

Campagne de mesure francilienne sur les particules ultrafines (PUF)

SYNTHÈSE - SITUATION DE FOND HIVER 2020-2021

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

Synthèse

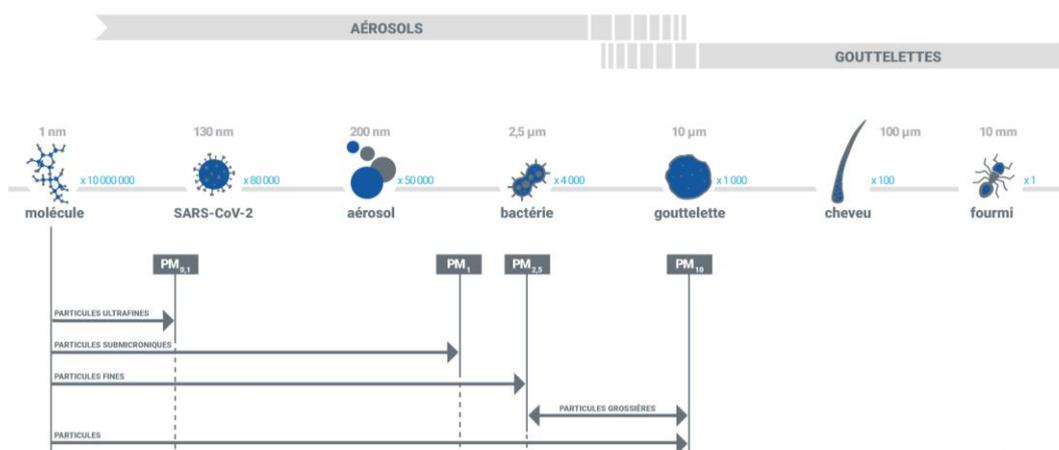
Table des matières

Contexte	1
La campagne de mesure	3
Caractérisation du nombre des particules ultrafines en situation de fond en période hivernale	4
Caractérisation du nombre de particules ultrafines par classes granulométriques	7
Perspectives	12

Contexte

Le terme « particules » désigne un mélange de polluants solides et/ou liquides en suspension dans un milieu gazeux. En fonction de leur taille, de leur source et de leur composition chimique, les particules ont un impact sur la santé, mais également sur le bâti, les écosystèmes et le climat. Cette étude cible les particules les plus fines de l'aérosol.

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



D'après Papathanasiou, Vejerano et al. (2018), adaptation graphique Airparif

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

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. **Pourtant, les particules ultrafines et submicroniques représentent une faible masse de particules et contribuent donc peu à la masse de particules PM₁₀ mesurées mais 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, dont les procédés de combustion.

Les particules plus petites, dont les PUF, 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 sont très nombreuses et 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.**

Depuis fin 2019, Airparif suit les variations temporelles des niveaux en nombre de PUF par classes granulométriques au centre de l'agglomération parisienne grâce à l'implantation d'un appareil de mesure (SMPS) permanent sur le site urbain de fond Paris 1^{er} les Halles et financé par la région Ile-de-France. **Pour aller plus loin, Airparif et ses membres ont souhaité renforcer la connaissance des PUF, en menant une étude exploratoire d'évaluation de la variabilité spatiale et temporelle des niveaux en nombre et en classes granulométriques des PUF dans différents environnements en Ile-de-France.** Airparif a lancé un programme d'étude sur plusieurs années visant à documenter les niveaux en situation de fond, le long du trafic routier et à proximité des plateformes aéroportuaires franciliennes Paris-CDG et Paris-Orly, via des campagnes de mesure successives de 3 mois (autant période hivernale / estivale). Ces études ont également pour objectif d'identifier les sources de PUF à partir des différences de profils granulométriques en fonction des environnements surveillés et permettront d'identifier les zones ou typologies nécessitant une surveillance approfondie ou permanente. Ces travaux sont cofinancés par Airparif, la Métropole du Grand Paris, la Ville de Paris, la communauté d'agglomération Paris Saclay, l'ARS et Aéroport de Paris.

Airparif a mené la première de ces campagnes de mesure de décembre 2020 à février 2021. **Son objectif était de renseigner et de comparer pour la première fois en Ile-de-France les niveaux de particules ultrafines (en nombre de particules et par tranches granulométriques) dans différentes situations de pollution de fond (éloignée des sources de pollution) de la région en période hivernale. L'analyse de ces résultats au regard des autres mesures réalisées sur le dispositif de surveillance, en particulier les mesures de composition chimique, permettra d'améliorer les connaissances sur les contributions des différentes sources aux niveaux de PUF franciliens.**

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

La campagne de mesure

Trois sites de mesure des PUF ont été mis en place à Gennevilliers et Tremblay-en-France (en zone urbaine, dans l'agglomération parisienne) et Bois-Herpin (en zone rurale sud), en complément de la station Paris 1^{er} Les Halles.

La Figure 2 ci-dessous présente les différents sites de mesure de cette campagne hivernale en situation de fond.



Figure 2 : Cartographie des sites de l'étude PUF en situation de fond. (source Google Earth et Airparif)

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

Caractérisation du nombre des particules ultrafines en situation de fond en période hivernale

La Figure 3 présente les moyennes des concentrations des différents paramètres de la pollution particulaire suivis dans cette étude :

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

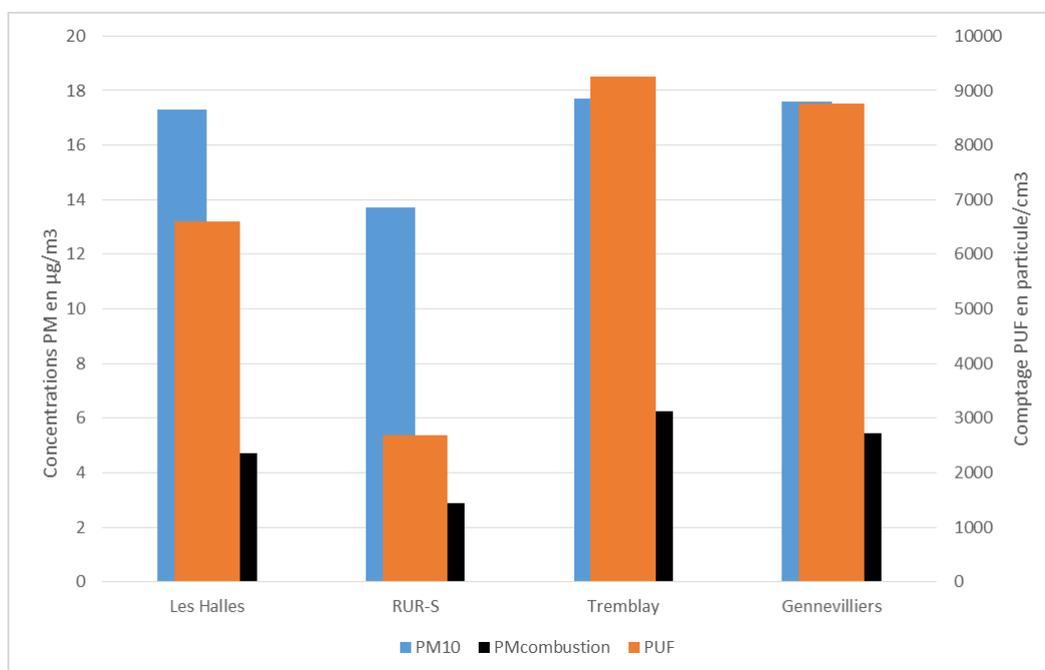


Figure 3 : Moyenne des polluants particulaires mesurés sur la période d'étude.

Le comptage moyen du nombre de PUF dans la gamme 5 à 100 nm met en évidence une variabilité importante du nombre de particules ultrafines entre les sites de fond franciliens. Cette variabilité est nettement plus marquée que celle observée pour les PM₁₀ ou pour les particules issues des sources de combustion. Les niveaux de PUF les plus bas sont enregistrés sur le site rural, éloigné des sources de l'agglomération parisienne. Les niveaux les plus soutenus sont relevés sur les sites de fond urbains avec une différence notable entre le site de Paris 1^{er} Les Halles et les sites de Gennevilliers mais surtout de Tremblay-en-France.

Les niveaux moyens en PUF mesurés sur l'ensemble de la campagne sont compris entre 2700 part/cm³ pour le site rural et 6600 à 9300 part/cm³ sur les sites urbains. Sur la période, **les sites**

de Tremblay et Gennevilliers enregistrent ainsi une concentration en nombre de PUF plus de 3 fois supérieure à celle du site rural Sud, qui s'expliquent par les sources urbaines locales. Le site de Paris 1^{er} Les Halles, situé dans un jardin, et plus éloigné des sources, notamment des axes routiers, relève des niveaux plus faibles que les deux autres sites urbains, implantés dans le tissu urbain, au milieu des habitations. **Ces concentrations de PUF relevées sur la zone urbaine francilienne sont conformes aux concentrations observées par les autres réseaux de surveillance français.**

L'évolution temporelle du nombre de PUF au cours de la journée (Figure 4) montre des sources de PUF, avec des profils journaliers « double bosse » caractéristiques de la pollution particulaire urbaine avec le pic du matin et du soir en lien avec les activités anthropiques et l'évolution des conditions de dispersion atmosphérique. Ces pics sont plus marqués sur Gennevilliers et Tremblay-en-France que sur le site de Paris 1^{er} les Halles et ne sont pas observés sur le site rural.

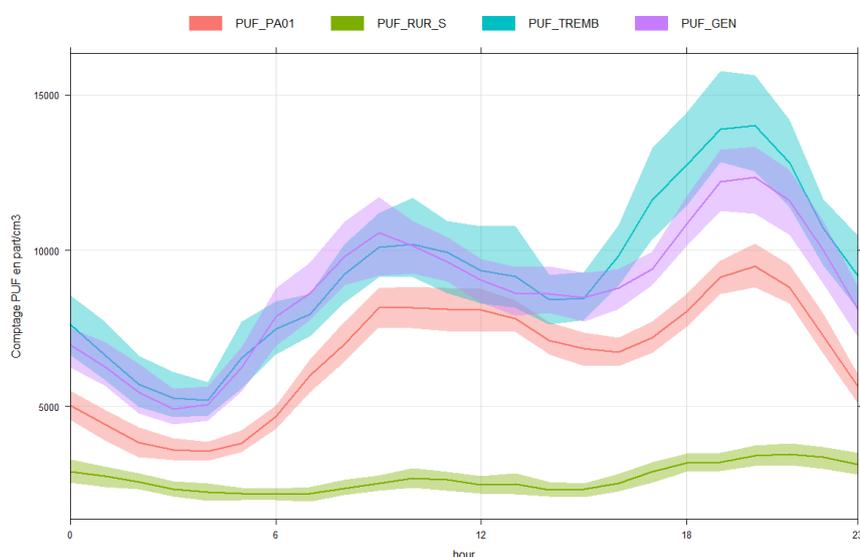


Figure 4 : Profils moyens journaliers du nombre de PUF (Hiver 2020-2021)

En complément des mesures de PM_{10} et $PM_{2.5}$, le réseau de surveillance d'Airparif dispose de mesures en continu de la composition chimique des particules, en particulier du carbone suie (BC). Ce composé est un très bon traceur des sources locales de combustion et la technique de mesure utilisée permet de distinguer les particules émises par la combustion d'hydrocarbures (eBCff, principalement par le trafic routier) de celles émises par la combustion de la biomasse (eBCwb, principalement en Ile-de-France et en période hivernale par le chauffage au bois). L'analyse des profils hebdomadaires du nombre de PUF et de la concentration en carbone suie dans les particules (Figure 5) permet de distinguer l'impact de deux sources prédominantes. Les pics matinaux, non observés le week-end, montrent une forte corrélation avec le carbone suie issu du trafic routier. La hausse des concentrations le vendredi, samedi et dimanche soir est corrélée avec le carbone suie issu de la combustion de biomasse et illustre l'impact d'un plus grand recours au chauffage au bois le week-end que la semaine.

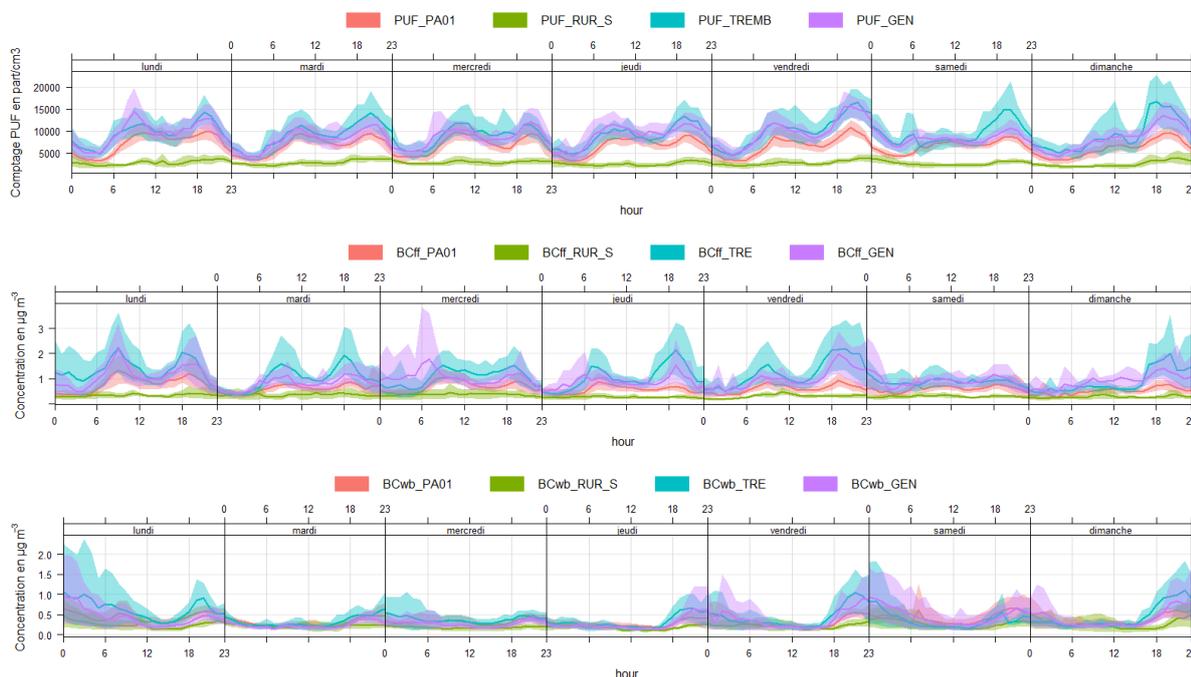


Figure 5 : Profils moyens journaliers selon le jour de la semaine du comptage PUF et des concentrations en eBC_f et eBC_{wb} (Hiver 2020-2021)

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

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

Cette étude a également permis d'étudier le nombre de PUF sur plusieurs situations de pollutions spécifiques rencontrées au cours de la campagne. Elle permet de donner des niveaux de référence hivernaux pour l'ensemble de la période, pour une journée faible, pour un épisode de combustion de biomasse et pour une formation d'Aérosols Inorganiques Secondaires (AIS)¹. Sur cette période hivernale 2020-2021, les niveaux de PUF sont inversement proportionnels à la

¹ 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. Les aérosols inorganiques secondaires (AIS) dont les nitrates et sulfates d'ammonium sont les représentants majoritaires ont pour précurseurs gazeux le dioxyde d'azote (NO₂), le dioxyde de soufre (SO₂) et les COV et l'ammoniac (NH₃).

température, avec des niveaux maximum enregistrés sur les mois de décembre et janvier lors des périodes les plus froides.

À titre d'exemple, les niveaux de PUF lors d'une journée d'épisode de pollution à la combustion biomasse sont 2 à 3 fois supérieurs à la journée de référence du 22 décembre 2020 sur les sites urbains et 1.5 fois supérieurs sur le site rural. L'augmentation des concentrations massiques conduisant à un épisode de pollution s'accompagne donc d'une hausse notable du nombre de PUF dans l'air francilien. Sur l'agglomération parisienne, la différence observée entre le site des Halles et les sites de fond périurbains semble donc s'expliquer essentiellement par l'utilisation du chauffage résidentiel au bois, plus marquée sur ces sites situés dans des zones résidentielles, avec le site Tremblay plus impacté que celui de Gennevilliers.

Caractérisation du nombre de particules ultrafines par classes granulométriques

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

La littérature scientifique fait état d'une distribution normale du diamètre des PUF si l'environnement est soumis à l'influence d'une source unique. Le diamètre présentant le nombre de PUF le plus important est appelé le mode. En environnement urbain, marqué par une grande diversité de sources de pollution, il est fréquent d'obtenir des distributions multimodales, présentant différents modes plus ou moins imbriqués. En dissociant ces différents modes, il est possible d'identifier chaque source associée à ces différentes caractéristiques de distribution et de la caractériser, tant qualitativement que quantitativement.

Des abaques permettent de recenser **« l'empreinte » granulométrique** de nombreuses sources urbaines et naturelles. La Figure 6 représente la distribution du diamètre des particules ultrafines selon leur source d'émission.

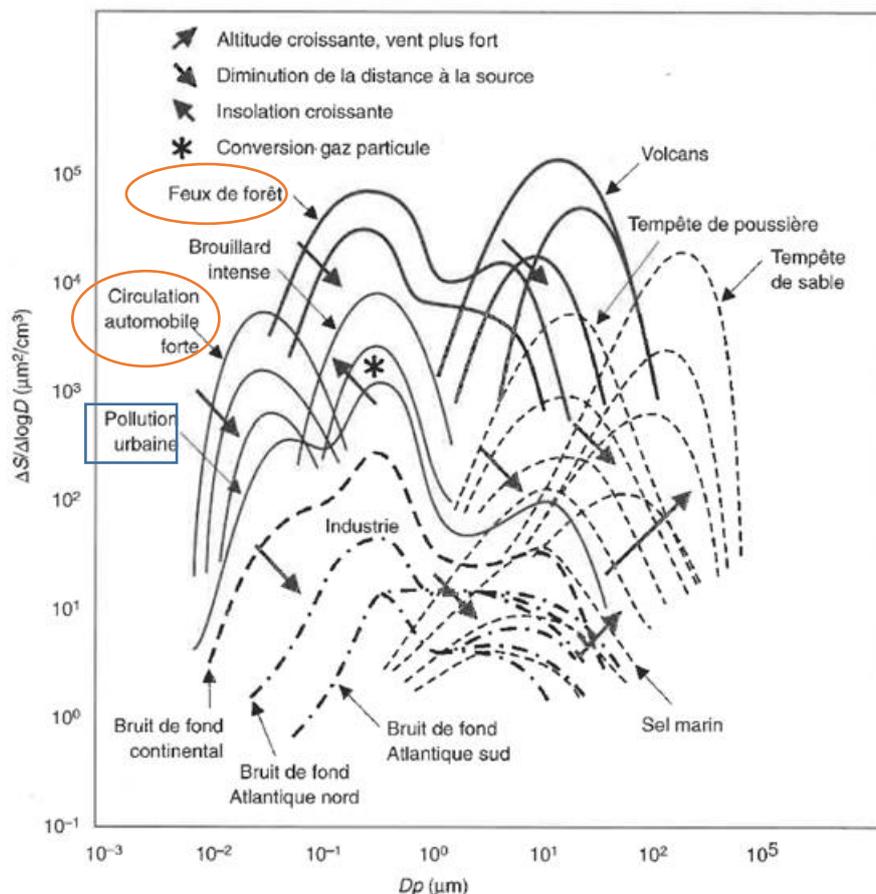


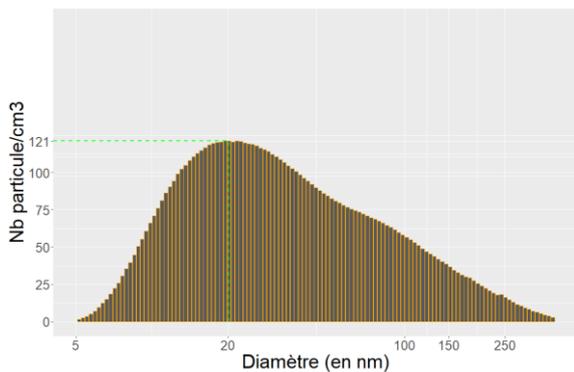
Figure 6 : Distribution granulométrique (en surface) de différents types d'aérosols atmosphériques (Renoux et Boulaud, 1998)

Le profil granulométrique théorique bimodal est caractéristique de la pollution urbaine (encadré bleu sur la Figure 6), avec un premier mode, plus fin, majoritairement lié au trafic routier, et le second, de diamètre plus élevé, plutôt lié à la combustion de biomasse. Ces deux sources de combustions urbaines sont confirmées à l'échelle internationale avec notamment une étude menée à Santiago au Chili (Gramsch et al., 2014).

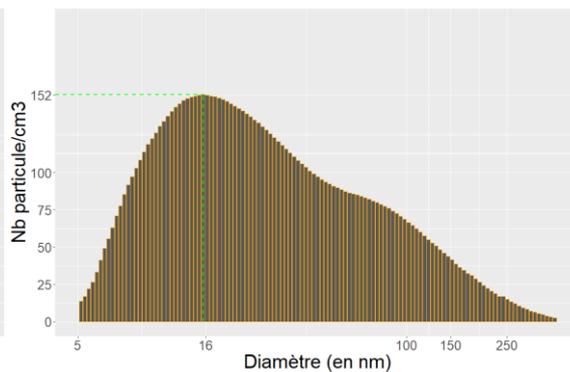
La mesure SMPS réalisant un tri de ces particules les plus fines configuré sur la gamme granulométrique 5 à 400 nm, suivant 121 classes granulométriques, permet de bâtir les profils granulométriques expérimentaux observés sur chacun des sites à fine échelle temporelle. Ces profils expérimentaux, comparés aux abaques de la littérature, permettent d'identifier les sources majoritaires de PUF.

La construction des profils granulométriques moyens est réalisée en regroupant au sein d'un même graphique les différentes données de comptage de chaque classe sous forme d'histogramme. Celui-ci présente en abscisse les tailles des particules (diamètre aérodynamique en nm, en échelle logarithmique) et en ordonnée la concentration en particules, exprimée en part/cm^3 , comme présenté dans l'introduction à cette partie. La Figure 7 illustre les résultats obtenus pour les quatre sites d'étude en moyenne sur la campagne.

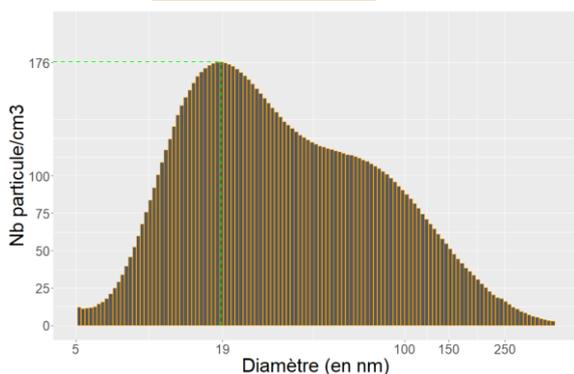
PARIS 1^{ER} LES HALLES



GENNEVILLIERS



TREMBLAY-EN-FRANCE



ZONE RURALE SUD

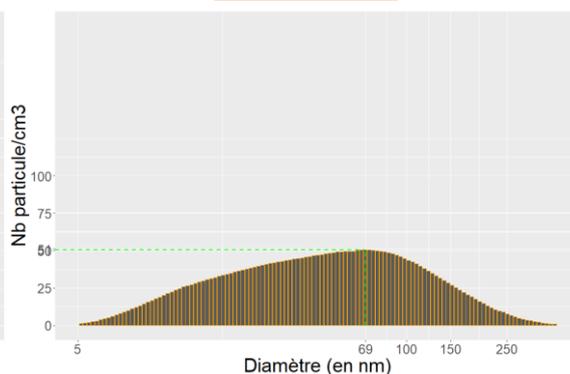


Figure 7 : Distribution granulométrique moyenne sur la région île-de-France pour l'hiver 2020-2021

Sur les sites urbains, les profils granulométriques font apparaître deux sources prédominantes de PUF : une première population majoritaire de particules ultrafines de diamètre compris dans la tranche 15 à 30 nm, caractéristique des PUF émises par le trafic routier, et une seconde population de diamètre compris entre 70 et 100 nm, en lien avec la combustion de biomasse, plus marquée sur les sites de Tremblay-en-France et Gennevilliers. La différence observée entre le site des Halles et les sites de fond périurbains s'explique essentiellement par l'utilisation du chauffage résidentiel au bois, plus marquée sur ces sites situés dans des zones résidentielles, avec le site Tremblay plus impacté que celui de Gennevilliers.

La variabilité de ces profils granulométriques sur les différentes périodes identifiées lors de la campagne confirme cette analyse, les particules comprises entre 70 et 100 nm devenant majoritaires lors des épisodes de combustion hivernale avec des périodes froides où le chauffage résidentiel est plus utilisé (Figure 8).

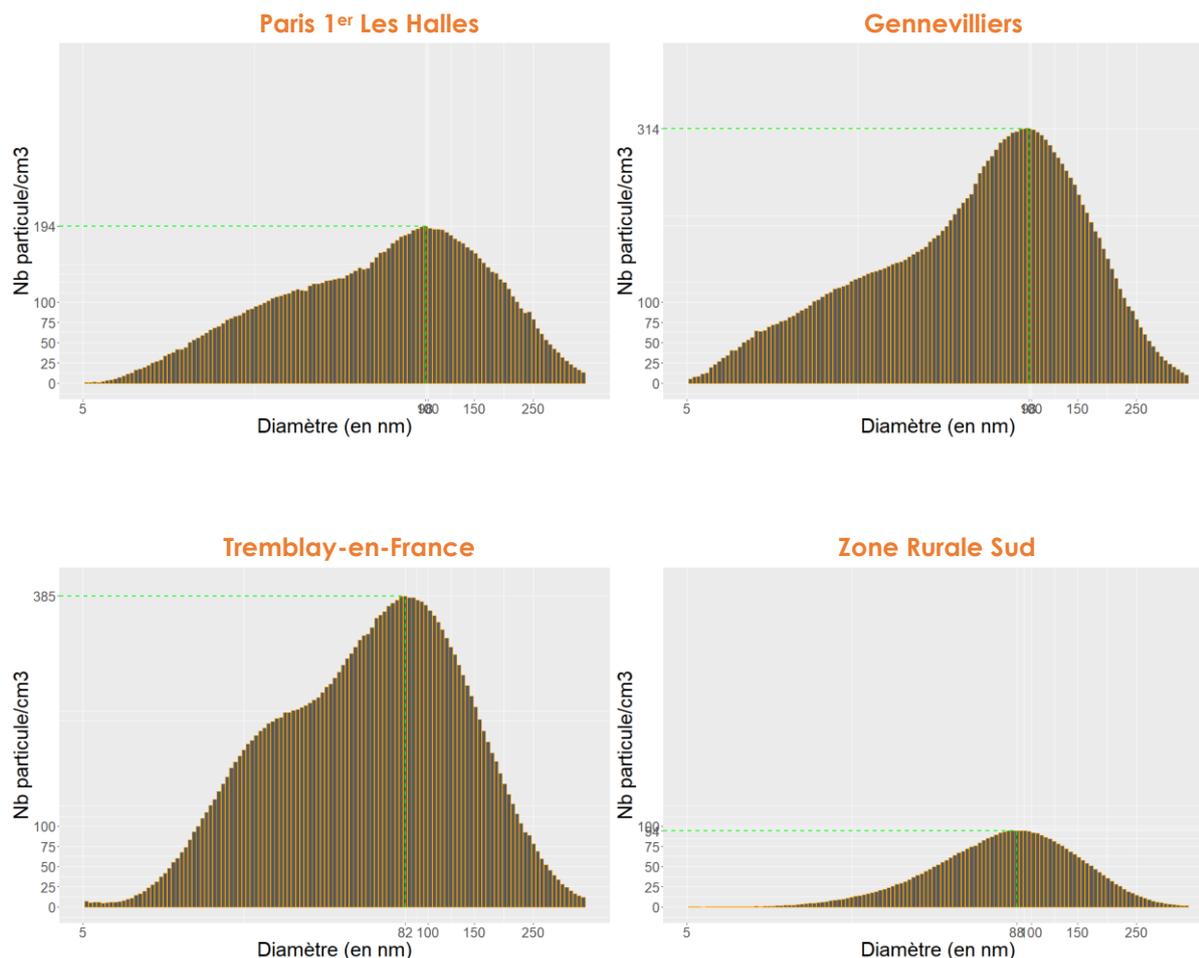


Figure 8 : Profils granulométriques d'un épisode de pollution de type combustion hivernale, le 2 janvier 2021.

L'analyse des périodes spécifiques rencontrées pendant la campagne de mesure a également permis d'illustrer des niveaux et des profils de référence hivernaux pour une journée de faible pollution. La journée du 22 décembre illustre l'impact d'une très bonne dispersion des émissions polluantes sur la zone urbaine. **Globalement sur cette journée, les sites de mesure enregistrent des concentrations 1.5 à 2 fois plus faibles que le nombre moyen de PUF sur la période complète, qui** caractérisent les niveaux minimum pouvant être observés sur la région Ile-de-France sur l'hiver 2020-2021. Les profils granulométriques associés à cette journée de référence sont présentés sur la Figure 9.

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

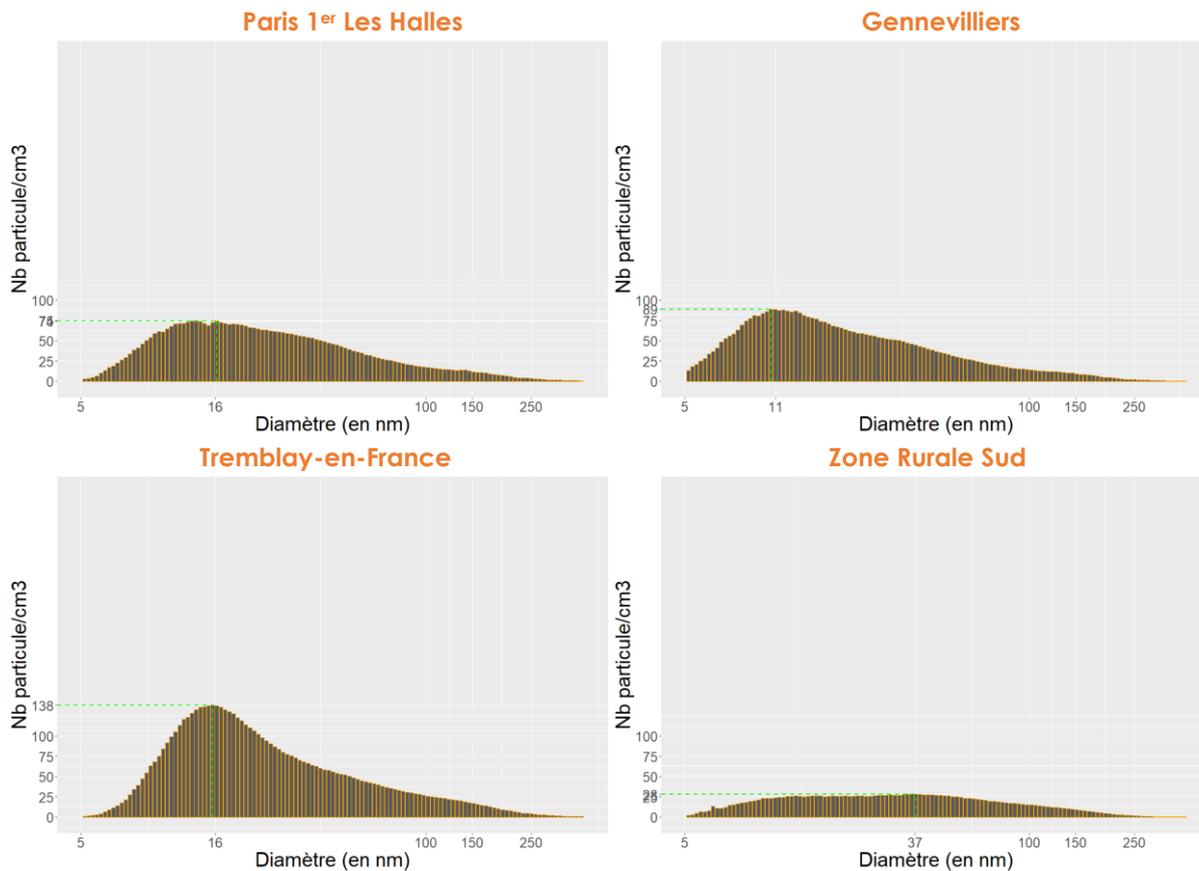


Figure 9 : Profils granulométriques de la journée la plus faible, le 22 décembre 2020.

Dans le cas d'une formation importante d'Aérosols Inorganiques Secondaires, une troisième population apparaît avec des particules inférieures à 10 nm, mais également des particules supérieures à 250 nm, formées par nucléation², comme par exemple sur le site de Gennevilliers (Figure 10). Cette population, difficile à distinguer des autres sources, sera étudiée plus avant dans des campagnes futures menées à des périodes plus propices à la formation de ces composés.

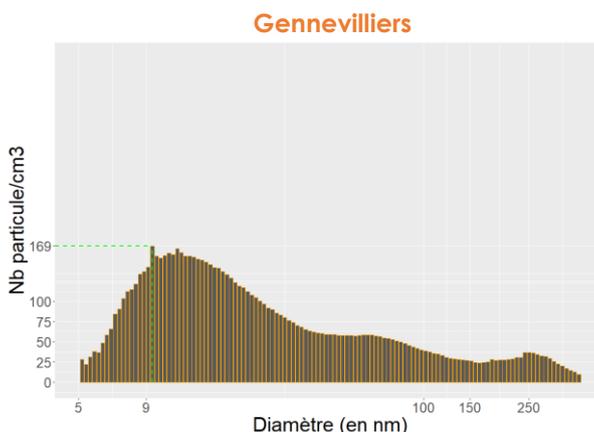


Figure 10 : Profils granulométriques d'une pollution de type formation d'aérosols inorganiques secondaires.

² La nucléation est le mécanisme de base de la formation des particules secondaire dans l'atmosphère. Les particules secondaires résultent de la conversion en particules, des gaz présents dans l'atmosphère. Cette conversion, soit directement gaz-solide, soit par l'intermédiaire des gouttes d'eau, est appelée nucléation.

Perspectives

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

Le programme d'étude se poursuit afin de répondre aux nombreuses questions qui demeurent sur ce sujet complexe :

- Quelle est la variabilité du nombre et du diamètre des PUF sur ces mêmes sites franciliens en période estivale, avec des contributions de sources très différentes, notamment bien moindre de la combustion de biomasse ? L'impact des Aérosols Inorganiques Secondaires sur les PUF pourra également être étudié en période printanière, propice à leur formation.
- Quels sont les niveaux à proximité immédiate des axes routiers ? aux abords proches des plateformes aéroportuaires ?
- Quelle est la variabilité fine des niveaux dans Paris intra-muros ?

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

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

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

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