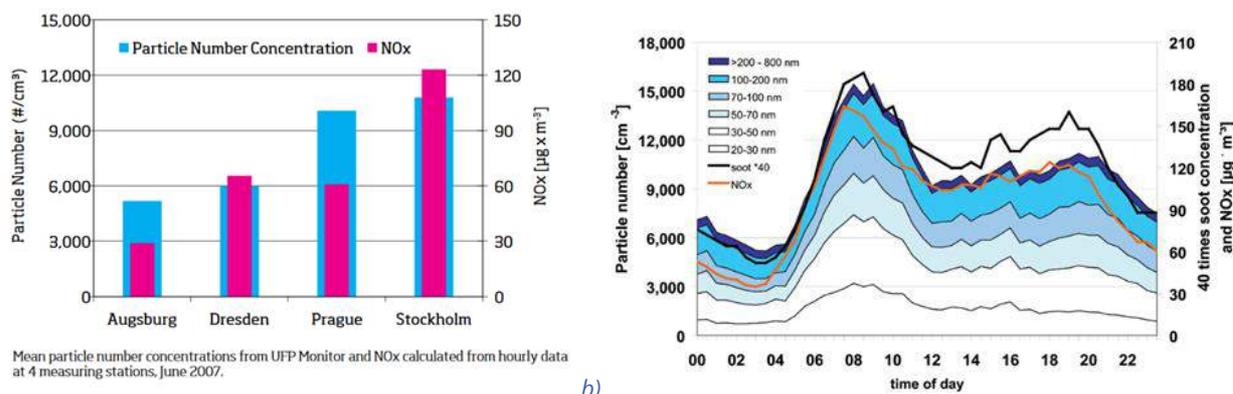
³³ Ken Donaldson and C. Lang Tran, "Inflammation Caused by Particles and Fibers," *Inhalation Toxicology* 14, no. 1 (Jan. 1, 2002): 5–27.

³⁴ Roel P.F Schins et al., "Inflammatory Effects of Coarse and Fine Particulate Matter in Relation to Chemical and Biological Constituents," *Toxicology and Applied Pharmacology* 195, no. 1 (February 15, 2004): 1–11.

³⁵ "Pollution Atmosphérique : Particules Ultrafines et Santé," *Extrapol*, no. N°33 (Décembre 2007).

1.5. Le projet Européen UFIPOLNET

Un groupe de travail de la Commission Européenne sur l'environnement et la santé a été créé pour élaborer et discuter de nouvelles lignes directrices européennes pour la mesure des particules ultrafines. Dans ce contexte, un projet **UFIPOLNET** (**Ultra**fine particle size distributions in air **pollution** monitoring **networks**) a été réalisé (12/2004 – 03/2008). L'objectif du projet a été de développer un nouvel instrument pour une surveillance de routine à long terme de la concentration en nombre et des tailles de particules ultrafines dans l'air urbain.



a)

b)

Figure 3 Comparaison de 4 stations de mesure : a) concentration en nombre moyenne et NO_x ; b) profil journalier pour 6 canaux de taille et NO_x

Les PUF sont mesurées dans 4 stations en Europe pour 12 mois : Stockholm, Dresden, Prag, Augsburg. Les 3 premiers sites se trouvent à proximité de routes très fréquentées et Augsburg est un site de fond urbain. Il y a une bonne corrélation avec un dispositif de référence pour la somme des particules et pour chacun des canaux individuels.

Les résultats sont comparables sur les 4 stations, en raison de la même méthode de mesure. La bonne corrélation entre NO_x et la concentration en nombre des PUF a mis en évidence leur origine trafic, notamment pour les sites Dresden et Stockholm (Figure 4a). Le profil journalier à Dresden montre que les concentrations des PUF, NO_x et carbone suie sont simultanées à l'heure pointe du matin et en fin d'après-midi (Figure 4b). Les résultats de ce projet ont été fournis au groupe de travail "Particulier Matter" dans le cadre de la programme Européenne CAFE (Clean Air for Europe). Le granulomètre UFP 330 (20nm – 500 nm) utilisé pendant UFIPOLNET est maintenant devenu le *Ultrafine Particle Monitor 3031*.

1.6. Groupe de Travail « PUF » en France

Les échanges sur la thématique PUF entre le LCSQA et différentes AASQA ont commencé depuis 2011 et un Groupe de Travail « particules ultrafines (PUF) » national a été créé en 2014, rattaché à la Commission de Suivi Particule (CS PM). Les réunions plénières, les réunions thématiques et les retours d'expériences ont été effectué entre 2014 et 2017. Le GT PUF actuel (2017) est constitué par : **Atmo Nouvelle-Aquitaine, Air PACA, Airparif, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, Atmo Hauts-de-France, LCSQA/INERIS.**

La Figure 4 présente les localisations des sites de mesures PUF par AASQA en France.

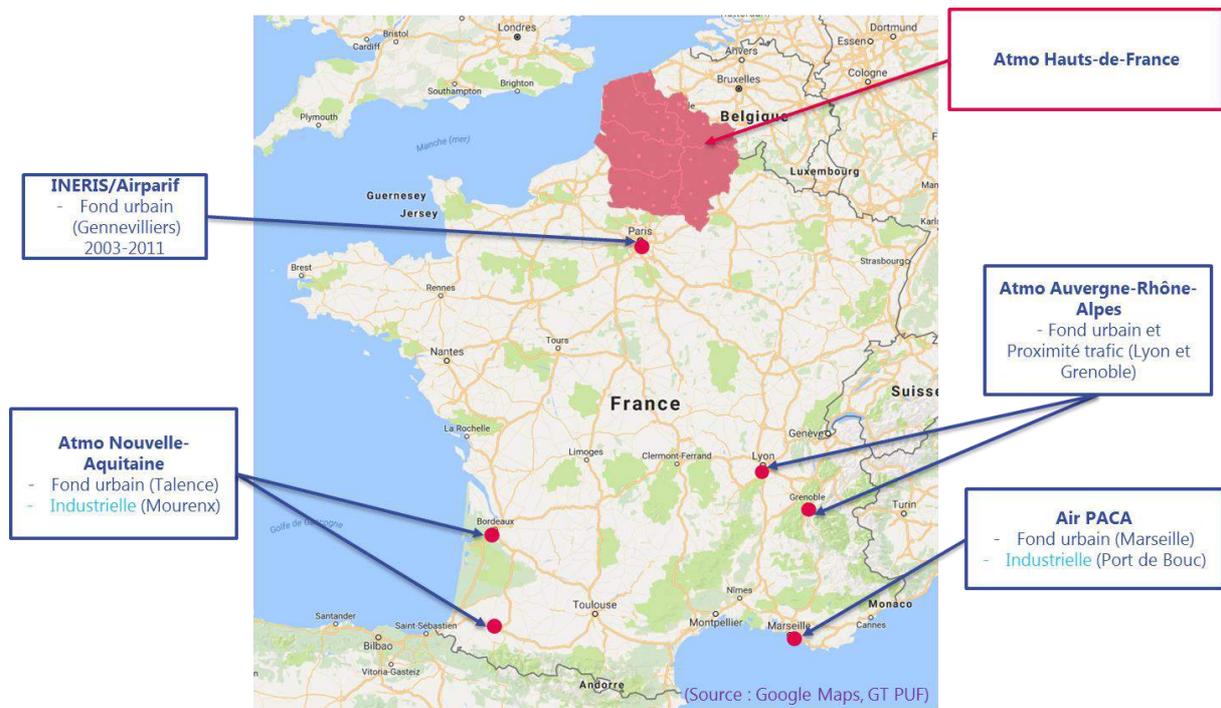


Figure 4 Sites de mesures PUF AASQA/LCSQA en France

1.6.1. Travaux déjà réalisés des AASQA

2003-2011 : Les travaux réalisés par le LCSQA en partenariat avec Airparif sur le site de Gennevilliers (nord de Paris) mettent en évidence les rôles majeurs du trafic et des processus photochimiques sur les niveaux de concentration des PUF en région parisienne. A partir de 2009, l'étude a été menée sur un nouveau granulomètre, l'UFP 3031.

2012- 2017 : travaux réalisés par des AASQA (Atmo AURA, Atmo NA et Air PACA)

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes

★ Stratégie

2011-2014 : étude de la zone de Grenoble, avec une station fixe et une station mobile.

2015 : un point fixe à Grenoble, un autre à Lyon.

2016 : poursuite de la production de données sur Lyon.

Sujet : effets sur santé/ production long terme de données / étude multi-instrumentée de PM

★ Résultats

Entre 2012 et 2014, Air Rhône-Alpes a réalisé des campagnes de mesures avec les 2 appareils UFP 3031, sur 7 sites de l'agglomération grenobloise. Les observations montrent que³⁶ :

- Les sites de proximité automobile présentent les concentrations deux fois plus élevées qu'en fond urbain ;
- Les PUF plus fines (20- 50 nm) sont de bons traceurs du trafic en corrélation avec le NO ou NO₂ ;
- En hiver, la fraction 100-200 nm sont plus élevées en lien avec le chauffage résidentiel.

³⁶ Air Rhône-Alpes, "Observatoire Des Particules Ultra Fines Atmosphériques En Rhône-Alpes – Résultats 2012-2014," Juin 2016.

☐ Atmo Nouvelle-Aquitaine

★ Stratégie

Depuis 2012, deux UPF 3031 sont installés sur un site fond urbain (Talence) et un en site de proximité industrielle (Mourenx).

★ Résultats³⁷

- La fraction 100-200 nm est une contribution majeure de la combustion de biomasse.
- La fraction 20 –50 nm, peut être soit associée au trafic (corrélation avec NO_x/NO₂), soit liée à la production des aérosols secondaires (photochimie).
- Lien entre le SO₂ élevé (>100 µg/m³) et les PUF sur le site industriel (formation d'aérosol secondaire de sulfate).

☐ Air PACA

★ Stratégie

Dans le cadre du projet PM Sources (PMS) pour une meilleure connaissance des sources de la pollution particulaire, la stratégie suivante a été adoptée :

- Pérennisation du monitoring sur un site urbain
Un à Marseille Cinq Avenues depuis 12/2014 (site urbain de fond)
Un à Port de Bouc depuis 07/2015 (site urbain sous influence industrielle)
- Projet éventuel d'équipement sur Nice

★ Résultats

- Les profils journaliers / la corrélation avec autres paramètres : identification des sources (trafic, chauffage domestique, photochimie...);
- Roses de pollution : source industrielle & (20-70 nm) PUF ;
- Episode de pollution mars 2015 : PUF > 100 nm suivent le comportement PM₁₀

1.6.2. Comparaison inter-laboratoire

Le LCSQA a organisé plusieurs exercices d'intercomparaison qui ont comparé les UFP 3031 utilisés par Atmo AURA, Atmo NA et Air PACA avec un SMPS (*Scanning Mobility Particle Sizer*) de référence (LCSQA/INERIS) en 2014, 2015 et 2016. Les intercomparaisons 2014 et 2015 ont eu lieu dans la station d'Atmo Picardie, dite de la « Faiënerie » située à Creil, qui est classée comme type urbaine de fond.

Ces exercices permettent de :

- Évaluer les performances, techniques (changement de chargeur) et logicielles de l'UPF 3031 ;
- avoir un retour d'expérience sur les bonnes pratiques par les différents acteurs français ;
- Souligner que le canal de mesure à la gamme 200-800 nm présente des performances limitées : considérer plutôt un usage « informatif ». Le reste de la gamme de mesure (5 canaux de 20 à 200 nm) présente des performances satisfaisantes.
- Confirmer la nécessité d'une maintenance et d'un contrôle des matériels annuel chez le constructeur et la maintenance régulièrement l'appareil et la ligne de prélèvement.

³⁷ Pierre-Yves Guernion, "Mesures Exploratoires de PUF (Particules Ultrafines) En Aquitaine," Novembre 26, 2015.

1.6.3. Identification/signature des sources spécifiques

La mesure des PUF, est non seulement un nouveau paramètre à mesurer, mais également un outil performant pour identifier ou trouver la « signature » de sources spécifiques.

Dans cette partie, quelques exemples d'études de cas sont donnés par d'autres AASQA concernant les sources industrielles, les épisodes de pollution et les PUF secondaires.

Ex. n°1 : Les émissions industrielles sont souvent très complexes et difficiles à identifier pour un site récepteur. La mise en place de mesure des PUF permet de trouver la signature de sources spécifiques industrielles. Selon l'étude effectuée sur la région PACA, la rose de pollution $PM_{2.5}$ ne permet pas de pointer vers des sources particulières de PM (Figure 5 à gauche). Par contre, la rose de pollution pour les PUF (20-30 nm) pointe bien les sources de pollution (Figure 5 à droite). En conclusion, la mesure granulométrique des particules ultrafines est un outil performant pour chercher de sources spécifiques de PM. Ce type de mesure sera intéressant à implanter sur la zone industrielle de Dunkerque, qui concerne secteurs divers tels que la métallurgie, la pétrochimie...

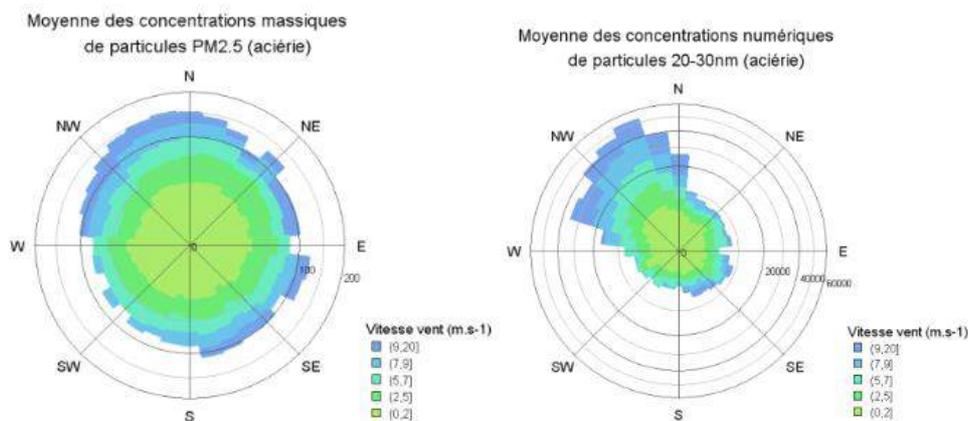


Figure 5 Roses de pollutions $PM_{2.5}$ et PUF (20-30 nm) sur un site de proximité industrielle³⁸

Ex. n°2 : La Figure 6 montre une augmentation de la concentration en nombre des PUF et les concentrations massiques PM_{10} et $PM_{2.5}$ durant une période d'incendies de forêt par rapport d'autres jours « classiques » à Marseille. Le seuil d'alerte en PM_{10} ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne journalière) a été dépassé le 10 août. Simultanément, les PUF entre 100 et 200 nm présentent la plus forte augmentation jusqu'à $8000/\text{cm}^3$. Cette fraction est considérée liée à la combustion de biomasse.

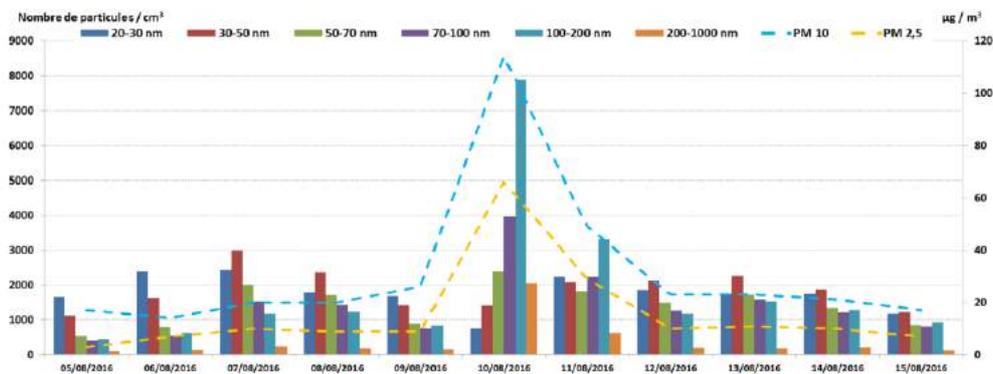


Figure 6 Episode de pollution lié aux incendies à Marseille (10-11/08/2016)

³⁸ Air PACA, "PM Sources - Pollution Par Les Particules En Suspension Recherche Des Sources À L'aide de Signatures Chimiques et Granulométriques Application À La Région Industrielle de L'étang de Berre," Octobre 2015.

Ex n°3 : A Grenoble, le niveau réglementaire d'information et de recommandations en PM₁₀ a été dépassé sur l'agglomération les 24 et 25 novembre 2014. La Figure 7 montre une bonne corrélation entre la fraction 100-200 nm et les concentrations de PM₁₀ et PM_{2.5}. De Plus, les PM_{wb} (liées aux pics de chauffage survenant les soirs et matins) évoluent parfaitement avec la fraction 100-200nm. Le 25 novembre matin (8-9h), un pic « trafic » PM₁₀ a également observé avec la hausse en nombre des PUF 20-30nm et 30-50nm.

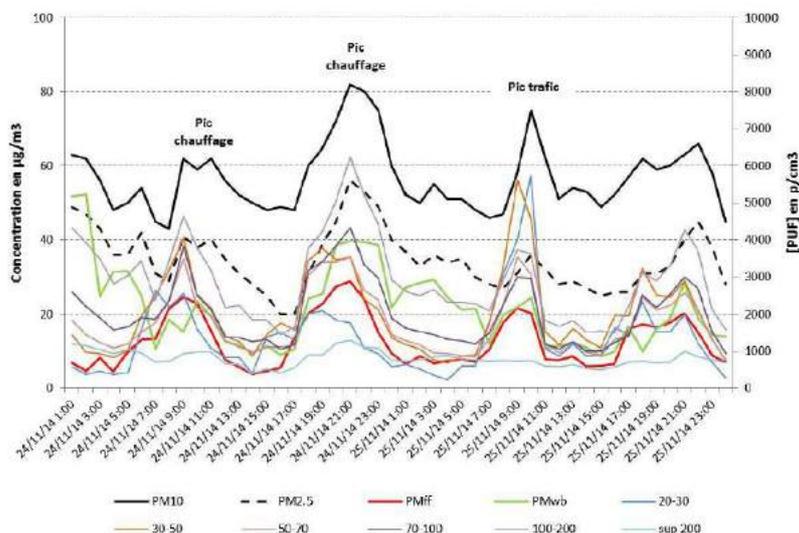


Figure 7 Episode de pollution PM₁₀ du 24 et 25 novembre 2014 à Grenoble

Ex. n°4 : Sur le site de Mourenx (Région Nouvelle Aquitaine), la période du 13/07/2013 au 01/08/2013 a été marquée par des niveaux en ozone significatifs. Les profils moyens journaliers des PUF sont présentés en Figure 8. Le pic des PUF observé est bien corrélé avec l'ozone. Le pic est très marqué pour les fractions 20-30 nm et 30-50 nm. Cette observation indique l'impact de la photochimie sur la formation des particules PUF secondaires et la formation de l'ozone.

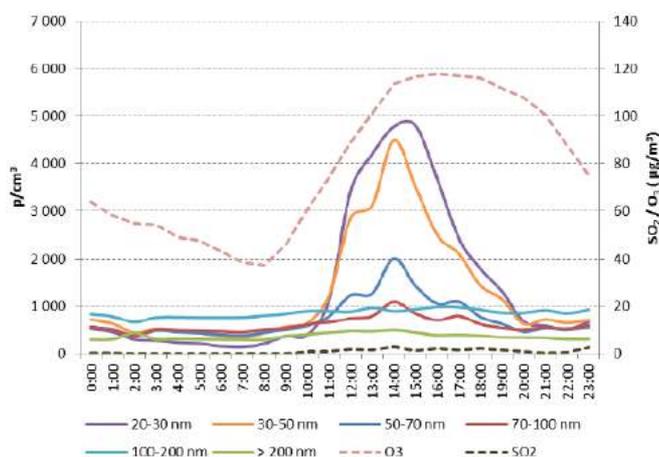


Figure 8 Profils moyens journaliers 13/07-01/08/13 à site de Mourenx

Les exemples ci-dessus confirment le rôle important des PUF dans l'identification des sources spécifiques et l'âge des particules, en complément des autres mesures chimiques existantes. Dans la région Hauts-de-France, d'autres sources spécifiques comme les émissions par les bateaux et les avions présentent aussi un intérêt : suivre leurs concentrations de PUF, peut aider à estimer leurs impacts sanitaires et leurs autres influences.

1.7. Instrumentation

1.7.1. TSI 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 pour de raison de politique d'investissement et de surveillance harmonisée.

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. L'avantage de cet instrument par rapport un SMPS (*Scanning Mobility Particle Sizer*) classique est : 1) il utilise un chargeur à effet couronne au lieu d'une source radioactive, donc ne requiert aucune licence spéciale pour se déplacer ; 2) le comptage des particules est effectué par un électromètre à la place de compteur à noyaux de condensation, évitant l'utilisation de butanol. Le modèle 3031 se monte dans une armoire de 48,3 cm, ce qui permet de l'installer facilement dans la station fixe ou mobile.

Caractéristiques :

- Gamme de mesure : entre 20 nm et 800nm
- Six canaux de taille : (20-30nm ; 30-50nm ; 50-70nm ; 70-100nm ; 100-200nm ; 200-800nm)

Fournit la concentration en nombre pour chaque canal de taille sans source radioactive ni butanol

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

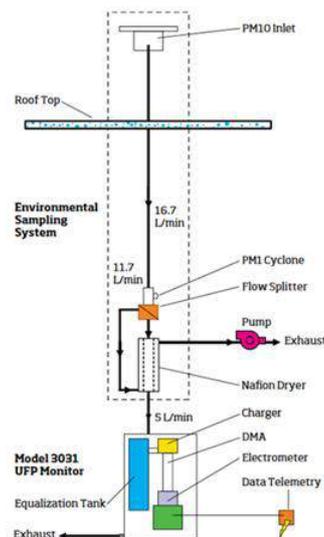


Figure 9 UFP 3031 a) photo ; b) schéma d'installation³⁹

³⁹ TSI, "Ultrafine Particle (UFP) Monitor Model 3031," 2012, http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Spec_Sheets/3031_5001114-spec.pdf.

1.7.2. Compléments

Pour vérifier la fiabilité de mesure, il est conseillé d'utiliser un **CPC (Condensation Particle Counter)** ou un **SMPS** en parallèle pour comparer la concentration en nombre et la distribution granulométrique de particules.

Pour mieux connaître la composition chimique des particules, plusieurs instruments peuvent être utilisés. Le **BC** (Black Carbon) mesuré par un **aéthalomètre** (e.g. type AE 33) et les **PM₁-NR** (non réfractaire) mesuré par un **ACSM** (Aerosol Chemical Speciation Monitor), qui donnerait la spéciation chimique en sulfate, nitrate, ammonium, organique, chlorure. Certains traceurs gazeux comme le **SO₂**, le **CO**, le **NO**, le **NO₂** et les **BTEX** sont aussi très intéressants à suivre pour aider de l'identification des sources PUF. Les autres tailles de PM (PM₁₀ et PM_{2.5}) seront utilisées pour comparer le niveau de concentration.

2. Stratégie pour la région Hauts-de-France

2.1. Enjeux pour la région

2.1.1. Contexte régional

Résultat de la fusion du Nord-Pas-de-Calais et de la Picardie, la région Hauts-de-France est la troisième région la plus peuplée de France et la 2^e la plus densément peuplée après l'Île-de-France. Elle s'étend sur 31 813 km² avec 6 millions d'habitants. La région est constituée par les zones urbaines avec la densité de population importante (>2000 hab./km²), comme Lille, Amiens, Dunkerque, Calais, Lens, Douai, Creil... En même temps, les surfaces cultivées représentent plus de 74% de territoire. Les activités économiques sont très dynamiques dans la région avec 157 sites Seveso, 2 aéroports et 3 gares TGV internationaux, 16 ports maritimes et fluviaux. En plus, la situation géographique de la région soumet à l'influence des masses d'air d'origine européenne et d'Île-de-France. En conséquence, les sources d'émissions atmosphériques sont nombreuses et diverses. Il est donc nécessaire d'améliorer les connaissances des sources et leurs évolutions, notamment les particules en suspension.

2.1.2. Santé de la population

Selon l'étude « Impact de l'exposition chronique à la pollution de l'air sur la mortalité en France - point sur la région Nord – Pas-de-Calais – Picardie »⁴⁰ : l'impact de l'exposition chronique aux particules fines (PM_{2,5}) a été estimé à environ 6 500 décès par an et une perte d'espérance de vie entre 11 et 16 mois dans les Hauts-de-France. Cela représente 13% de la mortalité totale de la région. La population de la région est exposée à des concentrations moyennes de particules fines comprises entre 11 et 17 µg/m³. Les zones les plus urbanisées présentent les concentrations les plus élevées, supérieures à 15 µg/m³. L'ensemble la population habite dans des zones exposées à des concentrations moyennes annuelles de PM_{2,5} dépassant la valeur recommandée par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) (10 µg/m³).

Rappelons toutefois que l'on passe 80% du temps en environnement intérieur. Dans ce contexte, la réduction du niveau d'exposition et des concentrations (extérieur et intérieur) est donc un sujet non négligeable pour la santé de population.

2.1.3. Dépassement des niveaux réglementaires

La région Hauts-de-France rencontre systématiquement des dépassements des niveaux réglementaires. En 2016, 15 épisodes de pollution avec une durée totale de 34 jours ont été constatés. Entre 2011 et 2015, 332 jours en dépassement des seuils réglementaires ont été comptabilisés avec 95% concernant les particules en suspension PM₁₀ et 3% de l'ozone. La mesure des PUF en routine permet de surveiller le nombre et la taille de particules pour la première fois dans la région, ce qui pourrait potentiellement nous aider à mieux comprendre la formation des nouvelles particules et les sources d'épisodes de pollution (e.g. source locale/régionale ? Si locale, quelle origine ?).

⁴⁰ H. Provost and C. Heyman, "Impact de L'exposition Chronique À La Pollution de L'air Sur La Mortalité En France : Point Sur La Région Nord – Pas-de-Calais – Picardie" (Santé publique France, June 2016), www.santepubliquefrance.fr.

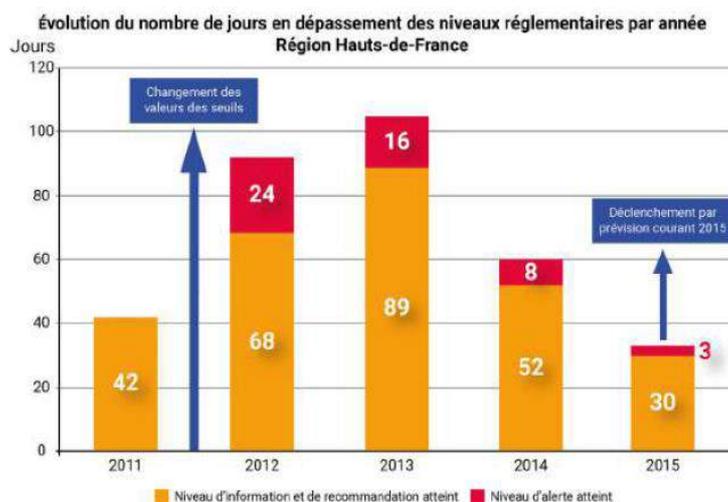


Figure 10 Evolution du nombre de jour en dépassement des niveaux réglementaires en région Hauts-de-France (PRSQA 2017-2021)

2.1.4. Identification des sources spécifiques

La mesure des PUF permet de compléter la caractérisation chimique des particules, l'identification des sources spécifiques dans la région, par exemple, la zone industrielle de Dunkerque, les émissions par les bateaux et avions... Les études de cas sont données dans la section 1.6.3.

2.1.5. Suivi des actions nationales et européennes

☐ PNSQA/PRSQA

Un Plan National pour la Surveillance de la Qualité de l'Air (PNSQA) a été élaboré pour la première fois pour la période 2016-2021. Celui-ci mentionne dans son objectif 1 « structurer le dispositif national pour répondre aux besoins d'observation - structurer les observations en demain » : « l'expérimentation du suivi d'autres polluants d'intérêt comme **les particules ultrafines** est par ailleurs à poursuivre dans une démarche d'anticipation à d'éventuelles réglementations à venir en tenant compte notamment des recommandations de l'ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) sur ce sujet »⁴¹.

Un Programme Régional de Surveillance de la Qualité de l'Air (PRSQA) 2017-2021 des Hauts-de-France a été récemment élaboré afin de répondre aux enjeux et problématiques du territoire sur la qualité de l'air extérieur et intérieur.

Il comporte 5 axes :

- Adapter l'observatoire aux nouveaux enjeux,
- Accompagner les acteurs dans l'action en faveur de la qualité de l'air,
- Communiquer pour agir,
- Se donner les moyens de l'anticipation,
- Assurer la réussite du PRSQA.

Dans un premier temps, la mise en place des analyseurs de particules ultrafines s'est inscrit dans l'axe D « Se donner les moyens de l'anticipation » du PRSQA, qui a proposé de « travailler sur les microcapteurs, analyseurs particules ultrafines » pour la période 2017-2018 et à partir de 2018 de « mettre en place des

⁴¹ Afsset, "Valeurs Guides de Qualité D'air Intérieur - Particules," Janvier 2010.

mesures de particules ultrafines et d'ammoniac en continu ». Les actions sont menées afin d'évaluer les performances du nouvel outil que constitue l'UFP 3031 et de mesurer les PUF en continue dans la région. Ces actions d'anticipation permettent d'interagir avec autres axes, par exemple dans l'axe A « approfondir la surveillance des particules » et « maintenir un suivi des polluants non réglementés en fonction des décisions du Conseil d'Administration », et axe B « accompagner les acteurs dans l'action en faveur de la qualité de l'air ».

CS PM

Dans le cadre de la stratégie de surveillance des particules au niveau national, la commission de suivi « Particules en Suspension » (CS PM) a été créée pour aider à la mise en conformité des mesures PM effectuées sur le territoire national basé sur la Directive 2008. Le GT PUF est attaché à cette commission.

La feuille de route 2014 de la CS PM propose de renforcer des travaux prévus par rapport aux besoins d'amélioration des connaissances sur les particules : « En fonction des besoins des travaux de modélisation et de mise en œuvre de méthodologies de quantification de la contribution des sources de polluants particulières, quels paramètres physico-chimiques à surveiller : (fraction(s) granulométrique(s)? Nombre? Composition chimique? ...)».

La mesure de PUF permet de répondre à cette proposition, en mesurant la granulométrie et le nombre des particules ultrafines.

PRSE

Des propositions d'actions régionales sur la surveillance des PUF peuvent être apportées durant l'élaboration du troisième Plan Régional Santé Environnement (PRSE) des Hauts-de-France 2017-2021.

Normalisation CEN

Un groupe de travail CEN (CEN/TC 264/WG 32) travaille actuellement à l'élaboration d'une méthode standard pour déterminer la concentration en nombre et en taille des particules ultrafines dans l'air ambiant.

2.1.6. Prise de conscience de la population et des décideurs sur les PUF

Les PUF sont encore peu connues du grand public et des décideurs par rapport aux $PM_{2.5}$ et aux PM_{10} . Il est ainsi nécessaire de leur faire prendre conscience des enjeux liés aux PUF, notamment par rapport à leurs effets sanitaires/environnementaux. De plus, la prise de conscience des décideurs sur les PUF aidera à la décision pour la planification des actions de réduction.

2.2. Objectifs du projet

2.2.1. Amélioration des connaissances sur les PM

Dans un premier temps, le projet PUF s'inscrit dans les actions d'Atmo Hauts-de-France menées pour l'amélioration des connaissances sur les particules. Il nous permet de développer les points suivants :

Amélioration de la connaissance de la partie la plus fine des PM

La concentration massique ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) est souvent utilisée pour décrire le niveau des PM (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ et PM_{1}). Par contre, les particules ultrafines représentent une masse négligeable en air ambiant, mais leur concentration en nombre est très élevée. L'unité pour mesurer les PUF est la concentration en nombre par centimètre cube (particules/ cm^3).

La mesure par UFP 3031 non seulement donne la concentration en nombre totale des PUF, mais aussi les informations sur la distribution granulométrique entre 20 nm et 800 nm. La Figure 11 représente la distribution moyenne entre le 02 et 06 Juin 2017 sur un site proximité du trafic à Lille (Leeds). Elle montre que les fractions les plus fines (20-50 nm) représentent les concentrations les plus élevées. Si on compare la courbe de granulométrie de notre mesure avec la littérature (Figure en bas à droite), elle est très proche de celles obtenues dans la littérature par la combustion de diesel. Cependant, ces résultats sont préliminaires. La comparaison avec le $\text{BC}_{\text{trafic}}$ et d'autres traceurs confirmeront cette hypothèse.

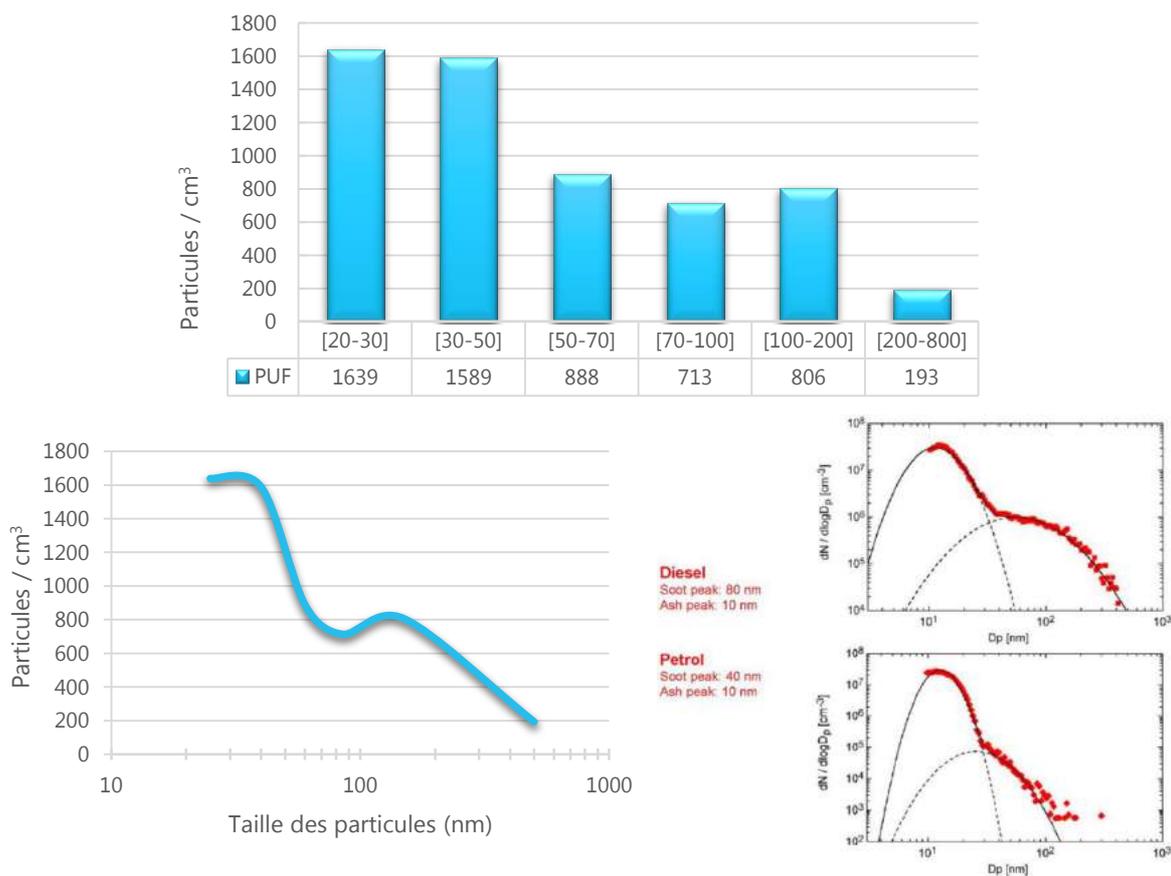


Figure 11 La distribution de taille (moyenne) pour le 2-6 juin 2017 à la station Leeds (Lille) et la comparaison avec la littérature⁴²

La mesure des particules ultrafines sera menée pour caractériser la variation spatiale (en différents typologies de l'environnement) et la variation temporelle (saisonniers et annuelle) dans la région.

⁴² 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.

☐ Identification des sources

La mesure des PUF est un moyen complémentaire avec les autres caractérisations chimiques pour chercher les sources PM. Les exemples donnés dans la section 2.1.4 montrent que les PUF peuvent aider à la distinction des émissions primaires et secondaires, à l'interprétation des épisodes de pollution et à d'autres sources spécifiques. Enfin, les mesures granulométriques sont un outil approprié dans la recherche de sources PM.

☐ PUF en air intérieur

Mieux connaître les PUF en air intérieur fait aussi partie de l'objectif du projet. En effet, les environnements clos sont influencés par tous types d'activités domestiques et par le niveau extérieur. La documentation des niveaux PUF en différents milieux intérieurs (écoles, habitations, transports...) est une étape essentielle pour les études épidémiologiques et les impacts sanitaires.

2.2.2. Alimenter et améliorer la modélisation

La plate-forme inter-régionale ESERALDA (EtudeS Multi RégionALes De l'Atmosphère) résulte de l'étroite collaboration de 5 Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) : Atmo Normandie, Airparif, Atmo Grand Est, Lig'Air et Atmo Hauts-de-France.

Les objectifs de cette plate-forme sont :

- Diffuser des informations et de prévisions la qualité de l'air au travers de cartographies et sur un large domaine,
- Disposer d'un potentiel commun d'études et de scénario locaux et inter-régionaux.

Dans la dernière version du modèle, il est possible de fournir l'information granulométrique des particules entre 10 nm et 40 µm. Il serait intéressant de comparer la mesure en temps réel et le calcul par la modélisation. En plus, les données de mesure peuvent aussi alimenter le modèle pour l'amélioration de la prévision et les cartes avec ces nouveaux paramètres (grande échelle et même fine échelle).

2.2.3. Compléter les mesures PUF au niveau national et européen

Les mesures PUF en France sont déjà réalisées par 3 AASQA et le LCSQA. Notre mesure dans les hauts-de-France permettra de compléter le réseau de surveillance PUF en France et Europe et comparer les niveaux de concentration et les distributions en taille.

Les échanges et les retours d'expérience réguliers entre les AASQA et le LCSQA sont indispensables pour la maintenance de l'instrument, l'échange avec le constructeur et le traitement de données.

2.2.4. Collaboration avec d'autres partenaires (unités de recherche, acteur santé...) et autres projets du territoire

Plusieurs collaborations sont envisagées avec d'autres partenaires et projets du territoire pour le projet PUF, ce qui permet d'enrichir et partager notre savoir-faire et nos compétences.

☐ Unité de recherche :

- Utiliser les instrumentations plus puissantes pour mieux caractériser les PUF (SMPS, CPC, AMS...) et assurer la qualité de notre mesure ;
- Réaliser des études sur les PUF en air intérieur avec les instrumentations appropriées ;
- Cotutelle d'une thèse sur un sujet spécifique.

☐ Acteur santé :

- Réaliser les études complémentaires (par exemple, air et santé) ;

Le programme de surveillance air et santé de Santé Publique France sera élargi à l'étude des maladies en lien avec la pollution, comme les pathologies cardio-vasculaires, le cancer et l'asthme. Les études épidémiologiques liées aux PUF à court et long terme constituent une nouvelle thématique qui pourrait être développée.

☐ Autres projets du territoire :

Éventuellement, la mesure des PUF permettra des collaborations sur des projets de modélisation, de l'impact du trafic, d'air intérieur, etc. La participation à ces différents programmes nationaux et internationaux renforce le lien entre « air » et les thématiques « santé », « climat » et « énergie ».

2.2.5. Valorisation des résultats

La valorisation des résultats peut être réalisée dans le monde de la recherche et également pour le grand public et acteurs territoires.

☐ Valorisation scientifique

Conférences & Congrès nationaux et internationaux

- CFA (Congrès Français sur les aérosols) (Paris) : Début 2018 (Poster ou oral, Atmo Hauts-de-France contribue à la partie état de l'art)
- JIQA (Journée Interdisciplinaire de la Qualité de l'Air) (Lille) : Début 2019
- EFCA (International Symposium on Ultrafine Particles) (Bruxelles) : Mai 2019

Articles scientifiques

- PUF mesurés par AASQA en France avec la participation d'Atmo Hauts-de-France

☐ Valorisation pour grand public/acteur territoire

Présenter les résultats au grand public et les différents acteurs territoires de façon concise et pédagogique.

2.3. Proposition d'actions

La question clé dans le projet c'est comment passer de la stratégie à l'action. Nous proposons 2 axes qui peuvent toujours se croiser et évoluer entre temps.

2.3.1. Axe 1 : à échéance du PRSQA (2-5 ans)

☐ Montée en compétence instrumentale

Tout d'abord, les actions sont priorisées pour une montée en compétence instrumentale :

- Assistance technique par INERIS : faciliter la mise en œuvre des appareils de mesure (UFP 3031) sur le terrain et leur utilisation grâce au guide de recommandations ;
- Mesure PUF en phase d'expérimentation et validation méthodologique jusqu'à fin 2017 ;
- Intercomparaison des deux appareils UFP 3031 pour une première évaluation des performances ;
- Participation au GT PUF / questions instrumentales.

☐ Documentation des niveaux de concentration en région

- Réaliser des campagnes avec différentes typologies en air ambiant (industrielle, proximité du trafic, urbain de fond, rural...);
- Réaliser des campagnes avec différentes typologies en air intérieur (écoles, habitats, bureaux, transports en commun...);
- Construction et validation de la base de données ;
- Participation au GT PUF / traitement des données.

☐ Positionnement par rapport aux territoires Français et étrangers

Les concentrations et la distribution de taille de particules ultrafines seront comparées aux mêmes types de sites en France et à l'étranger. Ce travail permettra :

- D'estimer les impacts des PUF par différentes sources ;
- De développer et améliorer la méthodologie homogène pour surveiller les PUF en routine en France et en Europe.

☐ Mener des actions par rapport à la problématique locale

Le dépassement de la réglementation des particules est une problématique pertinente dans la région. En plus, les sources et leurs évolutions dans l'atmosphère sont encore mal connues. La mesure des PUF joue un rôle complémentaire pour l'identification et la quantification des émissions locales, par exemple la zone industrielle de Dunkerque, les émissions spécifiques et peu documentées (les émissions par bateaux et avions), ...

☐ Echange avec les acteurs santé

Les échanges et collaborations avec les différents acteurs santé (Centre Hospitalier, Faculté de médecine, Agence régionale de santé, Santé publique France...) permettent d'étudier les impacts sanitaires toxicologiques et épidémiologiques des PUF (mortalité, maladies respiratoires, cardiovasculaire...). L'ensemble de ces études confirmera l'intérêt de la surveillance des PUF est de plus en plus privilégiée.

☐ Sensibilisation, communication et valorisation

La sensibilisation et la communication du projet commencera par annoncer le lancement du projet PUF dans la Newsletter d'Atmo et par un communiqué de presse. Un rapport d'étude permettra de donner la première d'analyse des PUF dans la région. L'organisation de la formation interne et des journées d'échange sont également importantes pour homogénéiser le niveau de connaissances au sein d'Atmo. Le bilan annuel « PUF » donnera une image plus complète de la variation spatiale et temporelle. La participation à des congrès et conférences et la publication d'articles scientifiques valorisera nos données de mesure.

Pour le grand public, Atmo Hauts-de-France préparera les éléments nécessaires pour la sensibilisation et la communication de la problématique PUF dans la région (qui pourra être mise à disposition pour d'autres territoires). Ensuite, les résultats de mesure seront communiqués de façon positive, diverse et compréhensible à tous les partenaires et au grand public.

2.3.2. Axe 2 : prospectives post-PRSQA (à partir de 5 ans)

☐ Pérenniser la mesure sur 1 ou 2 sites (ex. zone indus DK ou proximité trafic à Lille)

Ces sites pérennisés serviront comme surveillance en routine dans la région.

☐ Chercher l'originalité/ la complémentarité par rapport au GT PUF (et au-delà)

- Analyser la composition élémentaire par MET (Microscopie électronique en transmission) en collaboration avec les unités de recherche : ceci permet d'étudier différentes morphologies, compositions et microstructures des particules ultrafines.
- Scandale des moteurs truqués (écarts/conditions réelles) : la norme Euro 6 limite la masse et le nombre de particules émises sur un kilomètre, qui doivent être inférieurs à 4.5 mg et 6×10^{11} par kilomètre.

Une fois les normes fixées, il faut s'assurer qu'elles sont respectées, et pour cela, il est nécessaire de mesurer la quantité de particules fines présentes en masse et en nombre. Il peut y avoir jusqu'à un facteur 10 entre les émissions sur le banc d'essai et en conditions réelles dépend essentiellement du conducteur.

- Situation « Rue Canyon » :
La modification des caractéristiques de la couche limite atmosphérique par la présence d'une rue canyon affecte la température, la vitesse et la direction du vent et par conséquent le comportement des PUF dans la rue canyon.
- Emissions industrielles et port (en fonction des résultats de mesure)

☐ Investissement à partir de 2020 : en fonction de résultats/évolution/besoin de territoire

A partir de 2020, on réanalysera la stratégie en fonction de résultats, l'évolution de réglementation, et les besoins de territoire. Un investissement sera envisagé pour de nouvelles instrumentations.

☐ A partir de 2021, affiner la stratégie PUF dans le PRSQA 2022-2026

Pour le nouveau PRSQA 2022-2026, on affinera la stratégie pour approfondir la surveillance des PUF.

2.4. Choix de site/mode de mesure

2.4.1. Critères de choix des sites :

Les principaux critères à prendre en compte dans le choix des sites sont :

- Typologie du site : on sélectionne différents types des sites dans la région (proximité du trafic, industriel, urbain, rural, aéroport et port) ;
- Pour un même type de site, on étudie la concentration historique en PM_{10} et $PM_{2,5}$, les concentrations plus élevées seront choisies ;
- La distance entre la source d'émission et la station d'observation doit être la plus courte possible ;
- La densité de la population autour, notamment pour la question des impacts sanitaires ;
- Instrumentations complémentaires de la station, qui permet d'avoir un panel de mesure important ;
- La direction du vent (sous le vent de la source principale).

2.4.2. Station fixe pour une surveillance long terme

Une station fixe à Lille Leeds (proximité automobile) est choisie comme la station de surveillance PUF à long terme. Les paramètres mesurés dans la station sont $PM_{2,5}$, BC, NO_2 , NO et PUF. La Figure 12 montre la station, la tête de prélèvement et l'UFP 3031.



Figure 12 Photos de la station Leeds et d'un UFP 3031

2.4.3. Observation court terme

Le deuxième UFP 3031 sera utilisé pour l'observation à court terme dans différentes stations déjà existantes ou dans une unité mobile qui circulera dans la région.

Chaque site sera mesuré 4 fois (pour 4 saisons) ou 2 fois (été/hiver) avec la durée de campagne de 4 semaines.

Les stations proposées sont :

- Lille Five / Creil / Amiens (fond urbain)
- Dunkerque Port / Mardyck / Isbergues (Industrielle)
- Beauvais (aéroport)

- Boulogne-sur-Mer / Valenciennes Wallon / Roubaix Serres / Beauvais trafic (autres sites proximité automobile)
- Campagne-lès-Boulonnais / Cartignies (site ruraux)
- Dunkerque/ Calais (port)

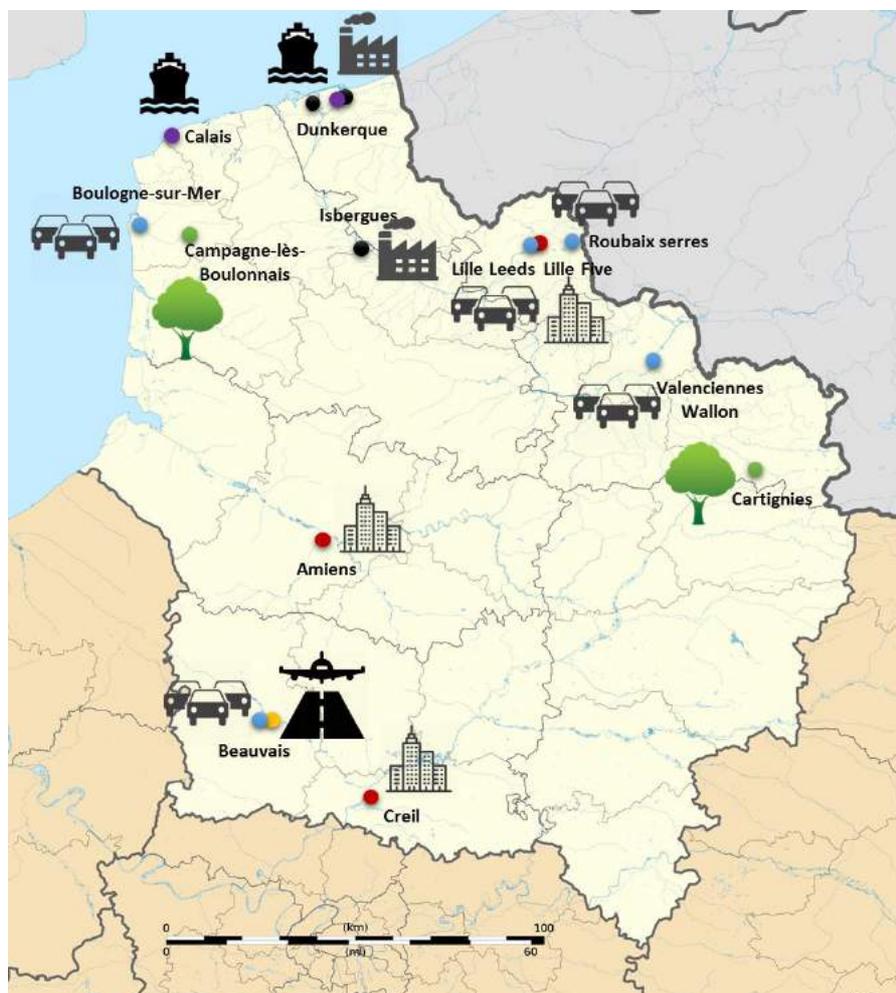


Figure 13 Sites d'observation PUF proposés en région Hauts-de-France

2.4.4. Paramètres à mesurer en parallèle

Pour mieux comprendre les sources d'émissions de PUF, il est important d'ajouter les autres mesures en parallèle.

Le BC mesuré par les aéthalomètres peut être distingué en BC_{ff} lié au trafic et BC_{wb} lié à la combustion de biomasse. On peut comparer le BC avec les PUF mesurés pour identifier leurs origines. Les traceurs liés aux émissions de moteur (automobiles, bateaux et avions) sont NO_2 , NO , CO , BC_{ff} , BTEX et SO_2 . La combustion de biomasse (le chauffage urbain, feu de forêt...) peut être observé par le suivi de BC_{wb} .

Le SO_2 est un traceur pour activités industrielles. L'ozone est un polluant dans la basse couche de l'atmosphère produit par la réaction photochimique.

Les autres paramètres de particules (PM_{10} , $PM_{2,5}$ et PM_1) peuvent être utilisés pour comparer concentration avec le nombre des PUF. L'ACSM (*Aerosol Chemical Speciation Monitor*) mesure la composition chimique (SO_4 , NH_4 , NO_3 , Org et Cl) dans les PM_1 -NR (non réfractaires).

Les paramètres météorologiques (direction et vitesse du vent, température, humidité relative ...) jouent les rôles importants dans la dispersion et la réaction physico-chimique des polluants. La combinaison des mesures des PUF et les traceurs permet d'identifier les sources et comprendre le processus de formation des particules.

2.5. Aspect technique

L'aspect technique est un point indispensable pour assurer la qualité des données. La maintenance régulière, les exercices d'intercomparaison et les échanges entre utilisateurs UFP 3031 sont les moyens à mettre en œuvre pour assurer une bonne mesure.

2.4.5. Maintenance UFP 3031

La maintenance périodique est nécessaire pour assurer la performance de l'instrument.

- Contrat avec TSI : les appareils sont envoyés chez le fournisseur pour l'étalonnage annuel, ce qui dure environ 3 semaines ;
- Vérification du bon fonctionnement : comparer la somme des PUF avec le compteur de particules ultrafines P-Trak[®] 8525 ;
- Maintenance de l'UFP 3031 selon la procédure standard et le guide de recommandation LCSQA (nettoyage de cyclone, nettoyage de colonne DMA, changement des filtres, test des fuites...);
- Maintenance la ligne de prélèvement régulièrement (nettoyage de cyclone PM₁₀ et PM₁, Nafion...).

2.4.6. Intercomparaison

Dans un premier temps, intercomparaison côte à côte des deux nouveaux UFP 3031 sur le site Lille Leeds jusqu'à fin 2017. Les résultats évaluent les écarts entre deux appareils. Il est toujours intéressant de comparer nos instruments avec autres AASQA et LCSQA. Les intercomparaisons avec les instrumentations laboratoires (SMPS, CPC...) permettent d'évaluer la précision, la limite de détection et les autres paramètres de l'UFP 3031.

2.4.7. Retour d'expérience

Les réunions GT PUF permettent de rassembler les différents utilisateurs AASQA, les LCSQA et les autres partenaires pour discuter de l'instrumentation, du traitement des données, de la communication, et des projets de collaboration.

3. Conclusion

Les particules ultrafines deviennent un sujet émergent à cause de leurs effets sanitaires même s'elles sont encore peu étudiées à l'heure actuelle. La partie « état de l'art » résume les connaissances et travaux déjà réalisés sur les PUF. La partie « stratégie » présente les enjeux et les actions pour mesurer les PUF dans la région Hauts-de-France.

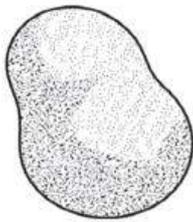
Nous mettrons en œuvre et validerons la méthodologie de mesure des particules ultrafines jusqu'à fin 2017. A partir de 2018, les premières mesures des PUF seront mises en route pour la région Hauts-de-France. Nous chercherons à identifier des caractéristiques pour différentes typologies (extérieur et intérieur), pour comprendre les phénomènes de formation des PUF, et pour mieux cerner les interactions avec les autres polluants.

De plus, la mesure des PUF nous aidera à mieux comprendre les problématiques régionales et locales (dépassement de réglementation, sources spécifiques, épisodes de pollution...). Ces bases de données pourront intégrer au niveau de surveillance national et Européen, ou encore aux acteurs de la santé pour des études épidémiologiques.

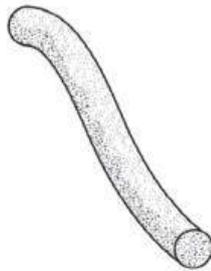
Cette stratégie des PUF n'est pas un plan figé : il pourra évoluer en fonction des besoins du territoire, des interactions avec les partenaires, et des résultats obtenus.

Annexes

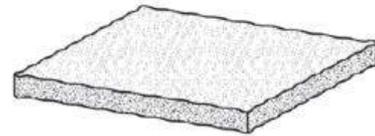
Annexe 1 : Illustrations représentant quelques formes de nano-objets⁴³



a) nanoparticule (3 dimensions externes à l'échelle nanométrique)

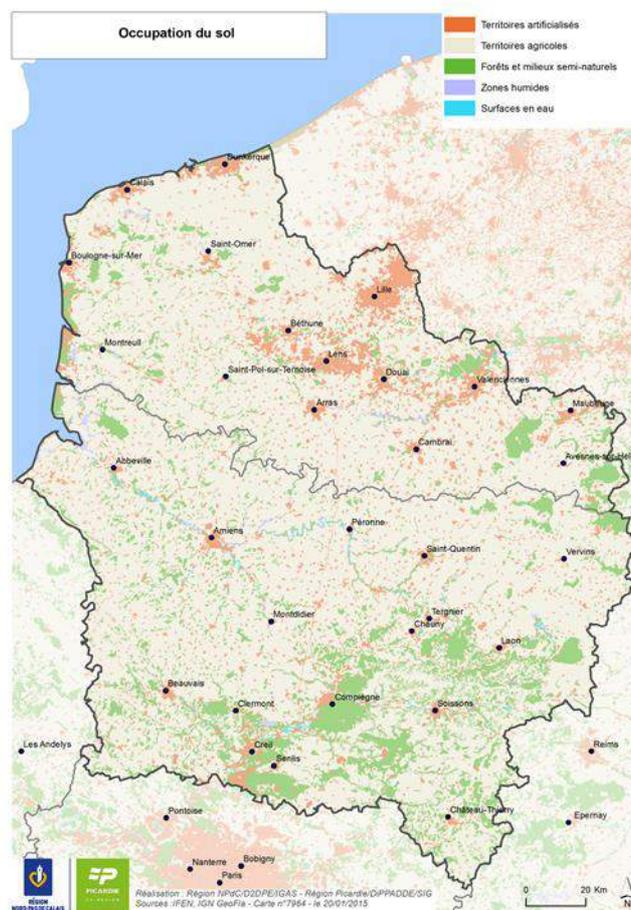


b) nanofibre (2 dimensions externes à l'échelle nanométrique)



c) nanoplaque (1 dimension externe à l'échelle nanométrique)

Annexe 2 : L'occupation du sol dans les hauts-de-France



(Source : <https://cartes.hautsdefrance.fr/?q=node/530>)

⁴³ "ISO/TS 80004-2:2015 Nanotechnologies -- Vocabulaire -- Partie 2: Nano-objets."



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

Atmo Haut-de-France

Observatoire de l'Air

55, place Rihour

59044 Lille Cedex

