



Campagne de mesure parisienne sur les particules ultrafines (PUF) :

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

Volet N°1 Mesures du 31 janvier au 5 mai 2022

Août 2023

**Bloomberg
Philanthropies**



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

7 rue Crillon - 75004 PARIS

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

www.airparif.fr

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

REMERCIEMENTS

La comparaison des niveaux de particules ultrafines entre Paris et les autres métropoles européennes et nord-américaines 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) :

Landesamt 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) ;

Et également 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 qui nous avons eu des échanges scientifiques sur la thématique de Particules Ultrafines.

Cette étude a été financée par Bloomberg Philanthropies dans le cadre d'un partenariat avec la Ville de Paris.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	2
SOMMAIRE	4
1. INTRODUCTION.....	6
2. DESCRIPTION DE LA CAMPAGNE	7
2.1. LES SITES DE MESURE	7
2.2. POLLUANTS MESURES.....	13
2.3. PERIODE DE MESURE.....	14
2.3.1. Météorologie	15
2.3.2. Roses des vents (secteurs de vents)	15
2.3.3. Qualité de l'air sur la période de la campagne	16
3. CARACTERISATION DES PARTICULES ULTRAFINES	17
3.1. HIERARCHISATION DU NOMBRE DE PUF	17
3.2. VARIABILITE TEMPORELLE DES PUF	17
3.2.1. Évolution horaire.....	17
3.2.2. Profil journalier moyen.....	19
3.3. PROFIL GRANULOMETRIQUE MOYEN	22
3.3.1. Mode majeur	22
3.3.2. Variabilité temporelle des profils granulométriques.....	24
4. ORIGINE DES PARTICULES ULTRAFINES A PARIS	27
4.1. CARBONE SUIE ET PARTICULES ULTRAFINES	27
4.1.1. Concentrations de carbone suie.....	27
4.1.2. Regroupement des sites selon les concentrations de carbone suie	28
4.1.3. Origine géographique des polluants.....	29
4.1.4. Corrélation entre les concentrations des particules ultrafines (PUF) et celles de carbone suie (eBC)	32
4.2. IMPACT DU TRAFIC ROUTIER A PARIS	34
4.3. CHAUFFAGE AU BOIS A PARIS	35
4.3.1. Profil horaire journalier	36
4.3.2. Corrélation entre les concentrations de carbone suie et celle des particules ultrafines (PUF) selon leur taille	37
4.3.3. Profil granulométrique : signature de la combustion de biomasse	38
4.4. PARTICULES ISSUES DE TRANSFORMATIONS DANS L'ATMOSPHERE	39
5. COMPARAISON A D'AUTRES METROPOLES.....	43
5.1. DEMARCHE	43
5.2. PRESENTATION DES SITES	43
5.2.1. Sites de fond urbain.....	44
5.2.2. Sites de trafic urbain	46

5.3.	ANALYSE DES NIVEAUX DES DIFFERENTES VILLES	48
5.3.1.	Facteurs d'influence.....	48
5.3.2.	Sites de fond urbain.....	49
5.3.3.	Sites de trafic urbain	50
6.	CONCLUSION	58
	REFERENCES.....	60
	ANNEXE I : LES POLLUANTS MESURES.....	62
	ANNEXE II : METROLOGIE.....	66
	ANNEXE III : BOITE A MOUSTACHE - DEFINITION.....	70
	ANNEXE IV : FORMATION ET DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DES AEROSOLS	71
	ANNEXE V : CONTACT DES ORGANISMES INTERNATIONAUX DE SURVEILLANCE DE LA QUALITE DE L'AIR	74
	ANNEXE VI : MOYENNES ANNUELLES DES MESURES DE DIOXYDE D'AZOTE A PARIS, FRANCFORT ET AMSTERDAM	77
	ANNEXE VII : PERIMETRES DE LA ZONE A FAIBLE EMISSION A LONDRES ET A PARIS	78

1. INTRODUCTION

Depuis fin 2019, Airparif suit les variations temporelles du nombre des 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 2 mois ont déjà été réalisées.

En février 2022, 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 campagne de mesures des particules ultrafines (PUF) avec pour objectifs une meilleure compréhension de leur variabilité spatiale et une évaluation de l'impact du chauffage au bois sur les niveaux de particules ultrafines dans Paris.

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).

Cette étude 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 d'Airparif à Paris Centre en situation de fond. Le premier volet de l'étude, objet du présent rapport, se focalise sur la **variabilité des PUF en période hivernale et printanière en 2022**. L'origine des PUF mesurées est recherchée en croisant les résultats avec des **mesures du carbone suie**. Une première comparaison des niveaux constatés avec ceux observés dans d'autres métropoles européennes et nord-américaine (Montréal, Canada) est également réalisée. Ce volet se penche également sur la problématique de l'utilisation du bois comme énergie de chauffage en croisant les mesures de carbone suie (permettant de tracer la combustion de la biomasse) avec le nombre de particules selon leur taille.

La seconde campagne de mesure menée pendant l'été 2023 prévoit une expérimentation complémentaire sur l'un des sites de mesure à proximité du trafic dans le cadre d'Airlab, le laboratoire d'innovation ouverte d'Airparif et ses partenaires. Une caméra sera installée pour évaluer la nature du trafic routier. Si l'expérimentation est concluante, elle permettra d'analyser les **niveaux de particules ultrafines au regard de la nature du trafic routier et d'affiner la compréhension des variabilités temporelles observées**. Les résultats feront l'objet d'un second rapport.

Cette étude des PUF renforcée sur Paris est financée par Bloomberg Philanthropies et entre dans le cadre de ses actions philanthropiques en faveur de l'environnement qui se donne pour mission d'améliorer et prolonger la vie du plus grand nombre. L'organisation se concentre sur cinq domaines : arts, éducation, environnement, innovation gouvernementale et santé publique.

2. DESCRIPTION DE LA CAMPAGNE

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 hivernale et printanière s'est déroulée du **31 janvier au 5 mai 2022**.

2.1. 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 1.5.

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

Sites de fond urbain

Les sites de fond urbain 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), l'un des objectifs de cette étude.

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 donc appuyée sur l'analyse du parc de logements réalisée par l'Atelier Parisien d'Urbanisme (APUR, Juillet 2018). L'approche se base en premier lieu sur la période de construction des bâtiments, qui permet de sélectionner les bâtiments érigés avant 1975, ceux-ci pouvant potentiellement être équipés de cheminée à foyer ouvert, de poêle à bois ou à granulés.

La Figure 4 représente les périodes de construction des bâtiments au sein de la Métropole du Grand Paris (MGP) avec un zoom sur Paris, avec une résolution à la parcelle (APUR, Juillet 2018).

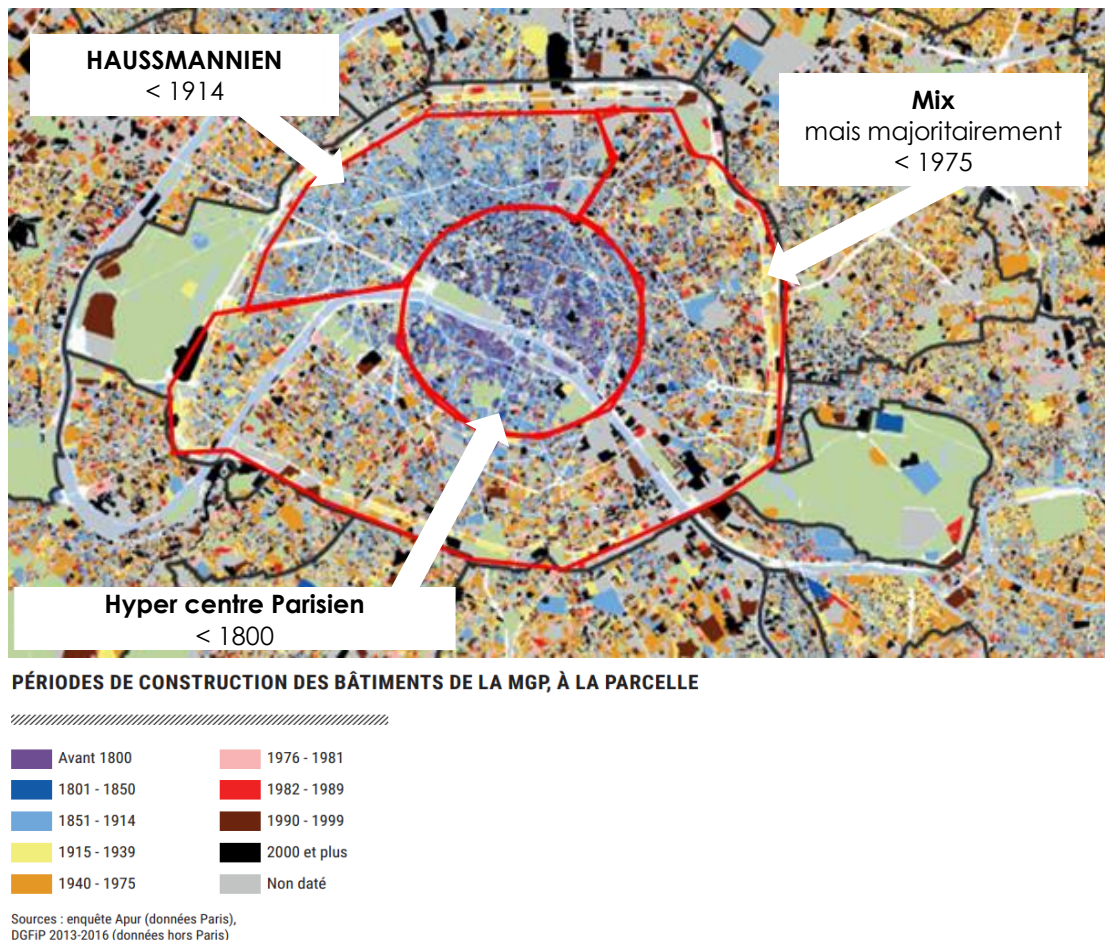


Figure 4 : Périodes de construction des bâtiments de la MGP (zoom sur Paris), à la parcelle (APUR, Juillet 2018)

La majorité des bâtiments de Paris ont été érigés avant 1975. Trois grandes zones se dégagent de la carte : la première zone est l'hyper centre avec des bâtiments principalement construits avant 1800, la deuxième zone appelée « Haussmannienne » dans ce 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 (la station Paris 1^{er} les Halles ; la station permanente Paris 18^{ème} est implantée dans la zone Haussmannienne.

La zone dite « mixte » avec des bâtiments majoritairement construits avant 1975 ne possède pas de site permanent de mesure en situation de fond. Un site temporaire a ainsi été recherché. Le type de logement permet d'identifier les secteurs où sont implantés les maisons individuelles qui peuvent potentiellement être équipées de systèmes brûlant de la biomasse.

La Figure 5, qui représente Paris et sa proche banlieue en fonction du type d'habitat, montre que cette zone est caractérisée par un nombre plus important de pavillons (représentés en orange). Airparif a donc prospecté dans les 14^{ème}, 16^{ème}, 19^{ème} et 20^{ème} arrondissements de Paris pour trouver un site de mesure urbain de fond potentiellement impacté par le chauffage au bois issu d'une de ces zones pavillonnaire (en pointillés rouge).

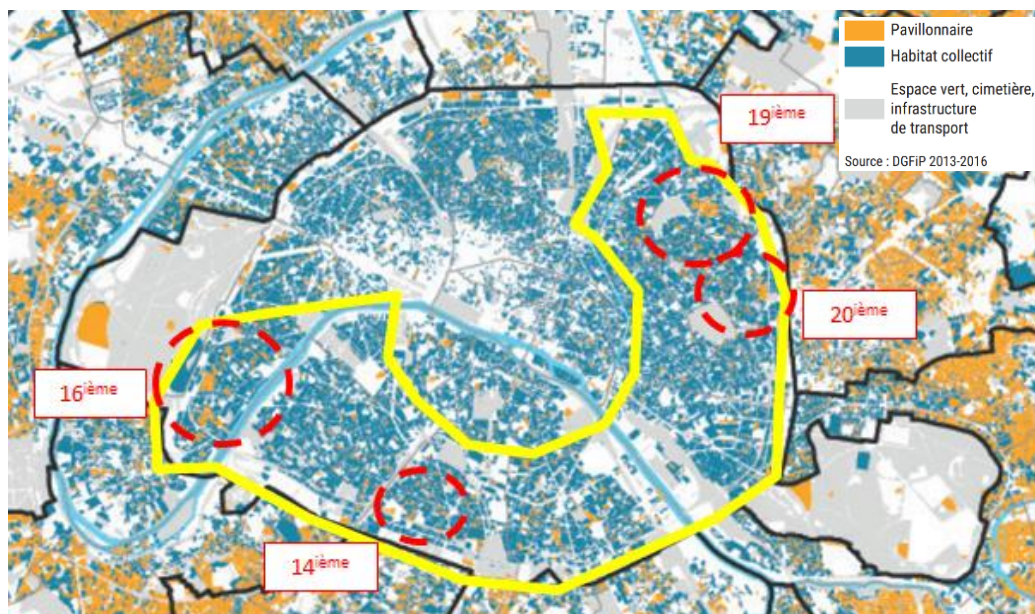


Figure 5 : Tissus pavillonnaire et d'habitat collectif de Paris et sa proche banlieue (APUR, Juillet 2018)

Les investigations sur le terrain de faisabilité d'implantation d'un site de campagne de mesure ont permis de retenir le site situé dans le 19^{ème} arrondissement.

Les trois sites urbains de fond sélectionnés pour la campagne sont donc :

- ✓ Paris 1^{er} les Halles – noté « PA01 »
- ✓ Paris 18^{ème} – noté « PA18 »
- ✓ Paris 19^{ème} – noté « PA19 »

Leur localisation est donnée sur la Figure 6 et les caractéristiques de chaque station sont décrites par la suite.



Figure 6 : Localisation des stations urbaines de fond de l'étude

Paris 1^{er} Les Halles :

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



Figure 7 : Site PA01, à gauche vue du jardin Nelson Mandela (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 8 : Site PA18, rue Ferdinand Flocon (Source Google Earth) ; à droite vue vers l'Ouest des points de prélèvements de la station PA18

Site temporaire Paris 19^{ème} :

Le site de mesure de « fond urbain » **PA19** a été implanté pour l'étude au sein de la cour de l'église Saint-François d'Assise (analyseur installé dans un camion laboratoire), la hauteur de prélèvement des polluants est de 2 m, hauteur conforme aux recommandations réglementaires.



Figure 9 : Site PA19, cour Eglise Saint-François d'Assise (Source Google Earth) ; à droite vue vers l'Ouest du camion laboratoire d'Airparif

Récapitulatif des sites instrumentés

Les sites de mesure de l'étude sont résumés dans le Tableau 1 et sur la Figure 10.

Nom du site	Lieu	Code station	Type de station
Paris 1 ^{er}	Jardin Nelson Mandela	PA01	Fond Urbain
Paris 18 ^{ième}	7 rue Ferdinand Flocon	PA18	Fond Urbain
Paris 19 ^{ième}	9 rue de Mouzaïa	PA19	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

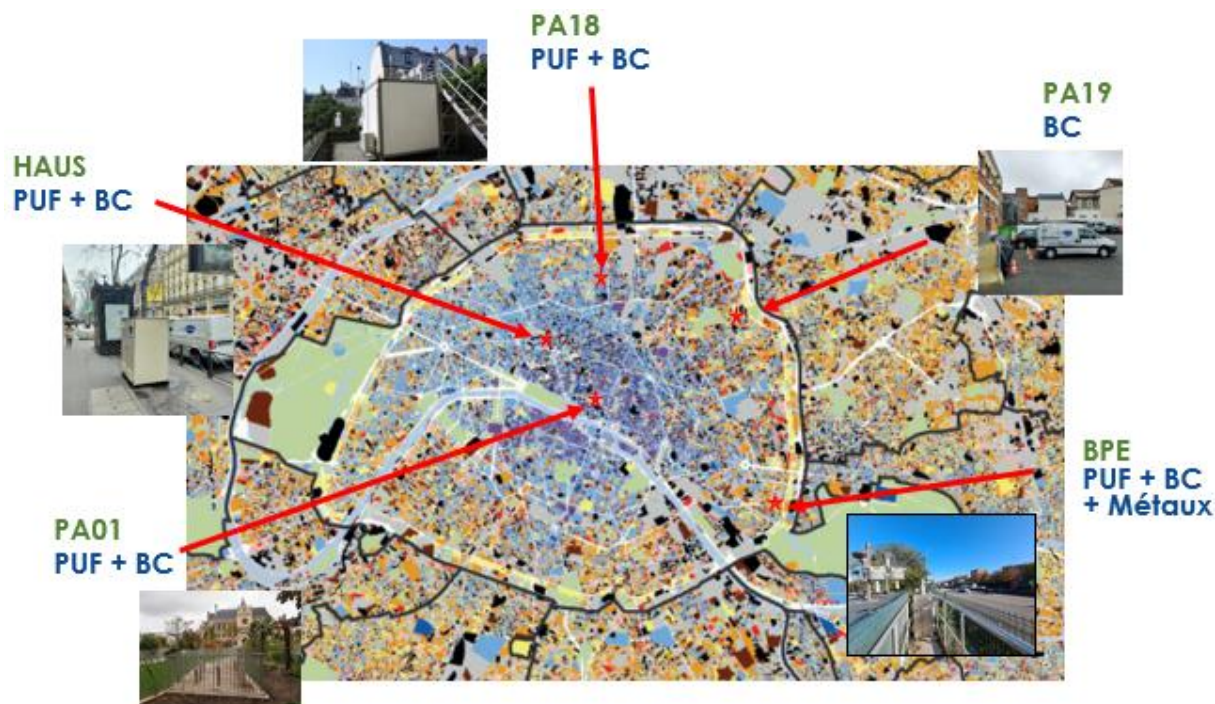


Figure 10 : Localisation de l'ensemble des sites de l'étude et nom des polluants mesurés

2.2. 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 (136 classes de tailles allant de 7 nm à 100 nm) 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.

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

Station	Comptage de particules (5 – 400 nm) Dont PUF (5 – 100 nm)	eBC*
PA01	U-SMPS	AE33
PA18	U-SMPS	AE33
PA19	-	AE33
HAUS	U-SMPS	AE33
BPE	U-SMPS	AE33

* dans les PM_{2.5}

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

2.3. Période de mesure

La campagne de mesure hivernale et printanière s'est déroulée du **31 janvier au 5 mai 2022**.

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	Particules 5 - 400 nm	eBC (dans les PM _{2.5})	Métaux
PA01	99.9 %	95.7 %	-
PA18	98.9 %	94.4 %	-
PA19	-	90.3 %	-
HAUS	90.2 % *	97.8 %	-
BPEST	97.2 % **	90.5 %	99.8 %

* Composé de 75.3 % en configuration 5-400 nm & 14.9 % en configuration 5 et 10 nm

** Composé de 90.8 % en configuration 5-400 nm & 6.4 % en configuration 10 nm

Tableau 3 : Taux de disponibilité des données en % sur la période de la campagne du 31 janvier au 5 mai 2022

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 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**.

En février, des rafales de vent fréquentes, notamment au passage de la tempête Eunice en Europe du Nord le 18 février ont été observées. Au mois de mars, les vents ont été généralement faibles à modérés, de direction principalement Nord-Est à Sud-Est en raison de la prédominance de conditions anticycloniques bloquant le plus souvent le flux océanique.

En avril, des vents d'un large secteur Nord-Est ont nettement prévalu en particulier lors de la 2^{ième} et dernière décade, dominées par des conditions anticycloniques.

2.3.2. Roses des vents (secteurs de vents)

La Figure 11 présente pour la campagne de mesures et pour la période de 2010 à 2020, la fréquence des régimes de vent ainsi que les vitesses de vent associées observées à la station météorologique de Paris Montsouris. Les secteurs en rouge indiquent les vents les plus faibles (vitesses 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.

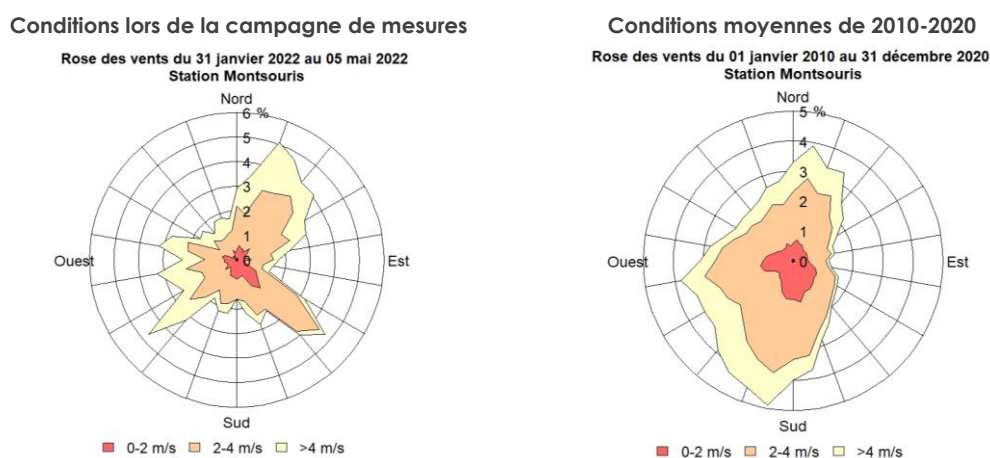


Figure 11 : Fréquence (en %) et secteurs de vents observés à la station Montsouris (Paris 14^{ième}) - Source : Météo France

Les régimes de vents étaient essentiellement dispersifs pendant la campagne, avec des vitesses de vent majoritairement comprises entre 2 et 4 m/s. La rose des vents moyennée sur la période des années 2010 à 2020 montre également des vents majoritairement dispersifs. Le vent de secteur Sud

a été moins représenté que sur la période des années 2010 à 2020, a contrario le secteur de vent Sud-Est a été plus représenté pendant la campagne de mesure.

La période de la campagne était donc globalement aussi dispersive que 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.

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

Ces conditions météorologiques ont engendré globalement sur le début d'année une qualité de l'air avec des indices allant de « moyen » jusqu'au qualificatif « mauvais ».

Le mois de février a globalement connu une qualité de l'air moyenne.

En mars, la qualité de l'air a été de moyenne à mauvaise suivant les jours. Trois 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, le mois de mars 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.

Le mois d'avril a été marqué par une majorité de journées qualifiées avec une qualité de l'air « dégradée » (sur les deux tiers du mois), en raison des niveaux d'ozone soutenus favorisés par les conditions printanières (température douce et ensoleillement) propices à sa formation.

3. Caractérisation des Particules ultrafines

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 **31 janvier au 5 mai 2022** aux différents sites présentés précédemment.

3.1. 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 31 janvier au 5 mai 2022).

Station	Typologie	Saison	Période	PUF	Comptage de
				(part/cm ³) 5 - 100 nm	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 4 : concentrations moyennes en particules ultrafines (PUF) et de particules sur la gamme 5-400 nm (en nombre) observées lors des campagnes PUF réalisées du 31 janvier au 5 mai 2022

Les concentrations en nombre de PUF (gamme 5 à 100 nm) relevées à proximité du trafic routier sont 2 à 2.5 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^{ème} sont proches avec des concentrations comprises entre 9 900 et 10 800 particules/cm³.

Concernant les sites à proximité du trafic routier urbain, les concentrations horaires moyennes de PUF durant la campagne ont été de 21 900 particules/cm³ sur le boulevard Haussmann et de 25 600 particules/cm³ sur le Boulevard Périphérique Est (soit 15 % 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.

Ces résultats sont cohérents avec les précédentes mesures d'Airparif (Airparif, février 2022), (Airparif, 2022)).

3.2. Variabilité temporelle des PUF

3.2.1. Évolution horaire

L'évolution temporelle à l'échelle horaire de la concentration en nombre de PUF sur les 4 sites de l'étude sont présentés Figure 12. Les niveaux mesurés sur les sites urbains de fond PA01 et PA18, y

sont représentés en orange et en violet et correspondent au niveau de fond au sein de Paris intra-muros. Les 2 sites « trafic » sont représentés en jaune (boulevard Hausmann) et en bleu (Boulevard Périphérique Est).

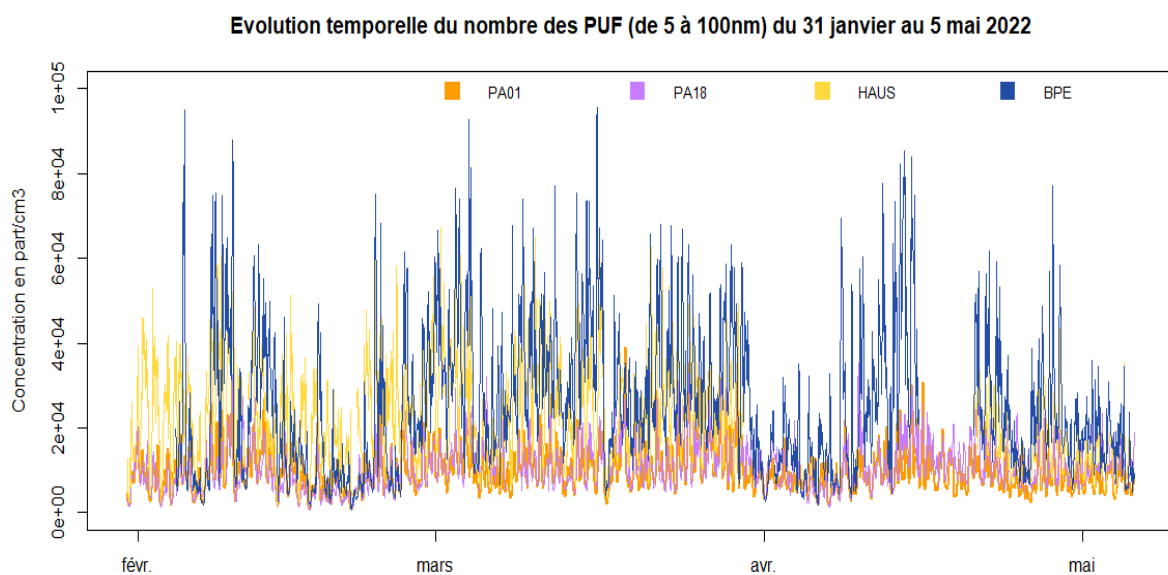


Figure 12 : Évolution temporelle du nombre moyen horaire des PUF en situation de fond (PA01 et PA18) et à proximité du trafic routier (HAUS, BPE) du 31 janvier au 5 mai 2022.

À l'échelle horaire, l'évolution temporelle de la concentration en nombre de PUF montre des niveaux variables 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 sur 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 synthétisée sous forme de « boîte à moustache » (voir définition en Annexe III) pour illustrer les différences de niveau moyen, médian, etc. entre les sites (Figure 13).

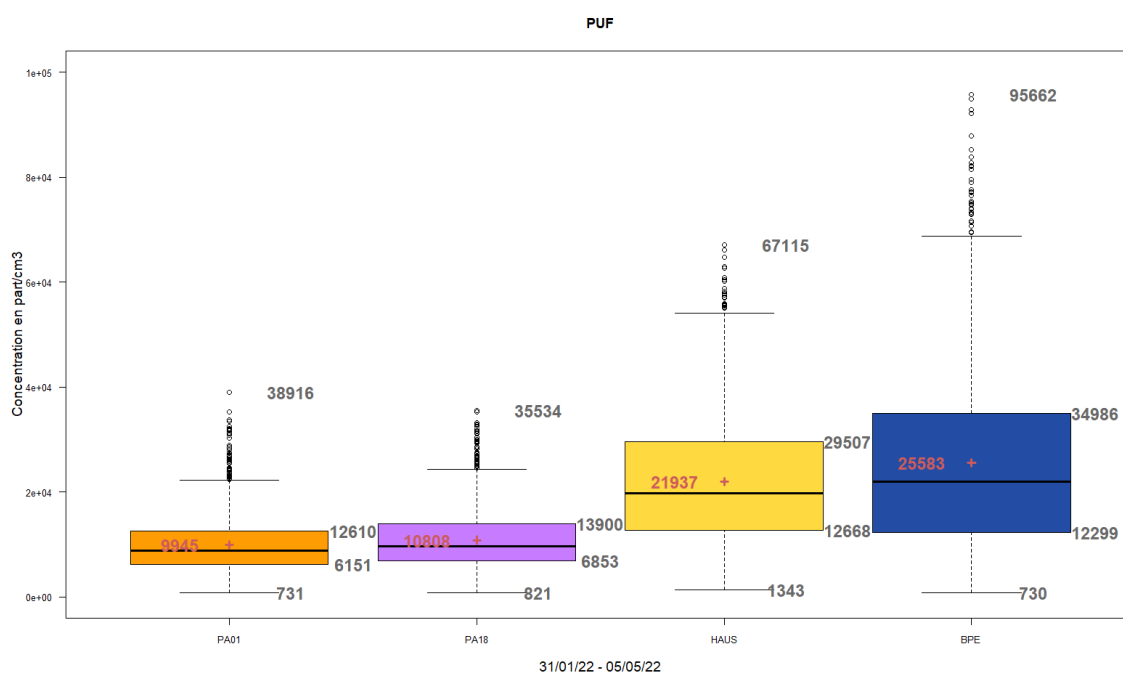


Figure 13 : Boîtes à moustaches des concentrations horaires en PUF du 31 janvier au 5 mai 2022

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 6 151 et 12 610 particules/cm³). Le trait noir au sein de la boîte représente la valeur médiane et la croix 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 représentent les valeurs (minimales et maximales) 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 ».

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, la 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 jusqu'à 100 000 particules/cm³ pour le site de BPE, alors que celles des sites de fond ne dépassent pas 40 000 particules/cm³.

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.

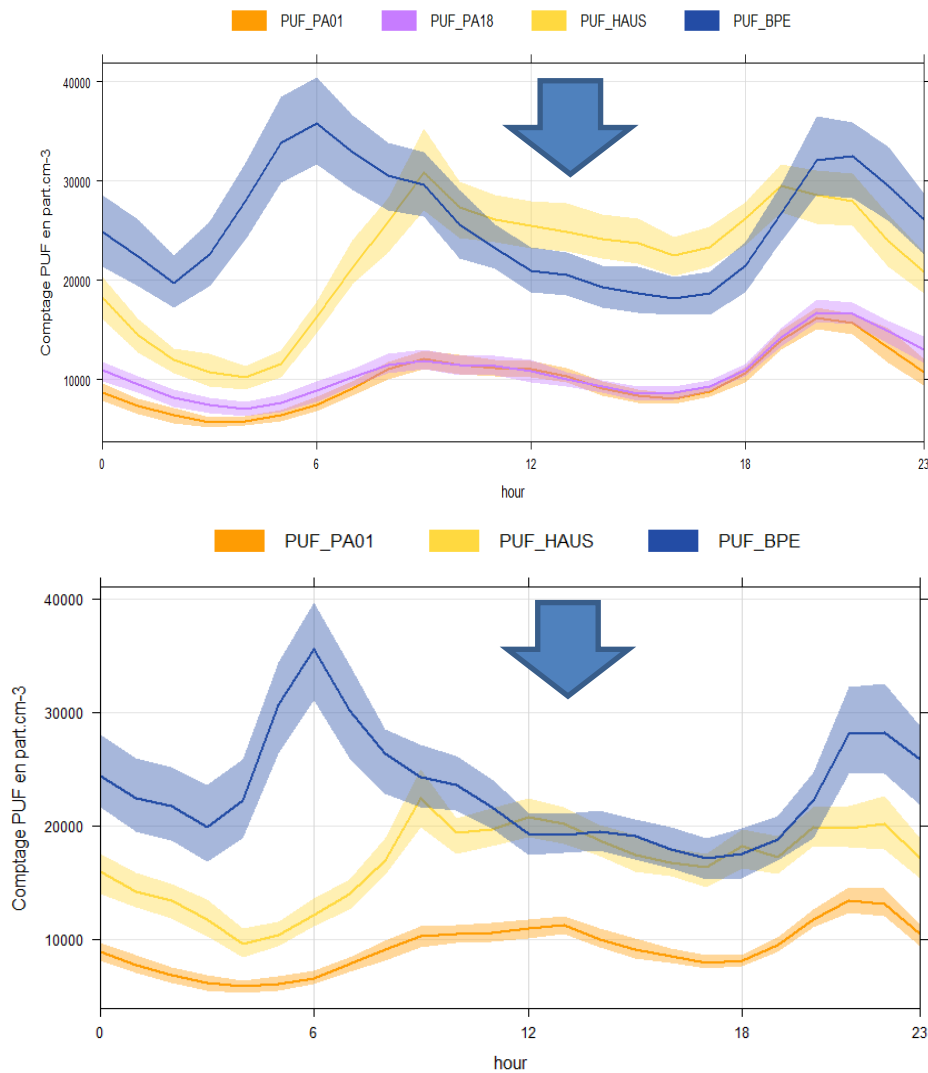
Ces résultats montrent que le trafic routier est une des sources de particules ultrafines à l'échelle locale, et que sa contribution peut faire augmenter ponctuellement très fortement les concentrations en nombre à proximité des axes de circulation.

3.2.2. 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 hiver et printemps 2022 (PA01, PA18, HAUS et BPE) et sur la graphique du bas celle du nombre de PUF observé sur les sites d'étude de la campagne 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.



Campagne d'étude
Hiver et Printemps 2022 :
31 janvier au 5 mai 2022

Campagne d'étude
Été 2021 :
14 juin au 19 septembre 2021

Figure 14 : Profils moyens journaliers du nombre de PUF lors de la campagne 2022 (en haut) et lors de la campagne été 2021 (en bas)

Le profil 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 comme estivale, ce qui est caractéristique d'un impact lié au trafic routier.

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 HAUS (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 (voir Figure 15).

Les concentrations moyennes en nombre de PUF entre 0h-6h 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), sur la période hiver-printemps comme sur la période estivale. Cette observation peut s'expliquer par le très faible trafic sur cet axe routier sur cette partie de la nuit, comme pour les autres grands axes de Paris Intra muros (voir graphe Figure 15).

Trafic - Jour ouvré

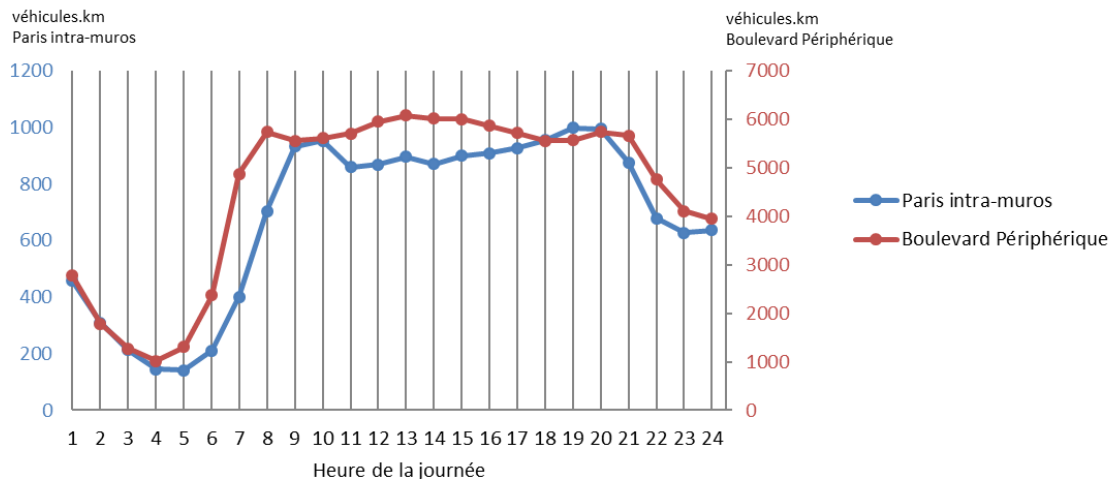


Figure 15 : Evolution moyenne horaire du trafic routier sur les axes parisiens intramuros et sur le Boulevard Périphérique

La campagne de l'été 2021 présente pour les sites BPE et HAUS un « plateau » en cours de journée (flèche en bleu sur la Figure 14) avec une concentration de PUF sur le site BPE qui rejoint le niveau du site HAUS. **En revanche, la campagne hivernale et printanière 2022 présente des niveaux sur le site BPE inférieurs à ceux observés sur le site HAUS sur la même tranche horaire.**

Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ces constats différents entre les deux campagnes :

- Les différences de conditions météorologiques entre les périodes estivales et hivernales ou printanières ainsi que le pourcentage du temps où la station BPE est sous l'influence directe du Boulevard Périphérique (fonction des vitesses et directions de vents) peuvent influencer les niveaux de PUF mesurés.
- Les variations de trafic entre les deux saisons peuvent également être un facteur explicatif (volume de trafic, composition du parc de véhicules circulant au droit des axes).
- Une autre des hypothèses pouvant expliquer le phénomène observé lors de la campagne 2022 est la modification du trafic sur l'axe du boulevard Haussmann. En effet, le site de la ville de Paris précise que cette période a été marquée par des travaux pour pérenniser la piste cyclable de la rue Tronchet et rue du Havre (Figure 16). Ils ont été réalisés du mois de janvier au mois d'avril 2022 inclus (cf. Ville de Paris). Ces travaux ont très certainement engendré une modification du trafic routier notamment sur le boulevard Haussmann : congestion, modification de la vitesse de circulation.

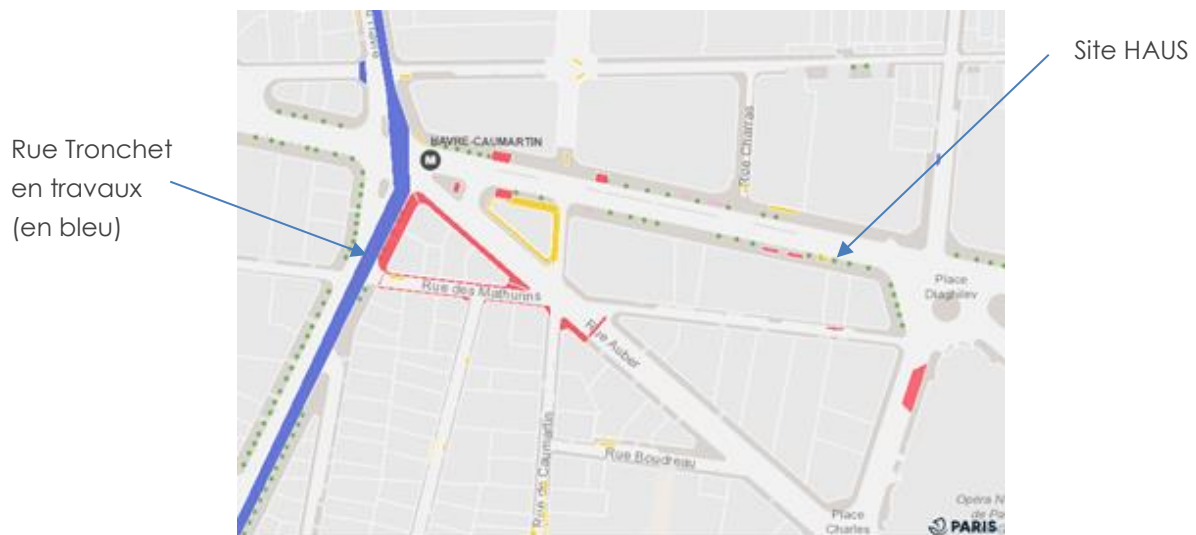


Figure 16 : Source Ville de Paris, plan de situation des travaux de la rue Tronchet et du site HAUS

Lors de la campagne hivernale et printanière 2022, les sites de fond urbain PA01 et PA18 présentent des profils moyens journaliers similaires à ceux observés pendant la campagne estivale de 2021. Les sites de proximité au trafic routier quant à eux présentent une hiérarchie des niveaux de concentrations au cours de la journée différente entre les deux campagnes de mesures. La campagne d'étude prévue à l'été 2023 permettra d'analyser de nouvelles mesures de PUF au sein de Paris en période estivale, et d'évaluer les différences de comportement des PUF entre les deux saisons sur les sites de proximité au trafic routier.

3.3. 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 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.

3.3.1. 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 en comptage sur le profil granulométrique est appelé « **mode majeur** ». Il est identifié par des pointillés verts sur la Figure 17 pour chaque site.

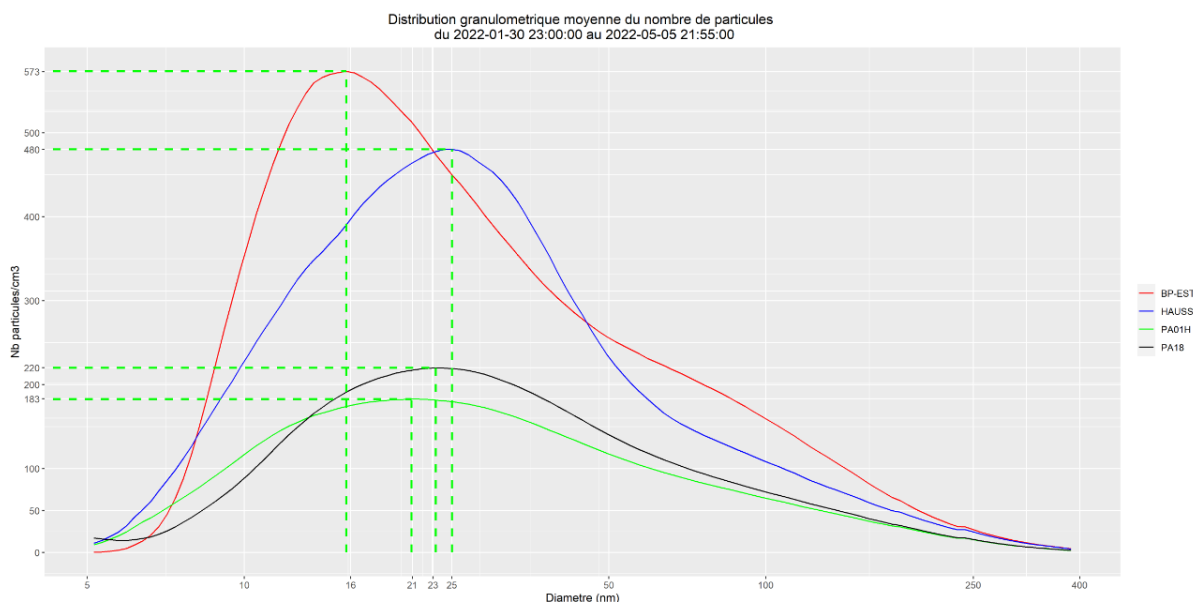


Figure 17 : Distribution granulométrique moyenne sur les 2 sites trafic (BPE en rouge, HAUSS en bleu) et les 2 sites de fond (PA01 en vert et PA18 en noir) sur Paris (31 janvier au 5 mai 2022)

Le

Tableau 5 synthétise le mode majeur associé à chacun des sites lors de la campagne d'étude du 31 janvier au 5 mai 2022 (extrait de la Figure 17) et celui observé lors de la campagne durant l'été 2021 (Airparif, 2022).

Mode Majeur (nm)			
Station	Typologie	Hiver et printemps 2022	Été 2021
PA01	Urbain de fond	21	22
PA18	Urbain de fond	23	-
HAUS	Trafic routier	25	26
BPE	Trafic routier	16	14

Tableau 5 : Synthèse du mode majeur de chaque site lors de la campagne hiver/printemps 2022 et lors de celle de l'été 2021

Pour chaque site, le mode majeur observé durant l'hiver et le printemps 2022 est inférieur à 30 nm. Ce résultat est conforme aux résultats des précédentes campagnes menées par Airparif, notamment celle menée durant l'été 2021 (Airparif, 2022). Ce mode majeur inférieur à 30 nm est caractéristique d'une source trafic routier et du mode appelé « Nucléation » (cf. Annexe IV : Formation et distribution granulométrique des aérosols), indiquant qu'une part majoritaire de particules est « fraîchement » émise.

Les sites de fond présentent un mode majeur autour de 20 nm, ce qui confirme les enseignements de campagnes précédentes.

Pour les sites de proximité au trafic routier, comme pour la campagne 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 25 nm.

Les informations disponibles concernant le trafic routier des axes routier BPE et HAUS sur la période de l'étude ne sont pas suffisamment précises pour permettre une identification des paramètres d'influence majeurs en lien avec la source du trafic routier qui pourraient expliquer ces différences de mode majeur entre les deux sites. Un dispositif de caméra installé pendant la campagne estivale de 2023 sur le site sur boulevard Haussmann permettra potentiellement d'acquérir une meilleure connaissance des facteurs d'influence des niveaux de particules ultrafines émis par le trafic routier, notamment en termes de composition du parc roulant au droit de cette station (nombre de poids lourds, de véhicules légers, de deux roues motorisés) mais également sur les conditions de circulation, par exemple la vitesse de circulation.

L'amplitude de concentration moyenne associée au mode majeur de chaque site est présentée dans le Tableau 6.

Concentration moyenne de particules associée au Mode Majeur (part/cm ³)			
Station	Typologie	Hiver et printemps 2022	Été 2021
PA01	Urbain de fond	183	175
PA18	Urbain de fond	220	-
HAUS	Trafic routier	480	398
BPE	Trafic routier	573	475

Tableau 6 : Concentration moyenne de particules au Mode Majeur (part.cm⁻³) – hiver/printemps 2022 / été 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 5), présente également une concentration en nombre associée à ce mode majeur du même ordre (

Tableau 6).

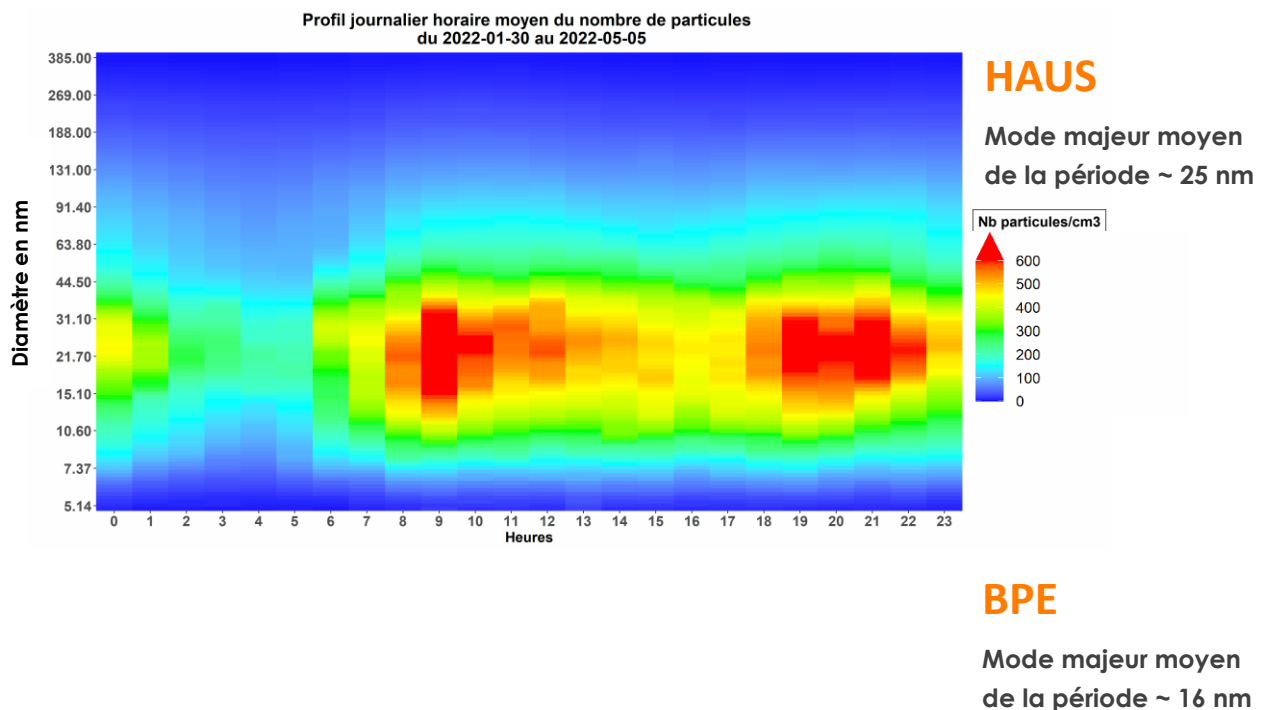
Pour les sites de proximité au trafic routier, l'amplitude est environ 2 à 2.5 fois plus forte que celle du fond urbain parisien (PA01 et PA18), avec une amplitude maximale constatée sur le site du Boulevard Périphérique. Ces éléments confirment l'influence du trafic routier.

3.3.2. Variabilité temporelle des profils granulométriques

Afin de mieux comprendre le profil granulométrique obtenu sur les différents sites, il est possible de de le décliner selon les heures d'une journée type. 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.



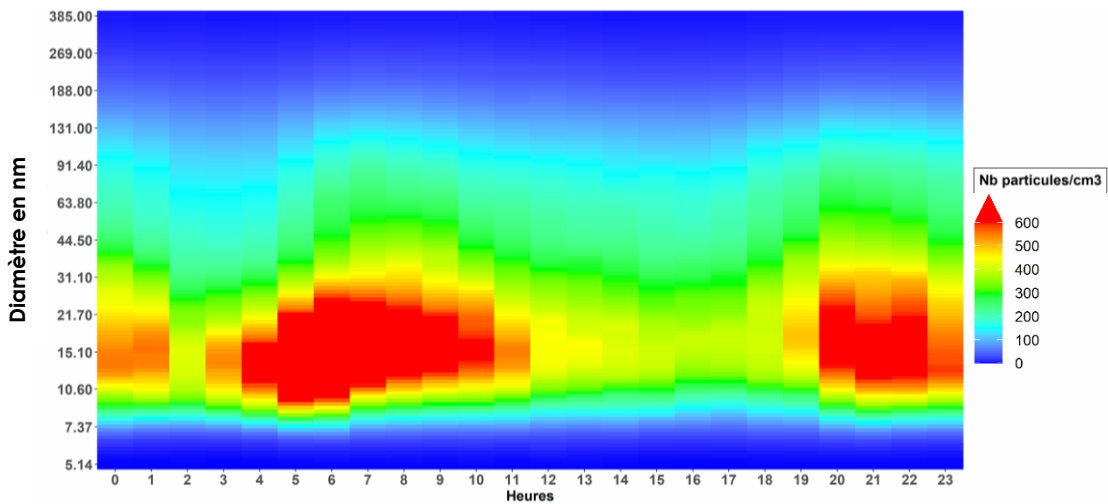


Figure 18 : Évolution journalière « 2D » du nombre de particules par diamètre - sites boulevard Haussmann (HAUS, en haut) et Boulevard Périphérique Est (BPE, en bas) [du 31 janvier au 5 mai 2022]

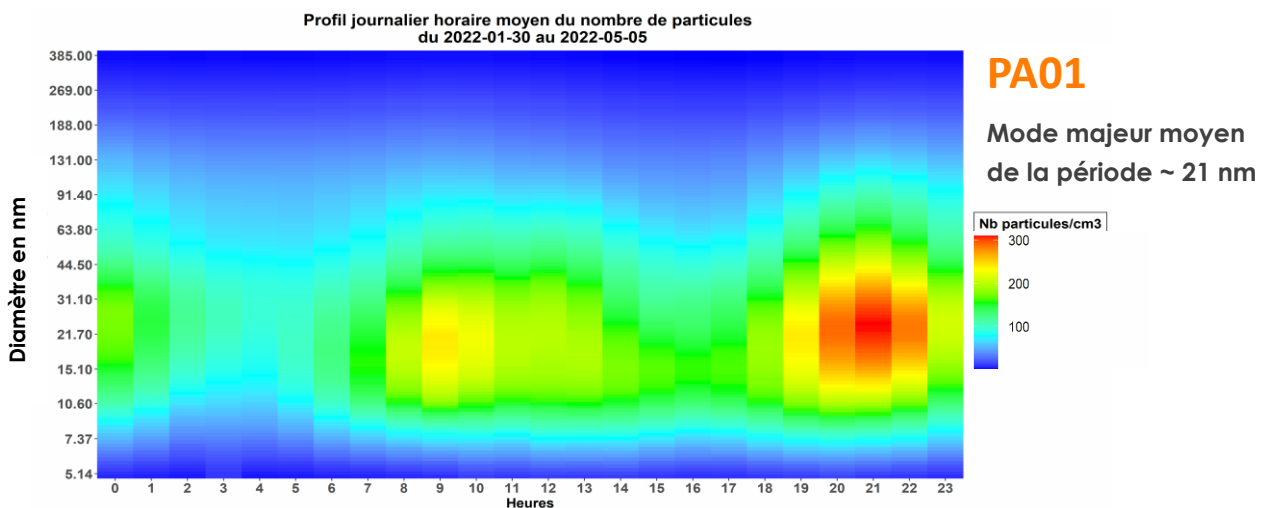
La figure confirme un décalage temporel de l'augmentation des concentrations en nombre de particules le matin entre les deux sites de trafic urbain parisien.

En effet, dans un premier temps, une augmentation des concentrations en nombre des particules dont le diamètre est de l'ordre de 15 nm (zone orangée entre 10 et 20 nm de 0h à 3h) est observée sur le site Boulevard Périphérique Est. Ce diamètre est proche du mode majeur moyen de la période (16 nm). Puis, dans un second temps, les tailles de particules les plus présentes passent d'une plage entre 10 et 20 nm à partir de 3h à une plage entre 10 et 30 nm 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 un élargissement de la gamme de taille plus tardif que sur le site Boulevard Périphérique Est : il débute autour de 6h du matin avec une augmentation des particules de diamètre proche du mode majeur moyen de la période (25 nm), puis un élargissement de la gamme de taille à une plage entre 10 et 40 nm à 9h.

A partir de midi, les concentrations en nombre se stabilisent autour du mode majeur de chacun des sites à des niveaux moins intenses. En début de soirée, les niveaux repartent à la hausse, cette fois de manière quasi synchrone sur les deux sites, avec toutefois des niveaux moins intenses que le matin.

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^{ième} (PA18, en bas) sur la période d'étude, ainsi que leur mode majeur moyen calculé sur la campagne de mesure.



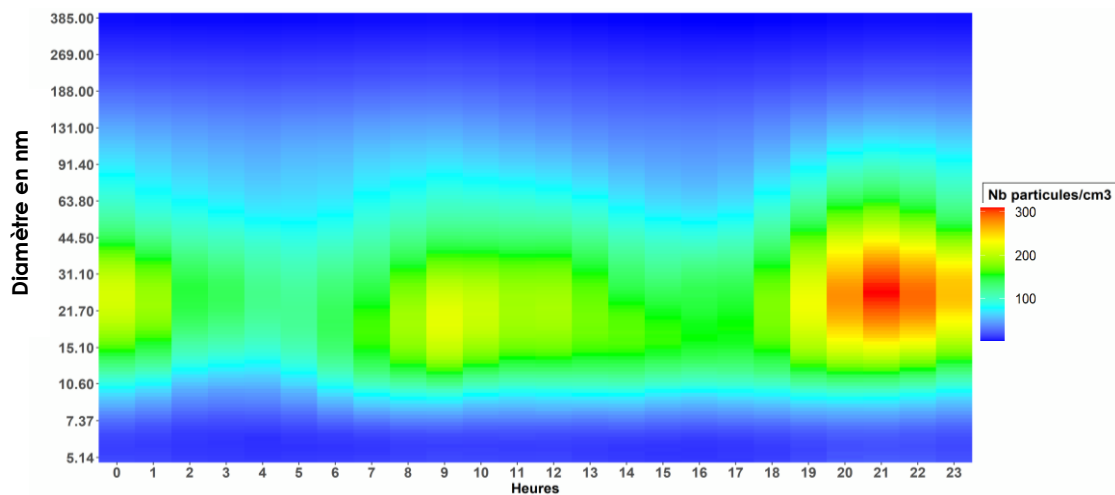


Figure 19 : Évolution journalière « 2D » du nombre de particules par diamètre - sites Paris 1^{er} les Halles (PA01, en haut) et Paris 18^{ème} (PA18, en bas) [du 31 janvier au 5 mai 2022]

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 à 9h avec une augmentation du nombre de particules autour du mode majeur moyen de la période (20 nm pour PA01 comme pour PA18) illustrée en jaune orangée. Une diminution des concentrations est constatée avant une nouvelle augmentation en début de soirée dès 19h avec des tailles de particules centrées autour du mode majeur.

Même si le profil est plus atténué que pour les sites de proximité au trafic routier, cette représentation illustre l'influence du trafic routier sur les niveaux de fond en nombre de particules.

4. 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.

L'objet de cette partie est d'aller plus loin sur l'origine des PUF, notamment vérifier si l'impact du chauffage au bois identifié lors de la campagne hivernale de 2020-2021 (Airparif, février 2022) est également visible dans les résultats de cette campagne de mesure hivernale et printanière à Paris sur l'année 2022.

Pour ce faire, des comparaisons avec les résultats de mesure de carbone suies faites sur chaque site de mesure de cette étude sont menées (paragraphe 4.1).

De plus, la campagne a connu en mars des journées avec des conditions propices à la formation de composés organiques secondaires. L'influence sur les niveaux de PUF est analysée dans le paragraphe 4.4.

4.1. Carbone suie et Particules ultrafines

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 »).

Deux appareils ont été installés pour l'étude sur les sites Paris 18^{ième} et Paris 19^{ième} en complément des trois appareils de surveillance permanente que compte le réseau de surveillance de la qualité de l'air d'Airparif (Paris 1^{er} les Halles, boulevard Haussmann et Boulevard Périphérique Est). 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 présence de carbone suie issu du brûlage de biomasse.

4.1.1. Concentrations de carbone suie

Le Tableau 7 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 31 janvier au 5 mai 2022). Les concentrations moyennes de particules ultrafines et le nombre total de particules sur la gamme de mesure (5-400 nm) sont également rappelés.

Station	Typologie	Saison	Période	eBC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	eBCff ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	eBCwb ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PUF (part/cm ³) 5 - 100 nm	Comptage de particules (part/cm ³) 5-400 nm
PA01	Fond urbain	Hiver et printemps	31 janv. 2022 -> 5 mai 2022	1.0	0.8	0.2	9 900	11 000
PA18	Fond urbain	Hiver et printemps	31 janv. 2022 -> 5 mai 2022	1.1	0.9	0.2	10 800	12 000
PA19	Fond urbain	Hiver et printemps	31 janv. 2022 -> 5 mai 2022	1.1	0.9	0.2	-	-
HAUS	Trafic urbain	Hiver et printemps	31 janv. 2022 -> 5 mai 2022	1.7	1.5	0.2	21 900	23 700
BPE	Trafic urbain	Hiver et printemps	31 janv. 2022 -> 5 mai 2022	4.5	-	-	25 600	27 900

Tableau 7 : 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 31 janvier au 5 mai 2022.

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, et $0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur les sites PA18 et PA19.

Les concentrations moyennes de carbone suie issu de la combustion de biomasse (eBCwb) sont homogènes sur l'ensemble des sites de mesure, à la fois à proximité du trafic routier et à distance des axes, sur la période de la campagne. Les conditions contrastées sur la période avec peu de jours avec des températures froides, propices à l'utilisation de chauffage au bois ne permettent toutefois pas des conclusions robustes sur l'ensemble de la période. Certaines analyses de la contribution de la combustion de biomasse aux concentrations de particules ultrafines sont donc effectuées sur certaines journées au sein de la période de la campagne. Il est également à noter que les sites de mesure de fond ont été choisis dans des zones potentiellement impactées par le chauffage au bois, ainsi ces mesures ne permettent pas de conclure à l'échelle de l'ensemble de Paris.

4.1.2. Regroupement des sites selon les concentrations de carbone suie

Afin d'évaluer statistiquement la similarité des mesures de carbone suie sur les différents sites, un test de regroupement ascendant hiérarchique (noté « CAH ») a été réalisé. La similarité entre les différents jeux de données se base sur le coefficient de corrélation. Les résultats du test sont regroupés dans la représentation en dendrogramme.

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.

La Figure 20 représente le dendrogramme des mesures de carbone suie (eBC) des sites de fond et de proximité au trafic routier parisiens (PA01, PA18, PA19, BPE et HAUS) et des sites de fond de la Petite Couronne (Gennevilliers, noté « GEN » et Tremblay-en-France, noté « TREMB »), sur la période 31 janvier au 5 mai 2022.

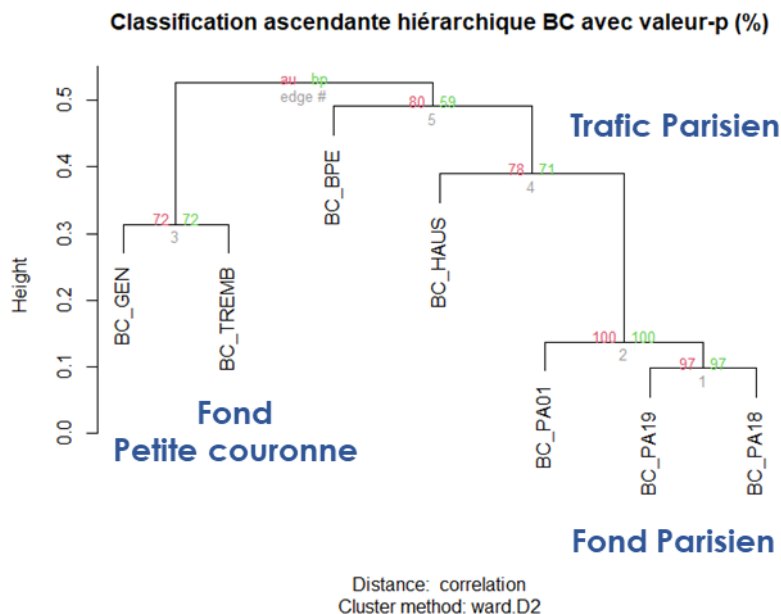


Figure 20 : Dendrogramme des mesures de carbone suie (BC) des sites de fond et de proximité au trafic routier parisiens (PA01, PA18, PA19, BPE et HAUS) et des sites de fond de la petite couronne (GEN et TREMB), sur la période 31 janvier au 5 mai 2022.

En haut du dendrogramme, l'ensemble des sites de mesure ne sont pas distingués. Plus on descend dans le dendrogramme, plus les regroupements de sites (un ou plusieurs sites) sont affinés.

Le dendrogramme met tout d'abord en évidence une similarité des mesures entre les sites de fond situés en Petite Couronne d'une part (GEN, TREMB, à gauche) et entre les sites parisiens d'autre part (BPE, HAUS, PA01, PA19 et PA18, à droite).

Au sein des sites parisiens, quatre sous-regroupements sont identifiés : un regroupement avec le site trafic de BPE, un regroupement avec le site trafic HAUS, un regroupement avec le site de fond PA01 et finalement un regroupement avec les sites de fond PA18 et PA19.

La distance entre les sites BPE et HAUS d'une part et les sites PA01, PA19, PA18 d'autre part montre bien une distinction nette entre les sites de trafic et les sites de fond au sein de Paris.

Le regroupement des sites PA01 et le groupement PA18 et PA19 se situent en bas du dendrogramme : ce sont les sites qui partagent la similarité la plus forte, ce qui indique que le comportement des niveaux de carbone suie sur ces sites de fond parisien est très similaire en moyenne sur la période de la campagne. Les profils granulométriques moyens des mesures de PUF indiquent un regroupement entre sites similaire : BPE puis HAUS, puis PA01 et PA18 (Figure 17).

4.1.3. Origine géographique des polluants

Pour représenter au mieux l'origine géographique des polluants sur chacun des sites, l'illustration sous forme de **rose de pollution** est usuellement utilisée en qualité de l'air. Ce graphique permet **d'estimer la concentration moyenne d'un polluant en fonction de la vitesse et du secteur de vent.** Comme pour une rose des vents, le graphique en radar est divisé en différents secteurs correspondant à l'origine des vents (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.

La Figure 21 présente ces roses de pollution pour les mesures de PUF, de carbone suie issu de la combustion d'hydrocarbures (eBCff) et celui issu de la combustion de biomasse (eBCwb). Les vents dominants sur la période d'analyse sont des vents en secteurs Sud-Ouest et Nord-Est.

En termes de qualité de l'air, pour les sites de fond urbain, 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.

Pour les sites de fond urbain, les maxima observés de carbone suie (eBCff et eBCwb) sont associés à des vitesses de vent entre 0 et 4 m/s, l'origine de ces niveaux est donc liée à des émissions locales. **L'impact local de la combustion biomasse sur les trois sites parisiens de fond est homogène mais le faible nombre de jours avec des températures froides, propices à l'utilisation de chauffage au bois ne permet pas d'être conclusif.**

Les roses de pollution des deux sites de proximité au trafic routier mettent clairement en évidence les émissions issues du trafic routier des axes surveillés (mesures PUF et eBCff), avec des concentrations maximales observées d'Est en Ouest pour le boulevard Haussmann et de Nord Est à Sud pour le Boulevard Périphérique Est. **De plus pour le boulevard Haussmann, l'impact des émissions locales de combustion de biomasse (eBCwb) observé sur le site est similaire à celui observé sur les sites de fond parisien** (motifs de dispersion selon les vitesses et secteurs de vent, comparables entre les 3 sites).

Il est important de noter que les roses de pollution des PUF ne sont pas complètement corrélées avec celles de carbone suie eBCff et eBCwb sur tous les secteurs et vitesses de vent. Notamment sur les sites de fond parisiens tels que Paris 1^{er} Les Halles, un maximum de PUF est constaté en provenance de sources en provenance du secteur de vent Nord Est, alors que ce n'est pas identifié sur les mesures de eBCff ni eBCwb. Cela illustre que les PUF ne proviennent pas uniquement de sources générant du carbone suie.

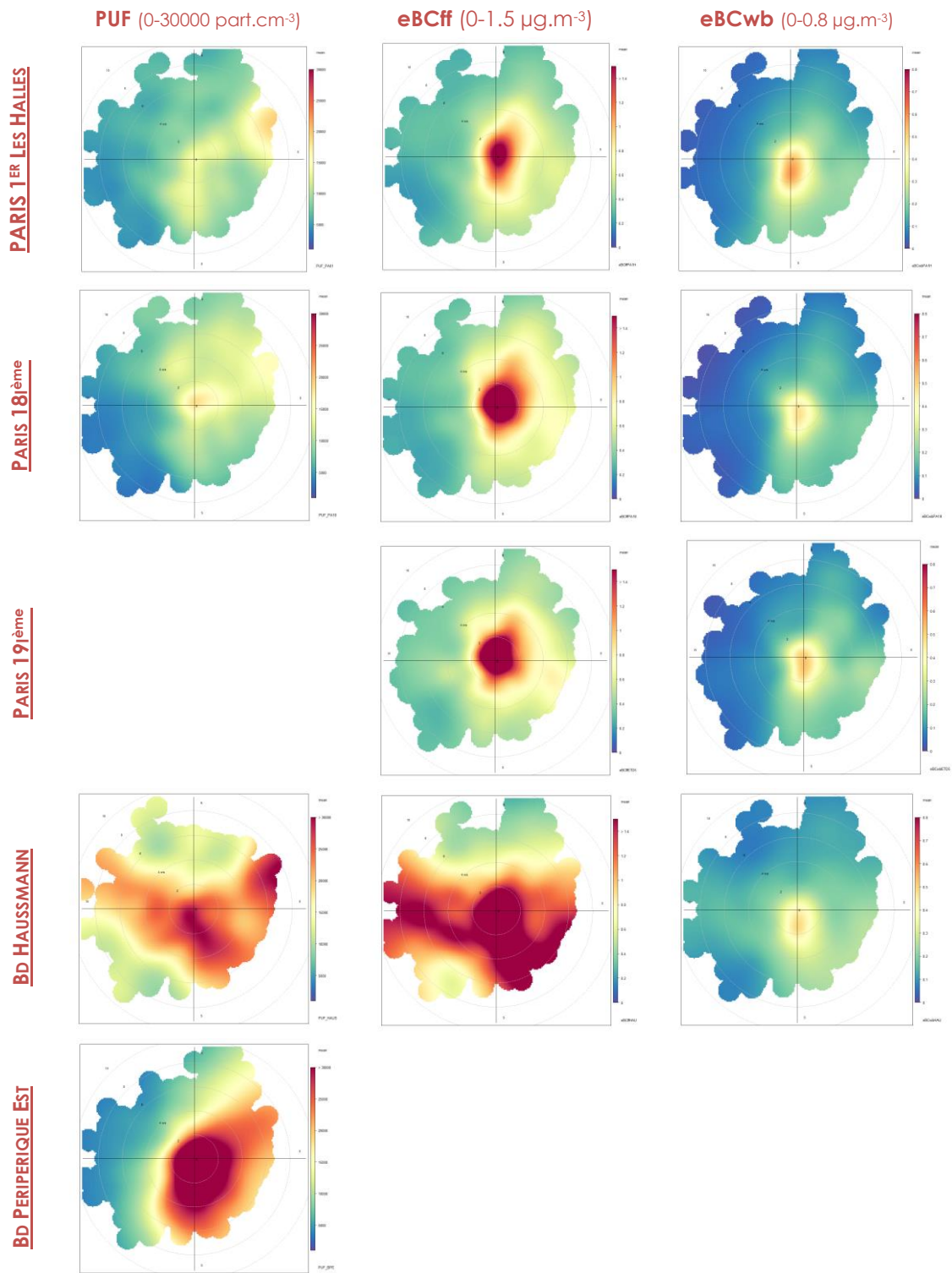


Figure 21 : Roses de pollution des données PUF (échelle de couleur de 0 à 3000 particules/cm³), de la fraction combustion d'hydrocarbures (eBCff, échelle de couleur de 0 à 1.5 µg.m⁻³) et de la combustion de biomasse (eBCwb, échelle de couleur de 0 à 0.8 µg.m⁻³) du 31 janvier au 5 mai 2022.

4.1.4. Corrélation entre les concentrations des particules ultrafines (PUF) et celles de carbone suie (eBC)

Une publication allemande (Sun, 2019) a montré des corrélations entre carbone suie et particules ultrafines, variables selon la taille des particules. La Figure 22 présente les résultats sur Paris sur la période de la campagne selon la même méthodologie. Le coefficient de corrélation entre les concentrations en nombre de particules et les concentrations de carbone suie en fonction de la taille des particules (de 10 à 400 nm en échelle logarithmique), pour les sites trafic (HAUS en bleu) et les sites de fond urbain (PA01 en orange, PA18 en vert) y est représenté.

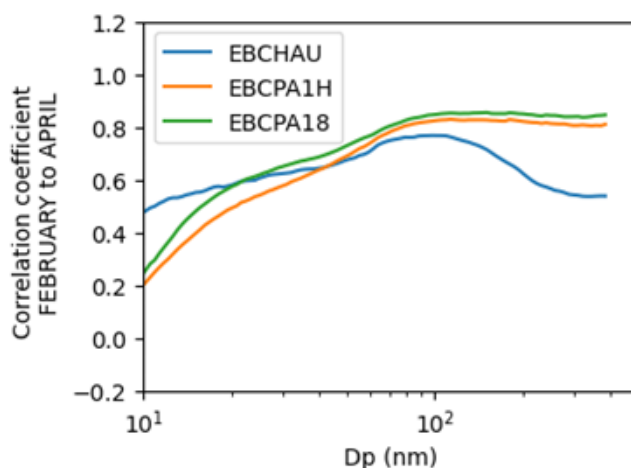


Figure 22 : Coefficient de corrélation entre les concentrations en nombre de particules mesurées par le U-SMPS (part/cm^3) et les concentrations de carbone suie (eBC) au sein des $\text{PM}_{2.5}$ en fonction de la taille de la particule (échelle logarithmique 10-400 nm) sur les sites de mesure parisiens (HAUS en bleu, PA01 en orange, PA18 en vert)

La comparaison des concentrations en nombre de particules avec les concentrations de carbone suie s'appuie sur le calcul du coefficient de corrélation des rangs de Spearman entre les deux séries temporelles de mesure relevées à chaque site. Le coefficient de corrélation peut avoir une valeur dans la gamme $[-1, 1]$. L'interprétation de la valeur du coefficient de corrélation est détaillée dans le Tableau 8. Une valeur positive indique que lorsque les concentrations de particules augmentent, les concentrations de carbone suie augmentent aussi. Une valeur négative indique que lorsque les concentrations de particules augmentent, les concentrations de carbone suie diminuent.

Coefficient de corrélation	Interprétation
$r = -1$	corrélation négative parfaite
$-1 < r \leq -0,8$	corrélation négative forte
$-0,8 < r \leq -0,4$	corrélation négative modérée
$-0,4 < r < 0$	corrélation négative faible
$r = 0$	pas de corrélation
$0 < r \leq 0,4$	corrélation faible
$0,4 < r \leq 0,8$	corrélation modérée
$0,8 < r < 1$	corrélation forte
$r = 1$	corrélation positive parfaite

Tableau 8 : Valeur du coefficient de corrélation de Spearman et interprétation

Que ce soit sur les sites de fond ou sur les sites trafic, la corrélation entre les concentrations de particules et les concentrations de suie est positive : lorsque les concentrations en nombre de particules augmentent, les concentrations de carbone suie augmentent aussi.

Le profil de corrélation est distinct en fonction de la typologie (trafic ou fond urbain) des sites de mesure :

- Les sites de fond se caractérisent par une corrélation positive faible (< 0.4) entre les particules inférieures à 20 nm de diamètre et les concentrations de carbone suie, puis des valeurs de corrélation plus fortes avec une valeur maximale atteinte sur la gamme de tailles entre 70 et 100 nm. La valeur du coefficient de corrélation reste similaire pour les particules de diamètre supérieur à 100 nm.
- Le site trafic du boulevard Haussmann se caractérise par une corrélation positive plus forte que celle des sites de fond urbain pour les plus petites tailles de particules, avec une valeur maximale atteinte sur la gamme de tailles entre 70 et 100 nm, puis une décroissance pour les particules de diamètre supérieur à 100 nm. Le site trafic du Boulevard Périphérique est caractérisé par un profil similaire au site du boulevard Haussmann avec des niveaux de corrélation légèrement supérieurs.

Les profils de corrélation observés sur les trois sites parisiens sont cohérents avec ceux observés sur le réseau de mesure allemand GUAN (German Ultrafine Aerosol Network). En effet, la Figure 23 présente les profils de corrélation entre les concentrations en nombre de particules et les concentrations de carbone suie (eBC, contenues dans les PM_{10} et PM_{10} selon les sites (Birmili, 2016)) du réseau GUAN pour chaque typologie de site, dont : « Roadside » (en rouge) pour les sites de trafic urbain et « Urban bg. » (en jaune) pour les sites de fond urbain.

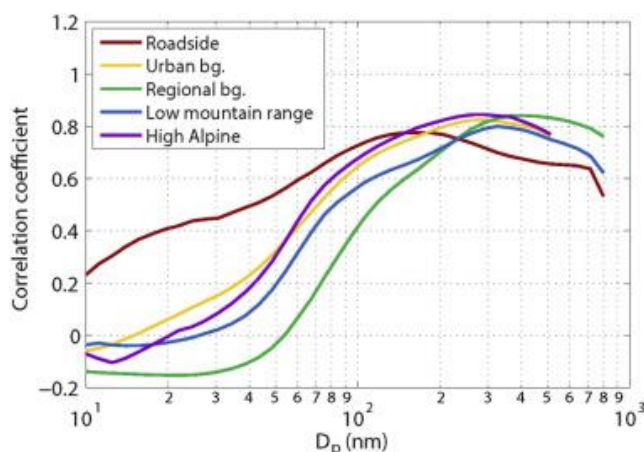


Figure 23 : Coefficient de corrélation entre les concentrations en nombre de particules mesurées par le U-SMPS ($part/cm^3$) et les concentrations de carbone suie (eBC) en fonction de la taille de la particule (échelle logarithmique 10-1000 nm) sur les sites du réseau allemand GUAN (trafic urbain en rouge, fond urbain en jaune) (Sun, 2019)

Les analyses entre les sites parisiens et les sites allemands sont cohérentes mais concernent des tailles de particules plus petites sur les sites parisiens que sur les sites allemands. Par exemple :

- Pour les sites de fond, le coefficient de corrélation entre les concentrations de particules et les concentrations de carbone suie est supérieur à 0.4 (corrélation modérée) dès le diamètre de 20 nm sur les sites parisiens, alors que cette valeur de corrélation est atteinte pour des particules de diamètre supérieur à 60 nm pour les sites allemands.
- La valeur maximale de corrélation pour les sites de fond urbain de l'étude du GUAN est atteinte entre 100 et 200 nm, alors qu'elle est atteinte entre 70 et 100 nm pour les deux sites de fond parisiens.

Cela implique que, **comparé aux sites de fond urbain allemands, les sites de fond parisiens sont plus influencés par des sources d'émissions de particules fraîchement émises, notamment le trafic routier. En effet, le réseau routier est caractérisé comme très dense dans Paris compte-tenu de la taille de la ville.** Néanmoins, cette observation est également à mettre au regard des différences entre les deux études, notamment la période d'étude. En effet, les résultats sur Paris concernent l'étude d'une campagne sur les mois de janvier à mai de l'année 2022 alors que l'étude GUAN est

une étude pluriannuelle sur des données des années de 2009 à 2014. De ce fait, l'impact de la variabilité des conditions météorologiques est différemment pris en compte.

4.2. Impact du trafic routier à Paris

Les résultats présentés dans le chapitre caractérisation des particules ultrafines 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 ceux enregistrés 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 la tranche granulométrique avec le plus grand nombre de particules est inférieur à 30 nm. Cette tranche de taille fait partie intégrante du mode appelé « Nucléation » et indique qu'une part majoritaire de particules est « fraîchement » émise, notamment par le trafic routier. La dynamique d'évolution horaire de chaque taille de particules en nombre montre un profil à deux bosses, caractéristique du trafic routier, sur les trafics trafic mais également sur les sites de fond urbain parisiens.

Les mesures de carbone suie montrent également l'influence du trafic routier tout comme les roses de pollution, que ce soit en carbone suie ou en nombre de particules.

Les corrélations entre concentrations de carbone suie et nombre de particules ultrafines complètent ces analyses.

Le calcul du coefficient de corrélation des concentrations en nombre de particules, tel que présenté dans le paragraphe 4.1.4, a également été réalisé au regard des concentrations de carbone suie issu de la combustion d'hydrocarbures (eBCff).

La Figure 24 présente les profils de corrélation des concentrations de particules avec les concentrations de carbone suie issu de la combustion d'hydrocarbures (eBCff) en fonction de la taille des particules pour les trois sites parisiens.

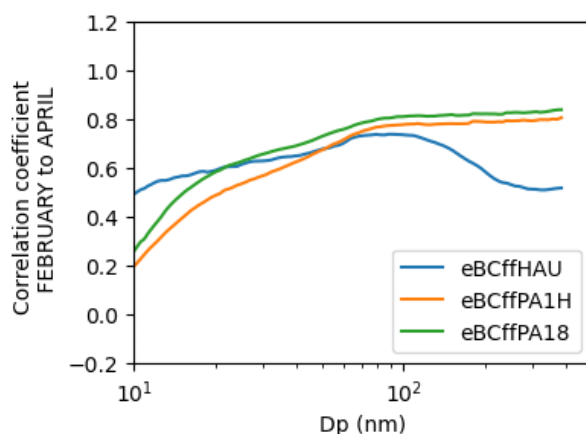


Figure 24 : Coefficient de corrélation entre les concentrations en nombre de particules mesurées par le U-SMPS (part/cm³) et les concentrations de carbone suie issu de la combustion d'hydrocarbures (eBCff) en fonction de la taille de la particule (échelle logarithmique 10-400 nm) pour chaque site de mesure (HAUS en bleu, PA01 en orange, PA18 en vert)

Pour la gamme de particules dont le diamètre est supérieur à 100 nm, le coefficient de corrélation reste stable pour les sites de fond PA01 et PA18 mais diminue progressivement pour le site trafic HAUS de façon très similaire aux profils de corrélations avec la concentration de carbone suie total (eBC, Figure 22). Cela peut s'expliquer par le fait que les particules plus grossières (ici supérieures à 100 nm) provenant de l'accumulation et l'agglomération de particules plus fines notamment émises par le

trafic routier (comme mesuré sur le site du boulevard Haussmann), se retrouvent plutôt sur les sites de fond urbain, compte-tenu du délai de formation nécessaire.

4.3. Chauffage au bois à Paris

L'analyse des niveaux moyens de carbone suie sur les différents sites de fond a montré (cf. paragraphe 4.1) qu'ils sont homogènes. Les constats sont les mêmes avec une analyse statistique de similarité faite à partir des niveaux de carbone suie issu de la combustion de biomasse, comme le montre la Figure 25. Elle représente le dendrogramme des mesures moyennes de carbone suie associé à la combustion de biomasse (eBCwb) des sites de fond parisiens (PA01, PA18 et PA19) et des sites de fond de la petite couronne (Gennevilliers, noté « GEN ») et Tremblay-en-France, noté « TREMB »), sur la période 31 janvier au 5 mai 2022.

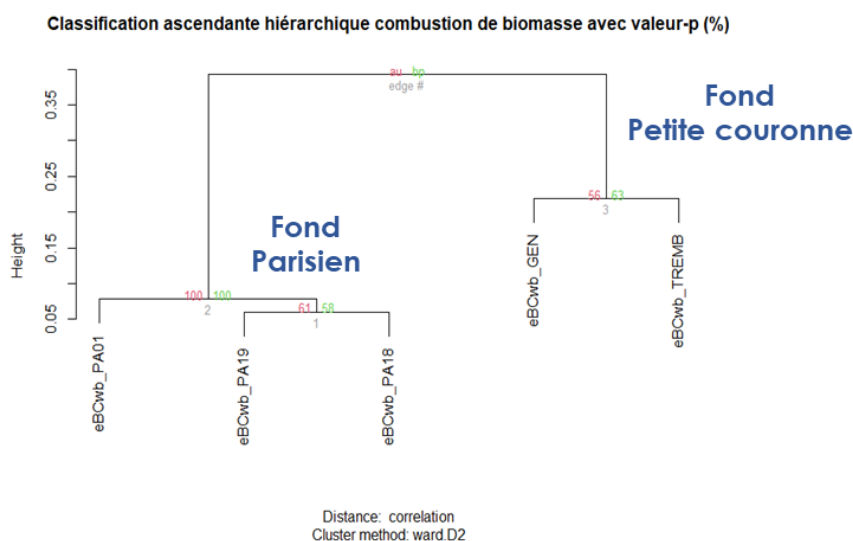


Figure 25 : Dendrogramme des mesures de carbone suie associé à la combustion de biomasse (eBCwb) des sites de fond parisiens (PA01, PA18 et PA19) et des sites de fond de la petite couronne (GEN et TREMB), sur la période 31 janvier au 5 mai 2022.

Le Dendrogramme des mesures de carbone suie associé à la combustion de biomasse (eBCwb), met en évidence une différence notable de comportement entre les sites de fond parisiens d'une part et ceux de la Petite Couronne d'autre part. Pour les trois sites de fond parisiens, le regroupement des sites Paris 18^{ième} et Paris 19^{ième} se situe en bas du dendrogramme, ce qui indique que ces deux sites ont la similarité la plus forte, et le site Paris 1^{er} les Halles se distingue d'eux avec une différence assez faible.

Globalement, le carbone suie associé à la combustion biomasse a un comportement similaire sur les sites de fond parisiens de l'étude sur la période de la campagne. Les conditions contrastées sur la période avec peu de jours avec des températures froides, propices à l'utilisation de chauffage au bois ne permettent toutefois pas de généraliser cette conclusion à une saison hivernale « type » (voir paragraphe suivant), également, la localisation des sites ne permet pas de généraliser cette conclusion à l'ensemble du territoire Paris intra-muros.

Les résultats d'une étude précédente d'Airparif avaient montré que **la combustion de biomasse augmente le nombre de particules ultrafines de diamètre entre 70 et 100 nm** (Airparif, février 2022). Cette signature n'a pas été trouvée dans le profil granulométrique moyen sur l'ensemble de la campagne menée en 2022 qui a connu des conditions météorologiques contrastées sur l'ensemble de la campagne et avec peu de jours avec des températures froides, propices à l'utilisation de chauffage au bois (Figure 17).

4.3.1. Profil horaire journalier

La Figure 26 permet de comparer les profils moyens journaliers des concentrations d'eBCwb sur les trois sites de fond urbain de la campagne hiver-printemps 2022 (PA01, PA18 et PA19) avec ceux des quatre sites de la campagne hiver 2020-2021 (dont PA01). L'enveloppe de couleur représente l'intervalle de confiance à 95 %, afin d'illustrer la variabilité des données moyennes horaires.

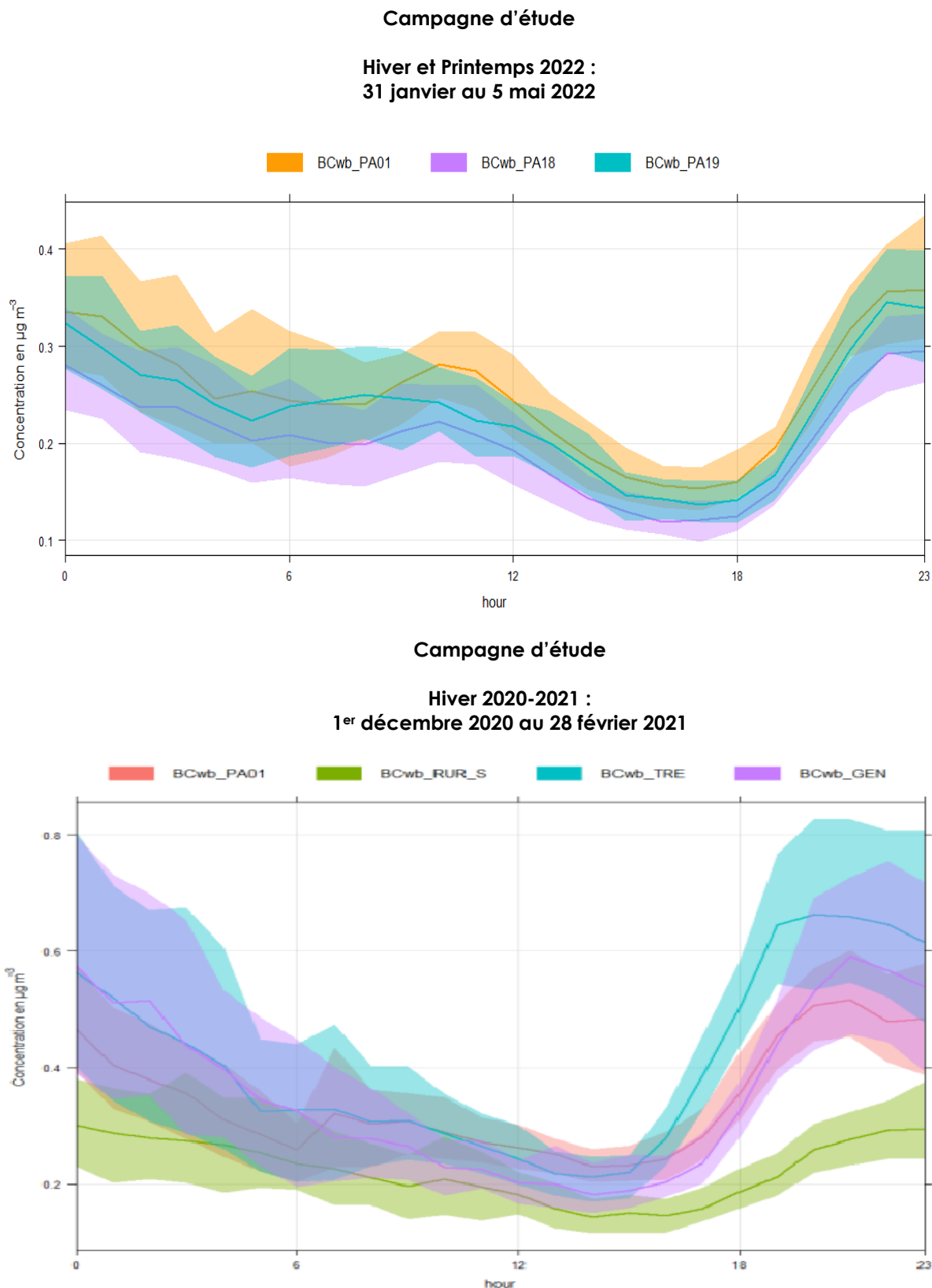


Figure 26 : Profils moyens journaliers des concentrations de eBCwb lors de la campagne hiver et printemps 2022 (en haut) et lors de la campagne fond hiver 2020-2021 (en bas)

Lors de la campagne hiver et printemps 2022, les niveaux de concentrations liés à la combustion de biomasse sont similaires sur les trois sites parisiens (PA01, PA18 et PA19). **Le profil journalier de chaque site présente une augmentation en début de soirée, qui peut être associée à la fois au retour des personnes à leur domicile engendrant une intensification du chauffage par la combustion de biomasse et aux conditions de dispersion des polluants qui sont moins favorables le soir et la nuit. Les concentrations moyennes descendent ensuite au cours de la nuit pour se stabiliser en cours de matinée jusqu'à midi. Les concentrations minimales sont observées dans l'après-midi, du fait d'un recours moindre au chauffage au bois en journée et à l'amélioration des conditions de dispersion.**

Sur le site PA01, le profil moyen journalier établi lors de la campagne hiver et printemps 2022 montre que la concentration massique de eBCwb à toute heure de la journée est inférieure à celle observée sur le profil moyen journalier de la campagne hiver 2020-2021. Cela est cohérent avec le faible nombre de jours avec des températures froides (propices à l'utilisation du chauffage au bois) observées lors de la campagne hivernale et printanière 2022, en comparaison avec celle de l'hiver 2020-2021 et **illustre que l'homogénéité des concentrations liées à la combustion de biomasse sur les trois sites parisiens (PA01, PA18 et PA19) sur la période de la campagne ne peut être généralisée.**

4.3.2. Corrélation entre les concentrations de carbone suie et celle des particules ultrafines (PUF) selon leur taille

Le calcul du coefficient de corrélation des concentrations en nombre de particules, tel que présenté dans le paragraphe 4.1.4, a également été réalisé au regard des concentrations de carbone suie issu de la combustion de biomasse (eBCwb) respectivement, afin d'affiner les spécificités entre les sites de mesure.

La Figure 27 présente les profils de corrélation des concentrations de particules avec les concentrations de carbone suie issu de la combustion de biomasse (eBCwb) en fonction de la taille des particules.

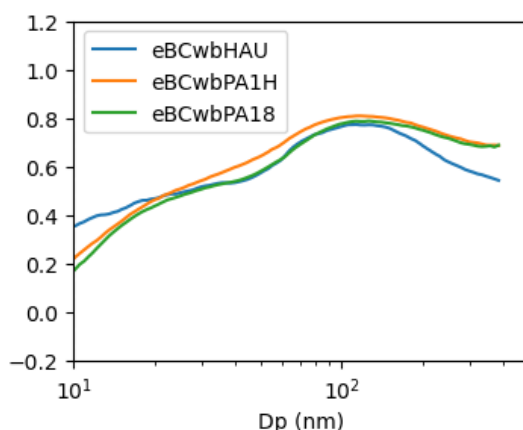


Figure 27 : Coefficient de corrélation entre les concentrations moyennes en nombre de particules mesurées par le U-SMPS (part/cm³) et les concentrations moyennes de carbone suie issu de la combustion de biomasse (eBCwb) en fonction de la taille de la particule (échelle logarithmique 10-400 nm) pour chaque site de mesure (HAUS en bleu, PA01 en orange, PA18 en vert)

La signature de la combustion de biomasse sur la gamme entre 70 et 100 nm identifiée lors de la campagne hivernale 2020/2021 (Airparif, février 2022) est retrouvée sur cette campagne : les corrélations entre le nombre de particules et les concentrations de carbone suie provenant de la combustion de biomasse sont les plus fortes sur cette gamme que ce soit sur les sites de fond ou le site trafic du boulevard Haussmann.

4.3.3. Profil granulométrique : signature de la combustion de biomasse

L'influence du chauffage au bois sur les niveaux de PUF à Paris a été illustrée par les corrélations du paragraphe précédent. L'analyse du profil granulométrique sur une période propice à l'utilisation de chauffage au bois est également menée pour compléter ces résultats.

Le suivi temporel horaire des mesures de carbone suie issu de la combustion de biomasse (eBCwb) sur la période de l'étude pour les sites de fond parisien (Paris 1^{er} les Halles, Paris 18^{ième} et Paris 19^{ième}) présenté en Figure 28 permet d'identifier les périodes avec le plus de combustion de biomasse.

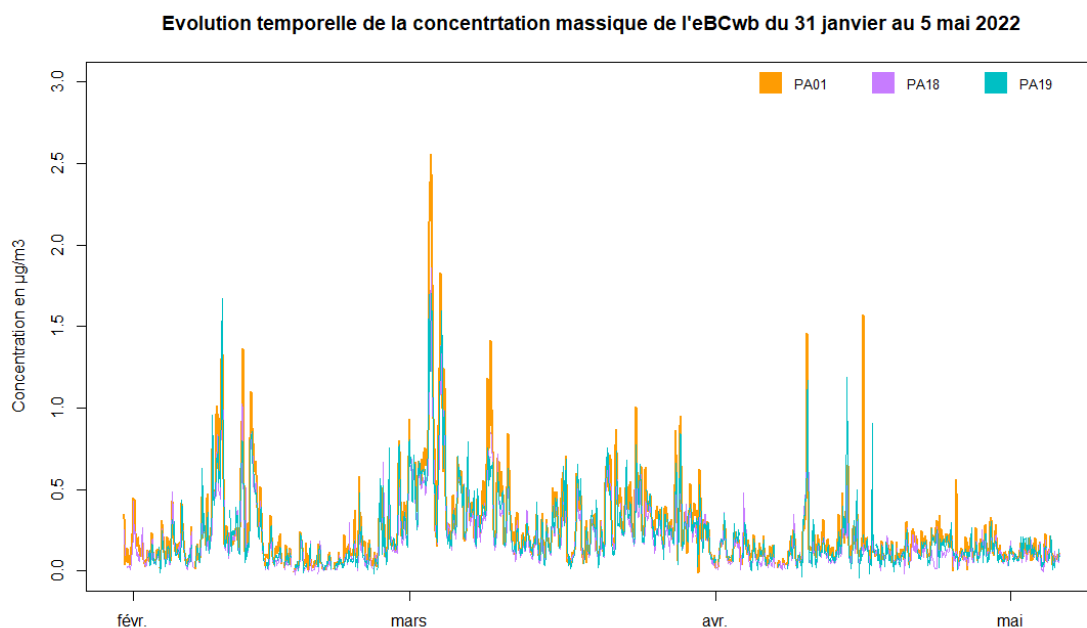


Figure 28 : Évolution temporelle de la concentration horaire moyenne d'eBCwb en situation de fond sur les sites PA01, PA18 et PA19, sur la période de la campagne

À l'échelle horaire, l'évolution temporelle de la concentration eBCwb montre une dynamique similaire sur les trois sites de l'étude.

La concentration maximale d'eBCwb sur chacun des trois sites est atteint au début du mois de mars les 2 et 3 mars 2022.

La Figure 29 présente le profil granulométrique obtenu respectivement pour les sites de fond Paris 1^{er} les Halles et Paris 18^{ième} en prenant en compte les données mesurées sur cette période, soit du 2 au 3 mars 2022 inclus. Le « mode majeur » (la taille de particules la plus représentée en nombre) est identifié par des pointillés verts sur le profil granulométrique pour chacun des sites.

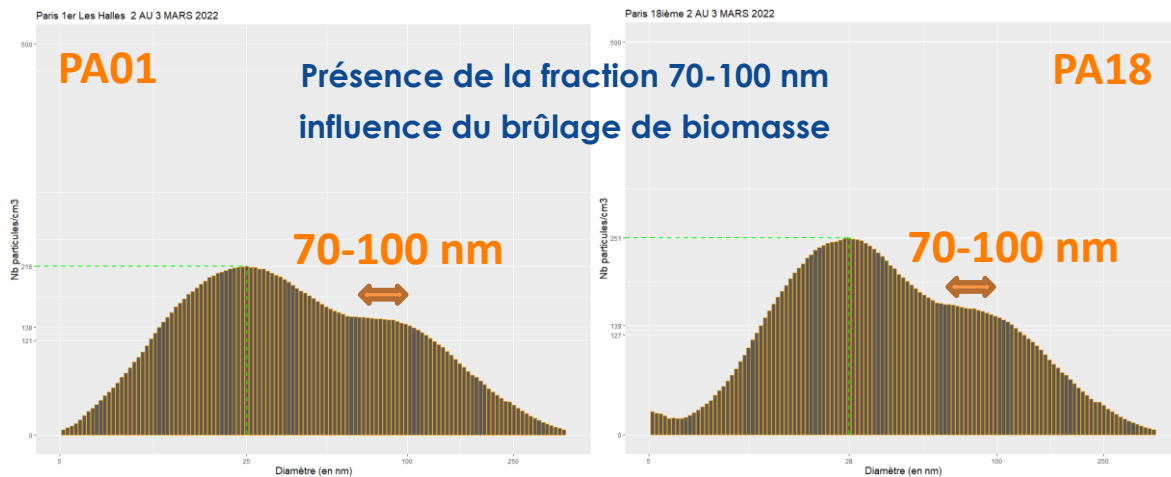


Figure 29 : Profils granulométriques (concentrations en fonction de la taille de la particule) pour les sites de Paris 18^{ème} (PA18) et Paris 1^{er} Les Halles (PA01)

Sur la période du 2 et 3 mars 2022, où les niveaux de eBCwb ont été les plus forts sur la période de la campagne, la Figure 29 montre que les modes majeurs du site Paris 1^{er} Les Halles sont inférieurs à 30 nm, comme sur l'ensemble de la campagne, soit dans la gamme du mode appelé « Nucléation » : celui-ci indique qu'une part majoritaire de particules est « fraîchement » émise, notamment par le trafic routier.

Le profil met également en évidence un second mode sur la tranche granulométrique entre 70 et 100 nm qui est la signature de la combustion de biomasse.

Malgré des conditions contrastées sur la période avec peu de jours avec des températures froides, propices à l'utilisation de chauffage au bois, l'analyse de la corrélation entre le nombre de particules et les concentrations de carbone suie issu de la combustion de biomasse montre les corrélations les plus fortes sur la gamme entre 70 et 100 nm, signature de la combustion de biomasse, que ce soit sur les sites de fond ou le site trafic du boulevard Haussmann. Une analyse du profil granulométrique de journées présentant des niveaux importants de carbone suie issu de la combustion de biomasse confirme ce point. 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.

4.4. Particules issues de transformations dans l'atmosphère

Durant la campagne de mesure, des niveaux exceptionnels de PUF ont été mesurés au mois de mars. Ce sont les plus forts niveaux en moyenne mensuelle relevés depuis le début des mesures continues de PUF sur la station de référence des Halles. Ces niveaux sont liés à des conditions météorologiques très atypiques pour un mois de mars et propices à la formation de composés secondaires issus de la transformation de composés gazeux en particules. Les conditions météorologiques ont été anticycloniques avec une masse d'air sèche, des températures douces, des journées ensoleillées et des vents de secteurs Nord/Nord-Est faibles.

Les mesures de composition chimique en temps réel (mesures de carbone suie avec un appareil AE33 et les mesures de nitrate, matière organique, ammonium et sulfate avec un ACSM, voir

description en Annexe II) sur la deuxième quinzaine de mars 2022 illustrent que les concentrations des composés secondaires sont 2 fois plus élevées au regard de celles relevées à la même période en 2021.

Ces conditions particulières ont conduit, du 24 au 26 mars 2022, à un épisode de pollution dû aux particules PM₁₀, avec un dépassement constaté du seuil d'information et de recommandation (seuil fixé à 50 µg/m³ en moyenne journalière). L'épisode de particules s'est étendu sur toute la partie nord de la France englobant Paris comme le montre la Figure 30. Ces épisodes sur une zone large sont caractéristiques d'épisode liés à des particules secondaires.

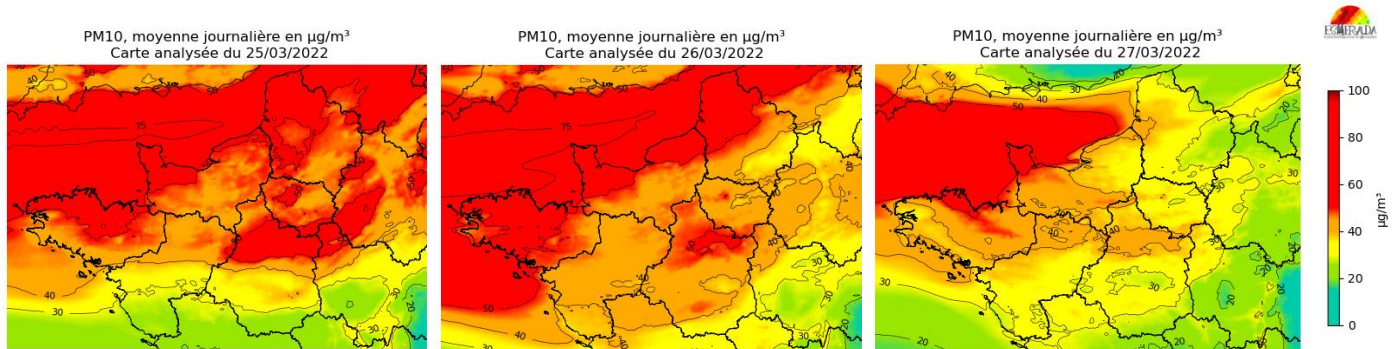


Figure 30 : Carte de la moyenne journalière des concentrations de particules PM₁₀ après assimilation des données aux stations, observées lors des journées du 25, 26 et 27 mars 2022 (source Esmeralda)

Cette partie vise à analyser les concentrations en nombre de particules ultrafines mesurées sur le site de référence Paris 1^{er} Les Halles, lors de l'épisode de pollution pour les particules PM₁₀ du 24 au 26 mars 2022, afin d'identifier si l'augmentation des concentrations de PM₁₀ est également identifiée sur les concentrations en nombre des particules ultrafines.

La Figure 31 illustre l'évolution journalière du profil granulométrique des particules mesurées sur le site Paris 1^{er} les Halles sur l'ensemble de la période de la campagne (du 31 janvier au 5 mai 2022). Pour rappel, la figure se lit de gauche à droite pour suivre l'évolution au cours du temps (jour par jour) et verticalement pour identifier le diamètre des particules. Le nombre moyen de particules est représenté à l'aide de l'échelle de couleur (de 0 à 400 particules/cm³) : les faibles concentrations tendent vers le bleu et les fortes concentrations tendent vers le rouge.

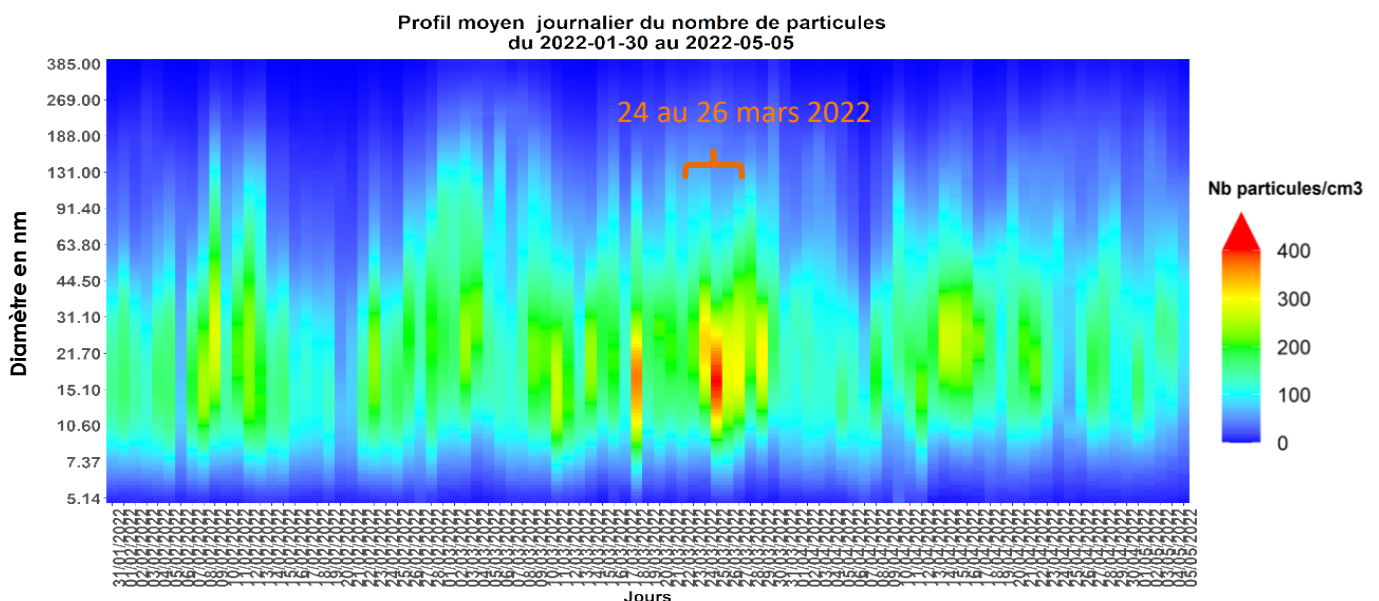


Figure 31 : Évolution journalière « 2D » de la concentration en nombre de particules par diamètre sur le site Paris 1^{er} les Halles [du 31 janvier au 5 mai 2022].

Le comportement des PUF est étudié plus en détail au regard de la composition chimique des particules pour une journée de l'épisode de pollution. La Figure 32 présente, pour la journée du 26 mars 2022, en partie haute, l'évolution des concentrations massiques de particules PM₁₀, PM_{2.5} et de la composition en carbone suie (mesures de l'appareil AE33), nitrate, matière organique, ammonium et sulfate (mesures de l'appareil ACSM) sur le site de Paris 1^{er} les Halles. L'évolution journalière de la concentration en nombre de particules par diamètre (de 5 à 400 nm, mesures SMPS) est représentée heure par heure en partie basse de la figure.

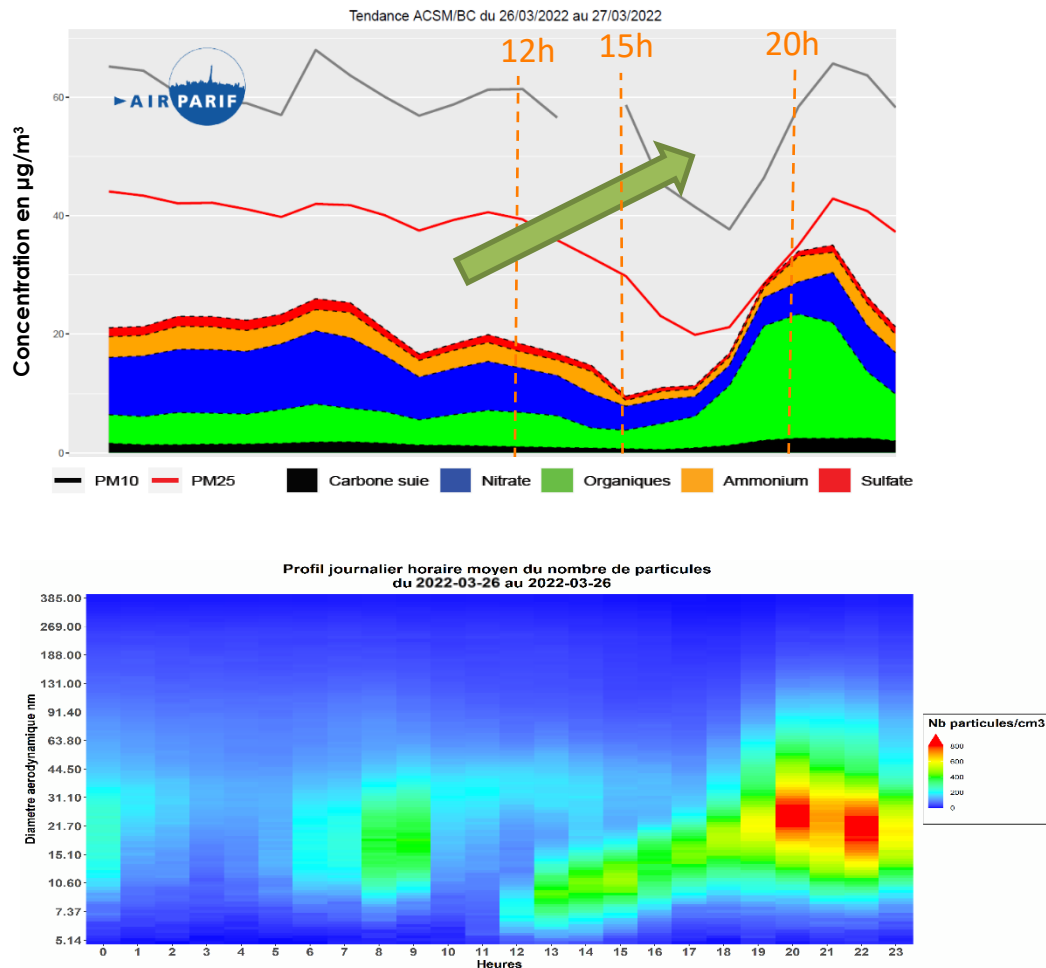


Figure 32 : Journée du 26 mars 2022 ; (en haut) Profils moyens horaires des concentrations massiques de particules PM₁₀ (courbe noire), PM₂₅ (courbe rouge), de carbone suie (zone noire), de nitrate (zone bleue), d'organiques (zone verte), d'ammonium (zone orangée) et de sulfate (zone rouge) – mesures 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.

La Figure 31 met en évidence une augmentation de la concentration en nombre des particules sur la gamme de diamètre 10-30 nm le 17 mars 2022 ainsi que lors de l'épisode de pollution aux particules PM₁₀ (24 au 26 mars 2022).

Les concentrations en nitrate (zone bleue) et en ammonium (zone orange) présentées au sein de la Figure 32 sont soutenues tout au long de la journée du 26 mars 2023. Il s'agit d'Aérosols Inorganiques Secondaires (AIS) qui se sont formés en raison des conditions météorologiques propices à leur formation (températures douces et ensoleillement). Leur présence tout au long de cette journée s'explique par le fait que ces conditions sont réunies depuis plusieurs jours. Vers 15h, une augmentation du niveau de matière organique (zone verte) est constatée. A 15h, la concentration de matière organique avoisine les 5 µg/m³ puis augmente progressivement pour atteindre les 20 µg/m³ à 20h. Sous l'influence du rayonnement solaire et de la température, les Composés Organiques Volatils (COV) présents dans l'air émis par des sources anthropiques (industries, secteur résidentiel, trafic routier, chantiers) et dans une moindre mesure par des sources naturelles, subissent une succession de dégradations chimiques aboutissant à la formation de

composés oxydés moins volatils qui se retrouvent en phase solide. Ces nouvelles particules, appelées Aérosols Organiques Secondaires (AOS), continuent d'évoluer par différents mécanismes (condensation, coagulation...) et gagnent en masse.

Sur la partie basse de la Figure 32, des particules fraîchement formées par phénomène de nucléation (majoritairement des AOS) sont constatées à partir de midi sur les tailles inférieures à 10 nm (zone bleu ciel). Puis, par phénomènes de condensation et de coagulation avec les autres particules présentes dans l'air, les particules grossissent (sur la figure, cela est représenté par la « bande verte » qui débute avec des particules inférieures à 10 nm pour aboutir à des tailles de particules autour de 20 nm à 20h). La flèche verte indique le sens de l'augmentation du nombre de particules entre 12h et 20h.

A partir de 20h, une intensification des concentrations de particules sur les tailles entre 20 et 30 nm est observée avec un élargissement de la taille des particules de 10 à 90 nm. Cette intensification des niveaux correspond au niveau de fond de particules auquel viennent s'ajouter les particules directement émises par le trafic routier qui augmentent en intensité à cette heure (particules qui ont eu le temps de se créer et de grossir par condensation et par coagulation avant d'arriver sur le site urbain de fond Paris 1^{er} les Halles).

De plus, les niveaux de chaque taille de particule commencent à décroître à partir de 20h, ce qui est à mettre en lien avec la baisse du trafic routier et la formation d'Aérosols Organiques Secondaires (AOS) avec la fin du rayonnement. A noter qu'en parallèle, une augmentation des niveaux d'Aérosols Inorganiques Secondaires (AIS) est observée 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.

Ainsi, l'analyse de l'épisode de pollution du 24 au 26 mars 2022 montre que les niveaux de particules ultrafines sur la gamme de diamètre entre 10 et 30 nm ont été les plus forts sur ces journées-là au regard de l'ensemble de la période de campagne, atteignant plus de 800 particules/cm³ en moyenne horaire au cours de la journée du 26 mars 2022 pour les particules d'un diamètre autour de 25 nm.

Cette augmentation de la concentration en nombre de particules ultrafines est liée à la formation d'Aérosols Secondaires de diamètre inférieur à 10 nm, issu de la transformation chimique de composés gazeux, favorisée par les températures douces et l'ensoleillement atypique pour un mois de mars sur ces journées. 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. **L'ensemble des niveaux décroissent à partir de 20h en lien avec la fin du rayonnement solaire.**

5. Comparaison à d'autres métropoles

Dans cette partie, l'analyse des niveaux de concentrations en nombre de particules ultrafines mesurés 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 et nord-américaine ayant mis en place des campagnes de mesure semblables, dont Londres, Amsterdam, Berlin, Francfort, Dresde et Montréal.

De premières hypothèses sont avancées pour expliquer les différences de concentration en nombre total de particules entre les sites de mesure étudiés, notamment l'environnement de chaque site de mesure et les caractéristiques des sources émettrices à proximité, notamment le trafic routier.

5.1. Démarche

Pour remplir cet objectif, Airparif a pris contact avec une dizaine d'experts en Europe et au Canada 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.

5.2. Présentation des sites

Des concentrations en nombre de particules, sur une gamme de taille allant de 5 à 3000 nm, incluant la gamme des particules ultra fines (diamètre inférieur à 100 nm), d'une diversité de stations de typologies variées ont pu être collectées :

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

Ci-dessous sont présentés les caractéristiques de chaque site de mesure. Le Tableau 9 précise les appareils de mesure utilisés. Les différences de type d'appareil et de gamme de taille sont à prendre en compte dans les comparaisons des résultats.

Typologie	Ville	Station	Appareil	Gamme de taille (nm)
Fond Urbain	Paris (AIRPARIF)	Les Halles	SMPS	5 – 400
		Paris 18 ^{ème}		
	Dresden (LfULG)	Winckelmann	SMPS	10 – 800
	Frankfurt (HLNUG)	Riedberg	SMPS	10 – 500
		Schwanheim Raunheim		
	Amsterdam (GGD)	Ookmer	CPC	7 – 3000
Montréal (RSQA)	Station 55 Rivière-des-Prairies	CPC	7 – 1000	
Trafic Urbain	Paris (AIRPARIF)	BPEst	SMPS	5 – 400
		Hausmann (rue canyon)		
	London (NPL)	Marylebone Road (rue canyon)	SMPS	16 – 600
Frankfurt (HLNUG)	Friedberger-Landstrasse (rue canyon)	SMPS	10 – 500	

Tableau 9 : Liste des sites de mesure dont les niveaux de particules ont été comparés selon la typologie (fond urbain ou trafic urbain). L'appareil et la gamme de tailles mesurés sont spécifiques à chaque ville ou site

5.2.1. Sites de fond urbain

- **Dresde, Allemagne** (LfULG)

La Figure 33 présente la station de fond urbain retenue pour la comparaison avec Paris pour la ville de Dresde : **Dresden-Winkelmann**, qui est située dans une zone résidentielle avec peu de trafic.



Figure 33 : Photographie et localisation de la station Dresden-Winkelmannstrasse, Allemagne

- **Francfort, Allemagne** (HLNUG)

La Figure 34 présente les trois stations de fond urbain retenues pour la comparaison avec Paris pour la ville de Francfort :

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

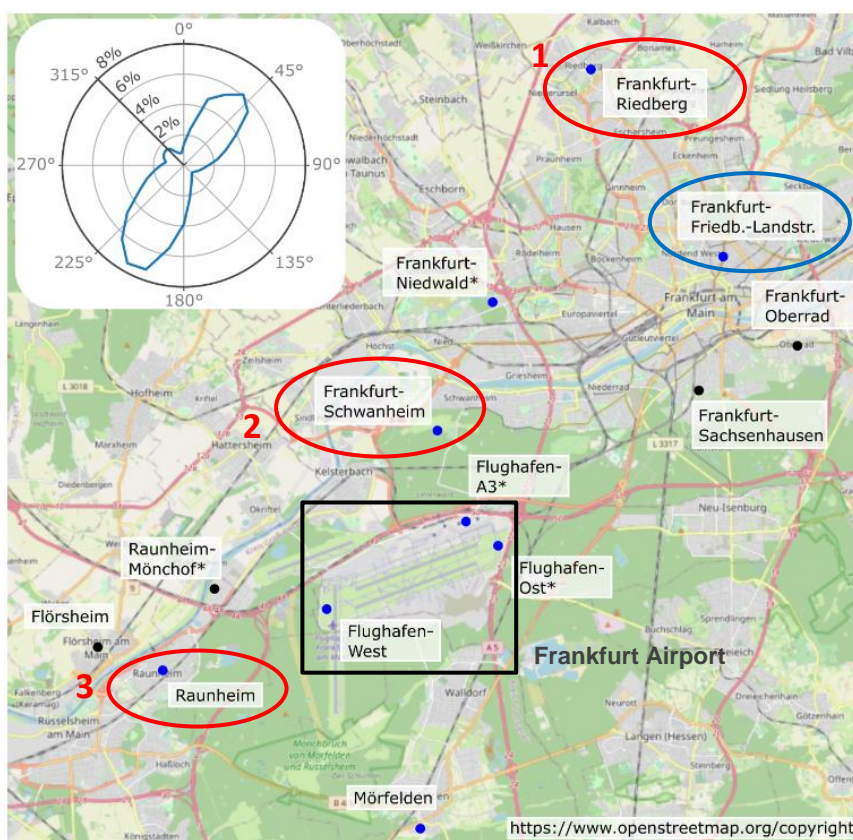


Figure 34 : Carte des stations de mesures du réseau HLNUG dans la région de Francfort en Allemagne. L'aéroport de Francfort est encadré en noir. Encerclé en rouge : sites de fond urbain. Encerclés en bleu : site de trafic urbain. La rose des vents prend en compte les mesures de septembre 2017 à août 2021 inclus. (Ditas, Rose, & Jacobi, 2022)

- **Amsterdam, Pays-Bas** (GGD Amsterdam)

La Figure 35 présente la station retenue pour la comparaison avec Paris 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 par contre située dans la zone d'influence de l'aéroport d'Amsterdam Schiphol.



Figure 35 : Photographie et localisation de la station Amsterdam-Ookmer, Pays-Bas

- **Montréal, Canada** (RSQA Montréal)

La Figure 36 présente la station retenue pour la comparaison avec Paris pour la ville de Montréal : la **Station 55 Rivière-des-Prairies** est localisée dans une zone résidentielle.

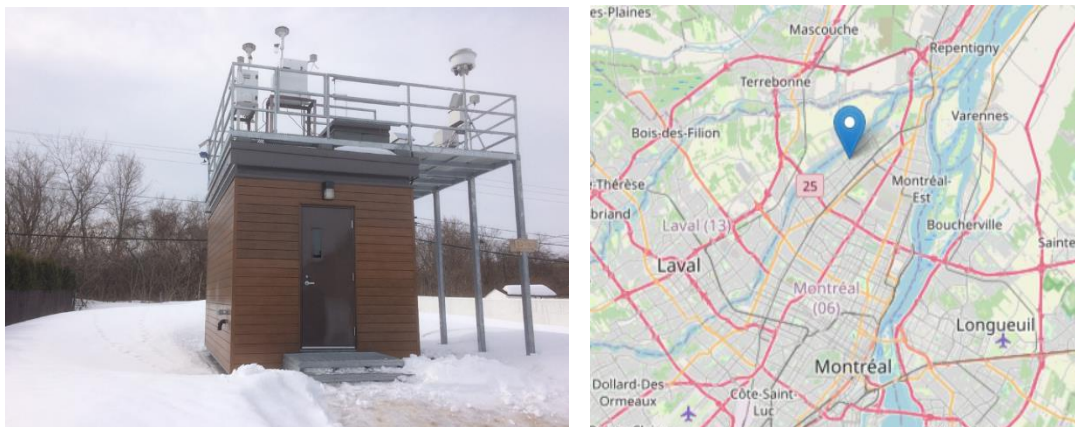


Figure 36 : Photographie et localisation de la station 55 Rivière-des-Prairies, Montréal, Canada

5.2.2. Sites de trafic urbain

- **London Marylebone Road, Grande-Bretagne** (NPL London)

La Figure 37 présente la station de trafic urbain retenue pour la comparaison avec Paris 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.

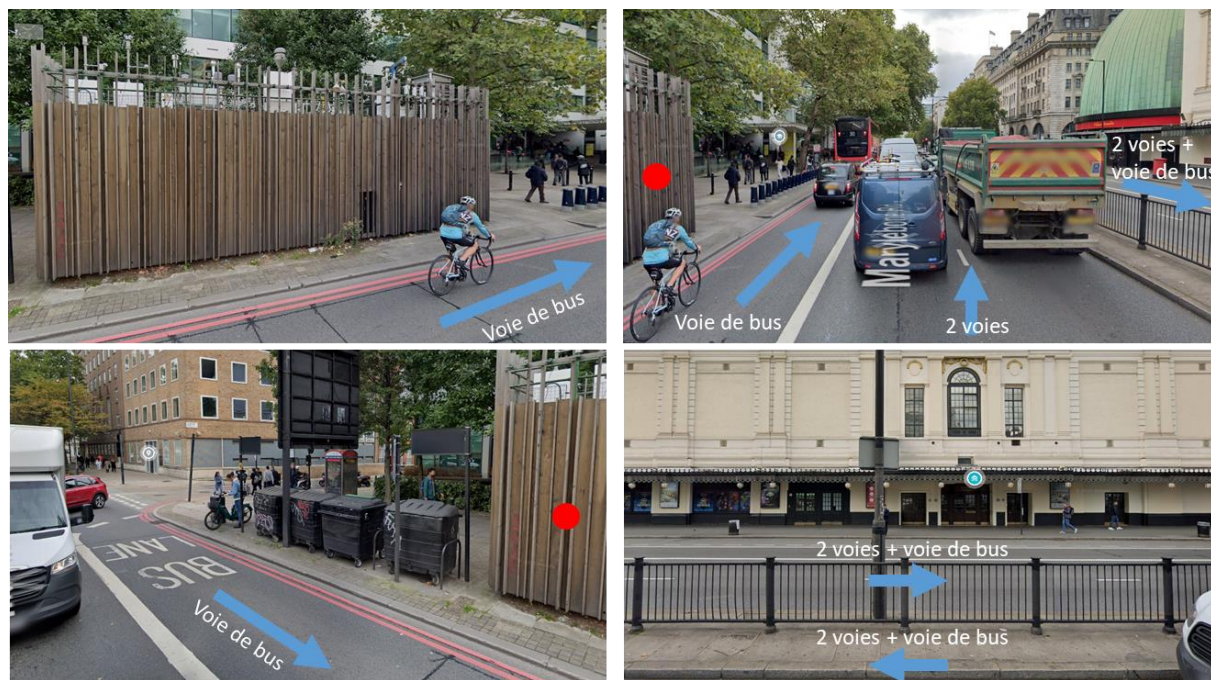


Figure 37 : Photographie et environnement de la station Marylebone Road à Londres, Angleterre.

- **Frankfurt Friedberger-Landstrasse, Allemagne** (HLNUG)

La station de trafic urbain retenue pour la comparaison avec Paris pour la ville de Francfort est la station **Frankfurt-Friedberger Landstrasse**, un site en rue canyon. La Figure 38 montre la localisation de la station.



Figure 38 : Photographie de la station Frankfurt 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 urbains en rue canyon sont présentées dans le Tableau 10, compte-tenu de leur influence sur les niveaux de PUF mesurés.

Caractéristique	Paris boulevard Haussmann	Londres Marylebone Road	Frankfurt 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 10 : Caractéristiques des stations de trafic urbain en typologie rue canyon à Paris boulevard Haussmann, Londres Marylebone Road et Frankfurt Friedberger-Landstrasse

Des différences de volume de trafic sur les différents axes surveillés sont à noter (pouvant aller jusqu'à -35 % de nombre de véhicules circulant en moyenne par jour au droit de la station Londres Marylebone Road que sur le site parisien du boulevard Haussmann), mais également des différences dans les modalités de prélèvements : hauteurs de prélèvements plus élevées à Londres et Francfort, distance à l'axe qui est 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 a été réalisée sur les niveaux mesurés de Septembre 2017 à Août 2021 inclus. Le nombre total de particules mesuré sur ces sites en situation de fond ou en situation de vent provenant de l'aéroport est présenté en Figure 39. 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 (niveaux de fond).

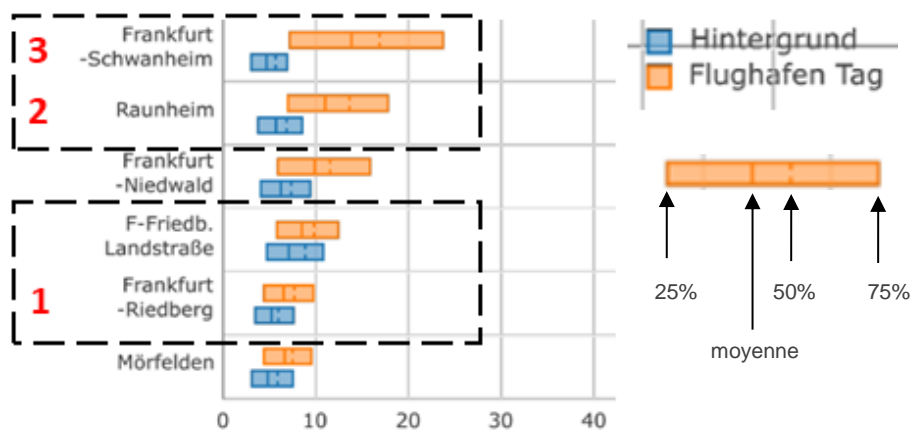


Figure 39 : Nombre de particules total (nb part/cm³, en milliers) mesurés sur les différents sites dans la région de Francfort (mesure SMPS de 10 à 500 nm). Les niveaux sont représentés sous la forme de boîte à moustache (schéma à droite), en bleu pour les niveaux de fond et en orange pour les niveaux 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 11 : 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 11 : Concentrations de particules (7 – 3000 nm) à la station Amsterdam-Ookmer sur les années 2018 et 2019 et influence de l'aéroport Amsterdam-Schiphol.

5.3. Analyse des niveaux des différentes villes

5.3.1. 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'ampleur des émissions sur la zone étudiée et plus spécifiquement à proximité du site de mesure, les conditions météorologiques et climatiques des villes.

Météorologie : 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 9 : 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 4) **Erreur !**

Source du renvoi introuvable..

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, etc.
- Ampleur des sources : flux de trafic, composition du parc, congestion, etc. pour le trafic routier par exemple
- 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 (océanique à continental pour Francfort), alors que celui de Montréal est un climat continental humide.

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

Les données analysées pour chaque site sont sur la même la période de la campagne de mesures Paris (1^{er} février au 30 avril 2022) mais cela 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.

Les comparaisons des niveaux dans les différentes villes développées dans les paragraphes suivants prennent en compte ces différents facteurs. Etant donné que tous les sites de mesure ne disposent pas de mesures des particules ultrafines selon leur granulométrie, l'analyse ci-dessous est réalisée sur les concentrations en nombre total de particules.

5.3.2. Sites de fond urbain

La Figure 40 présente les concentrations moyennes en nombre total de particules, observées sur la période de la campagne de mesure Paris (1^{er} février au 30 avril 2022) pour chaque site de fond urbain européen et à Montréal (Canada).

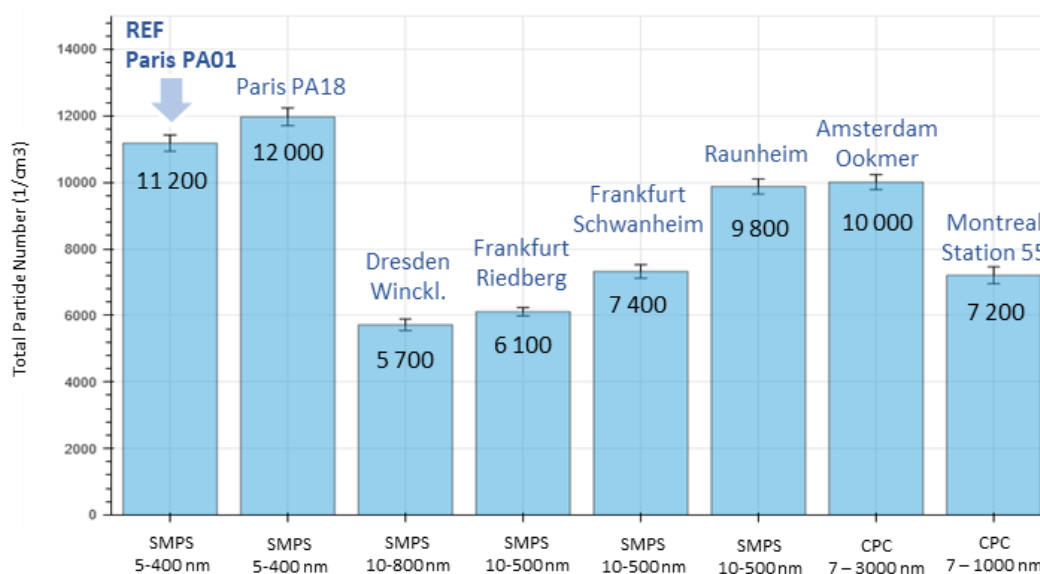


Figure 40 : Concentrations moyennes en nombre de particules, observées sur la période de la campagne PUF Paris (1^{er} février – 30 avril 2022) pour les différents sites de fond urbain. Le niveau de concentration moyen est arrondi à la centaine. Les barres d'erreur représentent l'intervalle de confiance de 95 % des données horaires de chaque site.

Les deux sites de fond parisien (PA01 et PA18) mesurent une concentration moyenne de particules entre 11 000 et 12 000 particules/cm³. Ces valeurs intègrent le mois de mars, dont les niveaux sont les plus élevés de l'historique sur la station PA01 (depuis septembre 2019). A titre de comparaison, les niveaux moyens lors de la campagne hivernale 2020-2021 ont été de 6 600 particules/cm³ (Airparif, février 2022) et de 10 100 particules/cm³ lors de la campagne estivale 2022 (Airparif, 2022). La moyenne des PUF en nombre de l'année 2022 sur la station PA01 est de 8700 particules/cm³.

Compte-tenu des conditions météorologiques différentes d'un site à l'autre, ces niveaux mesurés plus importants sur Paris sur cette période sont à relativiser. Néanmoins, l'agglomération parisienne est une mégapole, avec une densité de population et d'axes routiers nettement plus importantes que dans les autres villes prises en comparaison. En effet, la densité de population de Paris est d'environ 20 360 habitants/km² en 2020 alors qu'elle est comprise entre 1 691 habitants/km² (à

Dresde) et 5 767 habitants/km² (à Amsterdam) en 2021 pour les autres villes étudiées, soit de 3.5 à 12 fois supérieure. Cette densité de population et du réseau routier peut expliquer en partie les niveaux forts observés sur Paris.

Les autres sites présentant des niveaux forts hors sites parisiens sont ceux d'Amsterdam-Ookmer et Raunheim, potentiellement influencés par le trafic aérien. Elles mesurent environ 10 000 particules/cm³ sur la période de la campagne. Les données de moyennes mensuelles n'étant pas disponibles pour l'analyse, il existe néanmoins des travaux montrant que des niveaux entre 8 000 et 13 000 particules/cm³ peuvent être observés pour les périodes où la station Amsterdam-Ookmer est hors influence de l'aéroport (selon les directions de vent), ce qui est légèrement plus élevé qu'à Paris en situation de fond.

Les stations de Frankfurt-Schwanheim et Montreal-Station55 mesurent environ 7 500 particules/cm³. Pour la station de Montréal, ce niveau de concentrations est cohérent avec les niveaux mesurés sur l'année 2021 : entre 5 000 et 10 000 particules/cm³ en concentrations mensuelles pour une concentration annuelle moyenne de 7 600 particules/cm³ d'après leur bilan environnemental de la qualité de l'air de l'année 2021 (RSQA, Juin 2022). La valeur maximale des concentrations en moyennes mensuelles est donc proche de celle mesurée à Paris.

Les sites de Dresden-Winckelmannstrasse et Frankfurt-Riedberg mesurent autour de 6 000 particules/cm³ sur la même période. Pour Dresden-Winckelmannstrasse, le niveau moyen est de 6 215 particules/cm³ en moyenne sur les années 2017 à 2019 (Trechera, 2023). Les variabilités mensuelles n'étaient pas disponibles sur ce site, ce qui limite les comparaisons.

Cette analyse détaillée des variabilités de niveaux de concentration en nombre de PUF sur chacun des sites européens et nord-américain montre que les niveaux de fond à Paris, fortement marqués par un mois de mars atypique, restent néanmoins dans la même gamme de concentration que les autres sites étudiés.

5.3.3. Sites de trafic urbain

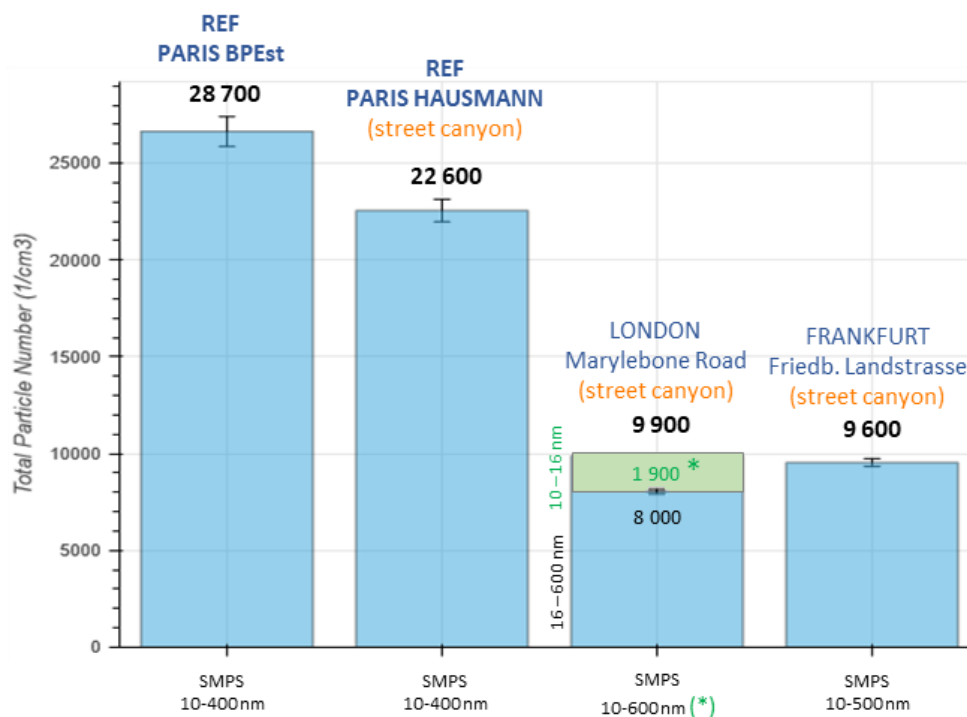
La Figure 41 présente les concentrations moyennes en nombre de particules, observées sur la période de la campagne de mesure Paris (1^{er} février au 30 avril 2022) pour chaque site de trafic urbain sélectionné pour la comparaison des niveaux européens : Paris Boulevard Périphérique Est, Paris boulevard Haussmann, Francfort Friedberger Landstrasse (Allemagne) et Londres Marylebone Road (Angleterre). A noter que pour le site de Londres, les données de concentrations en nombre de particules ne sont pas disponibles pour les mois de février et mars. Ainsi, les données analysées pour ce site sont ceux des mois de janvier, avril et mai, ce qui permet tout de même d'estimer le niveau de concentration en nombre de particules sur le début d'année 2022. Il est rappelé toutefois la situation particulière du mois de mars 2022 à Paris qui a conduit à des niveaux de PUF très élevés en situation de fond, impactant également la mesure à proximité du trafic routier.

Les données mesurées par les appareils de type SMPS ont été analysées dans cette partie pour chacun des sites. Comme présenté dans le Tableau 9 :, les appareils SMPS instrumentés sur ces quatre sites ont une gamme différente de diamètres mesurés. La limite basse est à 5 nm pour les sites parisiens, à 10 nm pour le site de Francfort et à 16 nm pour le site de Londres.

Comme précisé précédemment, la part en nombre des particules de faible diamètre au comptage total est majoritaire : les particules ultrafines, d'un diamètre inférieur à 100 nm, représentent environ 90 % du nombre de particules en comptage total sur une gamme 5 – 400 nm (Tableau 4). Une analyse du profil granulométrique sur le site parisien du boulevard Haussmann montre de plus que

le nombre de particules de diamètre entre 5 et 10 nm représente environ 8 % du comptage total de particules sur la gamme de 5 à 400 nm sur la période de la campagne. Le nombre de particules de diamètre entre 10 et 16 nm représente quant à lui 24 % du comptage total sur la gamme de 16 à 400 nm.

Afin de limiter les biais liés à la gamme de mesure, la comparaison des quatre sites a été réalisée sur une gamme de taille avec le même diamètre de début de comptage, c'est-à-dire à partir de 10 nm.



(*) Estimation du nombre de particules sur la gamme de taille de 10 à 16 nm

Figure 41 : Concentrations moyennes en nombre des particules de plus de 10 nm diamètre, observées sur la période de la campagne PUF Paris (1^{er} février – 30 avril 2022) pour les différents sites de trafic urbain. Le niveau de concentration moyen est arrondi à la centaine. Les barres d'erreur représentent l'intervalle de confiance de 95 %.

Parmi les quatre sites de trafic urbain retenus, le site parisien situé le long du Boulevard Périphérique Est mesure la concentration moyenne en nombre de particules la plus forte sur la période de la campagne : environ 28 700 particules/cm³. Cette valeur est par ailleurs supérieure à celle mesurée lors de la campagne francilienne menée par Airparif sur l'été 2021 : 25 100 particules/cm³ sur ce même site (Airparif, 2022), probablement au moins en partie liée aux conditions météorologiques spécifiques rencontrées en mars 2022.

Cette concentration moyenne en nombre de particules, élevée pour les deux campagnes peut s'expliquer notamment par la particularité du site du Boulevard Périphérique Est. D'une part, le Boulevard Périphérique est l'une des portions routières les plus fréquentées d'Europe avec 243 400 véhicules circulant par jour en moyenne (source Conseil 2017), et d'autre part, le volume trafic fluctue très peu selon le mois de l'année et les jours de la semaine (à titre d'exemple, la baisse de trafic typiquement observée le weekend par rapport à la semaine est de -5 % sur le Boulevard Périphérique contre - 20 % à - 25 % sur les autres types de route¹).

Analyse des sites de trafic urbain en typologie rue canyon

De par la particularité du site implanté au Boulevard Périphérique Est, la comparaison entre les niveaux parisiens et ceux des autres villes européennes est davantage axée sur le site du boulevard

¹ Source : Airparif d'après les données DRIEAT, DIRIF et Ville de Paris.

Hausmann, qui est un site en typologie rue canyon tout comme les deux autres sites de trafic urbain étudiés : le site Friedberger-Landstrasse situé dans la ville de Francfort et le site de Marylebone Road situé dans la ville de Londres. Le Tableau 10 : présente les caractéristiques des trois stations de mesure.

Le site trafic implanté boulevard Hausmann à Paris mesure la concentration moyenne en nombre de particules la plus forte : environ 22 600 particules/cm³ des trois sites étudiés. Cette concentration est également supérieure à la moyenne mesurée lors de la précédente campagne menée par Airparif sur l'été 2021 (18 000 particules/cm³) (Airparif, 2022), en lien notamment avec les conditions météorologiques exceptionnelles du mois de mars 2023.

Pour le site trafic de Londres situé à Marylebone Road, la concentration moyenne en nombre de particules mesurée sur la gamme de taille de 16 à 600 nm (configuration de l'appareil de type SMPS sur le site) s'élève à environ 8 000 particules/cm³. La concentration moyenne en nombre sur la gamme de taille de 10 à 16 nm (estimée à 24 % à partir des résultats parisiens du nombre mesuré sur la gamme de taille de 16 à 600 nm), représente environ 1 900 particules/cm³. Ainsi, **la concentration moyenne totale sur la gamme de 10 à 600 nm s'élève à quasiment 10 000 particules/cm³.**

La station trafic Francfort Friedberger-Landstrasse mesure une concentration moyenne en nombre de particules du même ordre de grandeur que le site de Londres : environ 9 600 particules/cm³. Sur ce site, les niveaux horaires peuvent néanmoins atteindre jusqu'à environ 12 000 particules/cm³ en fonction de la direction de vent mesurée au site, selon une analyse des niveaux mesurés du 29 avril 2020 au 31 août 2021, comme l'illustre la Figure 42.

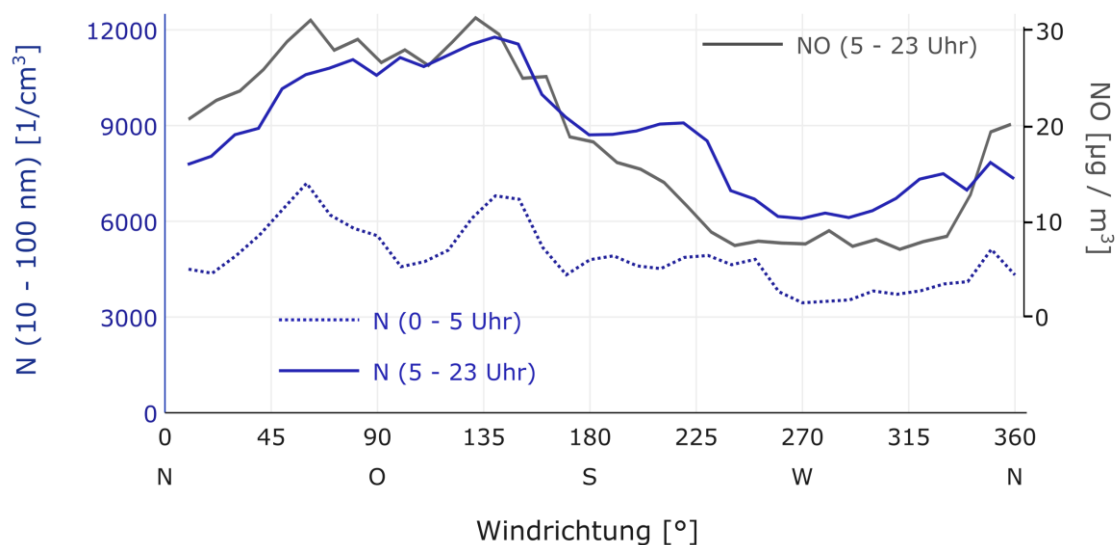


Figure 42 : Comparaison de la concentration en nombre de particules N (tailles 10 à 100 nm, en particules/cm³) et de la concentration de monoxyde d'azote NO (en µg/m³), selon la direction du vent (Windrichtung) au point de mesure de la station Frankfurt-Friedberger Landstrasse (29 avril 2020 au 31 août 2021).

La concentration moyenne en nombre de particules pour la période de 0h à 5h est représentée par la courbe pointillée bleue et celle de 5h à 23h est représentée par la courbe continue bleue. La concentrations moyenne de NO sur la période de 5h à 23h est représentée par la courbe grise. (Ditas, Rose, & Jacobi, 2022)

Les concentrations moyennes en nombre de particules mesurées à la station trafic du boulevard Hausmann à Paris sur la période de la campagne sont environ deux fois supérieures à celles mesurées à la station trafic de Francfort Friedberger-Landstrasse et de Londres Marylebone Road respectivement. Comme expliqué dans la partie Facteurs d'influence, une superposition de facteurs (météorologiques, environnement de la station, etc.) peuvent expliquer les différences de niveaux observés entre les différents sites de mesure européens.

Conditions météorologiques et climatiques

Les trois sites de mesure peuvent avoir été soumis à des **conditions météorologiques** différentes qui peuvent influencer les niveaux mesurés lors de la période de la campagne, notamment au mois de mars 2022, qui relève des niveaux du nombre de PUF en Ile-de-France exceptionnellement élevés pour la période.

Configuration du site de mesure

Les différents sites de mesure présentent des distances différentes aux émissions du trafic routier, notamment le site de Londres est implanté en bordure d'une voie de bus, l'éloignant du trafic dense de l'axe. Ces différences impactent potentiellement fortement les niveaux de PUF mesurés.

Caractéristiques du trafic routier

De plus, cette différence de niveau de concentration en nombre de particules ultrafines est à analyser en particulier au regard des caractéristiques du trafic routier au droit de chacune des stations. Les volumes de trafic sur les trois axes présentent des différences, pouvant aller jusqu'à 35 % de véhicules circulant en moins au droit de la station trafic de Londres Marylebone Road par rapport au boulevard Haussmann à Paris. **Des conditions de circulation différentes peuvent également influencer sur les niveaux de particules** mesurées sur les trois sites :

- La configuration de la circulation routière peut influencer la circulation et les niveaux de particules ultrafines mesurées au droit du site de mesure. En effet, les véhicules émettent davantage de polluants à l'émission au démarrage et en phase d'accélération, comme potentiellement après un feu tricolore ou après une intersection. **La présence de feux tricolores ou d'intersections et leur distance au point de mesure** peut donc influencer les niveaux de particules. Le site du boulevard Haussmann se situe à quelques mètres d'une intersection de six axes routiers (Figure 2), le site de Marylebone Road à Londres est également situé à quelques mètres d'une intersection reliant la rue Luxborough à la route Marylebone.
- De plus, les émissions liées au trafic routier peuvent être très différentes selon la configuration des voies en sens unique ou double-sens. Le boulevard Haussmann au niveau du site de mesure comporte quatre voies en sens unique de circulation (trois voies plus une voie de bus à droite) alors que Friedberger-Landstrasse est une rue à quatre voies en double-sens de circulation (deux voies pour chaque sens, et les voies intérieures sont partagées avec une ligne de tramway), et le site de Marylebone Road donne sur six voies en double-sens de circulation (deux voies plus une voie de bus à droite pour chaque sens), comme présenté dans la partie Sites de trafic urbain. En effet, dans le cas d'un double-sens de circulation, il est possible qu'un seul sens de circulation soit congestionné, alors que dans le cas d'un sens unique, tout l'axe est congestionné ou non congestionné.

Les parcs roulants et technologiques peuvent également être différents dans les trois villes. Pour illustrer ce point, les niveaux de dioxyde d'azote, un polluant atmosphérique émis par les activités de combustion et principalement du trafic routier, sont présentés. Les concentrations de dioxyde d'azote sont en effet directement impactées en proximité routière par les émissions d'oxydes d'azote de l'axe considéré. Au-delà de l'impact du flux de trafic et de la configuration de l'axe routier et des conditions de circulation (présence d'un feu tricolore, pente, congestion, ...), les niveaux dépendent du parc de véhicules circulant que ce soit en type de véhicules (véhicules particuliers, poids lourds, ...) ou en technologie (âge, type de carburant, ...). Les facteurs d'émissions de polluants atmosphériques liés à la combustion à l'échappement sont fonction du type de véhicule, du carburant et de la norme Euro, ainsi les émissions du trafic routier et les niveaux de concentrations résultantes peuvent être très différentes selon la composition du parc routier. A titre

d'exemple, à kilomètres parcourus équivalents, un poids-lourd Essence Crit'Air 1 émet 100 fois plus d'oxydes d'azote (NO_x) qu'un véhicule particulier Crit'Air 1.

La Figure 43 présente les **niveaux de concentrations de dioxyde d'azote** pour les trois sites trafic en typologie rue canyon : Paris boulevard Haussmann en bleu, Francfort Frieberger-Landstrasse en orange et Londres Marylebone Road en jaune, en moyenne annuelle sur les années de 2012 à 2022.

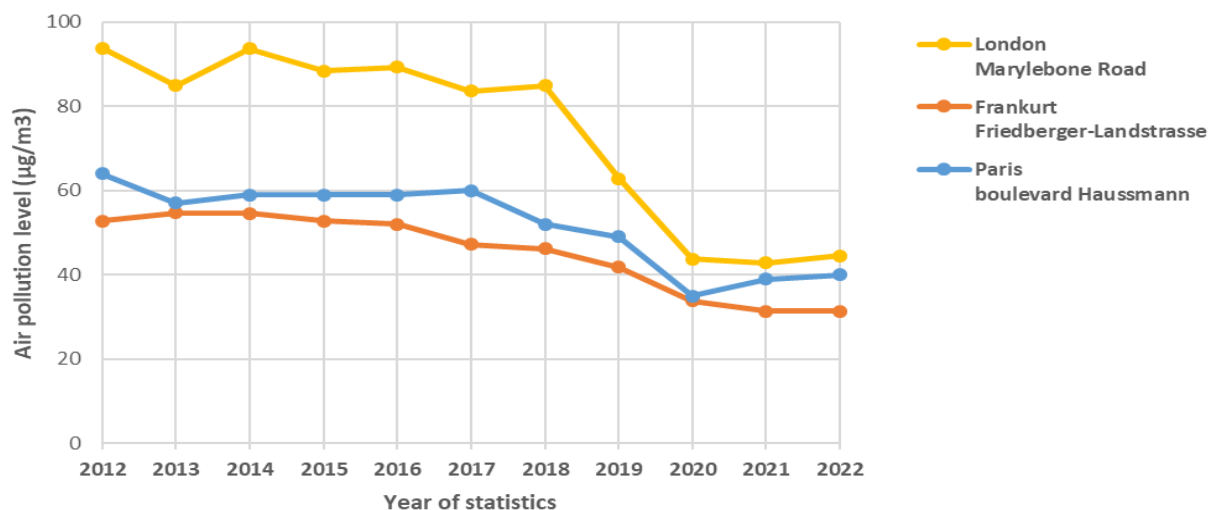


Figure 43 : Moyenne annuelle des concentrations de dioxyde d'azote (NO₂, en µg/m³) pour les sites de trafic urbain situés à Paris Boulevard Haussmann (bleu), à Francfort Frieberger-Landstrasse (orange) et à Londres Marylebone Road (jaune), de 2012 à 2022. ²

Globalement, les concentrations de NO₂ en moyenne annuelle sont en baisse sur l'ensemble des trois sites, avec une rupture assez visible sur l'année 2020, de part une forte baisse du volume du trafic routier en lien avec la pandémie COVID-19. Les niveaux sur les années 2021 et 2022 ne remontent néanmoins pas aux niveaux observés avant 2020.

De 2012 à 2018, la concentration de NO₂ en moyenne annuelle sur le site de Londres Marylebone Road était la plus forte parmi les trois sites, avec une concentration s'élevant à plus de 80 µg/m³, contre entre 55 et 70 µg/m³ pour le site du boulevard Haussmann à Paris et entre 45 et 55 µg/m³ pour le site Frieberger-Landstrasse à Francfort sur cette période. Les niveaux de NO₂ ont fortement baissé à partir de 2019 sur le site de Londres, se stabilisant entre 40 et 45 µg/m³ sur les années 2020, 2021 et 2022. Les fortes baisses constatées à Londres sont en lien avec la mise en place des restrictions de circulation pour les véhicules les plus polluants (« Ultra Low Emission Zone ») ainsi que le changement des bus londoniens.

Sur l'année 2021, la moyenne annuelle de NO₂ sur le site du Boulevard Haussmann et de Marylebone Road est très similaire, autour de 40 µg/m³, alors que celle de la station Frieberger Landstrasse se situe à environ 35 µg/m³.

Les « Zone à Faible Emission » (ZFE-m, « Low Emissions Zone » abrégée « LEZ » en anglais) sont un dispositif consistant à restreindre la circulation des véhicules « les plus polluants » au sein d'une zone géographique et sur une période temporelle données, selon des critères de norme Euro et/ou de carburant). Leur objectif est de réduire les émissions de polluants atmosphériques provenant du trafic routier en favorisant la circulation des véhicules les moins polluants au regard des norme Euro. Les trois sites de mesure Paris boulevard Haussmann, Francfort Frieberger-Landstrasse et Londres Marylebone Road font respectivement partie du périmètre de la ZFE mise en place pour chacune des villes. Le Tableau 12 : recense les informations concernant chacune des ZFE (date de 1^{ère} mise en place, description de la restriction de circulation et surveillance du dispositif), et le périmètre de

² Source : European Environment Agency <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/dashboards/air-quality-statistics/> / UK AIR DEFRA <https://uk-air.defra.gov.uk/>

la ZFE de la Métropole du Grand Paris (Paris) et celui de la ZFE de Londres sont présentés en Annexe VII : Périmètres de la Zone à Faible Emission à Londres et à Paris).

La date de première mise en œuvre de la ZFE est très différente entre la ZFE sur Paris et celle de Londres et Francfort : 2017 pour Paris et 2008 pour Londres et Francfort.

La restriction de circulation effective durant l'année 2022 l'est également : la ZFE métropolitaine qui inclut Paris, restreint la circulation à tous les types de véhicules de vignette Crit' Air 4, Crit' Air 5 et Non Classés (véhicules légers diesel pré-Euro IV et essence pré-Euro II ; véhicules lourds diesel pré-Euro V et essence pré-Euro III) depuis juillet 2021.

La ZFE de Francfort restreint la circulation à tous les types de véhicules (hors 2RM) diesel pré-Euro IV, ainsi qu'aux véhicules essence pré-Euro III, ce qui est similaire au niveau de restriction de la ZFE sur Paris.

La ZFE de Londres quant à elle restreint la circulation à tout type de véhicules lourds anciens, et est combinée avec une « Ultra Low Emission Zone » (ULEZ) dans un périmètre plus petit qui restreint la circulation à tous les types de véhicules (2RM pré-Euro III, véhicules diesel pré-Euro VI et véhicules essence pré-Euro IV), soit une restriction de niveau Crit' Air 2, ce qui est plus restrictif que celle mise en place au sein de la ZFE métropolitaine incluant Paris.

De plus, les ZFE des trois villes ne sont pas effectives selon les mêmes modalités temporelles, en effet, celle de Francfort est la plus stricte, car effective 24h/24 tous les jours de l'année sans exception, vient ensuite celle de Londres qui est effective 24h/24 tous les jours de l'année hors Noël et jour de l'An, alors que celle sur Paris est effective de 8h à 20h, et est effective le weekend seulement pour les véhicules lourds (poids lourds, bus et cars).

Enfin, les trois ZFE ne partagent potentiellement pas les mêmes taux de respect. En particulier, la ZFE de Londres dispose de trois zones de restriction de circulation : la LEZ, la ULEZ et une troisième zone nommée « Congestion Charge » délimitant le cœur du centre-ville qui autorise la circulation routière au sein de la zone sous condition de payer un forfait. La ULEZ de Londres est estimée comme étant respectée par neuf voitures sur 10³, cela peut s'expliquer par la présence d'un dispositif de surveillance assez important sur la ville, assuré par la lecture automatique de plaques via la captation de données caméra.

La ZFE métropolitaine incluant Paris ne dispose pas encore de dispositif de contrôle sanction automatique (CSA). Néanmoins, l'analyse de l'évolution du parc technologique circulant montre un renouvellement plus rapide des véhicules vers des véhicules plus récents depuis la mise en place de la ZFE.

³ Données de respect de la Ultra Low Emission Zone à Londres <https://tfl.gov.uk/modes/driving/ultra-low-emission-zone/ulez-compliance-data>

Caractéristique	Paris boulevard Haussmann	Londres Marylebone Road	Frankfurt Friedberger- Landstrasse ⁴
ZFE	ZFE Métropole du Grand Paris	London Low Emission Zone + Ultra LEZ (ULEZ) + Congestion Charge (CC)	Frankfurt Umweltzone
Date de 1^{ère} mise en place de la ZFE	2019 (2017 au sein de Paris)	LEZ : 2008-2012 ULEZ : 2019 CC : 2003	01/10/2008
Véhicules concernés	Tous véhicules	LEZ : hors VP et 2RM ULEZ : tous véhicules Congestion Charge : tous véhicules	Tous véhicules hors 2RM
Restriction de circulation en 2022	Crit'Air 4 et plus anciens véhicules légers diesel pré-Euro IV et essence pré-Euro II véhicules lourds diesel pré-Euro V et essence pré-Euro III	LEZ véhicules lourds pré-Euro VI, véhicules légers pré-Euro III ULEZ 2RM pré-Euro III, essence pré- Euro IV, diesel pré-Euro VI	diesel pré-Euro IV essence pré-Euro I
Date de mise en place de l'étape	2021	LEZ : 2021 ULEZ : 2014	2012
Amplitude horaire	8h-20h semaine et weekend	LEZ : 24h/24 ULEZ : 24h/24 CC : semaine 7h-18h, weekend 12h-18h	24h/24
Couverture temporelle	Semaine : tous véhicules Weekend : PL et bus et cars	LEZ : tous les jours ULEZ : tous les jours hors Noël CC : tous les jours hors Noël et jour de l'An	Tous les jours sans exception
Dispositif de contrôle	Contrôle manuel	Caméra à lecture automatique de plaque	Contrôle manuel
Taux de respect	Pas de publication	90 %	/

Tableau 12 : Comparaison des dispositifs de Zone à Faible Emissions à Paris, Londres et Francfort en 2022. Le périmètre de la ZFE de la Métropole du Grand Paris (Paris) et celui de la ZFE de Londres sont présentés en Annexe VII : Périmètres de la Zone à Faible Emission à Londres et à Paris.

⁴ Source : <http://gis.uba.de/website/umweltzonen/index.php#uwz/> / <http://gis.uba.de/website/umweltzonen/index.php#uwz>

Cette première étude comparative des niveaux de concentrations en nombre de particules ultrafines mesurés à Paris au regard de ceux mesurés sur d'autres métropoles européennes (dont Londres, Amsterdam, Francfort et Dresde) et nord-américaine (Montréal) sur la période de la campagne parisienne (de février à avril 2022 inclus) montre des niveaux plus forts mesurés à Paris sur cette période, en situation de fond urbain comme à proximité du trafic routier. Cette différence de niveau est néanmoins à analyser au regard des conditions climatiques et météorologiques potentiellement différentes entre les sites de mesure, notamment pour les mesures en situation de fond urbain. Les variabilités mensuelles sur les sites où les informations sont disponibles montrent que les différents sites urbains présentent des ordres de grandeurs de niveau similaires. Pour les sites à proximité du trafic routier, les mesures sont influencées de plus, par le volume de trafic, les conditions de circulation différentes au droit de chacun des sites et les véhicules circulants que ce soit leur type ou leur technologie. En particulier, la configuration de la circulation en sens-unique ou double-sens de circulation ainsi que la composition du parc routier, influencée par ailleurs par des Zones à Faibles Emissions (« Low Emissions Zone » en anglais) aux niveaux de restriction et modalités de mise en œuvre différentes, peuvent fortement influencer les émissions de polluants atmosphériques au niveau de ces sites de mesure. Il n'est pas possible sans une étude approfondie d'identifier l'importance de ces différents paramètres sur les différences de niveau observées.

Une analyse plus approfondie des niveaux de particules ultrafines au regard des caractéristiques du parc routier sur le site trafic du boulevard Haussmann sera réalisée lors de la seconde campagne de mesure sur l'été 2022 au cœur de Paris, afin d'étudier les facteurs liées au trafic routier et leur influence sur les concentrations de particule ultrafines mesurées sur ce site.

6. 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 de mesures des particules ultrafines (PUF) dans l'objectif de disposer d'une meilleure compréhension de leur variabilité spatiale dans Paris. En effet, 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), l'Organisation Mondiale de la Santé fait de même dans ses *Nouvelles lignes directrices mondiales sur la qualité de l'air* (OMS, 2021).

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 travaux de différentes campagnes de mesure sur le territoire francilien. Ces travaux renforcés sur Paris sont financés par Bloomberg Philanthropies.

Le premier volet de cette étude, objet du présent rapport, s'est focalisé sur l'analyse de la variabilité des particules ultrafines (PUF) au cours de la période hivernale et printanière de l'année 2022 et l'évaluation de l'impact du chauffage au bois sur les niveaux de particules ultrafines dans Paris en croisant les résultats avec des mesures du carbone suie.

La campagne s'est déroulée du 31 janvier au 5 mai 2022. La mesure des PUF a été réalisée à l'aide d'analyseurs de particules ultrafines de type CPC et SMPS, permettant l'acquisition de résultats en 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. De plus, une première comparaison des niveaux constatés avec ceux observés dans différentes métropoles européennes et nord-américaine (Montréal, Canada) en situation urbaine de fond et de proximité au trafic routier a été menée.

L'étude met en avant les points suivants :

Le nombre de PUF est fortement impacté par les émissions du trafic routier.

En effet, les résultats montrent que le nombre moyen de PUF (gamme 5 à 100 nm) sur la période de mesure est de 2 à 2.5 fois supérieur sur les sites trafic par rapport à ceux enregistrés sur les sites urbains de fond parisien avec une variabilité temporelle des niveaux également plus importante. Les sites de fond Paris 1^{er} les halles et Paris 18^{ème} présentent des niveaux de concentration de PUF similaires. 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.

Sur les sites de proximité au trafic routier, la variabilité des niveaux mesurés pourrait être en partie liés au volume de trafic, aux conditions de circulation (vitesse, congestion), ainsi qu'à la composition du parc de véhicules routiers circulant au droit des sites de mesure. *La campagne de mesures du deuxième volet (été 2023) devrait permettre une analyse plus détaillée du nombre de PUF au regard des données trafic, notamment par la mise en place de l'innovation Airlab (caméra-mesure du trafic routier) sur le site trafic du boulevard Haussmann.*

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 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. Cela correspond à la gamme de modes appelée « Nucléation », qui est caractérisé par une part majoritaire de particules « fraîchement » émises, notamment par le trafic routier.

Les niveaux de PUF à Paris sont impactés par le chauffage au bois lors des périodes les plus froides. En effet, la campagne hivernale et printanière montre la présence notable à Paris de particules ultrafines issues de la combustion de biomasse (chauffage au bois pour la période hivernale), malgré des conditions contrastées sur la période avec peu de jours avec des températures froides, propices à l'utilisation de chauffage au bois. 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.

Des PUF issues de transformations dans l'atmosphère lors de périodes de vents faibles et d'ensoleillement soutenu montrent des niveaux exceptionnels lors du mois de mars 2022.

La campagne de mesures a été marquée par une période avec des conditions météorologiques favorables à la génération de particules 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, impactant significativement les concentrations en nombre de particules ultrafines. De plus cette période a été favorable à l'augmentation d'Aérosols Inorganiques Secondaires (AIS) notamment en fin de soirée et la nuit. Ces particules secondaires en quantité importante expliquent que les niveaux de particules ultrafines de diamètre inférieur à 30 nm aient été les plus forts lors de cette période.

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 la période de l'étude 2022 mettent en évidence une disparité de niveaux de PUF d'un site à un autre. Ces différences peuvent être expliquées par de nombreux facteurs propres à chaque ville : le climat et les conditions météorologiques ; la densité de population et du réseau routier, qui est très forte sur l'agglomération parisienne et sans équivalent autre part en Europe. Pour les stations à proximité du trafic routier en particulier, les caractéristiques de la station de mesure, les caractéristiques du trafic routier notamment liées aux conditions de circulation (configuration routière en sens-unique ou double-sens, nombre de voies, vitesse, congestion, ...), ainsi que la composition du parc routier (influencée par ailleurs par des Zones à Faibles Emissions différentes), peuvent fortement influencer les émissions de particules aux sites de mesure.

Perspectives

Une analyse plus approfondie des niveaux de particules ultrafines au regard des caractéristiques du parc routier sur le site trafic du boulevard Haussmann sera réalisée lors de la seconde campagne de mesure sur l'été 2022 au cœur de Paris, afin d'étudier les facteurs liés au trafic routier et leur influences sur les concentrations de particule ultrafines mesurées sur ce site.

Références

- 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. (février 2022). *Campagne de mesure francilienne sur les particules ultrafines (PUF) - situation de fond - hiver 2020-2021*.
- 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*.
- 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*.
- H.J.P. Helmink, I. v. (2020). *Meetresultaten luchtkwaliteit Amsterdam 2019*. GGD Amsterdam.
- 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.
- 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*.
- 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*.
- 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*.
- 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>

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 44), 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).**

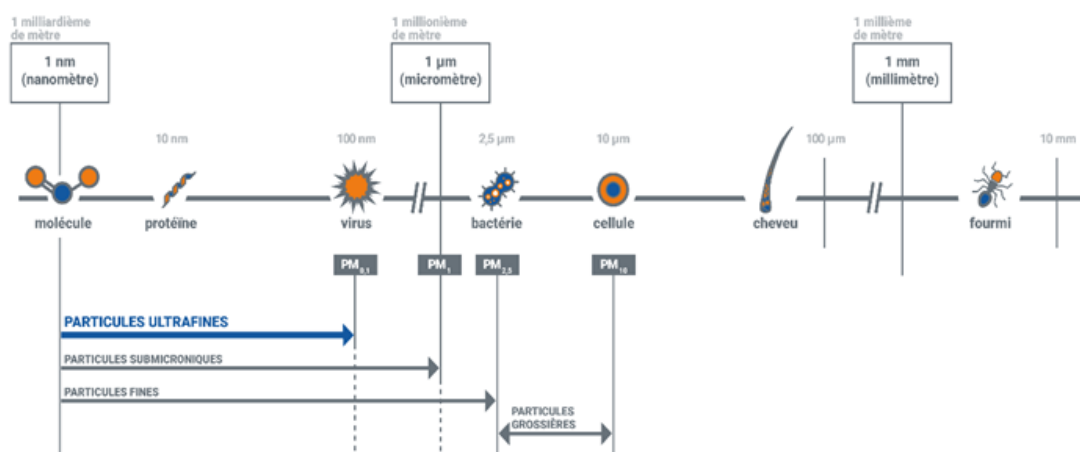


Figure 44 : Taille des particules - échelles et ordres de grandeur

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 PM₁₀ 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 PM₁₀ et PM_{2,5} mesurées dans le cadre de la réglementation sont exprimées en masse par unité de volume à savoir des µg/m³ 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 PM₁₀ 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 PM₁₀. En revanche, elles ne représentent que très peu en concentrations massiques :

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

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

La présence des PUF dans l'atmosphère constitue un risque avéré pour la santé humaine car leur faible taille leur permet de pénétrer profondément dans l'organisme, alors que les particules les plus grosses sont naturellement arrêtées par le nez. Plus les particules sont petites, plus elles vont pouvoir pénétrer et rester dans l'organisme (Figure 45).

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

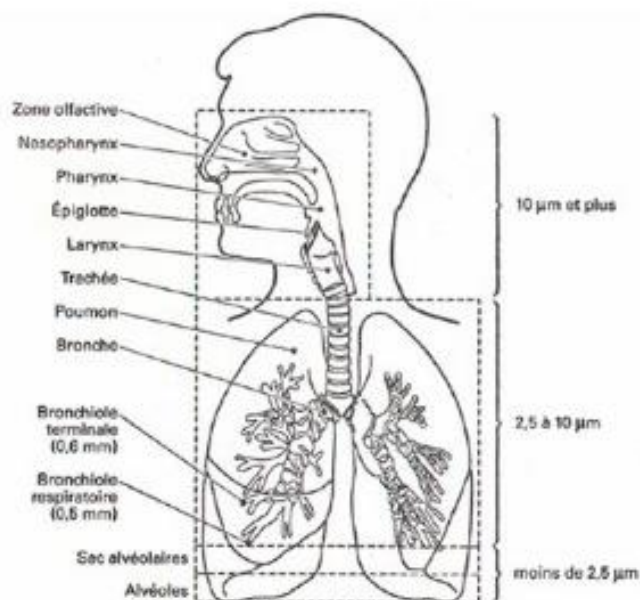


Figure 45 : Pénétration des particules dans l'organisme (Schéma réalisé sur la base d'un dessin du DR J. Hararkeman). (Source : www.santepubliquefrance.fr)

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

De plus, les très petites particules peuvent être en nombre très important, et elles offrent de ce fait une surface de contact plus importante que les grosses. D'autre part, les composés les plus toxiques se trouvent préférentiellement dans la fraction fine des particules. Les études épidémiologiques ont montré que les expositions aux PUF peuvent causer une augmentation de la mortalité et des hospitalisations pour des raisons cardio-respiratoires (Belleudi et al., 2010 ; Chatignoux et al., 2013). Une étude estime que l'augmentation de 10 000 part/cm³ est associée à une augmentation de 4,27 % d'hospitalisation liées aux maladies (Samoli et al., 2016). Les PUF peuvent être transportées dans les régions du cerveau par l'inhalation (Oberdörster et al., 2004). De nombreuses études in vitro ont mis en évidence que des PUF produisaient plus de radicaux libres que les particules plus grosses et provoquaient un stress oxydant plus important (Donaldson et al., 2002; Schins et al., 2004). Les PUF pourraient avoir un effet à long terme sur la santé neurologique (développement des performances cognitives de l'enfant) (ANSES, 2019). Il reste encore beaucoup d'incertitudes sur le comportement des PUF dans l'organisme.

Compte-tenu de leurs enjeux en termes d'impacts sanitaires, l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES 2018) a insisté, dans son [avis du 28 juin 2018](#), sur la nécessité de compléter et de pérenniser l'acquisition de données dans l'air

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

Le carbone suie (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).

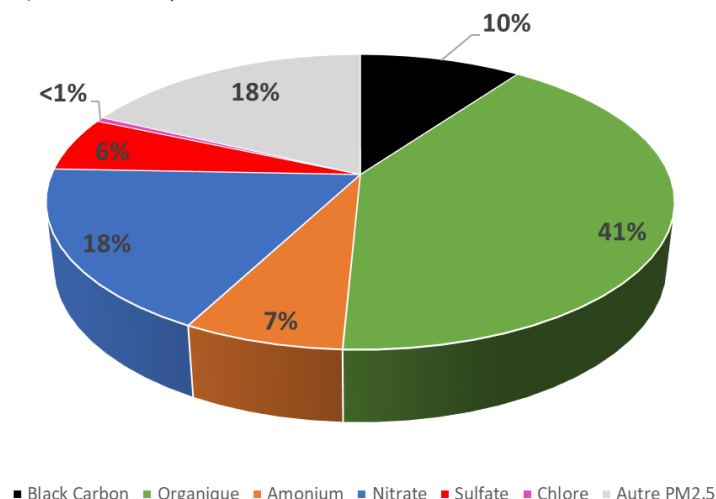


Figure 46 : Composition chimique moyenne annuelle des PM_{2.5} en situation de fond urbain (Mesures ACSM / AE33)

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 PM₁₀ primaires attribuables à ces deux familles de sources peuvent être estimées au moyen de facteurs multiplicatifs, établis lors d'études dans des environnements spécifiques, issus de la littérature scientifique. Le guide méthodologique du LCSQA

(LCSQA, 2020) préconise, pour une estimation des concentrations de particules primaires liées à la combustion, d'utiliser les facteurs multiplicatifs suivants :

- PM_{fr} (équivalent PM_{10}) = $2 \times eBC_{fr}$

- 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 particulaires

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

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

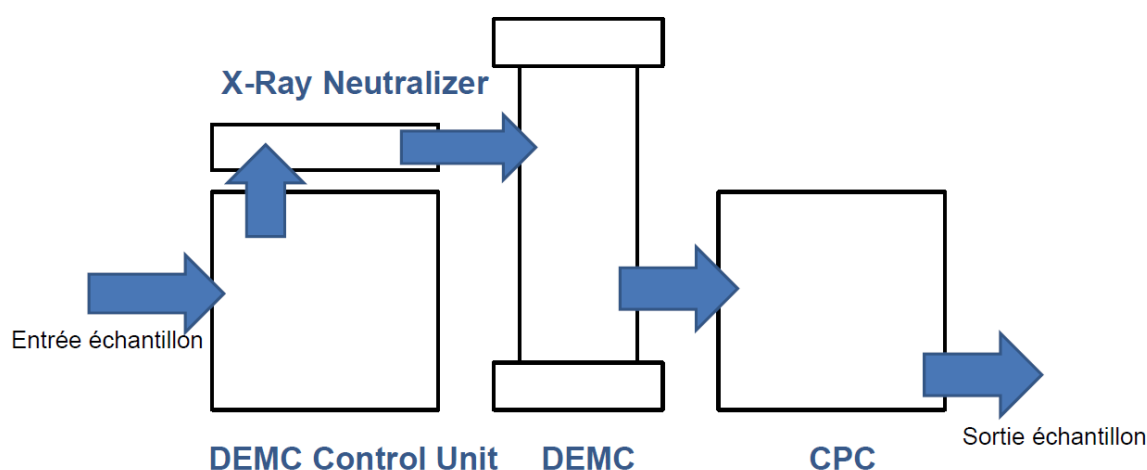
Annexe II : Métrologie

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

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

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

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

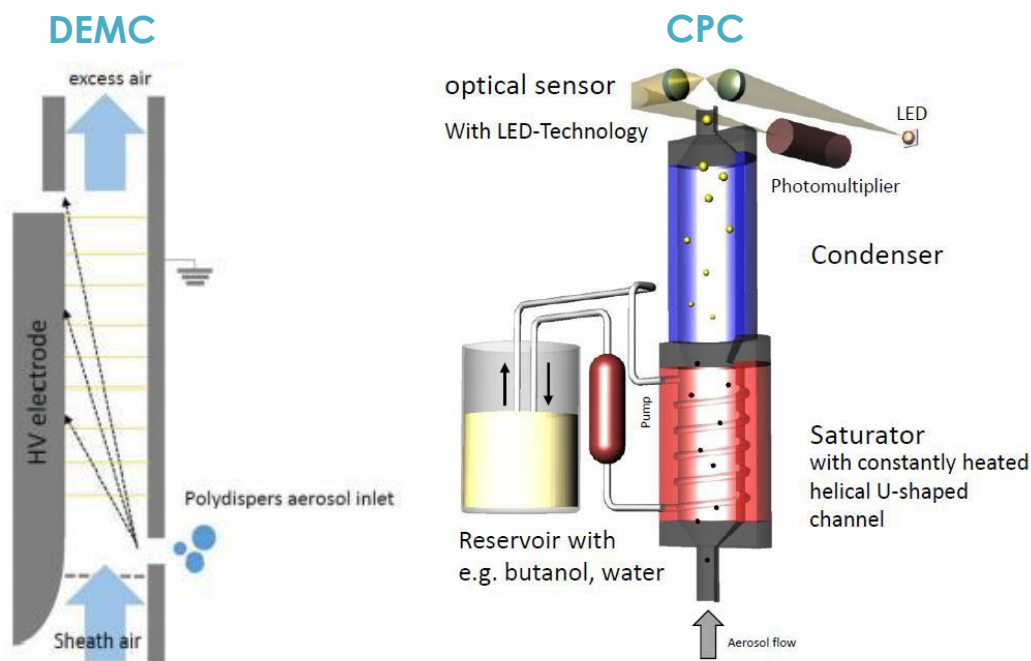


Le SMPS est ainsi composé d'un DEMC (Differential Electrical Mobility Classifier) qui sélectionne les particules suivant leurs tailles granulométriques via leurs mobilités électriques, et d'un CPC (Condensation Particle Counter) permettant de les faire grossir afin de les compter.



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

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



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

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

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

L'U-SMPS de chez Palas existe avec deux modèles de colonne DEMC, une grande permettant d'obtenir la distribution granulométrique sur la gamme 10 à 1000 nm et une petite affichant une gamme plus fine allant de 5 à 400 nm.

Pour cette étude, il a été choisi de configurer cet analyseur sur la gamme la plus fine allant de 5 nm à 400 nm avec une mesure toutes les 5 minutes validée techniquement sur 121 classes.

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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

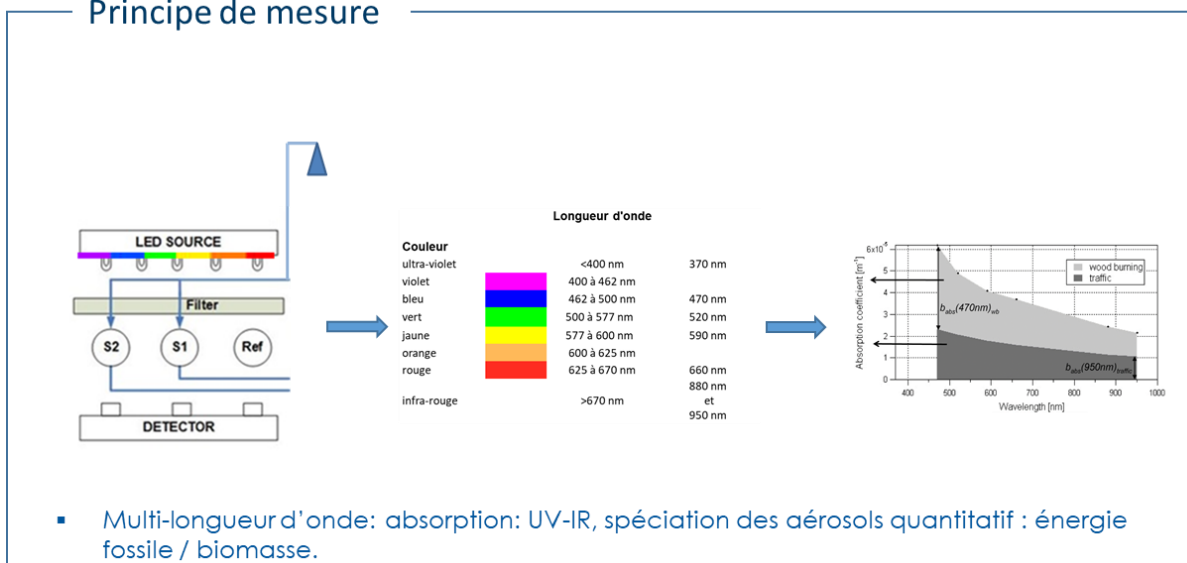
Les analyseurs AE33 sont utilisés au sein du dispositif de surveillance de la qualité de l'air francilien depuis 2015. **Ces aethalomètres permettent la mesure en continu du Black Carbon.**

Analyseur



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

Principe de mesure



- Multi-longueur d'onde: absorption: UV-IR, spéciation des aérosols quantitatif : énergie fossile / biomasse.

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.

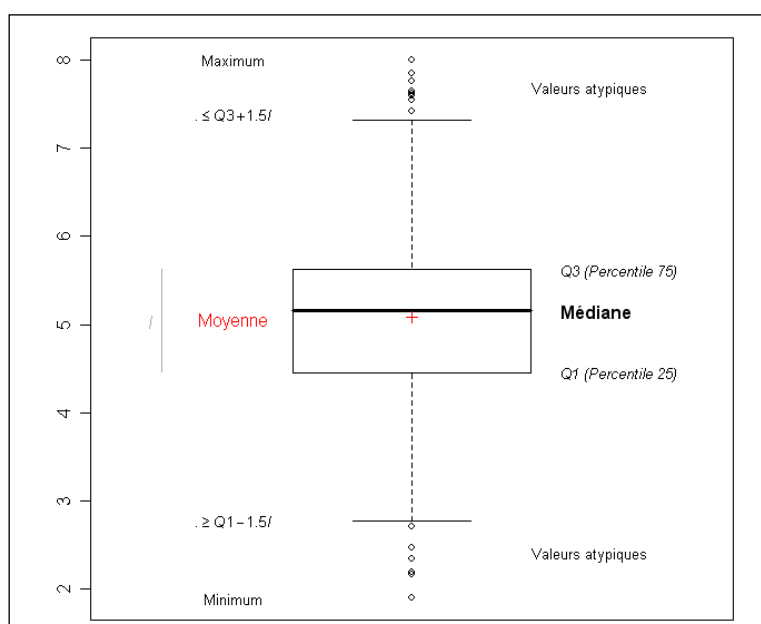
ACSM (Mesure de composition chimique en temps réel en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

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 : Boîte à moustache - Définition

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



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

Les moustaches réparties de chaque côté de la boîte représentent généralement près de 25 % des données, mais n'excèdent pas en termes de longueur, $1.5 * I$ (I étant l'écart interquartile, c'est-à-dire la longueur de la boîte), ce qui peut amener la présence de points atypiques en dehors des moustaches. La fin de la moustache supérieure correspond donc soit à la valeur $3Q + 1.5I$ (3^{ème} quartile + une fois et demi l'intervalle inter quartile), soit au maximum de l'échantillon s'il est plus faible que cette valeur.

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

Annexe IV : 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 47 (Renoux et Boulaud, 1998).

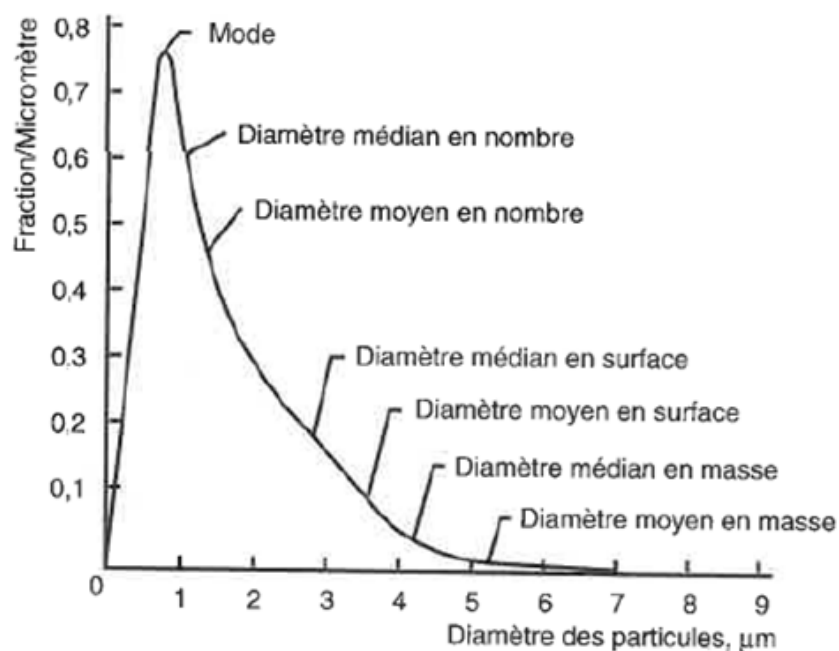


Figure 47 : Paramètres caractéristiques des distributions granulométriques (Renoux et Boulaud, 1998)

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 48 (Buseck, 2008).

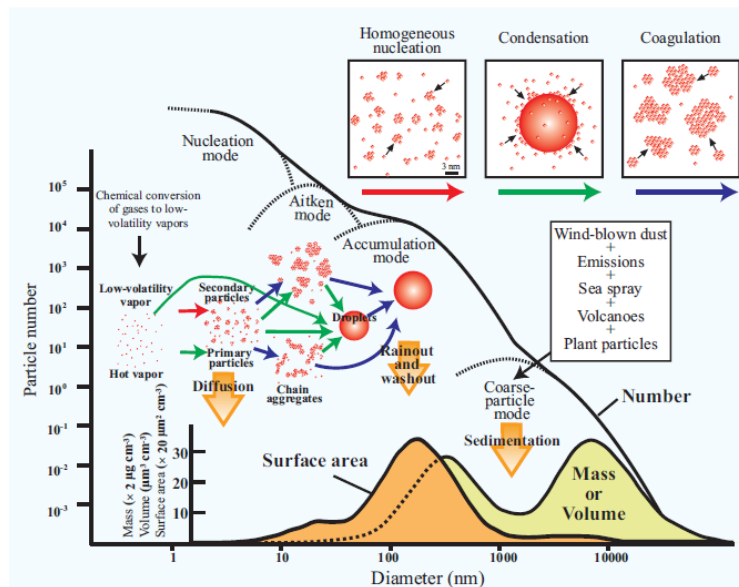


Figure 48 : Processus chimiques et physiques de la formation des aérosols dans l'atmosphère (Buseck, 2008)

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 49.

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 48 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 49).

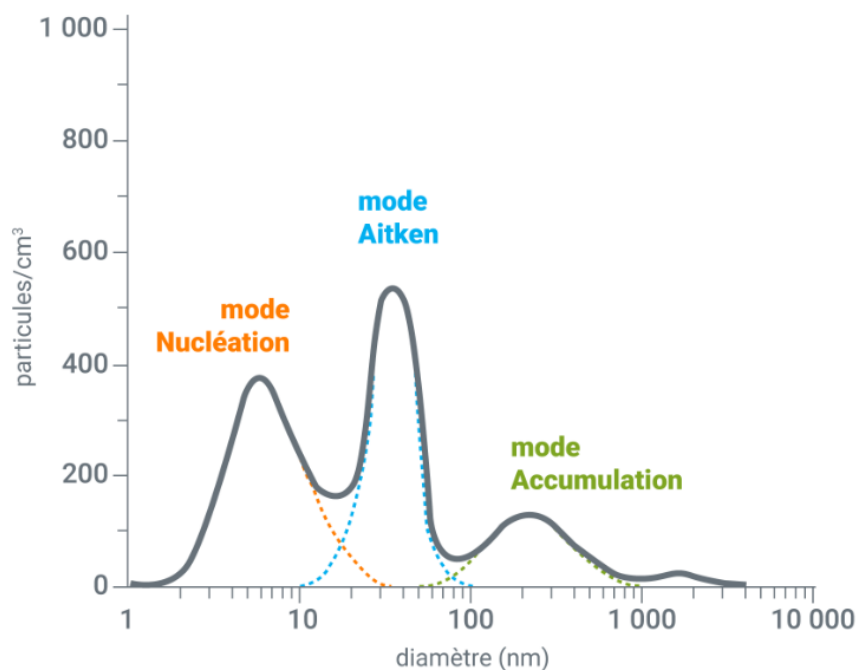


Figure 49 : Représentation indicative de la distribution des Modes Nucléation, Aitken et Accumulation (source : (Airparif, 2022))

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 **30 nm** (généralement composées de sulfates, nitrates, métaux et de composants organiques carbonés). Cette formation est favorisée par des températures ambiantes basses et une humidité relative élevée ((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 **10 et 100 nm** (Buseck, 2008). Elles sont soit issues du grossissement des particules du mode nucléation par condensation ou coagulation de celles-ci, de réactions hétérogènes ou soit produites directement par la combustion des matières fossiles et biomasse (émissions primaires). Elles sont principalement composées de suies et de cendres, servant de noyau de condensation à des matières volatiles.

Le mode Accumulation regroupe les particules de tailles allant approximativement de **50 à 1 000 nm** résultant entre autres de la condensation de matières organiques carbonées et de la coagulation des particules des autres modes. Elles ont une durée de vie de l'ordre de plusieurs jours à plusieurs semaines et peuvent, de ce fait, se déplacer sur de longues distances (**particules âgées, dites « vieilles »**) ((Riva, 2013), (Buseck, 2008)). La principale voie d'élimination de cette catégorie de particules reste les précipitations ((Regniers, 2006), (Hussein, 2004)).

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

Landesamt 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)61169390
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

Annexe VI : Moyennes annuelles des mesures de dioxyde d'azote à Paris, Francfort et Amsterdam

Stations de fond urbain

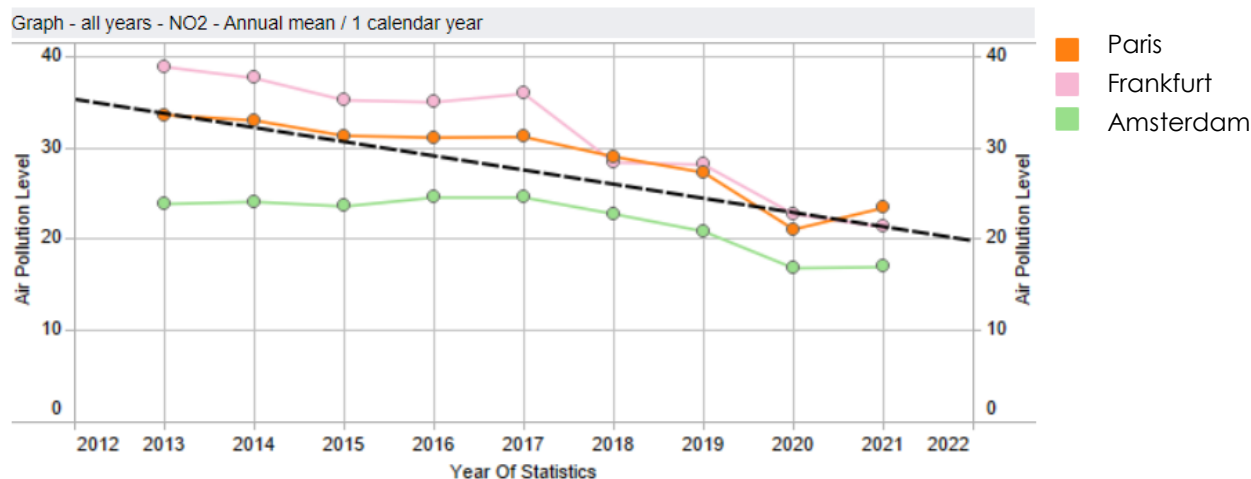


Figure 50 : Moyenne annuelle des niveaux de dioxyde d'azote (NO₂, en µg/m³) pour les sites de fond urbain situés à Paris (en orange), à Francfort (en rose) et à Amsterdam (en vert) | Source : European Environment Agency <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/dashboards/air-quality-statistics>.

Annexe VII : Périmètres de la Zone à Faible Emission à Londres et à Paris

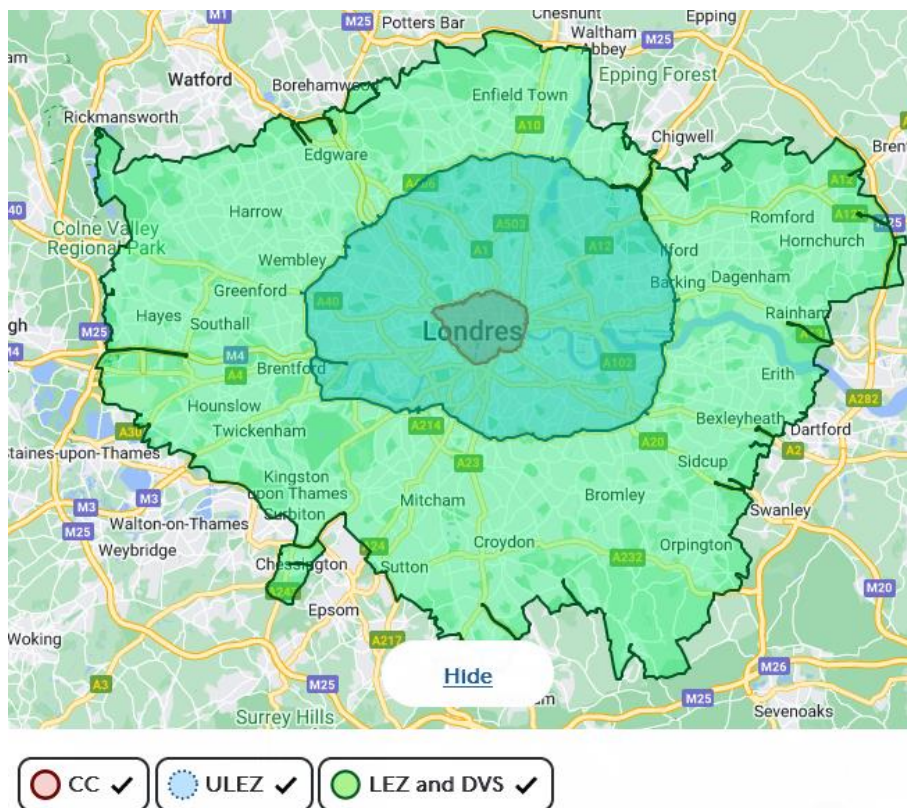


Figure 51 : Périmètres de la "Low-Emission Zone" (LEZ, en vert), de la "Ultra Low Emission Zone" (ULEZ, en bleu) et la "Congestion Charge" (en rouge) mises en place dans la ville de Londres (Angleterre).

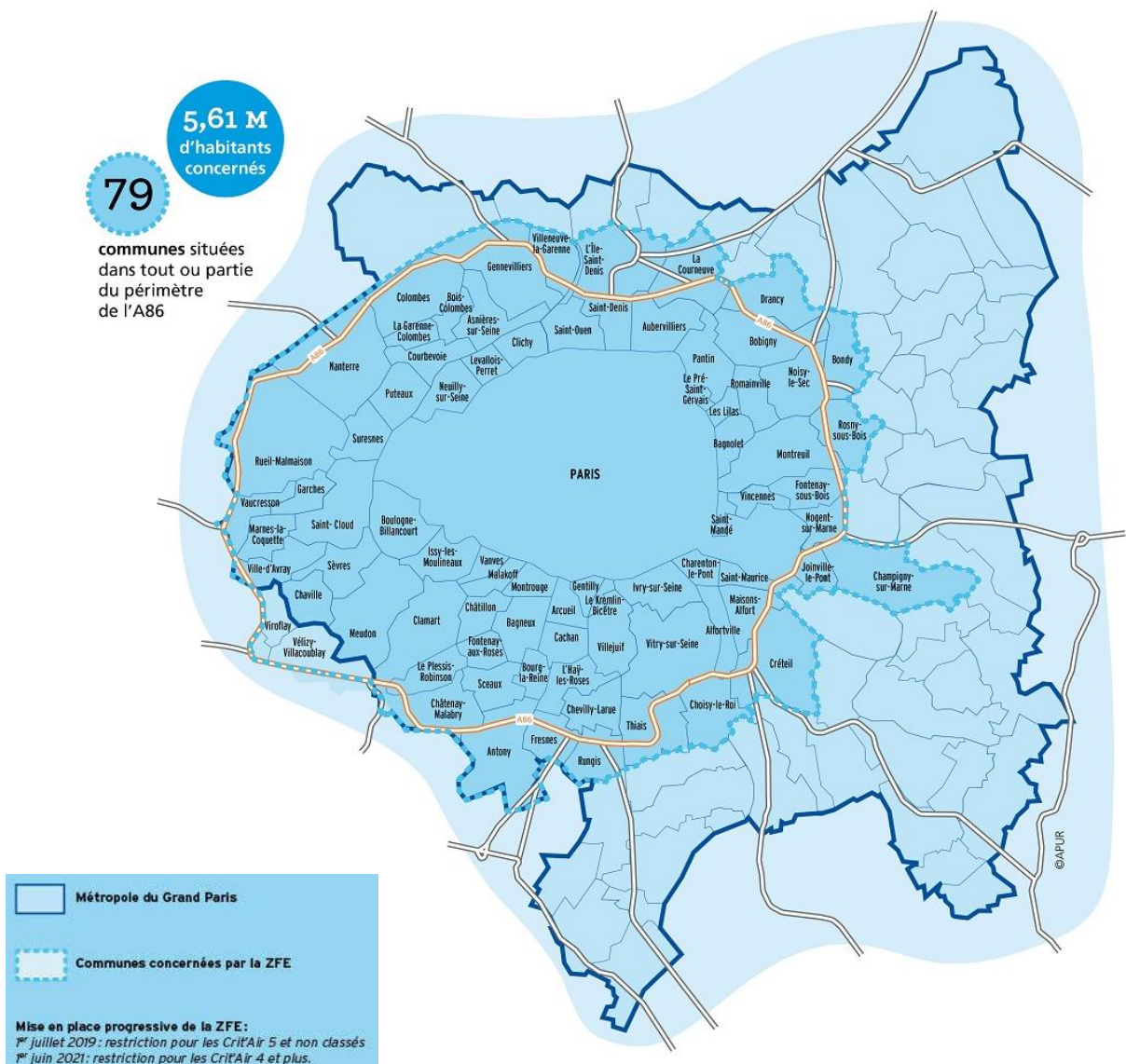


Figure 52 : Périmètre de la ZFE métropolitaine (périmètre à l'intérieur de l'autoroute A86, A86 exclue, en orange) et communes situées dans tout ou en partie au périmètre de l'A86 (en bleu). Le périmètre bleu foncé est le contour de la Métropole du Grand Paris.