



Campagne de mesure francilienne sur les particules ultrafines (PUF)

SITUATION DE FOND HIVER 2020-2021



**Campagne de mesure francilienne sur les
particules ultrafines (PUF) :
Situation de fond hiver 2020-2021**

Février 2022

AIRPARIF – L'Observatoire de l'Air en Ile-de-France

7 rue Crillon - 75004 PARIS

Tel : 01 44 59 47 64 – Fax : 01 44 59 47 67

www.airparif.fr

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	3
2. POLLUANTS MESURÉS	5
2.1. LES PARTICULES ULTRAFINES (PUF)	5
2.2. LE CARBONE SUIE (BC)	7
2.3. LES AUTRES MESURES DE COMPOSÉS PARTICULAIRES	9
3. CAMPAGNE HIVERNALE EN SITUATION DE FOND	10
3.1. STRATÉGIE ET IMPLANTATION DES SITES	10
3.2. INSTRUMENTATION	12
3.3. CONDITIONS RENCONTRÉES SUR LA PÉRIODE D'ÉTUDE	13
3.3.1. Météorologie sur la période	13
3.3.2. Qualité de l'air sur la période de la campagne	14
4. CARACTÉRISATION DU NOMBRE DE PUF EN SITUATION DE FOND EN PÉRIODE HIVERNALE	16
4.1. HIÉRARCHISATION DU NOMBRE DE PUF AU SEIN DE L'ÎLE-DE-FRANCE	16
4.2. VARIABILITÉ TEMPORELLE DES PUF	18
4.2.1. Évolution horaire	18
4.2.2. Profils moyens journaliers	18
4.2.3. Profils moyens hebdomadaires	21
4.3. ORIGINE DE LA POLLUTION	22
5. CARACTÉRISATION DU NOMBRE DE PARTICULES PAR CLASSES GRANULOMÉTRIQUES	25
5.1. PROFIL GRANULOMÉTRIQUE MOYEN : IDENTIFICATION DES SOURCES	27
5.2. ÉVOLUTION TEMPORELLE DU NOMBRE DE PARTICULES PAR CLASSE GRANULOMÉTRIQUE	29
5.2.1. Évolution horaire	29
5.2.2. Variabilité journalière	31
6. FOCUS SUR LES PÉRIODES D'INTÉRÊT	34
6.1. NIVEAUX LORS DE LA SEMAINE LA PLUS FAIBLE : JOURNÉE DE RÉFÉRENCE (22 DÉCEMBRE 2020)	34
6.2. COMPORTEMENT DES PUF SUR UN ÉPISODE DE COMBUSTION HIVERNALE (2 JANVIER 2021)	36
6.3. COMPORTEMENT DES PUF SUR UNE POLLUTION LIÉE À LA FORMATION D' AÉROSOLS INORGANIQUES SECONDAIRES	38
7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	41
RÉFÉRENCES	43
ANNEXE 1 : MATÉRIELS DE MESURE ET MÉTROLOGIE	45
ANNEXE 2 : BOITE À MOUSTACHE – DÉFINITION	50

1. Introduction

Comme leur nom l'indique, les particules ultrafines (PUF) sont encore plus petites que les particules réglementées (les particules PM_{10} et les particules fines $PM_{2.5}$). Leur diamètre est inférieur à 0,1 micron contre 10 et 2,5 microns respectivement pour les particules PM_{10} et $PM_{2.5}$. Ces particules proviennent de sources d'émissions variées et de processus physico-chimiques dans l'atmosphère, dont les procédés de combustion. Elles constituent un risque avéré pour la santé en particulier parce qu'elles pénètrent plus profondément dans l'organisme du fait de leur extrême petite taille. Compte-tenu de leurs enjeux sanitaires, l'Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) a insisté sur la nécessité de compléter et de pérenniser l'acquisition de données dans l'air ambiant pour les PUF et d'assurer un suivi particulier sur le long terme ([avis du 28 juin 2018](#)). Il est ainsi recommandé d'augmenter sur le territoire national le nombre de sites de mesures (couvrant des typologies variées d'implantation) pour les PUF, en assurant un suivi continu à long terme (ANSES, 2018). Dans sa communication de septembre 2021, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) conforte cette recommandation.

Certaines Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air ont entrepris des actions pour documenter, dans les différentes régions françaises, les niveaux de concentrations et leurs granulométries associées, en situation de fond et/ou sous l'influence de sources anthropiques (trafic routier, industries) en lien avec les problématiques de chaque région. Ce travail se généralise avec le Groupe de Travail national PUF piloté par le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA) et des financements associés au plan de relance 2021.

En Ile-de-France, les premières mesures exploratoires des PUF ont été initiées en 2003 par Airparif, en collaboration avec le LCSQA. Des campagnes de mesure de 5 semaines ont été réalisées de 2003 à 2010 en hiver et en été en 2005 à Gennevilliers. Ces premières campagnes de mesure ont apporté des éléments sur le nombre de PUF et les sources de ces particules ultrafines. Depuis fin 2019, Airparif suit les variations temporelles des niveaux en nombre des PUF par classes granulométriques au centre de l'agglomération parisienne grâce à l'implantation d'un appareil de mesure permanent sur le site urbain de fond Paris 1^{er} les Halles et financé par la région Ile-de-France.

Pour aller plus loin, Airparif et ses membres ont souhaité renforcer la connaissance des PUF, en menant une étude exploratoire d'évaluation de la variabilité spatiale et temporelle des niveaux en nombre et en classes granulométriques des PUF dans différents environnements en Ile-de-France. Airparif a lancé un programme d'étude sur plusieurs années visant à documenter les niveaux en situation de fond, le long du trafic routier et à proximité des plateformes aéroportuaires franciliennes Paris-CDG et Paris-Orly, via des campagnes de mesure successives de 3 mois (période hivernale / estivale). Ces études ont également pour objectif d'identifier les sources de PUF à partir des différences de profils granulométriques en fonction des environnements surveillés. Ces études permettront d'identifier les zones ou typologies nécessitant une surveillance approfondie ou permanente. Ces travaux sont cofinancés par Airparif, la Métropole du Grand Paris, la Ville de Paris, la communauté d'agglomération Paris Saclay, l'ARS et Aéroport de Paris.

Ce rapport présente les résultats de la première campagne menée en situation de « fond » qui correspond à une mesure d'ambiance générale de la pollution en période hivernale (du 1^{er} décembre 2020 au 28 février 2021) pour identifier un éventuel impact du chauffage. Ces mesures inédites avaient pour objectif de fournir pour la première fois des niveaux de référence et des comparaisons entre différents sites de fond de la région. Pour ce faire, en complément de la station de référence Paris 1^{er} Les Halles, 3 autres sites de mesures ont été instrumentés pour cette campagne exploratoire, 2 dans l'agglomération et 1 en zone rurale.

Le rapport est décliné en 5 parties. Les deux premières parties présentent respectivement les polluants mesurés durant la campagne et la mise en œuvre de la campagne. Les deux parties suivantes présentent les résultats d'abord en nombre total de PUF puis les profils granulométriques par classes de tailles. Pour finir, un focus est réalisé sur des journées spécifiques permettant d'illustrer les empreintes de sources spécifiques.

2. Polluants mesurés

Le terme « particules » désigne un mélange de polluants solides et/ou liquides en suspension dans un milieu gazeux. Les particules sont aussi appelées aérosols, notion qui inclut à la fois les particules et le gaz dans lequel elles se trouvent en suspension. Une distinction est faite entre les particules selon leur taille, d'une part, et selon leur composition chimique, d'autre part. **En fonction de leur taille, de leur source et de leur composition chimique, les particules ont un impact sur la santé, mais également sur le bâti, les écosystèmes et le climat. Cette étude cible les particules les plus fines de l'aérosol.**

2.1. Les Particules ultrafines (PUF)

Les particules ont des tailles qui peuvent varier sur près de six ordres de grandeur, de quelques fractions de nanomètres à une centaine de micromètres (Figure 1), ce qui en fait l'un des constituants les plus complexes de l'atmosphère. **On appelle Particules UltraFines (PUF) l'ensemble des particules ayant un diamètre aérodynamique compris entre 1 et 100 nanomètres (nm), soit de 0.001 à 0.1 micromètres (μm).**

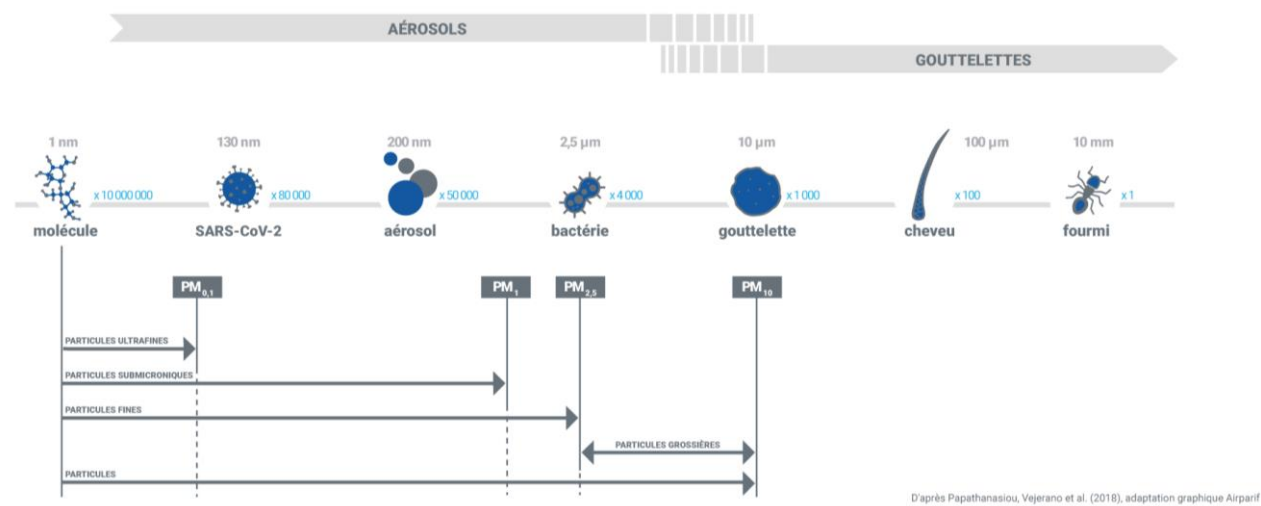


Figure 1 : Taille des particules - échelles et ordres de grandeur

Les réglementations française et européenne, mais également internationales, ainsi que les recommandations de l'OMS, portent actuellement essentiellement sur les concentrations massiques de particules PM_{10} et $\text{PM}_{2,5}$, donc les paramètres les plus mesurés. Néanmoins, la mesure seule de la masse ne permet pas de représenter correctement l'ensemble du spectre granulométrique d'un aérosol atmosphérique constitué de particules de dimensions très variables. Les concentrations de particules PM_{10} et $\text{PM}_{2,5}$ mesurées dans le cadre de la réglementation sont exprimées en masse par unité de volume à savoir des $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et non en nombre de particules par unités de volume comme les PUF. Pourtant, **les particules les plus fines qui représentent une faible masse de particules et contribuent donc peu à la masse de particules PM_{10} mesurées, sont présentes en très grand nombre.**

En moyenne, on estime que les PUF en zone urbaine représentent plus de 80 % du nombre de particules PM_{10} . En revanche, elles ne représentent que très peu en concentrations massiques :

1 particule de 10 μm = 1 000 particules de 1 μm = 1 000 000 000 particules de 10 nm.

Les PUF proviennent d'une multitude de sources d'émission et de processus de transformation physico-chimiques dans l'atmosphère. Comme pour les particules plus grosses, il faut distinguer les particules primaires des particules secondaires. **Les particules primaires sont directement émises dans l'atmosphère**, d'une part par les activités humaines, mais également par des sources naturelles. C'est notamment le cas des PUF émises par les sources de combustion. **Les particules secondaires ne sont pas émises directement dans l'atmosphère. Elles résultent de la transformation des polluants gazeux présents dans l'atmosphère**, tels que le dioxyde d'azote (NO₂), le dioxyde de soufre (SO₂), l'ammoniac (NH₃) et les Composés Organiques Volatils (COV). Les vapeurs gazeuses émises dans l'atmosphère se condensent et forment des particules de très petite taille, qui grossissent par coagulation ou fixation de la vapeur d'eau. Ceci peut s'accompagner d'une oxydation photochimique des composés, sous l'action du soleil.

La présence des PUF dans l'atmosphère constitue un risque avéré pour la santé humaine car leur faible taille leur permet de pénétrer profondément dans l'organisme, alors que les particules les plus grosses sont naturellement arrêtées par le nez. Plus les particules sont petites, plus elles vont pouvoir pénétrer et rester dans l'organisme (Figure 2).

Pénétration des particules dans l'organisme : (Schéma réalisé sur la base d'un dessin du Dr J. Harkema)

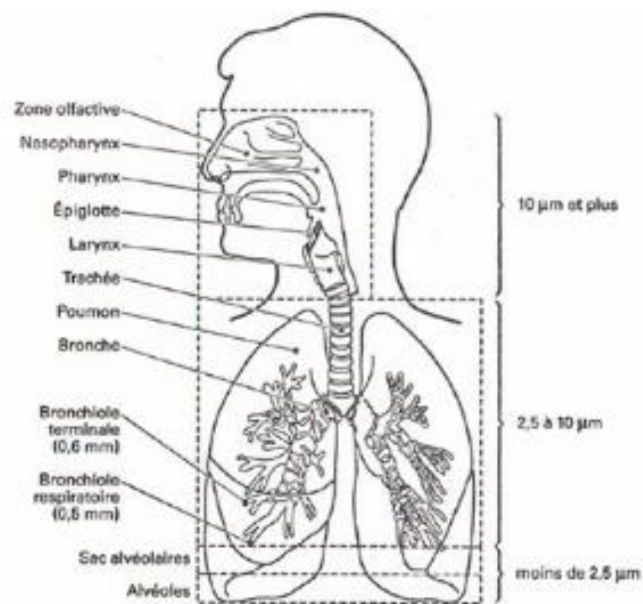


Figure 2 : Pénétration des particules dans l'organisme (Schéma réalisé sur la base d'un dessin du Dr J. Harkema).
(Source : www.santepubliquefrance.fr)

Les particules plus petites pénètrent dans les voies respiratoires profondes en proportion nettement plus importante que les particules plus grosses. Elles atteignent ainsi les alvéoles pulmonaires, par lesquelles s'effectuent les échanges gazeux entre l'air et le sang (ANSES, 2019) et persistent longtemps dans l'organisme, car elles résistent en partie aux processus d'élimination. Elles peuvent également passer dans le sang.

De plus, les très petites particules peuvent être en nombre très important, et elles offrent de ce fait une surface de contact plus importante que les grosses. D'autre part, les composés les plus toxiques se trouvent préférentiellement dans la fraction fine des particules. 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 (Belleudi et al., 2010 ; Chatignoux et al., 2013). Une étude estime que l'augmentation de 10 000 part/cm³ est associée à une augmentation de 4,27 % d'hospitalisation liées aux maladies (Samoli et al., 2016). Les PUF peuvent être transportées dans les régions du cerveau par l'inhalation (Oberdörster et al., 2004). 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 (Donaldson et al., 2002; Schins et al., 2004). Les PUF pourraient avoir un effet à long terme sur la santé neurologique (développement des performances cognitives de l'enfant) (ANSES, 2019). Il reste encore beaucoup d'incertitudes sur le comportement des PUF dans l'organisme. Il sera très important d'évaluer les effets à long terme : cancers, maladies neurodégénératives...

Compte-tenu de leurs enjeux en termes d'impacts sanitaires, l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) a insisté, dans son [avis du 28 juin 2018](#), sur la nécessité de compléter et de pérenniser l'acquisition de données dans l'air ambiant pour les particules ultrafines (PUF) et d'assurer un suivi particulier sur le long terme, tout comme l'OMS dans ses dernières recommandations de septembre 2021 (OMS, 2021).

2.2. Le carbone suie (BC)

Contrairement aux polluants gazeux, les particules ne constituent pas une espèce chimique unique et homogène. **Elles sont composées d'un mélange complexe de matière organique et inorganique.** Les particules sont composées majoritairement d'espèces carbonées (carbone élémentaire et carbone organique), d'espèces inorganiques (ions inorganiques, poussières minérales, métaux...) et d'eau. **La contribution relative de chacune de ces différentes espèces dépend essentiellement de la source de ces particules.** Elle est donc variable dans le temps et selon la typologie des sites.

Le carbone est présent sous deux formes : le carbone élémentaire (EC) et le carbone organique (OC). Les aérosols carbonés sont constitués d'un cœur de graphite entouré d'une pellicule composée d'un mélange complexe de composés organiques oxygénés. On parle de carbone élémentaire lorsque le noyau de graphite prédomine, et de carbone organique lorsque les fonctions organiques sont prépondérantes. La somme du carbone élémentaire et du carbone organique constitue le carbone total (CT).

Le carbone total représente, en Ile-de-France, la part majoritaire des particules PM_{2.5} avec plus 50 % de la masse totale (Airparif, 2021 a).

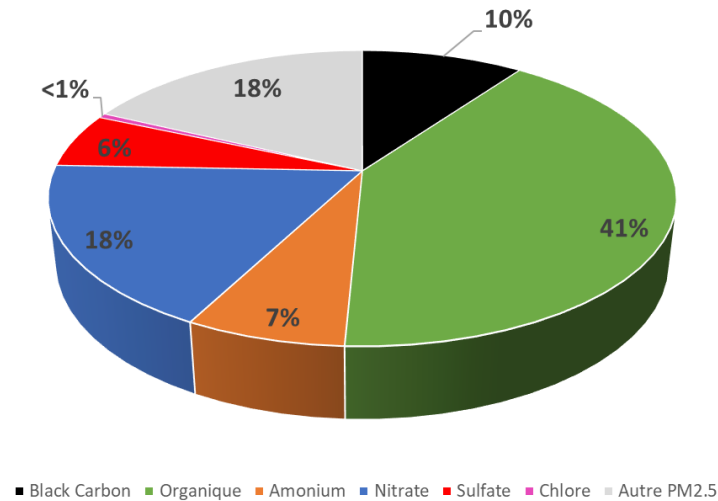


Figure 3 : composition chimique moyenne annuelle des PM_{2.5} en situation de fond urbain (Mesures ACSM / AE33)

Le carbone élémentaire, représentant 10 % de la composition chimique moyenne des PM_{2.5} en 2020, correspond au carbone graphitique amorphe. C'est sa couleur noire qui domine dans l'aérosol de pollution. On le désigne par le terme Carbone Élémentaire lorsqu'il est mesuré par méthodes thermiques ou thermo-optiques ou par les termes **Black Carbon (BC)** ou **Carbone Suie** lorsqu'il est mesuré par des méthodes optiques.

Le carbone suie est essentiellement d'origine anthropique et de petite taille. Il est formé lors de toute combustion, qu'elle soit de combustible fossile (charbon, gazole, essence, kérosène, gaz naturel...) ou renouvelable (bois, biomasse). **Il est émis à plus de 2/3 par des sources locales** (LCSE/Airparif, 2013 ; Petetin et al, 2014). **En Ile-de-France, c'est un bon traceur des sources de combustion, en particulier du trafic routier et du chauffage au bois.**

Les technologies actuelles de mesure permettent d'estimer de façon automatique et en temps réel la fraction de Carbone Suie issue de la combustion d'hydrocarbures (majoritairement liés au trafic routier en Ile-de-France) désignée par le terme BC_{ff} (fuel fossil), et la fraction issue de la combustion de la biomasse (chauffage au bois, brûlage de déchets verts...), désignée sous le terme BC_{wb} (wood burning). Cependant, ces deux paramètres ne représentent pas la concentration en particules primaires issues de ces deux sources. En effet, lors d'une combustion, le carbone suie est associé à de la matière organique primaire, en quantité plus ou moins importante selon la source de combustion. Les concentrations en PM₁₀ primaires attribuables à ces deux familles de sources peuvent être estimées au moyen de facteurs multiplicatifs, établis lors d'études dans des environnements spécifiques, issus de la littérature scientifique. Le guide méthodologique du LCSQA (LCSQA, 2020) préconise, pour une estimation des concentrations de particules primaires liées à la combustion, d'utiliser les facteurs multiplicatifs suivants :

- **PM_{ff} (équivalent PM₁₀) = 2 x eBC_{ff}**
- **PM_{wb} (équivalent PM₁₀) = 10 x eBC_{wb}**

Cela indique que la combustion de la biomasse génère en concentration massique environ 5 fois plus d'aérosols organiques que la combustion d'hydrocarbures.

Dans la suite du rapport, les concentrations des particules primaires issues des sources de combustion calculées à partir des mesures de BC (somme de PM_{ff} et PM_{wb}) seront désignées sous le terme PM_{combustion}.

2.3. Les autres mesures de composés particulaires

Cette étude ayant été menée sur des stations du réseau de surveillance d'Airparif, d'autres mesures sont également disponibles sur les sites.

La mesure de la concentration massique, en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en $\text{PM}_{2.5}$ et/ou PM_{10} réalisée sur les 3 sites permet d'illustrer les différences de résultats entre la mesure en nombre et la mesure en masse usuellement utilisée et actuellement réglementaire.

Des mesures composition chimique des particules sont également réalisées en continu sur le site de référence des Halles au cœur de Paris. Ces mesures, bien que réalisées sur un unique point de mesure, peuvent conforter et valider les sources identifiées sur les PUF.

- La matière organique est plus particulièrement émise par certains types d'activités, notamment la combustion de la biomasse.
- **Les particules inorganiques secondaires** sont formées par réaction chimique à partir des gaz dans l'atmosphère. Les ions les plus abondants impliqués dans ces réactions chimiques sont les sulfates (SO_4^{2-}), les nitrates (NO_3^-), l'ammonium (NH_4^+) et dans une moindre mesure les chlorures (Cl). La réaction entre ces ions forme des particules fines pouvant être à l'origine de phénomènes de pollution à grande échelle comme le sulfate d'ammonium ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) et le nitrate d'ammonium (NH_4NO_3). **Ces particules se situent en partie dans la fraction ultrafine ciblée dans cette étude.**

3. Campagne hivernale en situation de fond

La campagne de mesure, hivernale, a eu lieu du 1^{er} décembre 2020 au 28 février 2021. Les mesures ont été réalisées sur des sites de « fond ».

La typologie « fond » désigne des points de mesure qui ne sont pas sous l'influence directe d'une source locale identifiée. **Ils permettent une mesure d'ambiance générale de la pollution, représentative d'un secteur géographique plus ou moins large selon leur environnement** (à l'échelle d'un quartier dans Paris en proche couronne, et de plusieurs kilomètres carrés pour les stations rurales).

Actuellement, aucune étude sur la région parisienne ne permet de spatialiser les niveaux de PUF en situation de fond. **Cette étude permet de fournir des niveaux de référence sur différents sites de fond en Ile-de-France.**

3.1. Stratégie et implantation des sites

Cette étude visant à définir la variabilité spatiale et temporelle des niveaux en nombre de PUF par classes granulométriques en situation de fond, différentes stations permanentes du réseau de surveillance d'Airparif ont été choisies, en complément de la station de référence permanente de mesure des PUF Paris 1^{er} Les Halles caractérisant le fond parisien.

Trois autres sites de fond ont été instrumentés, deux sites de fond urbain en agglomération, dans des zones géographiques différentes et un site de référence en zone rurale.

Le premier site de fond urbain instrumenté pour cette étude est la station de Gennevilliers. Cette station est un point de mesure historique des PUF, c'est sur cette dernière que le suivi des PUF en Ile-de-France a été initié en 2003, en collaboration avec le LCSQA (Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air). Des campagnes de mesure de 5 semaines y ont été réalisées de 2003 à 2010 (LCSQA/INERIS/AIRPARIF, 2001 ; LCSQA/INERIS, 2003 ; LCSQA/INERIS, 2004 ; LCSQA/INERIS/EMD, 2005 ; LCSQA/INERIS/EMD, 2006).

Cette campagne de mesure ayant été conduite en période hivernale, un intérêt particulier a été donné à la station de fond périurbaine de Tremblay-en-France, située dans un quartier résidentiel marqué à cette saison par des émissions liées au chauffage au bois.

La station Zone rurale Sud située à Bois-Herpin a été choisie pour caractériser le niveau de fond régional ainsi que le gradient de concentration entre le cœur de l'agglomération et un site rural.

La figure 4 ci-dessous reprend les différents sites de mesure de cette campagne de fond.



Figure 4 : Cartographie des sites de l'étude PUF en situation de fond (Source Google Earth et Airparif).

Dans la suite de ce document des « noms courts » seront utilisés dans les graphiques. Les nomenclatures des sites de Paris 1^{er} Les Halles, zone rurale Sud, Tremblay-en-France et Gennevilliers seront respectivement PA01, RUR_S, TREMB, GEN.

3.2. Instrumentation

Les polluants particulaires sont mesurés grâce à des analyseurs automatiques permettant d'obtenir des données en temps réel sur des résolutions temporelles fines. Les analyseurs utilisés pour réaliser cette campagne de mesure sont les mêmes que ceux utilisés pour la surveillance continue sur le réseau de mesure francilien. Les données utilisées pour réaliser cette analyse ont été moyennées sur une **base horaire et sont affichées dans la plupart des figures en heure universelle (TU = Heure légale-1)**, pour les suivis temporels horaires.

Le comptage par classe granulométrique est effectué avec un SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) qui est composé d'un DEMC (Differential Electrical Mobility Classifier), qui sélectionne les particules suivant leurs tailles granulométriques en fonction de leurs mobilités électriques, et d'un CPC (Condensation Particle Counter), qui a pour but de les compter après les avoir fait grossir. L'unité affichée pour ces données de comptage est l'unité usuelle en nombre de part/cm³.

L'instrumentation de mesures de BC en complément des mesures PUF lors de cette étude a permis d'identifier les sources des PUF observées. De plus, les particules de carbone suie étant de petite taille, elles se retrouvent dans les PUF. Cette instrumentation a permis également d'étudier la corrélation entre le BC et les PUF. **La mesure massique du BC est réalisée par un aethalomètre multi longueur d'onde** qui, de par son principe de fonctionnement, permet de faire la distinction entre les particules carbonées issues d'une combustion d'hydrocarbures (eBCff) et issues d'une combustion de biomasse (eBCwb). Cette mesure est réalisée dans la fraction PM_{2.5}.

Les mesures massiques des particules organiques et inorganiques sont réalisées avec un spectromètre de masse du type ACSM (Aerosol Chemical Speciation Monitor). Cette mesure spécifique est réalisée sur la fraction PM₁.

Les mesures massiques PM₁₀ et/ou PM_{2.5} ont été réalisées avec le matériel de référence utilisé pour la mesure réglementaire des particules.

Les mesures mises en œuvre pour la réalisation de la campagne de mesure sont résumées dans le tableau 1 et les spécificités techniques de ces analyseurs sont précisées en Annexe 1.

Mesures campagne					
Station de mesure	Particules Ultrafines 5 nm - 400 nm	BC dans les PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₄ ⁻ , Org, NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺ , Cl ⁻ dans les PM ₁
Paris 1er - Les Halles	●	●	●	●	●
Gennevilliers	●	●	●	●	
Tremblay-en-France	●	●		●	
Zone rurale Sud - Bois Herpin	●	●	●	●	

Tableau 1 : Paramètres mesurés pour la campagne PUF en situation de fond

3.3. Conditions rencontrées sur la période d'étude

Les années 2020 et 2021 ont été des années très particulières, du fait de la crise sanitaire liée à la Covid-19 et des mesures gouvernementales adoptées pour y faire face. Ces différentes mesures ont entraîné une réduction importante des émissions de polluants, notamment celles issues du trafic routier et aérien. Toutefois, durant la période d'étude, de décembre 2020 à février 2021, seules les 15 premières journées ont été concernées par un confinement national.

Sur ces mois de campagne, les études menées par Airparif sur les émissions atmosphériques montrent un retour quasi à la normale en comparaison à 2019 illustrant sur cet hiver 2020-2021 des émissions significatives et conformes à une période hivernale sur la région francilienne.

Les variations des niveaux de pollution d'un jour à l'autre sont liées d'une part à l'évolution des émissions de polluants par les sources locales, mais également aux conditions météorologiques, qui ont une influence sur la dispersion de ces polluants. Ainsi sur la période hivernale, lorsque les conditions météorologiques sont favorables à la dispersion des polluants (vent soutenu, pluie...) et les températures sont douces, les niveaux de pollution sont généralement plus faibles. A l'inverse, les conditions anticycloniques, avec vent faible, associées à des températures froides, peuvent entraîner une accumulation des émissions polluantes. Ces journées hivernales peuvent engendrer des dépassements des seuils réglementaires marqués par une part importante d'émissions liées au chauffage au bois.

3.3.1. Météorologie sur la période

En termes de météorologie, selon Météo France, **les trois mois d'étude complètent la longue succession des mois plus chauds que la normale depuis juin 2019.** Les températures mensuelles se situent respectivement à 2°C, 0,2°C et 1,8°C au-dessus des normales.

Le mois de décembre a été très pluvieux. C'est le 3ème mois de décembre le plus arrosé depuis 1980, derrière 1999. Le temps souvent perturbé a généré un vent fréquemment orienté du sud-est au sud-ouest. Il n'est pas très marqué les deux premières décades, mais il s'affole quelque peu au passage de la tempête Bella le 27.

En janvier, les températures sont inférieures aux normales en 1ère décade. Par la suite, des pics de douceur alternent avec de brefs épisodes froids. Ce mois de janvier est pluvieux. Quelques chutes de neige sont observées le 24 et surtout le 16, avec une tenue temporaire de quelques cm au sol. Le temps perturbé donne parfois des épisodes de vents forts à partir du 20.

Malgré un épisode de froid remarquable et un épisode neigeux entre le 9 et le 12, février parvient quand même à être nettement plus chaud que la normale. Malgré une première semaine pluvieuse avec une succession de perturbations, le mois de février reste pauvre en pluie.

Ces conditions météorologiques ont engendré sur les trois mois de l'étude des secteurs de vent majoritairement issus du secteur Sud-Ouest. Ce flux océanique a entraîné **des conditions globalement dispersives et un hiver peu propice à des conditions anticycloniques** observées généralement par flux de Nord-Est, peu représentées sur la période d'étude. La fréquence des directions de vents enregistrée sur la station Météo France de Montsouris est représentée sur la rose des vents figure 5.

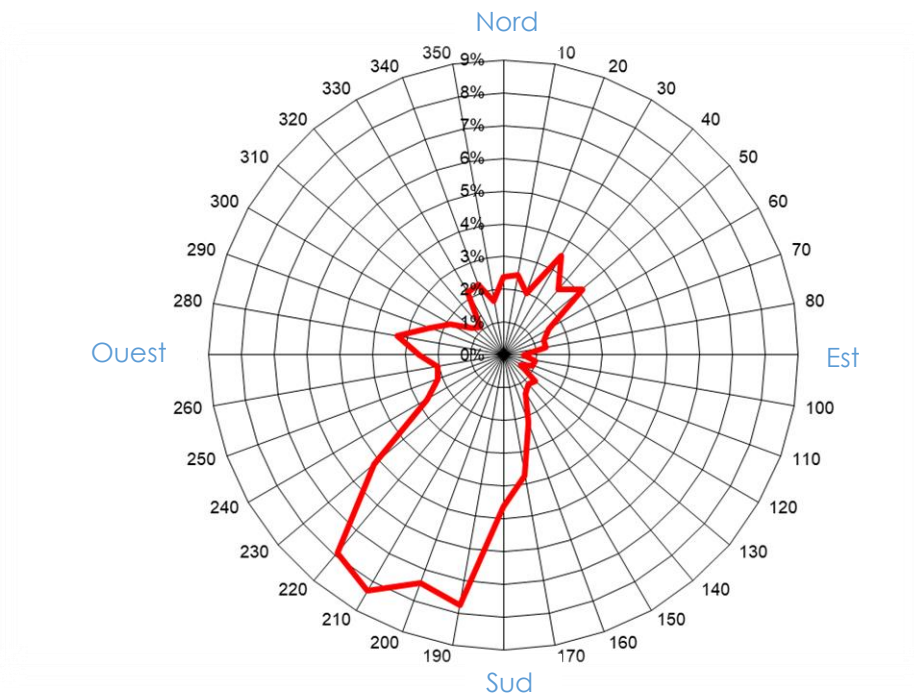


Figure 5 : Rose des vents sur la période d'étude à Paris-Montsouris (Source : Météo-France)

3.3.2. Qualité de l'air sur la période de la campagne

Les concentrations en NO_2 , PM_{10} et $\text{PM}_{2.5}$ mesurées durant la campagne de mesure (décembre 2020-février 2021) sont plus faibles que celles mesurées lors des mêmes mois, de 2017 à 2019 (Figure 6). Pour le NO_2 , une diminution des concentrations comprises entre 15 et 35 % est observée sur les stations de Paris 1^{er} – Les Halles, Gennevilliers et Tremblay. Cette diminution est liée à plusieurs facteurs : une baisse tendancielle depuis plusieurs années du fait des mesures de réduction d'émissions engagées tant localement qu'au niveau national et européen, à laquelle s'ajoute le rôle des conditions météorologiques, particulièrement dispersives pendant la campagne de mesure. A cela peut également s'ajouter, principalement pour le NO_2 , un impact conjoncturel des mesures de restrictions d'activités mises en place pour lutter contre la pandémie de COVID-19. En effet, les 15 premiers jours de campagne ont été marqués par un confinement, bien que moins strict que début 2020, et la suite de la campagne par un recours plus important au télétravail qui a limité les émissions liées au trafic routier. L'évaluation de l'impact de ces mesures réalisée par Airparif a montré que cet impact était plus visible dans Paris, là où la densité d'urbanisation engendre une densité d'émissions habituellement très importante, ce qui peut expliquer l'écart plus grand observé sur la station de Paris 1^{er} Les Halles (Airparif, 2021 b). Cet écart entre les stations n'est pas observé sur les particules. En effet, l'impact des mesures de restrictions d'activité est bien moindre sur les particules, en raison d'une plus grande diversité de sources.

La période de campagne a présenté des journées avec de très faibles concentrations en polluants, comme la période du 21 au 27 décembre 2020, où les conditions météorologiques ont été très favorables à la dispersion, avec notamment un vent bien établi de secteur ouest, des précipitations et des températures relativement douces pour la saison.

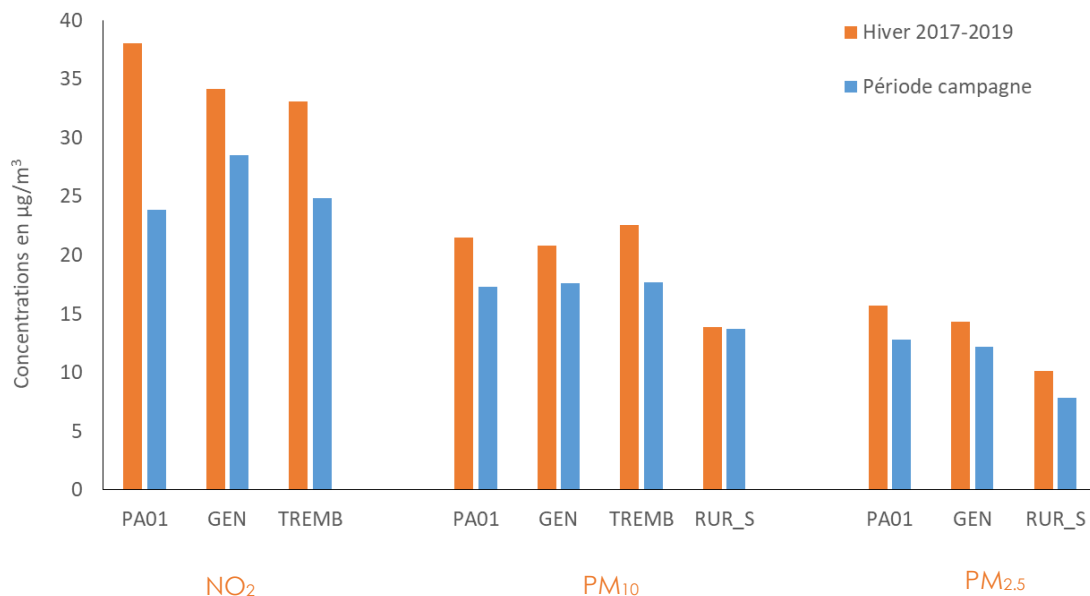


Figure 6 : Concentrations en µg/m³ en NO₂, PM₁₀ et PM_{2.5}, mesurées sur différentes stations du réseau Airparif lors des hivers 2017 à 2019 et pendant la campagne de mesure (décembre 2020 – février 2021).

Certaines journées ont tout de même présenté de fortes concentrations en polluants, notamment en particules, ayant mené à des dépassements de seuils journaliers. Ainsi, la journée du 2 janvier 2021 a connu un dépassement du seuil d'information et de recommandations pour les PM₁₀ avec comme source majoritaire la combustion de biomasse. De même, les journées du 22, 24 et 25 février ont dépassé le seuil d'information et de recommandations pour les PM₁₀ avec comme sources principales la combustion de biomasse, la formation d'Aérosols Inorganiques Secondaires et l'import de sable saharien.

4. Caractérisation du nombre de PUF en situation de fond en période hivernale

La campagne de mesure menée par Airparif sur la **période hivernale 2020/2021** a permis de recueillir des données de comptage de particules ultrafines sur la gamme de mesure 5 à 100 nm sur les différents sites présentés précédemment. Ces données résultent de la somme des comptages des 83 classes enregistrées par l'analyseur SMPS comprise sur cette gamme granulométrique représentative des PUF. Les résultats spatiaux temporels obtenus sont décrits dans cette partie.

4.1. Hiérarchisation du nombre de PUF au sein de l'Ile-de-France

La figure 7 présente les concentrations moyennes des différents paramètres de la pollution particulaire suivis dans cette étude :

- la concentration de PUF en nombre (en part/cm³) sur la période pour chacun des sites.
- la concentration massique en PM₁₀ (en µg/m³),
- la concentration massique (en µg/m³) des particules PM₁₀ issues des sources de combustion PM_{combustion}.

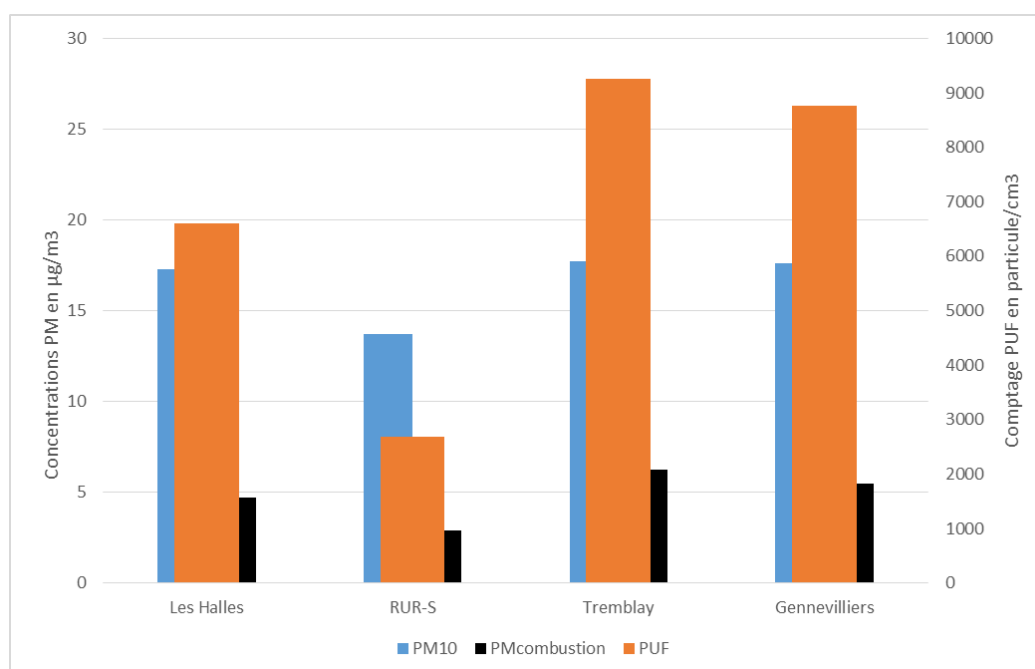


Figure 7 : Moyenne des polluants particulaires mesurés sur la période d'étude.

Le comptage moyen du nombre de PUF dans la gamme 5 à 100 nm met en évidence une variabilité importante du nombre de particules ultrafines entre les sites de fond francilien. Les niveaux de PUF les plus bas sont enregistrés sur le site rural, éloigné des sources de l'agglomération parisienne. Les niveaux les plus soutenus sont relevés sur les sites de fond urbains avec une différence notable entre le site de Paris 1^{er} Les Halles et les sites de Gennevilliers mais surtout de Tremblay-en-France.

Sur la période d'étude, les concentrations horaires moyennes en nombre de PUF de la région Ile-de-France sont comprises entre 2700 part/cm³ pour le site rural et 6600 à 9300 part/cm³ sur les sites urbains. **Les sites de Tremblay et Gennevilliers enregistrent ainsi une concentration en nombre de PUF plus de 3 fois supérieure à celle du site rural Sud, qui s'expliquent par les sources urbaines locales.** Le site de Paris 1^{er} Les Halles, situé dans un jardin, et plus éloigné des sources, notamment

des axes routiers, relève des niveaux plus faibles que les deux autres sites urbains, implantés dans le tissu urbain, au milieu des habitations.

Ces concentrations relevées sur la zone urbaine francilienne sont conformes aux niveaux observés dans les autres régions françaises. Les dernières publications sur la thématique montrent des concentrations urbaines au niveau national comprises entre 4000 et 12000 part/cm³ (Atmo GE, 2020 ; Atmo HDF, 2020 ; Atmo Sud, 2017 ; Atmo AURA, 2016).

La figure 7 montre que les concentrations massiques de particules, tant en PM₁₀ totales qu'en PM₁₀ issues des sources de combustion (PM_{combustion}), sont également plus importantes en zone urbaine qu'en zone rurale, caractérisant une source de particules en zone urbaine. Néanmoins, l'écart est plus marqué sur la mesure en nombre de PUF que sur les PM_{combustion} et surtout que sur les PM₁₀ totales. Alors que les sites de Tremblay et Gennevilliers enregistrent une concentration en nombre plus 3 fois supérieure au site rural Sud, cet écart est de 1.6 à 2 sur les PM_{combustion} et de 1.3 sur la concentration massique en PM₁₀. Cela peut s'expliquer par une plus grande diversité de sources de PM₁₀, dont certaines impactant toute la région et pas seulement la zone urbaine, et confirme que les sources d'émission de particules liées aux activités humaines, très denses en zone urbaine, constituent une source importante de PUF.

La figure 8 illustre la dispersion des données horaires sur les différents sites entre la mesure PUF et la mesure PM₁₀. La représentation graphique sous forme de boîte à moustache permet de caractériser cette dispersion avec une « boîte contenant 50 % des données » et des valeurs atypiques représentées sous forme de points. La définition de la représentation graphique « boîte à moustache » est précisée en annexe 2.

Les valeurs extrêmes, représentées par des points noirs sur le graphique, montrent l'impact ponctuel de sources locales de PUF, majoritairement présentes sur les sites urbains de petite couronne. Sur les concentrations en PM₁₀, les valeurs extrêmes semblent davantage liées à des événements observés à l'échelle de la région francilienne.

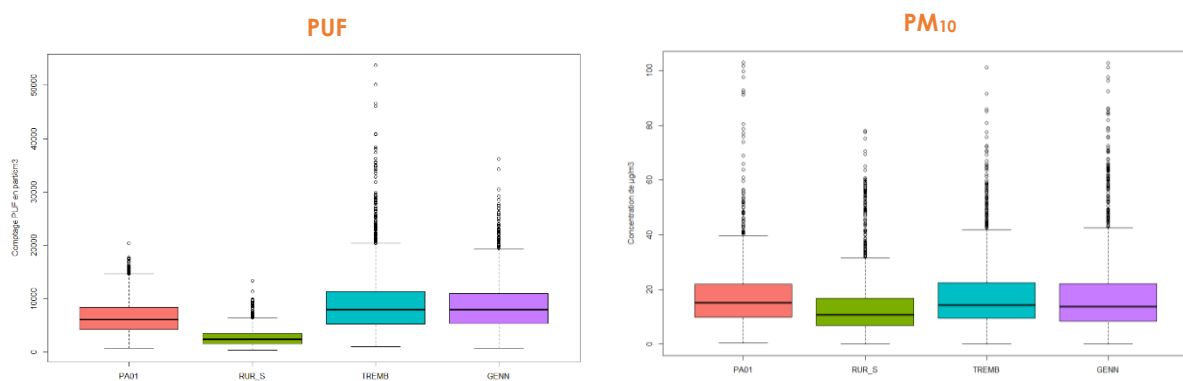


Figure 8 : Boîte à moustache des concentrations horaires en PUF et PM₁₀ du 1^{er} décembre 2020 au 28 février 2021

Ces mesures de PUF vont donc permettre d'affiner notablement l'information sur les impacts des sources urbaines de combustion par rapport aux mesures réglementaires en masse.

4.2. Variabilité temporelle des PUF

4.2.1. Évolution horaire

À l'échelle horaire, l'évolution temporelle de la concentration en nombre de PUF sur les 4 sites de l'étude montre une plus forte dynamique sur les sites urbains que sur le site rural (Figure 9). Le site Zone rurale Sud, représenté en vert sur la figure 9, caractérise le niveau de fond minimum sur la région Ile-de-France, avec très peu d'influence liée à des sources locales. **Les 3 sites urbains enregistrent des pulsations bien plus importantes associées aux émissions anthropiques issues de la zone urbaine dense.** Ce constat est particulièrement bien visible sur le site de Tremblay, présenté en bleu sur la figure 9, avec de nombreux pics relevés pouvant atteindre des concentrations de plus de 50 000 particules/cm³. La dynamique des sites de Paris 1^{er} Les Halles et de Gennevilliers est un peu moins marquée.

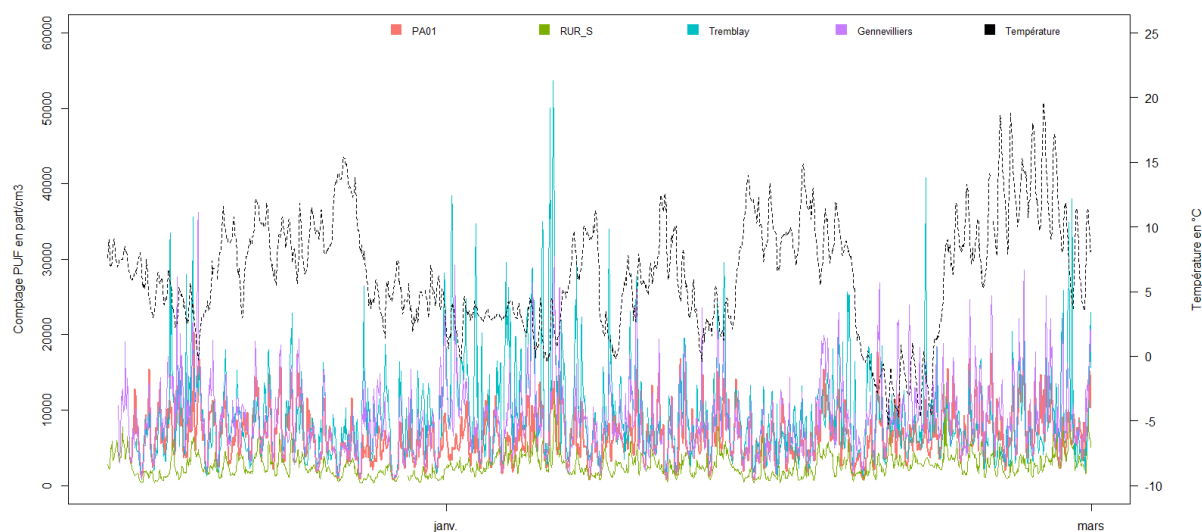


Figure 9 : Évolution temporelle du nombre moyen horaire des PUF (de 5 à 100 nm, en particule/cm³) en situation de fond et de la température sur le site de Montsouris (Source Météo-France).

Sur la durée de l'étude, il se dégage quatre périodes présentant des niveaux plus soutenus : au début du mois de décembre, la première quinzaine de janvier et en début et fin du mois de février. Ces périodes sont en lien avec les conditions météorologiques rencontrées et particulièrement la température, illustrée en noir sur la figure 9. Sur les deux premiers mois de l'étude, de décembre et janvier, il apparaît clairement que les concentrations en nombre de PUF les plus fortes sont rencontrées quand les températures sont les plus faibles. **Sur ces périodes, ce comportement pourrait être lié à un impact plus important des émissions de particules du chauffage résidentiel.** Ce constat réalisé sur les deux premiers mois semble aussi vérifié sur le mois de février avec les pics les plus importants enregistrés lors de franches baisses des températures.

4.2.2. Profils moyens journaliers

L'étude des profils moyens temporels permet de caractériser le comportement général des polluants étudiés à l'échelle de la journée.

La figure 10 représente l'évolution du nombre de PUF au cours de la journée, en moyenne sur la campagne, sur les 4 sites d'étude. L'enveloppe de couleur représente l'espace interquartile, qui correspond à l'intervalle dans lequel sont comprises au moins 50 % des données de l'heure considérée, de manière à illustrer la variabilité des données moyennes horaires.

À l'échelle de la journée, les sites urbains présentent un cycle journalier bien marqué avec une montée du nombre de PUF le matin et le soir. La montée du soir est plus importante que celle du matin. Cette augmentation significative en soirée est plus marquée sur le site de Tremblay que sur le site de Gennevilliers, qui présente pourtant le même ordre de grandeur en comptage sur la montée du matin, ce qui oriente vers une source de PUF propre au site de Tremblay en soirée.

Le site de Paris 1^{er} Les Halles, représenté en rouge, est moins impacté par les sources matinales mais surtout par les sources sérotinales, avec une très légère hausse des concentrations maximales obtenues le soir au regard du matin. Cela s'explique par l'implantation de la station parisienne au cœur des jardins des Halles, situation plus éloignée des sources urbaines, notamment des axes routiers majeurs que les sites de Gennevilliers et Tremblay-en-France se situant dans des zones fortement urbanisées.

Ce profil journalier urbain « **double bosse** » est caractéristique de la pollution aux particules en zone urbaine (voir paragraphe ci-dessous).

À contrario des sites urbains, le site zone rurale Sud-Bois-Herpin montre des concentrations relativement stables avec très peu de variabilité. Le pic du matin n'apparaît pas, une très légère montée est observée le soir. Sur le site rural, les niveaux les plus élevés sont relevés le soir et la nuit. **Ce site caractérise le niveau de base des PUF en Ile-de-France.**

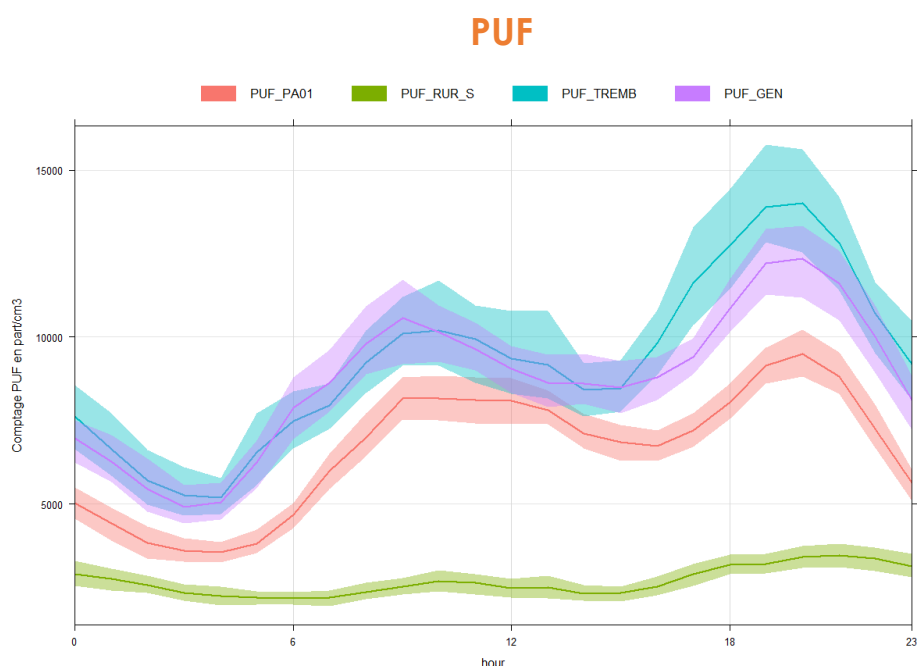


Figure 10 : Profils moyens journaliers du nombre de PUF (Hiver 2020-2021)

La figure 11 page suivante illustre les profils moyens journaliers des concentrations du Carbone Suie émis par la combustion des hydrocarbures (essentiellement par le trafic routier) (eBC_{if} à gauche) et par la combustion de la biomasse (essentiellement par le chauffage au bois en hiver) (eBC_{wb}, à droite).

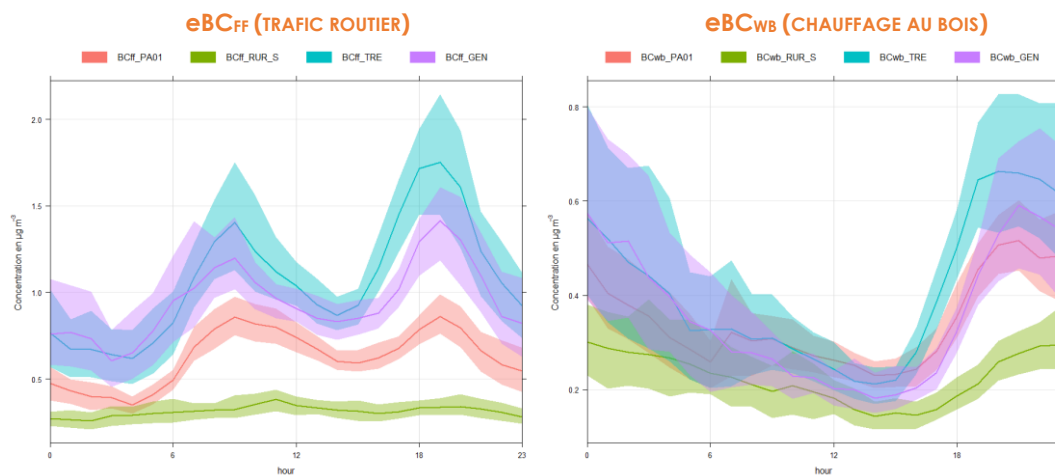


Figure 11 : Profils moyens journaliers des concentrations moyennes horaires en Carbone suie : eBC_{ff} (à gauche) et eBC_{wb} (à droite) (Hiver 2020-2021)

Le profil moyen journalier du carbone suie issu du trafic routier (BC_{ff}) présente, comme les PUF, un cycle journalier à deux bosses, caractéristique de la pollution urbaine avec, quel que soit le site urbain de mesure, un pic plus important le matin (entre 6h et 12h), en lien avec le trafic routier. Le cycle journalier des polluants primaires est largement gouverné par les conditions dispersives, en particulier la hauteur de couche limite, qui détermine le volume d'air dans lequel les polluants vont disperser les émissions. Cette hauteur de couche limite est généralement minimale le matin et, dans une moindre mesure, le soir et elle est maximale en milieu de journée. A l'évolution de ces conditions dispersives, se rajoute le cycle des émissions locales, avec un maximum d'émissions à l'heure de pointe du matin, au moment où les conditions de dispersion sont les plus défavorables, et un pic le soir, plus intense et moins étalé, dû à la baisse de la hauteur de couche limite associée à l'étalement des heures de retour travail-domicile en Île-de-France. Ce cycle n'est pas observé sur le site Zone rurale sud, du fait de l'absence d'axes routiers importants à proximité de la station de mesure.

Les concentrations maximales de carbone suie issu de la combustion de biomasse (BC_{wb}) sont enregistrées entre 18h et 6h. En période hivernale, le chauffage au bois est utilisé plus généralement en début de soirée jusqu'au matin. Le cycle journalier est plus marqué sur les sites de grande couronne, Gennevilliers et surtout Tremblay-en-France que dans Paris intra-muros sur le site des Halles. Sur le site rural sud, le BC_{wb} présente une dynamique similaire au site urbain mais bien moins marquée du fait du faible nombre de sources d'émissions engendrant des concentrations plus faibles.

En comparaison aux profils journaliers du carbone suie, le cycle journalier des PUF est très similaire au cycle du BC_{ff}, avec des concentrations néanmoins plus fortes observées le soir, qui résultent de la **superposition des deux sources urbaines de combustion trafic et chauffage au bois.** Le site rural sud subit très peu d'influence du trafic routier (pas de pic le matin) et une légère montée le soir attribuée à la combustion de biomasse en zone rurale, moins marquée cependant qu'en zone urbaine.

Ces résultats permettent de pointer les deux sources majoritaires de PUF sur la zone urbaine, le trafic routier et le chauffage au bois. Ces deux sources semblent être responsables de la dynamique générale du nombre des PUF en Ile-de-France.

4.2.3. Profils moyens hebdomadaires

La figure 12 représente le profil moyen journalier de la concentration en nombre de PUF et des concentrations en eBC_{ff} et eBC_{wb} selon le jour de la semaine. À l'échelle hebdomadaire, les profils des concentrations en nombre de PUF sont reproductibles sur les jours ouvrés, laissant apparaître la double bosse observée sur le profil moyen journalier décrit en 4.2.2. Le samedi et le dimanche, le pic de PUF du matin n'est visiblement plus présent. Ce constat est à mettre en lien direct avec les concentrations en BC_{ff} qui affichent très peu de dynamique sur le week-end en raison de la baisse des émissions du trafic le week-end, à l'exception du dimanche soir, où un pic est de nouveau observé (retour de week-end). **Ce constat valide la contribution du trafic routier comme source principale de PUF le matin sur les jours ouvrés.**

Les concentrations en PUF les plus fortes sont enregistrées le vendredi, samedi et dimanche soir sur le site de Tremblay-en-France. Contrairement à celles du carbone suie « trafic », les variations enregistrées pour le carbone suie « biomasse » sont différentes en fin de semaine, à partir du jeudi. **Cela s'explique par un plus grand recours au chauffage au bois le week-end que la semaine.** Cet impact est plus marqué sur la concentration en nombre de PUF que sur les concentrations massiques en BC, fournissant une information complémentaire précieuse dans la recherche de sources locales. La montée de BC du samedi soir sur le site de Tremblay n'apparaît pas car l'analyseur de BC a connu sur 3 des 13 samedis de l'étude des dysfonctionnements en soirée dont la journée du 2 janvier ayant entraîné les forts niveaux observés sur les PUF. Malgré ce manque temporel de données BC sur le site de Tremblay, ces constats restent vérifiés sur toutes les autres journées.

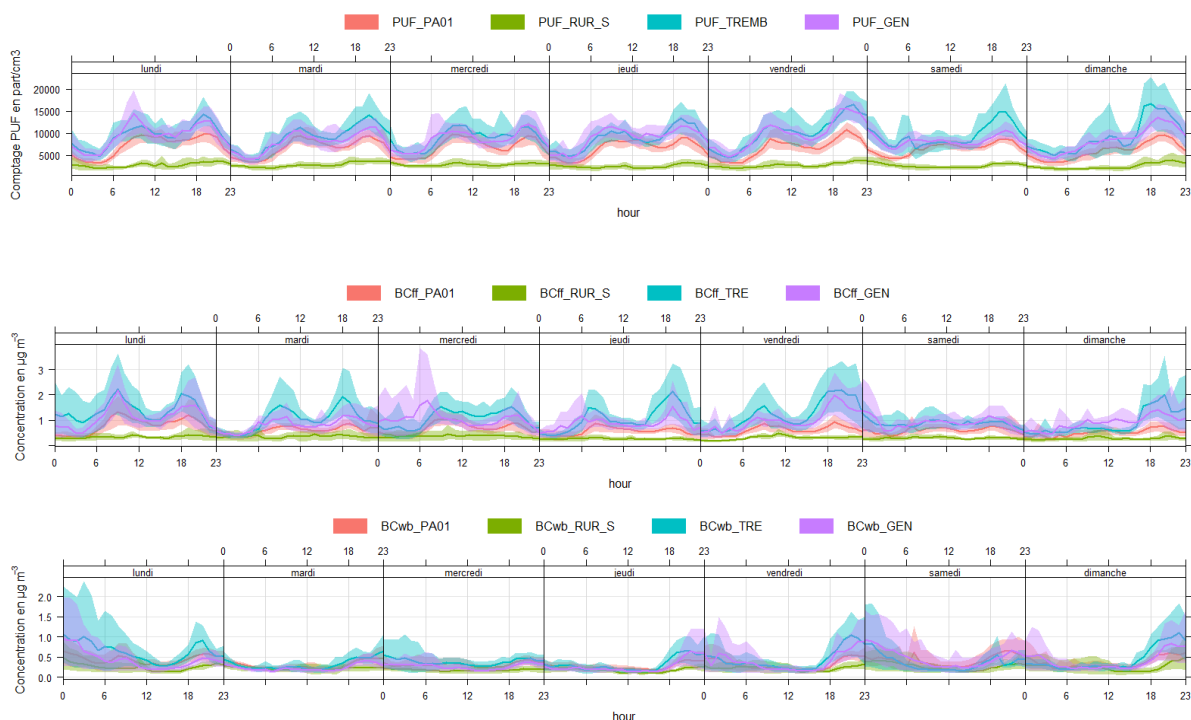


Figure 12 : Profils moyens journaliers selon le jour de la semaine du comptage PUF et des concentrations en eBC_{ff} et eBC_{wb} (Hiver 2020-2021)

4.3. Origine de la pollution

Pour représenter au mieux l'origine des polluants propre à chacun des sites, l'illustration sous forme de **rose de pollution** est usuellement utilisée en qualité de l'air. Ce graphique permet **d'estimer la concentration moyenne d'un polluant en fonction de la vitesse et du secteur de vent**. Comme pour une rose des vents, le graphique en radar est divisé en secteurs correspondants à l'origine des vents (Nord, Sud, Est et Ouest). La vitesse du vent est représentée par des cercles concentriques centrés à 0 m/s et allant de 2 à 12 m/s. Une échelle de couleur allant du bleu au rouge permet d'afficher les concentrations moyennes observées sur les 3 mois de l'étude.

La figure 13 présente ces roses de pollution pour les PUF et le carbone suie. Les vents dominants sur la période d'analyse sont des vents en secteur Sud-Ouest (cf. 3.2.1).

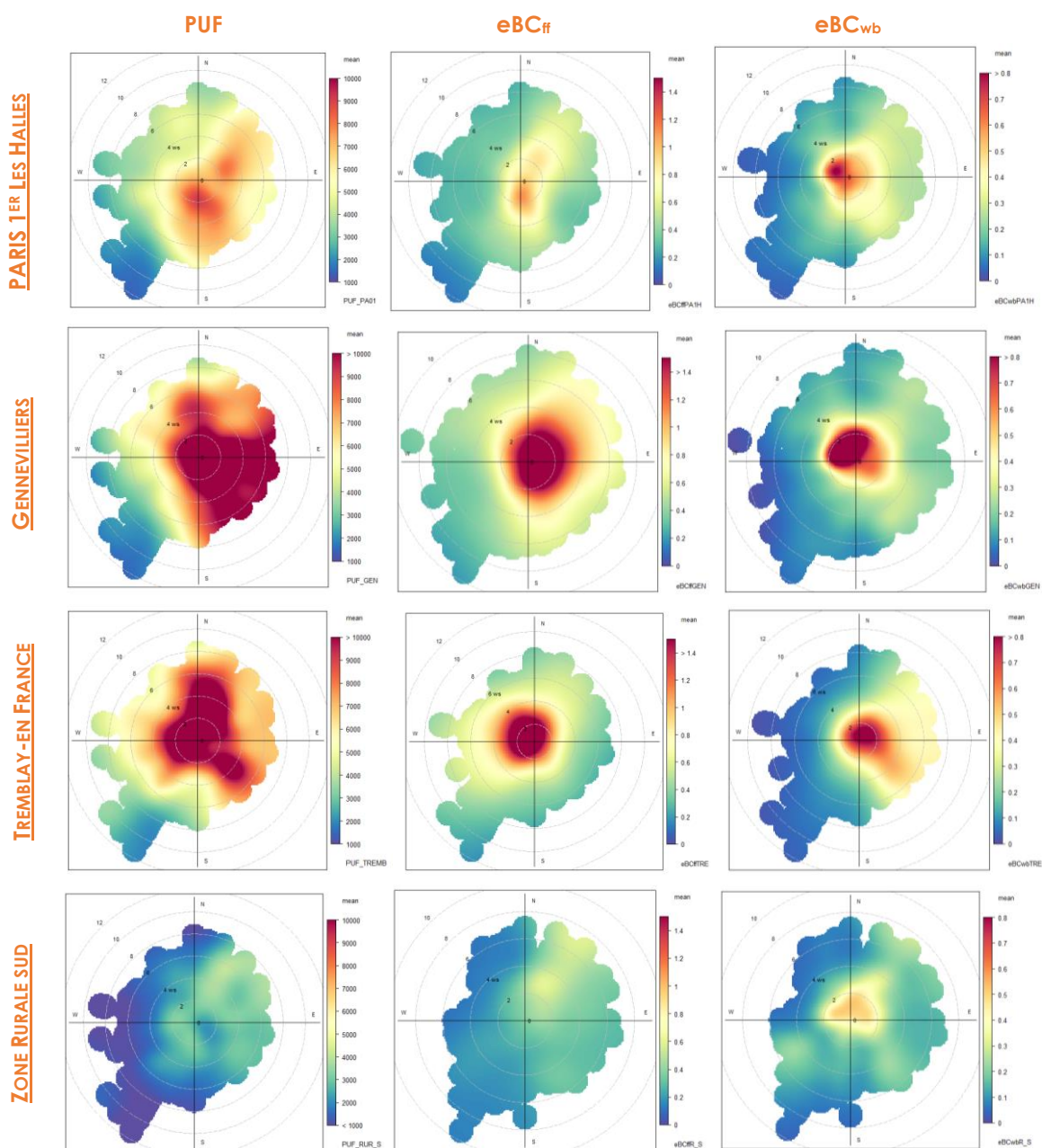


Figure 13: Répartition du comptage PUF et des concentrations en eBC_{ff} et eBC_{wb} selon la vitesse et le secteur de vent (Hiver 2020-2021)

En termes de qualité de l'air, si les niveaux plus forts sont obtenus avec des vitesses de vent élevées cela implique une source régionale, voire un import à plus longue distance de particules. Au contraire, s'ils sont centrés à 0-4 m/s, cela indique une augmentation de concentrations liée à des conditions météorologiques peu favorables à la dispersion des émissions locales de polluants, donc une origine de la pollution plus locale.

Le premier constat fait sur la figure 13 est que, pour tous les polluants présentés et pour tous les sites, par vents modérés à forts de secteur sud-ouest, supérieurs à 4 m/s, aucune concentration élevée n'est relevée. Ces vents sont en effet associés à des conditions météorologiques particulièrement favorables à la dispersion, avec des masses d'air océaniques peu chargées en polluants.

Sur le site des Halles, les concentrations en PUF semblent issues majoritairement d'une source diffuse de secteur Est avec une première source par vents compris entre 2 et 4 m/s en secteur Nord-Est et une seconde source plus locale enregistrée pour des vents compris entre 0 et 4 m/s de secteur Sud à Sud-Est. Ce constat est cohérent avec les roses de pollution obtenues à partir des données BC qui montrent une source de BC_{ff} (trafic routier) illustrant les mêmes secteurs de vent, Nord-est et Sud-Sud-est, et une source de BC_{wb} (combustion de biomasse). Ces deux sources montrent les concentrations les plus élevées par vents faibles compris 0 et 3 m/s impliquant des sources locales, cette remarque est particulièrement vraie pour la source biomasse, BC_{wb} . Elles sont néanmoins beaucoup moins marquées que sur les deux autres sites urbains, ce qui s'explique par la situation de la station au coeur d'un jardin, plus isolé des sources.

Sur le site de Gennevilliers, les concentrations les plus soutenues sont observées pour tous les secteurs par vent très faible, et par vents de secteurs Est à Sud-Est pour toute la gamme de vitesses de vent. Sur ce secteur, les données moyennes de comptage PUF sont toujours supérieures à 10 000 part/cm³. Au regard des roses de pollution du BC, les deux sources de BC_{ff} et BC_{wb} sont observées très majoritairement par vent faible, inférieur à 4 m/s, pointant des sources locales. La rose de pollution du BC_{ff} montre des concentrations toujours soutenues par vent de Nord-Est à Sud-Est jusqu'à 4 m/s, pouvant impacter les concentrations de PUF observées sur ce site urbain. En revanche, on ne retrouve pas ces concentrations par vents supérieurs à 4 m/s. Ces secteurs de vent sont cohérents avec la densité d'urbanisation et d'axes routiers sur ce site, implanté au Nord-Ouest de Paris. A noter sur ce site que l'impact de la source de combustion biomasse est bien plus marquée sur les concentrations moyennes en BC_{wb} que sur le site Paris intra-muros des Halles.

Sur le site de Tremblay-en-France, comme sur le site de Gennevilliers, les concentrations en nombre de PUF sont soutenues suivant tous les secteurs par vent faible, vraisemblablement en lien avec les sources locales de BC, engendrant les concentrations les plus fortes par vents inférieurs à 2 m/s. Un impact supplémentaire est observé par vent modéré de secteur Sud-Est, que l'on retrouve en partie sur la rose de pollution du BC_{wb} . Cette direction cible la zone résidentielle la plus proche et la plus dense, marquée par des émissions liées au chauffage au bois. Cette source est bien identifiée et illustrée par une flèche bleue sur la figure 14.

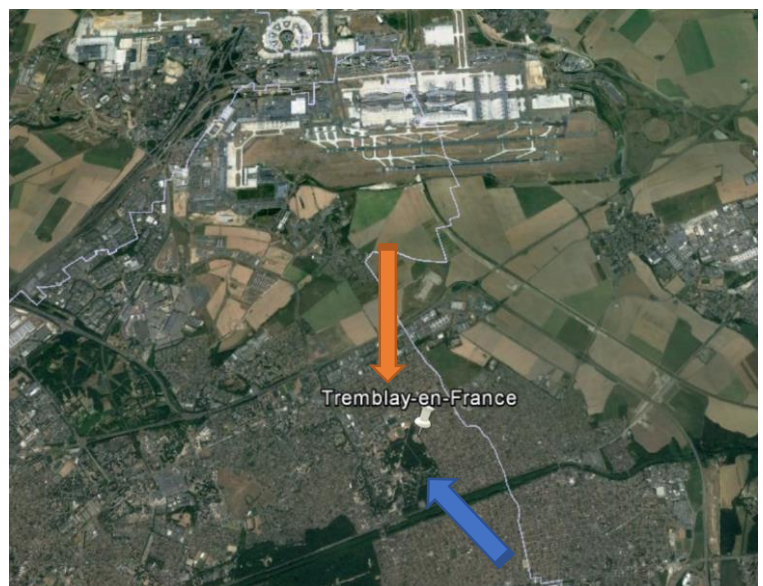


Figure 14: Vue aérienne du site de Tremblay-en-France

Sur ce site, une source de PUF est également identifiée au Nord où est implanté l'aéroport de Roissy-Charles de Gaulle, illustré par la flèche orange sur la figure 14. Ces PUF peuvent être liées à l'activité de la zone aéroportuaire (dont le trafic routier induit par la plateforme). La littérature scientifique montre également que les avions peuvent émettre des PUF (ACNUSA, 2017 ; ACI, 2017). Cette source de PUF fera l'objet d'une campagne de mesure spécifique dans le but de la caractériser plus finement.

Sur le site Zone rurale Sud, la rose de pollution confirme que les concentrations en PUF sont bien plus faibles que sur les sites urbains. De plus, les niveaux en zone rurale présentent une très faible variabilité spatiale. Cette rose de pollution des PUF est similaire à la rose obtenue avec le BC_{ff}, qui confirme l'absence de source de combustion importante liée au trafic routier. Sur cette période hivernale, une légère augmentation des concentrations en BC_{wb} est observée par vent faible, mettant en évidence un léger impact local du chauffage au bois, qui ne semble pas contribuer notablement au nombre de PUF.

Globalement, l'analyse de la répartition du nombre de PUF et de la concentration en BC selon les secteurs et les vitesses de vent montre des **zones plus larges que pour le BC, qui est un polluant très local. Des comportements différents sont observés d'un site à l'autre, indiquant un impact propre aux 4 sites choisis pour cette campagne de mesures.**

Cette étude confirme **l'absence de source locale importante sur le site de rural Sud et montre sur les sites urbains un impact des sources de combustion liées aux émissions du trafic routier et à la combustion de biomasse sur le nombre de PUF.** Ces sources de combustion illustrées par le BC ne permettent néanmoins pas totalement d'expliquer les concentrations en PUF qui semblent indiquer d'autres sources en milieu urbain.

5. Caractérisation du nombre de particules par classes granulométriques

L'analyse du nombre total de PUF conjointement à la concentration massique de BC a permis de pointer l'impact des sources de combustion sur les niveaux de PUF. Néanmoins, cette comparaison entre une mesure en nombre total et une mesure en masse ne permet pas de caractériser de manière robuste l'impact de chacune de ces sources. **L'analyse des profils granulométriques moyens suivant les différentes classes permet d'affiner ces observations.**

La littérature scientifique fait état d'une distribution normale du diamètre des PUF si l'environnement est soumis à l'influence d'une source unique. Les caractéristiques de distribution sont reprises dans la Figure 15 (Renoux et Boulaud, 1998).

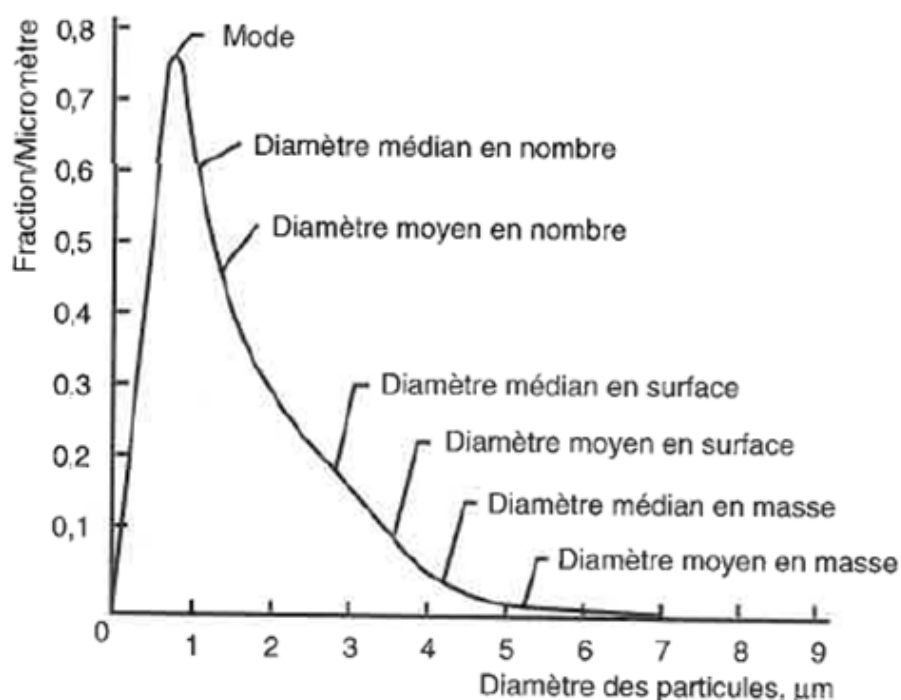


Figure 15 : Les paramètres caractéristiques des distributions granulométriques (Renoux et Boulaud, 1998)

L'illustration, figure 15, correspond à la **distribution granulométrique théorique pour une source unique** de pollution. En environnement urbain, marqué par une grande diversité de sources de pollution, il est possible d'obtenir des distributions multimodales, présentant différents modes plus ou moins imbriqués. **En dissociant ces différents modes, il est possible d'identifier chaque source** associée à ces différentes caractéristiques de distribution et de la caractériser, tant qualitativement que quantitativement.

Des abaques permettent de recenser « **l'empreinte** » granulométrique de nombreuses sources urbaines et naturelles et de les comparer aux profils granulométriques observés sur la région parisienne pour valider ces conclusions. La Figure 16 représente la distribution du diamètre des particules selon leur source d'émission.

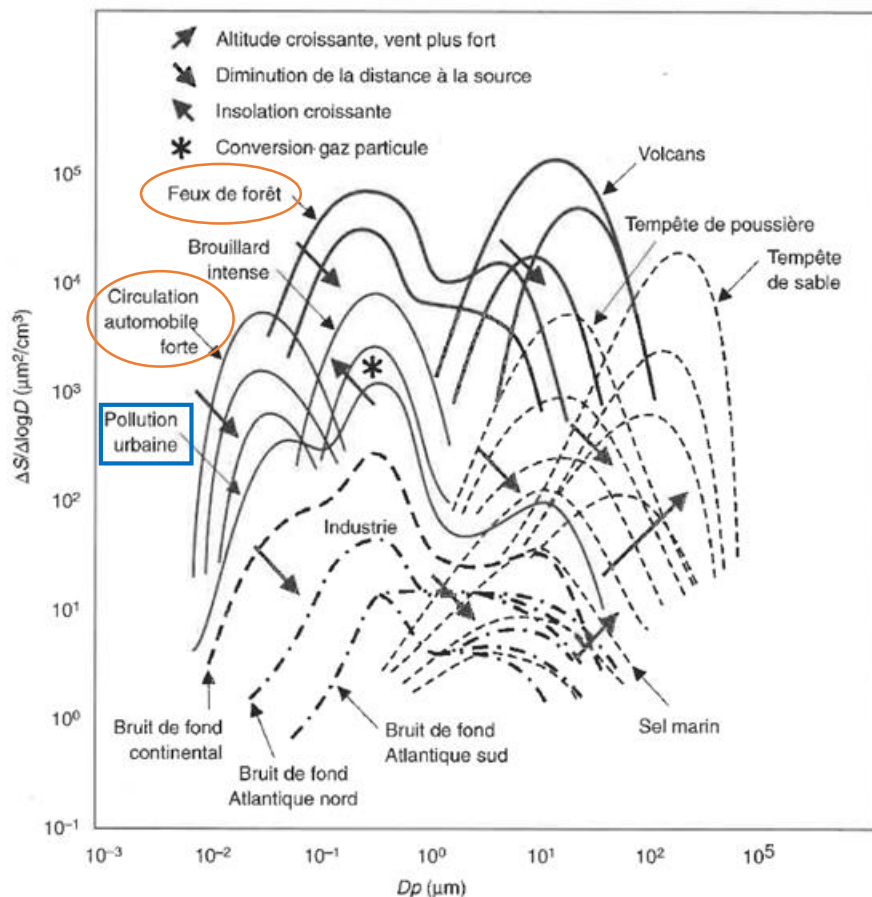


Figure 16 : Distribution granulométrique (en surface) de différents types d'aérosols atmosphériques (Renoux et Boulaud, 1998)

Le profil granulométrique théorique bimodal est caractéristique de la pollution urbaine (encadré bleu sur la figure 16), avec un premier mode, plus fin, majoritairement lié au trafic routier, et le second, de diamètre plus élevé pouvant aller au-delà des PUF, plutôt lié à la combustion de biomasse. Ces deux sources de combustions urbaines sont confirmées à l'échelle internationale, notamment avec une étude menée à Santiago au Chili (Gramsch et al., 2014).

La mesure SMPS réalise un tri de ces particules les plus fines configuré sur la gamme granulométrique 5 à 400 nm, suivant 121 classes granulométriques et permet de bâtir les profils granulométriques expérimentaux à fine échelle sur chacun des sites. **Bien qu'étant centrée sur les PUF, inférieures à 100 nm, l'analyse des profils granulométriques est réalisée sur un spectre plus large, allant jusqu'à 400 nm, afin de pouvoir étudier le profil des sources dont le mode peut s'étendre au-delà des PUF.**

L'analyse de ces profils granulométriques montrera **tout l'intérêt de la mesure SMPS, qui permet d'obtenir des informations complémentaires très importantes d'un point de vue qualitatif dans l'identification des sources mais surtout quantitatif sur le nombre de particules en lien avec chaque source**, majoritaire et minoritaire, des différents sites et ainsi disposer de valeurs de référence sur la région Ile-de-France.

Cette analyse est déclinée d'abord sur la période d'étude puis à l'échelle horaire et journalière, permettant une vue globale de l'évolution de la taille des particules et de leur nombre sur la période hivernale 2020-2021.

5.1. Profil granulométrique moyen : identification des sources

La construction des profils granulométriques moyens est réalisée en regroupant au sein d'un même et unique graphique les différentes données de comptage de chaque classe sous forme d'histogramme. Celui-ci présente en abscisse les tailles des particules (diamètre aérodynamique en nm, en échelle logarithmique) et en ordonnée la concentration en particules, exprimée en part/cm³, comme présenté dans l'introduction à cette partie. La figure 17 illustre les résultats obtenus pour les quatre sites d'étude.

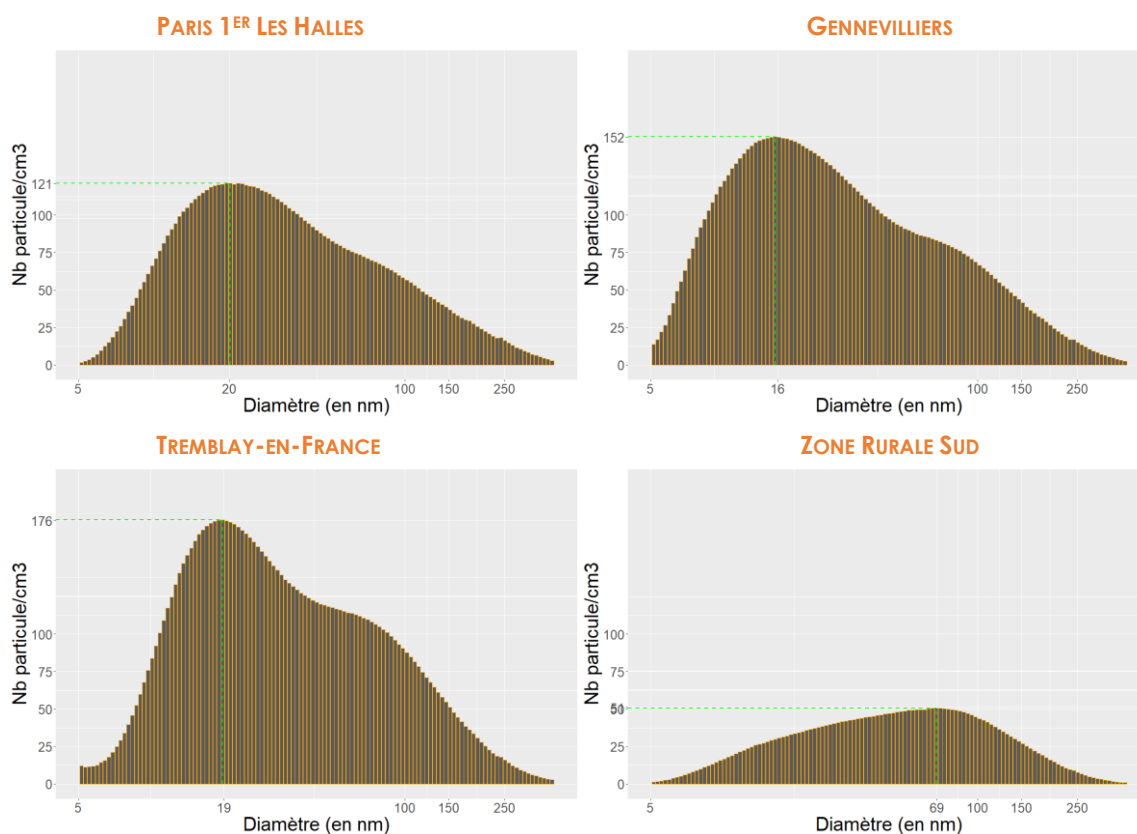


Figure 17 : Distribution granulométrique moyenne sur la région Île-de-France pour l'hiver 2020-2021

Sur la figure 17, les profils granulométriques moyens sur l'hiver 2020-2021 montrent la présence de plusieurs modes communs en zone urbaine et un unique mode et différent sur le site rural. La taille de particules la plus représentée en nombre sur un profil granulométrique est appelé « **mode majeur** ». Il permet de remonter à la source engendrant le plus de particules sur l'ensemble de la gamme granulométrique, à partir des abaques issues de la littérature (Figure 16). Il est identifié par des pointillés verts sur la figure 17. **Tous les modes majeurs se situent dans la gamme des PUF, soit de taille inférieure à 100 nm.**

Pour les sites urbains, le mode majeur se situe entre 16 nm et 20 nm. Cette granulométrie, **spécifique au trafic routier**, est identifiée comme le mode de nucléation correspondant aux particules secondaires formées après échappement par l'émission de gaz chauds contenant des vapeurs de composés organiques volatils ou semi-volatils. Après émission dans l'atmosphère, ces particules issues du trafic ont tendance à grossir par différents mécanismes (coagulation, condensation) pouvant entraîner un second mode dit d'accumulation compris en 30 et 500 nm. Le mode accumulation n'est pas constitué uniquement de PUF, contrairement au mode nucléation. Ce mode constitue une part importante de la masse (O. Regniers, 2006).

Comme pour la concentration totale des PUF, une hiérarchisation des sites est constatée sur les distributions granulométriques avec un mode majeur enregistrant respectivement 121, 152 et 176 part/cm³ pour les sites des Halles, de Gennevilliers et de Tremblay-en-France.

Sur la gamme granulométrique des PUF, les profils des sites urbains illustrent **un second mode** commun à ces 3 sites avec une famille de particules apparaissant **entre 70 et 100 nm. Bien que ce mode mineur soit plus fin que le mode « feu de forêt » présenté sur la figure 16 entre 100 et 500 nm, il est identifié sur la région francilienne comme issu du chauffage urbain** associé à la combustion de biomasse (bois de chauffage). Les particules associées à la combustion de biomasse présentent une saisonnalité très marquée en lien avec l'utilisation du chauffage, avec des niveaux en saison froide plus élevés qu'en saison chaude. Ce mode « chauffage au bois » compris entre 70 et 100 nm, enregistré par mesure SMPS, est conforme à une étude menée en Allemagne sur la ville de Augsburg (Gu et al., 2011). En France, ce mode avait préalablement été identifié sur les régions Sud et Nouvel-Aquitaine entre 100 et 200 nm avec un autre analyseur de mesure de PUF présentant une résolution inférieure au SMPS, l'UFP 3031 (Atmo AURA, 2020 ; Atmo Nouvelle-Aquitaine, 2018 ; Atmo Sud, 2017 ; Atmo Sud, 2018). Comme pour la source trafic, le mode accumulation, supérieur à 100 nm, constitue une part importante de la masse. Il est à noter que cette source caractéristique du chauffage au bois impacte plus fortement le site de Tremblay-en-France (environ +25 % en comparaison aux Halles), ce qui est cohérent avec les mesures de BC qui montrent sur ce site une influence plus marquée de cette source locale liée au chauffage résidentiel de la zone pavillonnaire située non loin du site. Cette source est largement significative, malgré un hiver relativement doux.

En considérant que toutes les particules enregistrées sur le second mode sont issues du chauffage au bois et en se basant sur le nombre de particules relevé sur les modes, **en moyenne sur l'hiver 2020-2021, le nombre de PUF urbaines émises par le trafic routier est environ de 1,5 à 2 fois plus élevé que celui des PUF émises par le chauffage au bois.** Cependant, ces deux sources ayant une gamme granulométrique commune, avec un recouvrement de leurs distributions granulométriques, il est difficile d'estimer précisément ce ratio. Il est possiblement légèrement sous-estimé du fait qu'une partie des particules de trafic se retrouve comptées dans la gamme granulométrique du chauffage au bois.

Sur ces 3 sites urbains, une **autre population de particules**, propre à la zone urbaine et **très minoritaire** au regard des 2 premières sources **entre 230 nm et 250 nm**. Cette source de particules reste significative, sans appartenir à la gamme des PUF. Sur les sites de Gennevilliers et Tremblay, il semble que cette population de particules soit liée avec **l'augmentation du nombre de PUF relevées sur la gamme inférieure à 10 nm**. Cette empreinte particulière est identifiée dans l'étude Allemande de de Augsburg comme issue de la formation d'aérosols secondaires (Gu et al., 2011). La suite de l'analyse tentera de la caractériser.

Au regard des sites de l'agglomération parisienne, le site Zone rurale Sud présente un profil granulométrique plat avec peu d'influence de sources spécifiques sur la gamme 10-40 nm et un mode majeur à 69 nm présentant près de 3,5 fois moins de particules que le site le plus fort de Tremblay. L'influence des émissions de chauffage au bois y est dominante, bien que faible en comparaison au site urbain, de -25 % par rapport au site des Halles à -55 % par rapport au site de Tremblay, le plus influencé par cette source chauffage, en lien avec la densité d'émission très différente suivant les zones géographiques.

L'analyse de la classe granulométrique présentant le nombre le plus important de PUF (modes majoritaires) pour chaque heure et chaque profil granulométrique permet de caractériser la variabilité de ces sources franciliennes hivernales (figure 18).

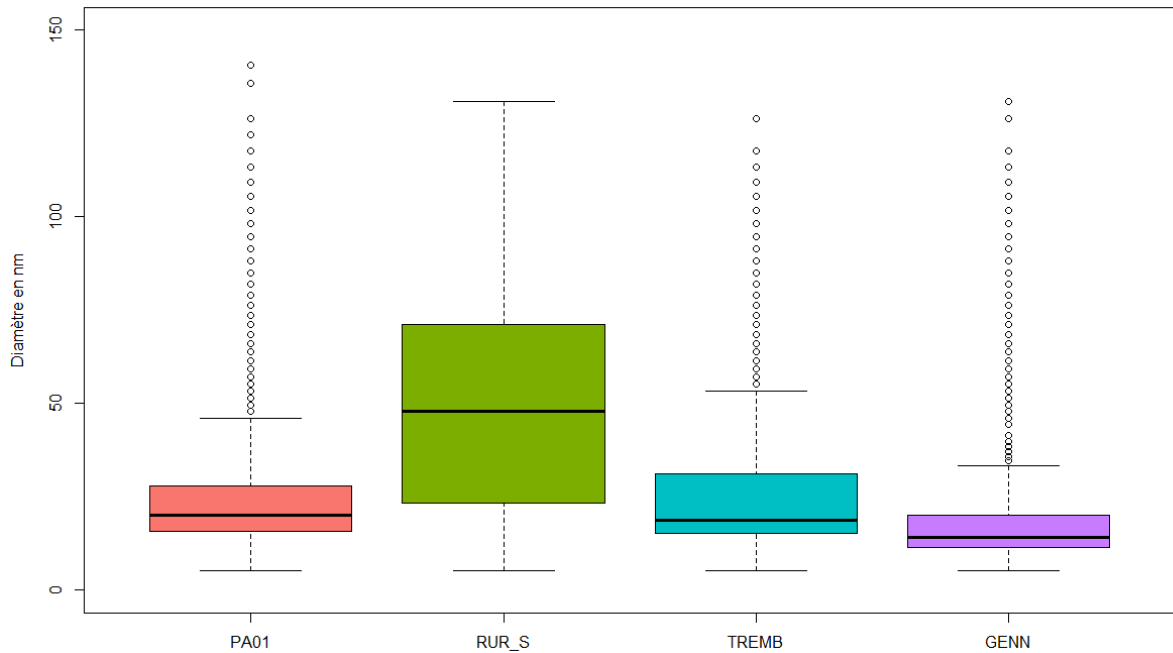


Figure 18 : Modes majeurs horaires sur la région île-de-France pour l'hiver 2020-2021

Les sites urbains présentent majoritairement des diamètres modaux fins, inférieurs à 50 nm, illustrant la forte influence de la source trafic, prépondérante sur l'agglomération. Le site rural présente des modes majeurs se situant sur une plus large gamme avec des diamètres inférieurs à 130 nm.

Les nombreuses valeurs extrêmes de ces 3 sites illustrent des heures présentant un mode différent, pointant une source différente avec des modes majeurs compris entre 50 et 150 nm. **Ces diamètres sont compris dans la gamme de diamètres observée sur le site rural, pouvant être attribués à des modes en lien avec la source combustion de biomasse.**

5.2. Évolution temporelle du nombre de particules par classe granulométrique

L'analyse de l'évolution temporelle des profils granulométriques à une échelle plus fine permet de caractériser les heures et les journées d'occurrence des différentes sources identifiées pendant la campagne de mesure.

5.2.1. Évolution horaire

Les appareils de mesure utilisés permettent de suivre heure par heure l'évolution des profils granulométriques sur les 4 sites de la campagne de mesure, représentés sur la figure 19. Pour chaque heure allant de minuit à 1h à 24h les profils granulométriques moyens des 4 sites sont représentés.

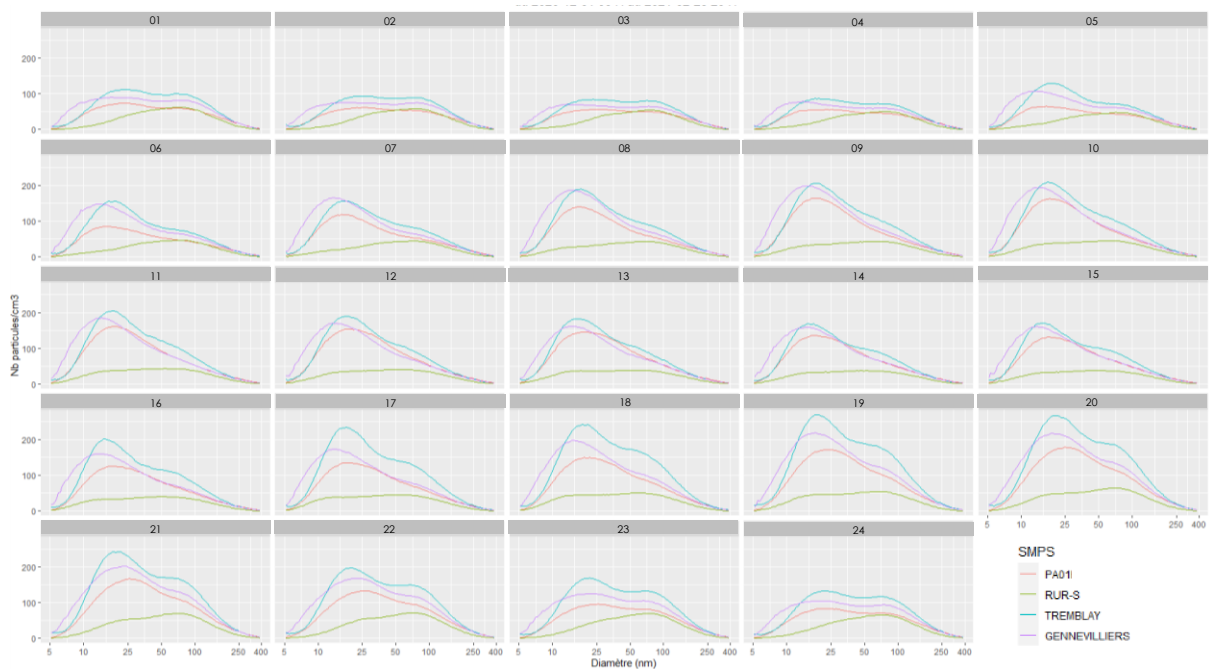


Figure 19 : Évolution heure par heure des profils granulométriques moyens sur la région Île-de-France pour l'hiver 2020-2021

Sur la plage horaire allant de 1 à 3h, les niveaux les plus faibles de la journée sont enregistrés, avec des profils plats communs aux 4 sites et des **diamètres compris entre 10 et 250 nm**, le site rural Sud présentant des niveaux plus faibles sur les diamètres inférieurs à 50 nm. **Sur ces heures, aucune source prépondérante n'est visible.**

La figure 19 montre que les deux modes ou populations de particules identifiées au paragraphe 5.1 présentent ensuite une évolution journalière différente.

Le nombre de particules de diamètre inférieur à 50 nm augmente progressivement de 4h à 11h sur tous les sites urbains. Il décroît légèrement de 11h à 14h, puis augmente de nouveau graduellement entre 15 et 18h, d'abord sur les sites de Tremblay et Gennevilliers, puis sur le site parisien des Halles, qui présente néanmoins une amplitude moins grande sur l'ensemble de la journée. Les concentrations maximales sont relevées de 18 à 20 heures, puis décroissent progressivement pour retrouver des niveaux minimums dans la nuit. Ce profil journalier est typique de l'évolution des émissions issues du trafic routier et des conditions de dispersion atmosphérique. Il n'est pas enregistré sur le site Zone rurale Sud, qui conserve un profil plat sur cette gamme de diamètre. **L'évolution journalière des particules de diamètre inférieur à 50 nm, avec un diamètre modal proche de 20 nm, commun aux 3 sites urbains, confirme que ce mode peut être attribué à l'impact de la source trafic sur la zone urbaine.**

Le nombre de particules de diamètre aérodynamique supérieur à 50 nm est globalement stable le matin sur l'ensemble des sites. Il augmente progressivement à partir de 14h sur le site de Tremblay-en-France (en bleu). Sur la plage horaire de 18h à 22h, les concentrations sont les plus soutenues, avec un développement de cette population de particules sur les autres sites urbains, qui diminue à partir de 21h. **La temporalité de la population de PUF supérieures à 50 nm est caractéristique des émissions du chauffage au bois.**

En soirée, une combinaison des deux sources est donc observée sur l'agglomération. La source trafic reste néanmoins prédominante.

5.2.2. Variabilité journalière

Sur le site de référence de fond parisien, est suivie en continu la concentration massique des paramètres réglementaires PM₁₀ et PM_{2.5} mais aussi **la composition chimique des particules, qui permet d'identifier leur source (Cf. 2.2 et 2.3)**. La **comparaison de ces paramètres à la mesure en nombre et par classe granulométrique** acquise par le SMPS permet d'affiner la connaissance des sources de PUF sur la période hivernale 2020-2021 en identifiant le lien entre le diamètre des PUF et la composition chimique des particules.

Les graphiques de la figure 21 montrent pour le premier, l'évolution horaire des concentrations de PM₁₀ et PM_{2.5}, avec une dissociation des particules primaires issues des sources de combustion « biomasse » et « trafic routier » (cf 2.2). Le second illustre cette même évolution sur les concentrations de carbone suie (BC), et des composés organiques et inorganiques (Sulfate, Ammonium, Nitrate). Le troisième montre l'évolution par journée du nombre moyen de particules suivant leur diamètre allant de 5 à 400 nm. Comme pour la figure 19, les plus faibles concentrations sont identifiées en bleu et les plus fortes en rouge, la gamme allant de 0 à 200 part/cm³.

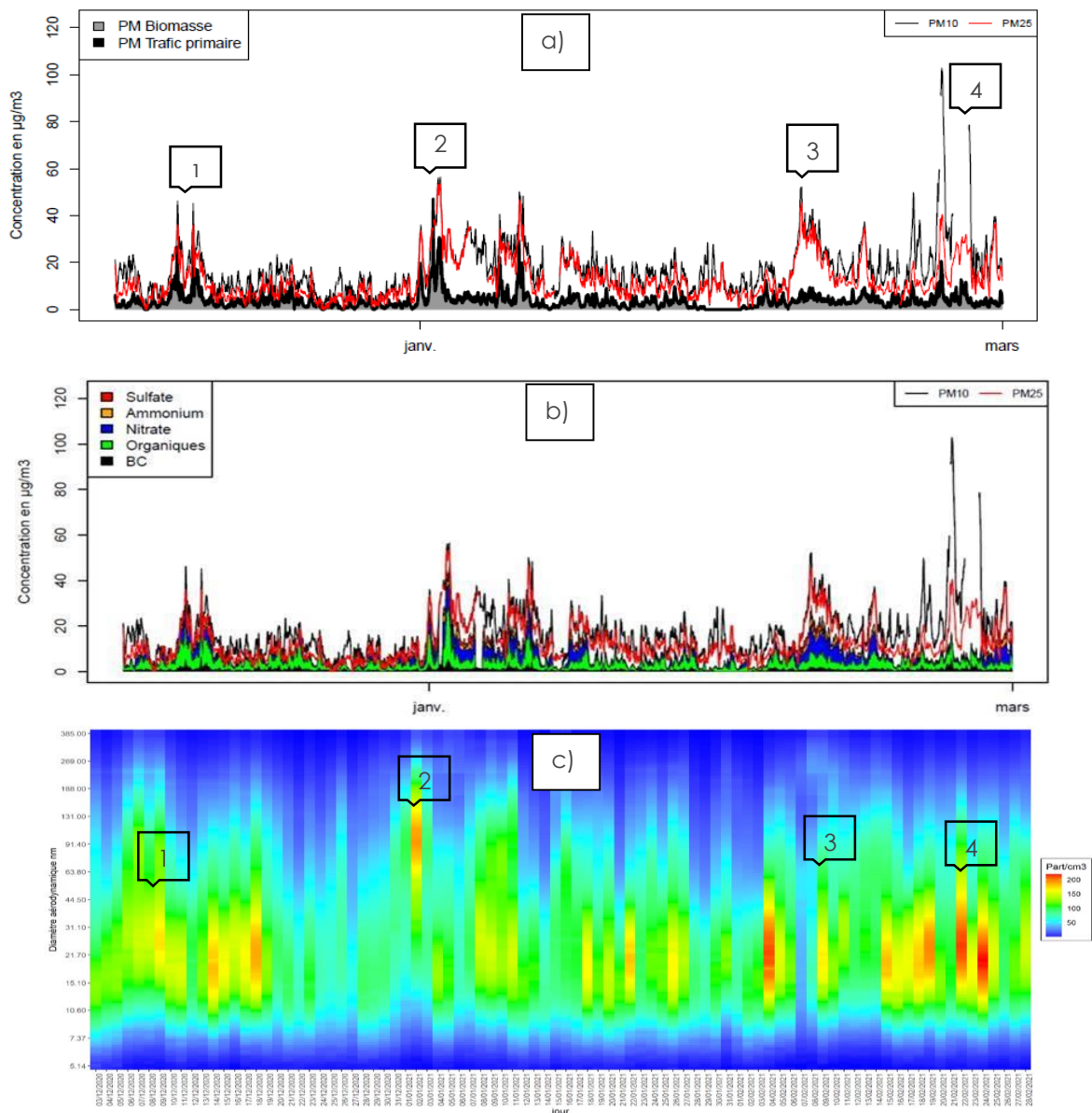


Figure 21 : Évolution horaire de la concentration en particules issues de la combustion (a) et de la composition chimique (b) et évolution journalière 2D du nombre de particules par diamètre aérodynamique (c) pour l'hiver 2020-2021 sur le site de Paris 1^{er} Les Halles

On retrouve sur ces graphiques les périodes de pollution identifiées sur l'évolution temporelle des PUF présentée dans la partie 4.1, avec **4 périodes présentant une hausse des concentrations**. La composition chimique des particules présente des variations marquées. Sur le profil 2D de la figure 21c, il apparaît une forte variabilité des concentrations en nombre de particules d'un jour à l'autre mais aussi de la taille dominante en nombre, avec des particules majoritairement représentées sur la gamme 10 à 200 nm.

La première période de pollution est relevée début décembre (du 7 au 9 décembre 2020). Elle montre une hausse des niveaux en particules carbonées, accompagnées d'une part significative de particules inorganiques caractéristiques d'une **pollution particulaire mixte**. Les niveaux en nombre de PUF sont relativement soutenus, avec en majorité des particules de diamètres compris entre 10 et 30 nm. Sur ces journées, **des diamètres relativement élevés**, pouvant aller jusqu'à 200 nm **visibles par la traîne verte, sont également observés** (concentration de l'ordre de 100 part/cm³).

La seconde période de pollution, début janvier, a enregistré un dépassement du seuil d'information et de recommandation en PM₁₀ le 2 janvier 2021. Cet épisode de pollution, marqué par une forte proportion de matière organique et des concentrations soutenues en PM biomasse, est caractéristique d'une **pollution de type combustion hivernale**. **Une forte hausse du nombre de particules comprises entre 70 et 150 nm est observée**. Sur le reste du mois de janvier, les niveaux en nombre de PUF restent soutenus, impactant majoritairement la classe 10 à 30 nm, et comparables au début du mois de décembre, ce qui est confirmé sur le suivi temporel de la composition chimique avec une pollution mixte.

Une hausse importante du nombre de particules ultrafines, illustrée par la plage rouge Figure 21c est observée sur la journée du 4 février. Elle ne correspond pas à une hausse de la concentration massique de particules PM₁₀ et PM_{2.5} (Figure 21a et 21b). Seules les journées sur lesquelles un épisode de pollution est constaté enregistrent des concentrations en nombre de PUF aussi importantes. Cette pollution, impactant en majorité la gamme 10-40 nm, illustre le fait que l'augmentation du nombre de particules les plus fines présentant une masse infime n'engendre pas forcément une hausse des concentrations massiques associées. Sur cette journée, l'augmentation du nombre de particules inférieures à 50 nm est aussi observée sur le site de Gennevilliers, semblant indiquer une source de particules ultrafines sur la région non caractérisée par la composition chimique. Une attention particulière sera portée lors de l'analyse des mesures en continu de PUF sur le site de Paris 1^{er} Les Halles depuis 2019 pour évaluer si ce phénomène se reproduit et tenter d'en identifier la cause.

Au cours de la troisième période de pollution, intervenue du 8 au 10 février 2021, la hausse des concentrations en particules avec une part modérée de carbone suie et une proportion majoritaire de particules inorganiques de nitrate d'ammonium, représentées en bleu et orange sur la figure 21, est caractéristique de la **formation d'aérosols inorganiques secondaires** (Airparif, 2020). Les concentrations massiques sont soutenues, sans pour autant dépasser le seuil d'information. Cette formation ne s'accompagne pas d'une très forte hausse du nombre de PUF mais une augmentation significative du diamètre des particules. Comme début décembre et début janvier, cette pollution met en œuvre une large gamme de diamètres particulaires, qui peuvent aller au-delà des PUF. L'étude plus fine du profil granulométrique est réalisée en partie 6.

Pour finir, **la quatrième période de pollution** survenue à la fin du mois de février a entraîné 3 journées de dépassement du seuil d'information et de recommandation en PM₁₀ (le 22, 24, 25 février 2021). Cet épisode de pollution a été particulièrement intense du fait de la combinaison d'une météorologie très défavorable avec des conditions anticycloniques limitant la dispersion de la pollution locale, la formation de particules inorganiques secondaires et un import de sable saharien ayant engendré les niveaux de PM₁₀ les plus forts de la campagne. Cet épisode a été caractérisé de **pollution multi-sources avec un import minéral saharien**. Les 2 dernières semaines de février 2021,

et plus particulièrement la dernière semaine, montrent des niveaux élevés de PUF avec des concentrations journalières dépassant très souvent les 150 part/cm³ sur la gamme 10 à 30 nm. Ce sont les niveaux en nombre les plus forts obtenus sur cette campagne de mesure, avec des particules inférieures à 10 nm, en particulier les deux journées de dépassements, du 22 février et du 24 février. Les profils granulométriques sont pourtant différents, avec une gamme de diamètres plus grands pour la journée du 22 février en comparaison à la journée du 24 février.

A noter également sur le mois de décembre 2020, **une semaine de faible pollution du 21 au 27 décembre** avec la journée du **22 décembre 2020**, relevant la concentration massique journalière **la plus faible de la campagne de mesure. Cette période de faible intensité se retrouve sur le nombre de PUF**, avec des concentrations globalement inférieures à 100 part/cm³ sur toute la gamme granulométrique de mesure.

6. Focus sur les périodes d'intérêt

Comme pressenti et en accord avec les autres études réalisées sur le territoire français, une forte corrélation existe entre la concentration en masse de la composition chimique des particules (BC, matière organique et inorganique) et le nombre et le diamètre des PUF mesurées.

Ce lien a été présenté dans la partie 5.2.2 à l'échelle de la campagne. **Trois périodes d'intérêts sont étudiées plus avant dans cette partie** : une semaine avec des niveaux faibles, un épisode de pollution de type combustion hivernale, une période de pollution issue de la formation de particules inorganiques secondaires.

L'étude spécifique de la journée présentant les concentrations en PM_{10} les plus élevées sur chacune des périodes identifiées permet de caractériser finement l'empreinte de chacune de ces pollutions rencontrées sur l'hiver 2020-2021. Inversement pour la semaine la plus faible, la journée avec les niveaux minimaux sera étudiée.

6.1. Niveaux lors de la semaine la plus faible : journée de référence (22 décembre 2020)

La journée du 22 décembre 2020 est, en concentration massique, la journée la plus faible de la campagne de mesure. Cette journée affichait des conditions météorologiques très favorables à la dispersion des polluants émis localement avec un temps pluvieux et venteux de secteur Sud-Ouest, amenant une masse d'air propre et permettant de maintenir les concentrations à des niveaux relativement faibles.

Cette journée sera utilisée pour définir le niveau de référence de comptage PUF pour une journée hivernale de faible pollution.

La figure 22 présente les concentrations horaires en nombre de PUF observées sur cette journée, illustrées sous forme de boîte à moustaches.

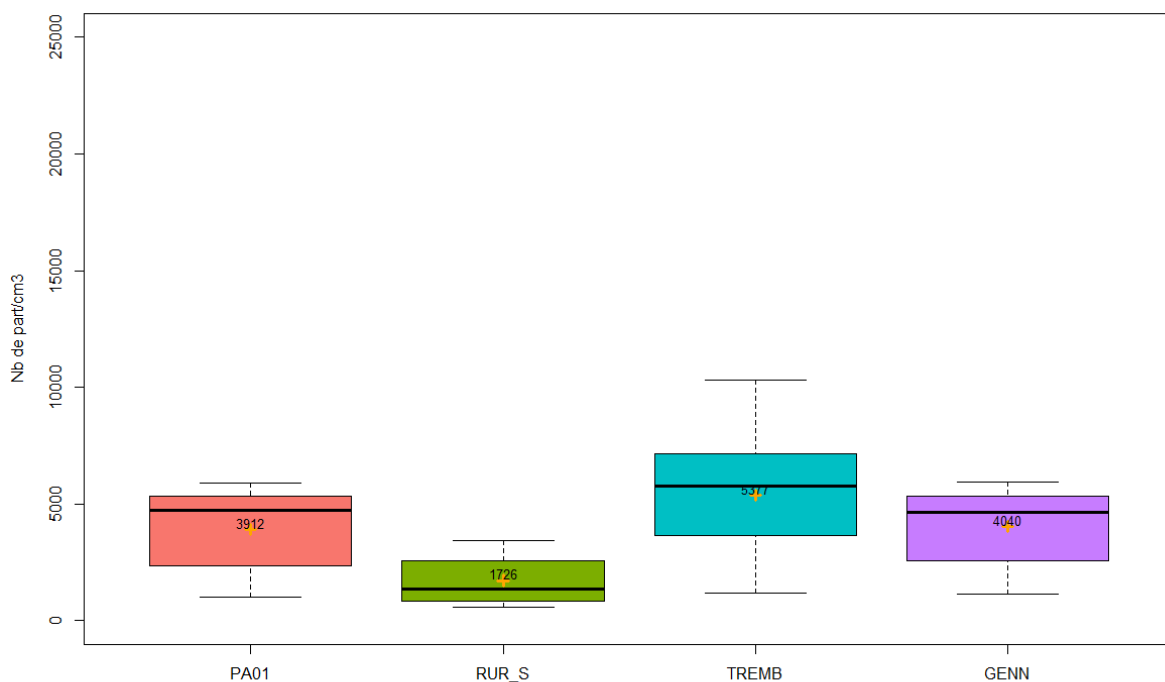


Figure 22 : Boîte à moustaches des concentrations horaires en nombre de PUF, le 22 décembre 2020.

Sur cette journée avec des niveaux faibles, les concentrations moyennes sont comprises sur les sites urbains entre 3 900 et 5 400 part/cm³ avec un site de fond rural à 1 700 part/cm³. La hiérarchisation des sites est conservée avec le site de Tremblay-en-France qui relève le plus grand nombre de PUF,

avec des concentrations horaires dépassant les 10 000 part/cm³ et le site Zone rurale Sud qui présente les niveaux les plus faibles, caractérisant le fond régional, avec l'ensemble des concentrations horaires inférieures à 5 000 part/cm³.

Sur cette journée de faible pollution, les moyennes journalières des différents sites urbains mais aussi du site rural sont proches, avec des boîtes à moustaches montrant des concentrations horaires relativement **homogènes sur le territoire francilien**.

Cette journée illustre une bonne dispersion des émissions polluantes sur la zone urbaine au regard des concentrations observées sur la période. **Globalement sur cette journée, les sites urbains enregistrent des concentrations 2 fois plus faibles que le nombre moyen de PUF sur la période complète. Cette baisse est moins marquée sur le site rural avec des concentrations 1,5 fois plus faibles ; elle reste néanmoins très significative.**

Cette journée caractérise les niveaux minimums pouvant être observés sur la région Ile-de-France sur l'hiver 2020-2021. Les profils granulométriques associés à cette journée de référence sont présentés sur la figure 23.



Figure 23 : Profils granulométriques de la journée la plus faible, le 22 décembre 2020.

Sur cette journée de faible pollution, les profils granulométriques urbains semblent présenter une distribution normale indiquant **une unique source de pollution**. Les modes associés sont identiques entre le site des Halles et le site de Tremblay avec des **modes centrés à 16 nm**. Ces derniers pointent **la source trafic routier**, avec un nombre de particules près de 2 fois plus élevé sur le site de Tremblay-en-France que sur le site des Halles, en se basant sur la concentration modale, en lien avec l'éloignement des axes routiers majeurs du site des Halles.

Le profil du site de Gennevilliers montre un nombre plus important de particules inférieures à 10 nm, avec un mode de taille plus petite que sur les 2 autres sites urbains, centré à 11 nm. Sur cette journée, Gennevilliers montre une influence du diamètre modal en lien avec la formation de particules très fines. Cette dernière reste néanmoins, sur cette journée, mineure au regard de la source trafic, avec un profil et des niveaux comparables à ceux du site des Halles.

Le site Zone rurale Sud présente des niveaux très faibles avec un profil granulométrique plat sur la gamme 5 nm à 200 nm. Sur cette journée, le mode est très peu marqué. Ce profil plat montre un impact mineur, sur cette journée, de la source chauffage au bois identifiée précédemment aux

environs de 80 à 100 nm. Ce profil obtenu sur le site rural Sud caractérise le profil granulométrique du niveau d'extrême fond de la région Ile-de-France.

6.2. Comportement des PUF sur un épisode de combustion hivernale (2 janvier 2021)

La journée du 2 janvier a été marquée par de **mauvaises conditions de dispersion et des températures froides comprises entre 0 et 5°C**. Cette journée a conduit à un épisode de pollution de type « **combustion hivernale** », marqué par une **pollution très locale** centrée sur le cœur de l'agglomération parisienne comme illustrée sur la figure 24. Cet épisode de pollution été caractérisé par **une proportion largement majoritaire de $PM_{combustion}$ dans les PM_{10} , en particulier issues de la combustion de biomasse** (Cf. Figure 21).

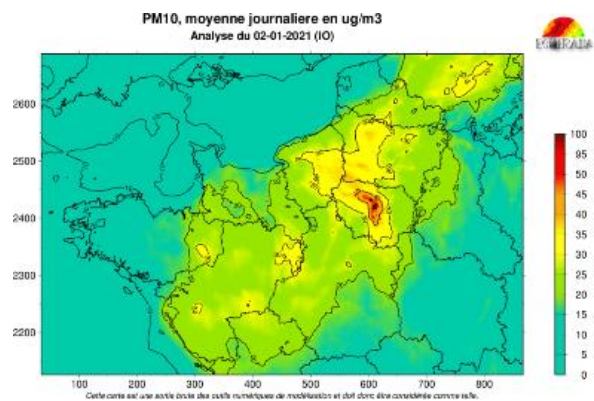


Figure 24 : Carte de pollution du modèle Esméralda pour la journée du 2 janvier 2021

La figure 25 résume les différentes statistiques des concentrations horaires en nombre de PUF observées sur cette journée, illustrées sous forme de boîte à moustaches.

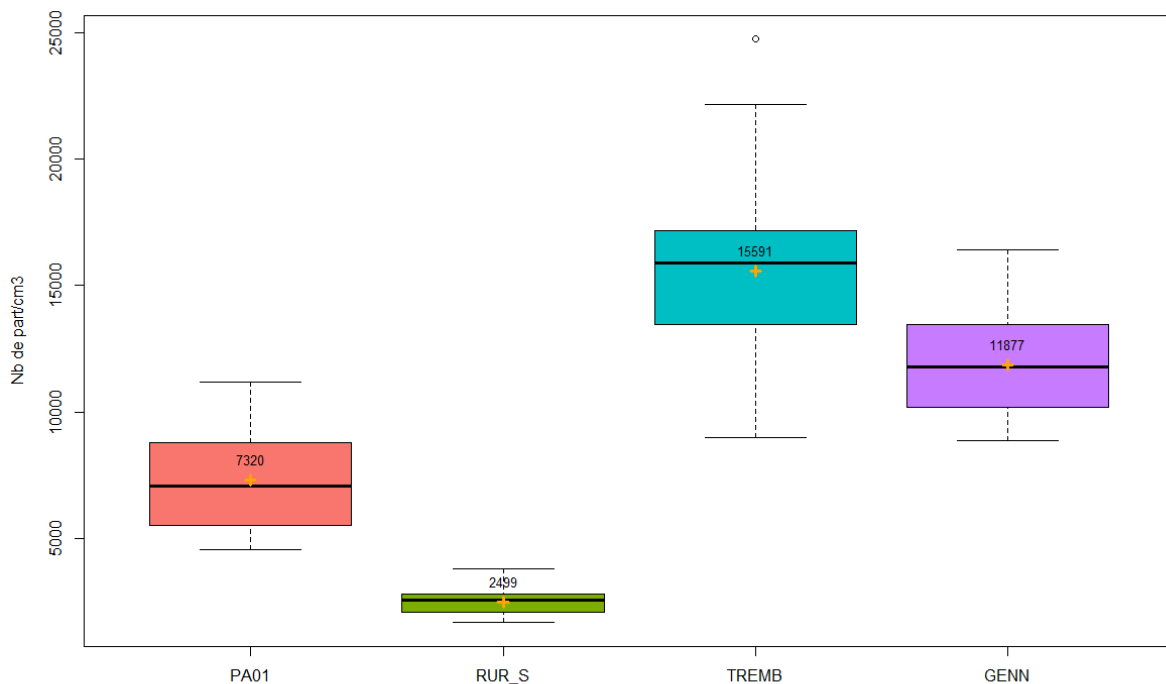


Figure 25 : Boîte à moustaches des concentrations horaires en nombre de PUF, le 2 janvier 2021.

Sur les sites urbains, les concentrations moyennes vont de 7 300 à 15 600 part/cm³, elles sont près de **2 à 3 fois supérieures à la journée de référence du 22 décembre 2020**. Le site rural enregistre une concentration de 2 500 part/cm³, soit environ 1.5 fois plus que la journée de référence la plus faible. Il apparaît **une grande variabilité des concentrations horaires** allant de 1 000 à 25 000 part/cm³ avec des niveaux minimums très variables d'un site à l'autre qui illustre l'influence des sources locales impactant majoritairement les sites urbains de Gennevilliers et surtout de Tremblay-en-France lors de cet épisode de pollution hivernale.

Les profils granulométriques associés à cette journée de pollution de combustion hivernale sont représentés sur la figure 26.

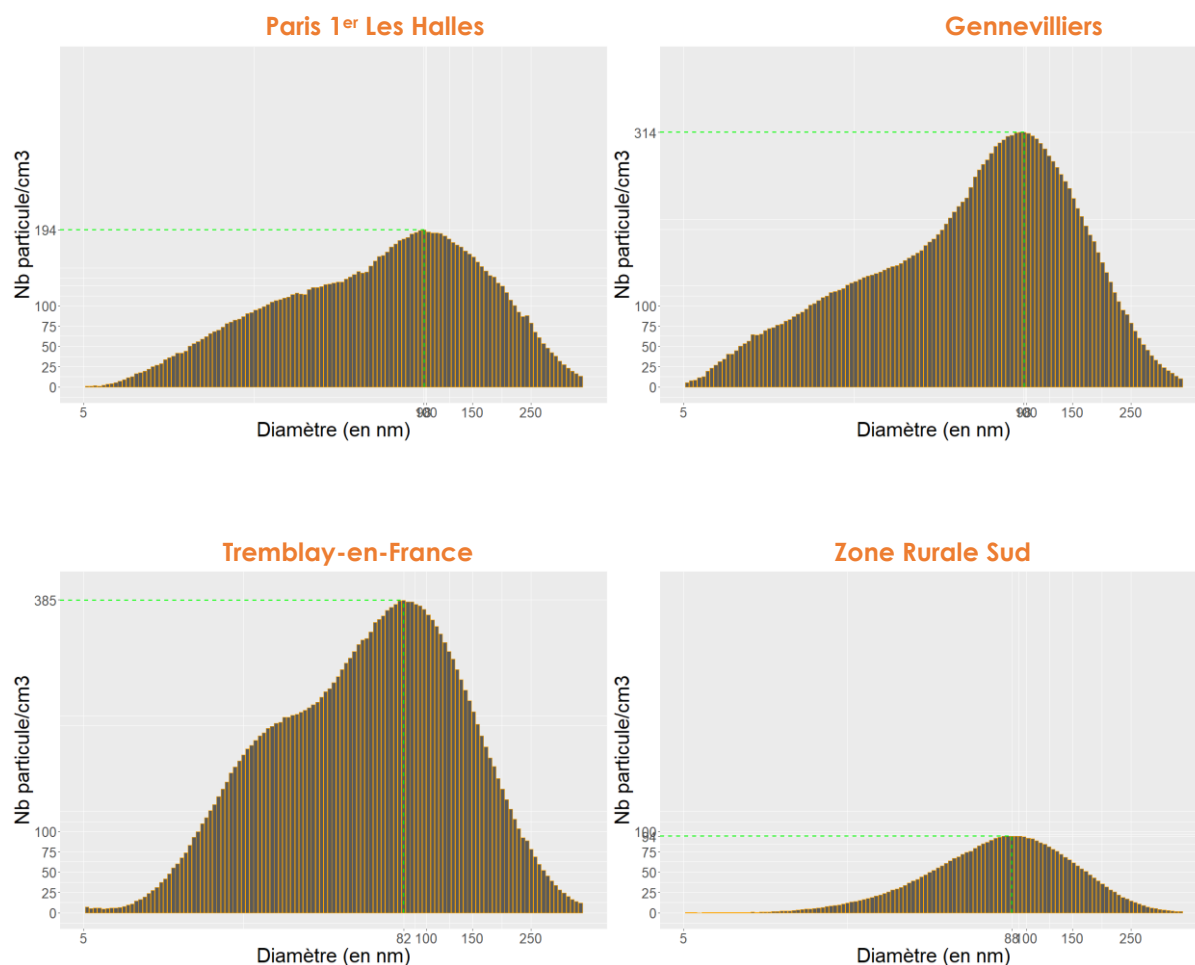


Figure 26 : Profils granulométriques d'un épisode de pollution de type combustion hivernale, le 2 janvier 2021.

Sur la figure 26, tous les profils granulométriques illustrent un mode majeur compris entre 80 et 100 nm. Ces profils confirment que les **diamètres modaux compris entre 80 et 100 nm sont la signature de la source chauffage au bois**. Cette source, majoritaire sur la région ce jour-là, est 4 fois supérieure sur le site de Tremblay-en-France que sur le site rural. Ces résultats sont cohérents avec l'implantation du site de mesure, influencé par les émissions de la zone résidentielle proche.

Sur les stations urbaines, cette source de combustion biomasse est combinée avec la source impactant les particules de diamètre inférieur à 50 nm, précédemment identifiée comme la source trafic routier. **Pour cette journée d'épisode, sur les sites urbains, le nombre de particules issues du chauffage au bois est 1,5 à 2 fois plus important que celui provenant de la source trafic, qui est la source largement majoritaire en moyenne sur la campagne.**

6.3. Comportement des PUF sur une pollution liée à la formation d'Aérosols Inorganiques Secondaires

Le début du mois de février 2020 est caractérisé par une forte proportion d'aérosols inorganiques secondaires, essentiellement du nitrate d'ammonium (cf. 5.2.2).

La journée du 8 février présente les concentrations massiques les plus importantes sur cette période, sans pour autant dépasser le seuil d'information. L'augmentation des concentrations concerne une large zone géographique centrée sur le Nord de la France, mais qui ne touche que la moitié Nord de la région Ile-de-France, comme l'illustre la carte de la Figure 27.

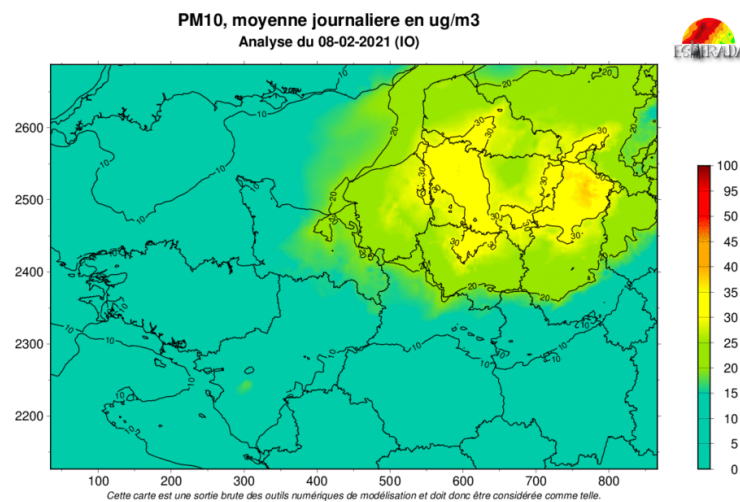


Figure 27 : Carte de pollution du modèle Esmeralda pour la journée du 8 février 2021

La figure 28 présente les différentes statistiques des concentrations horaires en nombre de PUF observées sur cette journée, illustrées sous forme de boîte à moustaches.

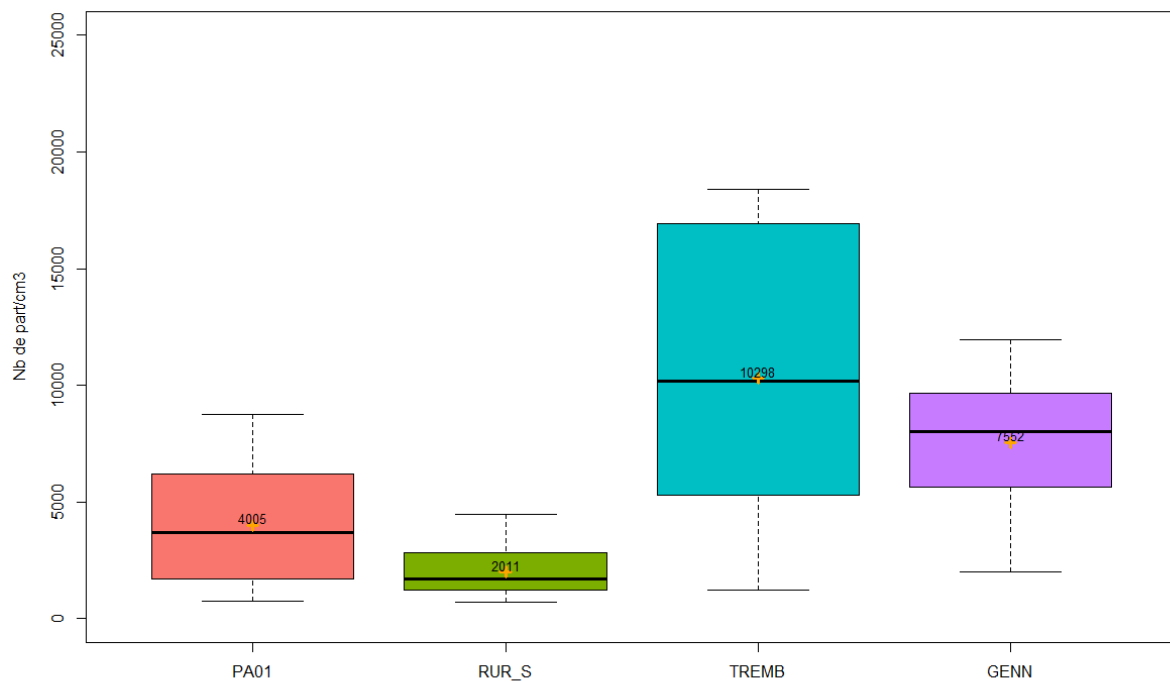


Figure 28 : Boîte à moustaches des concentrations horaires en nombre de PUF, le 8 février 2021.

Les nombres moyens de PUF, tout comme leur variabilité, sont très différents d'un site à l'autre lors de cette pollution aux particules secondaires. **Les concentrations moyennes sur les sites urbains sont modérées et comprises entre 4 000 et 10 300 part/cm³**. Un écart remarquable est observé entre le site urbain parisien et les sites urbains de banlieue, avec un site de Tremblay-en-France pouvant enregistrer des concentrations horaires maximales proches des 20 000 part/cm³. Le site Zone rurale Sud enregistre 2 fois moins de PUF que le site des Halles et 5 fois moins que le site de Tremblay-en-France. Cela s'explique par le fait que le site Zone rurale Sud se situe en-dehors de la zone concernée par cette formation importante de particules secondaires.

Les niveaux horaires minimums sont similaires sur tous les sites, contrairement à l'épisode de pollution de type combustion hivernale. Les concentrations moyennes sont comparables à la journée la plus faible pour le site des Halles et légèrement supérieures pour le site Zone rurale sud (+20 %). L'impact de ces particules secondaires est bien plus marqué sur **les sites urbains hors Paris qui enregistrent des niveaux 2 fois supérieures en comparaison à la journée de référence du 22 décembre 2020. Contrairement aux sources de combustion mises en évidence au paragraphe précédent, la présence de composés inorganiques secondaires dans les PM₁ ne semble pas impacter fortement le nombre de PUF**. Les profils granulométriques associés à la présence de ces particules inorganiques secondaires sont représentés sur la figure 29. Le site de la Zone rurale Sud n'étant pas concerné par cette augmentation de concentration massique, son profil granulométrique ne permet pas de caractériser l'impact de la formation d'aérosols inorganiques secondaires sur le profil des PUF en zone rurale. Les profils les plus marqués sont observés sur les sites de Gennevilliers et Tremblay-en-France, avec des **profils tri-modaux**.

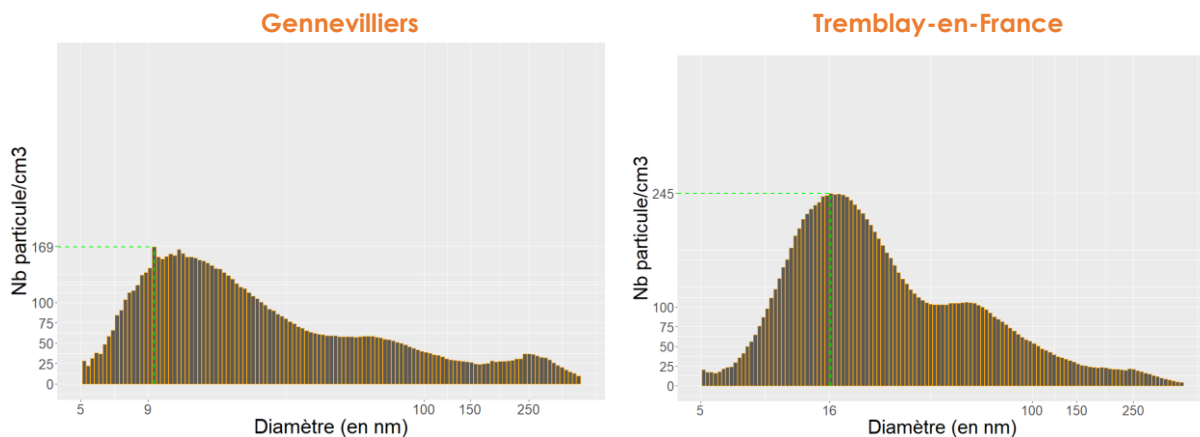


Figure 29 : Profils granulométriques d'une pollution de type formation d'aérosols inorganiques secondaires, le 8 février 2021.

Malgré une part modérée de matière carbonée dans la composition chimique des particules sur cette journée, les deux premiers modes observés correspondent aux sources prédominantes en Ile-de-France avec un mode majeur, identifié entre 15 et 20 nm, associé précédemment à la source trafic routier et le second mode, compris entre 80 et 100 nm, caractéristique du chauffage au bois. Ces modes sont cependant moins importants que lors de l'épisode de combustion hivernale. Des particules inférieures à 10 nm sont également relevées. Ce constat est particulièrement visible sur le site de Gennevilliers, entraînant des signaux nets sur ces particules inférieures à 10 nm. Un troisième mode apparaît également dans la gamme supérieure aux PUF, centré entre 240 et 250 nm. Bien que nettement plus faible que les deux autres sources, cette population est significative en termes de nombres sur la gamme 150 nm à 400 nm mais n'impacte donc pas le nombre total de PUF représenté sur la Figure 28. La combinaison de ces deux populations, inférieures à 10 nm et 240–250 nm, montre que ces particules sont très probablement issues de composés secondaires, très fins et qui s'agrègent très rapidement en particules plus grosses par nucléation (Gu, 2011). Ce constat est conforme aux distributions granulométriques théoriques des aérosols secondaires issues de la littérature scientifique repris en figure 30.

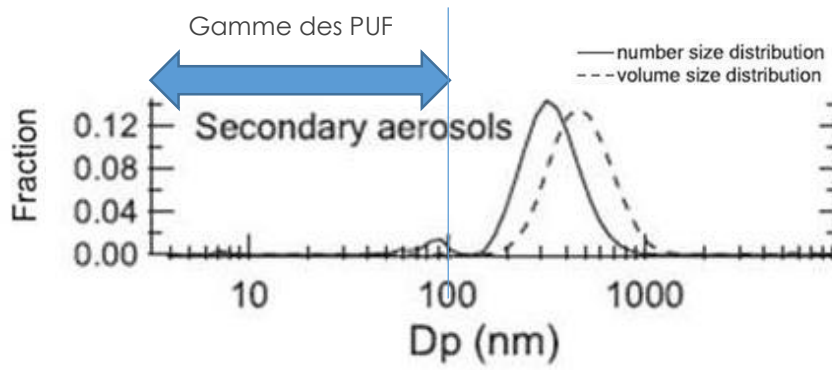


Figure 30 : Profil granulométrique théorique d'une pollution de type formation d'aérosols secondaires (D'après J. Gu, 2011)

Cette population, qui impacte peu le nombre total de PUF, contribue en revanche fortement aux concentrations massiques de PM_{10} et $PM_{2.5}$, de par le nombre important de particules comprises entre 100 nm et 1 μm . Elle est retrouvée de manière quasi-systématique lors de l'analyse des sites urbains sur cette période mais elle reste largement minoritaire en nombre en comparaison aux sources de combustion sur la gamme granulométrique analysée. Cette population est **difficile à quantifier sur la gamme des PUF** car difficile à déconvoluer des autres sources majeures. Ces enseignements pourront être confirmés lors d'une analyse spécifique sur la période printanière, saison propice à la formation de ces particules secondaires.

7. Conclusions et perspectives

Airparif a mené une campagne de mesure de décembre 2020 à février 2021, dont l'objectif était de renseigner et de comparer pour la première fois en Ile-de-France les niveaux de particules ultrafines (en nombre de particules et par tranches granulométriques) dans différentes situations de pollution de fond (éloignées des sources de pollution) de la région en période hivernale.

La mise en place des sites de Gennevilliers et Tremblay-en-France (en zone urbaine, dans l'agglomération parisienne) et Bois-Herpin (en zone rurale sud), en complément de la station Paris 1^{er} Les Halles, a permis d'obtenir des résultats non seulement sur des niveaux de références en nombre de PUF spatialisés sur la région mais aussi, grâce à la mesure SMPS, de caractériser des profils granulométriques sur la gamme 5 à 400 nm durant l'hiver 2020-2021.

Le comptage moyen du nombre de PUF dans la gamme 5 à 100 nm met en évidence une variabilité importante du nombre de particules ultrafines entre les sites de fond francilien. Cette variabilité est nettement plus marquée que celle observée pour les PM₁₀/PM_{2.5} ou pour le BC. Les niveaux de PUF les plus bas sont enregistrés sur le site rural, éloigné des sources de l'agglomération parisienne. Les niveaux les plus soutenus sont relevés sur les sites de fond urbains. Les niveaux moyens en PUF mesurés sur l'ensemble de la campagne sont compris entre 2700 part/cm³ pour le site rural et 6600 à 9300 part/cm³ sur les sites urbains. Sur la période, **les sites de Tremblay et Gennevilliers enregistrent ainsi une concentration en nombre de PUF plus de 3 fois supérieure à celle du site rural Sud. La différence notable entre le site de Paris 1^{er} Les Halles et les sites de Gennevilliers mais surtout de Tremblay-en-France s'expliquent par les sources urbaines locales, notamment la proximité des zones résidentielles.** Le site de Paris 1^{er} Les Halles, situé dans un jardin, est en effet plus éloigné des sources, notamment des axes routiers, que les deux autres sites urbains, implantés dans le tissu urbain, au milieu des habitations. **Ces concentrations relevées sur la zone urbaine de région parisienne sont conformes aux concentrations observées par les autres réseaux de surveillance français.**

L'analyse de la répartition du nombre moyen de PUF selon leur diamètre (sur 121 classes comprises entre 5 nm et 400 nm) met en évidence des profils granulométriques spécifiques durant la période hivernale, avec un profil urbain bimodal d'intensité plus ou moins importante selon le site de mesure. **Sur les sites urbains, ces profils font apparaître deux sources prédominantes de PUF : une première population majoritaire de particules ultrafines de diamètre compris dans la tranche 15 à 30 nm, caractéristique des PUF émises par le trafic routier, et une seconde population de diamètre compris entre 70 et 100 nm, en lien avec la combustion de biomasse, nettement plus marquée sur les sites de Tremblay-en-France et Gennevilliers.** La différence observée entre le site des Halles et les sites de fond périurbains s'explique essentiellement par l'utilisation du chauffage résidentiel au bois, plus marquée sur ces sites situés dans des zones résidentielles, avec le site Tremblay plus impacté que celui de Gennevilliers.

La variabilité de ces profils granulométriques sur les différentes périodes identifiées lors de la campagne confirme cette analyse, les particules comprises entre 70 et 100 nm devenant majoritaire lors des épisodes de combustion hivernale où le chauffage résidentiel est plus utilisé. L'analyse de ces périodes spécifiques permet d'illustrer des niveaux et des profils de référence hivernaux pour une journée faible, un épisode de combustion biomasse et une formation d'Aérosols Inorganiques Secondaires (AIS). Dans ce dernier cas, une troisième population apparaît avec des particules inférieures à 10 nm, mais également des particules supérieures à 250 nm, formées par nucléation. Cette population, majoritairement comprise entre 100 et 1000 nm impacte donc peu le nombre total de PUF, mais contribue fortement aux concentrations massiques.

Cette première campagne a ainsi permis de caractériser la variabilité du nombre de PUF en période hivernale sur différents sites de fond (hors de l'influence directe des sources de pollution) et de confirmer l'impact des sources urbaines sur les niveaux de PUF en Ile-de-France. **L'analyse fine du diamètre de ces particules ultrafines, couplée aux mesures de composition chimique, a permis d'améliorer les connaissances sur les contributions de ces différentes sources en période hivernale et de mettre en évidence l'importance du trafic routier et, lors des périodes les plus froides, du chauffage au bois.**

Cette évaluation des niveaux moyens et des profils granulométriques en situation de fond lors de la période hivernale devra être complétée sur d'autres périodes de l'année et dans d'autres environnements.

Des campagnes ont d'ores et déjà été menées et sont en cours d'exploitation ou sont planifiées dans les mois à venir.

Une exploitation des résultats mesurés en continu depuis fin 2019 sur le site de Paris 1^{er} Les Halles, dont l'instrument de mesure est financé par Région Île-de-France, est en cours de réalisation et sera publiée dans le courant de l'année.

Les niveaux franciliens mesurés loin de l'influence directe des sources de pollution serviront de référence aux campagnes menées au plus près des sources locales (trafic routier, trafic aérien,...) pour en caractériser l'impact. Une campagne de mesure a notamment été réalisée durant l'été 2021 afin de caractériser les niveaux en nombre et les profils granulométriques des PUF à proximité du trafic routier. Les résultats seront publiés mi-2022. Une campagne en zone péri-aéroportuaire devrait également être réalisée au cours de l'été 2022. Ces travaux sont cofinancés par Airparif la Métropole du Grand Paris, la Ville de Paris, la communauté d'agglomération Paris Saclay, l'ARS et Aéroport de Paris.

Dans le cadre d'un partenariat spécifique Airparif, Ville de Paris et Bloomberg Philanthropies, une campagne plus fine à l'échelle de Paris sera réalisée début 2022 afin d'évaluer la variabilité du nombre de PUF et de la contribution des différentes sources, à la fois à proximité du trafic routier et en situation plus éloignée des sources.

Références

- Airparif, « Synthèse des connaissances sur les particules en Île-de-France », 2021a.
- Airparif, « Evaluation de l'impact des restrictions d'activités liées à la pandémie de coronavirus sur la qualité de l'air en Ile-de-France », 2021b.
- Airports Council International (ACI), « Ultrafines particules at airports - Current understanding of ultrafine particle emissions and concentrations at airports in 2018 », 2018.
- ANSES, « Effet sanitaires des particules de l'air ambiant extérieur selon les composés, les sources et la granulométrie », Rapport d'expertise collective, 2019.
- ANSE, « Polluants "émergents" dans l'air ambiant - Identification, catégorisation et hiérarchisation de polluants actuellement non réglementés pour la surveillance de la qualité de l'air, Avis de l'Anses », Rapport d'expertise collective - Edition scientifique, 2018.
- Atmo AURA, « Observatoire des particules ultrafines atmosphériques en Rhône-Alpes », 2016.
- Atmo AURA, « Observatoire des particules Ultra Fines (PUF) en Auvergne-Rhône-Alpes », 2020.
- Atmo Grand-Est, « Rapport bibliographique sur les particules ultrafines (PUF) », 2020.
- Atmo Haut-de-France, « intercomparaison de dispositifs de mesure en continu des particules ultrafines en air ambiant », 2020.
- Atmo Hauts-de-France, « Stratégie "Particules ultrafines" pour la région Hauts-de-France », 2017.
- Atmo Hauts-de-France, « Surveillance des particules ultrafines dans la région Hauts-de-France », 2019.
- Atmo Hauts-de-France, « Surveillance des particules ultrafines dans la région Hauts-de-France », 2019.
- Atmo Nouvelle-Aquitaine, « Mesures exploratoires de particules ultrafines en Aquitaine », 2015.
- Atmo Nouvelle-Aquitaine, « Particules ultrafines - Bilan annuel 2017 », 2018.
- AtmoSud, « Plan de surveillance des particules dans la région PACA, PUF Bilan des mesures 2017 », 2018.
- AtmoSud, « Plan de surveillance des particules dans la région PACA, PUF Bilan des mesures 2016 », 2017.
- AtmoSud, « Plan de surveillance des particules dans la région PACA, PUF Bilan des mesures 2017 », 2018.
- Autorité de contrôles des nuisances aéroportuaires (ACNUSA), « Particules ultrafines et aviation - Etude bibliographique », 2017.
- Belleudi V., Faustini A., Stafoggia M., Cattani G., Marconi A., Perucci C. A., Forastiere F. « Impact of fine and ultrafine particles on emergency hospital admissions for cardiac and respiratory diseases », *Epidemiology*, 21(3):414-23, 2010.
- Characteristics, ambient processing and implications on human exposure », *Atmospheric Environment*, vol. 42, p. 8113-8138, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.050>.
- Chatignoux E., Host S. « Expositions à la pollution atmosphérique et recours aux urgences pour pathologies respiratoires chez les enfants en Ile-de-France ». Paris : Observatoire Régional de Santé Ile-de-France, 2013.
- Donaldson K., Lang Tran C., « Inflammation caused by particles and fibers ». *Inhalation toxicology*, 14 :5-27, 2020.
- Gramsch E., F. Reyes, P. Oyola, M.A. Rubio, G. López, P. Pérez & R. Martínez, « Particle size distribution and its relationship to black carbon in two urban and one rural site in Santiago de Chile », 2014.
- Gu J. et al, « Source apportionment of ambient particles: Comparison of positive matrix factorization analysis applied to particle size distribution and chemical composition data », 2011.
- LSCE/Airparif « FRANCIPOL: Impact de la pollution longue distance sur les particules et leurs précurseurs gazeux à Paris et Ile-de-France », Programme Primequal 2, 2013.
- Petetin, H., Beekmann, M., Sciare, J., Bressi, M., Rosso, A., Sanchez, O., and Ghersi, V.: A novel model evaluation approach focusing on local and advected contributions to urban PM2.5 levels

– application to Paris, France, *Geosci. Model Dev.*, 7, 1483–1505, <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1483-2014>, 2014.

- LCSQA, « Guide méthodologique pour la mesure du « Black Carbon » par aethalomètre multi-longueur d'onde AE33 dans l'air ambiant », DRC-20-201695-01215A, 2020
- LCSQA/INERIS. « Caractérisation de l'aérosol atmosphérique en milieu urbain ». Rapport final, DRC-0345581-OBI/883, 2003.
- LCSQA/INERIS. Surveillance des particules submicroniques. Convention 04000087, Etude n°5 - Surveillance des particules ultrafines INERIS/LNE/EMD, DRC-04-55265-AIRE n°1081-Ole-v1a, 2004.
- LCSQA/INERIS/AIRPARIF. « Etude comparative entre le TEOM1400 et différents préleveurs manuels sur filtre - Caractérisation physico-chimique de l'aérosol atmosphérique de Paris ». Rapport INERIS DRC-01-27588-ERSA-OBI/449, 2001.
- LCSQA/INERIS/EMD. « Connaissance de la pollution par les particules submicroniques ». DRC/AIRE-06-74752-Ole-n°0803-v4, 2006.
- LCSQA/INERIS/EMD. « Surveillance des particules submicroniques ». DRC/UNITE-05-64997-Ole-n°745-v2B, 2005.
- Morawska L. et al., « Ambient nano and ultrafine particles from motor vehicle emissions :
- Oberdörster G, Z Sharp, V Atudorei, A Elder, R Gelein, W Kreyling, C Cox. « Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain ». *Inhalation toxicology*, 16(6-7):437-45, 2004.
- OMS, "Lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air", 2021.
- Regniers O., « Les particules diesel ultrafines : techniques de mesure à l'émission et à l'immission », 2006.
- Samoli et al. « Exposure to ultrafine particles and respiratory hospitalisations in five european cities ». *European respiratory journal*, 2016.
- Schins R, Lightbody J., Borm P., Shi T., Donaldson K., Stone V., « Inflammatory effects of coarse and fine particulate matter in relation to chemical and biological constituents ». *Toxicology and applied pharmacology*, 195, 1-11, 2004.

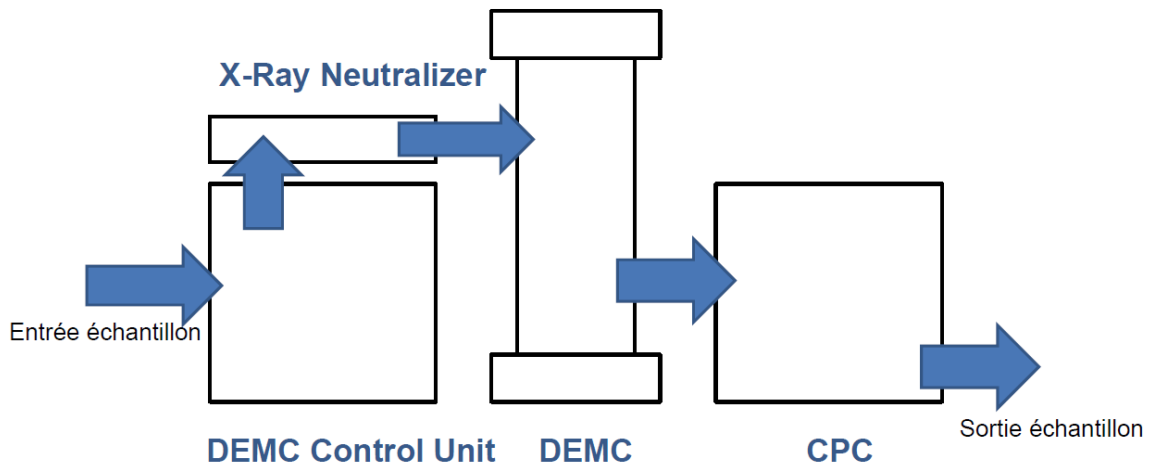
Annexe 1 : Matériels de mesure et métrologie

Analyseur SMPS (Mesure du nombre de particules en part/cm^3)

L'analyseur choisi pour réaliser cette surveillance PUF est un **spectromètre granulomètre à mobilité électrique** (Scanning Mobility Particle Sizer). En métrologie des aérosols, c'est une méthode de mesure fondée sur les propriétés électriques des aérosols et dont le principe comprend 4 étapes successives :

- Le marquage des particules par une source rayon X (neutraliseur)
- La séparation et la sélection des particules, avec un Classificateur Electrostatique (DEMC),
- La détection des particules, avec un Compteur de Noyaux de Condensation (CPC),
- Le traitement des données.

Ces étapes sont illustrées dans le schéma technique ci-dessous :

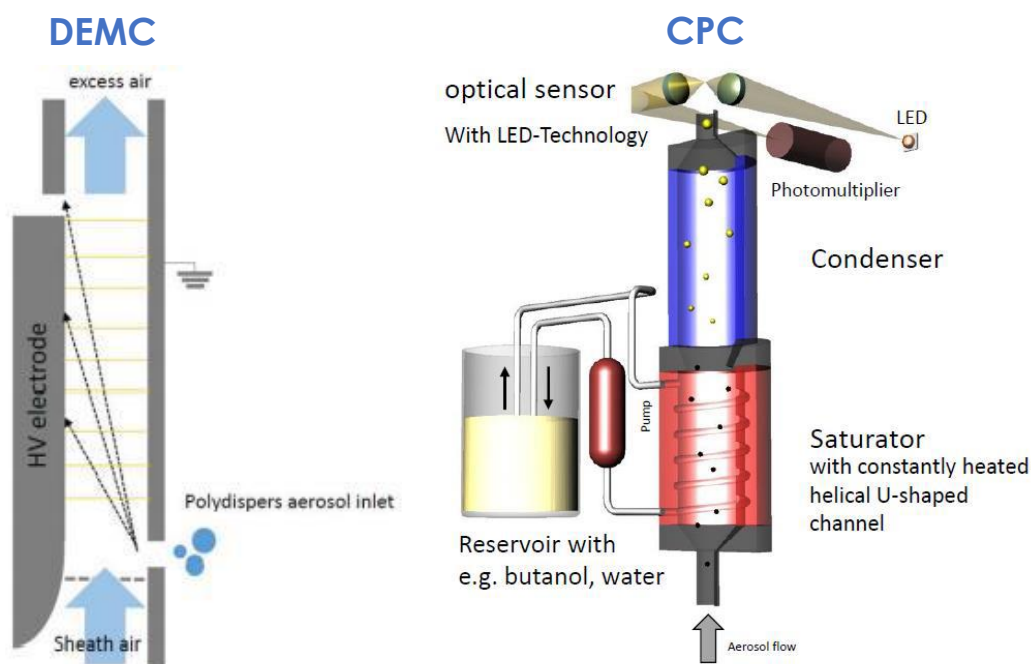


Le SMPS ainsi composé d'un DEMC (Differential Electrical Mobility Classifier) qui sélectionne les particules suivant leurs tailles granulométriques via leurs mobilités électriques, et d'un CPC (Condensation Particle Counter) permettant de les faire grossir afin de les compter.



Il est nécessaire de charger électriquement les particules dans un neutraliseur pour réaliser le tri des particules. Pour ce faire, un rayonnement ionisant est envoyé sur les molécules d'air, générant des ions positifs et négatifs venant se coaguler avec les particules ultrafines.

À l'issue du neutraliseur, un équilibre stationnaire se crée entre les différentes fractions de charges, dont la distribution est connue. Les particules, une fois passées dans le neutraliseur, et donc chargées électriquement, sont envoyées dans la colonne du DEMC. Un champ électrique variable va sélectionner les particules selon leur mobilité électrique, et donc leur taille. Une fois sélectionnées, les particules monodispersées sont envoyées au CPC pour comptage. Les schémas constructeurs du DEMC et du CPC sont illustrés ci-dessous :



Le CPC permet de compter optiquement les particules préalablement sélectionnées dans le DEMC. Afin que le détecteur puisse les détecter, il faut grossir la taille des particules.

Pour faire grossir ces nanoparticules, la méthode consiste à faire passer le flux de particules ultrafines dans une chambre sursaturée en vapeurs d'alcool. L'alcool, après refroidissement, va venir se condenser sur les particules ultrafines, ce qui aura pour conséquence de les faire grossir.

Ainsi, la mesure brute est en particules par secondes et la concentration en nombre, en particules/cm³ (Part/cm³), est déduite par inversion, en tenant compte des pertes par diffusion et de la dilution des PUF par leur passage dans la colonne du DEMC. Ces pertes de charges ont été estimées pour l'un des SMPS d'Airparif lors d'un exercice national d'intercomparaison réalisé par Atmo HdF en 2019 portant sur le comptage (Atmo HdF, 2019). Les résultats obtenus sont conformes aux attentes métrologiques.

L'U-SMPS de chez Palas existe avec deux modèles de colonne DEMC, une grande permettant d'obtenir la distribution granulométrique sur la gamme 10 à 1000 nm et une petite affichant une gamme plus fine allant de 5 à 400 nm. **Pour cette étude, il a été choisi de configurer cet analyseur sur la gamme la plus fine allant de 5 nm à 400 nm avec une mesure toutes les 5 minutes validée techniquement sur 121 classes.**

D'un point de vue normatif, il n'existe pas de norme qui régit cette mesure SMPS. Actuellement, la seule norme existante est basée sur le comptage total par CPC. Cette norme XP CEN/TS 16976 Air ambiant – « Détermination de la concentration en nombre de particules de l'aérosol atmosphérique. » datant de 2016 est une spécification technique traitant de travaux qui sont encore en phase de développement technique ou dont on estime qu'ils sont susceptibles d'un accord futur sur une norme internationale. Une norme propre à la mesure SMPS est en cours de discussion.

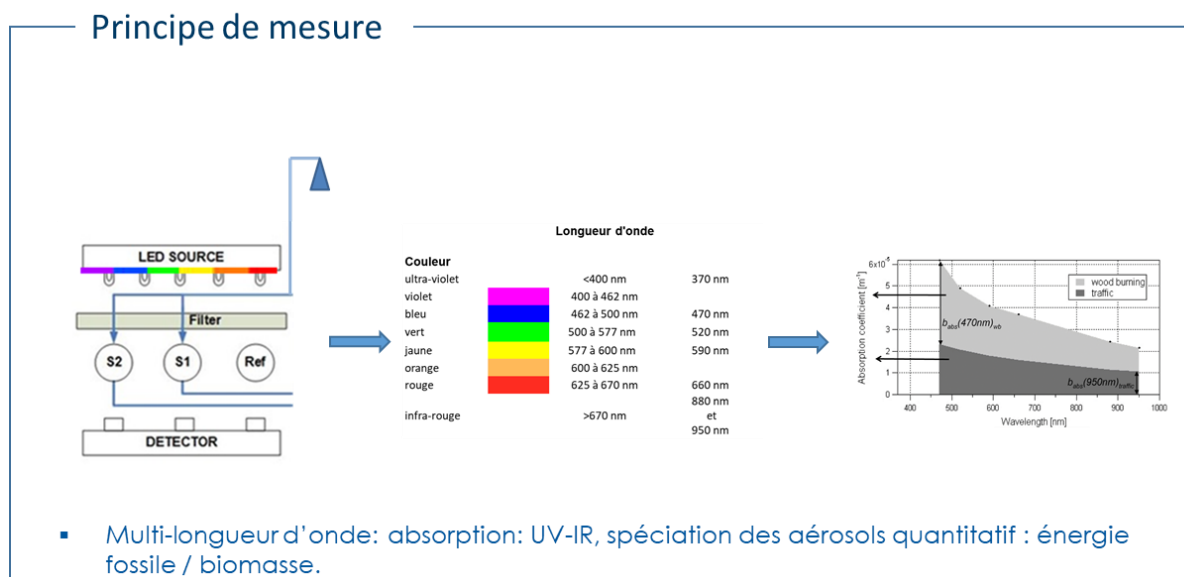
Sur la campagne de mesure, les taux de fonctionnement de ces matériels sont compris entre 95 % et 99 %. Il sont de 98 %, 99 %, 95 % et 99 % respectivement pour Paris 1^{er} Les Halles, Gennevilliers, Tremblay-en-France et Zone rurale sud-Bois Herpin.

Analyseur AE33 (Mesure du Black Carbon en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Les analyseurs AE33 sont utilisés au sein du dispositif de surveillance de la qualité de l'air francilien depuis 2015. **Ces aethalomètres permettent la mesure du continu du Black Carbon.**



L'aethalomètre mesure en continu la matière particulaire carbonée. Son principe de fonctionnement permet de faire la distinction entre les particules carbonées issues d'une combustion d'hydrocarbures (eBCff) et issues d'une combustion de biomasse (eBCwb).



L'analyseur permet la détermination des aérosols carbonés à partir de la mesure de l'atténuation d'un signal émis à travers l'échantillon. L'atténuation mesurée est directement liée à la masse de particules carbonées présente dans l'échantillon. Ce signal est composé de 7 longueurs d'ondes allant de l'Ultra-Violet à l'Infra-Rouge (voir schéma ci-dessus). La différence d'absorption suivant la longueur d'onde permet de dissocier la mesure totale des particules carbonées (EBC) en deux composantes (eBCff et eBCwb) suivant l'origine de la combustion. En effet, dans les longueurs

d'onde proche de l'UV, certaines molécules organiques contribuent à l'augmentation de l'absorption mesurée par l'Aethalomètre. Ces molécules, regroupées sous le terme « Brown Carbon », sont supposées être majoritairement liées au chauffage au bois. Ce principe de fonctionnement permet d'estimer de façon automatique et en temps réel la fraction de Carbone Suie issue de la combustion d'hydrocarbures (majoritairement liés au trafic routier en Ile-de-France) désignée par le terme « eBCff », et la fraction issue de la combustion de la biomasse (chauffage au bois, brûlage de déchets verts...), désignée sous le terme « eBCwb ».

Lors de campagne, sur les sites urbains, **le taux de fonctionnement des AE33** est de 88 %, 92 % et 92 % respectivement pour Tremblay, Gennevilliers et Paris 1^{er}-Les Halles. Sur le site rural, le taux de fonctionnement est relativement faible à 58 % du fait principalement des faibles concentrations enregistrées sur ce site passant sous la limite de détection de l'analyseur et rendant la donnée invalide.

ACSM (Mesure de composition chimique en temps réel en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

L'analyseur mis en œuvre pour mesurer la composition chimique en temps réel est développé par la société Aerodyne Res. Inc. L'**Aerosol Chemical Speciation Monitor (ACSM)** est **un spectromètre de masse permettant une mesure qualitative et quantitative de la composition des aérosols submicronique, dont la taille est inférieure à 1 μm** . Il permet une mesure rapide et continue des composantes chimiques majeures des particules que sont la matière organique (OM) et les ions nitrate (NO_3^-), sulfate (SO_4^{2-}), ammonium (NH_4^+) et chlorure (Cl^-).



Le taux de fonctionnement de l'ACSM de Paris 1^{er}-Les Halles est de 99 % sur la période de mesure.

Mesure de la concentration massique (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Pour le réseau réglementaire de surveillance des particules, Airparif met en œuvre des analyseurs appartenant à la liste des appareils conformes pour la mesure réglementaire de la qualité de l'air mis à disposition par le Laboratoire Central de la Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA) auprès des Associations Agréées pour la Surveillance de la Qualité de l'Air. Cette homologation au niveau national permet de garantir une **mesure par gravimétrie des particules conforme à la norme française en vigueur NF EN 12341 : « Air ambiant - Méthode normalisée de mesurage gravimétrique pour la détermination de la concentration massique MP_{10} ou $\text{MP}_{2.5}$ de matière particulaire en suspension »**. Cette liste est accessible sur le site de

LCSQA

:

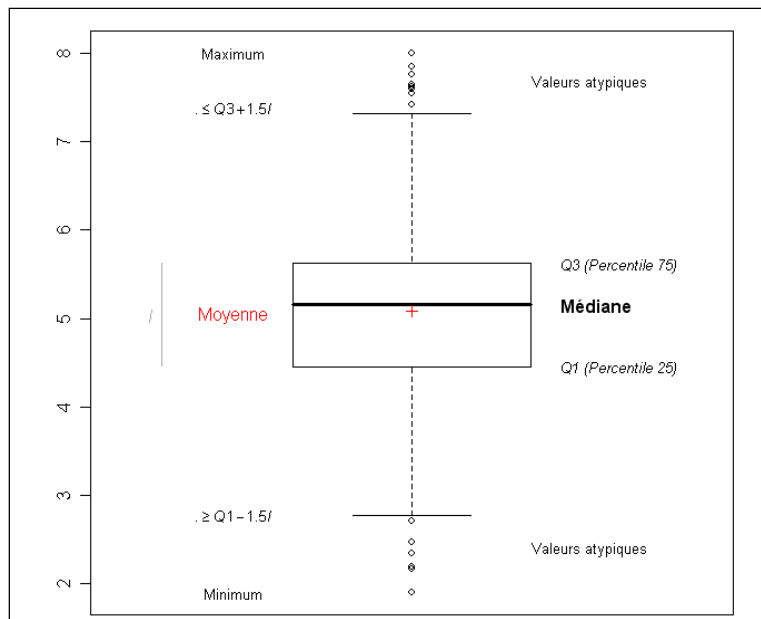
https://www.lcsqa.org/system/files/documents/Liste%20appareils%20conforme%20mesure%200_qualit%C3%A9%20air%20M%C3%A0J_13-05-20_v2_0.pdf .

Le taux de fonctionnement des PM₁₀ est de 97 %, 94 %, 92 % et 95 % respectivement pour Paris 1^{er}-Les Halles, Gennevilliers, Tremblay-en-France et Zone rurale sud-Bois Herpin.

Le taux de fonctionnement des PM_{2.5} est de 96 %, 92 % et 89 % respectivement pour Paris 1^{er}-Les Halles, Gennevilliers et Zone rurale sud-Bois Herpin.

Annexe 2 : Boîte à moustache – Définition

Une boîte à moustaches (ou box plot) est un graphique représentant la répartition d'une série statistique. Pour ce faire, l'échantillon est séparé en 4 parties de même effectif, appelées quartiles. Un quartile est donc constitué de 25 % des données de l'ensemble de l'échantillon. Le deuxième quartile (percentile 50) est appelé plus couramment la médiane (50 % des valeurs y sont inférieures, 50 % y sont supérieures).



La partie centrale correspondant à une « boîte » représente 50 % des données. Ces données se situent dans les 2^{ème} et 3^{ème} quartiles. La différence entre les deux est appelée l'écart inter quartiles.

Les moustaches réparties de chaque côté de la boîte représentent généralement près de 25 % des données, mais n'excèdent pas en terme de longueur, $1,5 \cdot I$ (I étant l'écart interquartile, c'est-à-dire la longueur de la boîte), ce qui peut amener la présence de points atypiques en dehors des moustaches. La fin de la moustache supérieure correspond donc soit à la valeur $3Q + 1,5I$ (3^{ème} quartile + une fois et demi l'intervalle inter quartile), soit au maximum de l'échantillon s'il est plus faible que cette valeur.

La fin des moustaches est très proche des centiles 1 et 99, lorsque la distribution de l'échantillon est gaussienne (suit une loi Normale).