



Campagne de mesure francilienne sur les particules ultrafines (PUF)

SITUATION PROXIMITÉ AU TRAFIC ÉTÉ 2021



**Campagne de mesure francilienne sur les
particules ultrafines (PUF) :
Situation de proximité au trafic routier été
2021**

Octobre 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

« Le bon geste environnemental : N'imprimez ce document que si nécessaire et pensez au recto-verso ! »

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION.....	4
2. METHODOLOGIE	6
2.1. LES MESURES.....	7
2.1.1. Descriptif du site de mesure « urbain de fond ».....	8
2.1.2. Descriptif des sites de mesures « trafic urbain ».....	8
2.1.3. Caractéristiques du trafic routier des sections d'axes étudiées.....	10
2.1.4. Les polluants mesurés.....	12
2.2. QUALITE DE LA MESURE.....	12
2.3. METEOROLOGIE	13
2.3.1. Roses des vents (secteurs de vents).....	14
2.4. QUALITE DE L' AIR SUR LA PERIODE DE LA CAMPAGNE	15
3. CARACTERISATION DU NOMBRE ESTIVAL DE PUF EN SITUATION DE PROXIMITE AU TRAFIC ROUTIER	16
3.1. HIERARCHISATION DU NOMBRE DE PUF	16
3.2. VARIABILITE TEMPORELLE DES PUF	19
3.2.1. Évolution horaire.....	19
3.2.2. Profil moyen journalier.....	21
3.2.3. Profil moyen hebdomadaire	22
3.2.4. Profil moyen mensuel	24
3.3. ORIGINE DE LA POLLUTION	25
3.3.1. Rose d'impact	27
4. CARACTERISATION DU NOMBRE DE PARTICULES PAR CLASSES GRANULOMETRIQUES.....	29
4.1. FORMATION ET DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DES AEROSOLS.....	29
4.2. LES PARTICULES PRIMAIRES ET SECONDAIRES DES VEHICULES MOTORISES.....	32
4.3. PROFIL GRANULOMETRIQUE MOYEN	32
4.4. INFLUENCE DE L'ETAPE DE FORMATION DES AEROSOLS	36
4.5. VARIABILITE TEMPORELLE DES PUF PAR CLASSE DE TAILLE	39
4.5.1. Profil moyen hebdomadaire 5-30 nm et 30-100 nm	39
4.5.2. Profils horaires journaliers 5-30 nm et 30-100 nm	41
4.5.3. Profils horaires journaliers et trafic routier.....	42
5. CONCLUSION & PERSPECTIVES.....	45
REFERENCES.....	47
ANNEXE I : LES POLLUANTS MESURES.....	49
ANNEXE II : METROLOGIE.....	53
ANNEXE III : BOITE A MOUSTACHE - DEFINITION.....	57

1. INTRODUCTION

Comme leur nom l'indique, les **particules ultrafines (PUF)** sont encore plus petites que les particules fines, leur diamètre est inférieur à 0,1 micron contre 2,5 microns pour les particules fines 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 potentiels enjeux en termes d'impacts sanitaires, l'Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) insiste 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**).

En Île-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 (station de fond urbain). 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 un appareil de mesure permanent sur le site urbain de fond Paris 1^{er} les Halles financé par la région Île-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 Île-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-Charles de Gaulle 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 le groupe ADP.

Fin 2020 - début 2021, le premier volet de cette étude a été réalisé. Il s'est **focalisé sur l'environnement de fond**, éloigné de l'impact direct d'une source de pollution (trafic routier, site industriel, ...) avec la réalisation d'une campagne de mesure en période hivernale. En complément de la station de référence Paris 1^{er} Les Halles, 3 autres sites de mesures ont été instrumentés pour cette campagne exploratoire dont 2 en situation de fond urbain dans des zones différentes et un site en zone rurale (Airparif, 2022). Cette étude a permis de fournir des niveaux de référence hivernaux en PUF sur différents sites de fond en Île-de-France.

Le comptage moyen du nombre de PUF dans la gamme 5 à 100 nm a mis en évidence une variabilité importante du nombre de particules ultrafines entre les sites de fond franciliens. Cette variabilité est nettement plus marquée que celle observée pour les mesures de particules (PM) et de Black Carbon (BC, carbone suie) en concentrations massiques. Sur les sites urbains, les profils granulométriques font apparaître deux sources prédominantes de PUF : une première population majoritaire de particules ultrafines de diamètre modal compris dans la gamme 15 à 30 nm, caractéristique des PUF émises par le trafic routier, et une seconde population de diamètre modal compris entre 70 et 100 nm, en lien avec la combustion de biomasse, nettement plus marquée sur les sites résidentiels.

L'évolution temporelle de ces profils granulométriques en comparaison à la composition chimique des particules confirme cette analyse, le nombre de particules compris entre 70 et 100 nm devenant majoritaire lors des épisodes de combustion hivernale au chauffage au bois. **En moyenne, sur cette campagne fond hivernale, la source trafic routier reste néanmoins prédominante en zone urbaine francilienne et conforte la nécessité de l'évaluer plus spécifiquement.**

Le présent rapport porte sur l'environnement à proximité du trafic routier en période estivale. Tout comme le premier volet de l'étude, la station de fond urbain de référence Paris 1^{er} Les Halles est utilisée comme référence et est complétée du 14 juin au 19 septembre 2021 par 3 autres sites localisés le long d'axes routiers franciliens de typologies différentes.

Le rapport est décliné en 2 parties. La première partie présente la méthodologie appliquée à la mise en œuvre de la campagne de mesure. Elle décrit les sites de mesure, les polluants mesurés, les moyens de mesure utilisés, l'assurance qualité permettant de garantir la qualité des données observées ainsi que les conditions météorologiques et la qualité de l'air sur la période de la campagne.

La seconde partie présente 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 du trafic routier sur les niveaux de PUF.

2. METHODOLOGIE

Cette étude a pour objectif de fournir des **niveaux de référence en nombre de particules par classes granulométriques en situation de proximité au trafic routier à partir de leurs variabilités spatiales et temporelles** en Ile-de-France. Ces niveaux pourront être par la suite comparés à des situations influencées par d'autres sources locales (aéroportuaire, etc...) et des situations de fond préalablement étudiées.

La typologie « trafic » désigne des points de mesure qui sont sous l'influence directe du trafic routier en un point donné, situés à moins de 10 m des voies de circulation. La mesure **permet de fournir des informations sur les concentrations en nombre de PUF auxquelles les usagers de la route, les piétons ainsi que les Franciliens résidants près d'une infrastructure routière sont susceptibles d'être exposés de façon chronique.**

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 dite de fond, **représentative d'un secteur géographique plus ou moins large selon leur environnement (à l'échelle d'un quartier dans Paris, d'une ville en proche couronne, et de plusieurs kilomètres carrés pour les stations rurales). Il est alors intéressant de comparer les concentrations observées sur cette typologie à celles obtenues sous l'influence de sources pour caractériser leur impact sur le nombre de particules.**

Le comptage des particules par classe granulométrique est effectué avec un spectromètre granulomètre à mobilité électrique, type SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer, voir l'Annexe I) 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 (avec du butanol). L'unité affichée pour ces données de comptage est l'unité usuelle en nombre de particules/cm³.

L'instrumentation de mesures de carbone suies (ou Black Carbon – BC), en complément des mesures de particules ultrafines (PUF) lors de cette étude trafic, doit permettre d'étudier la corrélation entre le BC émis par le trafic routier et les PUF. **La mesure massique du BC est réalisée par un aethalomètre multi longueurs d'ondes** qui (voir l'Annexe I), 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) largement minoritaire sur cette typologie et saisonnalité. Cette mesure est réalisée dans la fraction PM_{2.5}.

La campagne de mesure estivale le long du trafic routier s'est déroulée du 14 juin au 19 septembre 2021 sur trois points de mesure trafic en complément du site de référence de fond parisien. Ils sont présentés dans la partie suivante.

2.1. Les mesures

Il a été choisi d'instrumenter des stations de trafic du réseau de surveillance d'Airparif déjà équipées pour la surveillance réglementaire.

Trois sites trafic ont été sélectionnés en agglomération (2 sites urbains et 1 péri-urbain), proches d'axes routiers présentant des caractéristiques différentes en termes de configuration (nombre de voie, bâti environnant, ..., de trafic, de vitesse de circulation et de composition du parc roulant, notamment de poids lourds).

Les niveaux observés seront comparés à ceux mesurés par la **station de référence permanente Paris 1^{er} Les Halles caractérisant le fond parisien**.

Ville	Lieu	Code station	Type de station	Coordonnées
Paris 1 ^{er}	Jardin Nelson Mandela	PA01	Urbain de Fond	2°20'40.60" E 48°51'43.67" N
Montlhéry (91)	Route Nationale 20	RN20	Péri-Urbain Trafic	2°16'07.31" E 48°38'27.21" N
Paris 9 ^{ième}	Bd Haussmann	HAUS	Urbain Trafic	2°19'49.42" E 48°52'23.61" N
Paris 12 ^{ième}	Bd Périphérique Est	BPE	Urbain Trafic	2°24'46.01" E 48°50'18.77" N

Tableau 1 : codification et coordonnées des sites étudiés

La Figure 1 ci-dessous localise les différents sites de mesure de cette étude.



Figure 1 : Cartographie des sites de l'étude trafic PUF estivale (image Google Earth).

2.1.1. Descriptif du site de mesure « urbain de fond »

- **Paris 1^{er} Les Halles :**

Le site de mesure de « fond urbain » **PA01** est implanté au sein du jardin Nelson Mandela (Analyseurs installés en sous-sol), la hauteur de prélèvement des polluants est de 1.8 m – une hauteur conforme aux recommandations réglementaires.



Figure 2 : Site PA01, à gauche vue du jardin Nelson Mandela (Source Google Earth) ; à droite vue vers le nord des points de prélèvement de la station PA01

2.1.2. Descriptif des sites de mesures « trafic urbain »

- **Boulevard Périphérique Est (75)**

Le site de mesure « trafic urbain » **BPE** est implanté à proximité immédiate du Boulevard Périphérique Est qui est composé de 2x 4 voies de circulation et face au centre sportif Alain Mimoun. La largeur totale de l'axe est d'environ 32 m (voir Figure 3).

La hauteur de prélèvement des polluants est de 2,9 m et à une distance au sol de 5 m du bord de la voie (pour la mesure des PUF).



Figure 3 : A gauche, vue vers l'est de la station Boulevard Périphérique Est ; à droite, vue sud-nord du Boulevard Périphérique Est (source Google Earth) – le point rouge localise la station BPE

- **Boulevard Haussmann (75)**

Le site de mesure « trafic urbain » **HAUS** est implanté face au 35 Boulevard Haussmann. La configuration du boulevard Haussmann est du type « canyon » avec une largeur d'environ 30 m et d'un bâti environnant d'une hauteur moyenne de 20 m. Une rue peut être classifiée en rue canyon à partir d'un ratio hauteur/largeur > 0,5. La hauteur des bâtiments et la largeur du boulevard donnent un ratio hauteur/largeur de 1,5.

Le boulevard est en sens unique de circulation de l'est vers l'ouest (voir Figure 5). La largeur de l'axe (trottoirs inclus) est d'environ 30 m. Il est composé de 4 voies de circulation, dont une voie de bus sur sa droite (voir Figure 4) d'une largeur d'environ 14 m. La hauteur de prélèvement est de 3,7 m et à une distance au sol de 2,6 m du bord de la voie.



Figure 4 : à gauche Vue sud-nord (source Google Earth) ; à droite vue de la station HAUS (source Google Earth) – le point rouge localise la station HAUS



Figure 5 : Vue est-ouest (source Google Earth) – le point rouge localise la station HAUS – les points verts localisent les feux de signalisation – les flèches bleues représentent les sens de circulation

- **RN20 Montlhéry (91)**

Le site de mesure **RN20** est situé à Montlhéry, une ville péri-urbaine du département de l'Essonne. Le site de mesure est implanté à proximité immédiate de la RN20 dans une **section de la nationale qui est en pente** et à 47 m du carrefour le plus proche. Le sens de circulation est ascendant face à la station de mesure correspondant à une **phase d'accélération quand le feu passe au vert**. Pour les besoins de la campagne de mesure, ce site a été complété d'une armoire supplémentaire afin d'y installer le SMPS (voir Figure 6 et Figure 7).

L'axe routier d'une largeur totale de 32 m (trottoirs inclus) est composé de 3 x 2 voies d'une largeur d'environ 22 m, comprenant une voie de bus de part et d'autre de celui-ci.
La hauteur moyenne du bâti aux alentours de la station de mesure est de 6 m.
La hauteur de prélèvement est de 2,4 m et sa distance au sol au bord de la voie est de 0,8 m.



Figure 6 : à gauche Vue sud-nord (source Google Earth) ; à droite vue de la station RN20 – le point rouge localise la station RN20



Figure 7 : le point rouge localise la station RN20 (source Google Earth) – les points verts localisent les feux de signalisation – les flèches bleues représentent les sens de circulation

2.1.3. Caractéristiques du trafic routier des sections d'axes étudiées

Les sites trafic étudiés sont implantés à proximité immédiate d'axes routiers ayant des caractéristiques de trafic bien distinctes. Ces caractéristiques ayant un impact sur les niveaux de pollution mesurés, il est important de mesurer des configurations différentes pour cette étude.

Un axe routier peut être caractérisé par son trafic moyen journalier annuel (TMJA) sur une section donnée, la composition du parc roulant circulant, le débit des véhicules (exemple : nombre de

véhicule/h), la vitesse de circulation, etc... Sa configuration est également impactante (rue canyon, rue en pente, présence de feux tricolores, ...).

Les principales caractéristiques disponibles des sections routières étudiées sont listées ci-dessous.

- Le TMJA est obtenu en calculant la moyenne du nombre de véhicules circulant sur cette section, tous sens confondus sur une année. Le Tableau 2 dresse le TMJA des sections de routes étudiées.

Station	NOMBRE DE VOIE DE CIRCULATION	TRAFFIC MOYEN JOURNALIER ANNUEL (TMJA) (CUMULE SUR LES DEUX SENS DE CIRCULATION)
ROUTE NATIONALE 20	6	53 600*
BD Haussmann	4	38 000**
Bd PERIPHERIQUE	8	243 400***

*source DIRIF 2018 ; **source Mairie de Paris 2017 ; ***source Conseil 2017

Tableau 2 : Caractéristiques du trafic des axes étudiés

Le TMJA du Boulevard Périphérique est 4,5 fois supérieur à celui de la route nationale RN20 et 6,4 fois supérieur à celui du boulevard Haussmann.

- La répartition modélisée du parc roulant** en pourcentage est déduite de l'inventaire des émissions 2018 réalisé par Airparif (voir la Figure 8). Chaque type de véhicule est comptabilisé par catégorie selon la classification suivante : véhicule particulier (VP), véhicule utilitaire (VU), véhicule 2 roues motorisées, poids lourd (PL), transport en commun bus et autocar (TC).

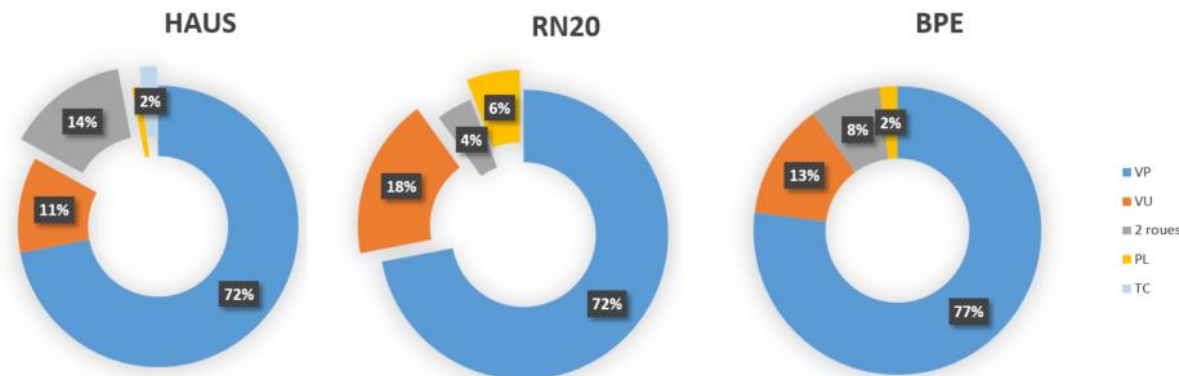


Figure 8 : Répartition modélisée du parc roulant par station – Airparif inventaire 2018

La RN20 se démarque par une part importante de véhicules utilitaires et de poids lourds. Les véhicules utilitaires y sont 1,4 fois plus nombreux que sur le Boulevard Périphérique et 1,6 fois plus nombreux que sur le boulevard Haussmann. La part des poids lourds est 3 fois plus importante que sur le Boulevard Périphérique et 6 fois plus importante que sur le boulevard Haussmann.

Le parc roulant du boulevard Haussmann se démarque par une part importante de 2 roues motorisées et un pourcentage non négligeable de transports en commun (TC). La part de 2 roues motorisées est 1,8 plus importante que celle du Boulevard Périphérique et 3,5 plus importante que celle de la route nationale 20. La part de transport en commun sur le boulevard Haussmann est aussi largement supérieure aux deux autres axes routiers étudiés.

La répartition du parc roulant sur la section routière au droit de la station BPE comporte une part de véhicules particuliers (VP) supérieure à celle des sites HAUS et RN20. Pour les autres catégories de véhicules, la station BPE se situe entre celles des sites HAUS et RN20.

2.1.4. Les 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 (Airparif, 2021a).

Cette étude cible les particules les plus fines de l'aérosol par comptage, leur masse pour les fractions PM₁₀ et PM_{2.5} ainsi qu'une partie leur composition chimique via la mesure du carbone suie (Black Carbon : BC). Les particules PM_{2.5} et le Carbone Suie (BC) sont émises par les processus de combustion des hydrocarbures (essentiellement par le trafic routier) et par la combustion de la biomasse (essentiellement par le brûlage de végétaux l'été et le chauffage au bois l'hiver).

La mesure de polluants gazeux (NO, NO₂, NO_x), bon indicateur du trafic routier, vient compléter les analyses.

Le Tableau 3 présente les appareils de mesure utilisés pour chaque polluant et site de mesure. Les descriptifs des polluants mesurés et des appareils de mesures sont détaillés respectivement dans l'Annexe I : Les polluants mesurés et l'Annexe II : Métrologie.

Station	Comptage de particules 5- 400 nm Dont PUF 5 - 100 nm	PM ₁₀	PM _{2.5}	BC*	NO, NO ₂ , NO _x
PA01	U-SMPS	Fidas 200E	Fidas 200E	AE33	MODEL 42i
RN20	U-SMPS	-	BAM 1020	AE33	MODEL 42i
HAUS	U-SMPS	BAM 1020	-	AE33	MODEL 42i
BPE	U-SMPS	BAM 1020	-	AE33	MODEL 42i

* dans les PM_{2.5}

Tableau 3 : Détail des polluants mesurés par site de mesure – type d'appareil de mesure et méthode

L'analyseur de particules est configuré sur la gamme 5–400 nm, avec une mesure toutes les 5 minutes validée techniquement sur 121 classes.

2.2. Qualité de la mesure

La mesure des polluants NO, NO₂, NO_x, PM_{2.5}, PM₁₀, BC, comptage de particules en nombre a été réalisée au cours de la campagne selon les critères suivants :

- NO, NO₂, NO_x : concentrations mesurées par le réseau d'Airparif, mesures en conformité avec la réglementation en vigueur (données horaires accréditées selon la norme NF-EN-14211) ;
- PM_{2.5}, PM₁₀ : concentrations massiques mesurées par le réseau d'Airparif, mesures en conformité avec la réglementation en vigueur (données horaires accréditées selon la norme NF-EN-16450)

- BC : Equivalent Black Carbon, concentrations massiques mesurées par le réseau d'Airparif, méthode de mesure Dual spot – contrôle AQ/CQ suivant les recommandations du GT national – caractérisation chimique et étude de sources.
- Comptage en nombre de particules : Analyseur U-SMPS, spectromètre granulomètre à mobilité électrique, qui permet de mesurer toutes les 5 minutes des particules submicroniques allant de 7 nm à 1000 nm sur 136 classes granulométriques (dans notre étude, l'analyseur a été configuré pour le comptage de particules sur les tailles 5 à 400 nm en 121 classes). Il respecte la méthode normalisée par XP CEN/TS 17434 (Juillet 2020) pour déterminer des distributions granulométriques de particules dans l'air ambiant. L'échantillonnage du nombre de particules est réalisé à l'aide d'une ligne de prélèvement en inox d'une longueur d'environ 1,5 m, de diamètre 2,5 mm, avec un débit laminaire de 5 l.min⁻¹. L'échantillonnage est séché à l'aide d'une membrane nafion – contrôle AQ/CQ suivant les recommandations du constructeur.

Le taux de disponibilité des données sur la période de l'étude (14 juin au 20 septembre 2021) est détaillé dans le Tableau 4 ci-dessous.

Station	SMPS 5 - 400 nm	PM ₁₀	PM _{2.5}	BC*	NO, NO ₂ , NO _x
PA01	97.9	76.9	96.1	82.9	98.4
RN20	82.2		84.7	75.2	91.9
HAUS	88.0	99.5		96.4	95.5
BPEST	93.7	96.6	98.0	95.3	99.5

* dans les PM_{2.5}

Tableau 4 : Taux de disponibilité en % des données sur la période du 14 juin au 19 septembre 2021

Les données manquantes sont dues à des défaillances d'équipement et à des périodes de contrôle qualité. Les analyseurs du site RN20, installés dans une armoire de mesures, ont subi des températures élevées ayant engendré des pertes de données jusqu'à la mi-juillet 2021.

2.3. Météorologie

Une analyse des conditions météorologiques rencontrées lors de la campagne de mesure permet de mieux appréhender leur influence sur les niveaux de pollution atmosphérique observés. En effet, les conditions météorologiques jouent un rôle très important de dispersion ou d'accumulation des polluants atmosphériques émis. Plus les conditions sont dispersives, plus les niveaux de pollution observés sont faibles. De plus, la température, l'ensoleillement et les précipitations influencent également les niveaux de pollution.

Les secteurs de vent permettent d'identifier les zones sous l'influence de sources spécifiques. Ils indiquent la provenance du vent (par exemple, un vent de secteur nord provient du nord et se dirige vers le sud).

Lors de cette campagne de mesures de 14 semaines, des conditions météorologiques différentes ont été observées. Les commentaires suivants s'appuient sur les observations de Météo-France et ses mesures sur la station de référence située à Montsouris (Paris 14^{ème}), pour la vitesse et la direction de vent, l'humidité relative et les précipitations.

La campagne de mesure s'est globalement déroulée sur une période estivale plutôt terne. Néanmoins, elle a démarré en juin sous des températures maximales plus chaudes que la normale avec un pic de chaleur culminant le 16 juin à 34°C sur la région parisienne. La dernière décade du

mois de juin est plus fraîche et est suivie des mois de juillet et août dont la moyenne de températures minimales est proche des valeurs de saison mais avec des maximales de 1 à 1.4°C en-dessous des normales. Le début de l'arrière-saison reprend des couleurs : la première quinzaine de septembre se classe au 2^{ème} rang des températures moyennes régionales les plus chaudes sur les 75 dernières années.

Des orages ont circulé sur la région entre le 16 et 29 juin et ont donné par endroits de très forts cumuls de pluie. Au mois de juillet, Météo-France a recensé entre 7 et 13 jours de précipitations sur l'ensemble de la région, avec des quantités disparates en fonction de leur nature parfois instable et localisée. Au mois d'août, la première décade a été concernée par les pluies et parfois copieusement. Au mois de septembre, les précipitations ont souvent pris un caractère instable avec des orages au rythme d'un jour sur trois à l'échelle régionale.

2.3.1. Roses des vents (secteurs de vents)

La Figure 9 présente, pour la campagne de mesures et pour une période de 2010 à 2020, la fréquence des régimes de vent ainsi que les vitesses de vent associées observées à la station météorologique de Paris Montsouris. Les secteurs en rouge indiquent les vents les plus faibles (vitesses de vent inférieures à 2 m/s), en orangé les vents modérés dont la vitesse est comprise entre 2 et 4 m/s et en jaune les vitesses de vent les plus dispersives (vitesses de vent supérieures à 4 m/s). La comparaison entre les deux périodes permet de vérifier si les données mesurées lors de la campagne sont représentatives de la situation habituelle en Île-de-France, sans sous-estimer ou surestimer un secteur de vent, donc l'influence sur une partie de la zone d'étude.

Conditions lors de la campagne de mesures

Conditions moyennes de 2010-2020



Sur la période de la campagne 14 juin -19 sept 2021

Sur la période 14 juin – 19 sept. des années 2010 à 2020

Figure 9 : Fréquence (en %) et secteurs de vents observés à la station Montsouris (Paris 14^e)
[Source : Météo France]

Les régimes de vents étaient **essentiellement dispersifs pendant la campagne**, avec des vitesses de vent majoritairement comprises entre 2 et 4 m/s à hauteur de 51% et 17 % de vitesses de vent supérieures à 4 m/s. Les vents de secteurs nord-est et sud-ouest étaient dominants. Les vents de secteurs nord-ouest et sud-est ont été peu, voire très peu représentés. La rose des vents moyennés sur la période du 14 juin au 19 septembre des années 2010 à 2020 montre également des vents

majoritairement dispersifs. Les vents de secteur sud-ouest ont été un peu plus représentés et le secteur de vents nord l'a été un peu moins.

La période de la campagne était donc globalement sous des régimes de vent proches de ceux observés lors des années de référence 2010-2020.

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

Durant la campagne de mesure, un seul dépassement du seuil d'information et de recommandations a été observé le 15 juin en ozone en région Île-de-France. En effet, cette période du mois de juin présentait des conditions météorologiques propices à la formation d'ozone : des températures supérieures à 30°C, une grande phase d'ensoleillement (15h sur une journée), des vents très faibles peu favorables à la dispersion des polluants.

La qualification de la qualité de l'air induite par les niveaux de PM₁₀, PM_{2.5} et NO₂ n'a pas dépassé le qualificatif moyen dans les communes et arrondissements de l'étude.

Les concentrations moyennes en NO₂, PM₁₀ et PM_{2.5} constatées lors de la campagne sont comparées avec les moyennes observées pour chacun des polluants de 2017 à 2019 (sur les périodes 14 juin - 19 septembre) (voir Figure 10).

En raison de la pandémie de COVID-19, l'année 2020 a été atypique et par conséquent n'a pas été intégrée dans la comparaison des niveaux avec ceux observés lors la présente étude. Les concentrations en NO₂ mesurées durant la campagne de mesure (14 juin – 19 septembre 2021) sont plus faibles que celles mesurées lors des mêmes mois, de 2017 à 2019. Pour le NO₂, une diminution des concentrations comprises entre 16 et 35 % sur les stations de Paris 1^{er} – Les Halles, Boulevard Périphérique Est, boulevard Haussmann et Route Nationale 20.

Les concentrations en PM₁₀ mesurées durant la campagne de mesure enregistrent une baisse de 4% à 12% sur les stations de Paris 1^{er} – Les Halles et boulevard Haussmann. Celles de la station Boulevard Périphérique Est marquent une légère hausse de 3%.

Les concentrations en PM_{2.5} durant la campagne de mesures marquent une baisse de 2% sur la station Boulevard Périphérique et 11% sur la station Paris 1^{er} – Les halles. Le site RN20 ne dispose pas d'historique de mesure en PM_{2.5}.

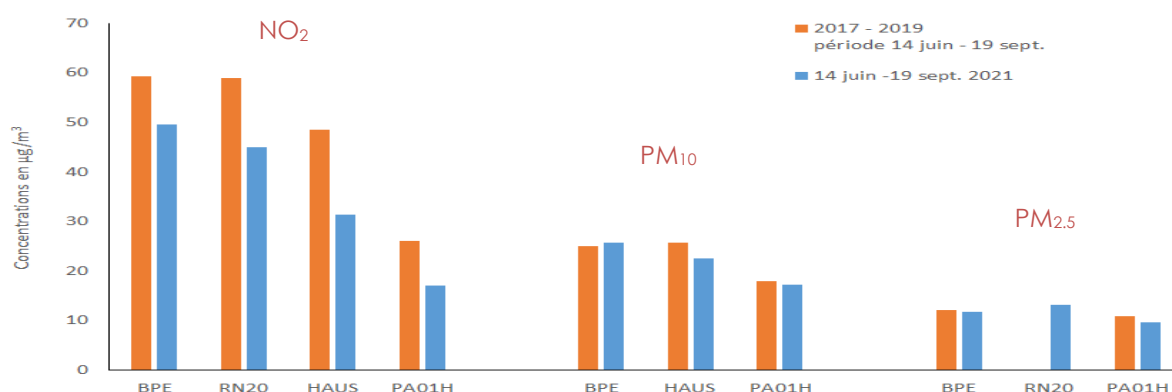


Figure 10 : Concentrations moyenne en µg/m³ en NO₂, PM₁₀ et PM_{2.5}, mesurées sur les stations du réseau Airparif lors des été 2017 à 2019 en orange et en bleu pendant la campagne de mesure (14 juin – 19 septembre 2021).

Une partie de cette baisse est due à la tendance des dernières années qui montre une diminution régulière des concentrations en NO₂ et en particules en Île-de-France. Cependant, cette baisse tendancielle n'explique pas tout et une partie est également attribuable aux **conditions météorologiques qui ont été globalement favorables à la dispersion au cours de cette campagne de mesures, caractérisée par un été maussade plus frais et plus humide que la normale.**

3. Caractérisation du nombre estival de PUF en situation de proximité au trafic routier

La campagne de mesure menée par Airparif sur la période estivale du 14 juin au 19 septembre 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. Les données résultent de la somme des comptages des 83 classes enregistrées par l'analyseur U-SMPS sur cette gamme granulométrique représentative des PUF.

Les comptages des particules de 100 à 400 nm ont aussi été réalisés, ces données résultant des comptages des 19 classes enregistrées par ces mêmes analyseurs.

Les résultats obtenus lors de cette campagne de mesures sont décrits dans cette partie.

3.1. Hiérarchisation du nombre de PUF

La première campagne menée par Airparif en **situation de fond** en période hivernale (du 1^{er} décembre 2020 au 28 février 2021) a montré des concentrations en nombre de particules ultrafines (PUF) **2.5 à 3.5 fois plus élevées en fond urbain qu'en situation de fond rural**.

Le Tableau 5 présente les concentrations moyennes des différents paramètres de la pollution particulaire obtenues lors de l'étude réalisée au cours de l'hiver 2020-2021 et celles mesurées lors de la présente étude.

Station	Typologie	Saison	Période	PUF (part.cm ⁻³) 5 - 100 nm	Comptage de particules (part.cm ⁻³) 5 - 400 nm	PM ₁₀ (µg.m ⁻³)	PM _{2.5} (µg.m ⁻³)	BC (µg.m ⁻³)
PA01	Fond urbain	Eté	14 juin. 2021 -> 19 sept. 2021	9 200	10 100	17.2	9.7	0.9
HAUS	Trafic urbain	Eté	14 juin. 2021 -> 8 sept. 2021	16 800	18 000	22.5	-	1.5
BPE	Trafic urbain	Eté	14 juin. 2021 -> 19 sept. 2021	23 200	25 100	25.7	11.9	4.9
RN20	Trafic péri-urbain	Eté	14 juin. 2021 -> 19 sept. 2021	53 300	57 500	-	13.3	6.6

Tableau 5 : concentrations moyennes en particules ultrafines, particules sur la gamme 5-400 nm (en nombre), PM₁₀, PM_{2.5} et BC (massiques) observées lors des campagnes PUF réalisées au cours de l'hiver 2020-2021 et de l'été 2021

Le Tableau 6 représente en pourcentage la part de PUF (5-100 nm) dans la fraction 5-400 nm.

Station	Typologie	Saison	Période	% PUF Particules 0 - 100 nm Dans 5 - 400 nm
PA01	Fond urbain	Eté	14 juin. 2021 -> 19 sept. 2021	91%
HAUS	Trafic urbain	Eté	14 juin. 2021 -> 19 sept. 2021	93%
BPE	Trafic urbain	Eté	14 juin. 2021 -> 19 sept. 2021	92%
RN20	Trafic péri-urbain	Eté	14 juin. 2021 -> 19 sept. 2021	93%

Tableau 6 : Pourcentage de PUF (5-100nm) comprises dans la fraction de particules 5-400nm, par typologie de site durant l'hiver 2020-2021 et l'été 2021

Sur la période estivale, il est constaté que la part de PUF dans la fraction 5-400 nm est très largement majoritaire, aussi bien sur le site de fond que sur les sites trafic (autour de 90 %).

Le comptage moyen du nombre de PUF dans la gamme 5 à 100 nm à proximité du trafic routier (Trafic Urbain) du 14 juin au 19 septembre 2021 met en évidence une plus grande variabilité des niveaux de concentrations en particules ultrafines que ceux constatés en milieu de fond urbain. Les concentrations horaires moyennes de PUF durant la campagne ont été comprises entre 17 000 et 53 000 part.cm⁻³, ce qui est de 2 à 6 fois plus élevés que celles observées en milieu de fond urbain en été.

La Figure 11 représente les concentrations moyennes observées lors des campagnes de mesure réalisées par Airparif au cours de l'hiver 2020-2021 et de l'été 2021, pour les PUF et les concentrations massiques de particules PM₁₀, PM_{2.5} et BC contenues dans les PM_{2.5}.

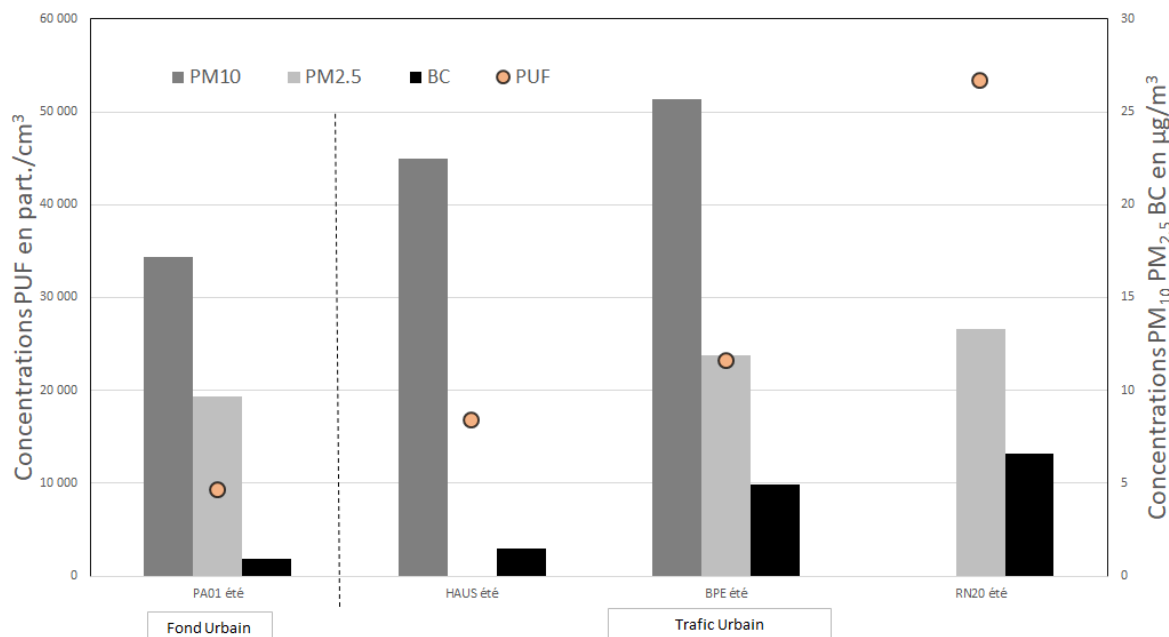


Figure 11 : Comparaison de la concentration moyenne en nombre des PUF (rond orangé) avec les concentrations moyennes massiques en PM₁₀, les PM_{2.5} et le BC contenu dans les PM_{2.5}

Les concentrations moyenne en nombre de PUF présentent une variabilité beaucoup plus importante que celle des concentrations massiques moyennes observées en PM₁₀, PM_{2.5} et BC sur la période de la campagne. Les sources dominant les PUF diffèrent donc de celles qui dominent les concentrations massiques de particules. Ce constat concorde avec les publications scientifiques qui montrent ce phénomène entre les PUF et les niveaux moyens de matière particulaire massique (Hagler G.S.W., 2009).

Les concentrations en PM_{2.5}, BC et PUF plus élevées sont observées sur le site RN20 dont le TMJA est intermédiaire aux 3 sites de l'étude (pour rappel, TMJA BPE : 243 400 véh. ; RN20 : 53 600 véh. ; HAUS : 38 000 véh.). La variabilité d'un site à l'autre ne semble pas directement corrélée au TMJA. Il est cependant à noter que le site BPE, qui est implanté en bordure du Boulevard Périphérique Est, a été sous une masse d'air en provenance de celui-ci 30% du temps. En ne considérant que les directions de vent en provenance du Boulevard Périphérique Est, le niveau moyen de PUF correspondant atteint 29 500 part.cm⁻³, soit +27.2 % par rapport au niveau moyen observé tous secteurs de vent confondus. Il reste inférieur au nombre moyen de PUF observés sur le site RN20.

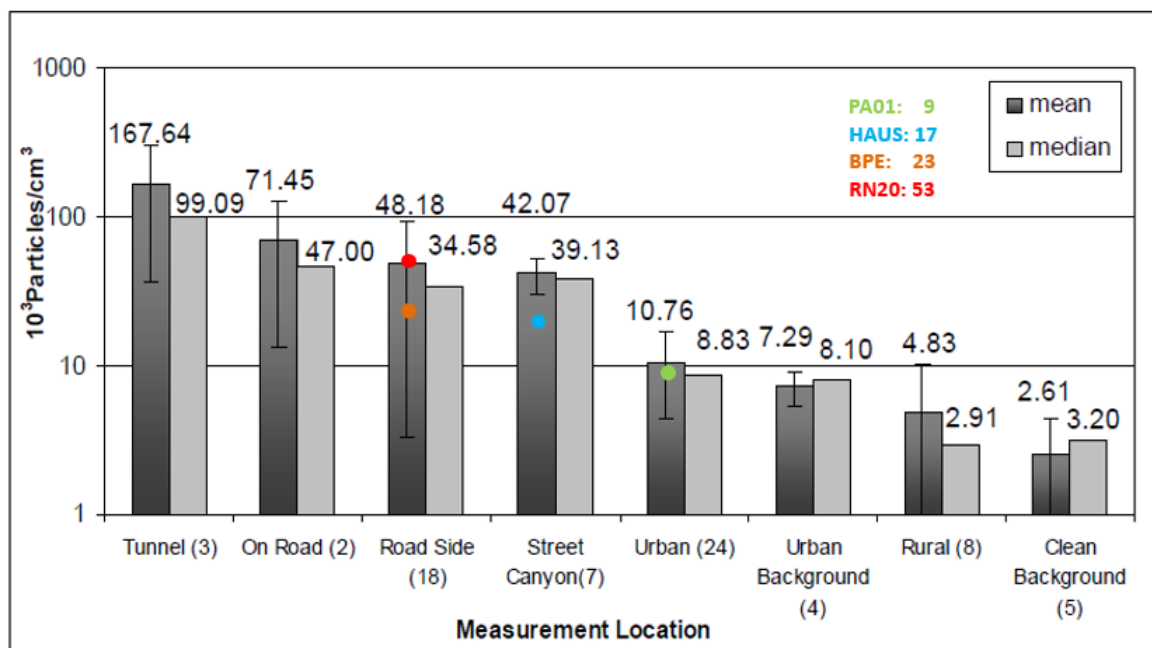
L'écart sur le nombre moyen de PUF entre ces deux sites peut aussi s'expliquer par la configuration des sections routières étudiées et par l'implantation du site par rapport au bord de l'axe. Sur RN20, l'axe routier est légèrement en pente et le site de mesure est implanté à 47 m d'un carrefour équipé de feux tricolores. Ces conditions sont propices aux phases d'accélération qui sont fortement

émettrices de particules (Rivas I. et al. 2020), alors que le Boulevard Périphérique Est présente un dénivelé faible. De plus, la part moyenne modélisée de poids lourds et de véhicules utilitaires est plus importante sur le site RN20 (~24%) que sur le site BPE (~15%) (voir Figure 8).

En l'absence de valeurs réglementaires sur les PUF, la littérature permet de présenter des éléments de comparaisons avec des mesures menées à l'international. La Figure 12 dresse un comparatif des concentrations en nombre de particules mesurées dans différents environnements à partir d'études publiées de 1999 à 2007 (Morawska, 2008). Les appareils de mesure utilisés sont de type CPC (appareil de comptage du nombre total de particules) ou SMPS, dont l'étendue de mesures peut aller au-delà des PUF 0-100 nm). Dans la mesure où les PUF représentent la majorité des particules fines en nombre (comme constaté dans le Tableau 6), même si l'on ne dispose pas du détail des conditions d'obtention des mesures (lieux, position du point de prélèvement...), cette figure permet néanmoins de situer les concentrations moyennes en nombre de PUF observées dans l'étude.

La moyenne « Road Side » regroupe les résultats obtenus à partir des mesures de 5x CPC et 19x SMPS, la moyenne « Urban » regroupe 1x CPC et 24x SMPS.

L'auteur stipule que les sites de mesure de typologie « Road Side » regroupent des sites de mesure dont les caractéristiques d'implantation (distance à l'axe routier étudié) et de trafic sont très disparates, ce qui se traduit par une large plage de dispersion des résultats moyens (représenté par un segment sur la Figure 12). Les sites trafic RN20 et BPE peuvent être classés dans la typologie « Road Side », le site HAUS peut être classé en site de type « street canyon » et le site de PA01 peut être classé en « Urban » ou « Urban Background » (nous avons pris le parti de la classer Urban). Les sites RN20, BPE et HAUS sont positionnés à titre indicatif sur Figure 12 et représentés par des pastilles de couleurs.



*Le chiffre entre parenthèses correspond au nombre de sites étudiés

Figure 12 : comparatif de concentrations de particules dans différents environnements (Morawska – 2008) avec superposition du nombre moyen de PUF observé sur les 4 sites de l'étude Airparif durant l'été 2021.

Il est à noter que le nombre de particules moyen observé pendant l'été 2021 des sites RN20 ($53 \cdot 10^3$ part.cm⁻³) et BPE ($23 \cdot 10^3$ part.cm⁻³) sont dans la plage de dispersion moyenne des sites « Road Side » recensés. Le site HAUS ($17 \cdot 10^3$ part.cm⁻³) est inférieur à la plage de dispersion.

Le nombre de particules moyens constaté sur le site urbain de fond PA01 lors de l'été 2021 ($9 \cdot 10^3$ part.cm⁻³) est dans la plage moyenne observée en « Urban ».

Les nombres de PUF moyens observés sur les 4 sites urbains franciliens étudiés sont globalement cohérents avec les niveaux par typologies retrouvées à l'échelle internationale.

3.2. Variabilité temporelle des PUF

3.2.1. 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 de proximité au trafic routier que sur le site urbain de fond PA01 (Figure 13).

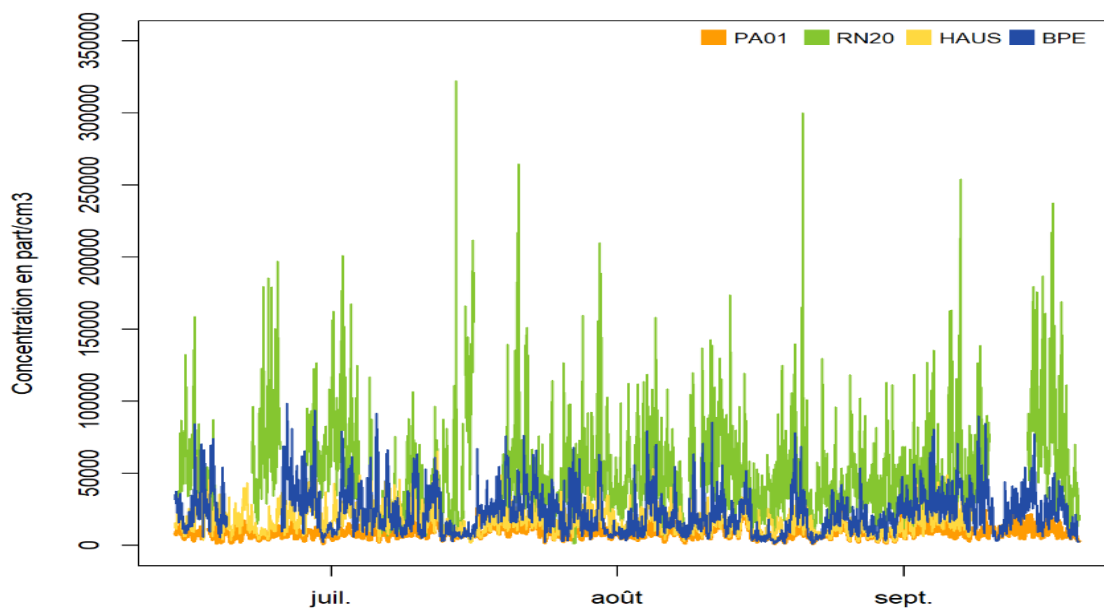


Figure 13 : Évolution temporelle du nombre moyen horaire des PUF en situation de fond (PA01) et à proximité du trafic routier (RN20, HAUS, BPE) du 14 juin au 19 sept. 2021.

Le site urbain de fond PA01, représenté en orange sur la Figure 13, caractérise le niveau de fond sur Paris intra-muros à associer aux émissions issues de la zone urbaine dense. **Les 3 sites « trafic » enregistrent des dynamiques plus importantes que sur le site de fond PA01, associés aux émissions du trafic routier.** Ce constat est particulièrement marqué sur les sites RN20 et BPE (respectivement en vert et en bleu sur la Figure 13) qui présentent de **nombreux pics pouvant atteindre des concentrations maximales horaires de plus de 300 000 particules.cm-3 sur le site implanté au bord de la RN20 et plus de 100 000 particules.cm-3 sur le site implanté à proximité du Boulevard Périphérique.** La dynamique du site boulevard Haussmann est quant à elle moins marquée.

La Figure 14 illustre la dispersion des données horaires sur les différents sites pour les concentrations PUF en nombre, les concentrations massiques de PM₁₀ et de PM_{2.5}. La représentation graphique sous forme de boîtes à moustaches 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 III.

Les niveaux sont globalement plus élevés sur le site de la RN20, que ce soit en moyenne ou en valeurs extrêmes. La variabilité la plus importante est également observée sur ce site. Les valeurs extrêmes, représentées par des points noirs sur le graphique, montrent l'impact ponctuel de sources locales de PUF en lien avec le trafic routier, impact moins intense sur les sites HAUS et BPE. Pour le site urbain PA01, les valeurs extrêmes montrent un impact ponctuel de sources locales plus diffuses de PUF.

Les concentrations en PM₁₀ constatées sur la Figure 14 présentent une hiérarchisation des niveaux usuellement constatée annuellement par Airparif (voir le Bilan Qualité de l'air en Ile-de-France, Airparif 2021b), avec des niveaux plus élevés sur le site BPE que sur les sites HAUS et PA01. Pour les mesures de PM_{2.5} et de PUF on observe une hiérarchisation différente de celle constatée sur les PM₁₀, dominée par les valeurs du site RN20 dont la médiane est supérieure à celles des autres sites. Les valeurs de PUF du site RN20 sont ici très nettement supérieures à celles mesurées sur HAUS et BPE (avec 75% des concentrations horaires du nombre de PUF du site RN20 supérieures à 75% des valeurs mesurées sur chacun des trois autres sites).

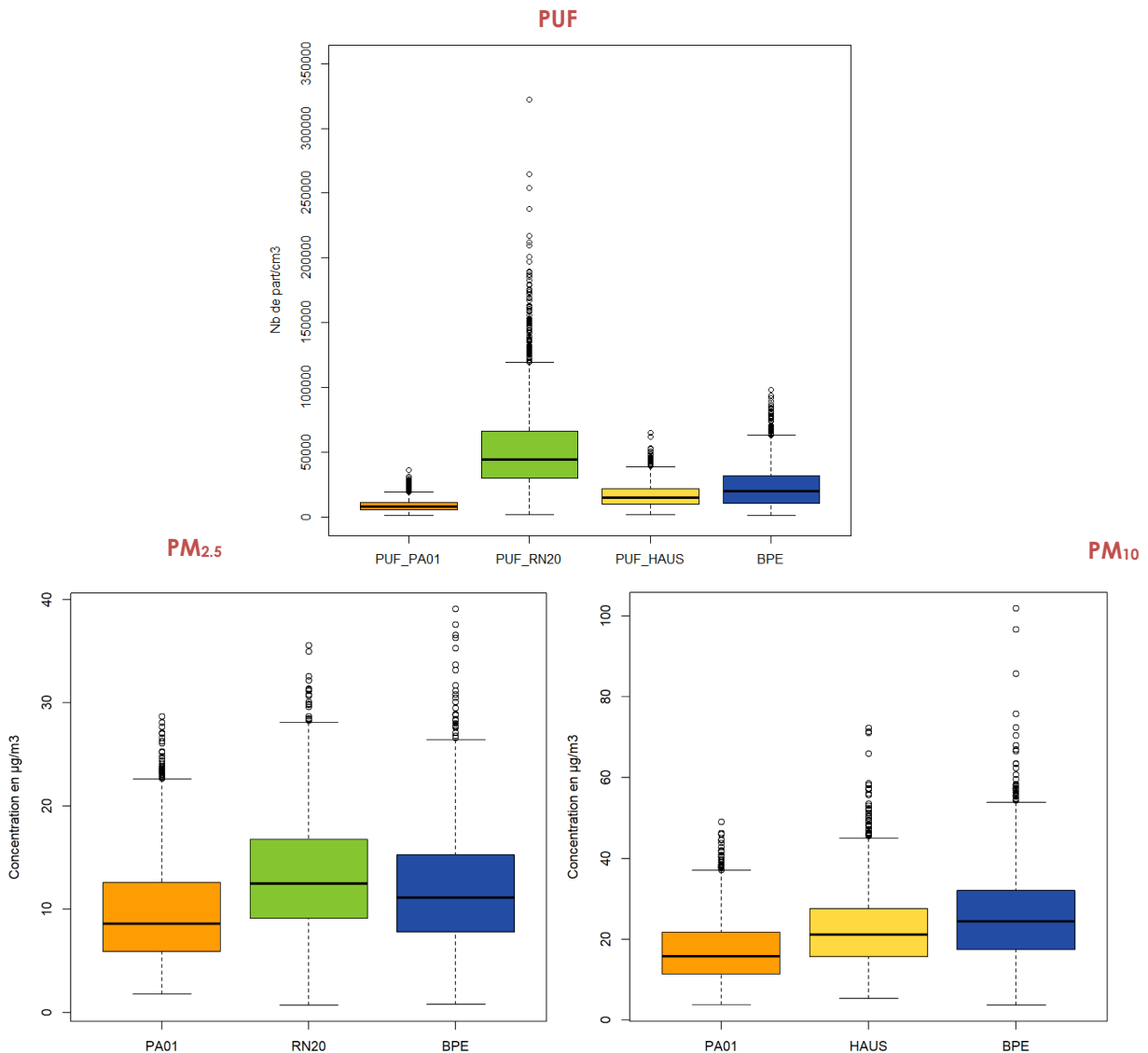


Figure 14 : Boîtes à moustaches des concentrations horaires en PUF, PM₁₀ et PM_{2.5} du 14 juin au 19 septembre 2021

Ces mesures en nombre de PUF vont donc permettre de compléter notablement l'information sur les impacts des sources issues du trafic routier par rapport aux mesures réglementaires en masse.

3.2.2. Profil moyen journalier

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

La Figure 15 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'intervalle de confiance à 95%, des données de l'heure considérée de manière à illustrer la variabilité des données moyennes horaires.

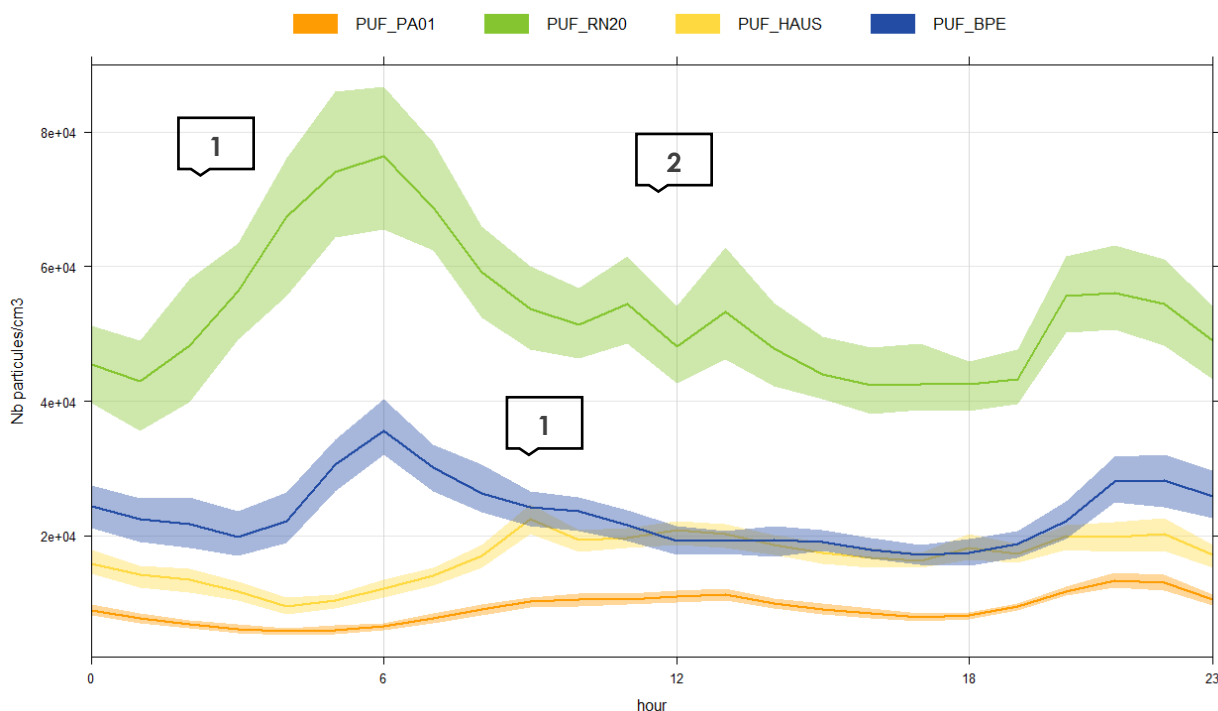


Figure 15 : Profils moyens journaliers du nombre de PUF sur la période du 14 juin au 19 septembre 2021

À l'échelle de la journée, les 4 sites présentent un cycle journalier bien marqué avec une montée du nombre de PUF le matin et le soir. Ce profil journalier « double bosse » caractéristique de la pollution aux particules du trafic routier et beaucoup plus marqué sur les sites RN20 et BPE.

La nuit, une baisse des niveaux moins rapide sur les PUF que sur le BC et les PM_{2.5} est observée.

Sur le site **RN20**, le profil PUF présente au cours de la journée un cycle nettement plus intense avec un pic le matin, deux pics singuliers visibles autour de midi (repère N°2) constatés aussi sur le profil des PM_{2.5} (cf. un pic repère N°2). Ce pic n'est cependant pas observé sur le profil des mesures du carbone suie (voir Figure 16). Par conséquent, celui-ci ne peut pas être complètement imputé à une augmentation de la circulation induite par exemple par la pause déjeuner des franciliens.

Le site **BPE** présente un profil PUF en cours de journée qui rejoint le niveau des concentrations en nombre de PUF observés sur le site HAUS, pour de nouveau augmenter en début de soirée avec la reprise du trafic et se détacher des niveaux observés à HAUS.

Le site **HAUS** présente un profil PUF journalier similaire au site de fond mais avec des concentrations PUF globalement plus élevées avec un maximum obtenu autour de 9h.

Cette évolution journalière en nombre de PUF est similaire à celle des concentrations massiques de particules mesurées sur la même période estivale.

La Figure 16 illustre les profils moyens journaliers des concentrations du Carbone Suie (BC) et des particules PM_{2.5}.

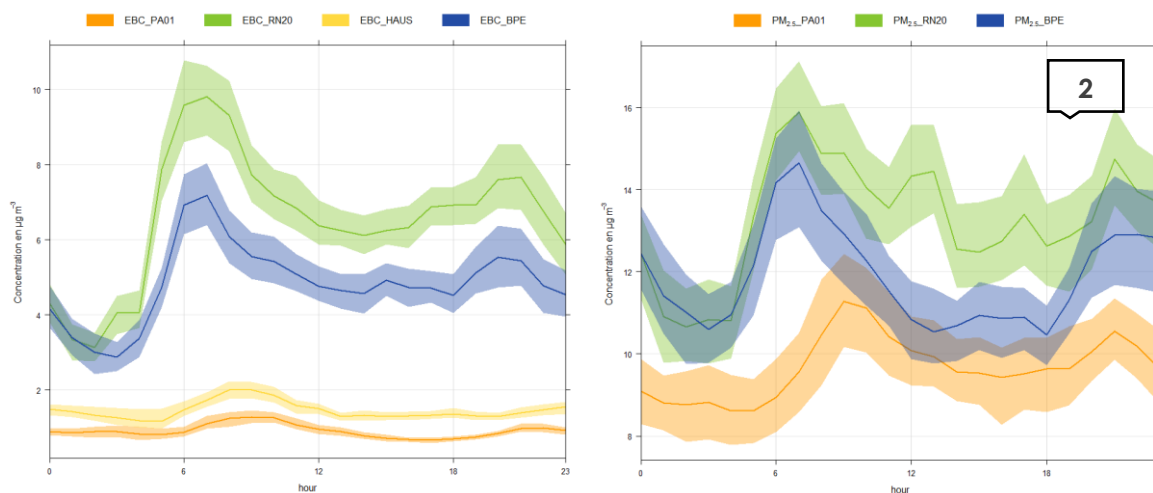


Figure 16 : Profils moyens journaliers des concentrations moyennes horaires en carbone suie (BC) et en particules PM_{2.5} (14 juin au 19 septembre 2021)

Le cycle journalier des polluants est largement gouverné par le cycle local des émissions du trafic routier. A l'évolution de ces émissions se rajoutent les conditions dispersives, en particulier la hauteur de couche limite, qui détermine le volume d'air dans lequel les émissions de polluants vont se disperser. L'intensité de cette hauteur de couche limite varie selon les saisons. Elle est généralement minimale le matin et, dans une moindre mesure, le soir et elle est maximale en milieu de journée. Le maximum d'émissions à l'heure de pointe du matin coïncide avec le moment où les conditions de dispersion sont les plus défavorables, et un pic le soir dû à la baisse de la hauteur de couche limite associée à l'étalement des heures de retour travail-domicile en Île-de-France.

Les **sites trafic BPE et RN20** se distinguent par un cycle journalier des PUF qui commence plus tôt (repère N°1 sur la Figure 15 et la Figure 16) que sur les sites intra-muros de Paris.

Les profils moyens journaliers du carbone suie (BC) et des particules PM_{2.5} présentent un cycle journalier à deux bosses covariant avec le profil moyen journalier des PUF, caractéristique de la pollution urbaine avec, quel que soit le site urbain de mesure, un pic plus important le matin, possiblement en lien avec le trafic routier et les conditions météorologiques.

3.2.3. Profil moyen hebdomadaire

La Figure 17 représente le profil moyen journalier de la concentration en nombre de PUF et des concentrations massiques en BC et PM_{2.5} selon le jour de la semaine.

À l'échelle hebdomadaire, les profils des concentrations en nombre de PUF des sites trafic de l'étude présentent des allures bien distinctes d'un site à l'autre du lundi au samedi. Le profil du dimanche présente une dynamique moins intense avec un minimum le matin et une remontée le soir, pouvant être attribuée aux retours de week-end en cette période estivale.

Le site trafic RN20 se démarque par l'amplitude de ses niveaux et un pic singulier le midi (décrit dans la sous-section précédente), qui est nettement visible sur la journée du mercredi. Ce pic du midi est néanmoins moins marqué sur les journées du jeudi et du vendredi, il est inexistant le lundi. On ne retrouve pas ce pic du midi sur le site trafic BPE qui est un axe de transit, ni sur le boulevard Haussmann qui, de par sa position dans Paris, le situe au milieu d'un tissu de transport en commun dense, ce qui n'est pas le cas de l'axe RN20.

Sur le site RN20, les pics singuliers constatés en nombre de PUF le mercredi midi sont aussi constatés en PM_{2.5}, mais ne sont pas constatés sur le carbone suie. Une hypothèse plausible est donc que ce pic ne soit pas à associer complètement aux émissions du trafic routier.

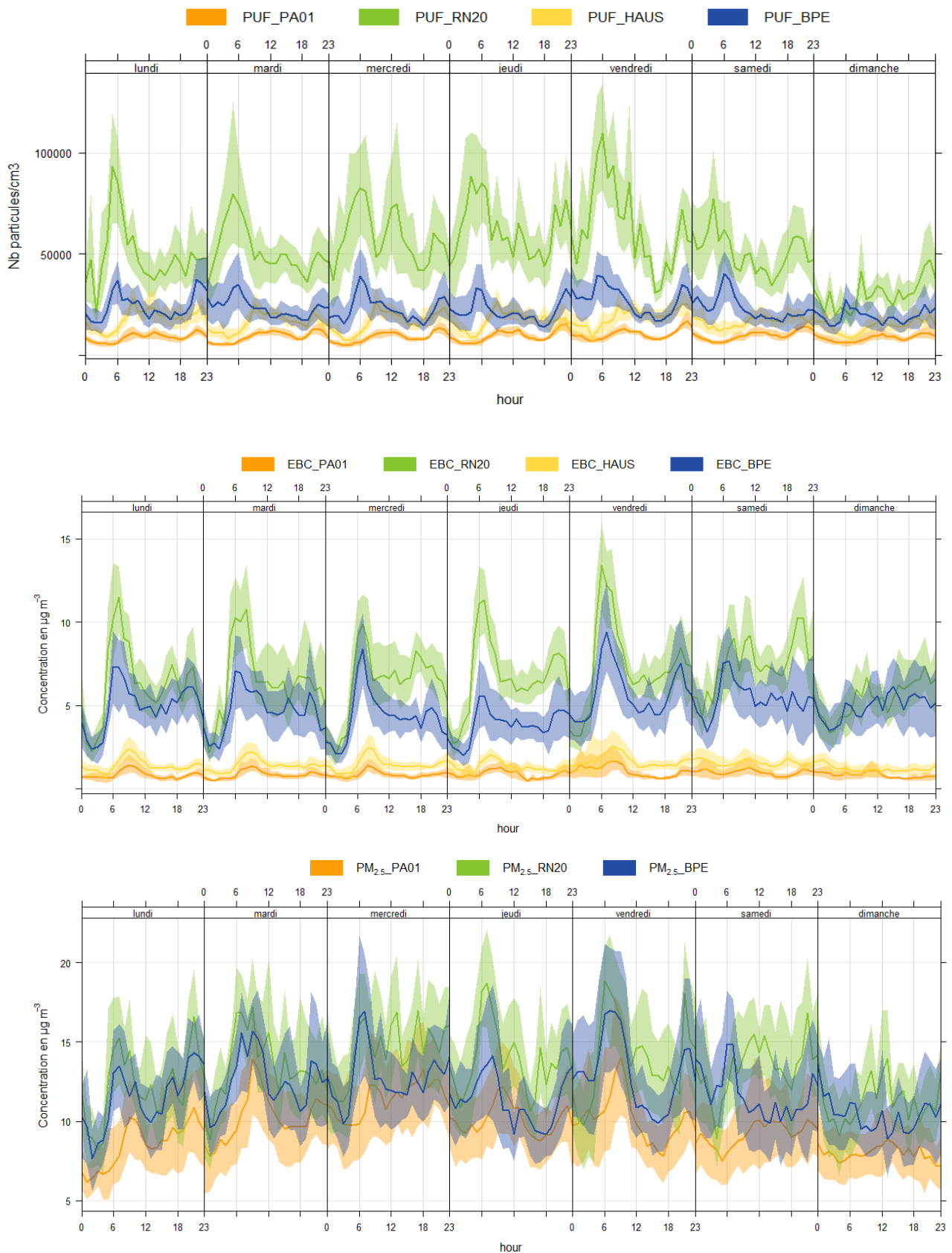


Figure 17 : Profils moyens journaliers selon le jour de la semaine du comptage de PUF et des concentrations en BC et PM_{2.5} (14 juin – 19 septembre 2022)

La Figure 18 représente la moyenne journalière des jours de la semaine.

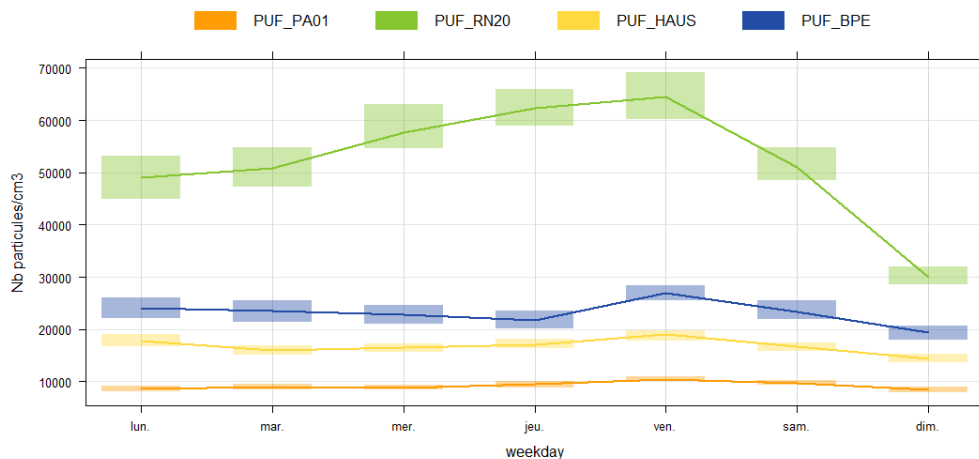


Figure 18 : Moyennes journalières des jours de la semaine du comptage de PUF (14 juin – 19 septembre 2022)

Sur la Figure 18, sur l'ensemble des sites de mesures, les niveaux maxima de PUF sont observés le vendredi et les minima le dimanche.

Le site trafic RN20 se démarque avec des concentrations en nombre de PUF qui augmentent du lundi au vendredi avec une baisse atteignant environ 50 % le week-end, à mettre en lien avec la diminution du trafic.

Les sites trafic HAUS et BPE enregistrent des moyennes journalières assez stables du lundi au jeudi qui remontent le vendredi, puis diminuent d'environ 20 % le week-end avec la baisse des activités anthropiques et du trafic routier associé.

3.2.4. Profil moyen mensuel

La Figure 19 représente l'évolution temporelle du nombre moyen mensuel des PUF pour les 4 sites de l'étude du 14 juin au 19 septembre 2021. La moyenne des PUF du mois de juin est calculée sur 17 jours et 19 jours pour le mois septembre, les mois de juillet et août sont quant eux quasiment complet

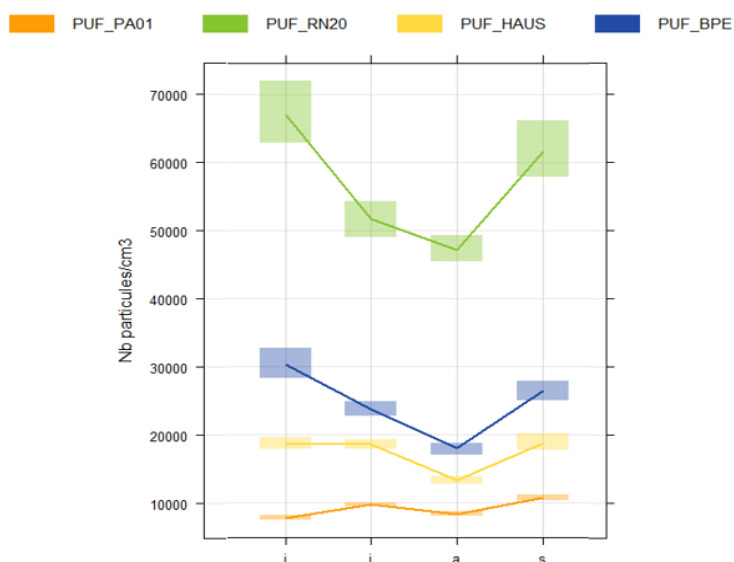


Figure 19 : Evolution temporelle du nombre moyen mensuel des PUF (de 5 à 100 nm, en particules.cm-3) en situation de fond (PA01) et à proximité du trafic routier (du 14 juin au 19 sept. 2021)

La Figure 19 illustre que les niveaux restent soutenus sur les sites trafic avec une baisse notable sur l'ensemble des sites au mois d'août, à mettre en lien avec les vacances scolaires et la baisse du trafic routier francilien.

3.3. Origine de la pollution

Pour représenter au mieux l'origine des polluants sur 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 différents secteurs correspondant 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 10 m/s. Une échelle de couleur allant du bleu au rouge permet d'afficher les concentrations moyennes observées sur la période de l'étude.

La Figure 20 présente ces roses de pollution pour les PUF, le carbone suie et des PM_{2.5}. Les vents dominants sur la période d'analyse sont des vents en secteurs Sud-Ouest et Nord-Est (cf. 2.3.1).

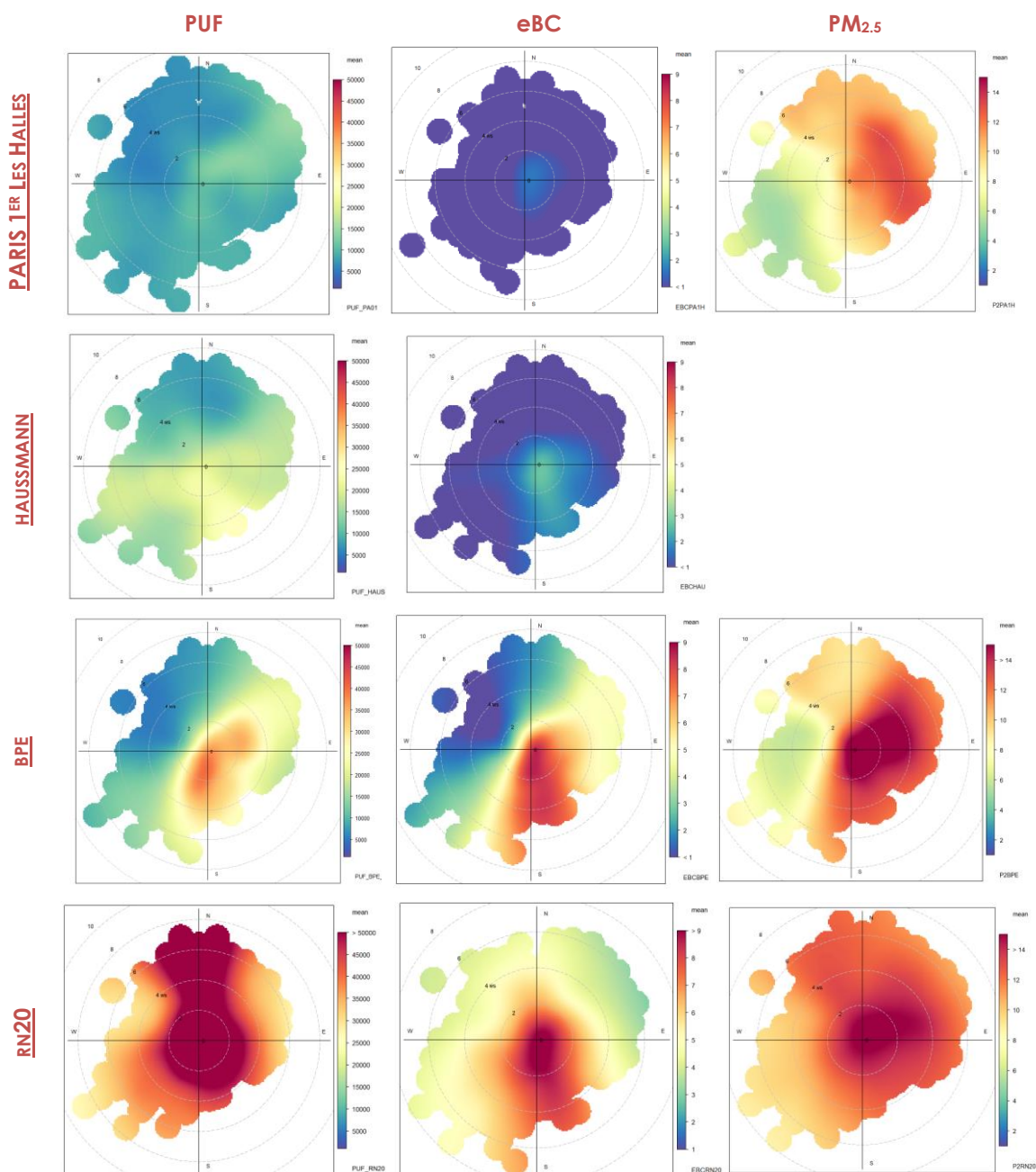
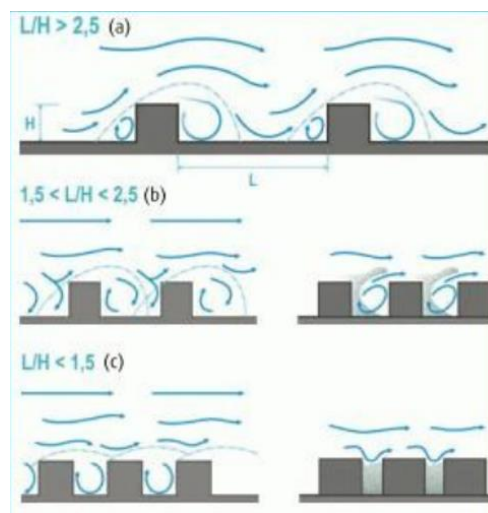


Figure 20 : Répartition du comptage PUF et des concentrations massiques en BC et PM_{2.5} selon la vitesse et le secteur de vent (du 14 juin au 19 septembre 2022)

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 des concentrations élevées liées 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 20 est que, pour tous les polluants présentés et pour tous les sites, par vents modérés à forts (supérieurs à 4 m/s) de secteur sud-ouest, les plus fortes concentrations ne sont pas observées.

Sur le site boulevard Haussmann, les concentrations élevées en PUF sont observées pour les secteurs Est à Ouest par vent faible, et par vents de secteurs Sud à Sud-Est pour les niveaux les plus soutenus autant pour les PUF que pour le carbone suie. Ce constat peut s'expliquer par la configuration du boulevard Haussmann (voir la description du site en 2.1.2). La direction du vent (majoritairement de secteurs Nord-Est et Sud-Ouest sur la période de la campagne de mesure) , combinée à la configuration des bâtiments du boulevard Haussmann qui lui donne l'aspect d'une rue proche du type « canyon » engendre majoritairement des écoulements pouvant être contraires à la direction du vent circulant au-dessus des bâtiments, comme décrit dans le schéma de la Figure 21. Le boulevard Haussmann se rapproche de la configuration b. Il faut aussi prendre en considération la proximité d'un large carrefour situé à l'ouest du site de mesure (voir Figure 4) qui influence aussi les écoulements d'air.



L= Hauteur des bâtiments ; H= Largeur de la rue

Figure 21 : Influence du rapport largeur de la rue sur la hauteur des bâtiments (partie gauche) et la dispersion des polluants (partie droite) (Source Oke. T.R, 1987)

Sur le site du Boulevard Périphérique Est, les concentrations en nombre de PUF sont soutenues suivant les secteurs Nord-Est à Sud et par vent faible (< 2m.s⁻¹) ; conditions de vents qui engendrent une mauvaise dispersion des émissions de particules locales notamment celles émises par le trafic routier du Boulevard Périphérique).

Le même constat est le même pour les concentrations en carbone suie et en PM_{2.5}. La rose de pollution illustre clairement l'axe du Boulevard Périphérique, comme étant la source majoritaire de PUF mesurées à cette station (voir la description du site en 2.1.2).

Sur le site RN20, les concentrations en nombre de PUF sont soutenues suivant tous les secteurs par vent faible, le constat est le même pour les concentrations en carbone suie et en PM_{2.5}. La rose de pollution illustre des concentrations très élevées sur l'axe Nord-Sud, avec par vents supérieurs à 4 m.s⁻¹ des concentrations élevées en secteur Nord. Ce secteur de vent correspond au sens de la montée de la route RN20 et à l'accélération des véhicules, suite au passage au feu vert du carrefour situé au sud (voir la description du site en 2.1.2). La variabilité spatiale observée sur les PUF n'est pas constatée sur le carbone suie notamment sur le secteur nord par vents supérieurs à 2 m.s⁻¹. Les

niveaux élevés de PUF observés peuvent vraisemblablement être attribués à la phase d'accélération des véhicules.

Sur le site des Halles, les concentrations en PUF et en BC sont beaucoup moins importantes que sur les sites trafic, ce qui s'explique par la situation de fond urbain de la station, plus isolée des sources de pollution. Néanmoins, comme constaté dans l'étude PUF hiver menée par Airparif sur les sites de fond, une source de particules de secteur Est est observée. En effet, cette masse d'air continental est généralement plus chargée en polluants. Les niveaux observés sous un secteur de vent d'Ouest sont généralement plus faiblement chargés en polluants et sont en cohérence avec ce secteur qui est aussi favorable à la dispersion.

Cette étude confirme l'impact très important des axes routiers comme source locale de PUF.

3.3.1. Rose d'impact

La rose d'impact des PUF est calculée par rapport au niveau de fond moyen de Paris observé sur le site de Paris 1^{er} les Halles. L'illustration sur la forme d'une rose d'impact permet de mettre en évidence l'impact de la source trafic étudiée et **d'estimer la concentration moyenne d'une source de pollution locale en fonction d'un secteur de vent donné sur la période de l'étude.**

La Figure 22 représente les roses d'impact des 3 sites trafic étudiés.

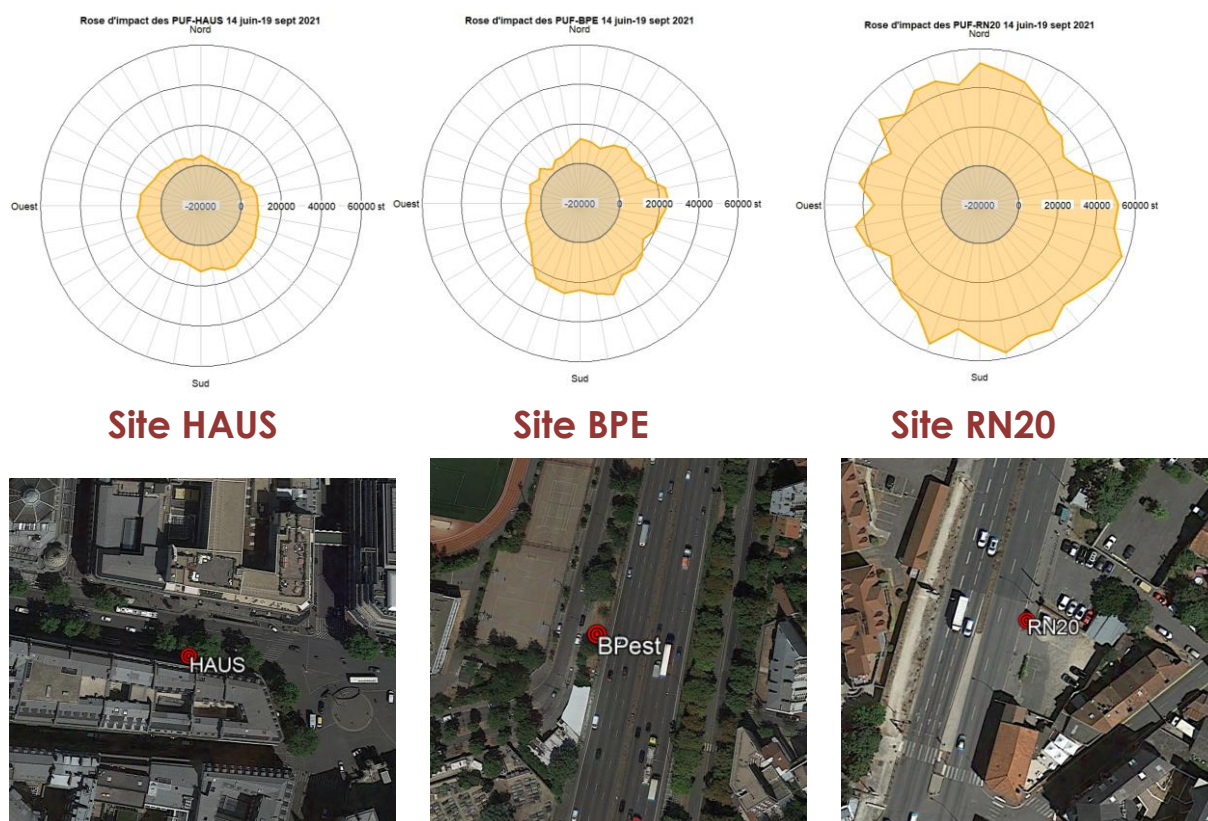


Figure 22 : Roses d'impact pour les PUF, moyenne en nombre de part/cm³ du 14/06 au 19/09/2021 et vues aériennes (Google Earth)

Sur le site boulevard Haussmann, la rose indique clairement un impact du trafic routier sur les secteurs de vent allant de l'Est à l'Ouest (en passant par le secteur Sud). Les écarts horaires moyens observés avec la station de fond de référence parisienne sont d'environ ~12 000 particules/cm³. Pour les autres secteurs de vent les concentrations sont plus proches du niveau de fond parisien.

Sur le site du Boulevard Périphérique Est, la rose indique clairement un impact du trafic routier sur les secteurs allant de Nord à Sud-Ouest, pointant bien l'axe routier. Les écarts horaires moyens observés avec la station de fond de référence parisienne sont d'environ ~20 000 particules/cm³. Les autres secteurs de vent correspondent au niveau de fond parisien.

L'étude sur les niveaux de fond menée durant l'hiver 2020-2021 a montré une décroissance des niveaux des PUF de fond lorsque l'on s'éloigne de l'agglomération parisienne. Les niveaux de fond observés sur la station de référence parisienne peuvent par conséquent être plus importants que les niveaux de fond de l'agglomération de Montlhéry (localisée à ~24 km à vol d'oiseau du centre de Paris) où est implantée la station de mesure RN20. La rose d'impact indique un impact du trafic routier sur tous les secteurs de vent, les écarts horaires moyens avec la station de fond de référence parisienne étant estimés à au moins 45 000 particules/cm³. L'impact de la source trafic est multisectoriel, en raison de la proximité immédiate de la station de mesure à l'axe routier, le point de prélèvement étant à moins d'1 m du bord de la route.

Les roses d'impact confirment donc les enseignements de la Figure 20.

4. Caractérisation du nombre de particules par classes granulométriques

L'analyse du nombre total de PUF couplé à la vitesse et la direction du vent a permis d'identifier un impact des sources issues du trafic routier sur le nombre de PUF et de mettre en avant la variabilité du nombre de particules rencontrées sur les sites à proximité des axes routiers étudiés.

Cette analyse peut être complétée par la répartition des particules par classes granulométriques observées sur chacun des sites de mesures étudiés. Elle permet d'obtenir des informations sur l'origine de la matière particulaire.

4.1. Formation et distribution granulométrique des aérosols

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 23 (Renoux et Boulaud, 1998).

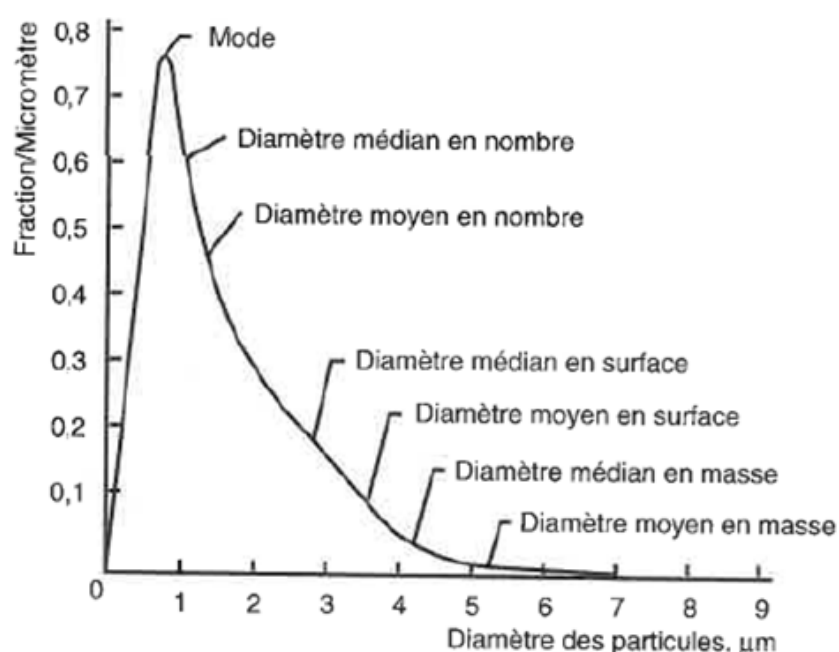


Figure 23 : Paramètres caractéristiques des distributions granulométriques (Renoux et Boulaud, 1998)

L'illustration, Figure 23, 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.

De plus, les particules émises sont **composées de particules primaires et secondaires**. Une particule primaire est émise directement par la source sous forme liquide ou solide, tandis qu'une particule

secondaire est formée par des processus physico-chimiques à partir de précurseurs gazeux. La plupart des gaz polluants de l'air, tels que le dioxyde de soufre (SO_2), les oxydes d'azote (NO_x), l'ammoniac (NH_3) et les Composés Organiques Volatils (COV) agissent comme précurseurs dans la formation de particules secondaires dans l'atmosphère (Regniers O., 2006).

La littérature indique que les émissions de particules issues de l'échappement des véhicules sont composées de particules primaires et secondaires.

Les différents processus chimiques et physiques de formation que les aérosols peuvent subir selon leurs concentrations (surface, masse ou volume) et leurs tailles (en nm) sont résumés dans la Figure 24 (Buseck, 2008).

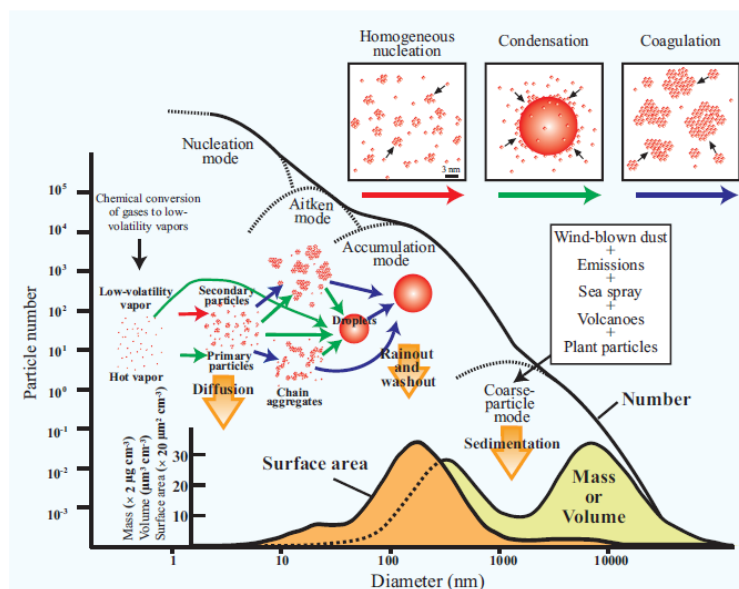


Figure 24 : Processus chimiques et physiques de la formation des aérosols dans l'atmosphère (Buseck, 2008)

La distribution en nombre des aérosols peut être divisée en plusieurs modes. Le mode correspond à la valeur la plus représentée dans la distribution du nombre de particules. La distribution peut être unimodale ou plurimodale (bimodale, trimodale, ...). Un exemple de distribution trimodale est présentée en Figure 25.

Les particules de diamètre entre 1 000 et 10 000 nm correspondent aux particules issues d'émissions telluriques, et d'émissions issues de l'abrasion engendrées par le trafic routier, des chantiers etc.... (Indication sur la Figure 24 sous le libellé « Coarse particle mode ») - un **mode qui contribue en grande partie à la masse des particules.**

Les particules submicroniques (entre 0 et 1 000 nm) peuvent être classées en trois modes : **le Mode nucléation, le Mode Aitken et le Mode Accumulation** (Figure 25).

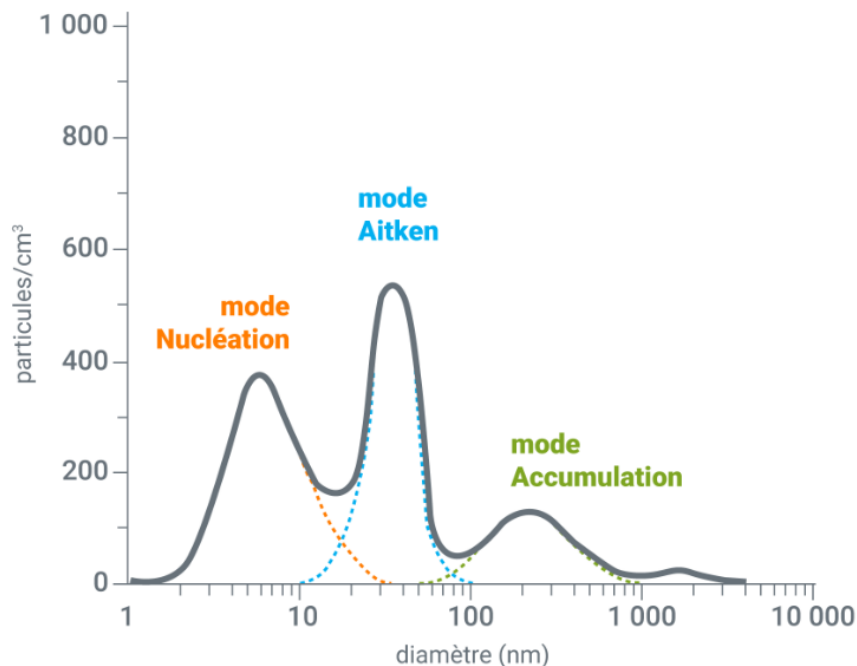


Figure 25 : Représentation indicative de la distribution des Modes Nucléation, Aitken et Accumulation (source : Airparif)

Le mode Nucléation regroupe les particules ultrafines principalement formées par nucléation. Les polluants gazeux émis par la combustion, en se refroidissant, forment des particules inférieures à **30 nm** (généralement composées de sulfates, nitrates, métaux et de composants organiques carbonés). Cette formation est favorisée par des températures ambiantes basses et une humidité relative élevée (Morawska 2008, Hussein T. 2004). Les particules de ce mode peuvent changer de taille et de composition en subissant des réactions de condensation ou de coagulation avec d'autres particules. Les particules du mode Nucléation interagissent rapidement avec d'autres particules et par conséquent ont une durée de vie relativement courte (quelques heures) (Regniers O. 2006, Hussein T. 2004).

Le mode Aitken regroupe les particules ultrafines et correspond aux aérosols de tailles comprises approximativement entre **10 et 100 nm** (Buseck, 2008). Elles sont soit issues du grossissement des particules du mode nucléation par condensation ou coagulation de celles-ci, de réactions hétérogènes ou soit produites directement par la combustion des matières fossiles (émissions primaires). Elles sont principalement composées de suies et de cendres, servant de noyau de condensation à des matières volatiles.

Le mode Accumulation regroupe les particules de tailles allant approximativement de **50 à 1 000 nm** résultant entre autres de la condensation de matières organiques carbonées et de la coagulation des particules des autres modes. Elles ont une durée de vie de l'ordre de plusieurs jours à plusieurs semaines et peuvent, de ce fait, se déplacer sur de longues distances (**particules âgées, dites « vieilles »**) (RIVA 2013, Regniers O. 2006). La principale voie d'élimination de cette catégorie de particules reste les précipitations (Regniers O. 2006, Hussein T. 2004).

4.2. Les particules primaires et secondaires des véhicules motorisés

La Figure 26 représente un exemple de modélisation de la formation et de l'évolution des particules primaires et secondaires pour le trafic routier, à savoir de la formation des particules dans le couple moteur-échappement en passant par leur évolution initiale à la sortie de l'échappement (10-100 m), suivi de leur évolution dans les 100-1000 m puis au-delà de 1 km.

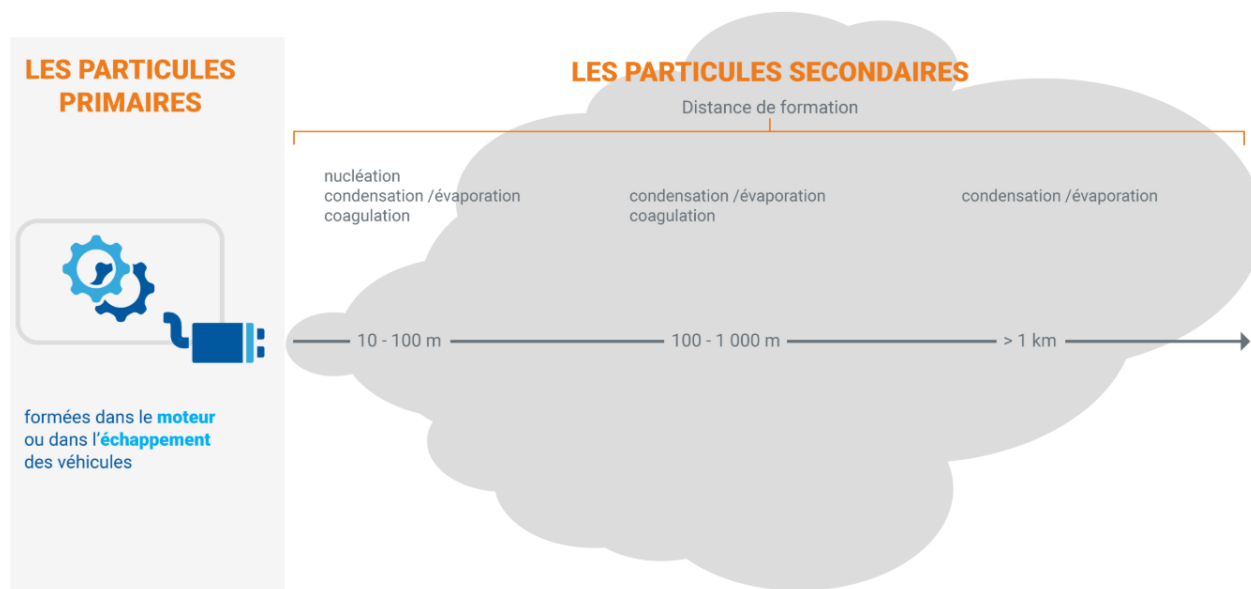


Figure 26 : Schéma modélisé de formation des aérosols et leur évolution (réalisé à partir de : Karine Sartelet, Cerea, cours VET)

Les émissions de particules des véhicules dépendent de la technologie du véhicule, des propriétés des carburants et des huiles lubrifiantes, ainsi que des conditions de conduite. **Il a été constaté plus d'émissions en phase d'accélération, à haute vitesse et au démarrage** (Ioar Rivas et al. 2020 ; Morawska, 2008).

En conclusion, **les distributions granulométriques des particules submicroniques changent au cours du temps par des processus dynamiques** (voir Figure 24). Ces processus provoquent des changements impactant la taille des particules ; la condensation provoque une croissance, quand l'évaporation les fait rétrécir, sans modifier leur nombre total. A contrario, la coagulation qui provoque une croissance diminue le nombre total de particules, tout comme le lessivage et les dépôts secs.

4.3. Profil granulométrique moyen

L'appareil de mesure des particules U-SMPS a été configuré sur un spectre assez large (5 à 400 nm), couvrant ainsi les PUF, inférieures à 100 nm, avec un détail sur toute la gamme en 121 classes granulométriques qui permet de bâtir les profils granulométriques expérimentaux à fine échelle sur chacun des sites.

Les profils granulométriques moyens sont réalisés en regroupant au sein d'un même graphique les différentes données de comptage de chaque classe sous forme d'histogramme. Celui-ci représente en abscisse les tailles des particules (diamètre aérodynamique en nm, en échelle

logarithmique) et en ordonnée la concentration en particules, exprimée en part/cm^3 , comme présenté dans l'introduction de cette partie. La Figure 27 illustre les résultats obtenus pour les quatre sites d'étude. La taille de particules la plus représentée en nombre sur un profil granulométrique appelé « **mode majeur** ». Il est identifié par des pointillés verts sur la Figure 27.

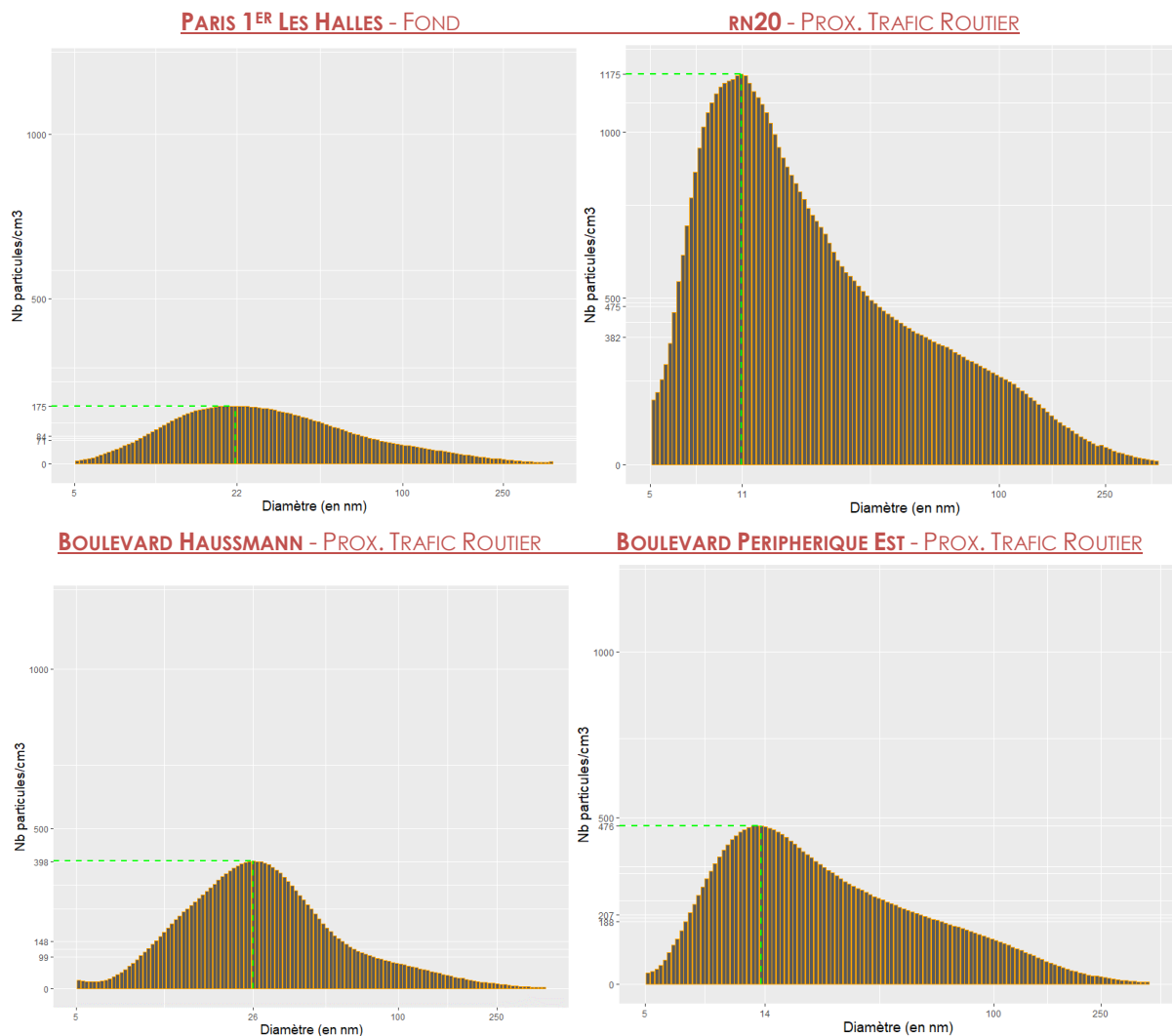


Figure 27 : Distribution granulométrique moyenne sur 3 sites de proximité routière et le site de fond de référence de Paris (14 juin au 19 septembre 2021)

Le Tableau 7 récapitule les modes majeurs et la concentration moyenne de particules associée, du 14 juin au 19 septembre 2021 (extrait de la Figure 27).

Station	Typologie	Mode Majeur (nm)	Concentration moyenne de particules au Mode Majeur (part.cm ⁻³)
PA01	Urbain de fond	22	175
HAUS	Trafic routier	26	398
BPEST	Trafic routier	14	475
RN20	Trafic routier	11	1175

Tableau 7 : Récapitulatif des modes majeurs et des concentrations totales moyennes de particules associées, période du 14 juin au 19 septembre 2021

Les profils granulométriques moyens présentés dans le Tableau 7 ont **tous un mode majeur inférieur à 30 nm**.

Deux groupes de modes majeurs se distinguent : le premier groupe est situé entre **11 et 14 nm**, pour les sites de proximité routière du Boulevard Périphérique et de la RN20, tandis que le second groupe présente des modes majeurs **de taille plus importante, entre 22 et 26 nm** pour le site de proximité routière du boulevard Haussmann et le site urbain de fond de Paris 1^{er} les Halles.

La taille du mode majeur indique une part majoritaire de particules issue du trafic routier.

Les raisons de la variation de taille de ce mode majeur sont probablement multiples :

- «âge» de la particule (voir illustration de ce point au paragraphe 4.1)
- emplacement du site de mesure (distance à la source trafic)
- autres sources (celles potentiellement liées au « fond »)
- configuration du site (présence et dimension du bâti environnant, axe routier avec dénivelé,...)
- conditions de trafic (volume, composition très précise du parc roulant, vitesse, congestion, phase de freinage et d'accélération, ...).

Les informations disponibles sur la période exacte de l'étude et la compréhension des phénomènes ne sont pas suffisantes à ce stade pour identifier les paramètres d'influence majeurs.

Les sites du Boulevard Périphérique Est et de la RN20 présentent un second mode autour de 100 nm. À ce stade des informations disponibles, l'origine ne peut être certifiée mais certainement au moins en partie liée aux émissions du trafic routier. Des investigations complémentaires sont à prévoir.

La hiérarchisation des sites sur les distributions granulométriques est la même que celle constatée pour la concentration totale des PUF (voir Tableau 5), avec un mode majeur illustrant une concentration en nombre de particules de 1 175 part.cm⁻³ sur le site trafic RN20. **Cette concentration en nombre du mode majeur sur le site de la RN20 est environ 3 fois plus élevée que celles observées sur les deux autres sites trafic de l'étude et de l'ordre de 7 fois plus importante que celle relevée sur le site urbain de fond de Paris 1^{er} les Halles.**

L'analyse de la classe granulométrique présentant le nombre le plus important de PUF (mode majeur) pour chaque heure sur toute la période de la campagne est présentée sur la Figure 28 pour chacun des quatre sites de l'étude.

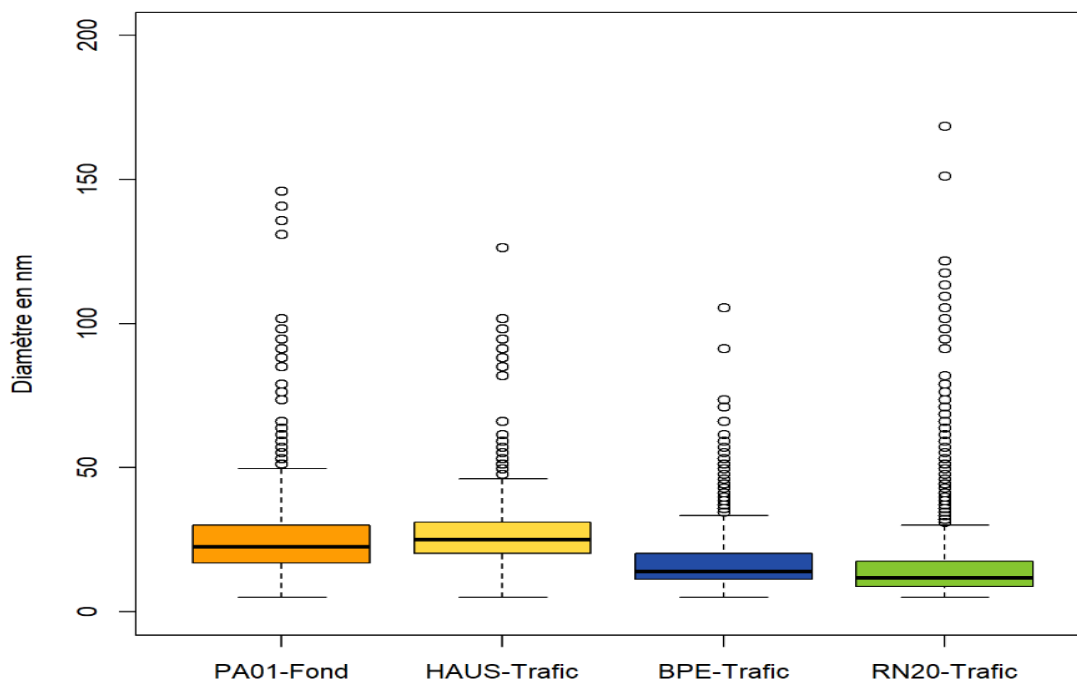


Figure 28 : Modes majeurs horaires des sites de l'étude sur la période du 14 juin au 19 septembre 2021

La Figure ci-dessus illustre, d'une part, comme précisé précédemment, des modes majeurs médians plus faibles (trait noir) pour la station située le long de la RN20 et la station située au bord du Boulevard Périphérique (BPE) que pour celles situées respectivement le long du boulevard Haussmann et en fond dans le jardin des Halles (PA01H).

D'autre part, les nombreuses valeurs extrêmes de ces 4 sites illustrent des heures présentant un mode différent, compris entre 50 et 170 nm, pointant soit une source autre que le trafic routier, soit une étape de formation différente (ou les deux).

La différence entre les particules fraîchement émises avec les plus âgées est abordée dans le chapitre suivant.

La configuration environnante du site Boulevard Périphérique, à l'Est le Boulevard Périphérique et à l'Ouest la ville de Paris, permet de sectoriser simplement des vents où le site de mesure est clairement sous l'influence des émissions de particules du Boulevard Périphérique ou non (voir Figure 20).

La figure 38 représente la distribution granulométrique observée sur le site Boulevard Périphérique dans différentes conditions de directions et de vitesses de vents :

- a. tous secteurs de vents
- b. secteurs Nord-Est à Sud et vents $< 2\text{m.s}^{-1}$ (site Boulevard périphérique sous l'influence du Boulevard Périphérique)
- c. secteurs Ouest à Nord avec des vents $> 2\text{m.s}^{-1}$
- d. représentation de la distribution granulométrique observée sur le site de fond de référence Paris 1^{er} les Halles pour des secteurs de vents Ouest à Nord avec des vents $> 2\text{m.s}^{-1}$ (représenté en d).

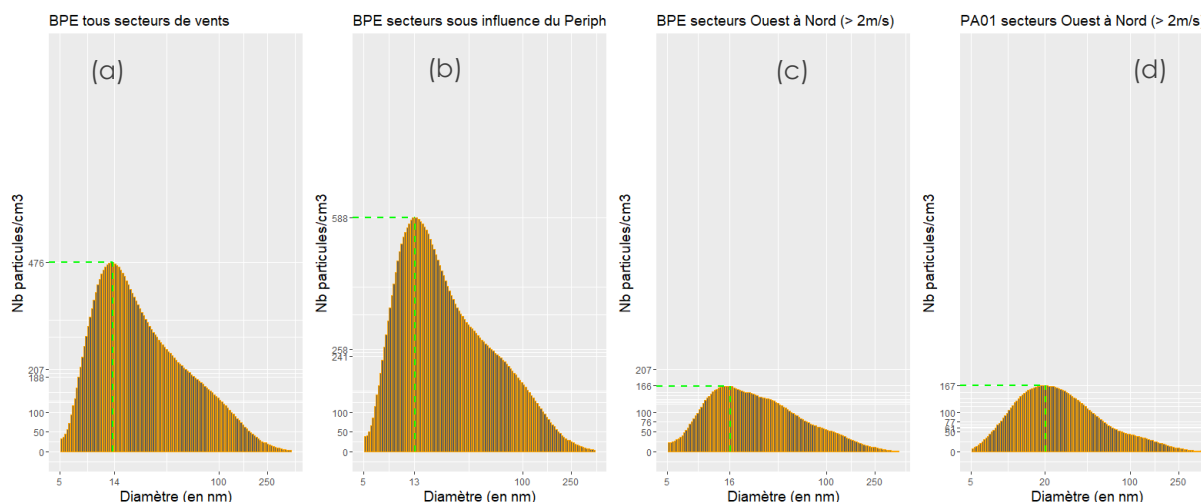


Figure 29 : Distribution granulométrique moyenne des sites BPE et PA01 en fonction des secteurs de vents (période 14 juin au 19 septembre 2021)

Pour l'ensemble des secteurs de vents (a), le site Boulevard Périphérique présente une distribution granulométrique moyenne des particules avec un mode majeur à 14 nm et une concentration moyenne de particules au mode majeur autour de 476 particules/cm³. Lorsque le site se retrouve sous l'influence du Boulevard Périphérique (b) le mode majeur est similaire (13 nm) avec une intensité plus importante (de 588 particules/cm³).

Par vent de secteur Ouest à Nord avec des vitesses de vents supérieures à 2 m.s⁻¹, la distribution granulométrique du site Boulevard Périphérique (c) présente un profil d'une intensité (166 particules/cm³) similaire à celle observée sur le site de fond de référence Paris 1^{er} les Halles (167 particules/cm³) (d).

4.4. Influence de l'étape de formation des aérosols

Les étapes de formation des particules, décrites en introduction du chapitre 4.1, mettent en avant la possibilité de classer les profils granulométriques en 3 grands modes : le mode nucléation, le mode Aitken et le mode accumulation.

Il est possible de les mettre en évidence de manière théorique en « déconvoluant » chacune des distributions granulométriques moyennes observées sur les sites de l'étude. La méthode consiste à rechercher mathématiquement la distribution de chacun des 3 modes correspondant à l'état de formation des particules, à partir de l'étalement théorique de chacun de ces modes (à savoir : mode Nucléation (<30nm), mode Aitken (~10 à 100 nm) et mode Accumulation (~50 à 1000 nm). Cette déconvolution théorique qui illustre l'influence du mode nucléation sur les distributions granulométriques moyennes est présentée en Figure 25.

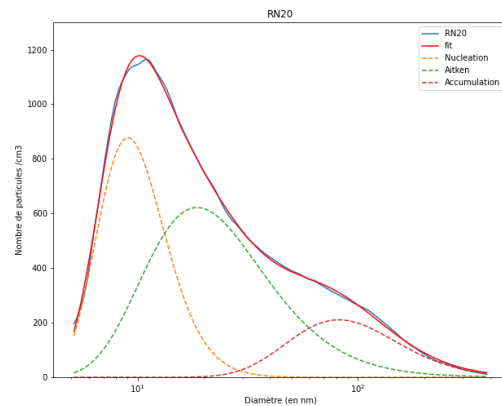
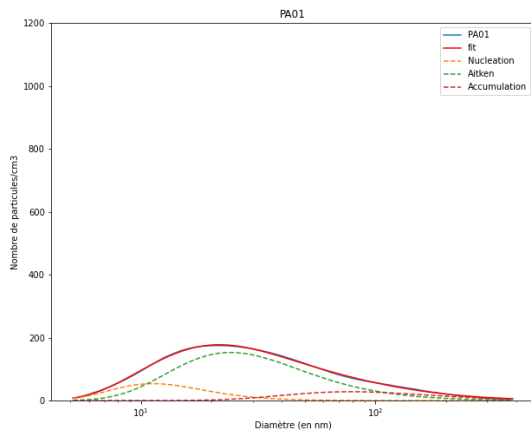
Il est à noter que la fraction PUF (<100 nm) englobe les modes Nucléation et Aitken.

Les profils granulométriques moyens des sites de l'étude ont été déconvolués (**travaux théoriques illustratifs**) sur la période du 14 juin au 19 septembre 2021 (Figure 30). Cette figure présente en abscisse les tailles des particules (diamètre aérodynamique en nm, en échelle logarithmique) et en ordonnée la concentration en particules, exprimée en nombre de particules.cm⁻³. La courbe bleue représente la distribution granulométrique moyenne observée. Les courbes en pointillées orange, vert et rouge correspondent respectivement aux modes calculés : le mode Nucléation, le mode Aitken et le mode Accumulation. La courbe rouge, nommée « fit », correspond à la somme des trois modes calculés. De très légers écarts entre le profil « fit » et le profil de référence (en bleu) sont

observés pour RN20 et boulevard Haussmann, ce qui n'est pas le cas pour Boulevard Périphérique Est et Paris 1^{er} Les Halles.

PARIS 1^{ER} LES HALLES - FOND

RN20 – PROX. TRAFIC ROUTIER



BOULEVARD HAUSSMANN – PROX. TRAFIC ROUTIER

BOULEVARD PERIPHERIQUE EST – PROX. TRAFIC ROUTIER

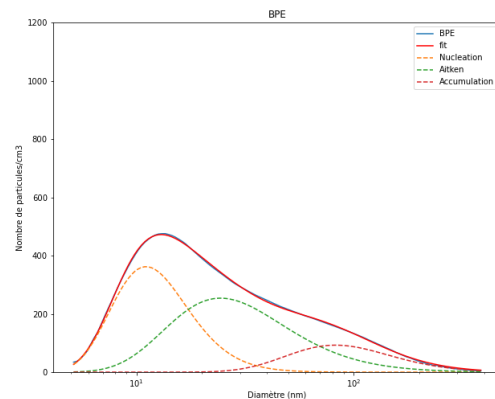
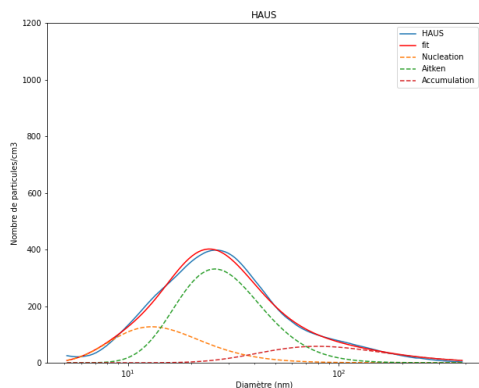


Figure 30 : Représentation des modes Nucléation, Aitken et Accumulation composant les profils granulométriques moyens des sites de l'étude sur la période du 14 juin au 19 septembre 2021

Les sites de proximité routière présentent tous une amplitude du mode nucléation supérieure au site urbain de fond (voir Tableau 8). Comme précisé en section 3.2, le mode nucléation est caractérisé par des particules dont la durée de vie est courte. Les particules de ce mode sont « fraîchement » émises et sont formées par nucléation à partir des gaz émis notamment par l'échappement des moteurs à combustion. Étant donné la proximité immédiate des points de prélèvements des sites trafic de l'étude et de la rapidité de la formation des particules de ce mode, il peut être considéré que le trafic routier est le **principal émetteur de particules dans le mode nucléation**.

Sur la station urbaine de fond de Paris 1er les Halles, le mode nucléation n'est pas dominant, ce qui est normal en raison de sa distance aux sources d'émissions de particules. La distance du site de mesure aux différentes sources environnantes laisse plus de temps pour la transformation des particules. Le **mode Aitken y est ainsi très largement dominant**, avec un nombre moyen maximum de particules pour ce mode équivalent à celui observé au mode majeur (voir Tableau 7).

Le Tableau 8 dresse pour chacun des sites de l'étude, la concentration modale (correspondant au maximum d'amplitude du nombre de particules) associée aux modes nucléation, Aitken et accumulation utilisés dans cette reconstitution théorique de la répartition granulométrique pour chaque site de mesure.

Maximum d'amplitude du nombre de particules (en part.cm ⁻³) calculé par mode sur la gamme 5 – 400 nm			
	Mode Nucléation	Mode Aitken	Mode Accumulation
PA01	21	172	27
HAUS	127	331	58
BPEST	362	254	93
RN20	877	622	210

Tableau 8 : Mode et Amplitude maximale rencontrée pour les modes Nucléation, Aitken et Accumulation sur la gamme 5 – 400 nm

Le Tableau 8 indique un maximum d'amplitude dans le mode nucléation pour le site RN20. Une des raisons plausibles repose sur la proximité de son point de prélèvement, qui est au plus près des émissions des pots d'échappement des véhicules (à 0.8 m du bord de la voie et à 2.4m de hauteur). Les autres facteurs d'influence sont certainement à associer à la configuration du site (route en pente notamment) et aux caractéristiques du trafic routier de l'axe.

Le site boulevard Haussmann présente un mode majeur similaire au site de fond (entre 20 et 30 nm, voir Tableau 7). Cependant, la déconvolution de son profil granulométrique permet de mettre en évidence une part non négligeable de particules fraîches (en mode nucléation) au regard de la reconstitution de ce mode sur le site de fond parisien. **Le site HAUS est sous l'influence directe des émissions du trafic routier, avec un nombre de particules en mode nucléation beaucoup plus élevé que celui observé sur le site de fond urbain.** Ce site se démarque toutefois des autres sites trafic de l'étude, avec un mode Aitken dominant. La position en hauteur de son point de prélèvement (à 3.7 m de hauteur et 2.6 m du bord de la voie), ses caractéristiques (rue canyon), la composition de son parc roulant, l'intensité et la fluidité du trafic peuvent être des facteurs explicatifs de cette différence de profil avec les autres sites trafic de l'étude.

Le site urbain de fond de Paris 1er les Halles est composé très majoritairement de particules secondaires, représentées dans le mode Aitken. Ces particules sont issues entre autres du trafic routier, qui par transformation au cours du temps diminuent en nombre et grossissent en taille, ce qui explique le faible volume sous la courbe du mode nucléation. Ce constat est en accord avec la source trafic routier identifiée durant la campagne de mesures de PUF menée en situation de fond au cours de l'hiver 2020-2021.

Les résultats de cette étude mettent ainsi en évidence la formation de particules ultrafines dans l'air ambiant, notamment dans la tranche granulométrique 10-15 nm, à proximité immédiate du trafic routier.

Ces constats sont à mettre en relation avec les caractéristiques du trafic routier de chaque axe. À ce jour, les éléments disponibles concernant la composition du parc roulant, la vitesse, les conditions de conduite ne sont pas connues suffisamment finement pour en déduire la part de l'impact associé à chacune des caractéristiques de l'axe (par exemple, quelle serait la part de l'impact des poids lourds, de la vitesse, de la configuration du site, ...).

L'implantation du point de prélèvement au plus proche des émissions des échappements de véhicules est un facteur augmentant l'exposition aux particules, notamment celles fraîchement formées de dimension ~10nm.

4.5. Variabilité temporelle des PUF par classe de taille

4.5.1. Profil moyen hebdomadaire 5-30 nm et 30-100 nm

La variabilité temporelle des particules pour deux classes de taille, la gamme de 5 à 30 nm et celle de 30 à 100 nm est étudiée dans cette partie. L'objectif est de mettre en évidence la part des particules inférieures à 30 nm dans les PUF, tailles de particules fortement influencées par les émissions du trafic routier.

La Figure 31 représente, pour les particules de la tranche granulométrique 5-30 nm, sur les sites de l'étude du 14 juin – 19 septembre 2021, les profils moyens journaliers et le pourcentage moyen journalier dans les PUF selon le jour de la semaine. La Figure 32 représente la même chose sur la tranche granulométrique 30-100 nm.

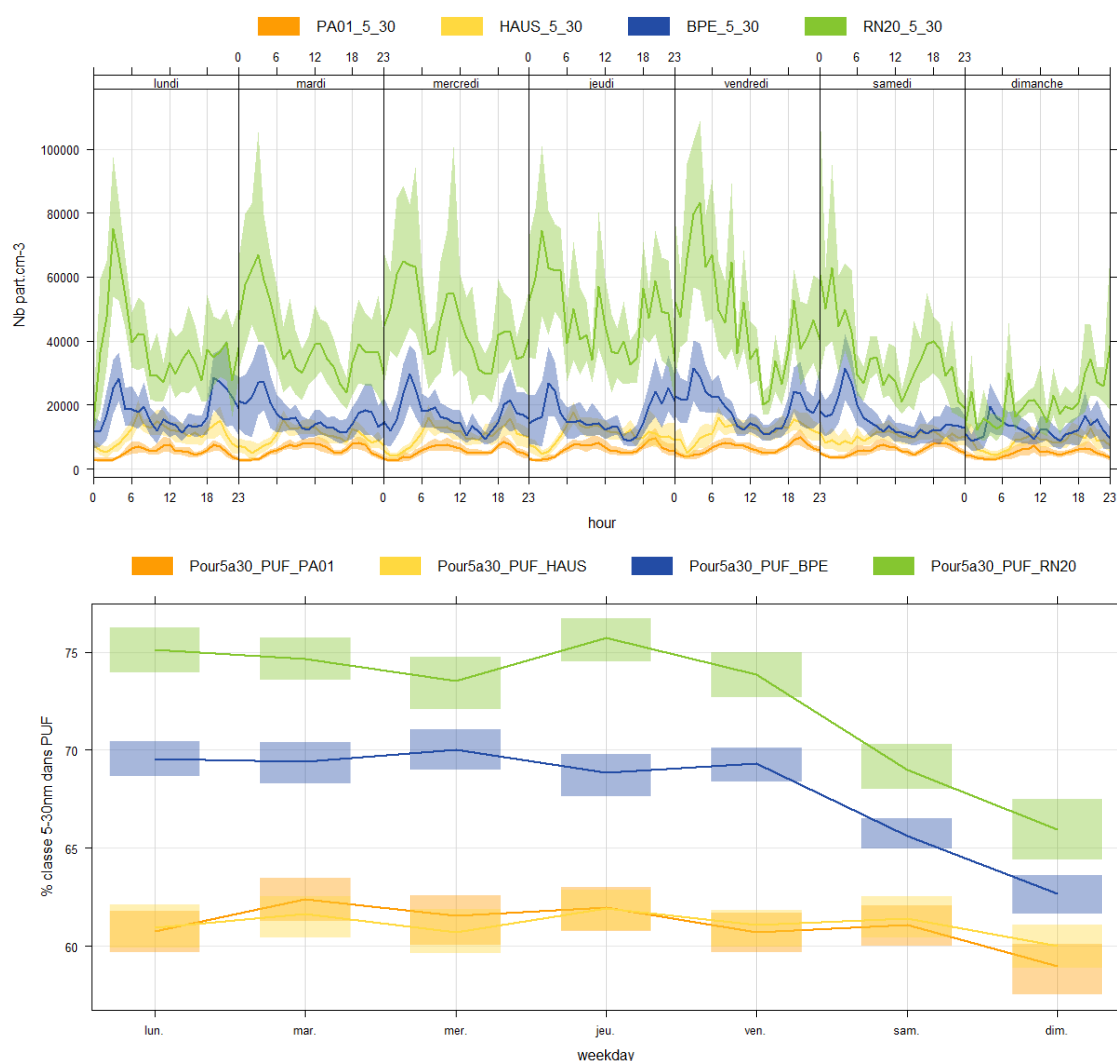
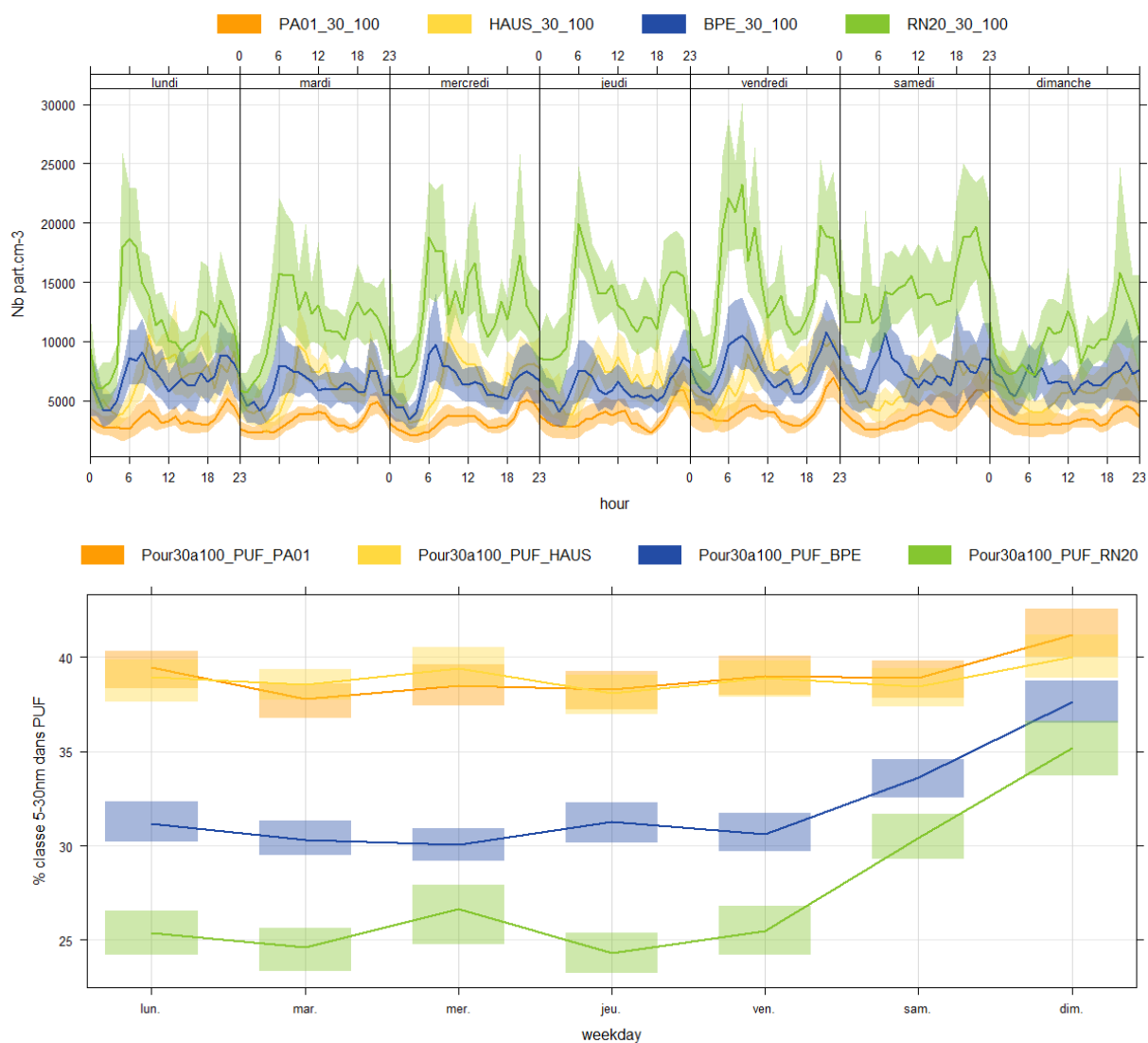


Figure 31 : Particules par tranche granulométrique 5-30 nm sur les sites de l'étude du 14 juin – 19 septembre 2021 ; En haut - Profils moyens journaliers selon le jour de la semaine ; En bas – Pourcentage moyen journalier dans les PUF

Sur la tranche granulométrique 5-30 nm, la dynamique des profils temporels des concentrations en nombre de particules suit la même hiérarchie que celle observée sur les PUF, avec les plus forts niveaux sur les sites trafic RN20, BPE et HAUS par rapport au site de fond PA01. On constate également une amplitude de dynamique plus importante sur RN20 que sur les autres sites trafics.

Sur les sites RN20 et BPE, la part de particules sur la gamme 5-30 nm dans les PUF est très élevée et avoisine du lundi au vendredi les 75% pour le site RN20 et 70% pour le site BPE. Une baisse s'amorce le samedi matin jusqu'en fin de matinée du dimanche pour tendre vers 65% des PUF, soit une baisse d'environ 10 %. Dès le dimanche midi, les concentrations de PUF de cette gamme repartent à la hausse avec les retours de weekend. Ces forts pourcentages de particules dans la tranche granulométrique 5-30 nm correspondent à des particules majoritairement attribuées aux émissions du trafic routier.

Le site trafic routier HAUS conserve une part relativement stable de particules comprises entre 5 et 30 nm dans les PUF, autour de **60 %** - pourcentage comparable à celui rencontré sur le site de fond PA01 mais avec une dynamique plus importante.



Sur la tranche granulométrique allant de 30 à 100 nm, les profils hebdomadaires des concentrations en nombre de particules ne suivent pas la même hiérarchie que celle constatée sur la granulométrie 5 à 30 nm. Les profils des sites du boulevard Hausman du Boulevard Périphérique Est, sur la granulométrie 30 à 100nm, présentent des amplitudes et des dynamiques très proches, le site RN20 se distingue par une amplitude plus grande, tandis que sur le site de fond PA01 se trouve bien en deçà des concentrations observées sur les sites trafic.

Le site du boulevard Hausman présente un pourcentage de particules pour la gamme d'intérêt de ~40%, comparable à ce qui est observé sur le site de fond PA01. Cela confirme le fait que le profil du site boulevard Haussmann est différent de celui des autres sites trafic étudiés.

4.5.2. Profils horaires journaliers 5-30 nm et 30-100 nm

La Figure 33 représente les profils moyens journaliers des concentrations de particules des tranches granulométriques 5-30 nm et 30-100 nm, sur les sites de l'étude du 14 juin au 19 septembre 2021.

Un décalage temporel entre les concentrations en nombre mesurées sur la tranche granulométrique 5-30 nm, en comparaison avec la tranche 30-100 nm, est observé. Les particules fraîchement émises par le trafic routier le matin (5-30 nm) sont détectées en premier, puis des particules de taille plus importante se forment par un phénomène de condensation et de coagulation (30-100 nm). Ce constat est très nettement visible sur le site RN20. Le décalage temporel s'estompe ensuite peu à peu en cours de journée.

De plus, une augmentation du nombre de particules dès 4h est à noter sur les sites BPE et RN20, puis plus tardivement sur le site HAUS (vers 7h). Un rebond est observé le soir avec la reprise du trafic induite en partie par le retour travail domicile. Les concentrations des deux classes de particules se rejoignent en cours de journée sur les sites parisiens BPE et HAUS, en lien certainement avec une stabilisation des émissions du trafic routier à ce moment de la journée (phénomène également constaté sur la mesure des PM_{2.5} voir Figure 16). La baisse des niveaux de particules apparaissant la nuit est attribuable à la baisse du trafic routier. Ce phénomène est notamment bien visible sur la fraction de particules secondaires (30-100 nm) sur les sites BPE et HAUS qui restent « équivalents » tout au long de la nuit.

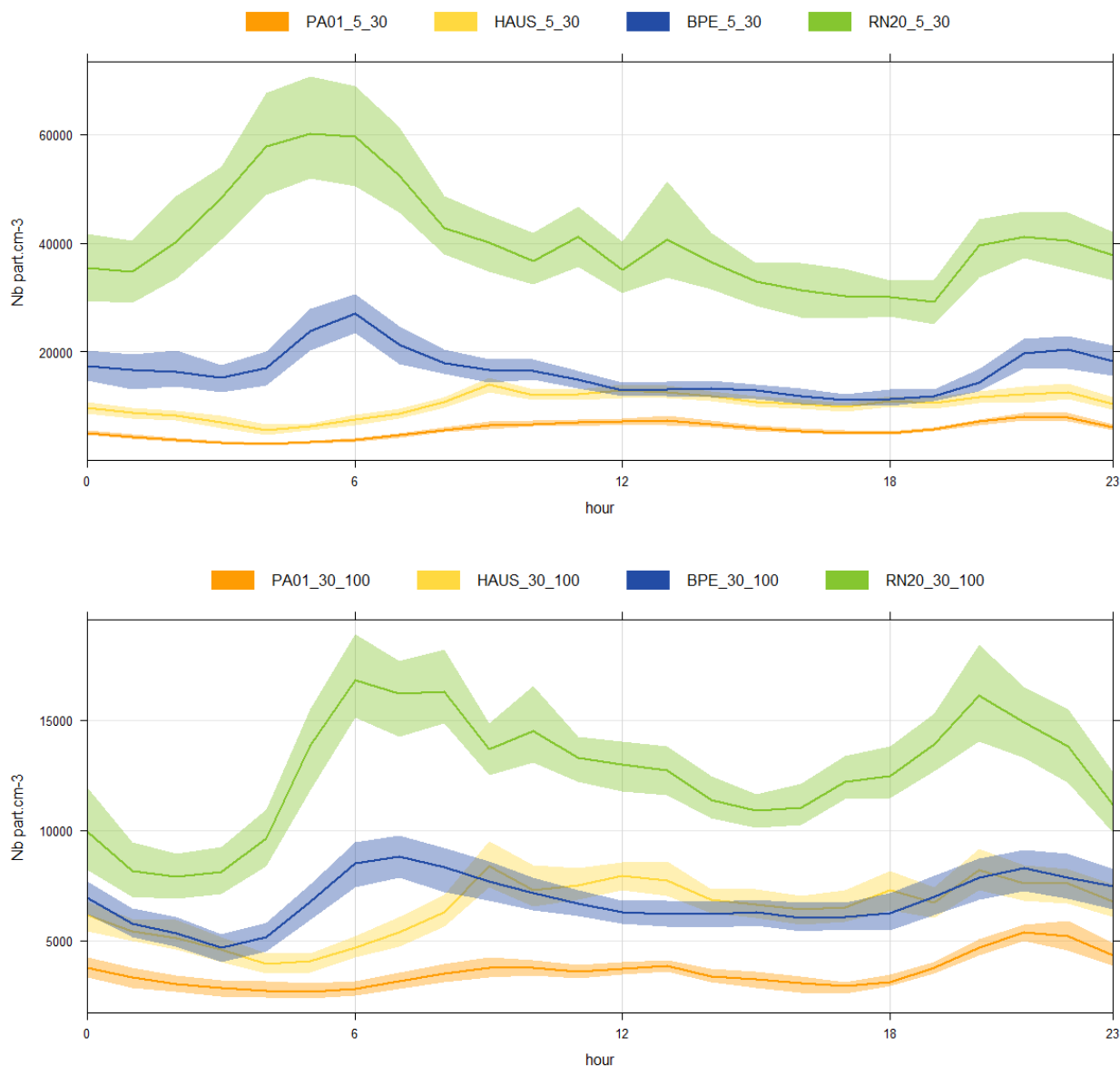


Figure 33 : Profils moyens journaliers particules 5-30nm (panel haut) et 30-100nm (panel bas) sur les sites de l'étude du 14 juin au 19 septembre 2021

4.5.3. Profils horaires journaliers et trafic routier

Le mois d'août et le mois de septembre ne recensent pas le même niveau de trafic routier. Le mois d'août correspond à une période de trafic routier réduit notamment en raison des vacances scolaires et le mois de septembre correspond à la reprise des activités Franciliennes qui engendrent une hausse du trafic routier.

La Figure 34 illustre heure par heure l'évolution du nombre moyen de particules suivant leur diamètre (5 à 400 nm) observée sur le site Boulevard Périphérique lorsque le site de mesure est principalement sous l'influence du Boulevard Périphérique (période du 12 au 18 août 2021) et lorsqu'il ne l'est pas (période du 2 au 8 septembre 2021).

La lecture de cette figure s'effectue de gauche à droite pour comprendre l'évolution au cours du temps (heure par heure) et verticalement pour obtenir la correspondance de la taille des particules.

Le nombre moyen de particules.cm⁻³ tend vers le bleu pour illustrer de faibles concentrations et vers le rouge pour représenter de plus forts niveaux.

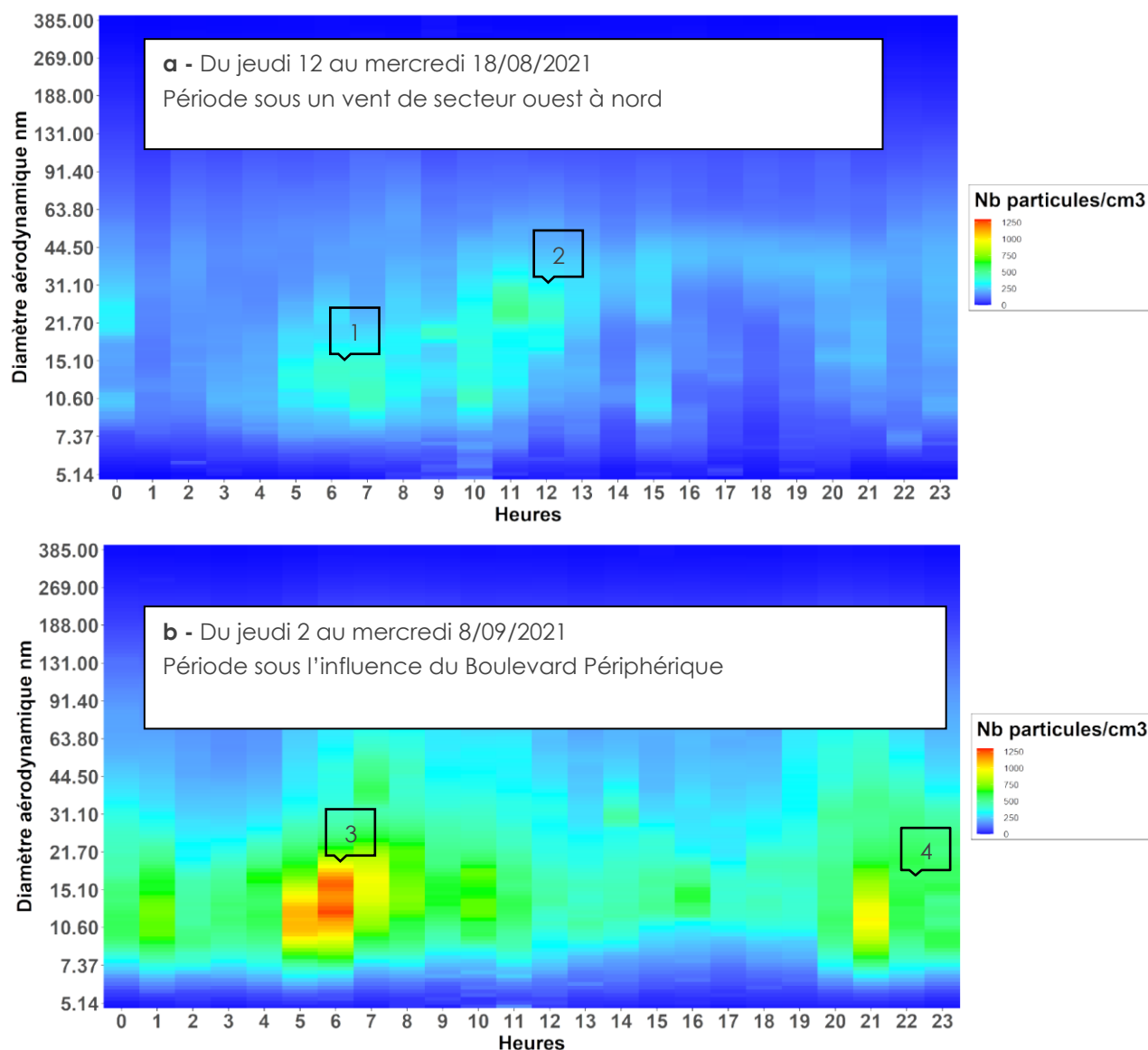


Figure 34 : Évolution journalière 2D du nombre de particules par diamètre aérodynamique du 12 au 18 août (a) et du 02 au 08 septembre (b) sur le site Boulevard Périphérique Est

Pour la période (a) du mois d'août sous le vent du fond Parisien (en secteur ouest à nord).

On constate deux dominantes de tailles de particules, la première est inférieure à 20 nm (étiquette n°1) et correspond entre autres par hypothèse aux émissions liées au trafic routier de Paris. La seconde dominante de taille de particules se situe entre 20 et 30 nm (étiquette N°2). La présence de cette seconde dominante peut être considérée comme étant la combinaison du niveau de fond parisien auquel vient d'ajouter, par hypothèse, les particules secondaires provenant des différents axes routiers situés de ce secteur de vents.

Pour la période (b) pour des vents en provenance du Boulevard Périphérique. On observe sur cette période du mois de septembre où le trafic routier et la congestion sont intenses, le cycle caractéristique du trafic routier à « deux bosses » (étiquettes N°3 et 4). Les niveaux de particules sont les plus élevés pour des tailles de particules <15 nm avec un maximum constaté le matin (étiquette N°3) (signature du trafic routier). La période (b) présente des profils granulométriques avec plusieurs modes qui évoluent d'heure en heure, pouvant être associés aux différents stades de formation des particules secondaires à mettre en lien avec le trafic routier de l'heure considérée. Pour aller plus

en avant dans l'analyse des profils granulométriques (5-400 nm) des sites influencés par le trafic routier, **une piste de réflexion peut porter sur le croisement du trafic routier réel (vitesse des véhicules, phase d'accélération ou de décélération, type de véhicules roulant...) avec le profil granulométrique constaté au même moment à pas de temps horaire voir plus fin.**

5. CONCLUSION & PERSPECTIVES

Airparif a réalisé une campagne de mesures en période estivale des particules ultrafines (PUF) en situation de proximité au trafic routier du 14 juin au 19 septembre 2021 avec l'objectif de renseigner une première évaluation de la variabilité des niveaux de particules ultrafines (PUF) en nombre et par tranches granulométriques dans ces environnements.

3 sites permanents du réseau de surveillance d'Airparif ont été instrumentés, le site du Boulevard Périphérique Est (Paris - 75), le site du boulevard Haussmann (Paris - 75) et le site RN20 (Montlhéry - 91), en complément de la station urbaine de fond permanente Paris 1^{er} Les Halles. Les sites ont été équipés d'analyseurs de type SMPS, permettant l'acquisition de résultats non seulement en nombre total de PUF mais aussi de caractériser des profils granulométriques sur la gamme de 5 à 400 nm durant l'été 2021 en région Île-de-France.

Le comptage moyen du nombre de PUF dans la gamme 5 à 100 nm met en évidence des nombres de particules ultrafines sur les sites trafic étudiés nettement supérieurs à ceux observés sur le site urbain de fond Paris 1^{er} Les Halles. Les mesures ont une grande variabilité entre les sites de proximité avec des niveaux moyens sur la période de mesure de 2 à 6 supérieurs à ceux enregistrés sur le site urbain de fond Paris 1^{er} Les Halles.

Les concentrations relevées sur la zone urbaine de la région parisienne sont cohérentes aux concentrations observées dans la littérature.

Il a également été constaté que la variabilité moyenne des PUF est beaucoup plus importante que celle des concentrations massiques moyennes observées en PM₁₀, PM_{2.5} et BC.

La fluctuation de l'intensité du trafic routier au cours de la journée ou à l'échelle hebdomadaire influence directement les variations du niveau moyen de PUF mesurées aux abords des axes, les niveaux les plus faibles constatés sur les sites trafic pouvant être par moment comparables au niveau observé en situation urbaine de fond. Les niveaux de concentrations ne sont toutefois pas corrélés aux données du trafic moyen journalier annuel (TMJA) des axes routiers étudiés. Cette première étude ne permet d'identifier l'importance de la contribution des différents autres paramètres d'influence que sont les configurations du site de mesure, celle de l'axe routier considéré et de son environnement (rue canyon, axe en pente, présence de feux tricolores, ...) ainsi que les conditions de circulation (flux de trafic, vitesse, type de véhicules circulants, congestion, ...)

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 estivale.

Sur les sites de proximité au trafic routier, ces profils font apparaître un mode majeur (granulométrie présentant le plus grand nombre de particules) de diamètre autour de 10 nm pour le site RN20 et le Boulevard Périphérique Est. Le mode majeur est autour de 26 nm sur le site du boulevard Haussmann, ce qui est proche de la population observée en situation de fond sur le site Paris 1^{er} Les Halles (~22 nm). Ce mode illustre l'importance de la source trafic routier pour tous ces sites. Les particules en plus grand nombre de taille plus petite pour les sites RN20 et Boulevard Périphérique Est, peuvent provenir de mode « nucléation », c'est-à-dire des particules ultrafines fraîchement produites.

Sur le site du boulevard Haussmann la déconvolution de son profil granulométrique permet de mettre en évidence une part non négligeable **de particules secondaires fraîches (issu du mode Nucléation) mais également des particules de taille un peu plus importante (déjà vieilles, mode Aitken)**. Les raisons ne sont pas expliquées à ce stade, mais la situation en rue canyon pourrait notamment induire des recirculations des particules.

Pour le site urbain de fond de Paris 1er les Halles, les particules sont issues en majorité du trafic routier qui, par transformation au cours du temps, diminuent en nombre et grossissent en taille, ce qui explique le profil et un faible pourcentage de particules du mode nucléation.

La poursuite des études est nécessaire pour affiner la compréhension des comportements des particules ultrafines. Par exemple, pour aller plus en avant dans l'analyse des profils granulométriques, une piste de réflexion est de suivre le trafic routier en temps réel et de le croiser avec le profil granulométrique constaté au même moment, afin de mettre en évidence l'impact de facteurs tels que la congestion du trafic routier, la vitesse, les phases d'accélération de la circulation, le parc roulant, ... qui, selon la littérature, sont des facteurs d'influence des émissions de PUF.

Cette évaluation des niveaux moyens et des profils granulométriques en situation de proximité au trafic routier lors de la période estivale sera complétée sur d'autres périodes de l'année et dans d'autres environnements. De plus les résultats estivaux sont à confirmer, compte-tenu de l'été 2021 atypique avec des températures globalement plus fraîches que la normale. Les travaux en cours, en complément de l'exploitation des mesures de la station permanente des Halles sont :

- Dans le cadre d'un partenariat spécifique Airparif, Ville de Paris et Bloomberg Philanthropies, une campagne à l'échelle de Paris a débuté en hiver 2022 et une seconde sera menée durant l'été 2023, afin d'évaluer la variabilité du nombre de PUF, à la fois à proximité du trafic routier et en situation plus éloignée des sources dans Paris. Les niveaux de PUF constatés sur Paris seront comparés avec ceux observés dans d'autres villes européennes. Une expérimentation visant à croiser les données de trafic avec les niveaux de PUF observés sera aussi menée.
- Une campagne de mesures de PUF à proximité de la plateforme aéroportuaire de Paris-Charles de Gaulle est réalisée sur le quatrième trimestre 2022.

Références

- Airparif, « Campagne de mesure francilienne sur les particules ultrafines (PUF), situation de fond hiver 2020-2021 », 2022.
- Airparif, « Synthèse des connaissances sur les particules en Île-de-France », 2021a.
- Airparif, « Bilan de la qualité de l'air en Ile-de-France », 2021b.
- Air Pays de la Loire, 2021 « Evaluation des concentrations en particules ultrafines dans les environs de l'aéroport de Nantes-Atlantique » Campagne Novembre 2020 – Juin 2021
- 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 Hauts-de-France, « Surveillance des particules ultrafines dans la région Hauts-de-France », 2019.
- 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.
- Buseck, gselements, "nanoparticles in the atmosphere", 2008
- Casati et al., "Measurement of nucleation and soot mode particle emission from a diesel passenger car in real world and laboratory in situ dilution", 2007
- 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.
- Hagler G.S.W., L. et al., « Ultrafine particles near a major roadway in Raleigh, North Carolina: Downwind attenuation and correlation with traffic-related pollutants Article in Atmospheric Environment » 2009
- Hussein T. acp, « Urban aerosol number size distributions », 2004
- 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.
- Karine Sarlet, Cerea, cours VET « Environnement atmosphérique et qualité de l'air » Particules atmosphériques
- Morawska L. et al., « Ambient nano and ultrafine particles from motor vehicle emissions: Characteristics, ambient processing and implications on human exposure. » 2008.
- 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.
- Oke. T.R, 1987, Boundary layer climates, Second Edition. University press, Cambridge
- OMS, "Lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air", 2021.
- Regniers O., Mémoire « Les particules diesel ultrafines : techniques de mesure à l'émission et à l'immission », 2006.
- Rivas I. et al., "Source apportionment of particle number size distribution in urban background and traffic stations in four European cities", 2020

- Rodriguez S., jaerosci, "The contributions of minimum primary emissions and new particle formation enhancements to the particle number concentration in urban air", 2007
- RIVA M., these, " Caractérisation d'une nouvelle voie de formation des aérosols organiques secondaires (AOS) dans l'atmosphère : Rôle des précurseurs polyaromatiques", 2013
- 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.
- Vu, T.V., Delgado-Saborit, J.M., Harrison, R.M., 2015. Review: Particle number size distributions from seven major sources and implications for source apportionment studies. Atmos. Environ. 122, 114–132. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.09.027>

Annexe I : Les polluants mesurés

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 35), 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).**

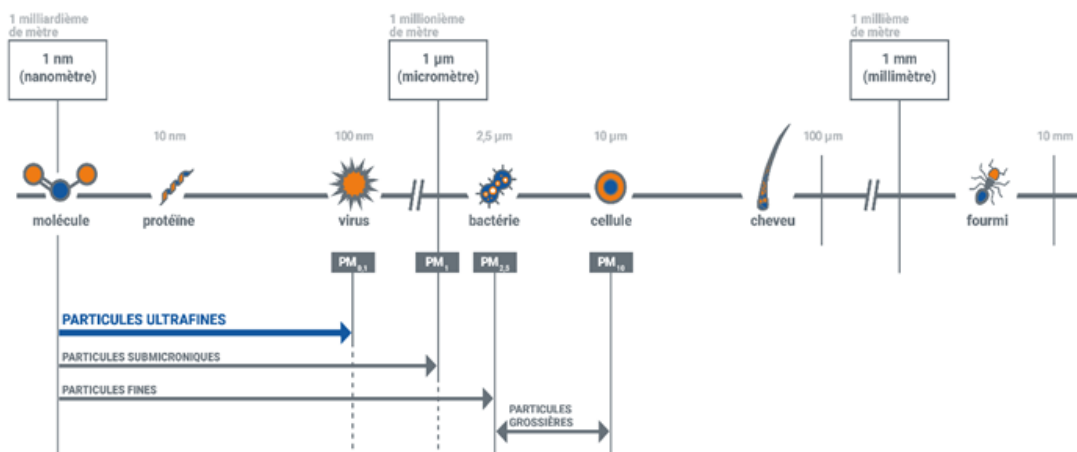


Figure 35 : Taille des particules - échelles et ordres de grandeur

Les réglementations française et européenne, mais également internationales, ainsi que les recommandations de l'OMS, portent à ce jour 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 (NO_2), le dioxyde de soufre (SO_2), l'ammoniac (NH_3) 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 36).

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

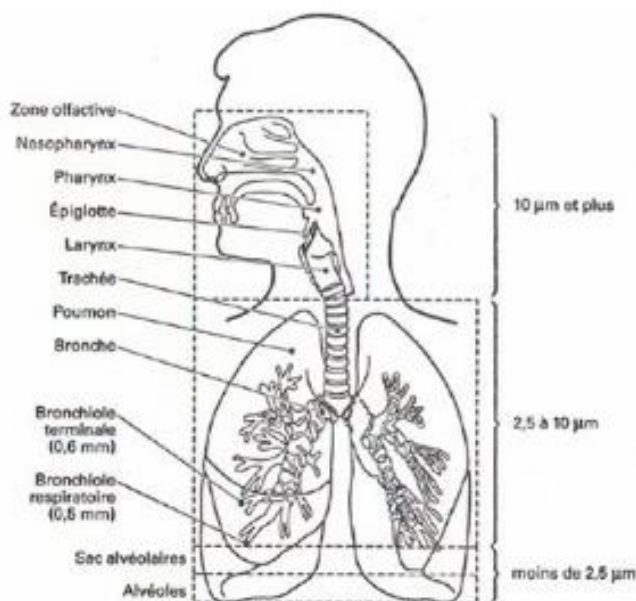


Figure 36 : Pénétration des particules dans l'organisme (Schéma réalisé sur la base d'un dessin du DR J. Hararkeman).
(source : www.santepubliquefrance.fr)

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.

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 2018) 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 et d'assurer un suivi particulier sur le long terme, tout comme l'OMS dans ses dernières recommandations de septembre 2021 (OMS, 2021).

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, 2021a).

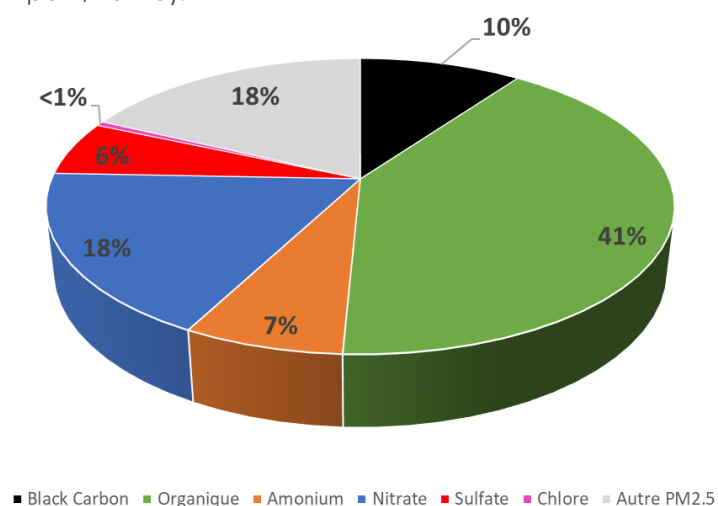


Figure 37 : composition chimique moyenne annuelle des PM_{2.5} en situation de fond urbain (Mesures ACSM / AE33)

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.

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 PM_{10} 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 PM_{10}) = 2 x eBC_{ff}

- PM_{wb} (équivalent PM_{10}) = 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.

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 $\mu g/m^3$, en $PM_{2.5}$ 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.

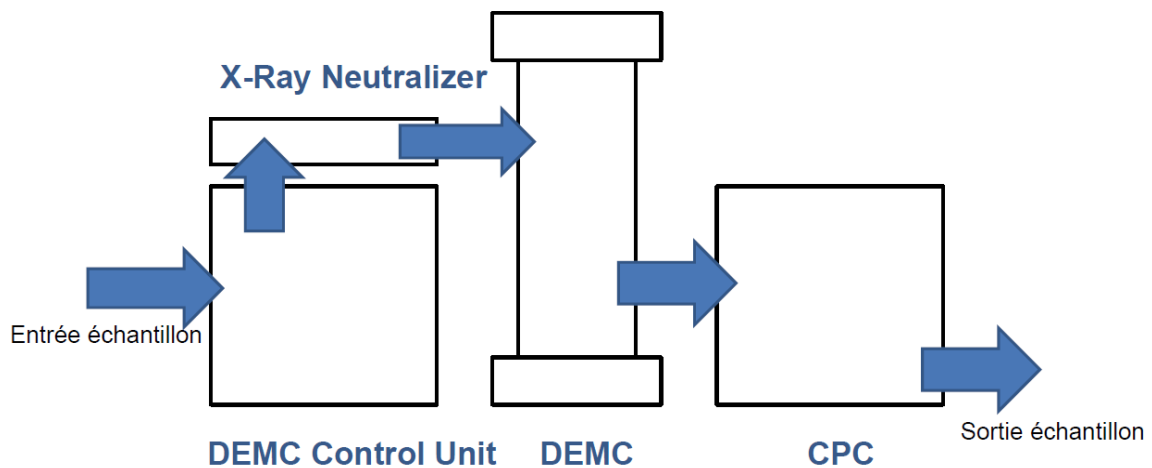
Annexe II : Métrologie

Analyseur SMPS (Mesure du nombre de particules en part/cm³)

L'analyseur choisi pour réaliser cette surveillance PUF est **un spectromètre granulomètre à mobilité électrique** (SMPS - 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:

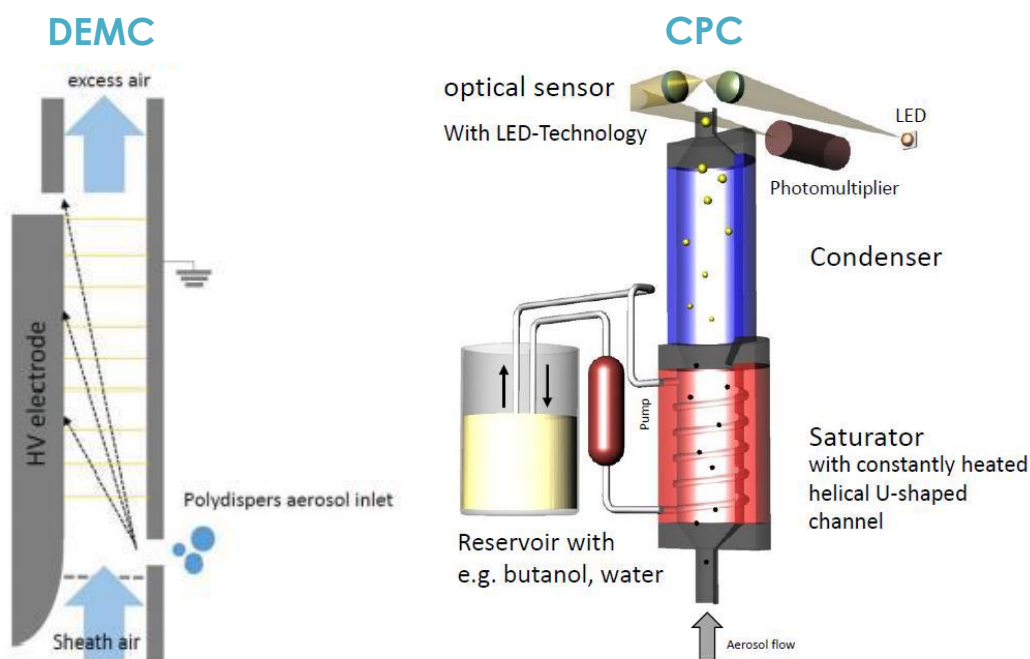


Le SMPS est ainsi composé d'un DEMC (Differential Electrical Mobility Classifier) qui sélectionne les particules suivant leurs tailles granulométriques via leurs mobilités électriques, et d'un CPC (Condensation Particle Counter) permettant de les faire grossir afin de les compter.



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, la création d'un équilibre stationnaire entre les différentes fractions de charges s'opère, 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 venir sélectionner les particules selon leur mobilité électrique, et donc leurs tailles. 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.

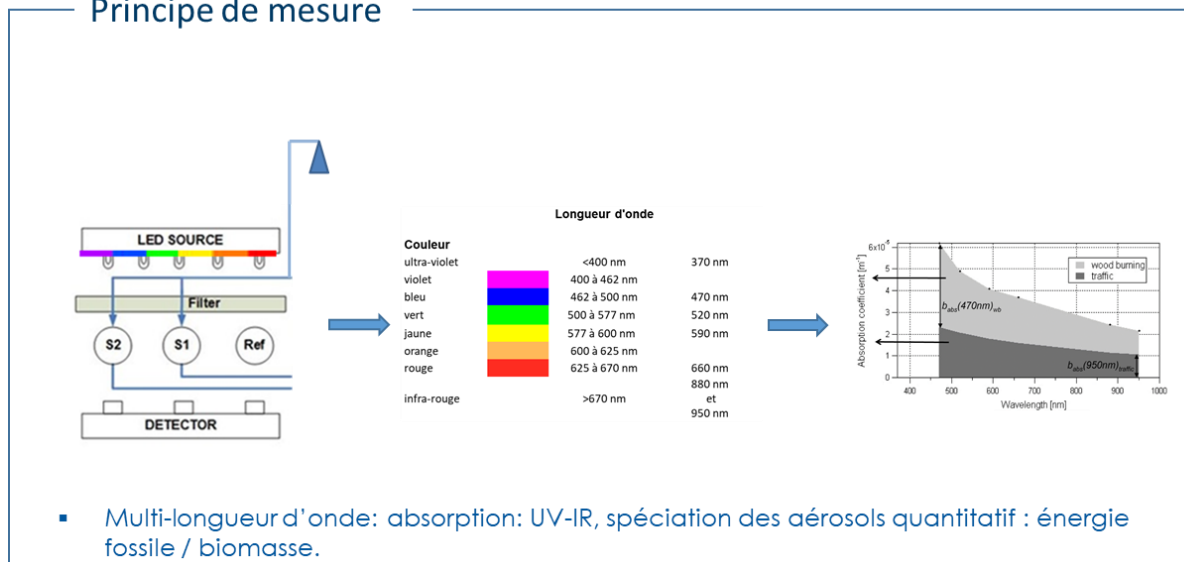
Analyseur AE33 (Mesure du Black Carbon en µg/m³)

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 en 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 celles issues d'une combustion de biomasse (eBCwb).

Principe de mesure



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 ».

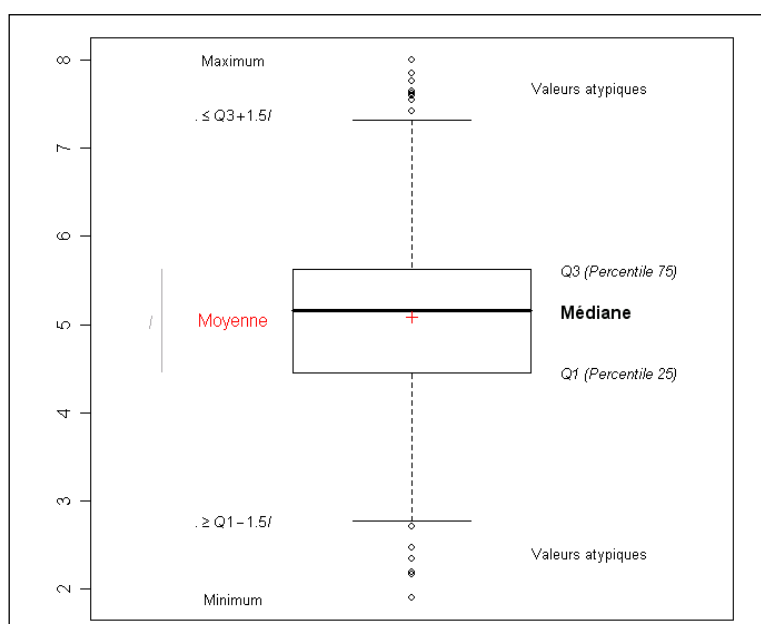
La mesure de la concentration massique de particules (PM₁₀ et PM_{2.5} en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

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 MP₁₀ ou 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%20qualit%C3%A9%20air%20M%C3%A0J_13-05-20_v2_0.pdf.

Annexe III : 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 termes de longueur, $1.5 * I$ (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).