



Campagne de mesure parisienne sur les particules ultrafines (PUF)

VOLET N°2 - MESURES ESTIVALES DU 17 JUILLET AU 15 SEPTEMBRE
2023 ET ENSEIGNEMENTS GLOBAUX DE L'ÉTUDE



Campagne de mesure parisienne sur les particules ultrafines (PUF)

Disposer d'une meilleure compréhension de la variabilité des PUF dans Paris

Volet N°2 Mesures estivales du 17 juillet au 15 septembre 2023 et Enseignements globaux de l'étude

Avril 2025



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

REMERCIEMENTS

La comparaison des niveaux de particules ultrafines entre Paris et les autres métropoles européennes a pu être réalisée grâce aux échanges et à la fourniture de données des différents organismes de surveillance de la qualité de l'air (dans l'ordre d'apparition dans le rapport) que nous tenons à remercier :

- Landesamtt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Dresde, Allemagne) ;
- Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) (Francfort, Allemagne) ;
- Gemeentelijke Gezondheidsdienst (GGD) Amsterdam (Amsterdam, Pays-Bas) ;
- Imperial College Londres et National Physical Laboratory (NPL) (Londres, Angleterre) ;

Nous remercions également les organismes suivants :

- Réseau de surveillance de la qualité de l'air (RSQA) Montréal (Montréal, Canada) ;
- DCMR Environmental Protection Agency (Rotterdam, Pays-Bas) ;
- Bruxelles environnement (Bruxelles, Belgique) ;
- ARPA Lombardia (Milan, Italie) ;
- Institute of Environmental Assessment and Water Research (IDAEA) ;
- Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIS) (Barcelone, Espagne)

avec lesquels nous avons eu des échanges scientifiques sur la thématique des Particules Ultrafines.

Cette étude a été réalisée avec le soutien de Breathe Cities.

This study was supported by Breathe Cities.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	3
SOMMAIRE	5
INTRODUCTION	7
PARTIE A	9
CAMPAGNE ESTIVALE : MESURES DU 17 JUILLET AU 15 SEPTEMBRE 2023	9
1. DESCRIPTION DE LA CAMPAGNE ESTIVALE	9
1.1. LES SITES DE MESURE	9
1.2. POLLUANTS MESURES	13
1.3. PERIODE DE MESURE.....	14
2.3.1. Météorologie	15
2.3.2. Roses des vents (secteurs de vents)	16
2.3.3. Qualité de l'air durant la période de la campagne	16
2. CARACTERISATION DES PARTICULES ULTRAFINES EN PERIODE ESTIVALE	18
2.1. HIERARCHISATION DU NOMBRE DE PUF	18
2.2. VARIABILITE TEMPORELLE DES PUF	20
2.2.1. Évolution horaire	20
2.2.2. Profil journalier moyen	22
2.3. PROFIL GRANULOMETRIQUE MOYEN	25
2.3.1. Mode majeur	25
2.3.2. Mode médian et moyen, incertitudes de mesure	26
2.3.3. Variabilité temporelle des profils granulométriques.....	27
3. ORIGINE DES PARTICULES ULTRAFINES A PARIS	31
3.1. IMPACT DU TRAFIC ROUTIER	31
3.1.1. Combustion d'hydrocarbures, carbone suie et PUF.....	32
3.1.2. Impact des conditions du trafic routier sur les PUF (expérimentation AIRLAB)	35
3.2. PARTICULES ISSUES DE TRANSFORMATIONS DANS L'ATMOSPHERE	41
3.2.1. Granulométrie moyenne des particules lors de l'épisode du 6 au 8 septembre 2023	41
3.2.2. Composition chimique des particules secondaires	45
3.3. PRECIPITATIONS ESTIVALES ET IMPACT SUR LES PUF	46
PARTIE B	49
ENSEIGNEMENTS DES DEUX CAMPAGNES SUR LES PARTICULES ULTRAFINES A PARIS	49
1. ENSEIGNEMENTS SUR LES PARTICULES ULTRAFINES A PARIS.....	49
1.1. CARACTERISATION ET ORIGINE DES PUF EN PERIODE HIVER-PRINTEMPS	49

1.1.1.	Description de la campagne hiver-printemps.....	49
1.1.2.	Caractérisation des particules ultrafines.....	50
1.1.3.	Origine des particules ultrafines à Paris	52
1.2.	CARACTERISATION DES PUF A PARIS SELON LA SAISON.....	54
1.2.1.	Hiérarchisation du nombre de PUF.....	54
1.2.2.	Variabilité temporelle des PUF.....	54
1.2.3.	Profil granulométrique moyen.....	55
1.3.	ORIGINE DES PUF A PARIS SELON LA SAISON.....	57
1.3.1.	Le trafic routier, une source chronique de PUF dans Paris	57
1.3.2.	Particules issues de transformations dans l'atmosphère	60
1.3.3.	Le chauffage au bois, une source de PUF en période hivernale	61
2.	COMPARAISON A D'AUTRES METROPOLES.....	62
2.1.	ETUDE EUROPEENNE PLURI-ANNUELLE DES NIVEAUX DE PUF	63
2.2.	COMPARAISON A D'AUTRES METROPOLES SUR LES PERIODES D'ETUDES.....	69
2.2.1.	Présentation des sites	69
2.2.2.	Comparaison des niveaux de PUF des différentes villes européennes.....	74
	CONCLUSION.....	84
	REFERENCES.....	88
	ANNEXES	90
	ANNEXE I : LES POLLUANTS MESURES.....	90
	ANNEXE II : METROLOGIE	94
	ANNEXE III : FORMATION ET DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DES AEROSOLS	98
	ANNEXE IV. FIGURES SUPPLEMENTAIRES.....	101
	ANNEXE V : CONTACT DES ORGANISMES INTERNATIONAUX DE SURVEILLANCE DE LA QUALITE DE L'AIR	102

INTRODUCTION

Depuis fin 2019, Airparif suit les variations temporelles du nombre des particules ultrafines (PUF) par classes granulométriques au centre de l'agglomération parisienne grâce à un appareil de mesure permanent sur la station de référence implantée dans le jardin des Halles à Paris (site urbain de fond) et mène un projet d'étude de la variabilité spatiale des PUF en Ile-de-France, que ce soit en situation de fond ou à proximité du trafic routier ou des plateformes aéroportuaires en conditions hivernales ou estivales. Plusieurs campagnes de 3 mois ont déjà été réalisées.

Prenant appui sur ce programme d'études proposé par Airparif sur la variabilité spatiale des particules ultrafines, **la Ville de Paris, Bloomberg Philanthropies et Airparif** ont lancé une étude parisienne visant à obtenir une meilleure compréhension de leur variabilité temporelle, spatiale, et de leurs sources d'émissions au sein de la capitale, notamment le trafic routier et le chauffage au bois, au travers de deux campagnes de mesure : une campagne hivernale, et une campagne estivale.

Comme leur nom l'indique, les **particules ultrafines (PUF)** sont encore plus petites que les particules fines, leur diamètre est inférieur à 0,1 micromètre contre 2,5 microns pour les particules fines PM_{2,5}. Ces particules proviennent de sources d'émissions variées, dont les procédés de combustion, et de transformations physico-chimiques dans l'atmosphère. Elles constituent un risque avéré pour la santé (ANSES, 2019), en particulier car elles pénètrent plus profondément dans l'organisme du fait de leur extrême petite taille. 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) 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 (ANSES, 2018), tout comme l'Organisation Mondiale de la Santé dans ses *Nouvelles lignes directrices mondiales sur la qualité de l'air* (OMS, 2021), et la nouvelle *Directive du Parlement Européen et du Conseil concernant la Qualité de l'air Ambiant et un air pur pour l'Europe* (Conseil de l'Union européenne, 2024).

Si l'impact sanitaire de ces polluants est reconnu, à ce stade aucune valeur limite réglementaire ni recommandation de l'OMS n'a encore été établie, du fait de la nécessité d'obtenir davantage de mesures long-terme dans des environnements variés.

Cette étude parisienne sur la variabilité des particules ultrafines (PUF) vise à fournir des niveaux en nombre de particules par classe granulométrique en **différents points de la capitale en situation de proximité au trafic routier ou en situation urbaine de fond**, sur deux périodes de l'année en complément des résultats de la surveillance permanente sur le site de fond d'Airparif situé dans le jardin des Halles, qui ont fait l'objet d'une étude pluri-annuelle (Abbou, 2024).

La première campagne de mesure, réalisée à l'hiver-printemps 2022, a fait l'objet d'un premier rapport fournissant les enseignements concernant la **variabilité des PUF en période hivernale et printanière en 2022** à Paris (Airparif, Décembre 2023), ainsi que sur les sources émettrices de PUF, en particulier le chauffage au bois, en croisant les résultats avec des mesures du carbone suie (permettant d'identifier la combustion de biomasse). De plus, cette première campagne a fourni une première comparaison des niveaux observés à Paris avec ceux d'autres métropoles européennes et nord-américaine (Montréal, Canada).

La seconde campagne de mesure, menée pendant l'été 2023, objet de ce rapport, présente les résultats concernant la **variabilité des PUF en période estivale**, et explore l'exploitation de données trafic afin d'affiner les facteurs d'influence associés au trafic routier, une des sources chroniques de PUF. Les données trafic ont été recueillies sur le site du boulevard Haussmann dans le cadre d'une expérimentation Airlab, le laboratoire d'innovation ouverte d'Airparif et ses partenaires. Cette

deuxième campagne enrichit également la comparaison des niveaux de PUF mesurés à Paris par rapport à d'autres métropoles européennes, avec l'analyse comparative en période estivale.

Une **synthèse des enseignements sur la variabilité de niveaux de PUF, leurs sources d'émissions et la comparaison à d'autres métropoles issus des deux campagnes de mesure** est également présentée dans ce rapport.

Cette étude des PUF renforcée sur Paris est financée par Breathe Cities, dans le cadre d'un partenariat avec la Ville de Paris.

PARTIE A

CAMPAGNE ESTIVALE : Mesures du 17 juillet au 15 septembre 2023

1. DESCRIPTION DE LA CAMPAGNE ESTIVALE

Cette première partie présente les sites de mesure retenus pour la campagne, les polluants mesurés, et le matériel de mesure associé. La campagne de mesure estivale s'est déroulée du **17 juillet au 15 septembre 2023**.

1.1. Les sites de mesure

Afin de documenter la variabilité spatiale des niveaux, des sites ont été instrumentés à Paris à la fois en situation de fond et à proximité du trafic routier (site « trafic »).

La **typologie « fond »** désigne des points de mesure qui ne sont pas sous l'influence directe d'une source de pollution 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).

La **typologie « trafic »** désigne des points de mesure, situés à moins de 10 m des voies de circulation, qui sont sous l'influence directe du trafic routier. 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 résidant près d'une infrastructure routière sont susceptibles d'être exposés de façon chronique.

4 points de mesure ont été installés, en complément du site de référence de fond parisien : 2 points de mesure en situation de fond urbain, afin d'évaluer les niveaux de particules ultrafines (PUF) dans des zones en dehors de l'influence directe de sources de pollution identifiées, ainsi que 2 points en proximité au trafic routier, afin d'améliorer les connaissances sur cette source de pollution aux niveaux de particules ultrafines.

Sites de proximité au trafic routier (trafic)

Les mesures des polluants atmosphériques à proximité du trafic routier ont été réalisées sur deux sites du réseau permanent d'Airparif :

- ✓ Boulevard Périphérique Est (75) – noté « BPE »
- ✓ Boulevard Haussmann (75) – noté « HAUS »

Ces sites proches d'axes routiers présentent des caractéristiques différentes en termes de configuration (nombre de voie, bâti environnant, ..., de trafic, de vitesse de circulation et de composition du parc roulant).

Boulevard Périphérique Est (75) :

Le site de mesure « trafic urbain » **BPE** est implanté à proximité immédiate du Boulevard Périphérique Est qui est composé de 2 fois 4 voies de circulation. Le site est au droit du centre sportif Alain Mimoun, la largeur totale de l'axe y est d'environ 32 m (voir Figure 1).

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 1 : 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 « rue canyon » avec une largeur d'environ 30 m et un bâti environnant d'une hauteur moyenne de 20 m. En effet, une rue peut être classifiée en « rue canyon » à partir d'un ratio hauteur/largeur supérieur à 0.5. La hauteur des bâtiments et la largeur du boulevard donnent un ratio hauteur/largeur de 0.67.

Le boulevard est en sens unique de circulation de l'Est vers l'Ouest (voir Figure 2). 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 (voie la plus éloignée de la station, voir Figure 3) 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.

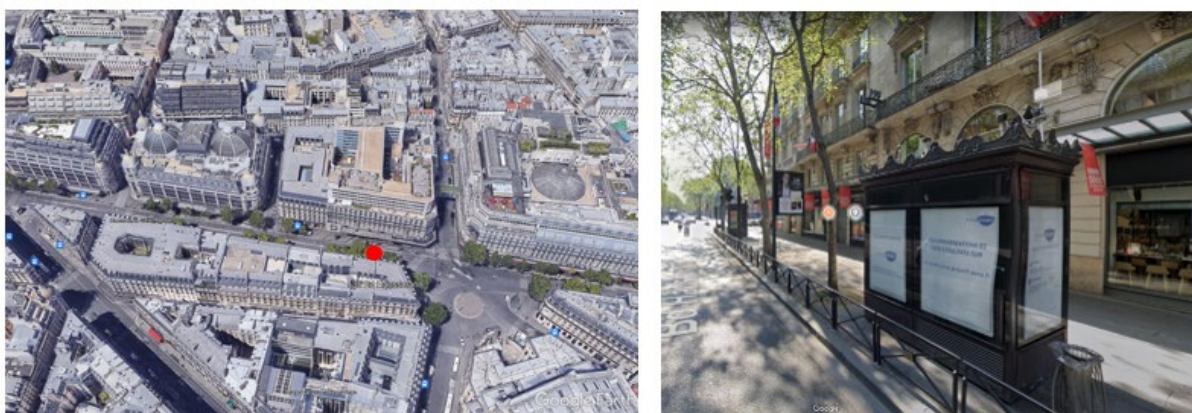


Figure 2 : A gauche vue Sud-Nord (source Google Earth) ; à droite vue de la station HAUS (source Google Earth) – le point rouge localise la station HAUS



Figure 3 : 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 du trafic routier

Le site du boulevard Haussmann a également été choisi comme site pour l'installation d'une caméra d'acquisition de données relatives au trafic routier dans le cadre d'une expérimentation AIRLAB, le laboratoire d'innovation d'Airparif, incluse dans l'étude. L'objectif de cette expérimentation était de pouvoir affiner les facteurs influençant les émissions de particules ultrafines au sein de la source trafic routier. L'acquisition des données caméra a été réalisée en collaboration avec la société LOGIROAD, et les données fournies à Airparif comprennent pour chaque type de véhicules (véhicule léger, véhicule utilitaire léger, deux-roues motorisé, poids lourd, bus ou car, vélo), le nombre de véhicules ainsi que leur vitesse moyenne de circulation au sein de la zone.

Les photographies en Figure 4 présentent l'installation de la caméra sur l'armoire implantée au niveau du site du Boulevard Haussmann.



Figure 4 : A gauche, armoire mise en place pour la campagne de mesure des données PUF (se situant à droite de la station HAUS) ; à droite, le dispositif caméra implanté en hauteur au dessus de l'armoire.

Sites de fond urbain

Les mesures des polluants atmosphériques en situation de fond urbain ont été réalisées sur deux sites du réseau permanent d'Airparif :

- ✓ Paris 1^{er} Les Halles (75) – noté « PA01 »
- ✓ Paris 18^{ème} (75) – noté « PA18 »

Paris 1^{er} Les Halles :

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



Figure 5 : Site PA01, à gauche vue du jardin des Halles (Source Google Earth) ; à droite vue vers le nord des points de prélèvements de la station PA01

Paris 18^{ème} :

Le site de mesure de « fond urbain » **PA18** est implanté 7 rue Ferdinand Flocon Paris 18 (analyseurs installés sur une terrasse), la hauteur de prélèvement des polluants est de 15.4 m, hauteur conforme aux recommandations réglementaires.



Figure 6 : Site PA18, rue Ferdinand Flocon (Source Google Earth) ; à droite vue vers l'Ouest des points de prélèvements de la station PA18

Synthèse des sites instrumentés

Les sites de mesure de l'étude sont résumés dans le Tableau 1 et sur la Figure 7.

Nom du site	Lieu	Code station	Type de station
Paris 1 ^{er}	Jardin des Halles	PA01	Fond Urbain
Paris 18 ^{ème}	7 rue Ferdinand Flocon	PA18	Fond Urbain
Boulevard Haussmann	35 boulevard Haussmann	HAUS	Trafic Urbain
Boulevard Périphérique Est	Rue Edouard Lartet	BPE	Trafic Urbain

Tableau 1 : Code et localisation des sites de l'étude

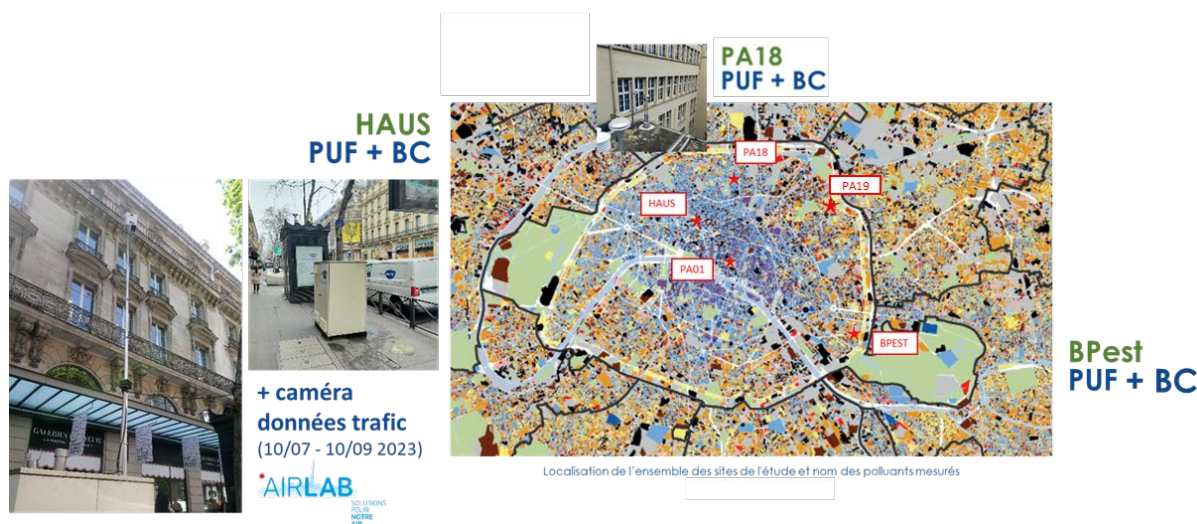


Figure 7 : Localisation de l'ensemble des sites de mesure de la campagne estivale du 17 juillet au 15 septembre 2023, nom des polluants mesurés, et localisation de la caméra d'acquisition de données relatives au trafic routier

Le site Paris 19^{ème}, instrumenté spécifiquement lors de la campagne hivernale-printanière (Airparif, Décembre 2023) afin de mesurer l'impact du chauffage au bois en période hivernale à différents endroits au sein de Paris, n'a pas été instrumenté pour la campagne estivale.

1.2. Polluants mesurés

Les mesures ont porté sur les **particules ultrafines (PUF) c'est-à-dire les particules dont le diamètre est inférieur à 100 nm**. Des précisions sur les PUF et leur impact sur la santé sont apportées en Annexe I : Les polluants mesurés. Afin de faciliter les travaux sur l'origine de ces particules, des **mesures de carbone suie** ont également été réalisées (voir détails sur ce polluant en Annexe I : Les polluants mesurés).

Les techniques de mesure utilisées sont les suivantes :

- Pour les particules les plus fines, la mesure en concentration en nombre de particules (nombre par unité de volume) est privilégiée face à la mesure en concentration en masse (unité de masse par unité de volume). En effet, de par leur petite taille, ces particules représentent peu en masse, mais beaucoup en nombre. **Le comptage des particules en nombre est réalisé par classe granulométrique avec un spectromètre granulomètre à mobilité électrique, type SMPS** « Scanning Mobility Particle Sizer », composé d'un DEMC (« Differential Electrical Mobility Classifier »), qui sélectionne les particules suivant leur taille granulométrique (121 classes de tailles allant de 5 nm à 100 nm dans cette étude) en fonction de leur mobilité électrique, 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.

Pour la campagne de mesure, l'analyseur a été configuré pour le comptage de particules sur 121 classes, d'un diamètre allant de 5 à 400 nm, afin de mesurer les particules les plus fines (dès 5 nm de diamètre) et couvrir largement la gamme des particules ultrafines.

Pour plus de détails, se reporter à l'Annexe II : Métrologie.

- La mesure massique du **Carbone Suie (eBC, équivalent Black Carbon)** est réalisée par un aethalomètre multi longueurs d'ondes qui, de par son principe de fonctionnement, permet de faire la distinction entre les particules carbonées issues de la combustion d'hydrocarbures (eBCff) et celles issues de la combustion de biomasse (eBCwb). Cette

mesure est réalisée dans la fraction des particules PM_{2.5}. Pour plus de détails, se reporter à l'Annexe II : Métrologie.

Dans ce volet de mesures sur la période estivale, un focus est réalisé sur le carbone suie issue de la combustion d'hydrocarbures étant donné la faible contribution de la fraction issue de la combustion de biomasse pour cette période de l'année.

Le Tableau 2 présente pour chaque site, les polluants mesurés et appareil de mesure associé.

Station	Comptage total de particules (5 – 400 nm)	eBC
	Dont PUF (5 – 100 nm)	(dans les PM _{2.5})
PA01	U-SMPS	AE33
PA18	U-SMPS	/
HAUS	U-SMPS	AE33
BPE	U-SMPS	AE33

Tableau 2 : Détail des appareils et polluants mesurés par site de mesure

De plus, les mesures des polluants réglementés (PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂) sont également disponibles pour l'ensemble des sites de mesure.

1.3. Période de mesure

La campagne de mesure estivale s'est déroulée du **17 juillet au 15 septembre 2024**.

Le taux de disponibilité des données sur la période de l'étude est satisfaisant, il est détaillé pour chaque polluant dans le Tableau 3.

Station	Comptage de particules	eBC	PM ₁₀	PM _{2.5}	NO ₂
	(5 – 400 nm)	(dans les PM _{2.5})			
PA01	100 %	90 %	49 % *	99 %	99 %
PA18	81 % *	/	65 % *	42 % *	67 % *
HAUS	97 %	97 %	98 %	96 %	86 %
BPE	76 % *	94 %	99 %	93 %	86 %

Tableau 3 : Taux de disponibilité des données (en %) sur la période de la campagne du 17 juillet au 15 septembre 2023. Le taux de disponibilité moindre pour certaines stations ou polluants (*) est dû à des pannes d'appareil ou coupures électriques.

Les appareils installés sur les stations PA18 et BPE n'ont pas pu fonctionner sur l'ensemble de la période de campagne de mesure du fait de coupure électrique sur la station PA18 du 17 juillet au 28 juillet 2023 et de dysfonctionnement de l'appareil SMPS permettant le comptage des particules sur la station BPE du 1^{er} au 10 septembre 2023.

Les périodes de mesure des données de comptage de particules sur la gamme 5-400 nm sont représentées dans la Figure 8.

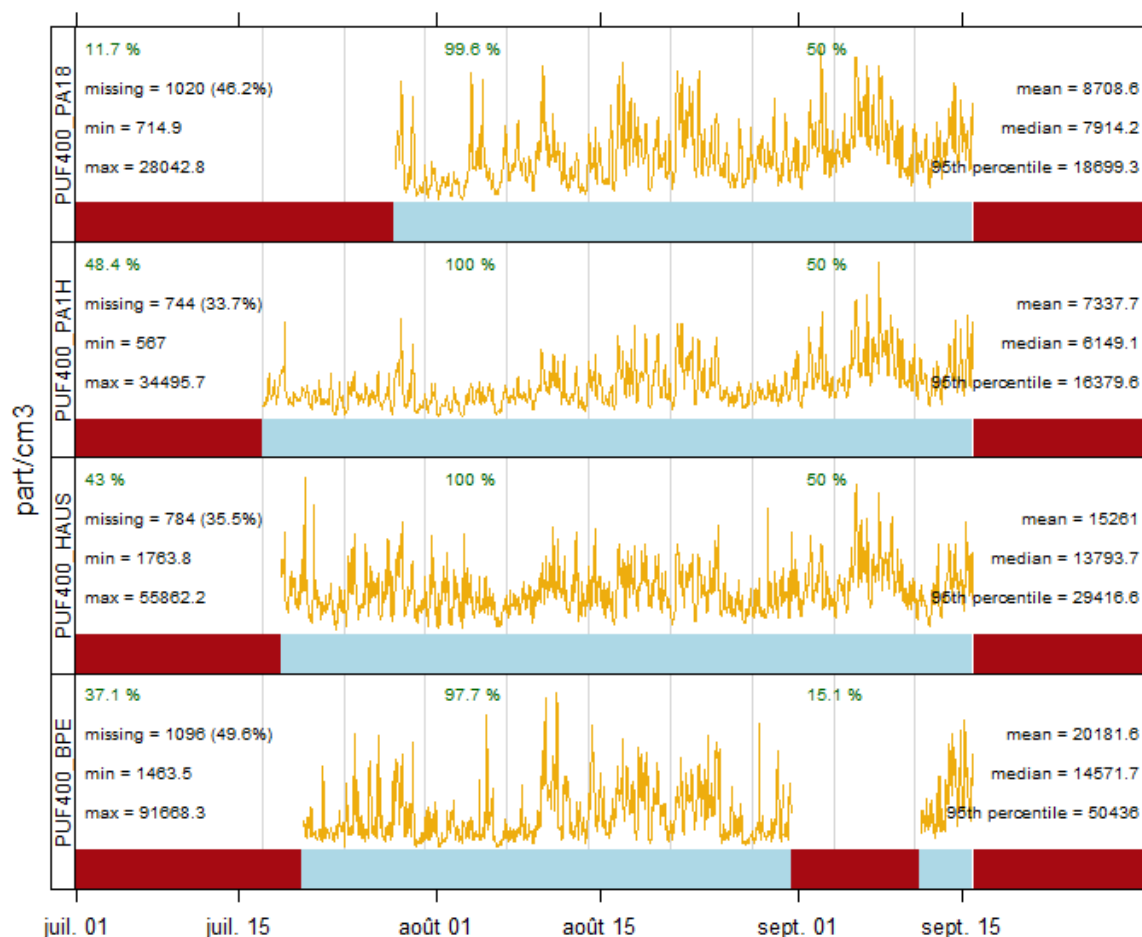


Figure 8 : Séries temporelles des mesures de comptage de particules sur la gamme 5-400 nm par site de mesure durant la campagne du 17 juillet au 15 septembre 2023.

Les conditions météorologiques observées durant la campagne de mesure ainsi que leur impact sur les conditions générales de pollution de l'air (indice de qualité de l'air, épisode de pollution, ...) sont précisées dans les paragraphes suivants. Elles 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. La température, l'ensoleillement et les précipitations influencent également les niveaux de pollution. La provenance des vents et leur intensité permettent d'identifier les zones sous l'influence de sources spécifiques.

2.3.1. Météorologie

L'analyse des conditions météorologiques s'appuie sur les observations de Météo-France et ses mesures sur la station de référence située à Montsouris (Paris 14^{ième}).

Globalement, l'été 2023 est placé au 4^{ème} rang des plus chauds en France depuis 1990. En moyenne sur l'été, les températures ont été plus de 1 °C au-dessus des normales sur l'ensemble des régions (+1.2 °C en Ile-de-France).

En effet, cet été a été marqué par deux périodes avec des températures moyennes horaires dépassant les 30 °C, pour la région Ile-de-France :

- du 18 au 23 août, correspondant à la vague de chaleur tardive la plus longue à l'échelle du pays et la plus intense en France, bien que les maxima relevés en Ile-de-France étaient inférieurs aux records pour la région.
- du 2 au 10 septembre, correspondant à un épisode de chaleur exceptionnel en France, et particulièrement pour la région Ile-de-France.

Au cœur de l'été, la région Ile-de-France, comme le reste de l'Hexagone, a connu des précipitations de mi-juillet à début août, du fait de la dépression Patricia qui a traversé les îles Britanniques et la France. La station Montsouris a mesuré un maxima de 51,5 mm en cumulé sur la journée du 28 juillet, ce qui représente près du tiers des quantités de précipitations mesurées sur la période la campagne de mesure (160,2 mm en cumulé sur la période). L'anomalie de précipitations de l'été 2023 par rapport aux normales de saison est de +20 % à l'échelle de la région.

2.3.2. Roses des vents (secteurs de vents)

La Figure 9 présente pour la campagne de mesures et pour la période de 2010 à 2020 (Mois de Juillet à Septembre), 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 inférieures à 2 m/s), en orangé les vents modérés (vitesses entre 2 et 4 m/s) et en jaune les vents les plus dispersifs (vitesses 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, et donc l'influence sur une partie de la zone d'étude.

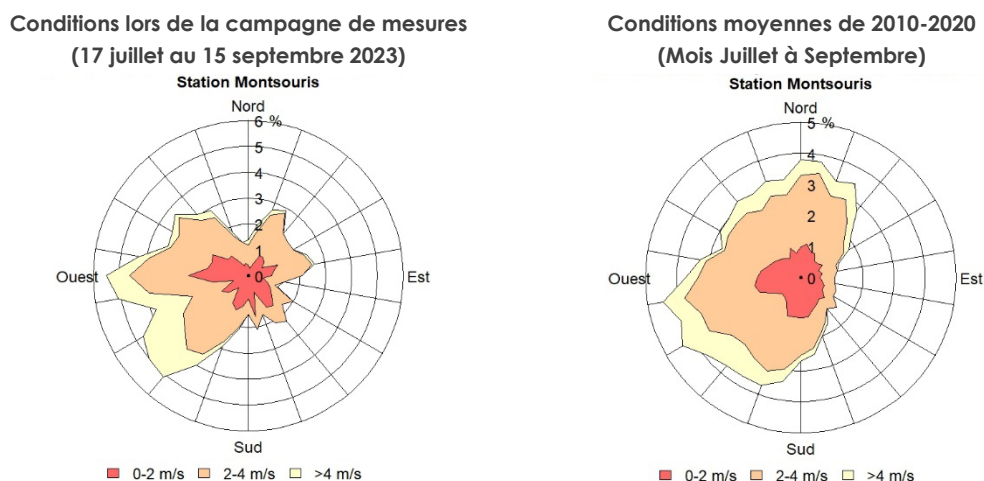


Figure 9 : Fréquence (en %) et secteurs de vents observés à la station Montsouris (Paris 14^{ième})
Source : Météo France

Durant la campagne de mesure, les vents provenaient majoritairement des secteurs Ouest et Sud-Ouest, associés à des arrivées de masses d'air généralement peu polluées. Ces secteurs de vent sont globalement comparables à ceux observés en moyenne en période estivale sur plusieurs années, avec néanmoins une sous-représentation du secteur Nord. De plus, les conditions étaient essentiellement dispersives, avec des vitesses de vent majoritairement pouvant aller jusqu'à 4 m/s, comme cela est le cas pour des conditions estivales moyennes mesurées sur plusieurs années.

La période de la campagne était donc globalement aussi dispersive que sur la période de référence 2010-2020, avec des vents majoritairement des secteurs Ouest et Sud-Ouest et une sous-représentation du secteur de vent Nord.

2.3.3. Qualité de l'air durant la période de la campagne

Ces conditions météorologiques ont engendré globalement sur la période de la campagne une qualité de l'air avec des indices allant de « moyen » jusqu'au qualificatif « mauvais », pour sept journées, le 18 juillet et du 5 au 10 septembre 2023, en raison des niveaux d'ozone soutenus favorisés par des températures élevées et de l'ensoleillement, résultant à trois jours de dépassement du seuil d'information et de recommandations pour l'ozone (180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne horaire) lors des

journées du 6 au 8 septembre 2023. La campagne réalisée du 17 juillet au 15 septembre a été représentative de conditions estivales habituelles sur la région.

Lors de cette période, il n'y a pas eu d'épisode pour les particules PM_{10} , pour lesquels les épisodes pour ce polluant surviennent davantage en période hivernale.

2. Caractérisation des Particules ultrafines en période estivale

Cette partie présente les données de comptage de particules sur la gamme de taille allant de 5 à 400 nm (incluant la gamme des particules ultrafines, inférieures à 100 nm) mesurées sur la période du 17 juillet au 15 septembre 2023 aux différents sites présentés précédemment.

2.1. Hiérarchisation du nombre de PUF

Le Tableau 4 présente les concentrations en nombre de particules ultrafines (PUF) et en nombre total de particules mesurées sur la gamme de taille de l'analyseur utilisé, allant de 5 à 400 nm lors de l'étude (du 17 juillet au 15 septembre 2023). Les concentrations en nombre sont arrondies à la centaine.

Station	Typologie	Saison	Période	Comptage de PUF (part/cm ³) 5 - 100 nm	Comptage total de particules (part/cm ³) 5 - 400 nm
PA01	Fond urbain	Eté	17 juillet au 15 sept. 2023	6 400	7 400
PA18	Fond urbain	Eté	17 juillet au 15 sept. 2023	7 900	8 700
HAUS	Trafic urbain	Eté	17 juillet au 15 sept. 2023	14 200	15 300
BPE	Trafic urbain	Eté	17 juillet au 15 sept. 2023	18 800	20 200

Tableau 4 : Concentrations moyennes en particules ultrafines (PUF) et de particules sur la gamme 5-400 nm (en nombre, arrondies à la centaine) observées lors de la campagne PUF réalisée du 17 juillet au 15 septembre 2023

Les concentrations en nombre de PUF (gamme 5 à 100 nm) relevées à proximité du trafic routier sont 2 à 3 fois plus élevées que celles observées en situation de fond sur la période de la campagne.

Les comptages moyens du nombre de PUF en situation de fond urbain observés sur les sites de Paris 1^{er} Les Halles et de Paris 18^{ième} sont proches avec des concentrations comprises entre 6 400 et 7 900 particules/cm³.

Concernant les sites à proximité du trafic routier urbain, les concentrations horaires moyennes de PUF durant la campagne ont été de 14 200 particules/cm³ sur le boulevard Haussmann et de 18 800 particules/cm³ sur le Boulevard Périphérique Est (soit 30 % de plus que sur le boulevard Haussmann).

La hiérarchie est la même en comptage total (gamme 5 à 400 nm), notamment puisque sur la période de la campagne, la part de PUF dans le nombre total de particules est de l'ordre de 90 % aussi bien sur les sites de fond que sur les sites trafic, comme le montre le Tableau 5. Ces résultats sont cohérents avec les précédentes mesures d'Airparif (Airparif, Campagne de mesure francilienne sur les particules ultrafines (PUF) - situation de fond - hiver 2020-2021, février 2022), (Airparif, 2022).

Station	Typologie	Saison	Période	% PUF (part/cm ³) 5 - 100 nm
PA01	Fond urbain	Eté	17 juillet au 15 sept. 2023	87%
PA18	Fond urbain	Eté	17 juillet au 15 sept. 2023	91%
HAUS	Trafic urbain	Eté	17 juillet au 15 sept. 2023	93%
BPE	Trafic urbain	Eté	17 juillet au 15 sept. 2023	93%

Tableau 5 : Part des concentrations de PUF (5-100 nm) au sein du comptage total sur la gamme 5-400 nm lors de la campagne PUF réalisée du 17 juillet au 15 septembre 2023.

Afin d'évaluer statistiquement si l'évolution temporelle des concentrations en nombre de PUF sur les sites mesurés sont effectivement similaires entre sites de fond urbain d'une part et sites de proximité au trafic routier d'autre part, un test de regroupement par Classification Ascendante Hiérarchique (« CAH ») a été réalisé. La « similarité » entre les différents jeux de données se base sur le coefficient de corrélation de Pearson, évaluant si les mesures de chaque paire de site ont une relation linéaire. Le résultat de la classification est représenté sous forme de dendrogramme dans la Figure 10. Les valeurs de coefficient de corrélation entre les concentrations en nombre de PUF de chaque paire de site sont données en Figure 74 (Annexe IV. Figures supplémentaires).

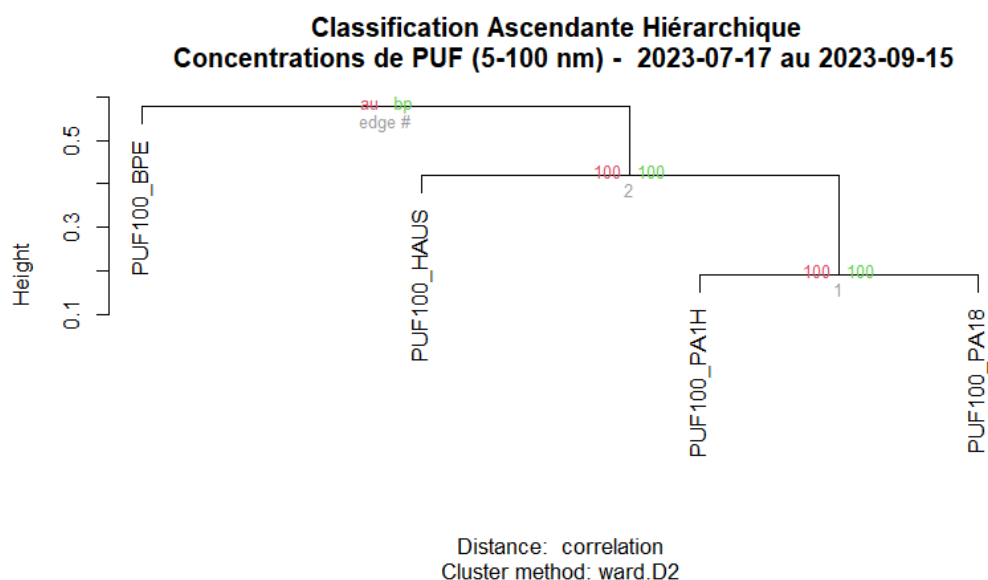


Figure 10 : Dendrogramme des concentrations en nombre de PUF des sites de fond urbain (PA01 et PA18) et de proximité au trafic routier parisien (BPE, HAUS), sur la période du 17 juillet au 15 septembre 2023.

Le **dendrogramme** est un diagramme en arborescence qui permet de regrouper de manière hiérarchique des jeux de données en fonction de leur similarité. Un test statistique est effectué sur chaque regroupement. L'hypothèse à vérifier est : « le regroupement n'existe pas ». Pour vérifier cette hypothèse, deux valeurs appelées « p-value » sont calculées : en rouge une valeur dite non-biaisée, à privilégier comparée à celle en vert. En pratique, si la p-value est > 0.95 , alors on rejette l'hypothèse. Cela veut donc dire que le regroupement existe statistiquement.

Le regroupement statistique des sites indique que l'évolution des concentrations de PUF en nombre est la plus similaire entre les deux sites de fond (PA01 et PA18). Ainsi, cela indique que les sites de fond sont globalement soumis aux mêmes sources émettrices de PUF.

D'autre part, bien que les concentrations moyennes sur la période de la campagne sont du même ordre de grandeur entre les deux sites trafic d'une part, et les sites de fond d'autre part ; le regroupement statistique des sites indique que les concentrations de PUF mesurées sur les deux sites trafic durant la campagne ont une évolution temporelle distincte. Ce résultat est différent de la classification obtenue à partir des mesures de NO_x pour ces mêmes sites. En effet, dans la Figure 11, le regroupement du site « HAUS » n'est pas significativement différent des deux autres groupes (p-value de 0.51) (PA01 et PA18 d'une part, BPE d'autre part). Cela indique que les concentrations de PUF ont bien une évolution temporelle distincte de celles d'autres polluants gazeux, marqueurs notamment du trafic routier.

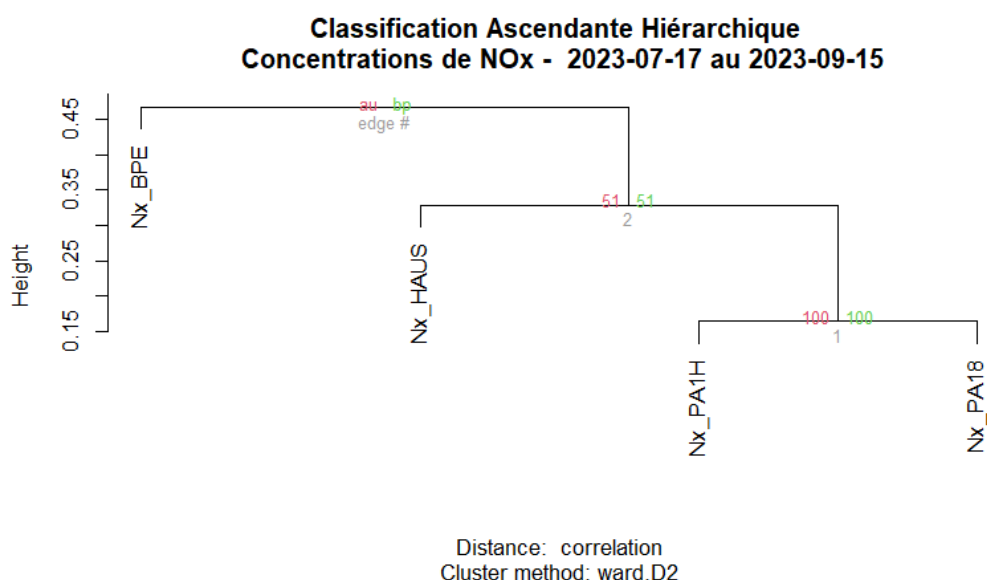


Figure 11 : Dendrogramme des concentrations massiques de NO_x des sites de fond urbain (PA01 et PA18) et de proximité au trafic routier parisien (BPE, HAUS), sur la période du 17 juillet au 15 septembre 2023.

2.2. Variabilité temporelle des PUF

2.2.1. Évolution horaire

L'évolution temporelle à l'échelle horaire de la concentration en nombre de PUF sur les 4 sites de l'étude est présentée dans la Figure 12. Les niveaux mesurés sur les sites urbains de fond PA01 et PA18, y sont représentés en orange et en violet. Les 2 sites « trafic » sont représentés en jaune (boulevard Hausmann) et en bleu (Boulevard Périphérique Est).

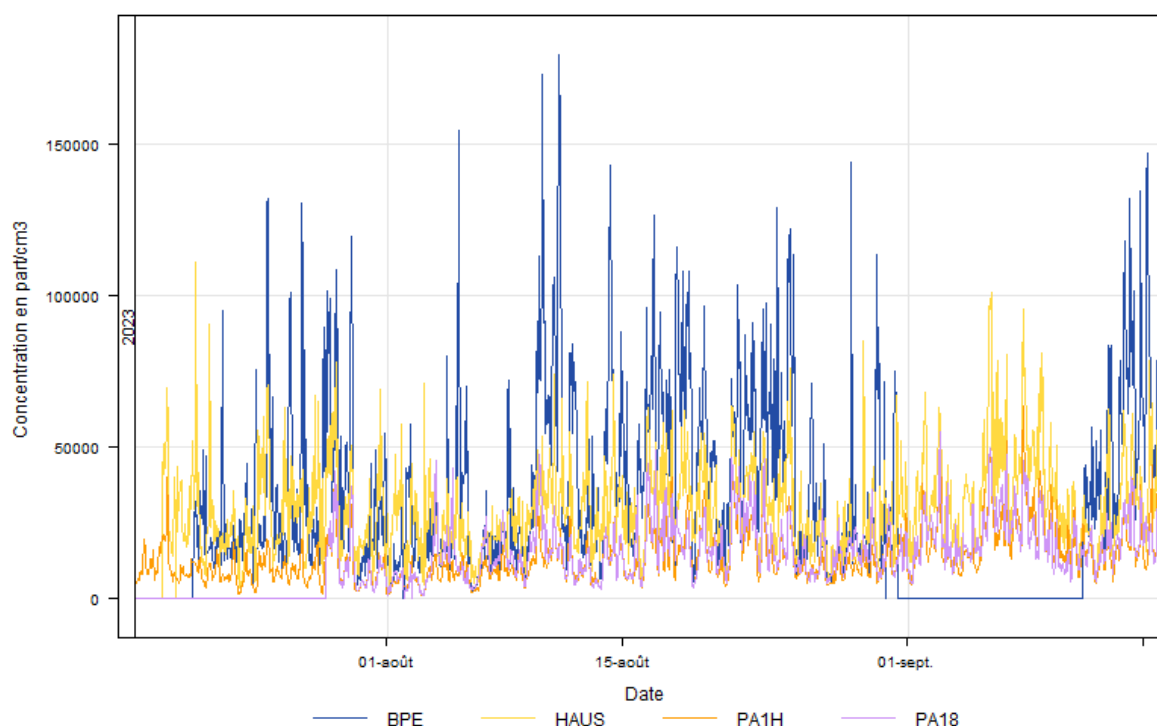


Figure 12 : Évolution temporelle du nombre moyen horaire des PUF en situation de fond (PA01, PA18) et à proximité du trafic routier (HAUS, BPE) du 17 juillet au 15 septembre 2023.

À l'échelle horaire, l'évolution temporelle de la concentration en nombre de PUF montre une forte variabilité au cours de la campagne, que ce soit en fond ou à proximité du trafic routier, en lien

avec la variabilité des émissions mais principalement en lien avec l'évolution des conditions météorologiques. Les sites de proximité au trafic routier présentent une plus forte dynamique que les sites urbains de fond, ce qui est cohérent avec les précédentes études menées par Airparif (Airparif, 2022).

La variabilité des données horaires de concentrations en nombre de PUF de chaque site de mesure est illustrée par la représentation en « boîte à moustache » dans la Figure 13 où figurent les concentrations minimale (point bleu), maximale (point rouge), moyenne (point vert), ainsi que les concentrations associées au premier quartile et troisième quartile (limites de la boîte) et à la médiane (trait horizontal au sein de la boîte).

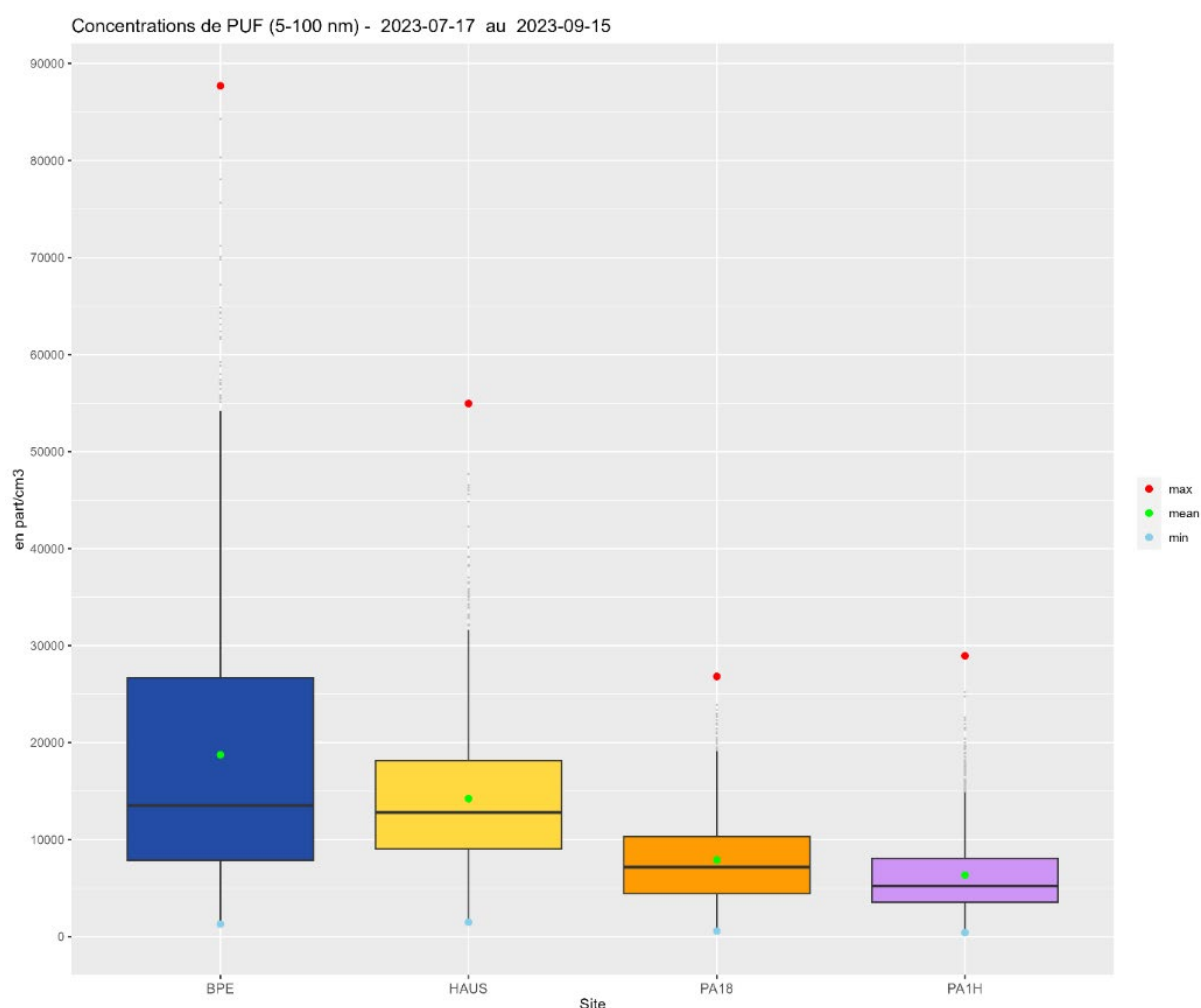


Figure 13 : Variabilité des concentrations horaires en PUF du 17 juillet au 15 septembre 2023, représentées sous forme de boîte à moustaches

Une **boîte à moustaches** est un graphique représentant la répartition d'une série statistique. 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, appelé plus couramment la médiane, est la valeur pour laquelle 50 % des données ont une valeur associée qui lui est inférieure, et 50 % des données ont une valeur associée qui lui est supérieure. La « boîte » représente 50 % des données dont la valeur se situe entre le 2^{ème} et 3^{ème} quartiles (par exemple, pour le site PA01 en orange, 50 % des données horaires ont une valeur comprise en 6 100 et 12 600 particules/cm³ – valeurs arrondies à la centaine). Le trait noir au sein de la boîte représente la valeur médiane et le point vert représente la valeur moyenne (la valeur indiquée dans le Tableau 4 pour chaque site est arrondie à la centaine).

Les moustaches réparties de chaque côté de la boîte (traits noir) représentent les valeurs extrêmes à partir desquelles les données sont associées à des valeurs atypiques par rapport à la série de

données. Ces données atypiques sont représentées par des cercles noirs en dehors des « moustaches ». Les valeurs minimales et maximales de la série statistique (point bleu et rouge) ne sont donc pas forcément représentatives de l'échantillon.

La Figure 13 illustre, d'une part, les niveaux plus forts en valeur moyenne et médiane sur les sites à proximité du trafic routier (HAUS et BPE) que sur les sites de fond (PA01 et PA18) et confirme, d'autre part, une variabilité des données horaires plus importante sur les sites trafic, et en particulier sur le site BPE. Les valeurs extrêmes, situées en dehors des « moustaches », observées sur les sites trafic peuvent atteindre presque 90 000 particules/cm³ pour le site de BPE, alors que celles des sites de fond ne dépassent pas 30 000 particules/cm³ en moyenne horaire.

Les 2 sites « trafic » enregistrent des niveaux plus importants avec une forte variabilité que sur les sites de fond, du fait de la contribution directe des émissions du trafic routier à proximité immédiate de l'axe.

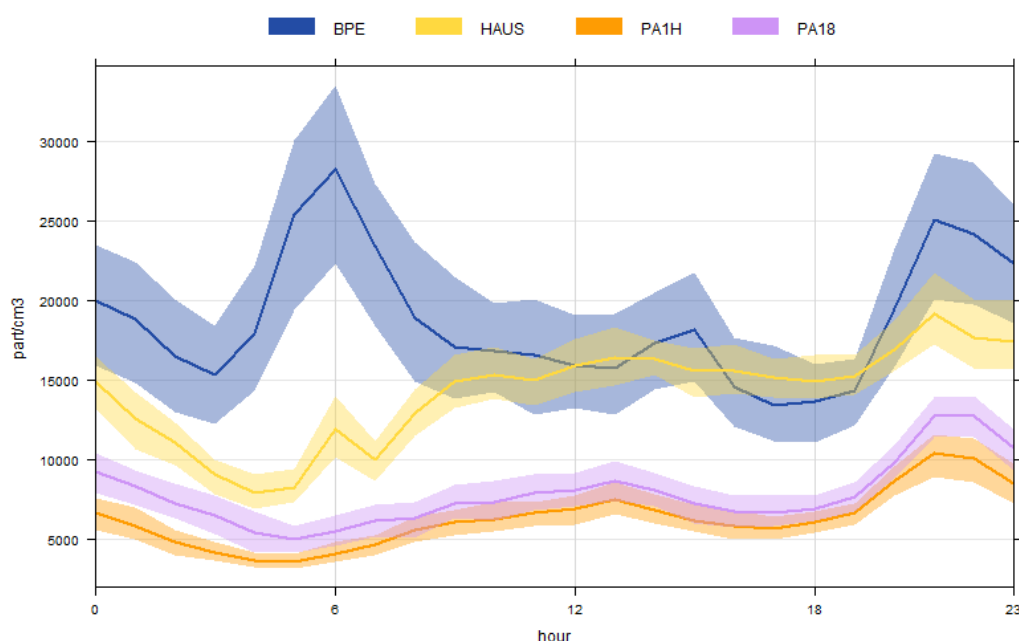
Ces résultats montrent que le trafic routier est une des sources de particules ultrafines à l'échelle locale, et que sa contribution peut faire augmenter ponctuellement très fortement les concentrations en nombre à proximité des axes de circulation.

2.2.2. Profil journalier moyen

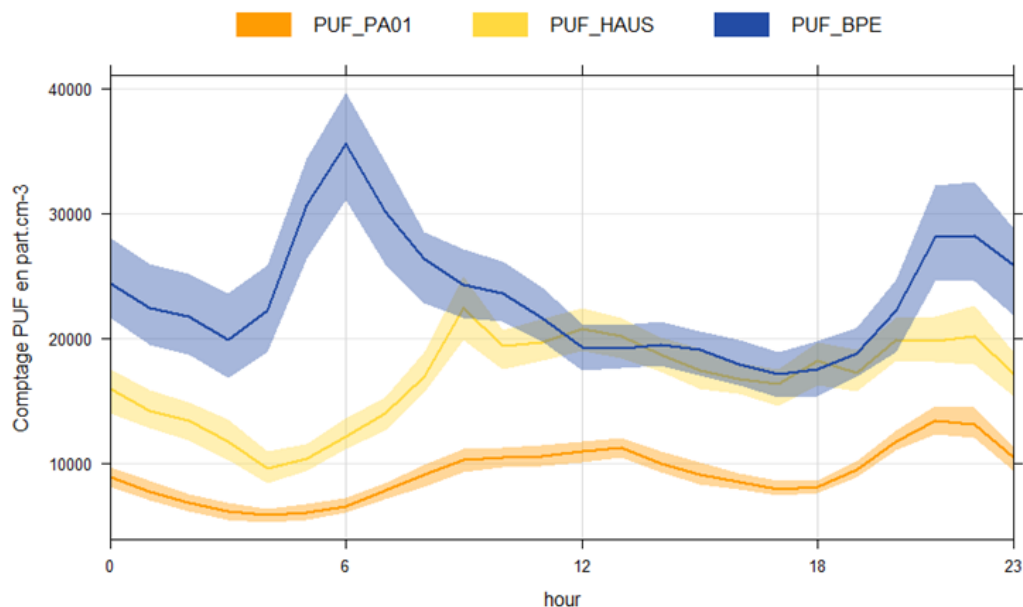
L'étude des profils journaliers moyens permet de caractériser le comportement général des polluants au cours de la journée.

La Figure 14 présente l'évolution du nombre de PUF au cours de la journée, en moyenne sur la campagne, sur les 4 sites d'étude de la campagne parisienne de l'été 2023 (PA01, PA18, HAUS et BPE) et sur le graphique du bas celle du nombre de PUF observé sur les sites d'étude de la campagne francilienne de l'été 2021 (PA01, HAUS et BPE) (Airparif, 2022).

L'enveloppe de couleur représente l'intervalle de confiance à 95 % (c'est-à-dire que 95 % des données horaires observées sur la période de campagne sont incluses dans cet intervalle), afin d'illustrer la variabilité des données moyennes horaires.



(a) Campagne Parisienne Fond/Trafic – Été 2023 (17 juillet – 15 septembre 2023)



(b) Campagne Francilienne Trafic – Été 2021 (14 juin – 19 septembre 2021)

Figure 14 : Profil moyen journalier de la concentration en nombre de PUF lors de la campagne PUF parisienne réalisée du 17 juillet au 15 septembre 2023 (a) et lors de la campagne PUF francilienne réalisée du 14 juin au 19 septembre 2021 (b)

Le profil moyen journalier indique une augmentation des concentrations en nombre de PUF en matinée et le soir, soit « deux bosses » observées sur l'ensemble des sites :

- L'augmentation des concentrations de PUF en matinée est observée en premier sur le Boulevard Périphérique (pic à 6h), puis ensuite au sein de Paris intra-muros comme cela est visible sur le site du boulevard Haussmann (premier pic à 6h du matin, mais maximum observé à 13h)
- Les niveaux baissent ensuite légèrement pour se stabiliser en cours de journée et se réintensifient en fin de journée après 18h.

Ce profil à deux bosses est caractéristique de l'impact du trafic routier, et l'évolution temporelle différente des concentrations en nombre de PUF entre le site du Boulevard Périphérique et le site boulevard Haussmann s'explique par l'évolution du trafic, différente pour le Boulevard Périphérique et les axes de Paris Intra muros (Figure 15).

De plus, les concentrations moyennes en nombre de PUF entre 0h-4h du matin sur le site trafic HAUS (représentées en jaune), se rapprochent du niveau de fond observé à PA01 et PA18 (en orange et en violet respectivement). Cette observation peut s'expliquer par le très faible trafic sur cet axe routier sur cette partie de la nuit, comme pour les autres axes de Paris Intra muros (Figure 15).

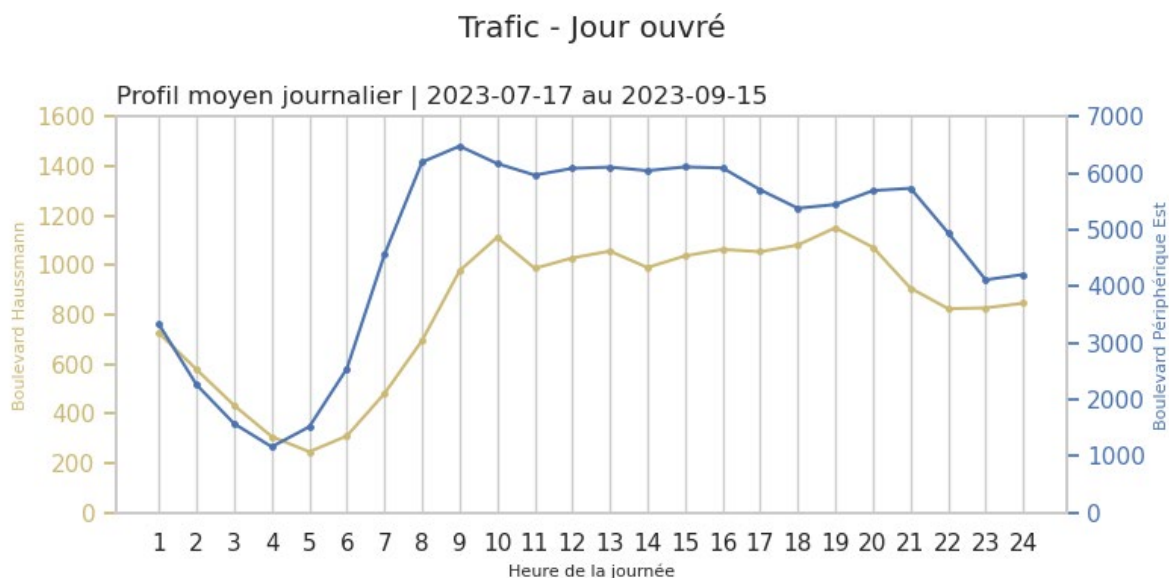


Figure 15 : Evolution moyenne horaire du trafic routier sur le boulevard Haussmann et sur le Boulevard Périphérique pour un jour ouvré moyen sur la période du 17 juillet au 15 septembre 2023

Ces observations sont globalement cohérentes avec celles faites sur les concentrations en nombre de PUF mesurées lors de la campagne francilienne lors de l'été 2021 (Figure 14 (b)). Il est néanmoins observé que les concentrations en nombre de PUF liées à la pointe de trafic du matin (à 10h pour la Figure 14 (b)) sont moins fortes lors de l'été 2023 par rapport à celles de l'été 2021. L'analyse des données en volume de trafic pour un jour ouvré moyen (Source : Boucles de comptage de la Ville de Paris) indique une amplitude de véhicules en plus lors de la pointe du matin par rapport au reste de la journée qui est plus faible lors de l'été 2023 (Figure 15) que lors de l'été 2021 (Figure 16). Il est par ailleurs observé une forte diminution du volume de trafic sur le Boulevard Haussmann entre les deux périodes, ce qui peut contribuer à des concentrations de PUF en nombre lors de la pointe du matin plus faibles lors de l'été 2023.

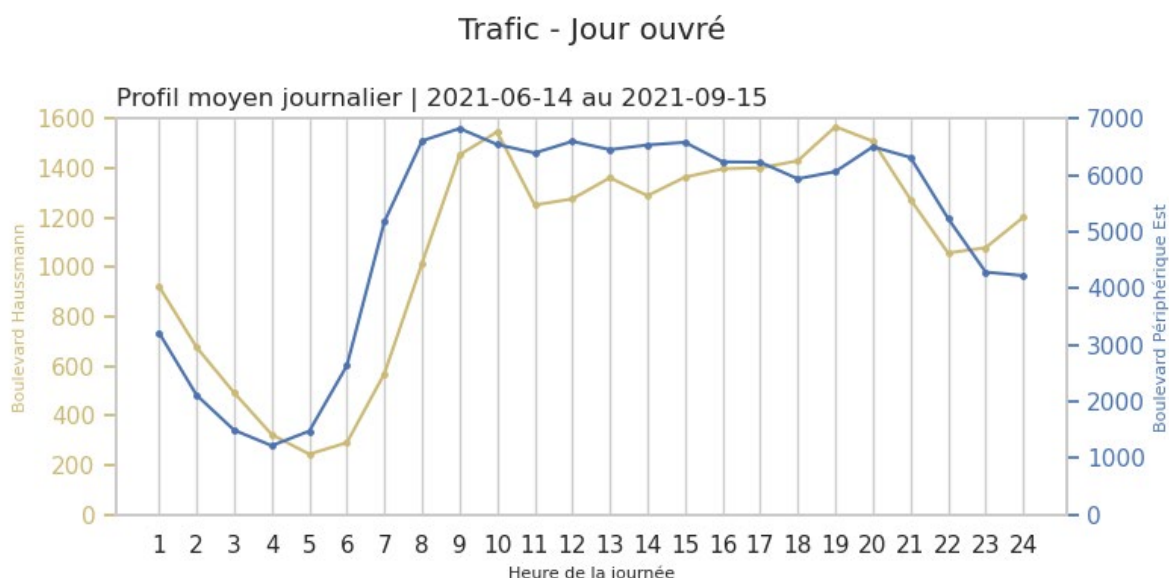


Figure 16 : Evolution moyenne horaire du trafic routier sur le boulevard Haussmann et sur le Boulevard Périphérique pour un jour ouvré moyen sur la période du 14 juin au 15 septembre 2021

Lors de la campagne estivale parisienne 2023, les sites de fond urbain PA01 et PA18 présentent des profils moyens journaliers similaires à ceux observés pendant la campagne estivale francilienne de 2021. Les évolutions journalières des concentrations en nombre de particules ultrafines à proximité

du trafic routier sont différentes entre les sites HAUS et BPE, mais sont respectivement globalement similaires à celles observées pour une période estivale.

2.3. 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 de tailles qui permet de bâtir les profils granulométriques expérimentaux à fine échelle sur chacun des sites. Le graphique de « profil granulométrique » représente les données de comptage de chaque classe de taille de particules (exprimées en particules/cm³) en fonction du diamètre de la particule (exprimé en nm, en échelle logarithmique). L'analyse du profil granulométrique permet d'identifier s'il existe un diamètre, aussi appelé « mode », ou une gamme de taille de particules qui serait davantage représentée au sein du comptage total, et caractériser les sources potentiellement à l'origine de ces particules.

Le **mode** est le diamètre correspondant au plus grand nombre de particules pour une population de particules.

Le **mode majeur** est le diamètre ayant le plus grand nombre de particules de la population.

Le **mode médian** est le diamètre correspondant à la valeur médiane de concentration en cumulé du nombre de ces particules.

Le **mode moyen** est le diamètre pondéré par les concentrations en nombre de particules relevées à chaque diamètre.

2.3.1. Mode majeur

La Figure 17 illustre les profils granulométriques moyens obtenus pour les quatre sites d'étude sur l'ensemble de la campagne. Le diamètre de particule associé au plus grand nombre de particules sur le profil granulométrique est appelé « mode majeur ». Il est identifié par des pointillés verts sur la Figure 17 pour chaque site.

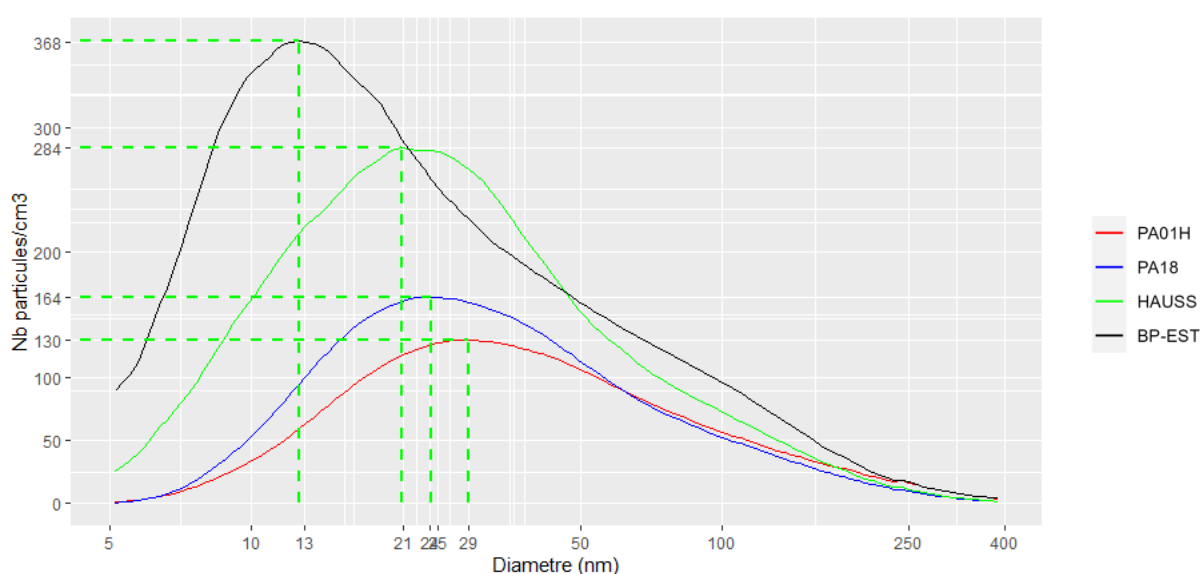


Figure 17 : Distribution granulométrique moyenne sur les 2 sites trafic (BPE en noir, HAUS en vert) et les 2 sites de fond (PA01 en rouge et PA18 en bleu) à Paris (17 juillet au 15 septembre 2023)

Le Tableau 6 synthétise le mode majeur associé à chacun des sites lors de la campagne d'étude du 17 juillet au 15 septembre 2023 (extrait de la Figure 17) et celui observé lors de la campagne francilienne réalisée durant l'été 2021 (Airparif, 2022).

Mode majeur (en nm)			
Station	Typologie	Été 2023	Été 2021
PA01	Urbain de fond	29	22
PA18	Urbain de fond	23	-
HAUS	Urbain Trafic	21	26
BPE	Urbain Trafic	13	14

Tableau 6 : Synthèse du mode majeur de chaque site de mesure lors de la campagne été 2023 et lors de celle de l'été 2021

Pour chaque site, le mode majeur observé durant la campagne parisienne de l'été 2023 est inférieur à 30 nm, voire inférieur à 20 nm pour le site trafic BPE. Ce résultat est conforme aux résultats des précédentes campagnes menées par Airparif, notamment celle menée à l'échelle francilienne durant l'été 2021 (Airparif, 2022). Le mode majeur pour le site BPE est caractéristique d'une source trafic routier et du mode appelé « Nucléation », indiquant qu'une part majoritaire de particules est « fraîchement » émise. Les autres sites, ont un mode majeur supérieur, compris entre 20 et 50 nm, correspondant au mode granulométrique suivant appelé « Aitken 1 », indiquant qu'une part majoritaire des particules sont issues du grossissement des particules issues du mode nucléation par condensation ou coagulation (cf. Annexe III : Formation et distribution granulométrique des aérosols).

2.3.2. Mode médian et moyen, incertitudes de mesure

Le mode majeur est une métrique permettant de caractériser de manière simple le diamètre de la population majoritaire des particules. Les modes médian et moyen permettent d'affiner la description de la distribution granulométrique, et les valeurs pour les 4 sites de mesure sont présentées dans le Tableau 7.

Diamètre (en nm)				
Station	Typologie	Modal (mode majeur)	Médian	Moyen
PA01	Urbain de fond	29	36	54
PA18	Urbain de fond	24	30	45
HAUS	Urbain Trafic	21	24	37
BPE	Urbain Trafic	13	19	35

Tableau 7 : Synthèse du mode majeur, diamètre médian et diamètre moyen pour chaque site de mesure lors de la campagne été 2023 [mesures du 17 juillet 2023 au 15 septembre 2023]

De manière analogue à la variabilité des concentrations de particules ultrafines mesurées sur chaque site de mesure, la valeur du mode majeur, moyen et médian présente également une variabilité, du fait de l'incertitude de mesure de l'appareil. Les incertitudes correspondent aux écart-types de reproductibilité réalisés par Airparif en amont de la campagne de mesures estivale, suivant la norme CEN TS 17660. Elle est quantifiée dans le Tableau 8.

Incertitude de mesure sur le diamètre (en nm)				
Station	Typologie	Modal (mode majeur)	Médian	Moyen
PA01	Urbain de fond	[-8 ; +8]	[-1 ; +1]	[-2 ; +3]

PA18	Urbain de fond	[-7 ; +7]	[-1 ; +1]	[-2 ; +2]
HAUS	Urbain Trafic	[-6 ; +6]	[-1 ; +1]	[-1 ; +2]
BPE	Urbain Trafic	[-4 ; +3]	[-1 ; +0]	[-2 ; +1]

Tableau 8 : Incertitude associée à la mesure du diamètre modal (mode majeur), médian et moyen, pour chaque site de mesure lors de la campagne été 2023 [mesures du 17 juillet 2023 au 15 septembre 2023]

Pour les sites de proximité au trafic routier, comme pour la campagne francilienne menée à l'été 2021, le site Boulevard Périphérique Est a un mode majeur situé autour de 15 nm, tandis que celui implanté boulevard Haussmann présente un mode majeur de taille plus importante, autour de 20 nm (Tableau 6). Néanmoins, en prenant en compte l'incertitude de mesure associée à la valeur du mode majeur, cette différence n'est pas significative.

L'amplitude de concentration moyenne associée au mode majeur de chaque site entre les deux campagnes est présentée dans le Tableau 9.

Concentration moyenne de particules associée au Mode Majeur (part/cm ³)			
Station	Typologie	Été 2023	Été 2021
PA01	Urbain de fond	130	175
PA18	Urbain de fond	164	-
HAUS	Urbain Trafic	284	398
BPE	Urbain Trafic	368	475

Tableau 9 : Concentration moyenne de particules au Mode Majeur (part.cm⁻³) relevée lors des campagnes de mesures estivales - parisiennes 2023 et franciliennes 2021

Le site de fond Paris 18^{ème}, caractérisé par un mode majeur très similaire à celui du site Paris 1^{er} les Halles (Tableau 6), présente également une concentration en nombre associée à ce mode du même ordre de grandeur (Tableau 9).

Pour les sites de proximité au trafic routier, l'amplitude est environ 2 à 2.5 fois plus forte que celle du fond urbain parisien (PA01 et PA18), avec une amplitude maximale constatée sur le site du Boulevard Périphérique. Ces éléments confirment l'influence du trafic routier.

2.3.3. Variabilité temporelle des profils granulométriques

Afin de mieux comprendre le profil granulométrique obtenu sur les différents sites, il est possible de le décliner selon les heures d'une journée représentant le comportement moyen mesuré lors de la campagne de mesure. La représentation obtenue est donc l'évolution heure par heure du nombre moyen de particules selon leur diamètre (de 5 à 400 nm) mesuré sur la période d'étude.

Sites de proximité au trafic routier

La Figure 18 présente l'évolution du nombre moyen de particules sur la période d'étude au cours de la journée suivant leur diamètre (de 5 à 400 nm) sur le site boulevard Haussmann (HAUS, en haut) et sur le site Boulevard Périphérique Est (BPE, en bas). La figure se lit de gauche à droite pour suivre l'évolution au cours du temps (heure par heure) et verticalement pour la taille des particules. Le nombre moyen de particules (exprimé en particules/cm³) est représenté à l'aide d'une échelle de couleur : les faibles concentrations tendent vers le bleu et les fortes concentrations tendent vers le rouge. La même échelle de couleur est utilisée pour les deux sites.

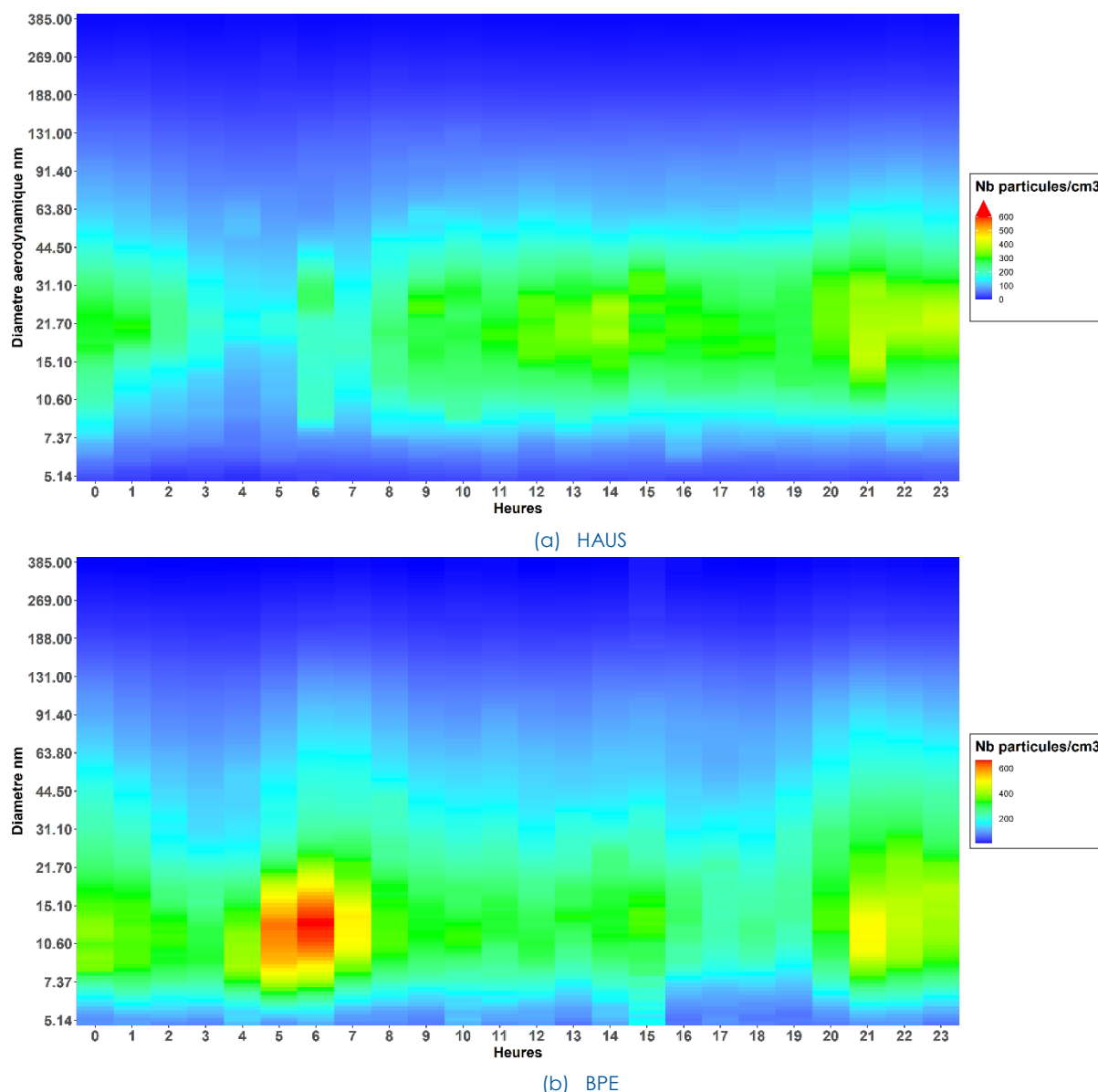


Figure 18 : Évolution journalière « 2D » du nombre de particules par diamètre pour les deux sites trafic routier (a) HAUS et (b) BPE [mesures du 17 juillet au 15 septembre 2023]

La Figure 18 confirme un décalage temporel de l'augmentation des concentrations en nombre de particules le matin entre les deux sites de trafic urbain parisien.

En effet, dans un premier temps, une augmentation des concentrations en nombre des particules dont le diamètre est de l'ordre de 10 nm (zone orangée entre 7 et 20 nm à 5h) est observée sur le site Boulevard Périphérique Est. Ce diamètre est proche du mode majeur moyen de la période (13 nm). Puis, dans un second temps, les tailles de particules les plus présentes passent d'une plage entre 7 et 20 nm à une plage légèrement plus large à 6h. Cet élargissement de la gamme de taille peut s'expliquer par la coagulation des particules entre elles et par l'augmentation du niveau de fond.

Le site boulevard Haussmann présente d'une part une augmentation des concentrations plus tard dans la matinée (entre 6h et 8h du matin, contre 5h sur le Boulevard Périphérique Est), et d'autre part une gamme de particules plus large que sur le Boulevard Périphérique Est (gamme de taille de 7 à 50 nm, contre des gammes plus fluctuantes au cours de la journée sur le Boulevard Périphérique Est).

Pour les deux sites, les concentrations en nombre lors de l'après-midi se stabilisent, et repartent à la hausse en début de soirée, de manière quasi synchrone sur les deux sites. Il est néanmoins observé

que les niveaux pour le site du Boulevard Périphérique Est sont moins intenses que ceux mesurés lors de la pointe trafic du matin.

La Figure 18 montre une granulométrie et une évolution temporelle au cours de la journée qui sont différentes entre les deux sites de trafic routier, confirmant la hiérarchisation des sites du dendrogramme présenté en Figure 10.

Sites de fond urbain

La Figure 19 illustre l'évolution du profil granulométrique au cours de la journée sur le site Paris 1^{er} les Halles (PA01, en haut) et le site Paris 18^{ème} (PA18, en bas) sur la période d'étude. La même échelle de couleur est utilisée pour les deux sites (mais elle est différente de celle sur les sites de proximité au trafic routier).

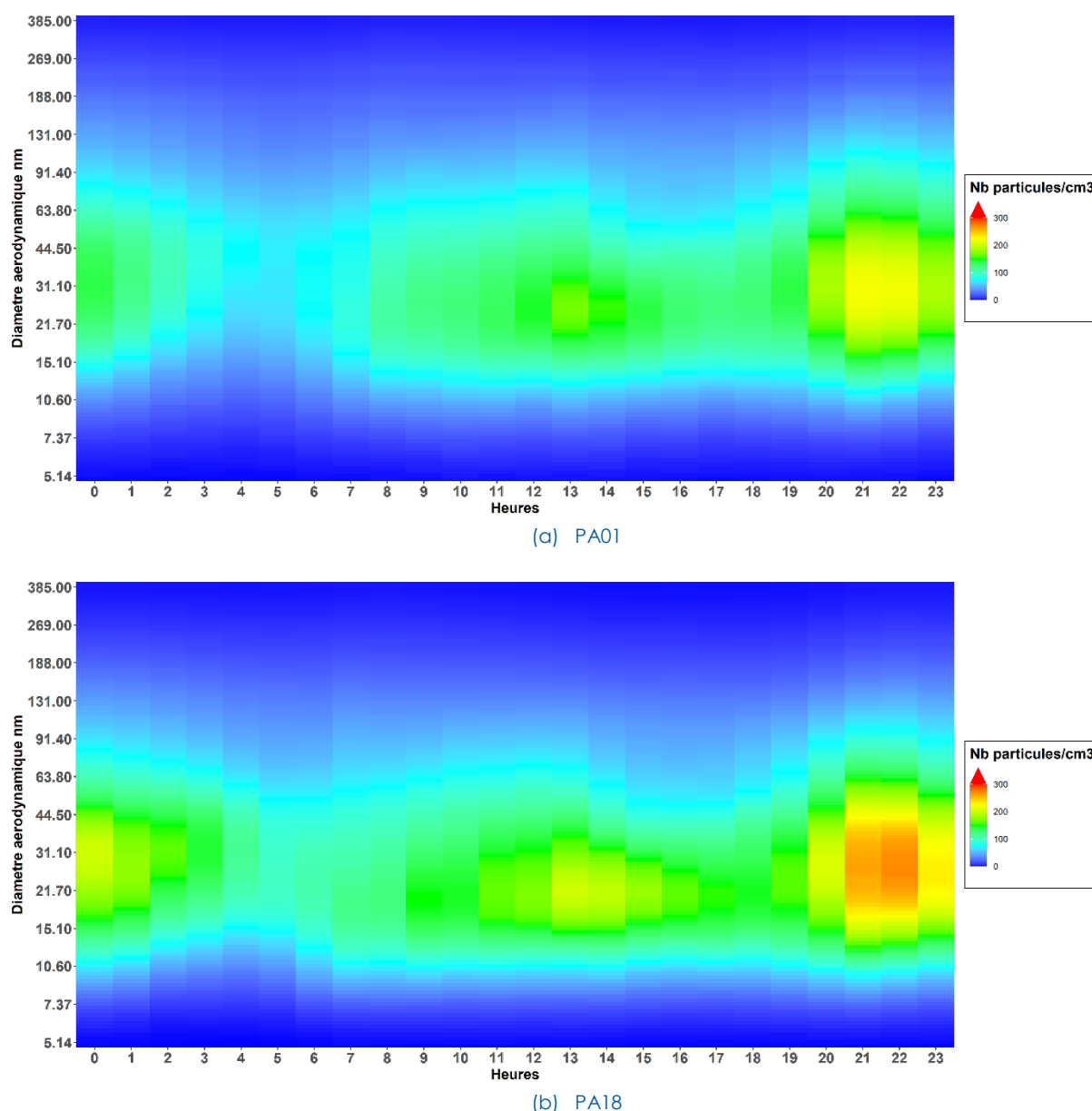


Figure 19 : Évolution journalière « 2D » du nombre de particules par diamètre pour les deux sites de fond urbain (a) PA01 et (b) PA18 [mesures du 17 juillet au 15 septembre 2023]

La dynamique d'évolution horaire de chaque taille de particules en nombre est très similaire entre les deux sites de fond urbain parisien. La dynamique à deux bosses observée dans le chapitre 3.2.2 « Profil journalier », se retrouve en début d'après-midi à 13h avec une augmentation du nombre de particules autour du mode majeur moyen de la période (entre 20 et 30 nm) illustrée en jaune

orangée. Une diminution des concentrations est constatée avant une nouvelle augmentation en début de soirée dès 20h avec des tailles de particules centrées autour du mode majeur.

Même si le profil granulométrique au cours des différentes heures de la journée des deux sites de fond parisien présente des concentrations en nombre de particules plus faibles que pour les sites de proximité au trafic routier, celui-ci identifie une augmentation des concentrations le matin et le soir, illustrant l'influence du trafic routier sur les concentrations de fond et confirme la hiérarchisation des sites du dendrogramme présenté en Figure 10.

3. Origine des particules ultrafines à Paris

L'analyse de la caractérisation des particules ultrafines permet de confirmer les enseignements des précédentes campagnes sur la hiérarchie des niveaux entre les sites de fond et les sites de proximité au trafic routier. Les résultats permettent également de confirmer que le trafic routier est l'une de sources importantes de particules ultrafines en période estivale.

L'objet de cette partie est d'aller plus loin sur l'origine des PUF, notamment sur les facteurs au sein du trafic routier qui permettraient de mieux expliquer la variabilité des concentrations en nombre de PUF mesurées à proximité du trafic routier. Cette analyse, réalisée ici sur les mesures de la campagne estivale permet de limiter l'influence d'une autre source de PUF connue à Paris, le chauffage au bois, qui est présente en période hivernale. Pour ce faire, des comparaisons avec les mesures de carbone suie issues de la combustion d'hydrocarbures réalisées sur l'ensemble des sites ont été menées, ainsi que l'analyse des données trafic récoltées dans le cadre de l'expérimentation AIRLAB au site du boulevard Haussmann. Celles-ci sont détaillées dans le paragraphe 4.1.

De plus, la campagne a connu des conditions météorologiques particulières conduisant à un épisode à l'ozone du 6 au 8 septembre 2023, ainsi que des précipitations très fortes lors de la journée du 28 juillet 2023. L'influence de ces conditions météorologiques sur les concentrations en nombre de PUF est analysée dans les paragraphes 4.2 et 4.3.

3.1. Impact du trafic routier

Les résultats présentés dans le chapitre 3 « Caractérisation des Particules ultrafines en période estivale » montrent que le trafic routier est une source importante de particules ultrafines à Paris.

En effet, les concentrations moyennes en nombre de PUF (gamme 5 à 100 nm) sur la période de mesure sur les sites de proximité au trafic routier sont 2 à 2.5 fois supérieures à celles enregistrées sur les sites de fond parisiens Paris 1^{er} les Halles et Paris 18^{ème}. Le mode majeur identifié sur tous les sites, c'est-à-dire le diamètre granulométrique avec le plus grand nombre de particules, est inférieur à 30 nm, voire inférieure à 20 nm pour le site trafic du Boulevard Périphérique Est. Le mode majeur inférieur à 20 nm est caractéristique du mode appelé « Nucléation » et indique qu'une part majoritaire de particules est « fraîchement » émise, notamment par le trafic routier. Le mode suivant, compris entre 20 et 50 nm est caractéristique du mode « Aitken 1 », indiquant qu'une part majoritaire des particules est issue du grossissement des particules du mode nucléation par condensation ou coagulation. La dynamique d'évolution horaire de chaque taille de particules en nombre montre un profil à deux bosses, caractéristique du trafic routier, sur les sites trafic mais également sur les sites de fond urbain parisiens.

Les analyseurs de carbone suie de type AE33 (cf. Annexe II : Métrologie) utilisés dans l'étude permettent de quantifier le carbone suie contenu dans les particules PM_{2.5} de l'air ambiant et d'identifier celui issu de la combustion des hydrocarbures (notamment par le trafic routier ; noté « eBCff ») de celui issu de la combustion de biomasse (notamment par le brûlage de déchets verts l'été et le chauffage au bois l'hiver ; noté « eBCwb »). L'analyse des mesures relevées sur les deux sites de fond urbain (PA01 et PA18) ainsi que sur les deux sites de trafic routier (HAUS et BPE) montrent également l'influence du trafic routier.

3.1.1. Combustion d'hydrocarbures, carbone suie et PUF

Le Tableau 10 présente la concentration massique de carbone suie (eBC), celle de carbone suie issue de la combustion d'hydrocarbures (eBCff) et celle issue de la combustion de biomasse (eBCwb) en moyenne sur la campagne (du 17 juillet au 15 septembre 2023) pour chaque site de mesure. Les concentrations moyennes de particules ultrafines et le nombre total de particules sur la gamme de mesure (5-400 nm) sont également rappelés. Il est à noter que le site Boulevard Périphérique Est mesure uniquement le carbone suie (noté « eBC »), la part des particules issues de la combustion d'hydrocarbures par le trafic routier étant largement prépondérante, la métrologie de l'AE33 ne permet pas de détecter de façon suffisamment fiable la distinction entre la part issue de combustion d'hydrocarbures et celle issue de la combustion de biomasse.

Station	Typologie	Saison	Période	eBC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	eBCff ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	eBCwb ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Comptage de PUF (part/cm ³) 5 - 100 nm	Comptage total de particules (part/cm ³) 5 - 400 nm
PA01	Fond urbain	Été	17 juillet -> 15 sept 2023	1.0	0.8	0.2	9 900	11 000
PA18	Fond urbain	Été	17 juillet -> 15 sept 2023					
HAUS	Trafic urbain	Été	17 juillet -> 15 sept 2023	1.7	1.5	0.2	21 900	23 700
BPE	Trafic urbain	Été	17 juillet -> 15 sept 2023	4.5	-	-	25 600	27 900

Tableau 10 : Concentrations moyennes massiques de carbone suie (eBC), de carbone suie issu de la combustion d'hydrocarbures (eBCff) et issu de la combustion de biomasse (eBCwb), concentration moyenne en nombre de particules ultrafines et concentration moyenne en nombre total de particules (gamme 5-400 nm) sur la période de la campagne du 17 juillet au 15 septembre 2023.

Les concentrations moyennes en eBC sont plus importantes sur les sites de proximité au trafic routier (BPE et HAUS) que sur les sites de fond urbain. Les niveaux les plus élevés sont constatés sur le site de proximité au trafic routier BPE et les moins élevés sur le site de fond parisien PA01.

Les concentrations moyennes de carbone suie (eBC) sur le territoire parisien sont très largement influencées par les émissions issues du trafic routier sur la période de l'étude y compris en situation de fond avec $0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de eBCff sur le site PA01. La période estivale à Paris n'est pas marquée par des concentrations fortes de carbone suie issue de la combustion de biomasse, indiquant une faible contribution de potentiel brûlage de déchets verts à Paris en période estivale.

La Figure 20 représente l'évolution moyenne journalière des concentrations massiques de carbone suie mesurées lors de la campagne estivale sur les trois sites de mesure (PA01, HAUS et BPE). La hiérarchie des niveaux de concentrations illustrée dans le Tableau 10 se retrouve avec des niveaux globalement plus forts au site BPE tout au long de la journée, suivis du site HAUS et du site PA01. Le profil moyen journalier illustre par ailleurs une dynamique journalière des concentrations de carbone suie très similaire entre le site HAUS et le site PA01, avec une différence de niveau de concentration qui est globalement stable toute la journée. Ce constat est également réalisé sur l'évolution journalière des concentrations en nombre de PUF des deux sites (Figure 14 (a)).

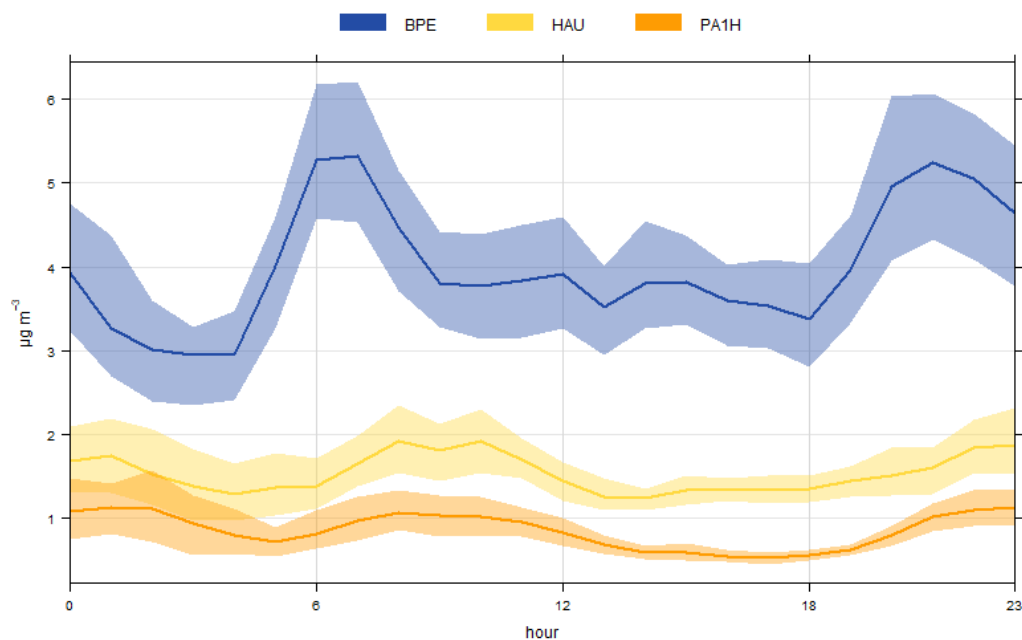


Figure 20 : Profil moyen journalier de la concentration massique de carbone suie (eBC) lors de la campagne PUF parisienne réalisée du 17 juillet au 15 septembre 2023

Cette différence d'évolution temporelle des concentrations massiques de carbone suie est confirmée par le regroupement statistique des sites par classification ascendante hiérarchique, représenté en Figure 21.

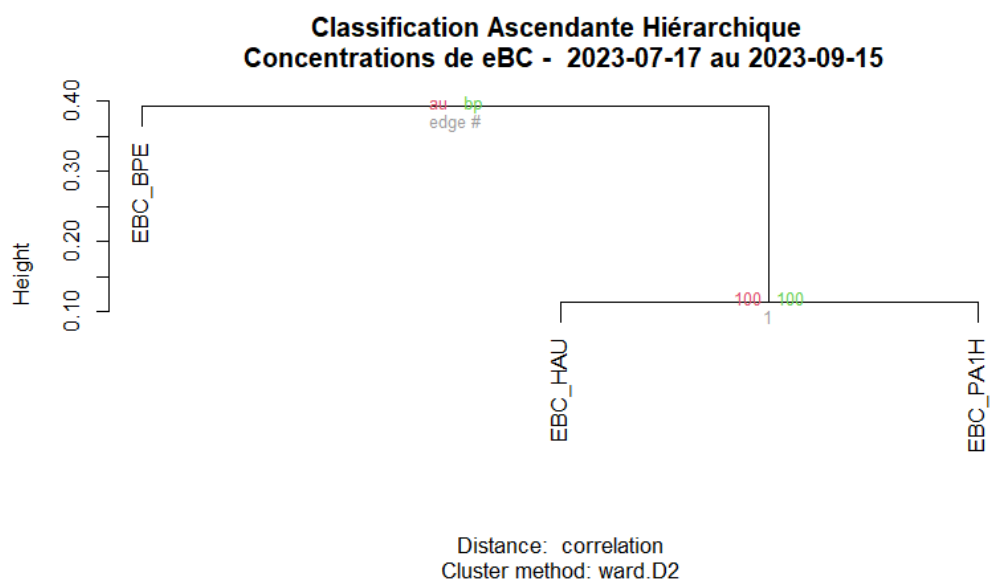


Figure 21 : Dendrogramme des concentrations massiques de carbone suie (eBC) des sites de fond urbain (PA01) et de proximité au trafic routier parisien (BPE, HAUS), sur la période du 17 juillet au 15 septembre 2023.

Pour compléter les informations sur l'origine des mesures de carbone suie (majoritairement issue de la combustion d'hydrocarbures à Paris pour la période estivale), les roses d'impact pour les deux sites trafic ont été réalisées. Cette représentation, en Figure 22, 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 (direction 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 d'étude.

Le terme « **impact** » désigne la concentration mesurée à proximité du trafic routier à laquelle a été soustraite la concentration dite « de fond ». L'impact désigne donc l'émergence ou le surplus de concentration dû à une source spécifique sur un site, le trafic routier dans le cadre de cette étude.

En termes de qualité de l'air, si les niveaux plus forts sont obtenus avec des vitesses de vent élevées, cela implique généralement une source régionale, voire un import à plus longue distance de particules. Au contraire, s'ils sont associés à des vitesses de vent faibles (entre 0 et 4 m/s), cela implique 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.

Concentrations de eBC en impact - 2023-07-17 au 2023-09-15

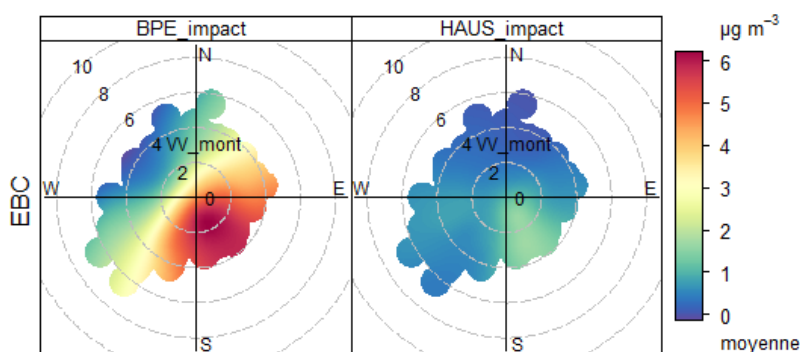


Figure 22 : Roses d'impact des concentrations de carbone suie (en µg/m³) pour les deux sites trafic routier (BPE et HAUS) sur la période de la campagne estivale [mesures du 17 juillet au 15 septembre 2023]

Les roses d'impact des deux sites de proximité au trafic routier mettent clairement en évidence les émissions issues du trafic routier des deux axes surveillés, avec des concentrations maximales observées de Nord Est à Sud pour le Boulevard Périphérique Est, et d'Est en Ouest pour le boulevard Haussmann. Cela confirme l'impact du trafic routier sur les concentrations de carbone suie mesurées sur la période estivale.

Finalement, le calcul des profils du coefficient de corrélation entre les mesures de carbone suie issue de la fraction combustion d'hydrocarbures (eBC_{ff}) et des concentrations en nombre de particules en fonction du diamètre de la particule permet de mettre en évidence une corrélation plus forte dès les particules de petite taille pour le site trafic BPE (Figure 23). En effet, l'écart de la valeur du coefficient de corrélation entre le site BPE et le site de fond PA1H est le plus important pour les particules d'un diamètre jusqu'à 20 nm.

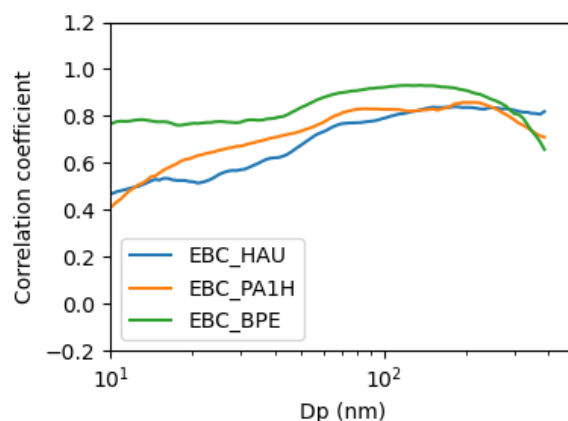


Figure 23 : Coefficient de corrélation entre les concentrations en nombre de particules mesurées par le U-SMPS (part/cm³) et les concentrations de carbone suie issu (eBC) en fonction de la taille de la particule (échelle logarithmique 10-400 nm) pour chaque site de mesure (HAUS en bleu, PA01 en orange, BPE en vert)

Pour la gamme de particules dont le diamètre est supérieur à 200 nm, le coefficient de corrélation diminue de manière plus forte pour le site trafic BPE que pour les sites HAUS et PA01. Cela peut s'expliquer par le fait que les particules de plus grand diamètre (ici supérieures à 200 nm) provenant de l'accumulation et l'agglomération de particules plus fines notamment émises par le trafic routier (comme mesuré sur le site BPE), se retrouvent plutôt sur les sites de fond urbain, compte-tenu du délai de formation nécessaire. Pour le site Hausmann, cela peut s'expliquer par la recirculation des particules ultrafines dans cette rue « canyon ».

La représentation indique également un profil de corrélation par gamme granulométrique qui est similaire entre le site de fond PA1H et le site de proximité trafic HAUS. En effet, les évolutions temporelles des concentrations en nombre de PUF et des concentrations massiques de carbone suie sont très similaires pour chacun des deux sites, bien que les concentrations en nombre de PUF et celles de carbone suie soient plus importantes à proximité du trafic routier (Figure 20).

Cette représentation, introduite dans la publication allemande (Sun, 2019) a été réalisée lors de l'analyse des mesures de la campagne parisienne sur la période hiver-printemps également.

L'ensemble des analyses sur les mesures de carbone suie confirme l'influence du trafic routier par la combustion d'hydrocarbures, sur les concentrations en nombre de particules ultrafines.

3.1.2. Impact des conditions du trafic routier sur les PUF (expérimentation AIRLAB)

Dans cette partie, les données relatives au trafic routier obtenues par la caméra installée sur le site du Boulevard Haussmann dans le cadre de l'expérimentation AIRLAB ont été analysées avec pour objectif d'affiner les facteurs influençant les émissions de particules ultrafines au sein de la source trafic routier.

Présentation des données analysées

Le dispositif caméra a fourni des données sur la période du 25 juillet au 10 septembre 2023, à une fréquence continue au millième de seconde, et sans interruption la nuit grâce à l'éclairage nocturne du site. Il a analysé une zone fixe située en face de la station HAUS, couvrant une longueur d'environ 50 mètres de voirie (Figure 24).

Il crée une nouvelle observation à chaque nouveau véhicule entrant dans la zone, en lui attribuant :

- **Identifiant** : créé à chaque nouvelle entrée dans la zone de détection (un véhicule entrant dans la zone le matin, puis une nouvelle fois le soir est associé à deux identifiants),
- **Numéro de voie** : indique la voie sur laquelle le véhicule circule (valeur de 1 pour la voie la plus éloignée de la station et de 4 pour la voie la plus proche de la station de mesure),
- **Date de début et de fin du passage** : date d'entrée dans la zone et date de sortie de la zone,
- **Type de véhicule** : distingué en six catégories (VL : véhicule léger, VUL : véhicule utilitaire léger, PL : poids lourds, BUS ou CAR, 2RM : deux-roues motorisés, et Vélo),
- **Vitesse moyenne du véhicule** : au sein de la zone et en km/h,
- **Indice de confiance de suivi** : valeur de 0 (si le véhicule est détecté une seule fois dans la zone de détection) à 1 (si le véhicule est détecté 100 % du temps au sein de la zone de détection),
- **Indice de confiance de catégorisation du type de véhicule** : valeur de 0 (confiance nulle) à 1 (confiance maximale).

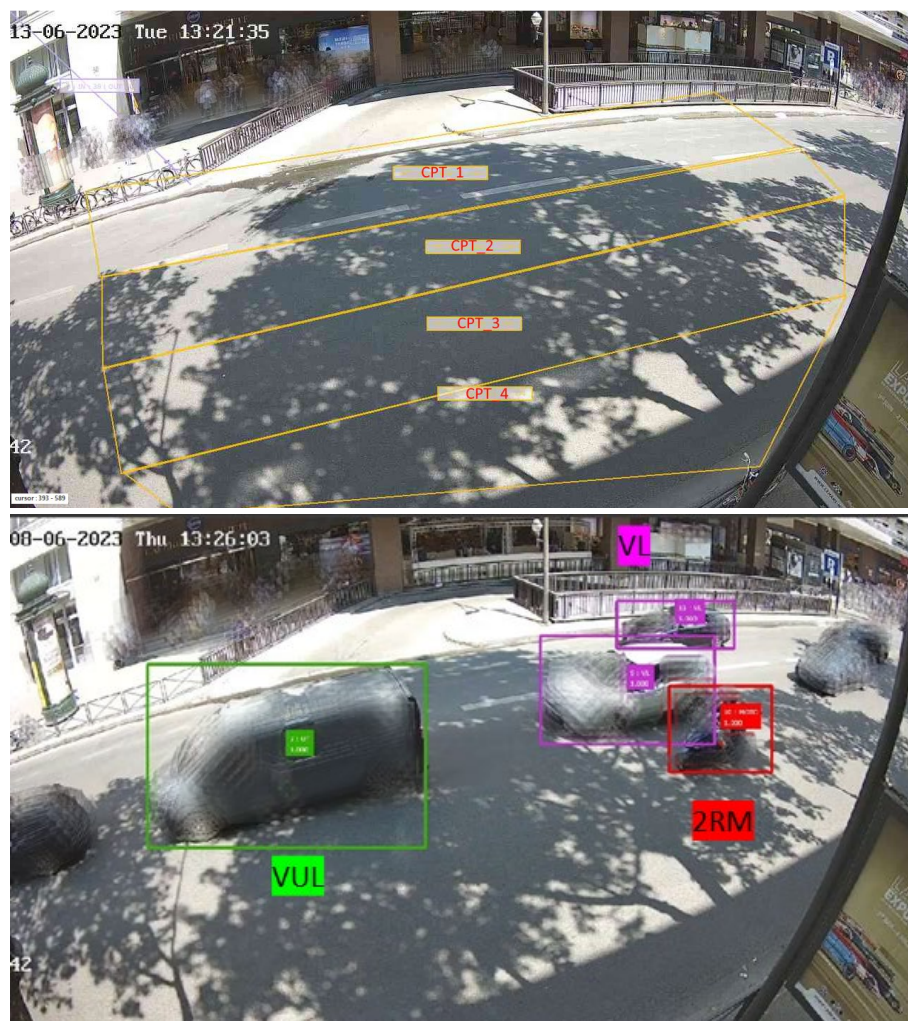


Figure 24 : Zone de détection (fixe et distance latérale d'environ 50 mètres) avec les 4 voies de circulation et exemple d'identification du type de véhicule.

En moyenne sur la période, un total d'environ 30 000 données ont été collectées par jour, permettant une bonne couverture de toutes les heures de la journée.

Un nettoyage des données brutes a été nécessaire et il a été estimé qu'environ la moitié des données sont considérées comme non exploitables pour l'analyse. La validation des données a été réalisée en prenant en compte : l'indice de confiance de suivi et de catégorisation (au moins supérieur à 0,9) et la vitesse de circulation par type de véhicule.

Informations sur le trafic routier

Au total, un ensemble de 783 500 véhicules ont été détectés sur la période. Le nombre d'observations de ces véhicules est représenté dans la Figure 25, et qui permet d'illustrer l'impact du weekend avec un flux de trafic moins important que sur les jours ouvrés.

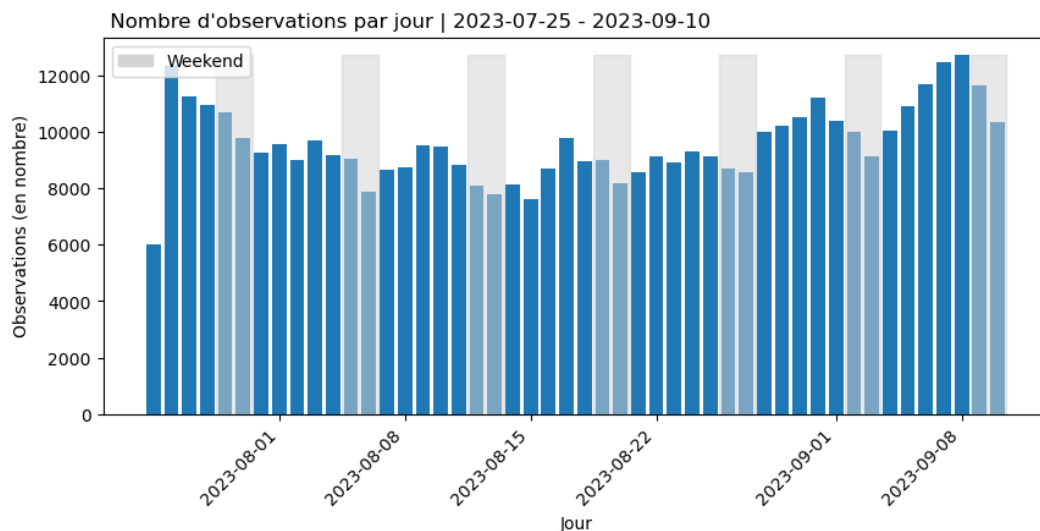


Figure 25 : Nombre total d'observations (identifications de véhicules) par jour sur le site du boulevard Haussmann du 25 juillet au 10 septembre 2023

La circulation sur l'axe du boulevard Haussmann est en majorité sur les voies 2 et 3 (représentant ensemble 68 % des observations totales), et est différenciée selon le type de véhicule (Figure 26) :

- Les vélos et bus circulent davantage sur la voie la plus éloignée de la station (du fait de la désignation de cette voie pour ces deux types de véhicule).
- Les VUL circulent davantage sur la voie la plus à gauche (la plus proche de la station).

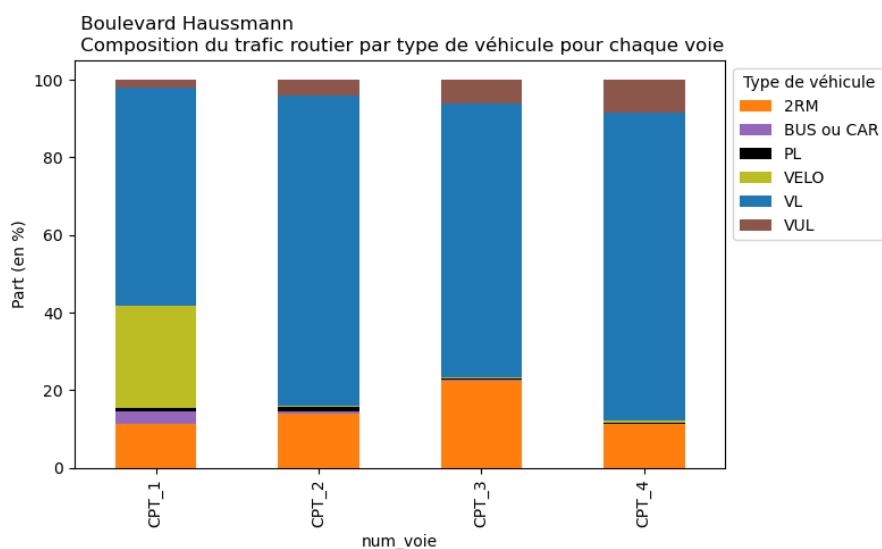
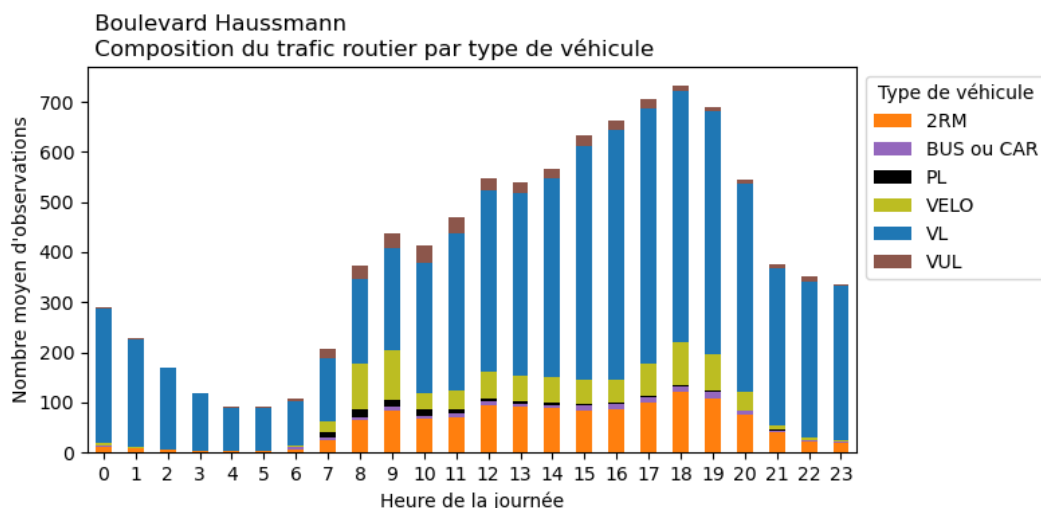


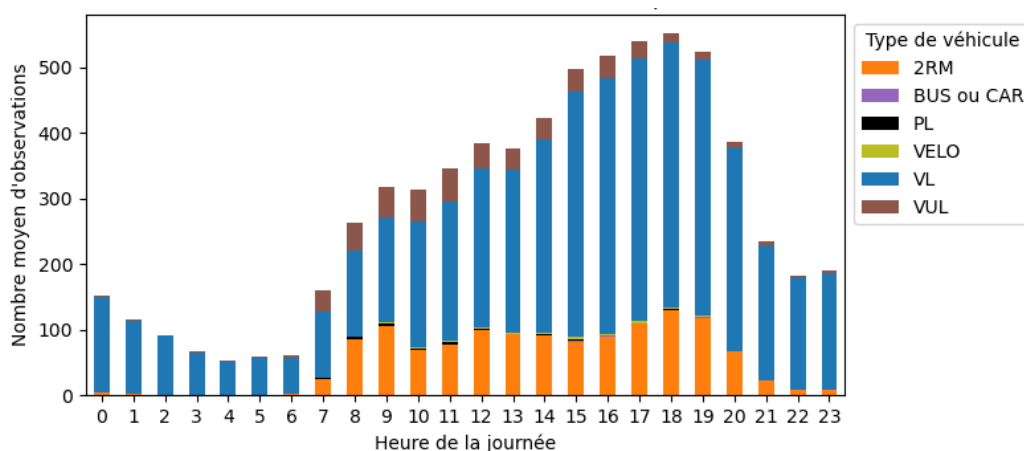
Figure 26 : Composition du trafic routier (par type de véhicule) selon les 4 voies de circulation au droit de la station de mesure Airparif du boulevard Haussmann. La voie 1 est la plus éloignée de la station, la voie 4 est la plus proche.

De plus, l'évolution du nombre d'observations au cours de la journée est différente selon le type de véhicules, étant donné leur usage différent, comme illustré dans la Figure 27 :

- Les vélos, deux-roues motorisés et bus ou cars sont observés surtout en journée ;
- Les véhicules légers sont observés en journée mais également la nuit
- Les véhicules utilitaires légers sont observés en journée jusqu'à 22h
- Les poids lourds sont surtout observés le matin et jusqu'en début d'après-midi.



a) moyenne voies 1 et 2



b) moyenne voies 3 et 4

Figure 27 : Evolution du nombre moyen d'observation par heure de la journée et par type de véhicule, au droit de la station de mesure Airparif du boulevard Haussmann selon les voies de circulation [mesures du 25 juillet au 10 septembre 2023]

Impact des conditions trafic sur les concentrations de PUF

Dans cette partie, l'impact des conditions de trafic sur les concentrations en nombre de particules ultrafines est analysé. L'analyse se focalise sur le surplus de concentration dû au trafic routier (concentration mesurée à proximité du trafic routier à laquelle a été soustraite la concentration dite « de fond », aussi dénommée « surconcentration trafic »), afin d'évaluer l'influence des conditions de trafic routier sur la variabilité du surplus de concentration mesuré en proximité du trafic routier, et s'affranchir de la variabilité des niveaux ambiants.

Le surplus de concentration en nombre de particules ultrafines est analysé pour trois gammes de taille de particules :

- Entre 5 et 20 nm, représentant la gamme dite « Nucléation »
- Entre 20 et 50 nm, représentant la gamme dite « Aitken 1 »
- Entre 50 et 100 nm, représentant la gamme dite « Aitken 2 »

Les données de mesure des concentrations en nombre de particules à la fréquence 5 min (fréquence la plus fine possible par l'appareil de mesure) sont analysées ici et sont mises au regard des données trafic de l'ensemble des voies de circulation.

Pour chaque pas de temps 5 minutes, le jeu de données comprend :

- Le surplus de concentrations en nombre de PUF par gamme de taille (5-20 nm, 20-50 nm, 50-100 nm)
- Le nombre total de véhicules identifiés (par type de véhicules)
- La vitesse moyenne des véhicules identifiés (par type de véhicule)

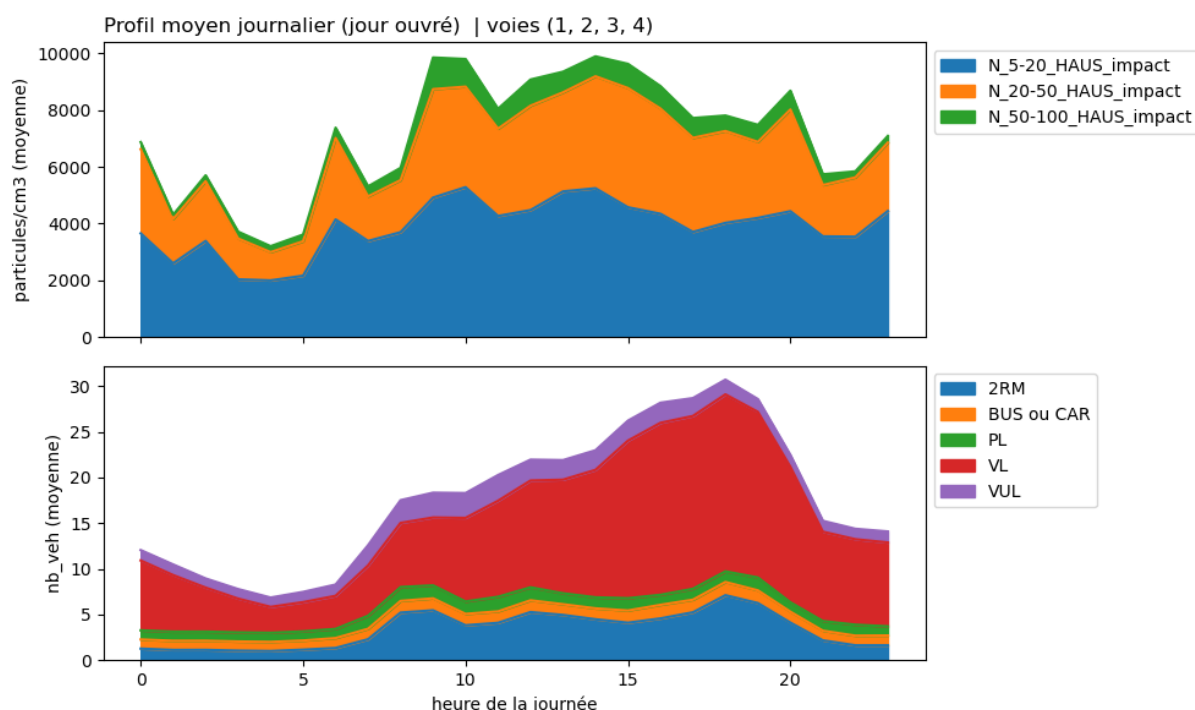


Figure 28 : Evolution moyenne journalière du surplus de concentrations en nombre de PUF par gamme de taille (5-20 nm, 20-50 nm, 50-100 nm), et du nombre moyen de véhicules observés par type de véhicule (hors vélos) [mesures du 25 juillet au 10 septembre 2023]

Les évolutions moyennes journalières du surplus de concentrations en nombre de PUF selon les trois gammes de taille et du nombre moyen de véhicules par type (2RM, BUS ou CAR, PL, VL et VUL) indiquent un lien entre l'activité du trafic routier et les concentrations de PUF (Figure 28). En effet, l'évolution caractéristique du pic du matin et du soir est retrouvée sur le profil du nombre moyen de véhicules (Figure 28, en bas). Celle-ci est moins marquée dans le profil du surplus de concentrations en nombre de PUF (Figure 28, en haut) car les concentrations de fond contribuent également au pic du matin et du soir du fait de la dynamique atmosphérique.

A partir de ce constat, des analyses statistiques ont été réalisées afin d'explorer l'impact de l'intensité de l'activité du trafic routier (représentée par le nombre de véhicules identifiés) sur le surplus de concentrations mesuré à proximité du trafic routier.

En première approche, le calcul du coefficient de corrélation entre le surplus de concentrations par gamme de taille et le nombre de véhicules par type est réalisé sur les profils moyens journaliers. La valeur du coefficient de corrélation est indiquée dans le Tableau 11 :

Type véhicule	[min – max]	Coefficient de corrélation de Pearson		
		(nb_veh, N_5-20)	(nb_veh, N_20-50)	(nb_veh, N_50-100)
VUL	[0.6 – 0.8]	0.64	0.58	0.81
2RM	[0.6 – 0.8]	0.63	0.67	0.77
BUS ou CAR	[0.6 – 0.8]	0.58	0.68	0.76
VL	[0.6 – 0.7]	0.55	0.69	0.56
PL	[0.3 – 0.6]	0.46	0.35	0.61

Tableau 11 : Coefficient de corrélation de Pearson entre le nombre de véhicules (par type de véhicule) et les concentrations en nombre de PUF par gamme de taille (5-20 nm, 20-50 nm, 50-100 nm), données agrégées pour un jour ouvré moyen [mesures du 25 juillet au 10 septembre 2023]

Pour l'ensemble des types de véhicules (à l'exclusion des vélos), le signe du coefficient de corrélation est positif, confirmant que le surplus de concentrations augmente lorsque l'activité du trafic routier augmente.

La valeur du coefficient indique si la relation est plus ou moins forte. Celui-ci varie à la fois selon la gamme de taille de particules et selon le type de véhicule analysé. En effet, parmi les cinq types de véhicules, les poids lourds sont associés à un coefficient de corrélation légèrement inférieur à celui des autres types de véhicules (entre 0,3 et 0,6 contre au moins supérieur à 0,6 pour les autres véhicules). L'analyse par gamme de taille des PUF estime que la relation entre le nombre de poids lourds et le surplus de concentrations en nombre est plus importante pour les particules de taille entre 50 et 100 nm plutôt que pour les particules de plus petite taille (diamètre inférieur à 50 nm). Ce même constat est fait pour les BUS ou CARS, mais cela est à mettre au regard des voies de circulation les plus empruntées par ces véhicules. En effet, les véhicules de type bus ou car, et poids lourds circulent majoritairement sur les voies les plus éloignées de la station (voies 1 et 2). La distance entre la voie de circulation de ces véhicules à la mesure des particules ultrafines, ainsi que le faible nombre de ces types de véhicules ne permettent pas d'obtenir de conclusions sur les diamètres de particules émises par ces types de véhicules. En effet, le délai entre l'émission des particules à l'échappement et la mesure à la station est susceptible d'engendrer des phénomènes d'agglomération et donc de grossissement des particules.

Pour les autres types de véhicules (2RM, VUL, VL), l'ampleur de la corrélation est globalement similaire quelle que soit la gamme de taille (entre 0,6 et 0,8). Les faibles différences du coefficient de corrélation entre les gammes 5 - 20 nm et 50 - 100 nm sont potentiellement liées à des spécificités concernant la carburation des véhicules. A titre d'exemple, les données issues de l'Inventaire Air-Climat-Energie d'Airparif quantifient qu'au sein de Paris, environ 97 % des kilomètres parcourus par les VUL sont attribués à des véhicules diesel, et 95 % des kilomètres parcourus par les 2RM sont attribués à des véhicules essence (Airparif, Mars 2024). Certains travaux de recherche explorent ces potentielles différences entre les tailles de particules émises par les moteurs essence et diesel (Sun, 2019). Dans le cadre de l'expérimentation AIRLAB présentée ici, les hypothèses sur les différences en termes de taille de particules émises par les différents modes de carburation ne peuvent pas être confirmées, étant donné l'absence d'information concernant la motorisation des véhicules détectés.

Pour aller plus loin sur la temporalité de l'impact entre l'activité du trafic routier et les concentrations de PUF mesurées à proximité du trafic routier, le calcul du coefficient de corrélation a été réalisé sur les séries temporelles à la fréquence 5 minutes (sans agrégation horaire). L'analyse à cette échelle temporelle fine estime des coefficients de corrélation faibles (coefficient inférieur à 0,4), indiquant que l'impact du nombre de véhicules n'est pas perçu instantanément sur les concentrations en nombre de PUF.

Afin d'explorer le délai potentiel entre le passage de véhicules (par type) sur les concentrations en nombre de particules, le test de causalité de Granger a été réalisé. Le test considère le surplus de concentrations mesuré à un instant t et quantifie si la prise en compte du nombre de véhicules mesuré précédemment permet d'améliorer l'estimation des concentrations mesurées à l'instant t . Le résultat est estimé pour plusieurs valeurs de délai, ici par tranche de 5 minutes (5, 10, 15 minutes, etc.). De premiers résultats indiquent que l'impact du nombre de véhicules sur les concentrations diminue avec le temps, mais ne permet pas d'estimer le délai à partir duquel le nombre de véhicules identifié à un instant t n'a plus d'effet sur les concentrations mesurées plus tard. De plus,

le test ne permet pas d'être conclusif sur l'ampleur de l'influence du nombre de véhicule en fonction du type de véhicule.

Du fait des conclusions limitées sur l'impact du nombre de véhicules sur les concentrations en nombre de particules, les mesures sur la vitesse de circulation des véhicules n'ont pas été analysées.

Enseignements sur l'expérimentation AIRLAB

L'expérimentation AIRLAB par l'installation de la caméra au droit de la station de mesure du boulevard Haussmann a permis de récolter différents enseignements quant à ces dispositifs de mesure :

- **Les données récoltées par le dispositif doivent être validées afin d'être exploitées à toutes fins d'analyse.** L'indice de confiance de suivi et de catégorisation mis à disposition par le sous-traitant a permis de filtrer efficacement les données les plus robustes vis à vis de la méthode employée par le dispositif, mais des validations supplémentaires ont été nécessaires, notamment sur les vitesses de circulation au sein de la zone, car celles-ci comportaient une grande variabilité et des valeurs aberrantes.
- **Des données supplémentaires concernant la carburation des véhicules, permettraient d'affiner les facteurs contribuant à la variabilité des concentrations mesurées à proximité du trafic routier.**
- L'analyse des mesures en conditions réelles de circulation (circulation des véhicules sur plusieurs voies - avec des spécificités selon le type de véhicule, la variabilité de plusieurs facteurs en même temps – type de véhicule, nombre de véhicules, vitesse de circulation, carburation, conditions météorologiques, etc.) complexifie l'analyse de chaque facteur. **Des mesures à l'émission sur un banc d'essai permettraient** de pouvoir contrôler la variabilité de chacun des facteurs et **d'estimer de manière plus robuste l'influence de chaque facteur sur les concentrations en nombre de particules.**
- A partir de données plus robustes, **d'autres analyses statistiques pourraient être mises en œuvre pour estimer l'influence de chaque facteur.**

3.2. Particules issues de transformations dans l'atmosphère

La partie 2.3.3 « Qualité de l'air sur la période de la campagne » illustre les trois jours d'épisode à l'ozone (O₃) survenus du 6 au 8 septembre 2023. Une analyse des concentrations en nombre et de la granulométrie des PUF a été réalisée afin d'explorer l'impact potentiel sur les PUF de conditions propices à la formation de composés secondaires (issus de transformations chimiques dans l'atmosphère), que ce soit des particules ou de l'ozone (fort ensoleillement, températures clémentes, etc.).

3.2.1. Granulométrie moyenne des particules lors de l'épisode du 6 au 8 septembre 2023

La Figure 29 illustre la distribution granulométrique moyenne des trois sites (trafic urbain HAUS, fond urbain PA01 et PA18) du 6 au 8 septembre 2023. L'analyse n'a pas pu être réalisée sur le site trafic BPE du fait de l'indisponibilité de données sur cette période.

Comparé à la période totale de la campagne, le mode majeur du site HAUS se rapproche de celui des sites de fond (estimé à 28 nm sur les trois jours d'épisode, contre 21 nm sur la période globale

de la campagne). Néanmoins, en prenant en compte l'incertitude des appareils, cette différence n'est pas significative.

La distribution granulométrique moyenne obtenue sur les 3 jours d'épisode est marquée par la **présence d'une seconde population de particules caractérisée par un deuxième mode autour de 100 nm pour tous les sites, que ce soit en typologie de trafic urbain ou de fond urbain.**

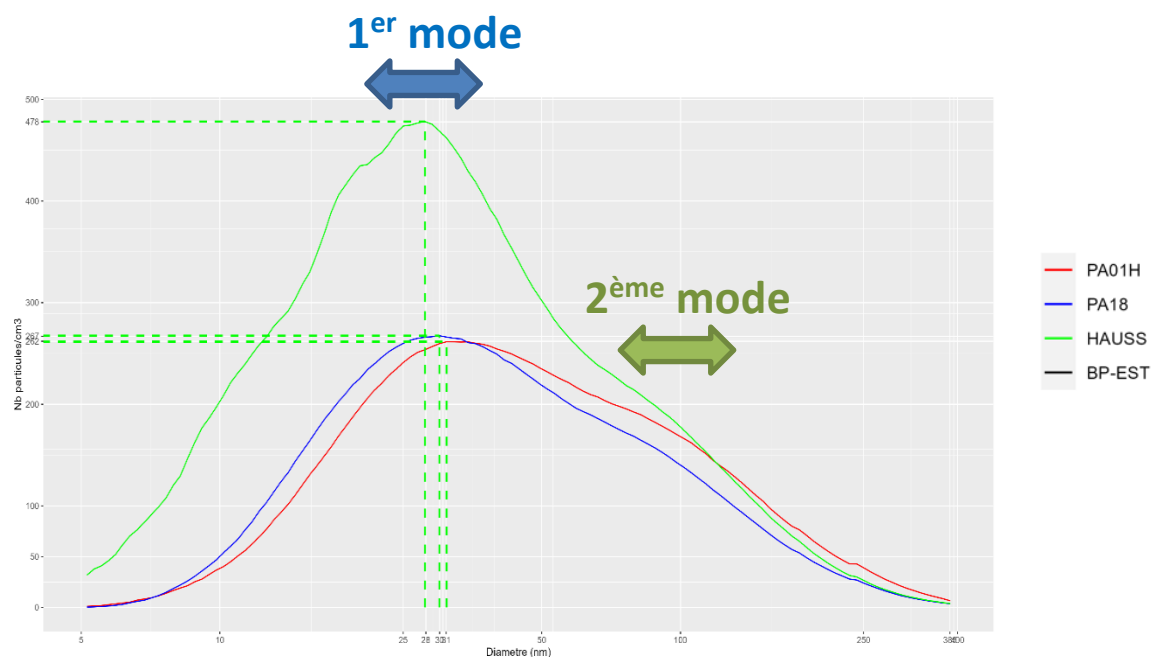
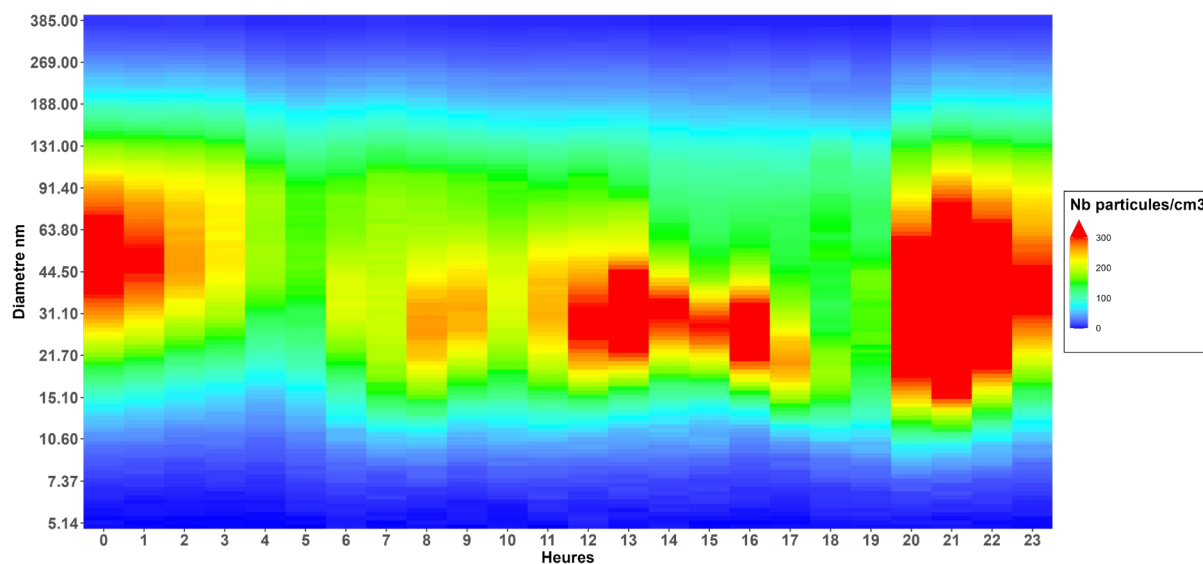


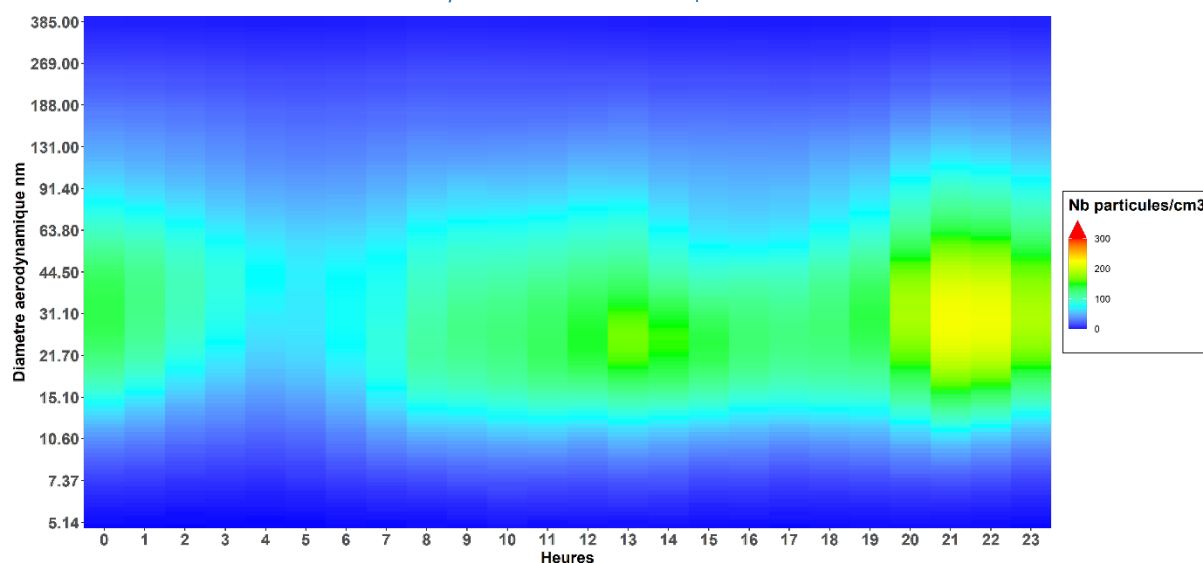
Figure 29 : Distribution granulométrique moyenne sur le site trafic (HAUS en vert) et les 2 sites de fond (PA01 en rouge et PA18 en bleu) sur Paris du 6 au 8 septembre 2023 (épisode ozone)

Une analyse est réalisée sur le site PA01 afin d'identifier la source de particules sur ce deuxième mode, autour de 100 nm.

La Figure 30 présente l'évolution de la distribution granulométrique au cours de la journée pour les mesures moyennes des 3 jours d'épisode et pour les mesures moyennes de l'ensemble de la campagne. Cette représentation met en exergue d'une part, des concentrations en nombre plus fortes en moyenne sur la période de l'épisode (dépassant 250 particules/cm³ en moyenne horaire), et d'autre part que la gamme de taille avec des concentrations de particules dépassant 50 particules/cm³ (valeurs à partir du bleu clair) s'étend de 10 à 200 nm, contre une gamme plus restreinte de 10 à 100 nm sur la période globale de la campagne. Cette deuxième observation est cohérente avec la distribution granulométrique moyenne sur la période de l'épisode (Figure 29) qui montre une deuxième population de particules avec un mode autour de 100 nm, et ajoute l'information que la présence de particules sur cette gamme est observée sur l'ensemble de la journée.



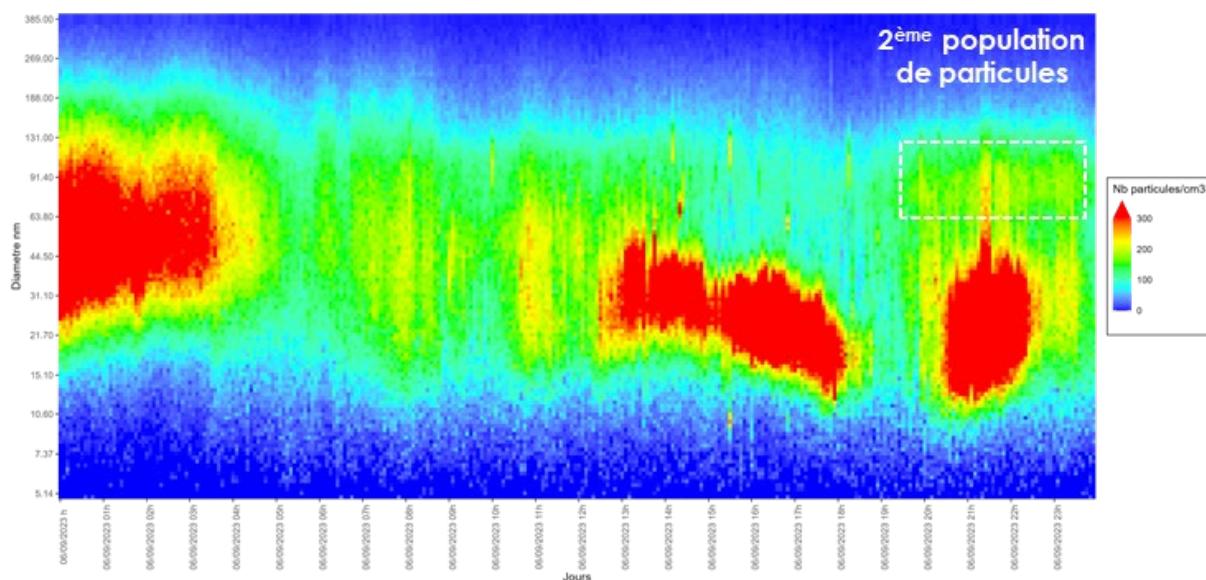
a) Mesures du 6 au 8 septembre 2023



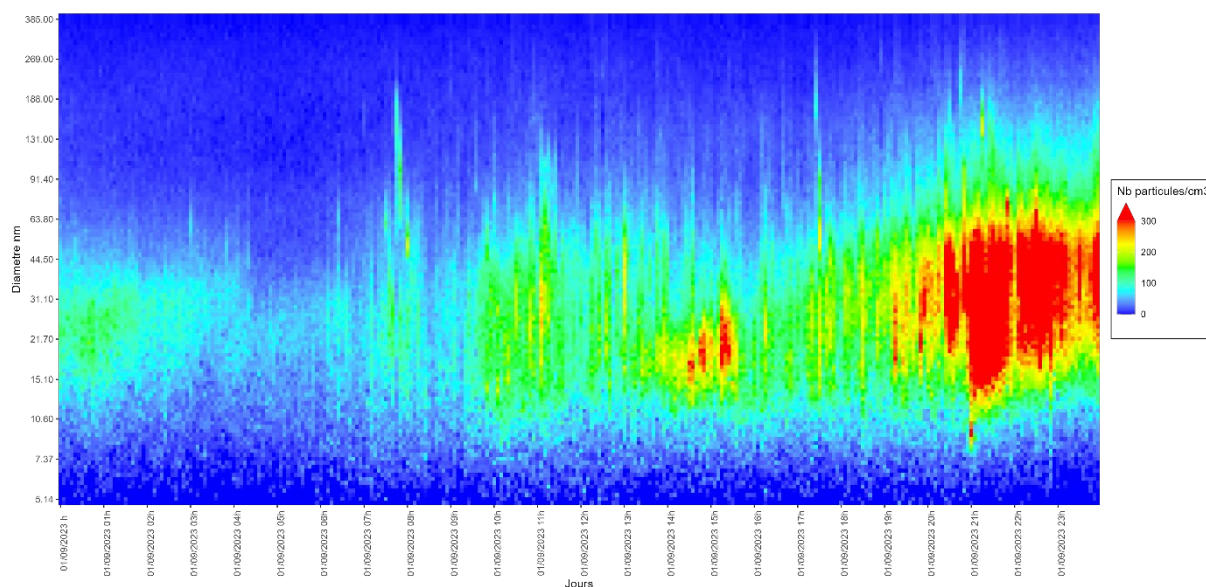
(c) Mesures du 17 juillet au 15 septembre 2023

Figure 30 : Évolution journalière « 2D » du nombre de particules par diamètre pour le site PA01 (échelle horaire) pour deux périodes temporelles (a) Mesures du 6 au 8 septembre 2023 et (b) Mesures du 17 juillet au 15 septembre 2023.

L'analyse des mesures granulométriques à l'échelle temporelle la plus fine disponible (fréquence 5 minutes) sur la journée du 6 septembre permet en plus d'identifier qu'il y a bien une distinction de cette deuxième population de particules le soir à partir de 20 heures, avec des concentrations relativement plus élevées. La Figure 31 illustre cette évolution granulométrique pour la journée du 6 septembre 2023 et la compare à une journée représentative du comportement moyen observé sur l'ensemble de la campagne :



(a) Mesures du 6 septembre 2023



(a) Mesures du 1^{er} septembre 2023 (journée représentative de l'évolution moyenne lors de la campagne)

Figure 31 : Évolution journalière « 2D » du nombre de particules par diamètre pour le site PA01 (échelle horaire) pour deux périodes temporelles (a) Mesures du 6 septembre 2023 et (b) Mesures du 1^{er} septembre 2023.

Les profils granulométriques réalisés de 20h à 23h sur la journée du 6 septembre, en Figure 32, permettent de confirmer que la 2^{ème} population de particules est associée à un mode entre 50 et 100 nm (mode « Aitken 2 », moins fin que le mode « Nucléation » et « Aitken 1 »).

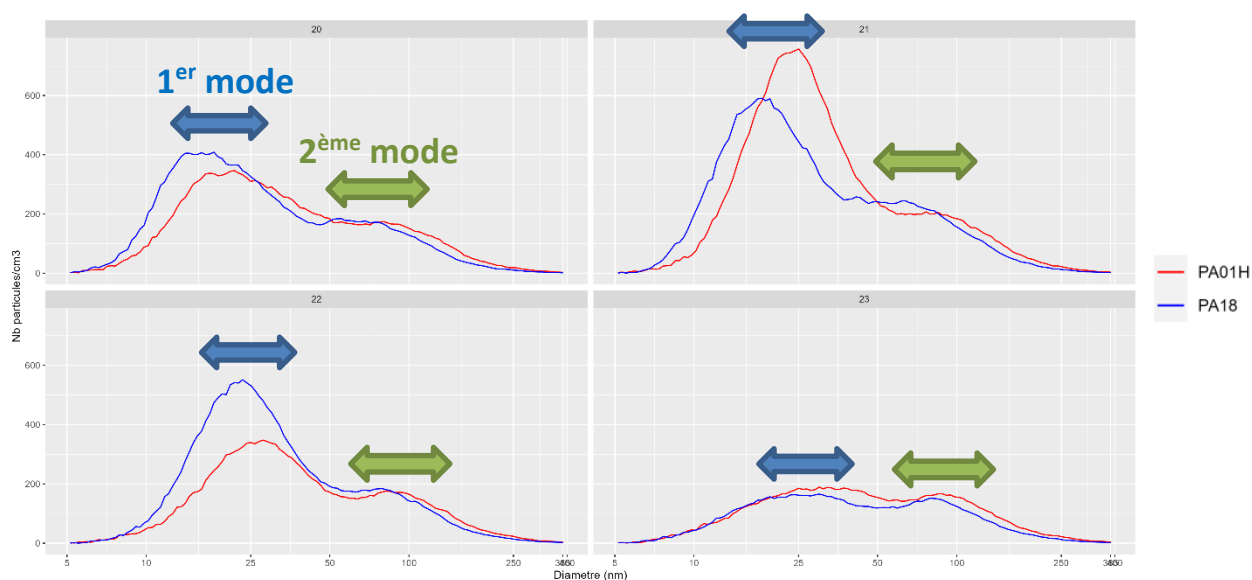


Figure 32 : Distribution granulométrique moyenne des concentrations en nombre de particules (gamme 5-400 nm) sur les 2 sites de fond (PA01 en rouge, PA18 en bleu) pour la journée du 6 septembre 2023 (de 20h à 23h).

3.2.2. Composition chimique des particules secondaires

L'analyse de la composition chimique des particules PM_{10} à partir des mesures de l'appareil ACSM installé sur le site PA01 permet d'identifier une part importante de particules organiques (environ 70 %) lors de l'épisode, comparé à ce qui est observé en moyenne annuelle (56 %) (Figure 33).

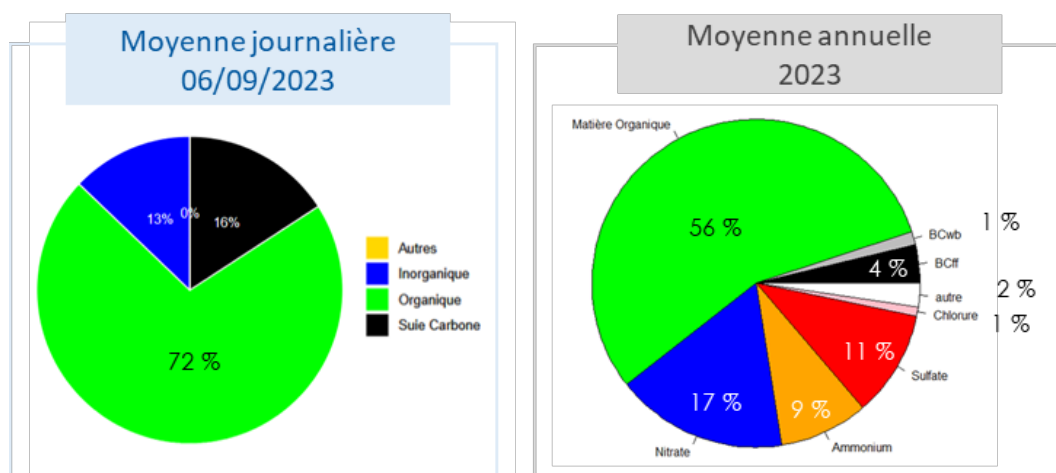


Figure 33 : Composition chimique des particules (données ACSM) sur le site PA01 en moyenne journalière sur la journée du 6 septembre 2023 et en moyenne sur l'année 2023.

Enfin, le calcul de la corrélation entre les mesures de particules organiques et celles du comptage de particules par classe granulométrique, dont les résultats sont donnés dans la Figure 34, identifie une corrélation plus importante des particules organiques avec les concentrations de particules sur la gamme 50 - 400 nm (incluant la part précédemment identifiée de 50 à 100 nm), qu'avec les concentrations de particules sur la gamme de 5 à 50 nm.

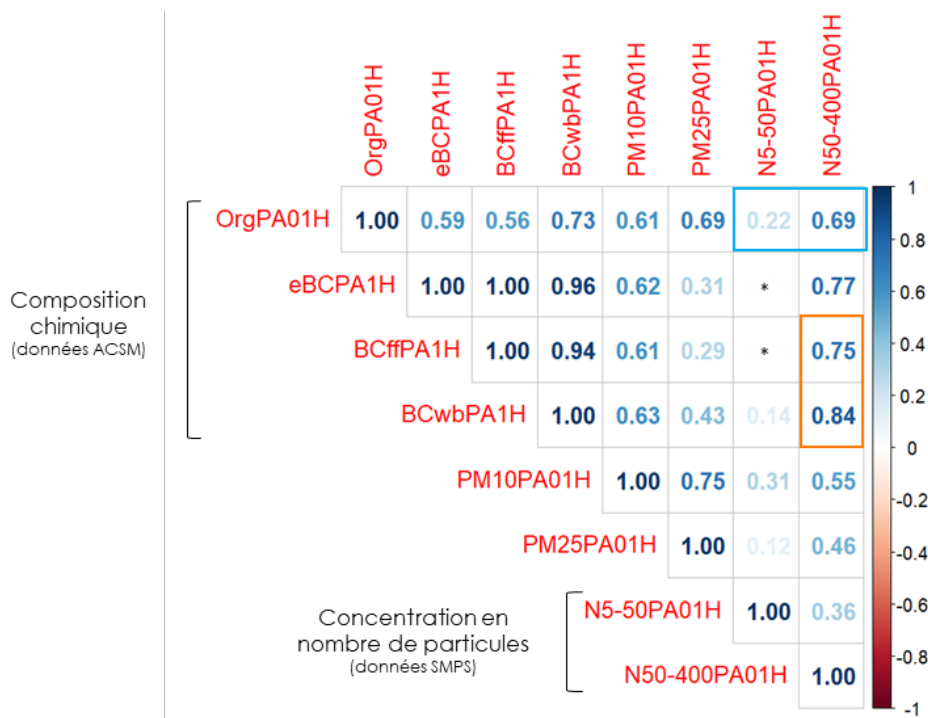


Figure 34 : Matrice de corrélation des données de concentrations en nombre de particules de diamètre 5-50 nm et 50-400nm et des données de composition chimique (organique, carbone suie) et des données PM10, PM2,5 sur les 3 jours d'épisode à l'ozone du 6 au 8 septembre 2023.

Cette étude a permis d'identifier, lors des trois jours d'épisode à l'ozone, la présence d'Aérosols Organiques Secondaires (AOS), observés sur la gamme des particules ultrafines, et plus précisément sur la gamme de 50 à 100 nm. Ces journées sont caractérisées par une augmentation de la capacité oxydante de l'atmosphère, propice aux phénomènes de transformations des composés de l'air, conduisant à la formation de ces AOS. **La formation des AOS s'est matérialisée par des concentrations en nombre de particules plus fortes sur l'ensemble des trois jours de l'épisode, et est associée à un mode entre 50 et 100 nm pour les sites en situation de fond urbain mais également à proximité du trafic routier.** A noter que ce mode reste mineur en comparaison au premier mode associé au trafic routier.

3.3. Précipitations estivales et impact sur les PUF

Comme précisé lors de la partie 2.3.1 « Météorologie », de fortes précipitations ont été mesurées en Ile-de-France le 28 juillet 2023, avec un cumul sur la journée de 51,5 mm de précipitations, soit près du tiers des quantités des précipitations mesurées sur l'ensemble de la période de campagne de mesure.

Une analyse est effectuée sur les deux heures de la journée du 28 juillet 2023 où les maxima de précipitations ont été mesurées (total de 23,6 mm de précipitations entre 19h à 20h, et total de 12,5 mm entre 20h à 21h), avec pour objectif d'analyser si ces conditions de précipitations importantes ont eu pour effet d'abattre les concentrations en nombre de particules mesurées sur ces deux heures, par à la journée complète.

L'analyse de l'abattement est réalisée à la fois sur le comptage total de particules (exprimé particules/cm³), **mais également sur la granulométrie des particules, c'est-à-dire analyser si l'abattement des concentrations concerne une gamme spécifique de taille de particules.**

Dans un premier temps, la comparaison permet d'observer un abattement des concentrations dès la gamme des PUF (de 5 à 100 nm), et également sur la gamme de 100 à 400 nm. De plus, la comparaison suggère que l'abattement est plus fort sur l'heure de 19h à 20h, que pour l'heure de

20 h à 21h, ce qui est cohérent avec avec les quantités de précipitations mesurées. Les mesures sur cette unique journée ne permettent néanmoins pas de quantifier de manière robuste l'ampleur de cet abattement, ni de la différencier selon les typologies de site.

Dans un second temps, la comparaison de la distribution granulométrique moyenne obtenue sur la journée du 28 juillet 2023 (Figure 35) par rapport à celle obtenue pour les deux heures d'intérêt (Figure 36) n'identifie pas d'impact sur le mode majeur associé à chaque site de mesure. En effet, pour ces deux heures, le mode majeur pour le site BPE se situe autour de 15 nm, celui de HAUS autour de 20 nm, celui de PA01 et PA18 autour de 30 nm, ce qui est cohérent, en prenant en compte les incertitudes de mesure, avec le mode majeur de chacun de ces sites obtenu en moyenne sur la journée du 28 juillet 2023.

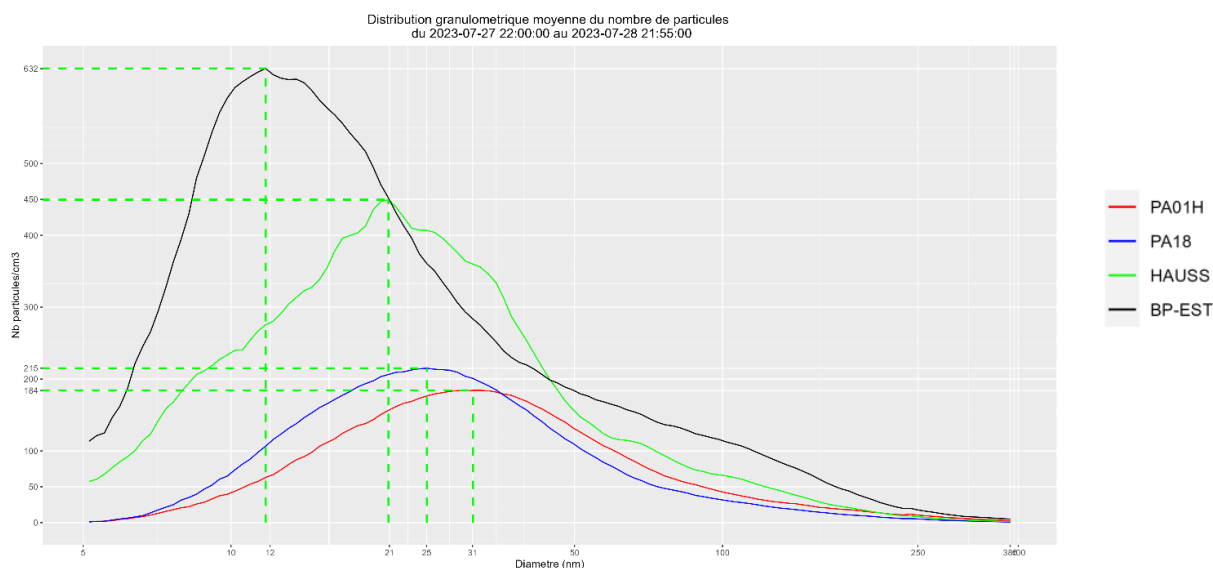
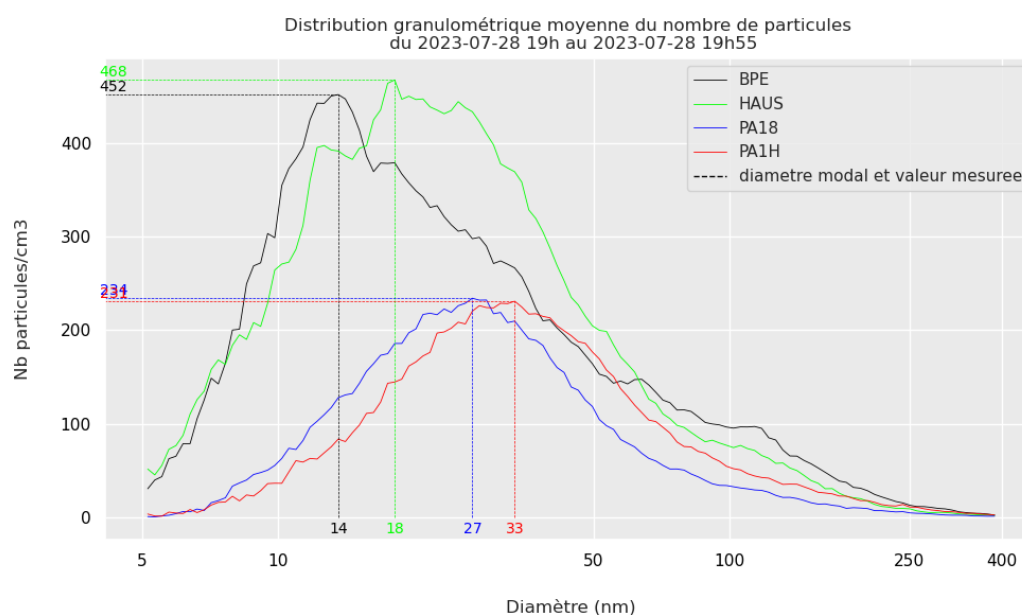
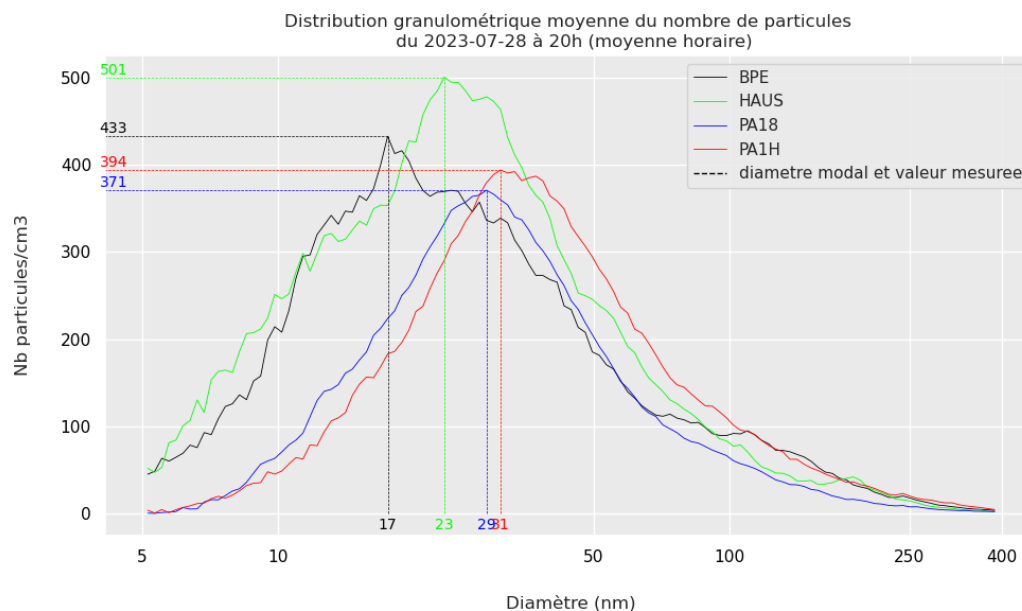


Figure 35 : Distribution granulométrique moyenne sur les 2 sites trafic (BPE en noir, HAUS en vert) et les 2 sites de fond (PA01 en rouge et PA18 en bleu) sur Paris (Journée du 28 juillet 2023)



(a) Entre 19h et 20h



(b) Entre 20h et 21h

Figure 36 : Distribution granulométrique moyenne sur les 2 sites trafic (BPE en noir, HAUS en vert) et les 2 sites de fond (PA01 en rouge et PA18 en bleu) sur Paris (Journée du 28 juillet 2023, heures de 19h à 20h et de 20h à 21h)

L'analyse de la journée du 28 juillet 2023, lors de laquelle les plus fortes quantités de précipitations de la période ont été mesurées, suggère un abattement des concentrations en nombre de particules dès la gamme des PUF. Cette première analyse ne permet néanmoins pas de quantifier de manière robuste l'ampleur de l'abattement, ni de la différencier selon les sites de mesure. **De plus, d'autres facteurs peuvent influencer les concentrations en nombre de particules : à la fois d'autres paramètres météorologiques** comme la vitesse et la direction du vent, le taux d'humidité ; **mais également des paramètres de conditions de circulation,** notamment le volume de trafic et la vitesse de circulation des véhicules du fait de fortes précipitations. Ainsi, **des analyses complémentaires prenant en compte ces facteurs ainsi qu'un échantillon plus large de journées associées à ce type de conditions météorologiques spécifiques sont nécessaires pour confirmer l'effet d'abattement des concentrations en nombre de particules,** notamment sur la gamme des PUF.

PARTIE B

ENSEIGNEMENTS DES DEUX CAMPAGNES SUR LES PARTICULES ULTRAFINES A PARIS

1. Enseignements sur les particules ultrafines à Paris

Cette partie présente les enseignements sur les particules ultrafines mesurés à Paris qui ont pu être obtenus au travers des deux campagnes de mesure, réalisées sur la période hiver-printemps 2022, dont la synthèse des résultats figure dans la partie 5.1 et sur la période estivale 2023. Les enseignements présentés dans les parties 5.2 et 5.3 portent sur la caractérisation des PUF (hiérarchie des niveaux selon les typologies de site, évolution temporelle, granulométrie des particules) et sur les sources d'émissions, qui peuvent varier selon la saison.

1.1. Caractérisation et origine des PUF en période hiver-printemps

La première campagne de mesure réalisée dans le cadre de l'étude a porté sur les mesures et l'analyse des concentrations en nombre de PUF durant la période hiver-printemps 2022, du **31 janvier au 5 mai 2022**.

1.1.1. Description de la campagne hiver-printemps

Afin de documenter la variabilité spatiale des niveaux, **5 sites de mesure ont été instrumentés, dont le site de référence de fond parisien** situé dans le jardin des Halles :

- **2 points à proximité immédiate du trafic routier** (site « trafic ») sur deux sites du réseau permanent d'Airparif pour des axes routiers de typologies contrastées :
 - o Boulevard Périphérique Est (75) – noté « BPE » (2 fois 4 voies de circulation au droit de la station avec un trafic moyen journalier annualisé (TMJA) de 243 400 véhicules par jour).
 - o Boulevard Haussmann (75) – noté « HAUS », un site de mesure « trafic urbain » implanté dans une rue de type « rue canyon » (4 voies de circulation en sens unique dont une voie de bus avec un TMJA de 38 000 véhicules par jour).
- **3 points de mesure en situation de fond urbain**, c'est-à-dire des sites hors influence directe d'une source de pollution locale telle qu'un axe routier ou une installation industrielle. Les sites ont été sélectionnés pour estimer la variabilité des niveaux des PUF dans Paris notamment en lien avec la combustion de biomasse (qui désigne le chauffage au bois l'hiver et le brûlage de végétaux l'été). Ne disposant pas de donnée précise sur la localisation des foyers individuels dans Paris (cheminée ouverte - poêle à bois - petite

chaufferie biomasse, etc.), **la sélection des sites s'est appuyée sur l'analyse du parc de logements** réalisée par l'Atelier Parisien d'Urbanisme (APUR, Juillet 2018), les bâtiments érigés avant 1975 pouvant potentiellement être équipés de cheminée à foyer ouvert, de poêle à bois ou à granulés. **Paris peut se découper en 3 grandes zones de bâti** : la première zone est l'hyper centre avec des bâtiments principalement construits avant 1800, la deuxième zone appelée « Haussmannienne » dans le rapport est composée majoritairement de bâtiments construits avant 1914 et, la troisième zone est caractérisée par un mix de bâtiments de différentes périodes de construction mais majoritairement construits avant 1975. **Il est retenu de disposer pour cette campagne d'un point de mesure dans chaque zone.**

- Le site urbain de fond permanent de référence d'Airparif se situe dans l'hyper centre parisien (station Paris 1^{er} les Halles - notée « PA01 ») ;
- La station permanente Paris 18^{ème} est implantée dans la zone Haussmannienne (« PA18 »)
- Un site temporaire a été installé dans le 19^{ème} arrondissement de Paris – noté « PA19 » dans la zone dite « mixte », avec beaucoup de maisons individuelles, potentiellement équipées de systèmes de chauffage utilisant de la biomasse. Sur ce site, seules des mesures de carbone suie ont été réalisées.

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. La température, l'ensoleillement et les précipitations influencent également les niveaux de pollution. La provenance des vents et leur intensité permettent de plus d'identifier les zones sous l'influence de sources spécifiques.

Globalement le début de l'année 2022 a été plus doux que la normale : les températures moyennes mensuelles classent 2022 à la dixième place des mois de mars les plus doux des cinquante dernières années, avec un ensoleillement quasiment moitié plus que la normale. Le mois d'avril a été marqué en début de mois par une offensive hivernale avec un coup de froid suivi d'un retour de la douceur. **Les perturbations ont été assez rares et peu actives avec un déficit de pluie sur les mois de février et de mars.** Les régimes de vents étaient essentiellement dispersifs pendant la campagne, comme sur la période de référence 2010-2020 mais avec une sous-représentation du secteur de vent Sud et une sur-représentation du secteur Sud-Est.

Ces conditions météorologiques ont engendré sur le début d'année 2022 une qualité de l'air avec des indices allant de « moyen » jusqu'au qualificatif « mauvais ». En mars, 3 jours de dépassement du seuil d'information et de recommandations ont été observés le 24, 25 et 26 mars 2022 pour les particules PM₁₀ en région Île-de-France. De plus, ce mois a été marqué par l'import d'un nuage de sable en provenance du Sahara (du 14 au 17 mars). Le ciel a pris alors un aspect laiteux sous le nuage de sable avec parfois des teintes ocres.

1.1.2. Caractérisation des particules ultrafines

Le comptage moyen du nombre total de PUF (gamme 5 à 100 nm) met en évidence que les sites de fond Paris 1^{er} Les Halles et Paris 18^{ème} présentent des niveaux de concentration de PUF similaires et que **le nombre de particules ultrafines sur les sites trafic du boulevard Haussmann et du Boulevard Périphérique est 2 à 2.5 fois supérieurs à ceux observés sur les sites urbains de fond étudiés.** La variabilité temporelle des niveaux y est également plus importante.

Station	Typologie	Saison	Période	Comptage de PUF (part/cm ³) 5 - 100 nm	Comptage total de particules (part/cm ³) 5 - 400 nm
PA01	Fond urbain	Hiver et printemps	31 janv. 2022 -> 5 mai 2022	9 900	11 000
PA18	Fond urbain	Hiver et printemps	31 janv. 2022 -> 5 mai 2022	10 800	12 000
HAUS	Trafic urbain	Hiver et printemps	31 janv. 2022 -> 5 mai 2022	21 900	23 700
BPE	Trafic urbain	Hiver et printemps	31 janv. 2022 -> 5 mai 2022	25 600	27 900

Tableau 12 : Concentrations moyennes en particules ultrafines (PUF) et de particules sur la gamme 5-400 nm (en nombre, arrondies à la centaine) observées lors de la campagne PUF réalisée du 31 janvier au 5 mai 2022

L'appareil de mesure des particules 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 de tailles. Les profils granulométriques moyens pour les quatre sites d'étude sur l'ensemble de la campagne sont présentés dans la figure ci-dessous. **Pour chaque site, le mode majeur observé durant l'hiver et le printemps 2022 est inférieur à 30 nm, voire inférieur à 20 nm pour le site trafic BPE.** Le mode majeur inférieur à 20 nm est caractéristique du mode appelé « Nucléation » et indique qu'une part majoritaire de particules est « fraîchement » émise, notamment par le trafic routier. Le mode majeur inférieur à 30 nm est caractéristique du mode « Aitken 1 », indiquant qu'une part majoritaire des particules est issue du grossissement des particules du mode nucléation par condensation ou coagulation.

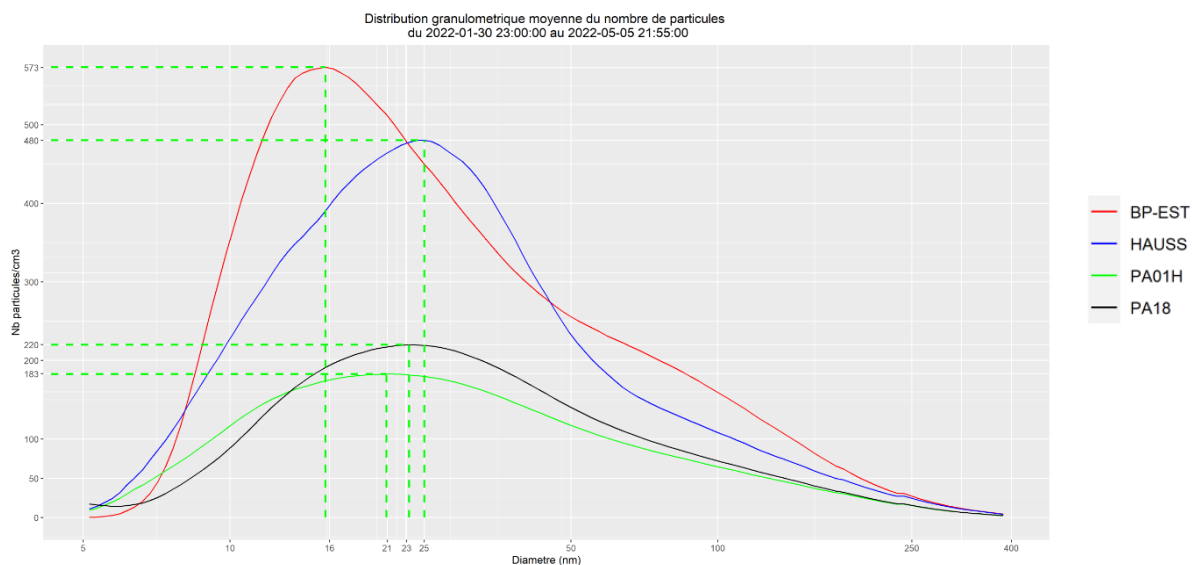


Figure 37 : Distribution granulométrique moyenne sur les 2 sites trafic (BPE en rouge, HAUS en bleu) et les 2 sites de fond (PA01 en vert et PA18 en noir) sur Paris (31 janvier au 5 mai 2022)

Mode majeur (en nm)		
Station	Typologie	Hiver et printemps 2022
PA01	Urbain de fond	21
PA18	Urbain de fond	23
HAUS	Trafic routier	25
BPE	Trafic routier	16

Tableau 13 : Synthèse du mode majeur de chaque site de mesure lors de la campagne hiver-printemps 2022 (31 janvier au 5 mai 2022)

1.1.3. Origine des particules ultrafines à Paris

Impact du trafic routier à Paris

Le trafic routier est une source importante de particules ultrafines à Paris. En effet, les concentrations moyennes en nombre de PUF (gamme 5 à 100 nm) sur la période de mesure sur les sites de proximité au trafic routier sont 2 à 2.5 fois supérieures à ceux enregistrés sur les sites de fond parisiens Paris 1^{er} les Halles et Paris 18^{ème}.

Un profil moyen journalier à deux bosses (le matin et le soir, qui correspond aux heures de pointe du trafic) est observé sur l'ensemble des sites, sur la période hivernale et printanière, ce qui est caractéristique d'un impact lié au trafic routier (Figure 38). L'augmentation des niveaux de concentrations de PUF en matinée est observée en premier sur le Boulevard Périphérique (pic à 6h du matin), puis ensuite au sein de Paris intra-muros comme cela est bien visible sur le site du boulevard Haussmann (augmentation plus tardive). Les niveaux baissent ensuite légèrement pour se stabiliser en cours de journée et se réintensifient en fin de journée après 18h. Ce profil est en lien avec celui de l'évolution du trafic, différent pour le Boulevard Périphérique et les autres axes de Paris Intra-muros.

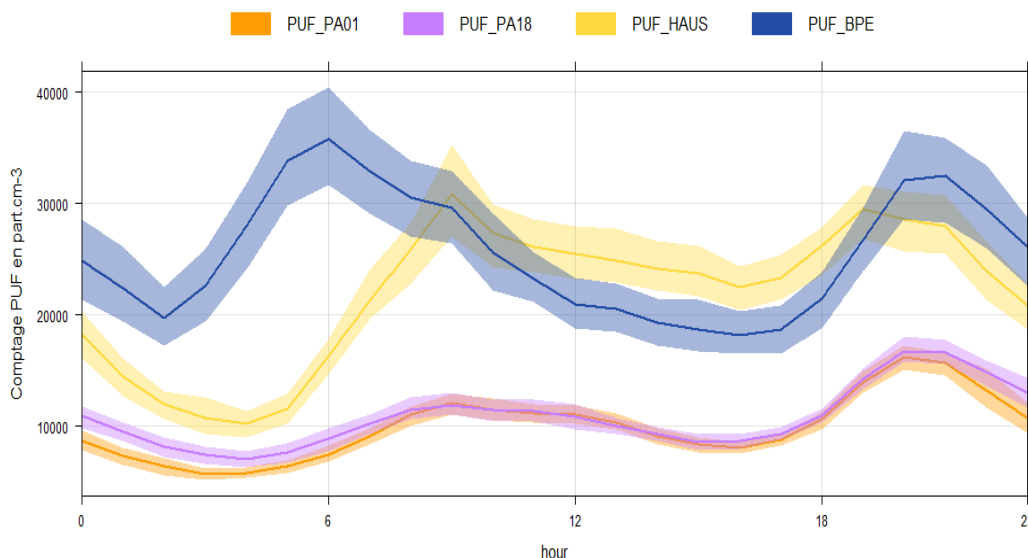


Figure 38 : Profils moyens journaliers du nombre de PUF lors de la campagne hiver-printemps 2022

Le mode majeur identifié sur tous les sites, c'est-à-dire la tranche granulométrique avec le plus grand nombre de particules, **est inférieur à 30 nm, voire inférieur à 20 nm pour le site trafic BPE.**

Le mode majeur inférieur à 20 nm est caractéristique du mode appelé « Nucléation » et **indique qu'une part majoritaire de particules est « fraîchement » émise, notamment par le trafic routier.** **Le mode majeur compris entre 20 et 50 nm** est caractéristique du mode « Aitken 1 », et **indique qu'une part majoritaire des particules est issue du grossissement des particules du mode nucléation** par condensation ou coagulation.

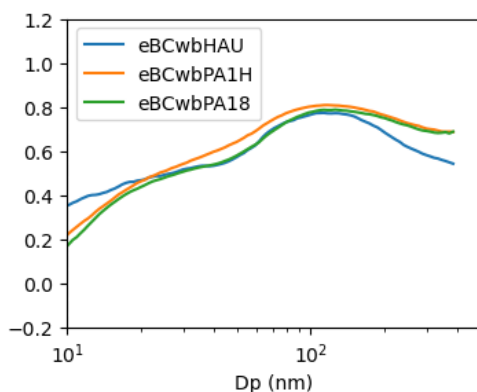
La dynamique d'évolution horaire de chaque taille de particules en nombre montre un profil à deux bosses, caractéristique du trafic routier, sur les sites trafic mais également sur les sites de fond urbain parisiens.

Les mesures de carbone suie et la corrélation de la fraction issue de la combustion d'hydrocarbures (eBCff) avec les concentrations de particules ultrafines montrent également l'influence du trafic routier sur les sites d'étude.

Chauffage au bois à Paris

Les corrélations des mesures de concentrations en nombre de PUF par classe granulométrique et des concentrations de carbone suie, représenté en Figure 39, sont les plus fortes pour les particules

dont le diamètre se situe entre 70 et 100 nm, ce qui correspond à la gamme de taille signature de la combustion de biomasse, que ce soit sur les sites de fond ou le site trafic du boulevard Haussmann.



eBCwb : fraction combustion de biomasse

Figure 39 : Coefficient de corrélation entre les concentrations moyennes en nombre de particules mesurées par le U-SMPS (part/cm³) et les concentrations moyennes de carbone suie issu de la combustion de biomasse (µg/m³) en fonction de la taille de la particule (échelle logarithmique 10-400 nm) pour chaque site de mesure (HAUS en bleu, PA01 en orange, PA18 en vert) [campagne estivale 2023]

Une analyse du profil granulométrique des 2 et 3 mars, journées présentant les niveaux de carbone suie issu de la combustion de biomasse les plus importants de la campagne confirme ce point.

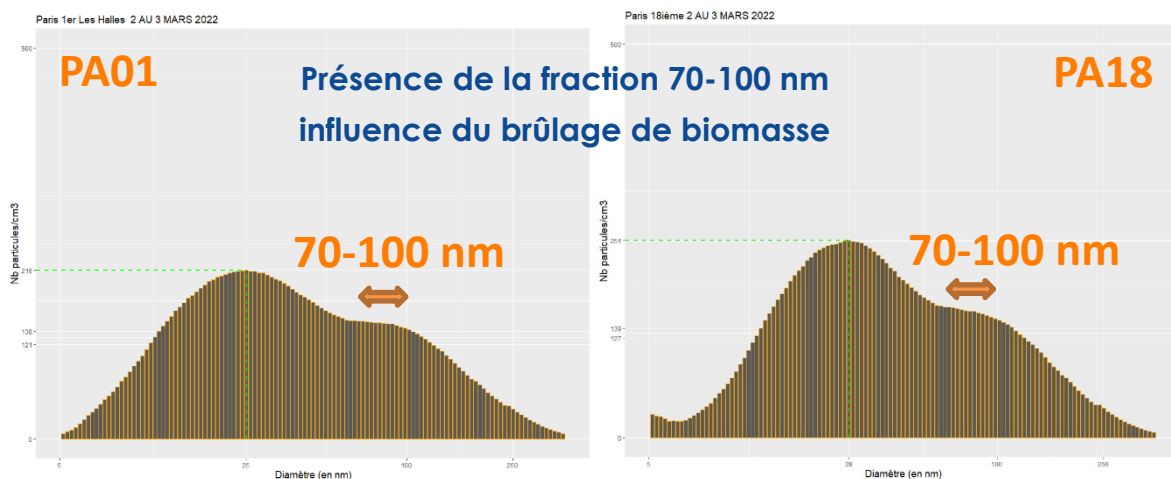


Figure 40 : Profils granulométriques (concentrations en fonction de la taille de la particule) pour les sites de Paris 18ème (PA18) et Paris 1er Les Halles (PA01) – Journées du 2 et 3 mars 2022

Ainsi, **malgré des conditions contrastées sur la période avec peu de jours avec des températures froides, propices à l'utilisation de chauffage au bois, la présence notable à Paris de particules ultrafines issues de la combustion de biomasse (chauffage pour la période hivernale) a été montrée.** Il est à noter que les sites de mesure de fond ayant été choisis dans des zones potentiellement impactées par le chauffage au bois, ces résultats ne permettent pas de conclure sur l'impact du chauffage au bois à l'échelle de l'ensemble de Paris.

Particules issues de transformations dans l'atmosphère

La campagne de mesures a été marquée par une période avec des conditions météorologiques favorables à la formation de particules « fraîches » appelées « Aérosols Organiques Secondaires ». En effet, les températures douces autour de 20°C, les vents faibles et un ensoleillement soutenu qui combinés avec la présence de précurseurs d'aérosol (COV...), ont généré ces nouvelles particules dans la gamme de taille inférieure à 10 nm, ce qui explique que les niveaux les plus forts des particules ultrafines de diamètre inférieur à 30 nm aient été les plus forts lors de l'épisode. **De plus**

cette période a été favorable à l'augmentation d'Aérosols Inorganiques Secondaires (AIS) notamment en fin de soirée et la nuit.

1.2. Caractérisation des PUF à Paris selon la saison

1.2.1. Hiérarchisation du nombre de PUF

Les analyses des mesures des deux campagnes (hiver-printemps et été) montrent d'une part que **quelle que soit la typologie du site de mesure et la saison, le nombre total de PUF** (sur la gamme de 5 à 100 nm) **représente environ 90 % du comptage total de particules** (gamme de 5 à 400 nm).

% PUF (5 – 100 nm) (part/cm3)			
Station	Typologie	Hiver-Printemps (31/01/22 – 05/05/22)	Été (17/07/23 – 15/09/23)
PA01	Fond urbain	90 %	87 %
PA18	Fond urbain	90 %	91 %
HAUS	Trafic urbain	92 %	93 %
BPE	Trafic urbain	92 %	93 %

Tableau 14 : Pourcentage de particules ultrafines (5-100 nm) au sein du comptage total de particules (5-400 nm) mesuré sur les 4 sites d'étude communs entre les deux campagnes parisiennes (hiver-printemps 2022 et été 2023)

D'autre part, les concentrations en nombre total de PUF diffèrent selon la typologie du site de mesure : **les concentrations en nombre de PUF sont 2x à 3x plus importantes à proximité des axes routiers parisiens qu'en situation de fond urbain à Paris.**

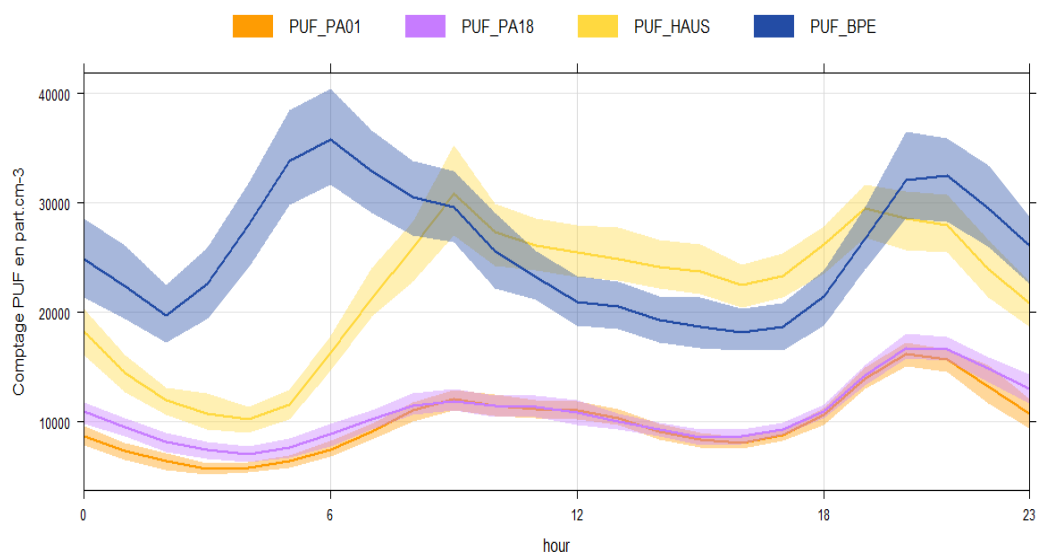
Comptage de PUF (5 – 100 nm) (part/cm3)			
Station	Typologie	Hiver-Printemps (31/01/22 – 05/05/22)	Été (17/07/23 – 15/09/23)
PA01	Fond urbain	9 900	6 400
PA18	Fond urbain	10 800	7 900
HAUS	Trafic urbain	21 900	14 200
BPE	Trafic urbain	25 600	18 800

Tableau 15 : Concentrations en nombre de PUF (5-100 nm) mesurées sur les 4 sites d'étude communs entre les deux campagnes parisiennes (hiver-printemps 2022 et été 2023)

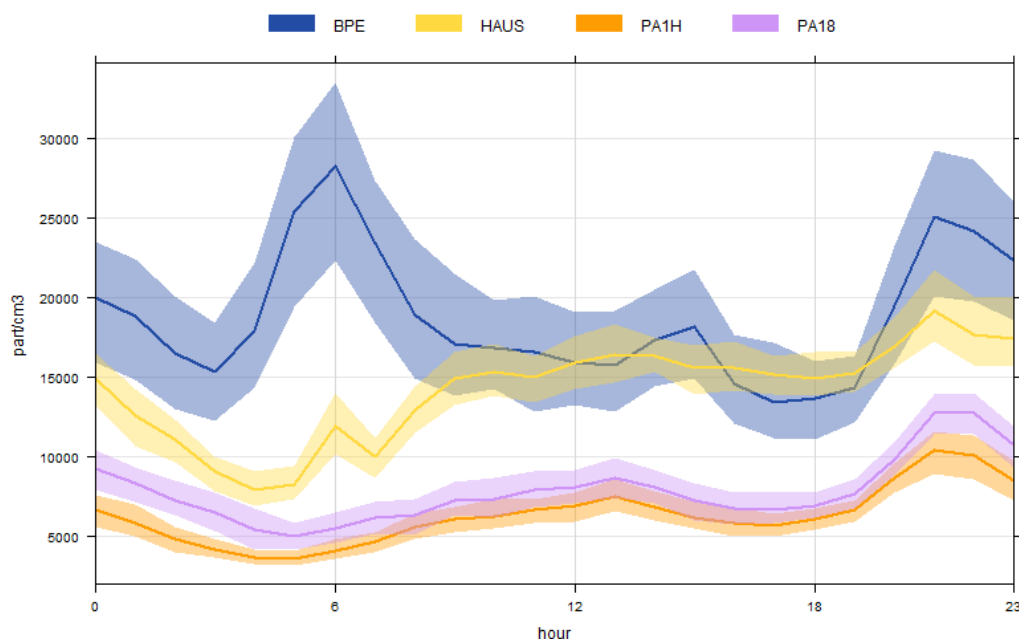
1.2.2. Variabilité temporelle des PUF

Quelle que soit la saison, les concentrations en nombre de PUF présentent une forte variabilité, aussi bien sur les sites de fond que sur les sites trafic. **La différence entre fond et trafic routier est plus ou moins marquée selon l'intensité des sources d'émissions au cours de la journée** : l'écart entre les niveaux mesurés à proximité du trafic routier et les niveaux de fond sont plus marqués lors de la pointe du matin. Cela est lié au fait que pour les sites trafic routier, les niveaux les plus forts sur la journée sont mesurés durant la pointe du matin, alors que pour les sites de fond urbain, cette période correspond aux niveaux les plus bas mesurés). Cet écart est moins important lors de la pointe du soir. En effet, bien que la pointe du soir engendre des niveaux importants mesurés à proximité du trafic routier, des niveaux importants sont également mesurés au niveau de fond urbain parisien, du fait de l'activité d'autres sources, comme le chauffage au bois en hiver.

Le profil moyen journalier des concentrations en nombre de PUF (part/cm³) obtenu pour chacune des campagnes (Figure 41) montre la variabilité des niveaux et l'écart plus ou moins important entre les mesures à proximité du trafic routier (BPE en bleu, HAUS en jaune) et celles du fond urbain parisien (PA01 en orange et PA18 en violet).



(a) Hiver-Printemps 2022



(b) Été 2023

Figure 41 : Profils moyens journaliers du nombre de PUF sur les 4 sites d'étude communs entre les deux campagnes parisiennes (hiver-printemps 2022 et été 2023)

1.2.3. Profil granulométrique moyen

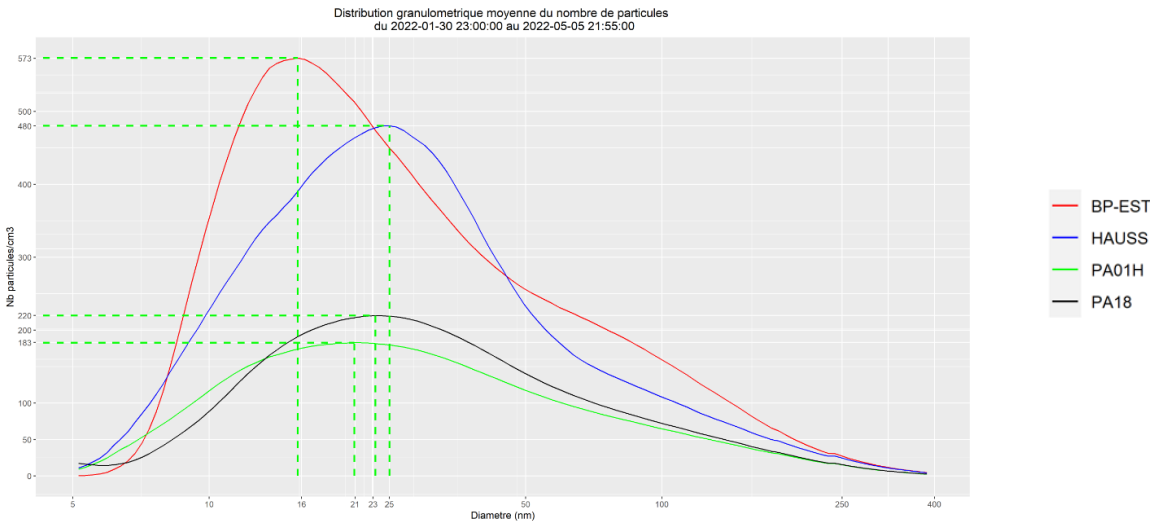
L'analyse des données granulométriques des deux campagnes permet d'identifier le mode majeur, c'est-à-dire le diamètre associé à la concentration maximale du nombre de particules, pour les deux campagnes (Tableau 16). Quelle que soit la saison, le mode majeur mesuré est inférieur à 30 nm, à la fois pour les mesures réalisées à proximité du trafic routier, mais également en situation de fond urbain. Il est plus précisément inférieur à 20 nm pour le site trafic situé au Boulevard

Périphérique Est. Ce résultat indique que le trafic routier est la source majoritaire de PUF à proximité du trafic routier mais également en situation de fond urbain à Paris. En effet, un mode majeur inférieur à 20 nm est caractéristique du mode « Nucléation », indiquant qu'une part majoritaire des particules est fraîchement émise, notamment par le trafic routier. Un mode majeur inférieur à 30 nm est caractéristique du mode « Aitken 1 », indiquant qu'une part majoritaire des particules est issue du grossissement des particules de nucléation par condensation et coagulation.

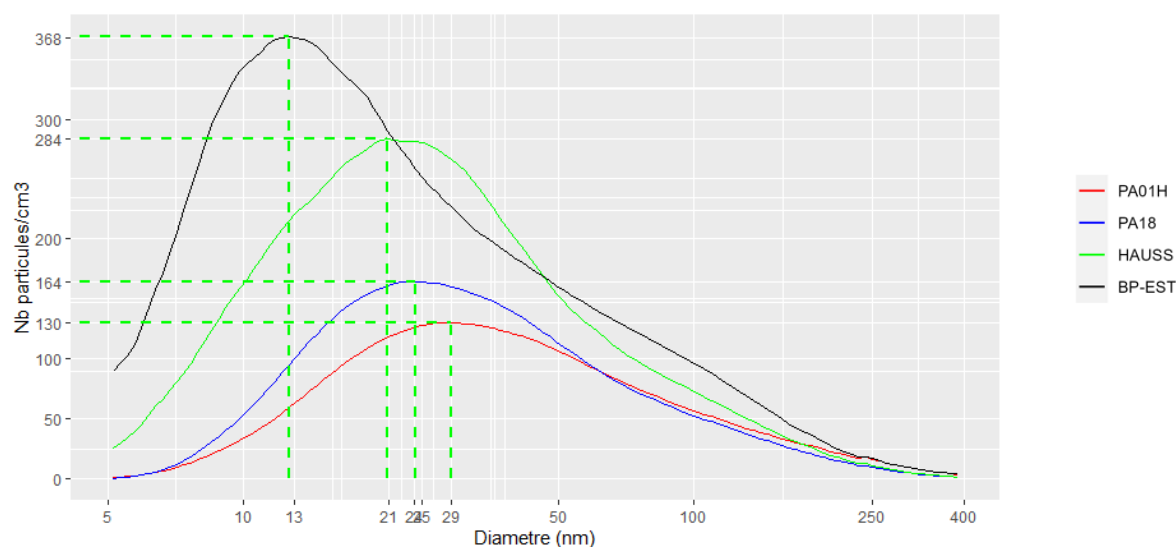
Station	Typologie	Mode majeur (en nm)	
		Hiver-Printemps	Été
		(31/01/22 – 05/05/22)	(17/07/23 – 15/09/23)
PA01	Fond urbain	21	29
PA18	Fond urbain	23	23
HAUS	Trafic urbain	25	21
BPE	Trafic urbain	16	13

Tableau 16 : Synthèse du mode majeur mesuré sur les 4 sites d'étude communs entre les deux campagnes parisiennes (hiver-printemps 2022 et été 2023)

Les profils granulométriques illustrent les concentrations en nombre de particules selon le diamètre (en nm) pour les 4 sites et les 2 périodes de mesure dans la Figure 42. Les profils granulométriques sont globalement cohérents entre la typologie des sites, avec des concentrations les plus fortes mesurées à proximité du trafic routier (les particules les plus fines sont davantage observées sur le Boulevard Périphérique Est, que sur le boulevard Haussmann dans Paris), et les concentrations sont globalement similaires entre les deux sites de fond.



(a) Hiver-printemps 2022 (BPE en rouge, HAUS en bleu, PA01 en vert et PA18 en noir)



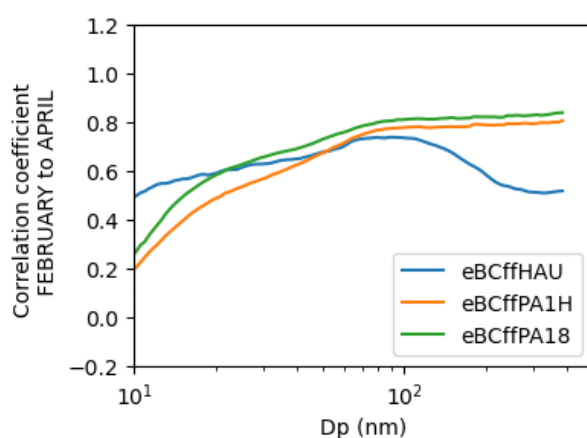
(a) Été 2023 (BPE en noir, HAUS en vert, PA01 en rouge et PA18 en bleu)

Figure 42 : Distribution granulométrique moyenne pour les 4 sites d'étude communs entre les deux campagnes parisiennes (hiver-printemps 2022 et été 2023)

1.3. Origine des PUF à Paris selon la saison

1.3.1. Le trafic routier, une source chronique de PUF dans Paris

Le trafic routier est une source chronique émettrice de particules ultrafines, en particulier de particules de diamètre inférieur à 20 nm. C'est la source prédominante sur les sites parisiens, à proximité du trafic routier, mais également en fond urbain à Paris, comme l'illustre l'évolution journalière avec un pic le matin et un pic le soir, lié au pic d'activité du trafic routier sur ces deux périodes (Figure 41). L'impact de cette source est également confirmé par la corrélation positive entre les mesures de concentrations en nombre de PUF et des mesures de carbone suie issu de la combustion d'hydrocarbures (eBCff), qui est significative pour les sites trafic dès les particules les plus fines (< 20 nm) (Figure 43).



eBCff : fraction combustion d'hydrocarbures

Figure 43 : Coefficient de corrélation entre les concentrations moyennes en nombre de particules mesurées par le U-SMPS (part/cm³) et les concentrations moyennes de carbone suie issu de la combustion d'hydrocarbures (µg/m³) en fonction de la taille de la particule (échelle logarithmique 10-400 nm) pour chaque site de mesure sur la période hiver-printemps 2022 (HAUS en bleu, PA01 en orange, PA18 en vert)

L'expérimentation AIRLAB avec l'installation d'une caméra d'acquisition de données relatives au trafic routier sur le site du boulevard Haussmann (du 25 juillet au 10 septembre 2023), a permis d'affiner les connaissances sur les conditions de trafic au droit de l'axe. Chaque véhicule détecté dans la zone a été attribué à un type de véhicule (VL : véhicule léger, VUL : véhicule utilitaire léger, 2RM : deux-roues motorisé, PL : poids lourds, BUS ou CAR, et vélo) et sa vitesse de circulation moyenne au sein de la zone a été estimée. La Figure 44 illustre la zone de détection et l'exemple d'identification du type de véhicule.

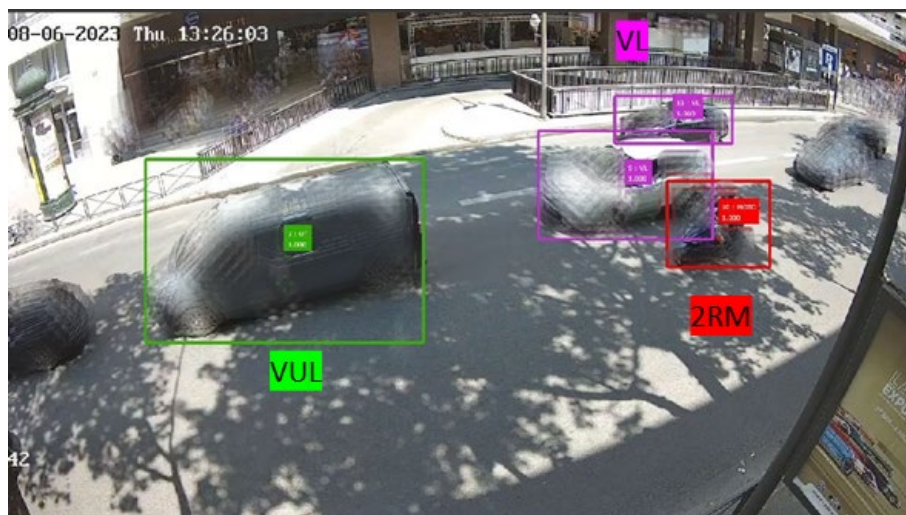


Figure 44 : Zone de détection (fixe et distance latérale d'environ 50 mètres) avec les 4 voies de circulation et exemple d'identification du type de véhicule.

L'exploitation de ces données trafic a permis d'identifier que la majorité des véhicules circulent sur les voies centrales, mais que **la composition du parc en termes de type de véhicules diffère sur les 4 voies de circulation**, comme indiqué dans la Figure 45. De plus, **l'évolution du nombre d'observations au cours de la journée est différente selon le type de véhicules, étant donné leur usage différent.**

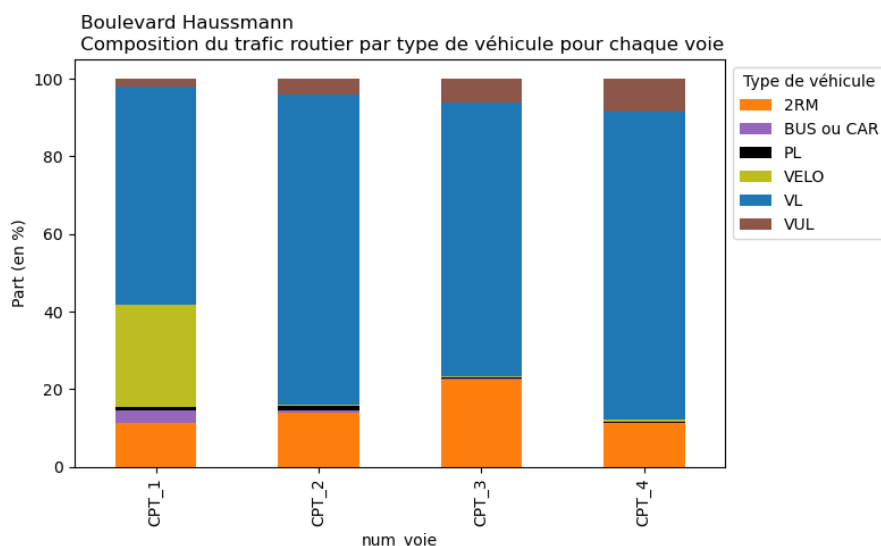


Figure 45 : Composition du trafic routier (par type de véhicule) selon les 4 voies de circulation au droit de la station de mesure Airparif du boulevard Haussmann. La voie 1 est la plus éloignée de la station, la voie 4 est la plus proche.

A partir des données de comptage du nombre de véhicules par type, une analyse a été réalisée afin d'évaluer leur impact sur les surconcentrations en nombre de PUF, pour trois gammes de taille : entre 5 et 20 nm, entre 20 et 50 nm, et entre 50 et 100 nm.

Les évolutions moyennes journalières du surplus de concentrations en nombre de PUF selon les trois gammes de taille et du nombre moyen de véhicules par type représentées en Figure 46 indiquent un lien entre l'activité du trafic routier et les concentrations de PUF. En effet, l'évolution caractéristique du pic du matin et du soir est retrouvée sur le profil du nombre moyen de véhicules (Figure 46, en bas).

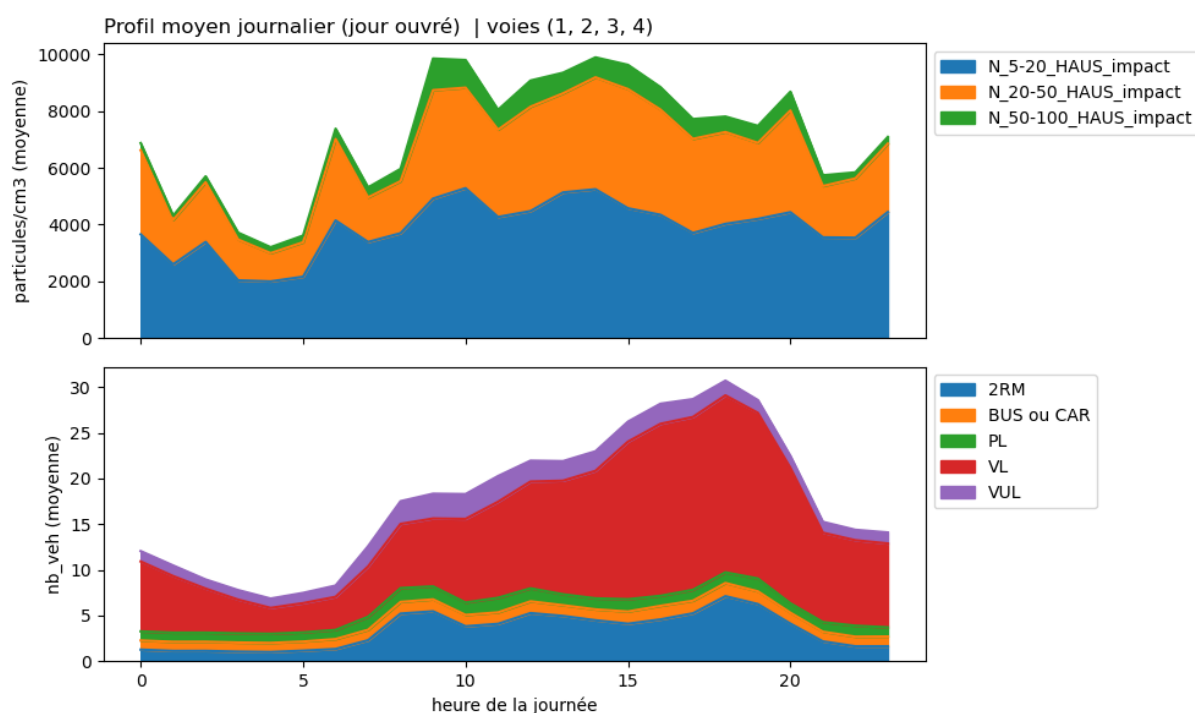


Figure 46 : Evolution moyenne journalière du surplus de concentrations en nombre de PUF par gamme de taille (5-20 nm, 20-50 nm, 50-100 nm), et du nombre moyen de véhicules observés par type de véhicule (hors vélos) [mesures du 25 juillet au 10 septembre 2023]

La valeur du coefficient de corrélation obtenu par type de véhicule et par gamme de PUF est compris entre 0.3 et 0.8, **indiquant que le surplus de concentrations augmente lorsque l'activité du trafic routier augmente pour chaque type de véhicule** (hors vélos).

Pour les VUL, 2RM, BUS ou CAR, VL, **la relation est globalement similaire quelle que soit la gamme de taille**, avec une corrélation entre 0,6 et 0,8. Les faibles différences sont potentiellement liées à des spécificités concernant la carburation des véhicules, comme suggèrent certains travaux de recherche sur les tailles de particules émises par les moteurs essence et diesel (Sun, 2019), mais celles-ci ne peuvent pas être confirmées dans cette étude. Pour les PL, les résultats suggèrent que la relation entre le nombre de poids lourds et le surplus de concentrations en nombre de particules entre 50 et 100 nm est plus importante qu'avec des particules de plus petit diamètre, néanmoins, le faible nombre de poids lourds identifiés sur cet axe, ainsi que leur circulation sur les deux voies les plus éloignées de la station de mesure, ne permettent pas de conclure sur les diamètres de particules émises par ces types de véhicules.

D'autres tests statistiques sur la temporalité de l'impact entre l'activité du trafic routier et les concentrations de PUF mesurées à proximité du trafic routier **suggèrent que l'impact du nombre de véhicules n'est pas perçu instantanément sur les concentrations en nombre de PUF**, mais la méthode mise en œuvre ne permet pas d'estimer le délai à partir duquel le nombre de véhicules identifié à un instant t n'a plus d'effet sur les concentrations mesurées plus tard.

1.3.2. Particules issues de transformations dans l'atmosphère

Les particules secondaires (ou aérosols secondaires), issues de transformations dans l'atmosphère, sont également une source fréquente de pollution sur l'année. Leur formation est visible dans la gamme des PUF par une augmentation des concentrations par rapport aux niveaux de référence, et le diamètre de ces particules au sein des PUF peut différer selon la temporalité ou la nature des particules. En effet, la nature des particules secondaires (organique ou inorganique) peut différer selon les conditions de formation (conditions météorologiques couplées à des niveaux d'émissions anthropiques locales spécifiques).

Lors des deux campagnes de mesure, la formation d'aérosols secondaires a été observée lors de journées spécifiques.

Durant la campagne réalisée à l'hiver-printemps 2022, la journée du 26 mars 2023 a été marquée par des conditions météorologiques favorables à la formation ou augmentation d'Aérosols Organiques Secondaires (AOS) et Aérosols Inorganiques Secondaires (AIS, désignant les sulfates d'ammonium et les nitrates d'ammonium), comme l'illustre la Figure 47. Ces aérosols secondaires sont également dénommés « new particles » dans la littérature scientifique internationale (Gu, 2011), (Rivas, 2020), (Xiao, 2015), (Setyan, 2014).

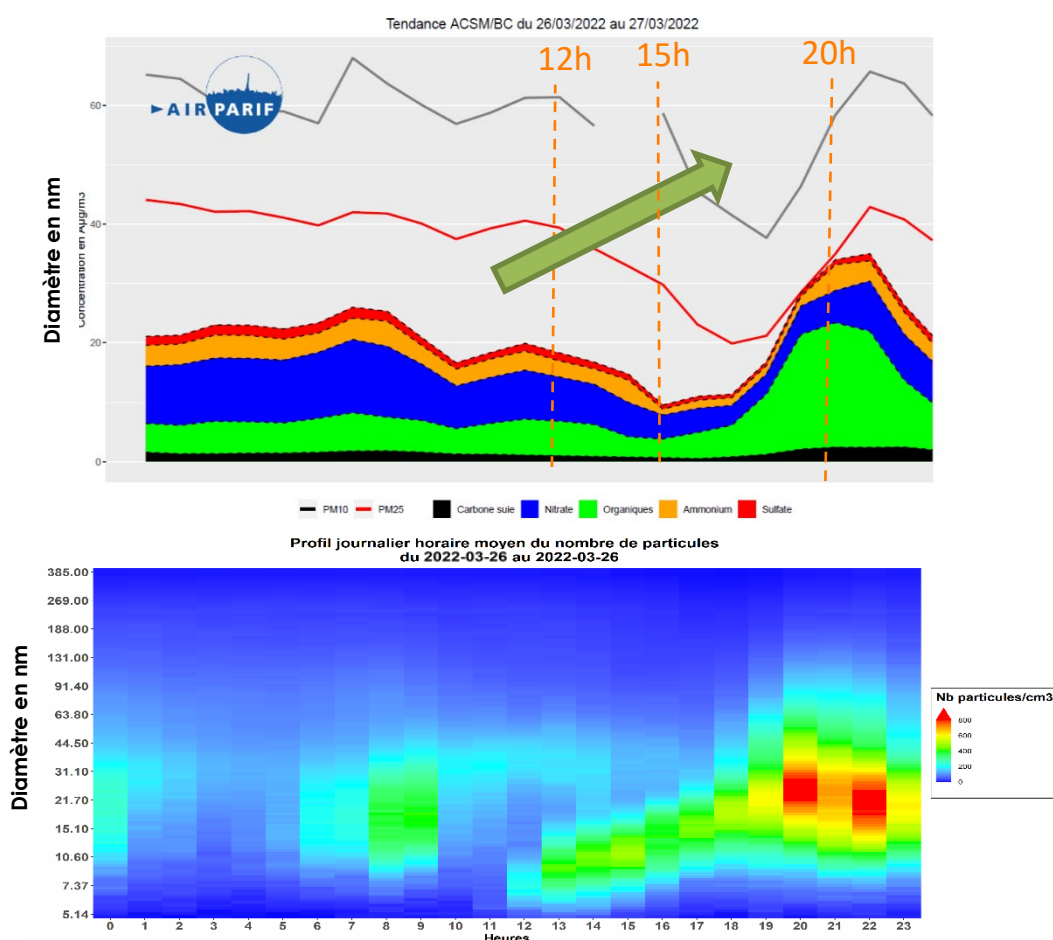


Figure 47 : Journée du 26 mars 2022

(en haut) Profils moyens horaires des concentrations massiques de particules PM₁₀ (courbe noire), PM₂₅ (courbe rouge), de carbone suie (zone noire), de nitrate (zone bleue), d'organiques (zone verte), d'ammonium (zone orangée) et de sulfate (zone rouge) – mesures de l'appareil ACSM ;
(en bas) Profil moyen horaire 2D de la concentration en nombre de particules (part/cm³) par diamètre par heure, sur la station Paris 1^{er} les Halles – mesures de l'appareil SMPS.

En effet, les températures douces autour de 20°C, les vents faibles et un ensoleillement soutenu qui combinés avec la présence de précurseurs d'aérosol (COV...), ont mené à la formation de **formation d'Aérosols Secondaires de diamètre inférieur à 10 nm. Ces composés secondaires, émis fraîchement sur la gamme inférieure à 10 nm gagnent ensuite en diamètre et en masse par phénomènes de condensation et coagulation**, ce qui est montré par l'augmentation progressive du nombre de particules de plus grandes tailles et la baisse du nombre de particules de plus petites tailles. **Leurs niveaux décroissent à partir de 20h en lien avec la fin du rayonnement solaire, mais** il a été observé en parallèle une augmentation des niveaux d'ALS en soirée, accentuée par des conditions peu dispersives en lien avec la hauteur de couche limite (qui détermine le volume d'air dans lequel les polluants vont disperser les émissions), qui est généralement minimale le matin et, dans une moindre mesure le soir, et elle est maximale en milieu de journée.

Durant la campagne réalisée à l'été 2023, trois jours d'épisode de pollution pour l'ozone, soit des conditions favorables également à la formation d'AOS, ont été observés, du 6 au 8 septembre 2023. **L'analyse de la journée du 6 septembre 2023 a mis en évidence une augmentation de la concentration en nombre de PUF sur la gamme de 50 à 100 nm du fait de la formation d'AOS**, à la fois observée sur les sites de fond urbain et trafic routier. L'évolution de la distribution granulométrique des concentrations en nombre de PUF mesuré à Paris est illustrée dans la Figure 48. Les données de composition chimique obtenues par l'appareil ACSM sur le site de référence de Paris 1^{er} Les Halles ont permis de confirmer la nature des particules, à 72 % d'organique sur cette journée, contre 56 % en moyenne annuelle en 2023.

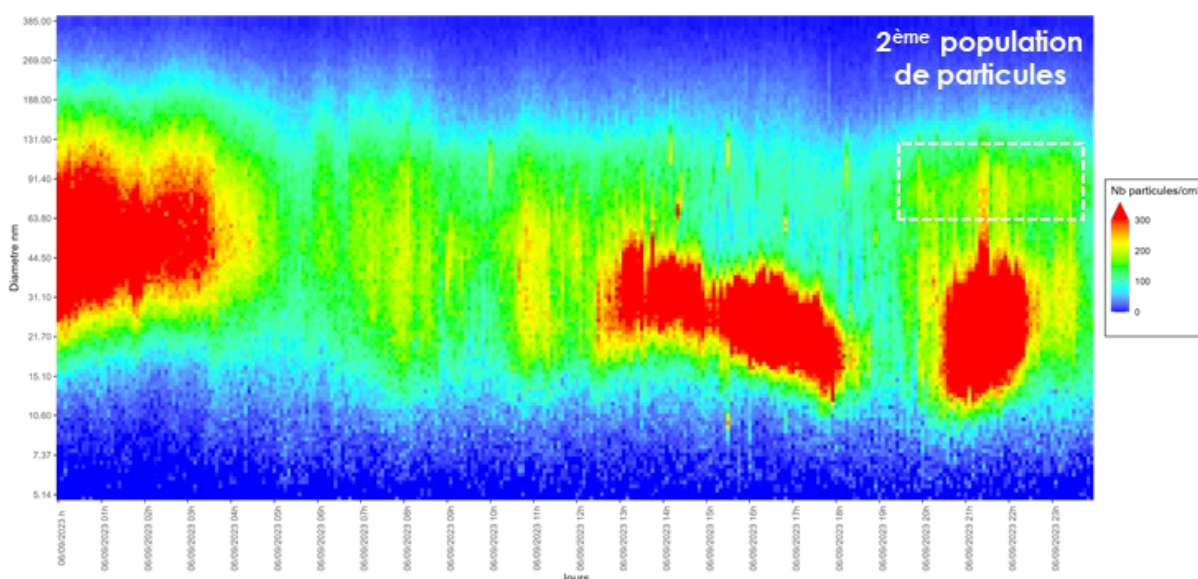


Figure 48 : Évolution journalière « 2D » du nombre de particules par diamètre pour le site PA01 (échelle horaire) issues des mesures du 6 septembre 2023

1.3.3. Le chauffage au bois, une source de PUF en période hivernale

Le chauffage au bois est une source de PUF en période hivernale, émettrice de particules de taille entre 70 et 100 nm (Airparif, février 2022). Malgré des conditions contrastées sur la période hiver-printemps 2022 avec peu de jours avec des températures froides, propices à l'utilisation de chauffage au bois, la présence notable à Paris de particules ultrafines issues de la combustion de biomasse (chauffage pour la période hivernale) a été observée.

En effet, les distributions granulométriques lors des pics d'utilisation du chauffage au bois (indiqués par des forts niveaux de carbone suie issue de combustion de biomasse) montrent clairement la présence d'une deuxième population de particules sur la gamme de 70 à 100 nm (Figure 49).

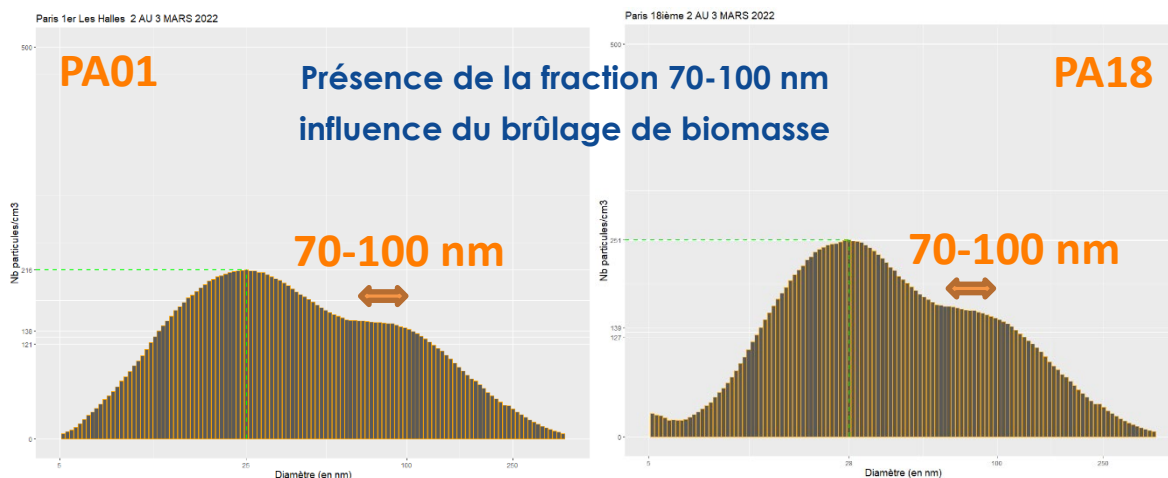


Figure 49 : Profils granulométriques (concentrations en fonction de la taille de la particule) pour les sites de Paris 18^{ème} (PA18) et Paris 1^{er} Les Halles (PA01)

De plus, les corrélations des mesures de concentrations en nombre de PUF par classe granulométrique et des concentrations de carbone suie en prenant en compte les données de l'ensemble de la période de mesure hiver-printemps 2022, sont les plus fortes pour les particules dont le diamètre se situe entre 70 et 100 nm, que ce soit sur les sites de fond ou le site trafic du boulevard Haussmann (Figure 50).

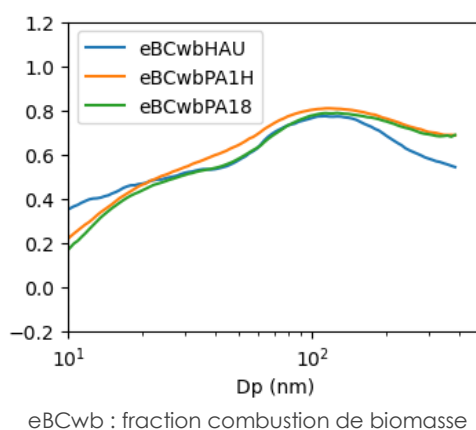


Figure 50 : Coefficient de corrélation entre les concentrations moyennes en nombre de particules mesurées par le U-SMPS (part/cm³) et les concentrations moyennes de carbone suie issu de la combustion de biomasse (µg/m³) en fonction de la taille de la particule (échelle logarithmique 10-400 nm) pour chaque site de mesure (HAUS en bleu, PA01 en orange, PA18 en vert)

L'analyse des différences de niveaux mesurés entre les différents sites de fond urbain, du fait de spécificités en termes de type de chauffage et logement (Haussmannien, foyers ouverts, maisons individuelles), n'a pas pu être conclusive du fait du faible nombre de journées propices au chauffage au bois durant la période hivernale.

2. Comparaison à d'autres métropoles

Dans cette partie, l'analyse des concentrations en nombre de particules ultrafines mesurées au sein de Paris sur les sites à proximité du trafic routier et à distance des axes, est enrichie avec une

comparaison à ceux observés dans d'autres métropoles européennes disposant de mesures semblables, dont Londres, Amsterdam, Francfort et Dresde.

Une première analyse a été menée sur la base des résultats de campagne de mesure parisienne durant la période hivernale-printanière 2022 (Airparif, Décembre 2023). Plusieurs limitations ont été soulevées, que ce soit les conditions météorologiques différentes ou les différences de méthodes de mesure et les gammes granulométriques utilisées, montrant la nécessité d'un travail d'harmonisation pour rendre comparable les données de comptage réalisées par les différents acteurs internationaux de la surveillance de la qualité de l'air. Les comparaisons ont été complétées et sont présentées dans les paragraphes suivants après une présentation d'une publication récente sur la variabilité des niveaux de particules ultrafines en Europe.

2.1. Etude européenne pluri-annuelle des niveaux de PUF

A l'échelle internationale, une étude majeure publiée en 2023 a été menée dans le cadre **du projet RI-Urbans¹**. Ce projet vise à développer un système de surveillance de la qualité de l'air qui complète les dispositifs existants, en se concentrant particulièrement sur les nanoparticules et les fractions de matière particulaire. L'objectif est de permettre aux administrations et agences de santé européennes de mieux identifier et mesurer les polluants atmosphériques, afin de les réduire efficacement et limiter leur impact sur la santé humaine. Cinq études pilotes sont menées dans neuf villes européennes (Athènes, Barcelone, Birmingham, Bucarest, Helsinki, Milan-Bologne, Paris, Rotterdam-Amsterdam et Zurich) pour tester et démontrer l'efficacité des services développés dans le projet dans différents environnements urbains.

Airparif participe activement à ce projet dans le cadre d'une partie portant sur l'analyse statistique des sources de matière organique particulaire et des travaux relatifs au potentiel oxydant des particules ainsi qu'aux polluants émergents, dont les particules ultrafines.

Concernant les particules ultrafines, le projet a permis de dresser un état des lieux des concentrations et des distributions de particules en nombre sur 16 sites internationaux, dont 15 en Europe et 1 aux États-Unis (Figure 51). Cette étude a permis de comparer les gammes granulométriques sur des périodes pluri-annuelles, de 2017 à 2019. Paris, ayant commencé la mesure permanente des particules ultrafines en octobre 2019, n'a pas pu être intégrée à l'étude. Les paragraphes suivants décrivent comment les données récoltées sur Paris depuis octobre 2019 s'insèrent dans les comparaisons des différents sites européens de cette étude.

¹ Research Infrastructures Services Reinforcing Air Quality Monitoring Capacities in European Urban & Industrial Areas, programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne, n°101036245

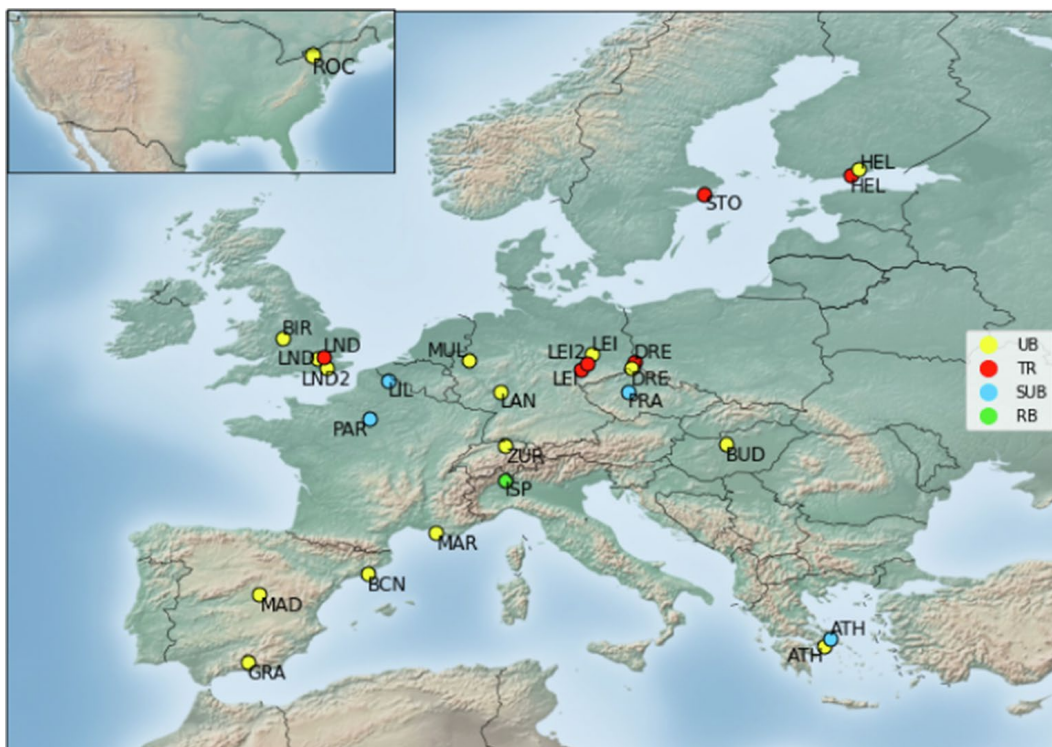


Figure 51 : Carte des 16 sites urbains en jaune, trafic en rouge, sub-urbains en bleu et ruraux en vert repris de l'étude RI-Urbans (2017–2019 period, Trechera et al., 2023)

En effet, dans le cadre du programme d'étude pluri-annuel de la variabilité spatiale et temporelle des particules ultrafines en Ile-de-France, Airparif a équipé le site de Paris 1^{er} Les Halles d'un SMPS afin d'assurer le suivi permanent des particules en nombre et par classe granulométrique en octobre 2019, en complément de l'installation d'un appareil CPC de comptage total du nombre de particules. L'étude pluri-annuelle (Abbou, 2024) a analysé les mesures de ce site de fond sur Paris sur l'année 2022. De plus, les campagnes de mesure parisiennes en partenariat avec la Ville de Paris et Breathe Cities, réalisées lors de l'hiver-printemps 2022 et lors de l'été 2023, complètent les résultats de cet article en fournissant des données complémentaires sur les concentrations parisiennes mesurées lors des deux saisons en situation de fond urbain, mais également à proximité du trafic routier, ce qui permet une comparaison avec les autres sites internationaux sur les deux typologies de site.

Les concentrations moyennes en nombre de particules allant de 10 à 25 nm (notées « N10-25 », représentatives dans cette étude du mode Nucléation), celles de 25 à 100 nm (notées « N25-100 », représentatives dans cette étude du mode Aitken) et de 10 à 100 nm (notées « N10-100 », représentatives de la gamme de taille des PUF) observées à Paris en 2022 et sur les deux campagnes saisonnières 2022/2023 ont été comparées à celles mesurées dans quinze villes européennes (et une aux États-Unis) sur la période 2017–2019. La décision de mener cette comparaison pour l'année 2022 a été guidée par le retour à une activité anthropique normale, bien qu'il soit à noter que les émissions du trafic routier à Paris sont sur une tendance à la baisse et que les niveaux de l'année 2022 ne sont donc pas au même niveau que ceux d'avant 2020 (Les émissions de NO_x du trafic routier représentent 25 800 tonnes en 2022, contre 31 700 tonnes en 2019, soit une diminution entre ces deux années d'environ 19 % (Airparif, Mai 2025)). Les résultats de cette comparaison sont présentés dans le Tableau 17 pour les sites de fond et dans le Tableau 18 pour les sites à proximité du trafic routier.

Urban Station	N ₁₀₋₂₅ (part/cm ³)	σ ₁₀₋₂₅ (part/cm ³)	N ₂₅₋₁₀₀ (part/cm ³)	σ ₂₅₋₁₀₀ (part/cm ³)	N _{PUF} (N ₁₀₋₁₀₀) (part/cm ³)	σ ₁₀₋₁₀₀ (part/cm ³)
Paris PA01 (année 2022)	3,688	2,301	4,591	2,701	8,279	4,530
Paris PA01 (été 2023)	2,128	1,404	3,988	2,818	6,116	3,903
Paris PA01 (hiver-printemps 2022)	4,455	2,652	4,926	2,095	9,381	5,386
Athens	1,503	1,312	5,338	4,642	6,841	5,448
Barcelona	4,245	4,141	5,560	3,820	9,805	6,641
Birmingham	661	632	2,197	1,813	2,858	2,263
Budapest	3,691	3,075	4,973	3,333	8,664	5,785
Dresden	1,935	2,322	3,038	2,529	4,973	4,019
Granada	3,129	2,677	5,629	4,160	8,758	6,230
Helsinki	1,419	1,526	2,144	1,764	3,563	2,913
Langen	4,628	4,491	4,074	2,762	8,702	5,890
Leipzig	3,236	4,076	3,524	2,818	6,760	5,691
London_1	614	560	2,983	2,433	3,597	2,790
London_2	540	405	2,912	2,256	3,452	2,509
Madrid	1,997	1,908	4,806	3,632	6,803	4,942
Marseille	2,679	1,760	5,894	3,881	8,573	5,160
Mülheim	2,810	2,139	5,058	3,375	7,868	4,955
Rochester	1,434	1,428	2,370	1,849	3,804	2,867
Zürich	296	264	2,845	2,156	3,141	2,336

Tableau 17 : Concentrations moyennes en nombre de particules et leurs écarts-types pour N₁₀₋₂₅, N₂₅₋₁₀₀, N₁₀₋₁₀₀ (N_{PUF}) de 16 sites urbains de fond (période 2017-2019, Trechera et al., 2023) comparés à Paris mesurées au site PA01 (année 2022, campagne hiver-printemps 2022 et campagne été 2023).

Les concentrations les plus élevées de N_{PUF} ont été enregistrées à Barcelone, Grenade, Langen, Budapest, Marseille, Paris et Mülheim (de 7 868 à 9 805 particules/cm³), s'en suivent les villes d'Athènes, Madrid, Leipzig et Dresde (de 4 973 à 7 868 particules/cm³) et enfin de Rochester, Helsinki, Londres_1, Londres_2, Zurich et Birmingham (de 2 858 à 3 804 particules/cm³). Les campagnes parisiennes réalisées en hiver-printemps 2022 et à l'été 2023 se positionnent de part et d'autre de la concentration annuelle moyenne mesurée à Paris en 2022. Cela indique que **les deux campagnes parisiennes, réalisées en période hivernale et estivale permettent d'estimer les concentrations potentiellement minimales et maximales saisonnières pouvant être mesurées lors d'une année**, donnant donc un intérêt à leur analyse.

Pour les concentrations de N₁₀₋₂₅, elles varient globalement entre 540 et 4 628 particules/cm³, avec des concentrations les plus élevées en Europe centrale, orientale et sud-ouest (de 2 800 à 4 600 particules/cm³, incluant Paris avec 3 688 particules/cm³) et les niveaux les plus bas en Europe du Nord, au Royaume-Uni et dans le nord des États-Unis (de 700 à 1 400 particules/cm³, sauf pour Zürich avec 300 particules/cm³). Cette distribution spatiale des concentrations de N₁₀₋₂₅ peut être associée aux villes situées en Europe méridionale, principalement affectées par des processus de photo-nucléation favorisés par des conditions de température et d'ensoleillement intenses. En outre, d'autres contributeurs, tels que les émissions du trafic routier et divers processus physico-chimiques, peuvent également influencer les concentrations de particules dans cette gamme de tailles.

Pour les concentrations de N₂₅₋₁₀₀, les concentrations moyennes en nombre de particules enregistrées dans des conditions de fond urbain variaient de 2 144 à 5 894 particules/cm³. Comme indiqué par Trechera et al. (2023), il est important de noter des tendances marquées Sud-Centre-Nord (S-C-N) pour les N₂₅₋₁₀₀, avec des concentrations plus élevées en Europe méridionale, notamment à Madrid, Athènes, Barcelone et Marseille (de 4 800 à 5 900 particules/cm³), puis des concentrations intermédiaires (de 2 800 à 5 100 particules/cm³) observées à Zürich, Leipzig, Mülheim, Budapest et Paris (4 591 particules/cm³). Les niveaux de particules les plus bas ont de

nouveau été enregistrés en Europe du Nord, au Royaume-Uni et dans le nord des États-Unis (de 2 100 à 3 000 particules/cm³).

Ces résultats sont illustrés sous la forme d'un histogramme hiérarchisant les villes selon leur concentration totale en nombre de PUF (Figure 52).

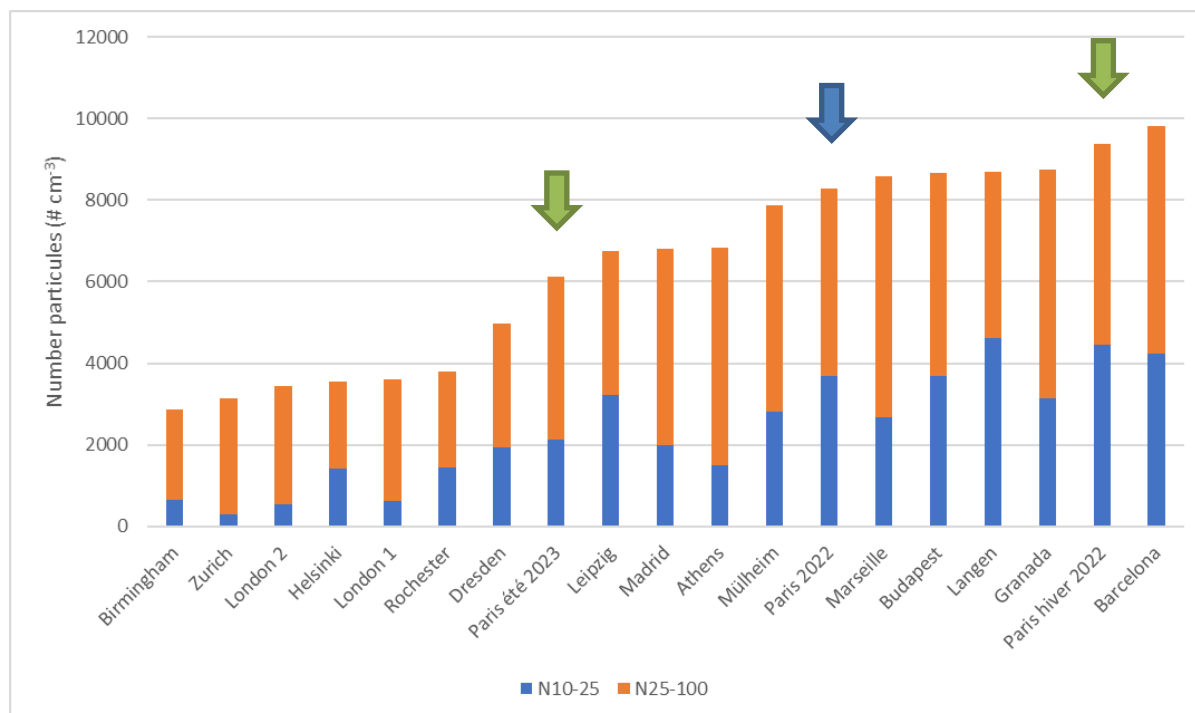


Figure 52 : Hiérarchisation des concentrations en Npuf, combinaison de N₁₀₋₂₅ en bleu et de N₂₅₋₁₀₀ en orange, sur les différents sites de fond internationaux sur la période 2017-2019 issue de Trechera et al., 2023 comparées à la ville de Paris sur PA01H (année 2022, campagne Paris hiver-printemps 2022 et campagne Paris été 2023).

Le positionnement sur la Figure 52 montre que **la ville de Paris présente des concentrations relativement élevées** de particules pour les N_{PUF}, N₁₀₋₂₅ et N₂₅₋₁₀₀, aussi bien en moyenne annuelle que sur les deux périodes de campagne. Ces concentrations peuvent être principalement attribuées aux émissions du trafic routier, comme c'est le cas pour d'autres villes européennes aux caractéristiques similaires (Abbou et al., 2024).

Cette comparaison est également réalisée sur les mesures de particules ultrafines à proximité immédiate du trafic routier. Le Tableau 18 présente les résultats obtenus dans le cadre du projet RI-Urbans pour 6 sites trafic dans cinq villes européennes (Dresde, Helsinki, Leipzig, Londres et Stockholm) et les compare aux mesures des campagnes parisiennes menées en période hivernale-printanière 2022 et estivale 2023 sur les sites du Boulevard Périphérique Est (BPE) ainsi que sur le boulevard Haussmann (HAUS).

Urban Station	N ₁₀₋₂₅ (part/cm ³)	σ ₁₀₋₂₅ (part/cm ³)	N ₂₅₋₁₀₀ (part/cm ³)	σ ₂₅₋₁₀₀ (part/cm ³)	N _{PUF} (N ₁₀₋₁₀₀) (part/cm ³)	σ ₁₀₋₁₀₀ (part/cm ³)
Paris BPE (été 2023)	8,309	7,220	6,456	4,592	14,766	11,237
Paris HAUS (été 2023)	5,827	3,347	6,064	3,678	11,891	6,181
Paris BPE (hiver-printemps 2022)	13,178	9,484	11,064	7,150	24,243	15,832
Paris HAUS (hiver-printemps 2022)	9,833	5,605	10,831	6,304	20,664	11,151
Dresden	3,647	2,939	3,892	2,499	7,539	4,655
Helsinki	6,091	6,704	3,357	2,816	9,448	8,698
Leipzig_1	6,711	5,725	5,272	3,062	11,983	7,750
Leipzig_2	5,249	5,252	5,075	3,368	10,324	7,331
London	1,961	1,270	6,753	3,943	8,714	5,045
Stockholm	1,646	1,441	2,756	1,807	4,402	2,848

Tableau 18 : Concentrations moyennes en nombre de particules et leurs écarts-types pour N₁₀₋₂₅, N₂₅₋₁₀₀, N₁₀₋₁₀₀ (N_{PUF}) de 6 sites trafic routier (période 2017-2019, Trechera et al., 2023) comparés à Paris, mesurées aux sites BPE et HAUS (campagne Paris hiver-printemps 2022 et campagne Paris été 2023).

Les concentrations en PUF (N_{PUF}) sont comprises entre 24 243 particules/cm³ pour la campagne hiver 2022 sur le Boulevard Périphérique parisien et 4 402 particules/cm³ pour le site de Stockholm en moyenne sur les années 2017-2019 illustrant le fort impact des émissions trafic sur le Boulevard Périphérique au regard d'un autre site européen. Outre cette spécificité du Boulevard Périphérique du fait d'un volume de trafic bien supérieur à un site de typologie « trafic urbain », le site d'Hausmann sur la campagne été 2023 présente des niveaux similaires à Leipzig (environ 12 000 part/cm³). Les 5 autres sites présentent des concentrations en PUF plus faibles qu'à Paris.

Ce constat sur la prédominance du trafic routier comme source principale des PUF se reflète dans les concentrations mesurées sur la gamme N₁₀₋₂₅, qui peuvent devenir majoritaires par rapport à la gamme N₂₅₋₁₀₀ sur le Boulevard Périphérique et le boulevard Hausmann. Ces résultats indiquent la présence de particules fraîchement émises, directement issues du trafic routier. Une tendance similaire est observée sur les sites de Helsinki et Leipzig (1 et 2). En revanche, les sites de Dresden, Londres et Stockholm, qui présentent les niveaux les plus bas et des concentrations de N₁₀₋₂₅ inférieures à celles de N₂₅₋₁₀₀, semblent être impactés par le trafic routier dans des proportions significativement inférieures à ce qui est observé à Paris. Par ailleurs, **cette différence peut être liée à l'intensité de l'activité du trafic routier** (ex : volume de trafic) **mais également à des différences en termes de composition du trafic routier, des conditions de circulation et de la configuration et de l'environnement des sites** (configuration des voies de circulation, distance de mesure à la route, etc.).

Comme pour le fond, la comparaison des sites trafic européens peut être illustrée sous forme d'un histogramme permettant de hiérarchiser les sites selon les concentrations en nombre total de PUF (Figure 53).

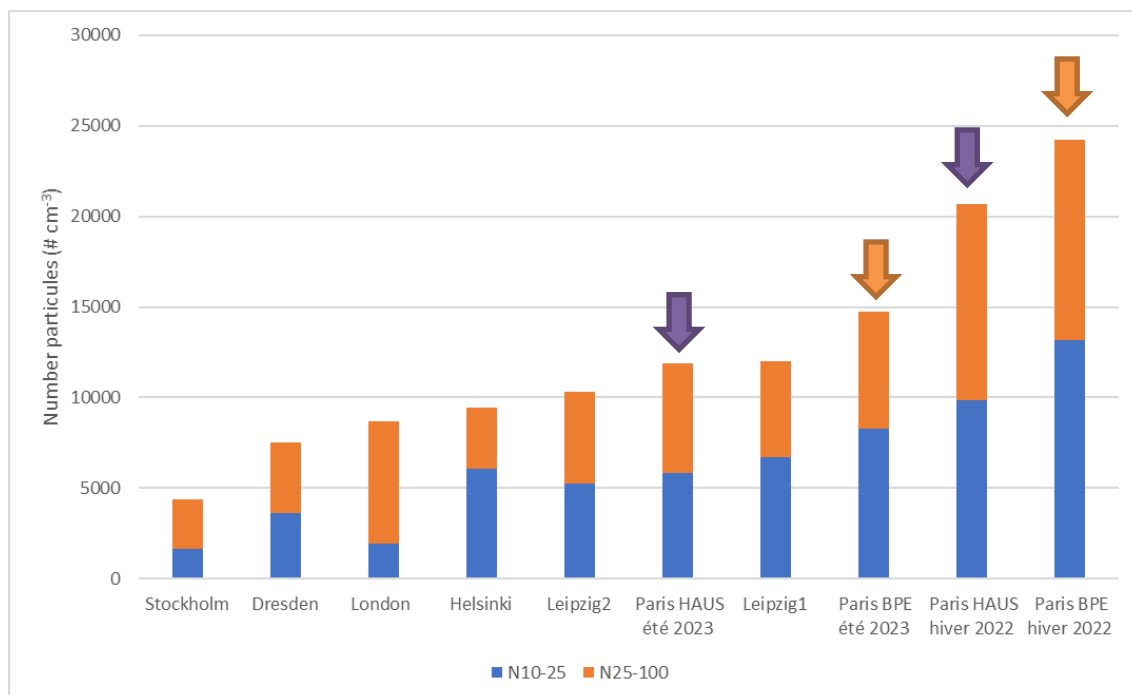


Figure 53 : Hiérarchisation des concentrations en N_{PUF} , combinaison de N_{10-25} en bleu et de N_{25-100} en orange, sur les différents sites de trafic internationaux sur la période 2017-2019 issue de Trechera et al., 2023 comparées à la ville de Paris sur le Boulevard périphérique (BPest) et sur le Boulevard Haussmann (Haus) sur les campagnes hiver 2022 et été 2023.

Sur la Figure 53, il apparaît clairement de par son positionnement en tête de classement que Paris présente des émissions trafic bien plus impactantes que les villes de Suède, d'Allemagne (à l'exception de Leipzig) et d'Angleterre quelle que soit la saison. En période hivernale, la part de N_{10-25} sur les deux sites trafic parisiens peut être supérieure au nombre total de PUF des autres sites trafic européens.

Ce constat s'applique aussi bien au Boulevard Périphérique qu'au boulevard Haussmann, illustrant l'ampleur des émissions liées au trafic routier dans l'agglomération parisienne et leur impact sur le nombre des PUF, particulièrement sur les plus fines d'entre elles situées dans le mode Nucléation.

Toutefois, il est important de mentionner que les technologies de comptage des particules utilisées dans ces études peuvent varier d'une ville à l'autre, ce qui peut nuancer certains éléments de cette comparaison. Ce manque d'harmonisation en termes d'instruments, de chaîne d'étalonnage et de traitement des données devrait bientôt être standardisé pour rendre ces analyses strictement comparables.

De plus, **les distributions granulométriques permettent d'affiner les différences sur les concentrations en nombre de PUF** de différentes typologies, comme vu dans l'analyse des données sur Paris, mais permet également d'observer des différences de granulométries pour des sites de même typologie. L'article de Trechera et al. (2023) fournit des distributions granulométriques pour quatre typologies de sites, dont les typologies de fond urbain et de trafic urbain des sites internationaux de l'étude (Figure 75, Annexe IV. Figures supplémentaires). Afin de compléter les enseignements de cette publication, les distributions granulométriques des mesures sur Paris en situation de fond urbain et à proximité du trafic routier des deux saisons sont comparées à celles d'autres sites internationaux dans la partie suivante.

2.2. Comparaison à d'autres métropoles sur les périodes d'études

Dans cette partie, la comparaison des concentrations en nombre de particules ultrafines entre différents sites européens est affinée en s'intéressant particulièrement à l'effet saisonnier entre la période hivernale et estivale sur Paris, Londres, Amsterdam, Dresde, Francfort, à la fois sur des sites situées à proximité du trafic routier que sur des sites plus éloignés des axes de circulation. En effet, les deux campagnes parisiennes, réalisées en période hivernale et estivale ont permis d'estimer les concentrations potentiellement minimales et maximales pouvant être mesurées lors de l'année à Paris. Ainsi, les niveaux saisonniers des autres sites européens sont estimés en prenant en considération les périodes des campagnes parisiennes.

De plus, la différence de granulométrie des particules selon les sites européens et la saison est analysée dans cette partie.

Pour remplir cet objectif, Airparif a pris contact avec une dizaine d'experts en Europe pour disposer de résultats de mesures de particules ultrafines pour chaque ville sur la même période que la campagne parisienne et d'informations sur le matériel de mesure utilisé, et les configurations des sites de mesure.

2.2.1. Présentation des sites

Des concentrations en nombre de particules ont pu être collectées sur 8 autres sites, sur une gamme de taille allant de 5 à 3000 nm, incluant la gamme des particules ultra fines (diamètre inférieur à 100 nm) :

- **Typologies de site** : fond urbain, trafic urbain
- **Sources locales de PUF** : trafic routier et trafic aérien notamment
- **Appareils de mesure** : marque, configuration, gamme de tailles mesurées

Le Tableau 19 présente les caractéristiques de chaque site de mesure. Il reprend les types d'appareil et leur gamme de taille associés pour chacun des sites de l'étude. L'hétérogénéité de ces configurations sont à prendre en compte dans les comparaisons des résultats.

Typologie	Ville	Station	Appareil	Gamme de taille (nm)
Fond Urbain	Paris (AIRPARIF)	- Les Halles - Paris 18 ^{ème}	SMPS	10 – 400
	Londres (NPL)	Honor Oak Park	SMPS	10 – 800
	Dresden (LfULG)	Winckelmann	SMPS	10 – 800
	Francfort (HLNUG)	- Riedberg - Schwanheim - Raunheim	SMPS	10 – 500
	Amsterdam (GGD)	Ookmer	CPC	7 – 3000
Trafic Urbain	Paris (AIRPARIF)	- BPÉst - Haussmann (rue canyon)	SMPS	10 – 400
	Londres (NPL)	Marylebone Road (rue canyon)	SMPS	10 – 800
	Francfort (HLNUG)	Friedberger-Landstrasse (rue canyon)	SMPS	10 – 500

Tableau 19 : Liste des sites de mesure dont les niveaux de particules ont été comparés selon la typologie (fond urbain, trafic urbain).

Afin d'harmoniser et de garantir la comparabilité des analyses effectuées dans cette section, le diamètre minimum d'analyse a été fixé à 10 nm sur les sites où cette résolution est techniquement

possible (par exemple sur les sites parisiens du Boulevard Périphérique Est et du boulevard Haussmann). Cette approche assure une cohérence méthodologique et permet une meilleure interprétation des résultats en tenant compte de la contribution très importante des particules les plus fines dans le comptage total de particules.

Sites de fond urbain

Londres, Angleterre (NPL)

La Figure 54 présente la station de fond urbain retenue pour la ville de Londres : Honor Oak Park, est située au cœur de l'enceinte du King's College Sports Ground Brockley Rise en bordure d'un stade d'entraînement de revêtement synthétique. Ce site londonien a été ajouté aux sites de fond initiaux recensés dans le premier rapport de la campagne Hiver-Printemps 2022.



Figure 54 : Photographie et localisation de la station Londres Honor Oak Park, Angleterre

Dresde, Allemagne (LfULG)

La Figure 55 présente la station de fond urbain retenue pour la ville de Dresde : **Dresden-Winkelmann**, qui est située dans une zone résidentielle avec peu de trafic.



Figure 55 : Photographie et localisation de la station Dresden-Winkelmannstrasse, Allemagne

Francfort, Allemagne (HLNUG)

La Figure 56 présente les trois stations de fond urbain retenues pour la ville de Francfort :

- **Francfort-Schwanheim**, aux portes de Francfort
- **Francfort-Riedberg**, au sein de la ville de Francfort
- **Raunheim**, en dehors de Francfort

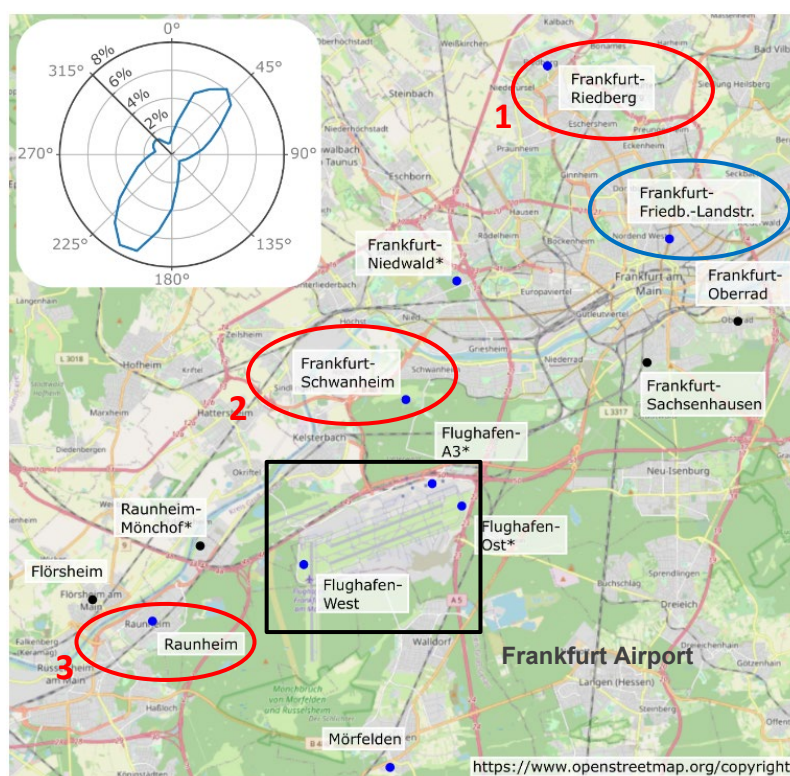


Figure 56 : Carte des stations de mesures du réseau HLNUG dans la région de Francfort en Allemagne. L'aéroport de Francfort est encadré en noir. Encerclé en rouge : sites de fond urbain. Encerclés en bleu : site de trafic urbain. La rose des vents prend en compte les mesures de septembre 2017 à août 2021 inclus. (Ditas, Rose, & Jacobi, 2022)

Amsterdam, Pays-Bas (GGD Amsterdam)

La Figure 57 présente la station retenue pour la ville d'Amsterdam : la station **Amsterdam-Ookmer** est localisée dans une zone avec quelques habitations, peu de routes très fréquentées, pas de port ou de zone industrielle dans les environs immédiats. Elle est en revanche située dans la zone d'influence de l'aéroport d'Amsterdam Schiphol.

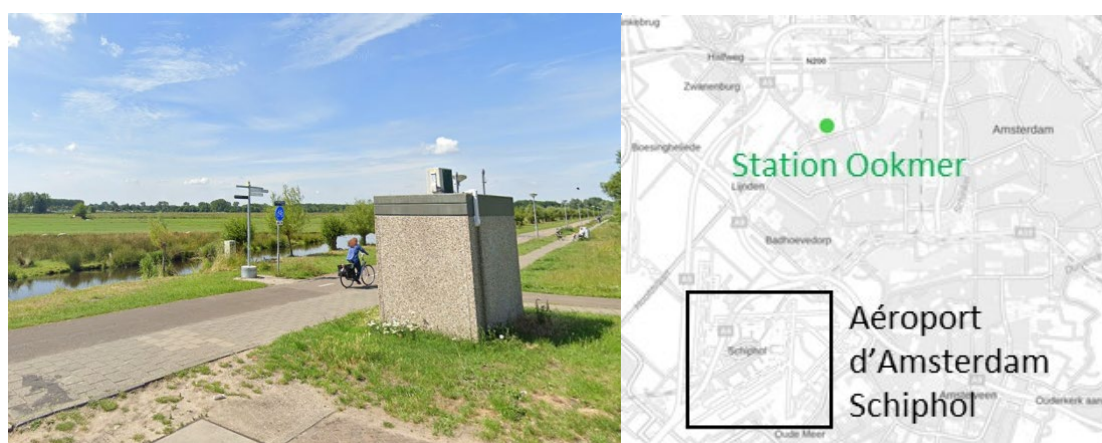


Figure 57 : Photographie et localisation de la station Amsterdam-Ookmer, Pays-Bas

Londres Marylebone Road, Grande-Bretagne (NPL)

La Figure 58 présente la station de trafic urbain retenue pour la ville de Londres : la station **Marylebone Road**. Située à environ 1 mètre de la route Marylebone (A501) qui permet de rentrer ou sortir du centre-ville de Londres de Nord-Est en Sud-Ouest, la station est considérée comme étant en typologie rue canyon, avec une largeur de voirie d'environ 40 mètres. La station est en immédiate proximité d'une voie de bus. La circulation est fréquemment congestionnée avec entre 25 000 et 30 000 véhicules par jour en moyenne au point de comptage le plus proche. La hauteur de prélèvement est de 3.5 mètres pour l'appareil SMPS.

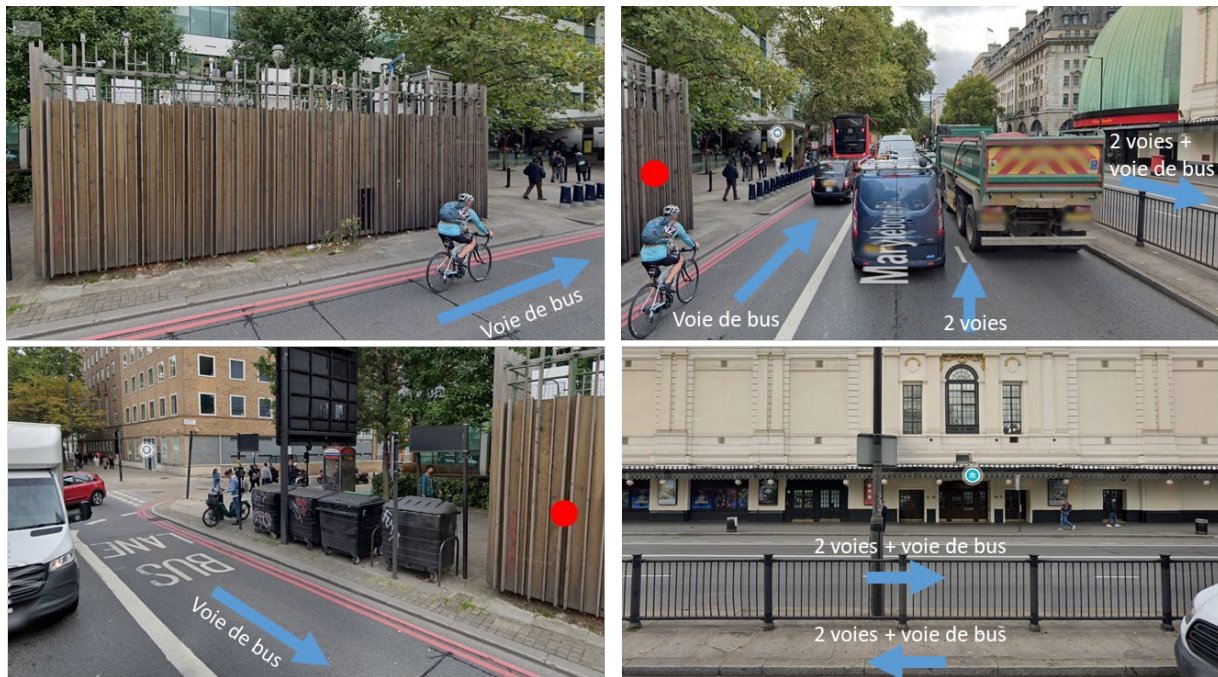


Figure 58 : Photographie et environnement de la station Marylebone Road à Londres, Angleterre.

Francfort Friedberger-Landstrasse, Allemagne (HLNUG)

La station de trafic urbain retenue pour la comparaison avec Paris pour la ville de Francfort est la station **Francfort-Friedberger Landstrasse**, un site en rue canyon. La Figure 59 montre la localisation de la station.



Figure 59 : Photographie de la station Francfort Friedberger-Landstrasse

Les caractéristiques tant de volume et conditions de trafic que celles du prélèvement (distance à rue, hauteur de prélèvement) de ces trois sites trafic urbains en rue canyon sont présentées dans le Tableau 20. Ces paramètres influencent directement les niveaux de PUF mesurés.

Caractéristique	Paris boulevard Haussmann	Londres Marylebone Road	Francfort Friedberger-Landstrasse
Typologie	Trafic – rue canyon	Trafic – rue canyon	Trafic – rue canyon
Hauteur de mesure	2.4 m (SMPS) 3.8 m (eBC)	3.5 m	3.96 m
Distance à la route	1.8 m	1 m	2 m
Densité de trafic	Dense	Dense	Dense
Nombre de véhicules / j	38 000 (en 2017)	25 000 – 30 000	33 500

Tableau 20 : Caractéristiques des stations de trafic urbain en typologie rue canyon à Paris boulevard Haussmann, Londres Marylebone Road et Francfort Friedberger-Landstrasse

Des différences de volume de trafic sur les différents axes surveillés sont à noter (pouvant aller jusqu'à 35 % en moins de véhicules circulant en moyenne par jour au droit de la station Londres Marylebone Road que sur le site parisien du boulevard Haussmann). Des différences dans les modalités de prélèvements sont également à prendre en compte dans les interprétations : hauteurs de prélèvements plus élevées à Londres et Francfort, distance à l'axe plus faible à Londres mais le long d'une voie de bus, soit une mesure en réalité plus éloignée du flux de trafic dense.

Sites influencés par le trafic aérien

Francfort, Allemagne (HLNUG)

Les sites de la région de Francfort présentent potentiellement un **impact du trafic aérien** de l'aéroport de Francfort, selon les directions de vent. En effet, une étude de l'impact de l'aéroport de Francfort réalisée sur les niveaux mesurés de Septembre 2017 à Août 2021 inclus montre que, lorsque le vent provient de l'aéroport et que l'aéroport est en service (de 5h à 23h), le niveau de particules est supérieur à celui relevé lors de conditions de vent provenant des autres directions (Figure 60).

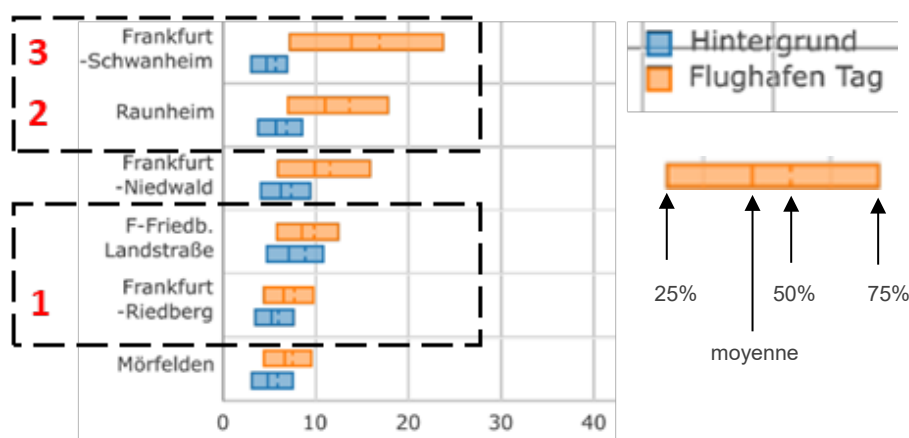


Figure 60 : Nombre de particules total (nb part/cm³, en milliers) mesurés sur les différents sites dans la région de Francfort (mesure SMPS de 10 à 500 nm). Les niveaux sont représentés sous la forme de boîte à moustache (schéma à droite), en bleu pour les niveaux de fond et en orange pour les niveaux lorsque le vent provient de la direction de l'aéroport sur les heures de service (5h à 23h).

Amsterdam, Pays-Bas (GGD Amsterdam)

La station Amsterdam-Ookmer est la station la plus proche de l'aéroport d'Amsterdam-Schiphol. Elle peut être influencée par ses émissions lorsque le vent provient de la direction de l'aéroport. Une campagne a été réalisée en 2018 et 2019 (H.J.P. Helmink, 2020) afin de quantifier les niveaux de particules selon les directions de vent et l'impact potentiel de l'aéroport. Les résultats de cette campagne présentés dans le Tableau 21 illustrent cette influence.

	Année 2018	Année 2019		Moyenne 2018-2019
Comptage total de particules (part/cm ³)	13 950	15 264	Direction de vent provenant de l'aéroport	17 000 – 30 000
			Autres directions de vent	8 000 – 13 000

Tableau 21 : Concentrations de particules (7 – 3000 nm) à la station Amsterdam-Ookmer sur les années 2018 et 2019 et influence de l'aéroport Amsterdam-Schiphol.

2.2.2. Comparaison des niveaux de PUF des différentes villes européennes

Facteurs d'influence

Différents facteurs influencent les concentrations de particules, que ce soit la technique de mesure et les appareils utilisés, l'environnement de la station de mesure, l'intensité et l'ampleur des émissions sur la zone étudiée et plus spécifiquement à proximité du site de mesure mais aussi les conditions météorologiques et climatiques des villes.

Métrologie : Comptage total ou comptage par taille des particules

- Les appareils de type CPC mesurent le nombre total de particules sur une gamme de taille de particules donnée (de 7 à 3000 nm pour les sites étudiés).
- Les appareils de type U-SMPS trient les particules par gamme de diamètres et mesurent le nombre de particules dans chacune de ces classes. Le nombre total de particules sur une gamme donnée (5 à 400 nm, 10 à 800 nm, 16 à 600 nm, ..., selon les sites étudiés) est donc la somme des comptages de chaque classe de taille donnée. Des comparaisons réalisées à Paris entre avril et décembre 2022 montrent un écart d'environ 30 % entre les résultats du SMPS et ceux d'un CPC.

Les gammes de taille des appareils CPC et SMPS dépendent du modèle et peuvent donc être différentes selon les sites de mesure, notamment sur différents sites européens. Le Tableau 19 présente pour chaque site, l'appareil de mesure (CPC ou SMPS) et la gamme de taille mesurée. En effet pour ces sites, le comptage effectué par les appareils SMPS commence à 5 nm ou 10 nm selon les sites, et celle des appareils CPC commence à 7 nm. Pour les mesures parisiennes, objet du présent rapport, les particules ultrafines dont le diamètre est inférieur à 100 nm représentent environ 90 % de la fraction 5-400 nm, aussi bien sur les sites de fond que sur les sites trafic (Tableau 14)

Etant donné que tous les sites, sauf Amsterdam, disposent de mesures des particules ultrafines (PUF) selon leur granulométrie, l'analyse ci-dessous est réalisée sur les concentrations en nombre total de particules (N_{tot}) et décliné sur les concentrations en nombre de PUF (N_{PUF}).

Pour le site d'Amsterdam ne présentant pas de méthode de comptage permettant le calcul des PUF, une estimation des concentrations en PUF est réalisée en considérant qu'environ 90 % du nombre total de particules sont des PUF.

Pour les sites de Londres, les données SMPS sur l'année 2022 portaient sur la gamme de mesure 16-600 nm. A partir de 2023, les données de comptage de particules par granulométrie portent sur la gamme de 10-800 nm, permettant ainsi une comparaison du nombre de particules avec un début de comptage à 10 nm, comme pour les autres sites de l'étude. La proportion de particules sur la gamme 10-16 nm pour les deux sites londoniens a donc été estimée sur les données 2023 et appliqué aux données de l'année 2022 pour rendre les résultats comparables entre les deux périodes mesurées. Ils sont respectivement de 6 % sur le site de fond d'Honor Oak Park et de 11 % pour le site trafic de Marylebone Road. Le site de Marylebone Road présente une part plus élevée sur la gamme 10-16 nm ce qui est cohérent avec la source trafic impactant les concentrations en nombre de particules majoritairement les plus fines dans le mode Nucléation.

Environnement de la station

La configuration de la station de mesure, distance aux sources, environnement de la station, influencent les niveaux mesurés :

- Sources locales : par exemple le trafic routier, le trafic aérien, les industries, le type de chauffage (bois, gaz, réseau de chaleur, électrique, etc.), etc.
- Ampleur des sources : flux de trafic, composition du parc, congestion, etc. pour le trafic routier par exemple.
- Politiques publiées liées à ces sources d'émissions, par exemple, la mise en œuvre de Zones à Faible Emissions (ou « Low Emission Zone » en anglais) pour le trafic routier, l'interdiction du chauffage au bois en tant que moyen principal et ou secondaire, etc.
- Distances aux sources spécifiques (axe routier notamment)
- Typologie de la ville et la densité urbaine

Climat et conditions météorologiques

Les conditions météorologiques (température, pluviométrie, vent, ensoleillement, etc.) sont liées au climat d'une région donnée : les métropoles européennes retenues pour la comparaison sont associées à un climat tempéré (océanique à continental pour Francfort).

Parmi les conditions météorologiques, la température, la direction et la vitesse de vent, et notamment la stabilité atmosphérique influencent particulièrement les niveaux de polluants.

En l'absence de mesures permanentes sur l'ensemble des sites parisiens étudiés, les analyses de données ont été réalisées pour chaque site sur les périodes des campagnes de mesure de Paris, soit du 1^{er} février au 30 avril 2022 (pour la période hivernale-printanière) **et du 17 juillet au 15 septembre 2023** (pour la période estivale). Cette considération ne garantit pas que les températures, direction et vitesse de vents, et les conditions favorisant ou non la dispersion des polluants atmosphériques soient identiques sur les différents sites.

Sites de fond urbain

La Figure 61 présente les concentrations moyennes en nombre total de particules (N_{tot}) et en nombre de PUF (N_{puf}), observées sur les périodes des campagnes de mesure saisonnières réalisées sur Paris, pour chaque site de fond urbain européen pour lesquels ces données ont pu être collectées sur la même période d'analyse.

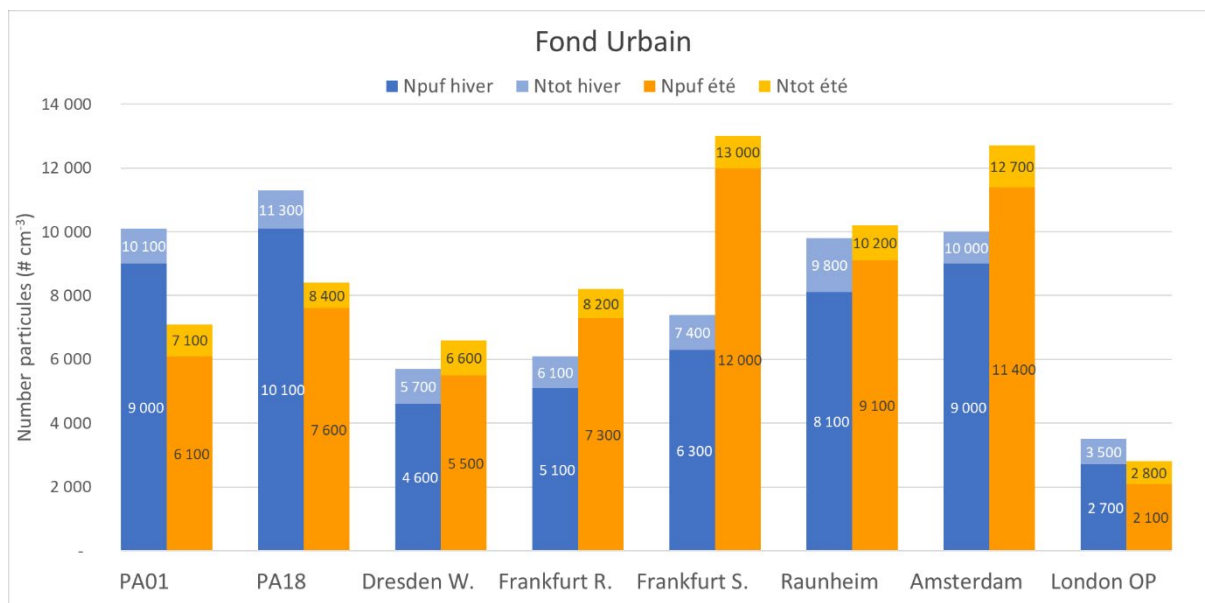


Figure 61 : Concentrations moyennes en nombre de particules (N_{tot}) et en PUF (N_{puf}) observées sur les périodes de la campagne hivernale-printanière (1^{er} février – 30 avril 2022) et de la campagne estivale (17 juillet – 15 septembre 2023) pour les sites de fond urbain étudiés (exprimées en particules/cm³). Les concentrations sont arrondies à la centaine.

En situation de fond, les niveaux estivaux en nombre total de particules (N_{tot}) des 8 sites analysés dans cette étude varient entre 2 800 et 13 000 particules/cm³. À titre de comparaison, durant la période hivernale-printanière, ces niveaux étaient compris entre 3 500 et 11 300 particules/cm³ sur les mêmes sites.

Sur la gamme granulométrique des PUF (N_{puf}), les concentrations sont comprises entre 2 100 et 12 000 particules/cm³ sur la période estivale 2023 contre 2 700 et 10 100 particules/cm³ sur la période la période hivernale-printanière 2022. Les particules ultrafines mesurées entre 10 et 100 nm représentent une part largement majoritaire du nombre de particules totales. En été, cette part varie sur les 8 sites présentés entre 75 % pour Londres Honor Oak Park à 92 % pour Francfort S. Ce ratio est compris entre 77 % pour Londres Honor Oak Park à 90 % pour le site de fond de surveillance sur Amsterdam pour la période hivernale. Ces proportions sont cohérentes avec les différentes études menées sur le sujet. **Ces ratios sont relativement stables sur les différents sites entre l'été et l'hiver** avec des écarts allant de -3% pour Paris les Halles à +7% sur les sites de Raunheim et Francfort S., illustrant des sources impactant majoritairement la gamme des PUF.

La gamme des concentrations de PUF (N_{puf}) sur les deux saisons en situation de fond, telle qu'affichée dans cette étude, se situe entre 2 100 et 12 000 particules/cm³, représentant la gamme moyenne de référence en situation urbaine de fond en Europe.

Au travers des deux campagnes réalisées à Paris, il a été observé que **les concentrations en Ntot et Npuf en période estivale à Paris sont environ 30 % moindres que les concentrations enregistrées pendant la période hivernale-printanière** (-32 % pour le site de Paris 1^{er} Les Halles (PA01) et -25 % pour le site de Paris 18^{ème} (PA18) sur les concentrations en N_{puf}). Ce constat met en évidence l'impact significatif des particules primaires liées aux chauffages au bois résidentiels en période hivernale, une source bien identifiée sur la ville de Paris (Airparif, Campagne de mesure francilienne sur les particules ultrafines (PUF) - situation de fond - hiver 2020-2021, février 2022), (Airparif, Décembre 2023).

Sur le site de Londres, ce même impact saisonnier est observé avec des concentrations lors de la période hiver-printemps 2022 estimées 22 % plus faibles que celles lors de l'été 2023. Cet abattement est néanmoins plus faible au regard de Paris, du fait que **Londres présente des niveaux en Ntot et Npuf 3 fois inférieurs à ceux enregistrés sur Paris, à la fois en période hivernale et en période estivale.**

Pour les mêmes périodes d'analyse, les 5 autres sites européens enregistrent un impact saisonnier inverse, avec des niveaux plus élevés en été qu'en hiver. Cette différence peut s'expliquer par la configuration spécifique de certains sites, qui peuvent être moins influencés par les émissions primaires hivernales (par exemple, en raison de leur éloignement des sources de chauffage/zones résidentielles). De plus, ces sites peuvent être davantage affectés par des processus naturels (végétation) et anthropiques de formation de particules, principalement liés à la présence dans l'atmosphère de précurseurs gazeux secondaires, tant organiques qu'inorganiques. En présence de conditions météorologiques favorables (telles que température, pression, humidité et ensoleillement), ces précurseurs peuvent alors se transformer en particules dites secondaires présent en grand nombre.

L'augmentation des concentrations en N_{puf} en été par rapport à la période hivernale-printanière varie grandement, de 12 % sur le site de Raunheim jusqu'à 90 % sur le site de Francfort S., illustrant ainsi l'influence des phénomènes locaux liés aux conditions météorologiques sur les concentrations en nombre de PUF, ainsi qu'aux sources naturelles de polluants précurseurs tels que les COV.

La variabilité de l'évolution saisonnière a été étudiée dans l'article scientifique (Trechera, 2023) ; illustrant **3 cas sur 3 sites urbains de fond en Europe**.

- 1- **Une hausse du nombre de particules estivales** au regard de la saison hivernale (cas de Leipzig en Allemagne) ;
- 2- **Un cycle saisonnier non défini** (cas de Barcelone en Espagne) ;
- 3- **Une baisse du nombre de particules estivales** au regard de la saison hivernale (cas d'Athènes en Grèce).

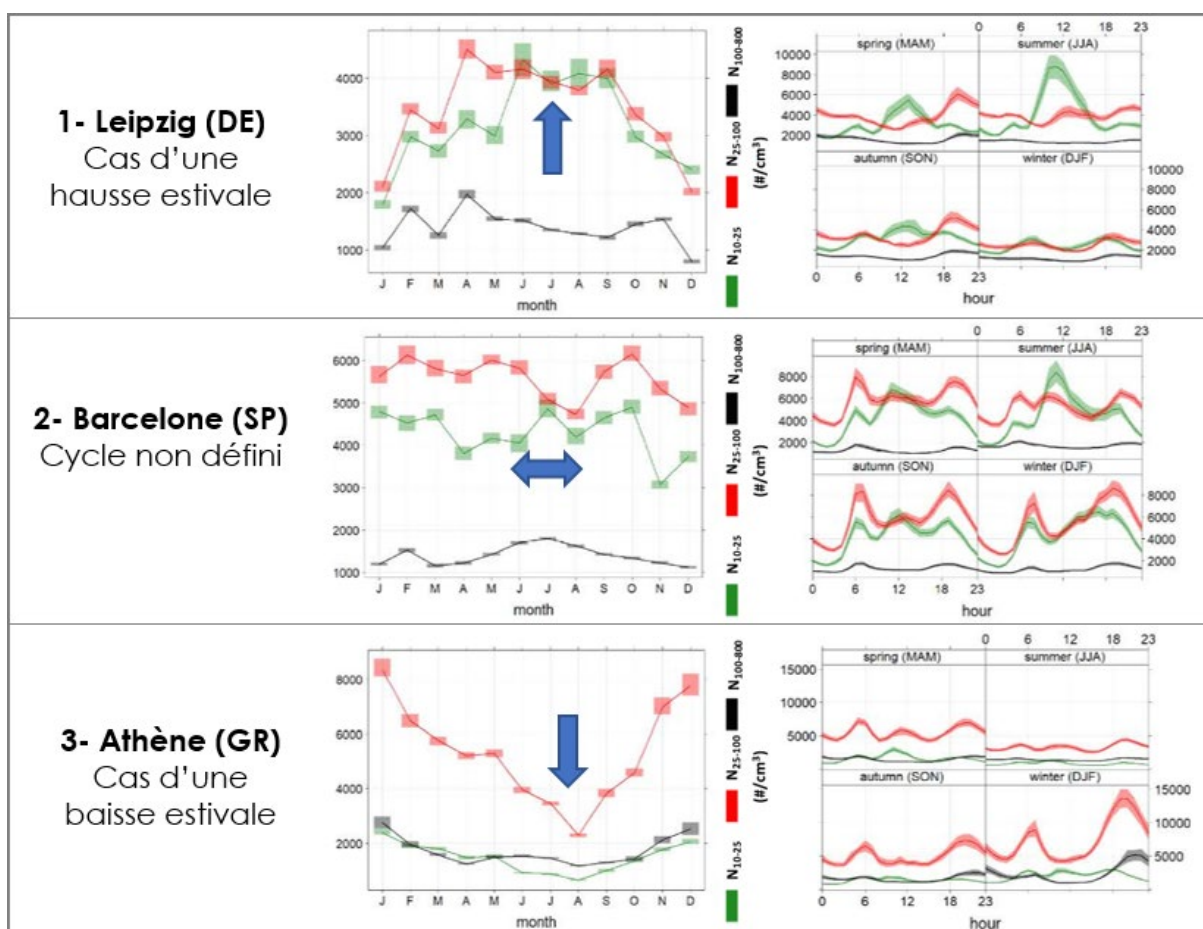
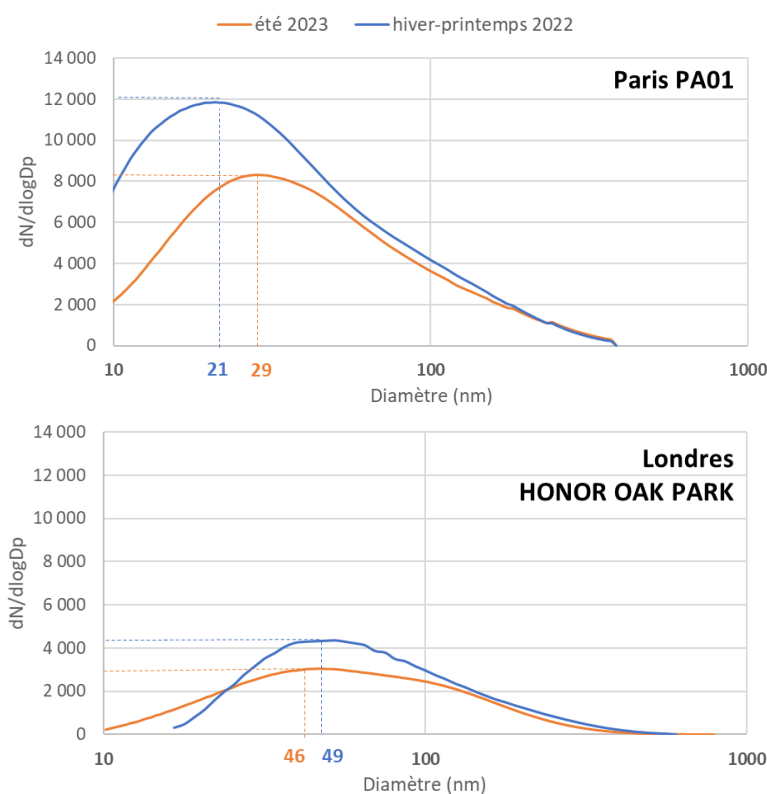


Figure 62 : Tendances mensuelles et saisonnières du nombre de particules pour trois stations de fond urbaines en Europe entre 2017-2019, concentrations en nombre de particules entre 10 et 25 nm (en vert), entre 25 et 100 nm (en rouge) et entre 100 et 400 nm (en noir) (Trechera et al, 2023)

Cette étude saisonnière des particules ultrafines (PUF) basée sur l'analogie avec les particules primaires de carbone suie (BC) met en évidence des variations saisonnières distinctes des concentrations de PUF et du BC selon le type de site étudié. **Pour les sites principalement influencés par le trafic routier, les concentrations de BC et de PUF sont plus élevées en hiver et plus faibles en été.** Ce comportement s'explique par les émissions liées au chauffage ainsi que par des conditions météorologiques hivernales favorisant l'accumulation des polluants et une réduction de la dispersion atmosphérique. En été, la meilleure dispersion contribue à des concentrations plus faibles. À l'inverse, **pour les sites où les pics de PUF sont plus marqués à midi qu'aux heures de pointe du trafic**, les tendances saisonnières du PUF et du BC sont opposées. **Les concentrations de PUF atteignent leur maximum en été**, notamment en raison des processus de nucléation photochimique favorisés par un ensoleillement plus intense et des températures élevées. En parallèle, le BC suit une tendance inverse, avec des valeurs plus élevées en hiver, ce qui reflète une diminution des sources de combustion estivales et une meilleure dispersion des particules. Enfin, **pour les sites intermédiaires, aucune tendance saisonnière marquée n'est observée pour le BC et les PUF, avec des concentrations relativement constantes tout au long de l'année.** Toutefois, les épisodes de nucléation restent plus fréquents et plus intenses en été à midi.

Pour l'agglomération parisienne, les niveaux de pollution sont significativement plus élevés en hiver, en raison des émissions liées au chauffage au bois, qui viennent s'ajouter à la pollution urbaine chronique générée par les PUF. **Cette interaction entre les différentes sources de pollution reflète la complexité de l'impact des conditions saisonnières sur la qualité de l'air en milieu urbain.**

Les résultats peuvent être complétés sur les sites disposant de données de comptage du nombre de particules par taille : Paris (Les Halles), Londres (Honor Oak Park) et Dresde (Winckelmann) sur ces 2 saisons. Conventionnellement, les concentrations des 3 sites ont été normalisées en $dN/d\log D_p$ et mises à la même échelle pour rendre comparables entre elles ces distributions granulométriques présentées en Figure 63.



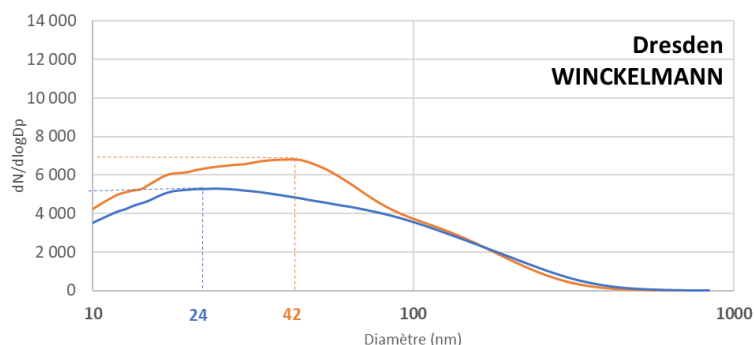


Figure 63 : Distribution granulométriques sur les périodes de campagnes de l'été 2023 en bleu et l'hiver 2022 en orange pour les 3 sites de fond urbain de Paris 1^{er} Les Halles (PA01) (France), Londres HOP (Angleterre) et Dresden W. (Allemagne).

L'étude des profils granulométriques sur les trois sites de fond européens met en évidence des variations saisonnières plus ou moins marquées ainsi que des influences locales spécifiques.

Sur le site de Paris (PA01H), les particules présentent un mode moyen de 25 ± 5 nm, avec une granulométrie plus fine en hiver (mode majeur à 21 nm) qu'en été (mode majeur à 29 nm). À Dresden Winckelmann, le mode majeur est de 33 ± 9 nm, avec une différence plus marquée entre l'été (42 nm) et l'hiver (24 nm), indiquant une évolution plus prononcée selon les saisons. En revanche, à Londres Honor Oak Park, le mode majeur reste stable toute l'année (47 ± 2 nm), suggérant l'influence d'une source chronique présentant peu de variations saisonnières.

A noter, en situation de fond, que tous ces modes sont situés dans le mode Aitken et plus précisément entre 20 et 50 nm, cette gamme de mesure est définie par la communauté scientifique comme le mode Aitken 1, le mode Aitken 2 étant défini comme la gamme entre 50 et 100 nm. **Ces modes sont caractéristiques des sources de combustion issues du trafic routier.** Ce constat est conforme aux enseignements de l'étude RI-Urbans et aux profils de distribution en situation de fond présentés en Figure 75 (Annexe IV. Figures supplémentaires) ainsi qu'à l'étude faite sur Paris, Abbou et al. (2024) ce qui témoigne de la représentativité et de la robustesse des résultats obtenus lors de ces deux campagnes de mesure sur Paris.

Sites de trafic urbain

La Figure 64 illustre les concentrations moyennes du nombre total de particules (N_{tot}) et du nombre de particules ultrafines (N_{puf}) mesurées lors des campagnes saisonnières menées à Paris en situation de proximité au trafic routier, sur le Boulevard Périphérique Est (BPE) et le boulevard Haussmann (HAUS) en hiver-printemps 2022 et en été 2023. Ces résultats sont comparés à ceux de deux sites de trafic européen, Londres MR (Marylebone Road) et Francfort FL (Friedberger Landstrasse), pour lesquels des données ont été collectées sur la même période d'analyse.

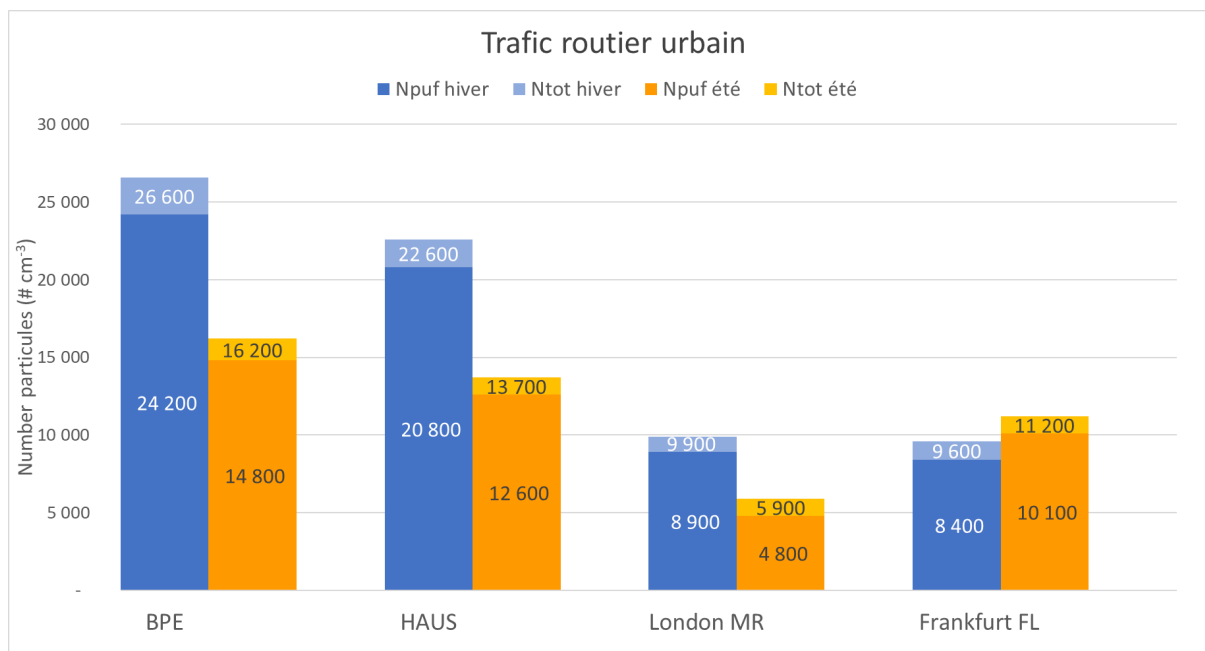


Figure 64 : Concentrations moyennes en nombre de particules (N_{tot}) et en nombre de particules ultrafines (N_{puf}) observées lors de la campagne hivernale-printanière (1er février – 30 avril 2022) et de la campagne estivale (17 juillet – 15 septembre 2023) sur les 2 sites trafic parisiens (BPE et Hauss), le site de Londres MR et de Francfort FL. (Concentrations arrondies à la centaine).

Comme pour les sites de fond, les particules ultrafines mesurées entre 10 et 100 nm représentent une part largement majoritaire du nombre de particules totales mesuré à proximité du trafic routier. Ville par ville, cette part est néanmoins plus élevée sur les sites de proximité immédiate au trafic routier que sur les sites de fond, confirmant ainsi que les émissions liées au trafic sont une source majeure de particules ultrafines (par exemple en période estivale, 92 % pour HAUS contre 87 % pour PA01). De plus, la part de PUF diffère légèrement au sein des trois villes : pour la période estivale, elle est de 81 % pour Londres MR et de 88 % pour Francfort FL. **La part de PUF étant la plus élevée sur Paris, suggère que les sites parisiens sont davantage impactés par les particules les plus fines, provenant du trafic routier.**

L'amplitude des concentrations de PUF entre les deux saisons en situation de trafic, telle qu'observée dans cette étude, se situe globalement entre 4 000 et 25 000 particules/cm³, ce qui caractérise une plage moyenne influencée par les émissions liées au trafic routier. Cette gamme est nettement plus large que celle observée en situation de fond (2 100 à 12 000 particules/cm³), **la borne haute étant plus de deux fois supérieure aux niveaux de fond. Ces résultats confirment que le trafic routier constitue une source prédominante de PUF.**

Outre le fait que les deux sites parisiens mesurent des concentrations en nombre de PUF supérieurs à ceux de Londres et de Francfort, à la fois en période hiver-printemps et en période estivale, **l'impact de la saison entre hiver-printemps et été sur les concentrations en nombre de PUF mesurés à proximité du trafic routier est différent selon le site européen étudié.**

Pour les deux sites parisiens (BPE et HAUS), les concentrations mesurées durant l'été sont environ 40 % plus faibles que celles mesurées durant la période hivernale-printanière (à la fois sur BPE et HAUS), soit une baisse comparable à ceux enregistrés sur les sites de fond parisiens. Un constat similaire est observé à Londres MR, où une baisse de 46 % est enregistrée en été comparé à la période hiver-printemps. À l'inverse, le site de trafic de Francfort présente une hausse significative de +20 % durant l'été.

Ce résultat est délicat à analyser, les niveaux de fond impactant les niveaux à proximité immédiate du trafic routier. Ainsi, les analyses sont complétées dans le paragraphe suivant en présentant des résultats en termes d'impact trafic (surplus de concentrations mesurées à proximité du trafic routier), ce qui permet de quantifier précisément l'influence de cette source d'émission sur les

concentrations en nombre de PUF. Pour Paris, le site sur le boulevard Haussmann a été retenu, car il correspond mieux aux conditions d'implantation des sites de mesure du trafic à Londres et à Francfort (rues en typologie « canyon »).

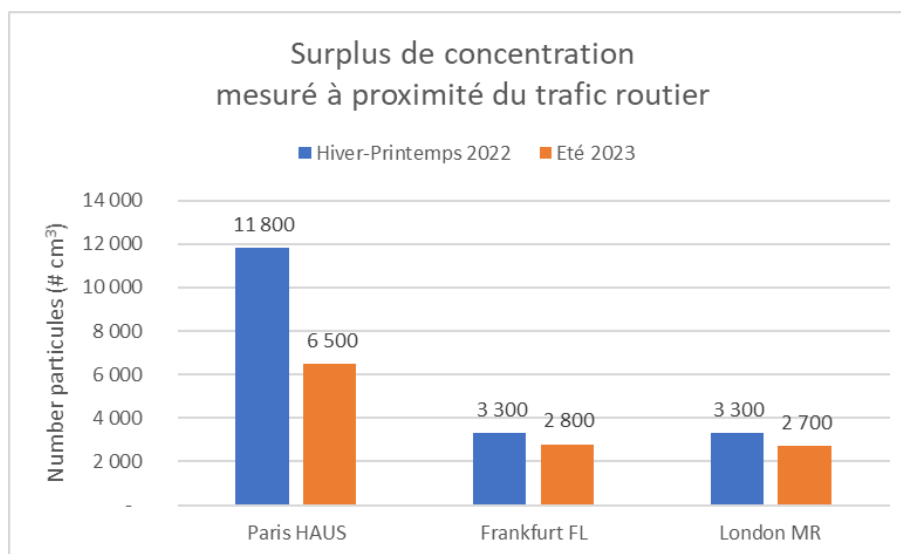


Figure 65 : Surplus de concentration liée au trafic routier sur les concentrations moyennes en nombre de PUF (N_{PUF}) sur Paris HAUS, Francfort FL et Londres MR avec Ville sur la campagne hiver-printemps 2022 (en bleu) et été 2023 (orange) (Concentrations sont arrondies à la centaine).

Les sites trafic de **Francfort FL et Londres MR présentent des surconcentrations globalement similaires** par rapport aux concentrations mesurées en fond au sein des deux villes respectives, **estimée à environ $3\,000 \pm 10\%$, que ce soit en période hiver-printemps ou en été. Le site de Paris HAUS présente des surconcentrations nettement plus élevées : En été, elle est plus de deux fois supérieure à celle observée à Francfort et Londres (+ 6 500 particules/cm³), et est plus de 3,5 fois supérieures à celle enregistrée dans les deux autres villes en hiver (+11 800 particules/cm³).**

Ces résultats soulignent l'importance de surveiller et de mieux comprendre les sources et les mécanismes de formation des particules ultrafines notamment dans une ville très dense comme Paris.

L'étude des profils granulométriques permet d'affiner l'observation des différences entre les sites européens. Pour cela, les données granulométriques de trois sites, Paris (BPE et HAUS) et Londres MR sont représentées en Figure 66.

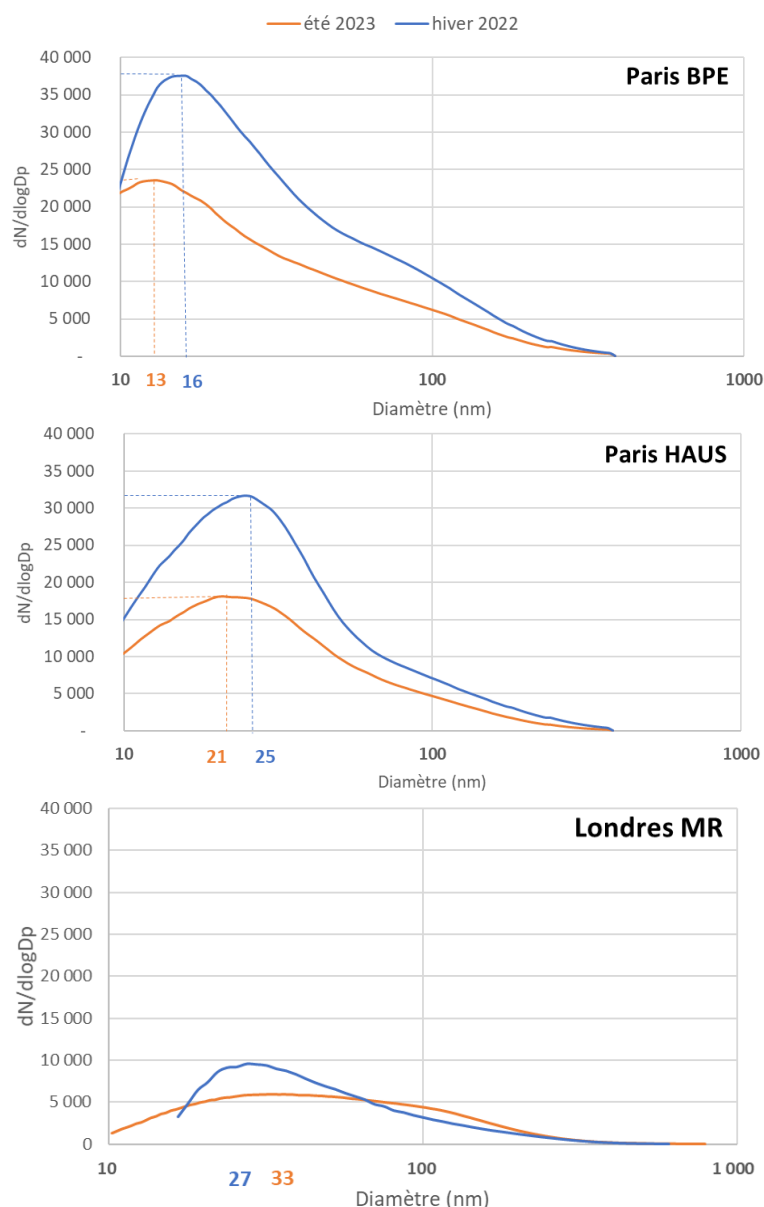


Figure 66 : Distribution granulométriques sur les périodes de campagnes de l'été 2023 en bleu et l'hiver 2022 en orange pour les 2 sites trafic de Paris Boulevard périphérique est et le Boulevard Haussmann (France) comparés à Londres MR (Angleterre).

Comme pour les distributions granulométriques réalisés à partir des données mesurées en situation de fond, celles réalisées à partir des données mesurées à proximité du trafic routier met en évidence des différences saisonnières significatives ainsi qu'une influence spécifique des sources locales.

Sur les deux sites parisiens, BPE et HAUS, les particules présentent des diamètres modaux plus faibles que sur le site de fond londonien, ce qui traduit des émissions plus récentes de particules primaires, caractéristiques du trafic routier. À BPE, le mode majeur est de 13 nm en été 2023 et de 16 nm en hiver-printemps 2022, tandis qu'à Haussmann, il varie de 21 nm en été à 25 nm en hiver.

À Londres, le mode granulométrique est plus élevé, atteignant 33 nm en été 2023 et 27 nm en hiver-printemps 2022. La variation saisonnière plus faible sur le site de Londres suggère des particules du trafic moins fines que sur les sites parisiens, du fait de conditions de trafic différentes (composition du parc de véhicules, conditions de circulation).

En considérant que les sites exposés à des émissions de particules fraîches issues du trafic présentent des diamètres modaux plus fins, il est possible d'établir une hiérarchie de l'impact du trafic. BPE apparaît comme le site le plus influencé, suivi du boulevard Haussmann, lui-même bien plus exposé que le site londonien.

En comparaison au fond, les modes majeurs mesurés en moyenne à proximité du trafic routier sont relativement stables entre les saisons hivernale-printanière et estivale, ce qui **illustre que le trafic routier est une source majorante chronique bien identifiée sur cette typologie de site.**

Enfin, l'analyse des profils granulométriques met en évidence des concentrations en nombre de particules (dont les PUF) bien plus élevées à Paris qu'à Londres, illustrant **l'impact prédominant du trafic routier dans la capitale française par rapport à la capitale britannique.**

La gamme de concentrations en nombre total de particules et en nombre de PUF sur la période des deux campagnes de mesure sur l'ensemble des villes étudiées est présentée sur la Figure 67 en fonction de l'environnement obtenue lors des études (Résultats arrondis au millier).

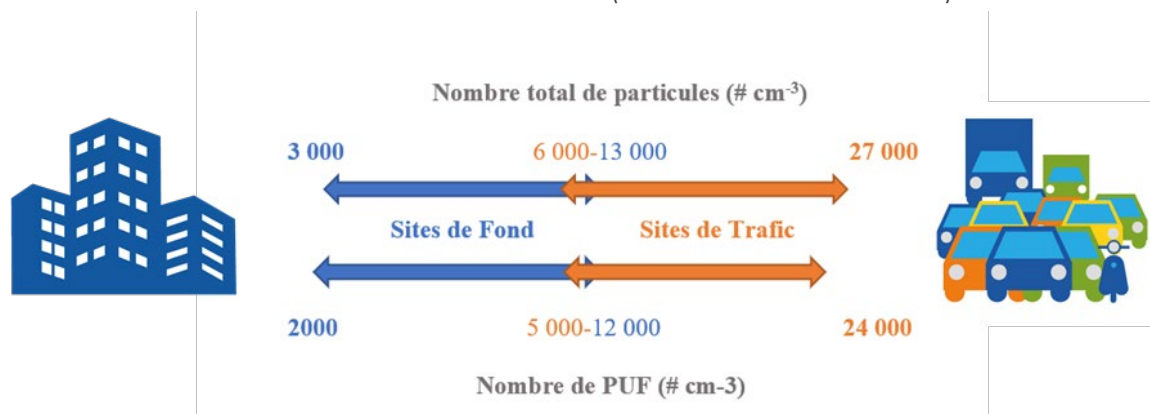


Figure 67 : Concentrations en nombre de particules (N_{tot} et N_{PUF}) en fonction de la typologie du site (gauche : fond urbain, droite : trafic routier)

Conclusion

Prenant appui sur le programme d'études proposé par Airparif sur la variabilité spatiale des particules ultrafines, décidé compte-tenu du risque avéré pour la santé (ANSES, 2019), la Ville de Paris, Bloomberg Philanthropies et Airparif ont lancé une étude parisienne de mesures des particules ultrafines (PUF) dans l'objectif de disposer d'une meilleure compréhension de leur variabilité temporelle et spatiale, ainsi que de leurs sources d'émissions dans Paris, en particulier le trafic routier et le chauffage au bois en hiver. Pour cela, deux campagnes de mesures, l'une en période hivernale, et l'autre en période estivale ont été réalisées.

Ces travaux sur Paris visent à compléter le suivi permanent des variations temporelles du nombre des PUF par classes granulométriques au centre de l'agglomération parisienne sur le site urbain de fond implanté par Airparif dans le jardin des Halles à Paris, ainsi que les différentes campagnes de mesure sur le territoire francilien. Ces travaux renforcés sur Paris sont financés par Breathe Cities.

La première campagne de mesure a été réalisée à l'hiver-printemps 2022 (du 31 janvier au 5 mai 2022), et la deuxième à l'été 2023 (du 17 juillet au 15 septembre 2023). La mesure des PUF a été réalisée à l'aide d'analyseurs de particules ultrafines de type SMPS, permettant d'obtenir des concentrations en nombre total mais aussi en profil granulométrique sur la gamme de taille de 5 à 400 nm, couvrant ainsi largement la gamme de taille des PUF. Des mesures de carbone suie (eBC) ont également été réalisées à l'aide d'aethalomètre AE33, permettant d'identifier la combustion issue de la combustion de biomasse (chauffage au bois en hiver et brûlage de déchets verts en été) et la combustion d'hydrocarbures (marqueur du trafic routier).

Pour les deux campagnes, des mesures ont été réalisées à proximité du trafic routier, localisées à deux stations du réseau permanent d'Airparif, l'un sur le boulevard Haussmann et l'autre le long du Boulevard Périphérique Est ; ainsi qu'en situation de fond urbain au sein de Paris (Paris 18^{ème} arrondissement), en complément de la mesure permanente au centre de Paris (Paris 1^{er} Les Halles). En période hivernale, des mesures de carbone suie ont également été réalisées dans le 19^{ème} arrondissement de Paris, afin d'obtenir un échantillon sur 3 zones caractérisées par des bâtiments et moyens de chauffage au bois potentiellement différents : l'hyper centre parisien (Paris 1^{er} Les Halles), la zone Haussmannienne (Paris 18^{ème}), et une zone « mixte » avec des maisons individuelles (Paris 19^{ème}).

En période estivale, une expérimentation dans le cadre d'Airlab, le laboratoire d'innovation d'Airparif et de ses partenaires, a été conduite, permettant l'acquisition de données sur le nombre et la vitesse moyenne des véhicules par type (véhicule léger, véhicule utilitaire léger, deux-roues motorisés, bus ou car, poids lourd, vélo) au droit de la station du boulevard Haussmann.

Cette étude a permis d'affiner les enseignements sur la variabilité temporelle et spatiale, ainsi que sur les sources d'émissions de PUF au sein de Paris :

- **Quelle que soit la typologie du site de mesure et la saison, le nombre total de PUF** (sur la gamme de 5 à 100 nm) **représente environ 90 % du comptage total de particules** (gamme de 5 à 400 nm).
- Les niveaux de concentrations en nombre total de PUF diffèrent selon la typologie du site de mesure : **les concentrations en nombre de PUF sont 2x à 3x plus importantes à proximité des axes routiers parisiens qu'en situation de fond urbain à Paris**. De plus, pour un même site, les concentrations en nombre de PUF présentent une forte variabilité, aussi bien sur les sites de fond que sur les sites trafic. **La différence entre fond et trafic routier est donc plus ou moins marquée selon l'intensité des sources d'émissions au cours de la journée**.
- Les profils granulométriques moyens sur 121 classes de tailles (construits sur toute la gamme de mesure des appareils SMPS, soit de 5 à 400 nm) montrent pour tous les sites d'étude, et sur les deux campagnes de mesure, que **le diamètre de particule associé au plus grand**

nombre de particules en comptage sur le profil granulométrique, appelé « mode majeur », **est inférieur à 30 nm, et est inférieur à 20 nm pour le site trafic « Boulevard Périphérique Est ».**

Ce résultat indique que le trafic routier est la source majoritaire de PUF à proximité du trafic routier, et en situation de fond urbain à Paris.

- **Le trafic routier est une source chronique émettrice de particules ultrafines, en particulier de particules de diamètre inférieur à 20 nm.** C'est la source prédominante sur les sites parisiens, à proximité du trafic routier, mais également en fond urbain à Paris, comme l'illustre l'évolution journalière avec un pic le matin et un pic le soir, liés au pic d'activité du trafic routier sur ces deux périodes, ainsi qu'à des conditions de dispersion moins favorables qu'au cours de la journée.

L'expérimentation AIRLAB, avec l'installation d'une caméra d'acquisition de données relatives au trafic routier sur le site du boulevard Haussmann, a permis d'affiner les connaissances sur les conditions de trafic au droit de l'axe, avec une différenciation selon le type de véhicule. L'impact des conditions de trafic sur les concentrations de PUF mesurées au droit de l'axe ne sont néanmoins pas conclusives, mais suggèrent des perspectives.

- **Les particules secondaires** (ou aérosols secondaires), **issues de transformations dans l'atmosphère sont également une source de pollution sur l'année.** Leur formation est visible dans la gamme des PUF par une augmentation des concentrations par rapport aux niveaux de référence, et le diamètre de ces particules au sein des PUF peut différer selon la temporalité ou la nature des particules. En effet, la nature des particules secondaires (organique ou inorganique) peut différer selon les conditions de formation (conditions météorologiques couplées à des niveaux d'émissions anthropiques locales spécifiques). Les conditions météorologiques durant les deux campagnes respectives ont notamment mené à la formation d'aérosols organiques le 6 septembre 2023, et à la formation d'aérosols organiques et inorganiques le 26 mars 2022.
- **Le chauffage au bois est une source de PUF en période hivernale, émettrice de particules de taille entre 70 et 100 nm.** Les distributions granulométriques lors des pics d'utilisation du chauffage au bois (indiqués par des forts niveaux de carbone suie issue de combustion de biomasse) montrent la présence d'une deuxième population de particules sur la gamme de 70 à 100 nm. L'analyse des différences de niveaux mesurés entre les différents sites de fond urbain, ayant des spécificités en termes de type de chauffage et logement (Haussmannien, foyers ouverts, maisons individuelles), n'a pas pu être conclusive du fait du faible nombre de journées propices au chauffage au bois durant la période hivernale.

De plus, une première étude comparative des niveaux de PUF de métropoles européennes et nord-américaine a été menée. Des échanges avec de nombreux experts de la qualité de l'air dans différentes villes européennes (notamment Londres, Amsterdam, Rotterdam, Milan, Berlin, Dresde, Francfort, Barcelone et Bruxelles) et au Canada (Montréal) ont permis de recueillir des données et de préfigurer de potentielles collaborations futures entre les différents experts (exemple : échanges autour de la caractérisation des PUF autour des aéroports, indicateur de tendance d'évolution des PUF sur plusieurs années, etc.).

Les mesures de PUF dans chaque ville sur les deux périodes de campagne de mesure à Paris, mettent en évidence une disparité de niveaux de concentration en nombre total de PUF d'un site européen à un autre, ainsi que des différences quant à la granulométrie des particules, à la fois en situation de fond urbain et à proximité du trafic routier. La comparaison des concentrations en nombre de PUF aux autres villes européennes considérées dans cette étude indique que les niveaux mesurés à Paris lors des campagnes en 2022 et 2023 sont plus forts que ceux des autres villes pour ces mêmes périodes, à la fois en proximité au trafic routier et en situation de fond.

L'étude parisienne sur les particules ultrafines a permis de récolter de nouvelles mesures sur les niveaux en comptage total de particules ainsi que sur la granulométrie des particules à la fois en situation de fond urbain et à proximité du trafic routier à Paris.

Dans une démarche de déployer le suivi permanent des PUF dans des environnements variés, comme le recommandent l'ANSES et l'OMS, cette étude a permis de confirmer que le trafic routier est une source chronique émettrice PUF au sein de Paris, ce qui appuie le **besoin de disposer de mesures long-terme des PUF à proximité du trafic routier**. De plus, l'analyse des mesures de PUF issues de différentes villes européennes, à partir de différents appareils de mesure, soulève le **besoin d'harmonisation des mesures et des procédés de validation des données à l'échelle internationale**, ce qui permettrait de s'affranchir de différences de niveaux de PUF liées à la mesure et s'intéresser particulièrement aux différences liées aux sources d'émissions.

A Paris, l'identification des sources émettrices de PUF progresse, notamment sur le trafic routier et le chauffage au bois, mais celle-ci nécessite d'être affinée. En effet, il est nécessaire de **mieux identifier les facteurs d'influence au sein du trafic routier** permettant d'expliquer la grande variabilité des niveaux mesurés à proximité des axes routiers parisiens. Par exemple, les conditions de circulation (volume de trafic, vitesse de circulation, phases arrêt/démarrage, etc.), la configuration des axes (nombre de voies, sens unique ou circulation à double sens, etc.), et la composition du trafic routier (part des différentes motorisations, part des différents types de véhicules, etc.). L'expérimentation AIRLAB réalisée dans le cadre de l'étude indique la difficulté d'analyser l'impact de chaque facteur sur la mesure des PUF en conditions réelles de circulation. Des travaux de recherche, par exemple de mesures à l'émissions en banc d'essai, permettraient dans un premier temps de mieux identifier l'impact de chaque facteur (ex : vitesse, type de véhicule). Ces résultats expérimentaux pourront ensuite être mobilisés dans l'analyse des mesures en conditions réelles de circulation.

Pour le **chauffage domestique au bois** à Paris, il convient de **continuer l'étude de la variabilité spatiale de cette source d'émissions de PUF au sein de la capitale, ainsi que les différences potentielles de facteurs d'émissions selon les équipements, le combustible ou l'usage** (chauffage principal, chauffage d'appoint, chauffage d'agrément). En effet, à titre indicatif, les données actuelles sur les facteurs d'émissions de PM_{2.5} (particules de diamètre inférieur à 2.5 µm) des équipements de chauffage au bois indiquent que le facteur d'émissions des foyers ouverts à bûches est quasiment 130 fois plus important que celui de chaudières et poêles à granulés (Airparif, 5 minutes pour comprendre présenté par Airparif : Chauffage domestique au bois, quel impact sur la qualité de l'air en Ile-de-france ?, 2025).

De plus, **il existe potentiellement d'autres sources émettrices de PUF**, par exemple celles issues de la cuisson (Garcia-Marlès, 2024), dont la contribution au sein de Paris n'a pas été documentée à ce jour par Airparif, la cuisine de rue étant moins développée que dans d'autres villes.

In fine, des **travaux sur la contribution de chacune de ces sources** permettraient d'obtenir une vision globale, multi-source, des émissions de PUF à Paris et de leur évolution temporelle. Des travaux sont menés actuellement par Airparif.

La comparaison des mesures de PUF entre Paris et les autres villes européennes illustre l'importance de comparer les concentrations en nombre de PUF sur des durées longues puisque la hiérarchisation des sites peut différer selon la période de mesure, du fait de l'influence majeure des conditions météorologiques et des processus atmosphériques sur les concentrations, avec des dynamiques contrastées selon le type d'environnement urbain. L'analyse long-terme de l'évolution des concentrations de PUF permettrait également d'être mise au regard de celle d'autres polluants, tels que les oxydes d'azote, pour ces mêmes villes, afin de mieux comprendre les facteurs d'influence. **Pour mieux expliquer les différences de niveaux mesurés à proximité de différents axes**

routiers européens, l'exercice réalisé dans cette étude illustre le **besoin de données complémentaires, sur les conditions de circulation, la configuration des axes et la composition du trafic routier**, et d'une étude conjointe avec une des villes européennes similaire à Paris, par exemple Londres. De plus, l'usage du chauffage au bois peut différer selon les villes européennes, d'une part du fait d'un développement plus ou moins poussé de la filière du bois-énergie dans ces pays et villes, du prix de l'énergie et des réglementations des autorités locales. En effet, certaines villes nord européennes comme Helsinki en Finlande sont caractérisées par une part importante du bois comme énergie de chauffage, notamment pour les maisons individuelles (3^{ème} source d'énergie après l'électricité et la chaleur urbaine, (Statistics Finland)), alors que l'utilisation du chauffage au bois est soumise à des restrictions strictes à Londres car la quasi-totalité de la métropole est considérée comme « Smoke Control Area » où l'utilisation de cheminée est interdite sous peine d'amende, sauf si l'appareil est approuvé par la DEFRA, le ministère britannique de l'Environnement, de l'Alimentation et des Affaires rurales. A Paris, l'utilisation du chauffage au bois en tant qu'énergie principale à Paris est interdite pour les logements individuels (DRIEAT Ile-de-France, 2025), mais son utilisation en agrément ou en appoint représente la source majoritaire des émissions de particules sur le territoire. **Un nombre croissant de recherches européennes visent à améliorer la connaissance des émissions liées au chauffage au bois ainsi que leur impact sur les concentrations ambiantes de polluants, dont les particules** (Horsfall, 2025), (Pinxteren, 2023), (Tsiotra, 2021), (NILU, 2017).

L'étude parisienne sur les PUF, comme pour les autres études réalisées par Airparif, a pour objectif de disposer de données long-terme sur des environnements variés au sein de Paris et de la région Ile-de-France, permettant d'**alimenter les études d'impact sanitaires sur les PUF, en collaboration avec les organismes de santé locaux**.

Ces travaux complètent, avec les travaux sur les sources, la dynamique de la France qui a anticipé les exigences de la nouvelle directive européenne sur la qualité de l'air ambiant et un air plus pur pour l'Europe validée le 20 novembre 2024 (Directive (UE) 2024/2881. Cette directive impose la surveillance des particules en nombre total à l'aide de compteurs de type **Compteurs de Noyaux de Condensation (CNC)** dans les villes de grande taille. Les dernières analyses sur Paris ont confirmées que **les PUF représentent environ 90% du nombre total des particules mesurées par CNC**. La mesure CNC n'est pas une mesure spécifique des PUF mais permet d'en avoir une très bonne estimation (Abbou et al., 2024).

Depuis 2022, le ministère de l'Environnement a instauré une surveillance systématique du comptage en nombre total sur l'ensemble du territoire français. Ces mesures respectent la norme CEN/TS 16976:2016. En 2024, le parc français comptait 68 analyseurs de type CNC répartis selon différentes typologies d'exposition (situation de fond, zones de trafic et campagnes spécifiques, avec **une prédominance des mesures effectuées dans des zones de fond**).

Références

- Abbou, G. G.-L. (2024, Octobre 18). Ultrafine Particles Monitoring in Paris: From Total Number Concentrations to Size Distributions Measurements. *Aerosol and Air Quality Research*. doi:<https://doi.org/10.4209/aaqr.240093>
- Airparif. (2021). *Synthèse des connaissances sur les particules en Ile-de-France*.
- Airparif. (2022). *Campagne de mesure francilienne sur les particules ultrafines (PUF) - situation proximité du trafic routier - Eté 2021*.
- Airparif. (2025, Mars). *5 minutes pour comprendre présenté par Airparif : Chauffage domestique au bois, quel impact sur la qualité de l'air en Ile-de-France ?* Récupéré sur <https://www.airparif.fr/publi/5min-pour-comprendre/chauffage-au-bois/>
- Airparif. (Décembre 2023). *Campagne parisienne sur les particules ultrafines - Hiver/Printemps 2022*. Récupéré sur <https://www.airparif.fr/etudes/2023/etude-campagne-de-mesure-parisienne-sur-les-particules-ultrafines-puf-variabilite-dans>
- Airparif. (février 2022). *Campagne de mesure francilienne sur les particules ultrafines (PUF) - situation de fond - hiver 2020-2021*.
- Airparif. (Mai 2025). *Inventaire Air-Climat-Energie - Bilan Ile-de-France - Année 2022*.
- Airparif. (Mars 2024). *Inventaire Air-Climat-Energie - Bilan Ile-de-France - Année 2021*.
- ANSES. (2018). *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*.
- ANSES. (2019). *Effets sanitaires des particules de l'air ambiant extérieur selon les composés, les sources et la granulométrie*.
- APUR. (Juillet 2018). *Évolution des modes de chauffage des résidences principales de la MGP - Analyse du parc de logements, de ses occupants et des systèmes de chauffage*.
- Birmili, W. (2016). Long-term observations of tropospheric particle number size distributions and equivalent black carbon mass concentrations in the German Ultrafine Aerosol Network (GUAN). *Earth System Science Data - Volume 8*, 355-382. doi:10.5194/essd-8-355-2016
- Buseck. (2008). *Nanoparticles in the atmosphere*.
- Conseil de l'Union européenne. (2024, Octobre). *Directive du Parlement Européen et du Conseil concernant la Qualité de l'Air Ambiant et un air pur pour l'Europe*.
- Ditas, F., Rose, D., & Jacobi, S. (2022). *Bericht zur Untersuchung der regionalen Luftqualität auf ultrafeine Partikel im Bereich des Flughafens, Frankfurt*. HLNUG.
- Donaldson et al. (2002). Inflammation caused by particles and fibers. *Inhalation toxicology*.
- DRIEAT Ile-de-France. (2025, Février). *Le chauffage au bois : un fort impact sur la qualité de l'air*. Récupéré sur <https://www.drieat.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/le-chauffage-au-bois-un-fort-impact-sur-la-qualite-a3791.html>
- Garcia-Marlès, M. (2024, Décembre). Source apportionment of ultrafine particles in urban Europe. *Environment International*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.109149>
- Gu, J. (2011). Source apportionment of ambient particles: Comparison of positive matrix factorization analysis applied to particle size distribution and chemical composition data. *Environment International*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.01.009>
- H.J.P. Helmink, I. v. (2020). *Meetresultaten luchtkwaliteit Amsterdam 2019*. GGD Amsterdam.
- Horsfall, L. (2025). High-resolution mapping of residential wood burning heat sources using Energy Performance Certificates: A case study of England and Wales. doi:<https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5110085>
- Hussein, T. (2004). *Urban aerosol number size distributions*.
- Morawoska, L. (2008). *Ambient nano and ultrafine particles from motor vehicle emissions: Characteristics, ambient processing and implications on human exposure*. et al.

- NILU. (2017). *Wood burning pollutes the urban air in Norway*. Récupéré sur <https://nilu.com/2017/03/wood-burning-pollutes-the-urban-air-in-norway/>
- Oberdörster et al. (2004). Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. *Inhalation toxicology*.
- OMS. (2021, Septembre). Les nouvelles lignes directrices mondiales de l'OMS sur la qualité de l'air visent à éviter des millions de décès dus à la pollution atmosphérique.
- Pinxteren, D. V. (2023). Residential Wood Combustion in Germany: A Twin-Site Study of Local Village Contributions to Particulate Pollutants and Their Potential Health Effects. *American Chemical Society*. doi:10.1021/acsenvironau.3c00035
- Regniers, O. (2006). *Mémoire « Les particules diesel ultrafines : techniques de mesure à l'émission et à l'immission »*.
- Renoux et Boulaud. (1998). *Les aérosols : Physique et métrologie*. Paris: Edition Tec&Doc.
- Riva, M. (2013). *Caractérisation d'une nouvelle voie de formation des aérosols organiques secondaires (AOS) dans l'atmosphère : Rôle des précurseurs polyaromatiques*.
- Rivas, I. (2020). Source apportionment of particle number size distribution in urban background and traffic stations in four European cities. *Environment International*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105345>
- RSQA. (Juin 2022). *Bilan environnemental 2021 - Qualité de l'air à Montréal*. Récupéré sur <https://donnees.montreal.ca/ville-de-montreal/rsqa-bilans-annuels-qualite-air>
- Samoli et al. (2016). Exposure to ultrafine particles ADN respiratory hospitalisations in five european cities. *European respiratory journal*.
- Schins et al. (2004). Inflammatory effects of coarse and fine particulate matter in relation to chemical and biological constituents. *Toxicology and applied pharmacology*.
- Setyan, A. (2014). Chemistry of new particle growth in mixed urban and biogenic emissions - insights from CARES. *Atmospheric Chemistry and Physics*. doi:<https://doi.org/10.5194/acp-14-6477-2014>
- Statistics Finland. (s.d.). *Energy consumption in households 2008-2023*. Récupéré sur https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/en/StatFin/StatFin__asen/statfin_asen_pxt_11zs.px/
- Sun, J. (2019). Variability of black carbon mass concentrations, sub-micrometer particle number concentrations and size distributions: results of the German Ultrafine Aerosol Network ranging from city street to High Alpine locations. *Atmospheric Environment - Volume 202*, 256-268. Récupéré sur <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.12.029>
- Trechera, P. (2023). Phenomenology of ultrafine particle concentrations and size distribution accross urban Europe. *Environment International - Volume 172*. Récupéré sur <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107744>
- Tsiodra, I. (2021). Annual exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons in urban environments linked to wintertime wood-burning episodes. *Atmospheric Chemistry and Physics*. doi:<https://doi.org/10.5194/acp-21-17865-2021>
- Xiao, S. (2015). Strong atmospheric new particle formation in winter in urban Shanghai, China. *Atmospheric Chemistry and Physics*. doi:<https://doi.org/10.5194/acp-15-1769-2015>
- Yadav, S. (2022). Ultrafine particle number concentration and its size distribution during Diwali festival in megacity Delhi, India: Are 'green crackers' safe? *Journal of Environmental Management*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115459>

Annexes

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 68), 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 compris entre 1 et 100 nanomètres (nm), soit de 0.001 à 0.1 micromètres (µm).**

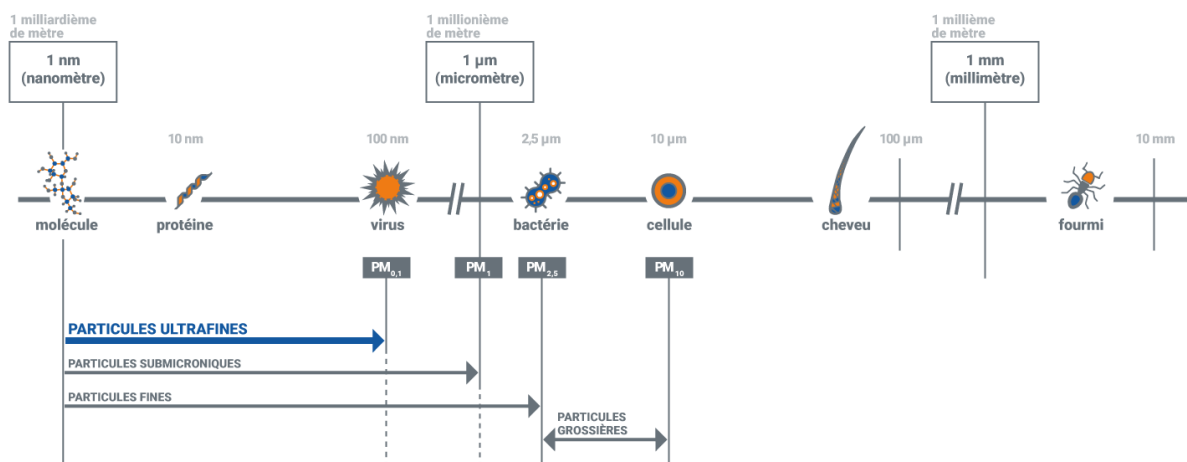


Figure 68 : Taille des particules - échelles et ordres de grandeur

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 $PM_{2.5}$, 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 $PM_{2.5}$ 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 69).

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

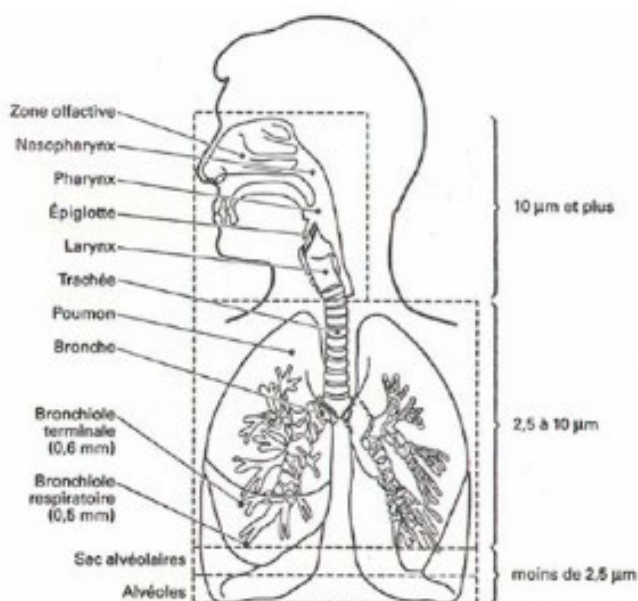


Figure 69 : Pénétration des particules dans l'organisme (Schéma réalisé sur la base d'un dessin du DR J. Hararkeman).
(Source : www.santepubliquefrance.fr)

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 $10\,000\text{ part/cm}^3$ 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). Cependant, aucune valeur limite réglementaire ni recommandation de l'OMS n'a encore été établie. Actuellement, seules des valeurs indicatives sont fournies par l'OMS. Ces recommandations suggèrent que des concentrations élevées de particules ultrafines, mesurées en nombre total (NTOT), peuvent orienter les décisions concernant les priorités de contrôle des sources d'émission. **Les seuils indicatifs proposés par l'OMS sont de 10 000 particules par cm³ (particules/cm³) en moyenne journalière et de 20 000 particules/cm³ en moyenne horaire.**

Le carbone suie (eBC)

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).

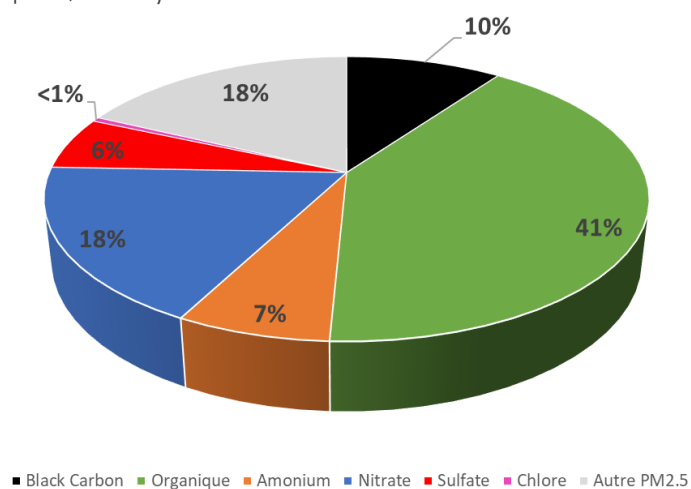


Figure 70 : Composition chimique moyenne annuelle des PM_{2.5} en situation de fond urbain (Mesures ACSM / AE33)

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 (eBC)** 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 eBC_{ff} (fuel fossil), et la fraction issue de la combustion de la biomasse (chauffage au bois, brûlage de déchets verts...), désignée sous le terme eBC_{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}) = $2 \times eBC_{ff}$

- PM_{wb} (équivalent PM_{10}) = $10 \times eBC_{wb}$

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 particuliers

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.

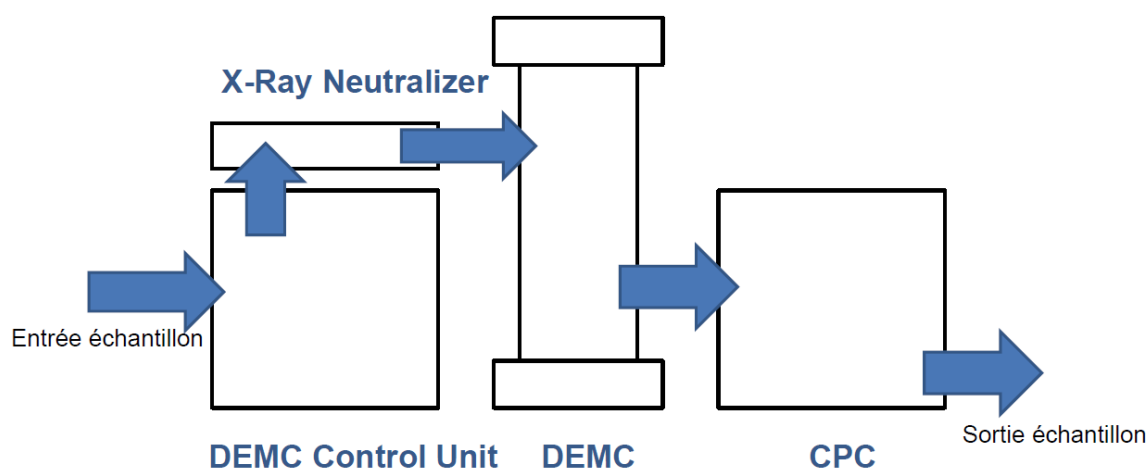
Annexe II : Métrologie

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

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 :

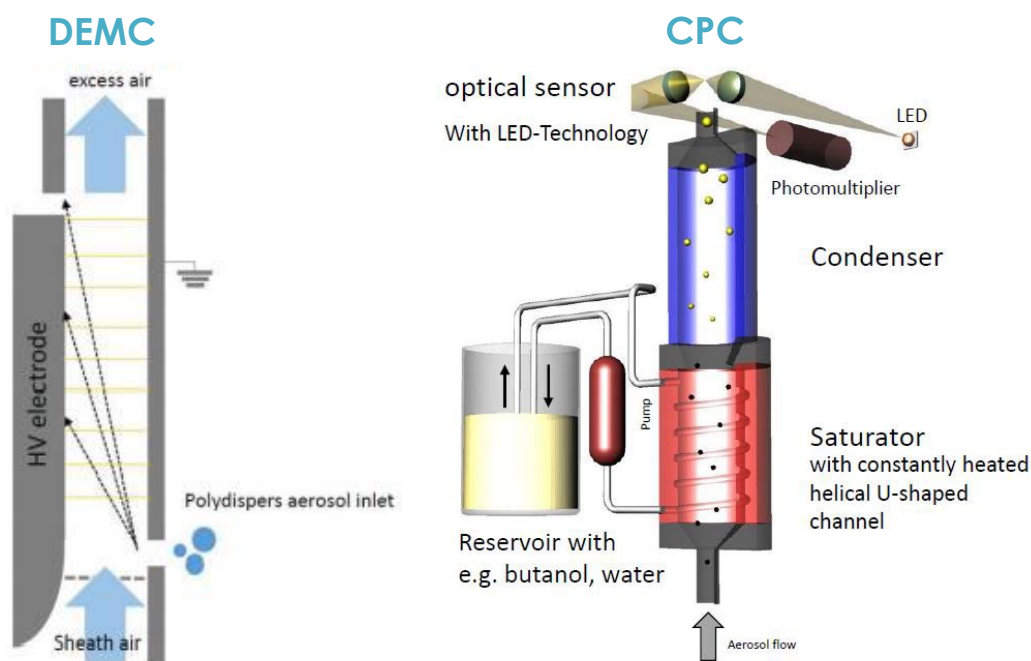


Le SMPS est ainsi composé d'un DEMC (Differential Electrical Mobility Classifier) qui sélectionne les particules suivant leurs tailles granulométriques via leurs mobilités électriques, et d'un CPC (Condensation Particle Counter) permettant de les faire grossir afin de les compter.



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.

La comparaison des mesures de comptage total entre les appareils U-SMPS et CPC montrent une bonne adéquation ($r^2 = 0.924$), et estime que le comptage total en nombre de particules issu du U-SMPS représente environ 75 % du comptage total en nombre issu du CPC.

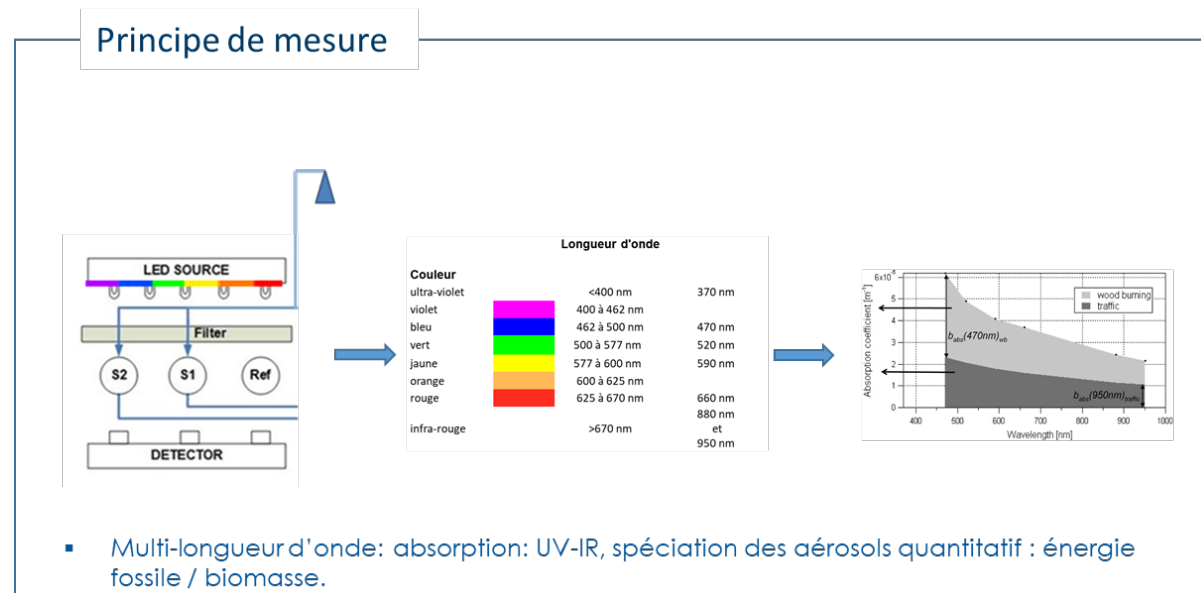
L'analyseur respecte la méthode normalisée par XP CEN/TS 17434 (Juillet 2020) pour déterminer des distributions granulométriques de particules dans l'air ambiant. L'échantillonnage du nombre de particules est réalisé à l'aide d'une ligne de prélèvement en inox d'une longueur d'environ 1.5 m, de diamètre 2.5 mm, avec un débit laminaire de 5 L/min. L'échantillon est séché à l'aide d'une membrane nafion. Les contrôles qualité sont réalisés dans le respect des recommandations du constructeur.

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

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



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 ».

Les contrôles qualité sont réalisés suivant les recommandations du groupe de travail (GT) national – caractérisation chimique et étude de sources.

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

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



Annexe III : 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 71 (Renoux et Boulaud, 1998).

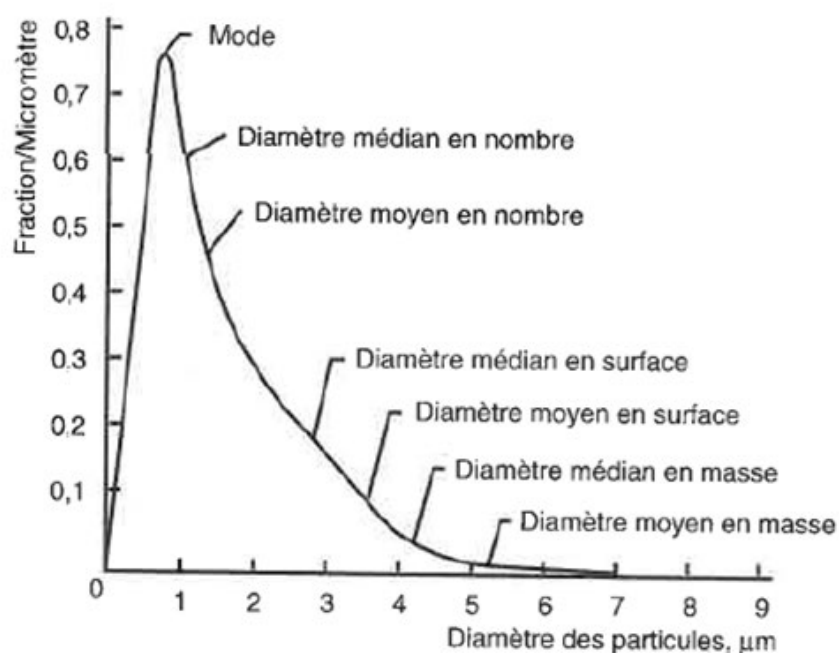


Figure 71 : Paramètres caractéristiques des distributions granulométriques (Renoux et Boulaud, 1998)

L'illustration 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.

La littérature indique que les émissions de particules issues (Regniers, 2006) 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 72 (Buseck, 2008).

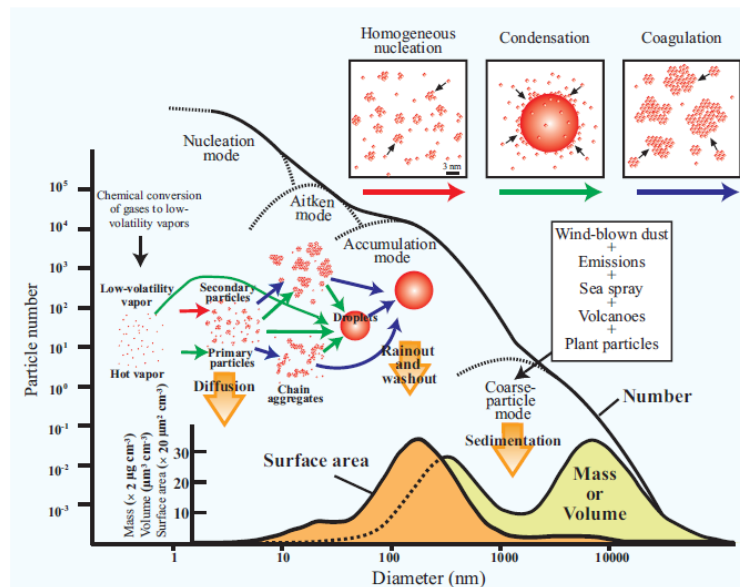


Figure 72 : Processus chimiques et physiques de la formation des aérosols dans l'atmosphère (Buseck, 2008)

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 73.

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 72 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 73).

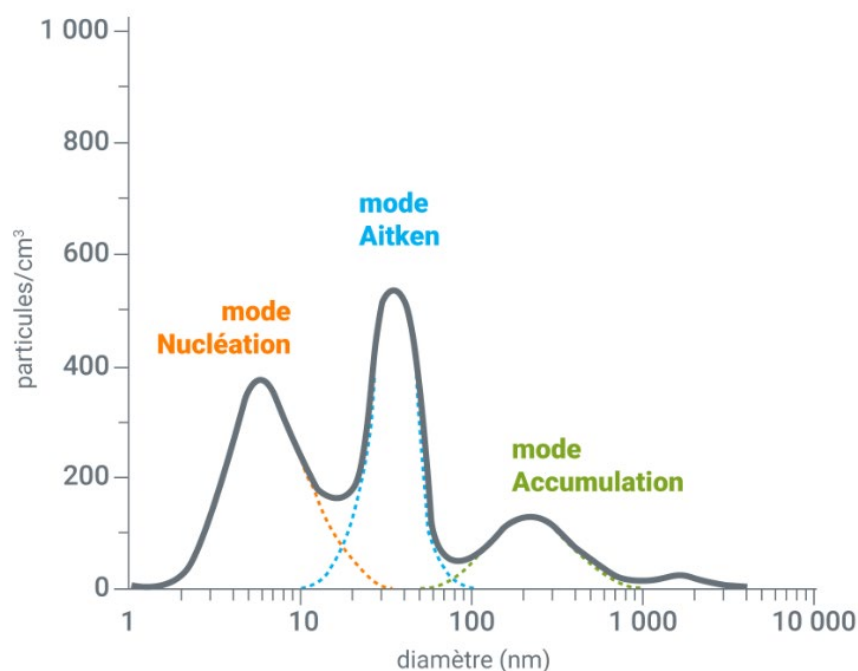


Figure 73 : Représentation indicative de la distribution des Modes Nucléation, Aitken et Accumulation (source : (Airparif, 2022))

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 **20 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 ((Morawoska, 2008), (Hussein, 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) ((Buseck, 2008), (Hussein, 2004)).

Le mode Aitken regroupe les particules ultrafines et correspond aux aérosols de tailles comprises approximativement entre **20 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 et biomasse (émissions primaires). Elles sont principalement composées de suies et de cendres, servant de noyau de condensation à des matières volatiles. Ce mode est généralement distingué en deux gammes de tailles, le mode **Aitken 1 (particule ultrafines entre 20 et 50 nm)** et le mode **Aitken 2 (particules ultrafines entre 50 et 100 nm)** (Yadav, 2022).

Le mode Accumulation regroupe les particules de tailles allant approximativement de **100 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), (Buseck, 2008)). La principale voie d'élimination de cette catégorie de particules reste les précipitations ((Regniers, 2006), (Hussein, 2004)).

Annexe IV. Figures supplémentaires

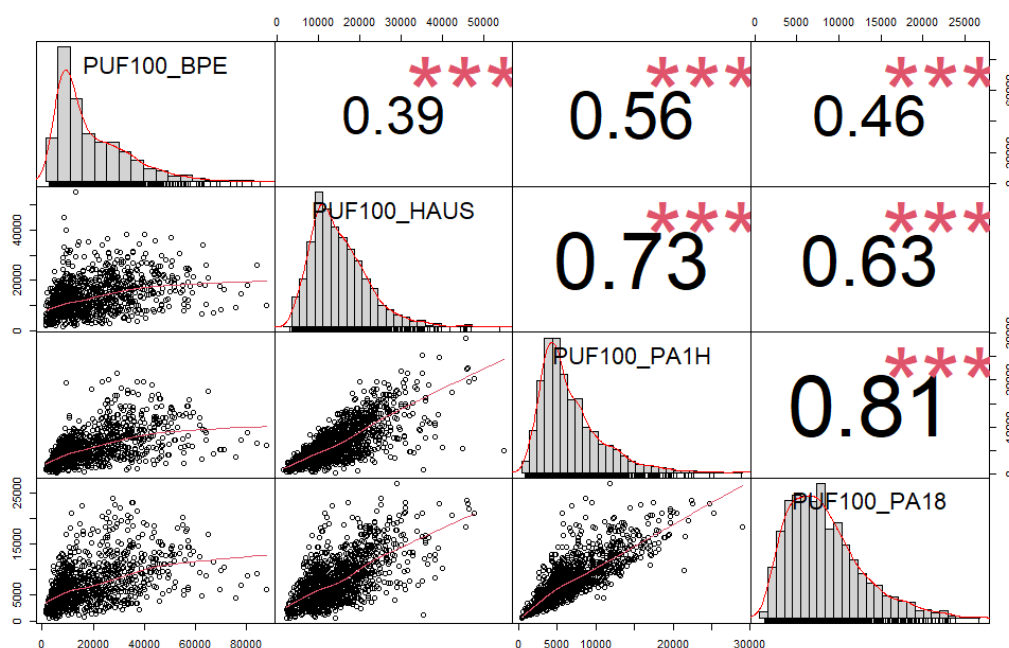


Figure 74 : Matrice de corrélation de Pearson entre les concentrations en nombre de PUF de chaque paire de site, mesurées du 17 juillet au 15 septembre 2023.

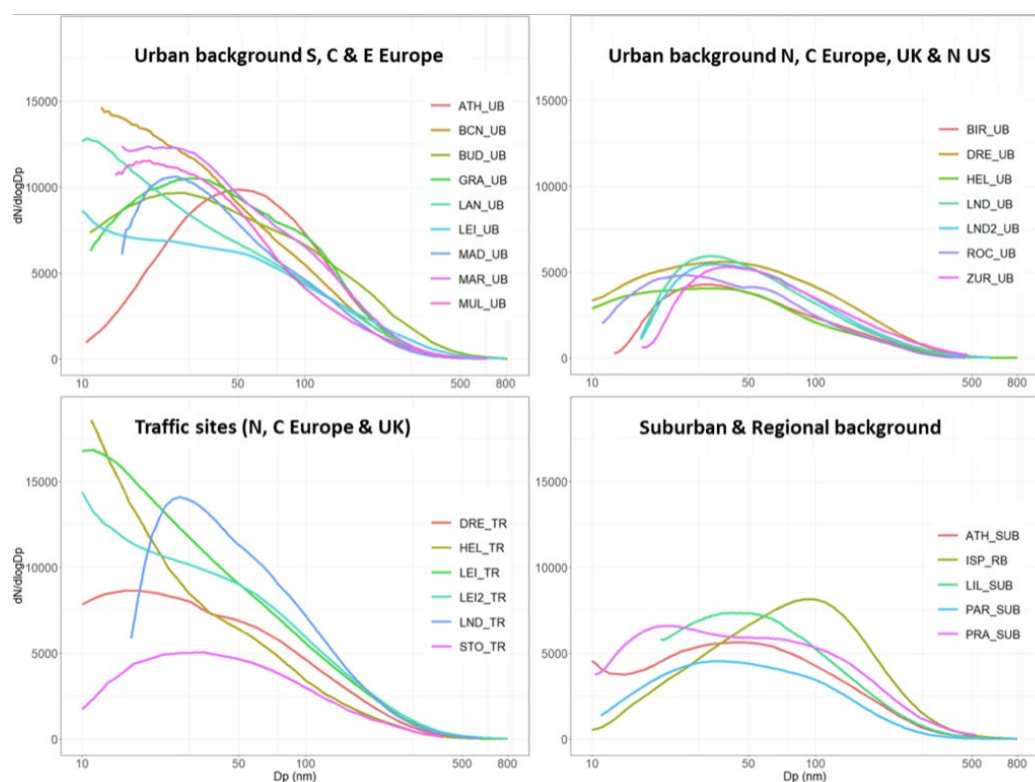


Figure 75 : Distribution granulométrique des sites européens selon la typologie (situation de fond urbain, situation à proximité du trafic routier, situation sub-urbain et rural) Extrait de (Trechera, 2023)

Annexe V : Contact des organismes internationaux de surveillance de la qualité de l'air

Landesamtf für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Dresde, Allemagne) ;
Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) (Francfort, Allemagne) ;
Gemeentelijke Gezondheidsdienst (GGD) Amsterdam (Amsterdam, Pays-Bas) ;
Réseau de surveillance de la qualité de l'air (RSQA) Montréal (Montréal, Canada) ;
Imperial College London et National Physical Laboratory (NPL) (Londres, Angleterre).

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Dresde, Allemagne)

SAXON STATE OFFICE FOR ENVIRONMENT, AGRICULTURE AND GEOLOGY
Postfach 54 01 37
01311 Dresden
Téléphone : +49 351 2612-0
Email : lfulg@smekul.sachsen.de
Site internet : <https://lfulg.sachsen.de/>

Contact :

Bastian Dr., Susanne – LfULG susanne.bastian@smekul.sachsen.de

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) (Francfort, Allemagne)

HLNUG in Wiesbaden
Rheingaustraße 186 | 65203 Wiesbaden | Germany
Téléphone : +49 (0)611 69390
Email : poststelle@hlnug.hessen.de
Site internet : <http://www.hlug.de>

Contact :

Dr. Diana Rose Diana.Rose@hlnug.hessen.de
Dr. Florian Ditas Florian.Ditas@hlnug.hessen.de

Gemeentelijke Gezondheidsdienst (GGD) Amsterdam (Amsterdam, Pays-Bas)

GGD Amsterdam
Nieuwe Achtergracht 100, 1018 WT Amsterdam
Téléphone : +31205555911
Site internet : <https://www.ggd.amsterdam.nl/>

Contact :

Dave de Jonge ddjonge@ggd.amsterdam.nl

Réseau de Surveillance de la Qualité de l'Air (RSQA) Montréal (Montréal, Canada)

RSQA Montréal
Service de l'environnement
Division du contrôle des rejets et suivi environnemental
827, boul. Crémazie Est, bureau 302
Montréal (Québec) H2M 2T8
Site internet : <https://montreal.ca/sujets/qualite-de-lair>

Contact :

Fabrice Godefroy fabrice.godefroy@montreal.ca
Sonia Melançon sonia.melancon@montreal.ca

Imperial College London (Londres, Angleterre)

Imperial College London
South Kensington Campus
London SW7 2AZ, United Kingdom
Téléphone : +44 (0)20 7589 5111
Site internet : <https://www.imperial.ac.uk/>

Contact :

David Green d.green@imperial.ac.uk

National Physical Laboratory (NPL), (Londres, Angleterre)

National Physical Laboratory
Air Quality and Aerosol Metrology Group
Hampton Road, Teddington
Middlesex TW11 0LW, United Kingdom
Téléphone : +44 (0)20 8977 3222
Site internet : www.npl.co.uk

Contact :

David Butterfield david.butterfield@npl.co.uk
Jordan Thompkins jordan.tompkins@npl.co.uk
Krzysztof Ciupek krzysztof.ciupek@npl.co.uk

DCMR Environmental Protection Agency (Rotterdam, Pays-Bas)

DCMR Milieudienst Rijnmond
Parallelweg 1
3112 NA Schiedam
Téléphone : +31102468000
Email : info@dcmr.nl
Site internet : <http://www.dcmr.nl/>

Contact :

Sef van den Elshout sef.vandenelshout@dcmr.nl

Bruxelles environnement (Bruxelles, Belgique)

Bruxelles Environnement
Site de Tour & Taxis
Avenue du Port 86C/3000 B-1000 Bruxelles
Téléphone : +32 2 775 75 75
Email : info@environnement.brussels
Site internet : <https://environnement.brussels>

Contact :

Anne Cheymol acheymol@environnement.brussels

ARPA Lombardia (Milan, Italie)

Arpa Lombardia
ARPA Lombardia
Via Rosellini 17, 20124 Milano
Téléphone : [02696661](tel:02696661)
Email : arpa@pec.regione.lombardia.it
Site internet : <https://www.arpalombardia.it/>

Contact :

Guido Guiseppe Lanzani G.LANZANI@arpalombardia.it
Christina Comlombi C.COLOMBI@arpalombardia.it
Umberto Dal Santa u.dalsanto@arpalombardia.it

Institute of Environmental Assessment and Water Research (IDEA) et Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIS), (Barcelone, Espagne)

Institute of Environmental Assessment and Water Research (IDÆA)
Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)
C/ Jordi Girona 18-26
08034 Barcelona, Spain
Téléphone : 00 34 93 4006149
Site internet : www.idaea.csic.es

Contact :

Xavier Querol xavier.querol@idaea.csic.es
Andres Alastuey andres.alastuey@idaea.csic.es
www.airuse.eu | www.riurbans.eu