

[🔗 Consulter le site AtmoSud](#)

DOSSIER THEMATIQUE

LES PARTICULES ULTRAFINES

Juin 2025

SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| Des particules nombreuses et variées à mieux connaître..... | 3 |
| CHAPITRE 1 : les PUF, Qu'est-ce que c'est ? Pourquoi et comment on les mesure ? | 4 |
| 1. Que sont les Particules Ultrafines ? | 4 |
| 2. Pourquoi mesurer les PUF ?..... | 6 |
| 3. Comment mesurer les PUF ?..... | 8 |
| 4. Ce qu'il faut retenir sur les PUF et leur surveillance | 11 |
| CHAPITRE 2 : Qu'en est-il en région Provence-Alpes-Côte d'Azur ?..... | 12 |
| 1. Quelle est la stratégie d'implantation ? | 12 |
| 2. Quels sont les niveaux moyen et maximal mesurés en air ambiant ?..... | 14 |
| 3. Comment évoluent les PUF dans les différents environnements ? | 19 |
| 4. Ce qu'il faut retenir des PUF en Provence Alpes-Côte d'Azur | 23 |
| CHAPITRE 3 : L'identification des sources en air ambiant par granulométrie | 25 |
| 1. Environnement urbain industriel | 25 |
| 2. Environnement urbain fond..... | 27 |
| 3. Environnement urbain trafic..... | 28 |
| 4. Environnement maritime | 28 |
| 5. Environnement aéroportuaire | 29 |
| 6. Ce qu'il faut retenir de l'identification des sources par granulométrie..... | 30 |
| CHAPITRE 4 : Les PUF en air intérieur | 31 |

| | |
|---|----|
| 1. Dans les enceintes ferroviaires souterraines (EFS)..... | 31 |
| 2. Dans le secteur résidentiel – Expérimentation chauffage bois | 32 |
| 3. Dans un bâtiment d’enseignement scolaire – Expérimentation epurateur d’air | 33 |
| 4. Ce qu’il faut retenir sur les PUF en air intérieur..... | 35 |
| Bibliographie | 36 |
| Annexe 1 : Évolution des concentrations journalières depuis 2015 | 38 |

Contact

Rédaction : Florence PÉRON – Mathieu IZARD

DES PARTICULES NOMBREUSES ET VARIEES A MIEUX CONNAITRE

Les particules fines en suspension ou aérosols suscitent un intérêt grandissant dans des domaines aussi variés que les sciences de l'atmosphère, la qualité de l'air, les sciences des matériaux et l'industrie. Dans les sciences de l'atmosphère, il est question d'étudier et de comprendre l'origine des aérosols et leurs impacts sur le climat terrestre. Concernant la qualité de l'air et les polluants associés, les objectifs sont de mesurer les niveaux d'exposition des populations aux particules fines, d'inciter à une réduction des émissions anthropiques¹ mais également de définir les facteurs relatifs à leur toxicité comme la concentration, la taille, la morphologie ou la composition chimique, afin d'évaluer leur impact sanitaire.

Les particules ou aérosols sont caractérisés par plusieurs paramètres physico-chimiques qui permettent de les caractériser, d'identifier leurs sources ou de détecter des phénomènes à l'origine de fortes concentrations en air ambiant. Différentes études toxicologiques et épidémiologiques ont montré l'importance des paramètres comme le nombre de particules, leur morphologie et leur composition chimique pour comprendre les mécanismes inhérents à la formation, la transformation et l'évolution des particules dans l'air, leurs impacts climatiques et leur toxicité.

Les propriétés des aérosols sont fortement liées à au diamètre aérodynamique des particules qui les compose. Ainsi, plusieurs méthodes et instruments ont été développés pour mesurer des concentrations en particules en fonction de leurs gammes de taille : mesures en nombre ou en masse par unité de volume. Ainsi, en matière de surveillance de la qualité de l'air, les valeurs réglementaires en air ambiant sont exprimées en concentration massique (essentiellement en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et concernent uniquement les particules PM10 et PM2.5 dont les diamètres aérodynamiques sont respectivement inférieurs à 10 μm et 2,5 μm .² Or plusieurs publications³ [1] soulignent la pertinence **sanitaire** d'une mesure de **concentration numérale plutôt que massique**. Cette approche permet d'intégrer les mesures des particules dites ultrafines (PUF) dont le nombre peut être très important malgré une masse négligeable par rapport des particules grossières.

C'est donc en raison de leur impact sanitaire que depuis quelques années, des mesures ponctuelles des Particules Ultrafines (PUF) sont réalisées en France par les AASQA. Ces évaluations se font sur le nombre de particules et visent à mieux connaître les origines et les sources de ces polluants émergents, en complément des polluants réglementés. Dans ce cadre défini, Atmosud développe un réseau de surveillance en continu des concentrations en nombre de particules ultrafines et réalise également des mesures granulométriques de PUF. Ce réseau régional de mesure est actuellement le plus dense de France.

Ce dossier thématique d'AtmoSud a vocation à présenter :

- un état des connaissances générales sur les PUF, leur composition, leurs mécanismes de formation et d'évolution, la méthodologie pour les mesurer, et leurs effets sanitaires connus ;
- un panorama sur la surveillance des PUF mise en place en région Sud, sur leur distribution géographique et leur dynamique ;
- les différentes sources d'émissions des PUF et les moyens métrologiques d'identification.

¹ Emission d'origine anthropique : liée à une activité humaine

² La réglementation européenne définit une Valeur limite annuelle pour la protection de la santé (VL) de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM10 et de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM2.5. La Valeur limite en moyenne journalière est de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM10 à ne pas dépasser plus de 35 jours par an.

³ https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749120302025?dgcid=rss_sd_all

CHAPITRE 1 : LES PUF, QU'EST-CE QUE C'EST ? POURQUOI ET COMMENT ON LES MESURE ?

1. QUE SONT LES PARTICULES ULTRAFINES ?

► Quelques précisions de vocabulaire

Plusieurs terminologies existent pour décrire les particules en suspension ou un aérosol, aussi rappelons quelques définitions :

- **Aérosol** : c'est un ensemble de particules, solides ou liquides, d'une substance chimique ou d'un mélange de composés chimiques, en suspension dans un milieu gazeux. Le terme particules, parfois utilisé pour définir un aérosol, est en effet un de ces constituants.
- **Particules de matière** : notées « PM » pour *Particulate Matter* en anglais, les particules sont classées selon plusieurs intervalles de taille (fractions) en raison de leur comportement aérodynamique. Par exemple, la fraction PM10 désigne les particules dont le diamètre aérodynamique de coupure est inférieur à 10 µm. Pour les PM2.5 et les PM1, le diamètre aérodynamique de coupure est respectivement inférieur à 2.5 µm et 1 µm.

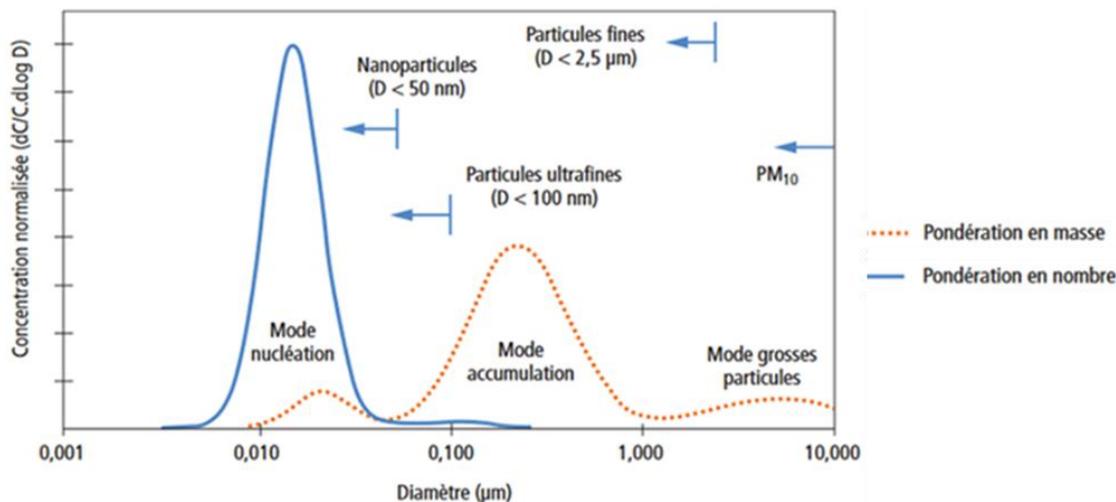
Entre deux fractions de particules, la concentration massique identique correspond à un nombre très différent de particules. Par exemple, la concentration massique d'une seule particule de 10 µm par cm³ équivaut à la concentration massique d'un milliard de particules (10⁶) de 0.1 µm de diamètre par cm³ (en considérant une densité unitaire). Ainsi les tailles des particules sont souvent réparties en trois catégories de particules :

- Les particules grossières désignent les particules microniques dont la contribution dans un aérosol atmosphérique est très importante en masse mais négligeable en nombre ;
- Les particules fines (PF) désignent les PM2.5 ou les PM1 (appelés également particules submicroniques). Leur contribution peut être à la fois importante en nombre et en masse ;
- Les Particules Ultrafines (PUF) : pour désigner les particules de diamètre aérodynamique inférieur à 100 nm⁴. Selon les sources et les conditions météorologiques, leur contribution peut être très importante en nombre avec une masse très négligeable.

Par ailleurs, les mesures granulométriques (répartition des particules selon la taille) en nombre ou en masse fournissent une classification des particules selon trois modes (Figure 1) :

- **Un mode nucléation** : concerne les particules initiées par des processus de conversion de la phase gazeuse à la phase particulaire. Leur diamètre est généralement inférieur à 0,1 µm (100 nm).
- **Un mode accumulation** : concerne les particules submicroniques formées par agglomération/agrégation de plusieurs particules du mode nucléation ou par condensation de composés gazeux sur ces mêmes particules du mode nucléation.
- **Un mode « grosses particules »** : concerne les particules de taille supérieure à 1 µm formées essentiellement par des processus mécaniques (érosion, frottement, ...)

⁴ Les particules ultrafines peuvent également être appelées nanoparticules. Il est communément admis d'employer le terme "nanoparticules" pour des particules intentionnellement produites (nanotechnologies), en opposition aux particules ultrafines, facteur de pollution (non intentionnellement produites).



Source Thèse ADEME/PSA - F. Collin - déc. 2000

Figure 1 : Distribution granulométrique type constatée derrière un véhicule diesel selon le nombre, la masse, F. Collin ⁵.

► D'où proviennent les PUF ?

Les particules ultrafines ou PUF sont des particules de diamètre aérodynamique inférieur à 100 nm, soit 0,1 µm. En raison de leur petite taille, leur comportement s'apparente à celui des gaz. Elles ont de nombreuses origines, aussi bien naturelles qu'anthropiques.

- Sources naturelles : Les fumées des incendies de forêt, les éruptions volcaniques, l'érosion éolienne ou encore la pulvérisation des embruns sont des sources naturelles [2].
- Sources anthropiques : Les PUF d'origine anthropique sont émises par les activités humaines, comme celles issues des processus de combustion (produits pétroliers, gaz, biomasse, tabac, cuissons...), des mécanismes d'usure (freins [3], pneus⁶, route [4], ...) ou celles liées à l'utilisation de certains équipements (cuisson électrique, imprimantes laser et 3D, etc..).

L'utilisation de nanoparticules dans différents produits (cosmétiques, alimentation, médicaments, peintures...) peut également en faciliter l'inhalation ou l'ingestion et donc l'exposition, notamment en air intérieur.

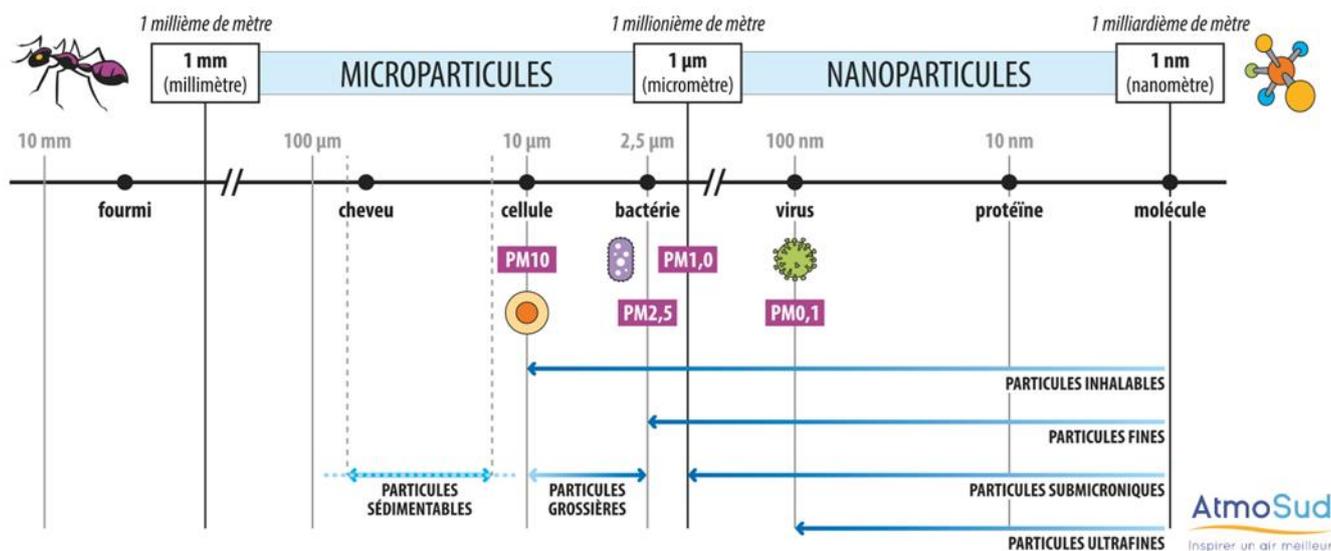


Figure 2 : Classification des particules par taille

⁵ F. Collin, Détermination des signatures granulométriques et chimiques de particules prélevées à l'échappement de moteurs Diesel et en atmosphère urbaine, Thèse ADEME - CNRS-LMR / PSA Peugeot Citroën, décembre 2000

⁶ Selon une enquête menée par un laboratoire indépendant (Emission Analytics pour l'association Agir pour l'environnement et publiée le 14/10/2024, entre 92,3% et 97,4 % de toutes les particules identifiées comme provenant de l'abrasion des pneus, font moins de 100 nanomètres.

Au-delà de la source naturelle ou non, les particules ultrafines sont définies d'origine primaire ou secondaire :

- Les particules primaires sont celles émises directement par la source, comme particules d'érosion, suies issues de la combustion de biomasse ou de matière fossile ...
- Les particules secondaires, elles, résultent d'une transformation : la matière à l'état gazeux passe à l'état solide par nucléation ou liquide par condensation. La nucléation peut être homogène, à partir d'une phase initiale gazeuse ou hétérogène sur des particules préexistantes. Le processus de nucléation homogène le plus commun implique l'acide sulfurique en raison de sa faible pression de vapeur saturante à des températures atmosphériques. D'autres précurseurs de nucléation, comme les ions, l'ammoniac, les composés organiques volatils (COV), les composés iodés, peuvent contribuer à la formation de PUF [5], dont les concentrations varient selon les environnements (marins, industriels, urbain, forestier).

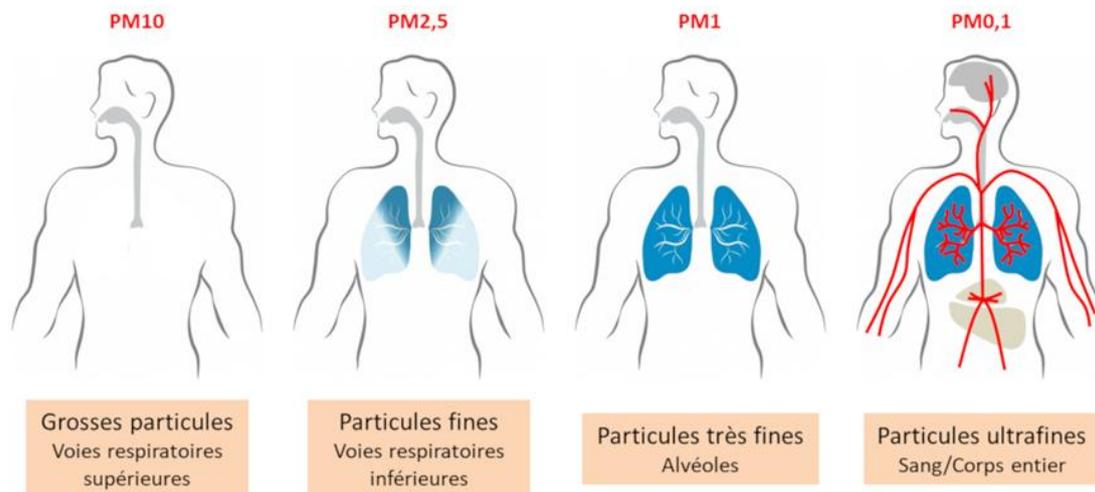
2. POURQUOI MESURER LES PUF ?

La question du suivi de ces minuscules particules s'impose, du fait de leur impact sanitaire mais également en raison de leur influence climatique. Les AASQA mènent depuis longtemps déjà des études, souvent à caractère ponctuel, mais le développement de la surveillance régulière des PUF à l'échelle nationale a nécessité de disposer d'éléments homogènes et comparables. En septembre 2020, le LCSQA a ainsi publié dans sa note technique « Stratégie de surveillance nationale de la concentration en nombre totale des particules (ultra) fines⁷ » des éléments d'orientation au sein du dispositif national, en cohérence avec les directives européennes.

► Un impact sanitaire et climatique évident qui justifie une surveillance...

L'impact sanitaire des particules dans l'organisme est d'autant plus grand que leur taille est petite, rendant davantage préoccupants les effets sanitaires des PUF. Une fois inhalées, les particules progressent dans l'appareil respiratoire et, selon leur taille, se logent plus ou moins profondément dans l'organisme.

Les PM₁₀, de la taille d'une cellule, limitent leur impact à l'appareil respiratoire supérieur alors que les PM_{2,5} plus petites, peuvent parvenir jusqu'aux alvéoles pulmonaires et engendrent des problèmes cardio-vasculaires et neurologiques. Comme l'indique Isabella Annesi-Maesano (IHU Immun4Cure, Montpellier, France), les PUF ont une « surface spécifique élevée, ce qui augmente leur capacité à transporter des substances toxiques » [6].



source : ©encyclopédie de l'environnement

Figure 3 : pénétration des particules dans l'appareil respiratoire

De la même taille qu'un virus, elles pénètrent profondément dans les poumons et peuvent ainsi, en passant dans le sang et atteindre d'autres organes, entraînant des conséquences sanitaires au-delà des **affections respiratoires chroniques** (inflammation pulmonaire, aggravation de l'asthme et diminution de la fonction respiratoire notamment chez les enfants et les personnes âgées) et **cardio-vasculaires** (agrégation plaquettaire, athérosclérose et troubles du rythme cardiaque).

⁷ Stratégie de surveillance Nationale des PUF, Note Technique LCSQA -Septembre 2020

Mais la toxicité des PUF est d'autant plus importante qu'elles peuvent franchir la barrière hémato-encéphalique, celle qui protège le cerveau des substances toxiques et des micro-organismes pathogènes, et ainsi toucher le **système nerveux central** (déclin cognitif, troubles neurodégénératifs) [6].

L'impact climatique des particules est notamment lié à leur interaction directe avec le rayonnement solaire. Leur présence modifie le bilan radiatif terrestre⁸ par leur capacité à jouer le rôle de noyaux de condensation pour les gouttelettes de nuage. Par ailleurs, les réactions photochimiques peuvent influencer la capacité oxydante de l'atmosphère via la formation/destruction d'ozone (O₃) et des composés radicalaires (ex. le radical hydroxyle OH⁹).

► ...mais pas de seuil sanitaire encore défini

Malgré un impact sanitaire incontesté en cohérence avec leur petite taille, aucune valeur réglementaire pour les PUF existe en raison d'un nombre insuffisant de données.

Le développement des mesures de PUF participe donc à la constitution d'un recueil d'informations et d'observations conséquent et statistiquement robuste pour établir des recommandations sur les niveaux à ne pas dépasser. Néanmoins, dans un relevé de bonnes pratiques [7], l'OMS évoque des concentrations considérées comme hautes et basses à l'échelle horaire et journalière (Tableau 1), sans toutefois préciser l'intervalle de tailles de particules auquel il se réfère.

Tableau 1 : concentrations identifiées par l'OMS dans les lignes directrices relatives à la qualité de l'air (2021).

| Concentration moyenne en particules/cm ³ | Valeur basse | Valeur haute |
|---|--------------|--------------|
| Sur 24 heures | < 1 000 | > 10 000 |
| Sur 1 heure | - | 20 000 |

Le LCSQA [8] a également établi des valeurs de comparaison pour différentes typologies à partir des données de campagnes des stations françaises et européennes (Tableau 2). Notons, que les données présentées sont issues de matériels qui mesurent dans des intervalles gammes de tailles de particules différents (Europe : 90 % dans un intervalle [3 nm-1 µm] / France : 50 % dans chacun des intervalles [7 nm-2.5 µm] et [20-500 nm]).

Tableau 2 : Concentrations moyennes, minimales et maximales dans les campagnes de mesures à l'échelle française ou européenne (2021) [8].

| Concentration en particules/cm ³ | Valeur moyenne | | Valeur maximale | | Valeur minimale | |
|---|----------------|------------|-----------------|------------|-----------------|------------|
| | française | européenne | française | européenne | française | européenne |
| Fond rural | - | 1 500 | - | 7 000 | - | 8 |
| Fond urbain | 7 700 | 9 800 | 12 300 | 59 000 | 5 100 | 600 |
| Trafic | 9 700 | 19 500 | 14 900 | 70 000 | 7 600 | 4 000 |

► Conclusion sur l'intérêt de surveiller les PUF

Les valeurs réglementaires des PUF ne sont pas encore définies car les données épidémiologiques sont encore limitées et les effets sanitaires dépendent de plusieurs paramètres comme la composition chimique, la source et l'exposition.

Néanmoins, de nombreuses études expérimentales révèlent une toxicité potentielle élevée, montrant la nécessité d'une prise en compte dans les politiques de santé publique.

⁸ Le bilan radiatif terrestre est le résultat de la différence entre l'énergie reçue (essentiellement provenant du Soleil) et perdue (absorption par l'atmosphère le sol et les océans et réflexion (albédo) par le système climatique

⁹ Le radical hydroxyle (OH) est une molécule chimique formée d'un atome d'hydrogène et d'oxygène, issu de l'action des rayons ultraviolets sur l'ozone (O₃) en présence de vapeur d'eau (H₂O). Il a un fort pouvoir oxydant qui, du fait de grande réactivité, dégradent de nombreux gaz par réactions chimiques.

3. COMMENT MESURER LES PUF ?

Deux grands types de matériel existent actuellement pour mesurer les PUF :

- les compteurs à noyaux de condensation (CNC) pour enregistrer la concentration totale en nombre,
- les spectromètres de granulométrie à mobilité électrique (SMPS) qui sont équipés d'un système de séparation par classe de taille et d'un système de comptage (CNC ou électromètre) pour déterminer la distribution en nombre des particules.

► Des analyseurs différents pour une meilleure connaissance des PUF

Dans l'état actuel des possibilités technologiques, métrologiques et commerciales, la mesure¹⁰ de la concentration totale en nombre des particules fines à l'aide de CNC est à privilégier afin de garantir une homogénéité et faciliter une comparaison nationale. Toutefois, pour des besoins d'études ponctuelles, le recours au SMPS est possible pour obtenir le détail de la distribution statistique des tailles particules sur les gammes de mesures prises en compte.

AtmoSud a débuté la surveillance des PUF dès 2015 et, en dix ans, a eu recours à plusieurs types d'analyseurs pour la surveillance de la qualité de l'air ambiant et intérieur. Les CNC implantés en zone industrielle répondent à la norme CEN/TS 16976 préconisée par le GT des AASQA piloté par le LCSQA. Ce réseau automatique est complété par d'autres compteurs, des spectromètres de granulométrie à mobilité électrique.

L'ensemble des matériels est présenté dans le Tableau 3.

Tableau 3 : appareils de mesure de PUF utilisés par AtmoSud

| Mesure | Compteur à noyaux de condensation CNC | Spectromètres de granulométrie à mobilité électrique SMPS/ CNC | | |
|---|--|--|------------------------------|---|
| | Concentration totale en nombre | Distribution en nombre par taille | | |
| Appareil | PUF – CPC | 3031 TSI – jusqu'en 2022 | SMPS | Grimm Mini-Wras |
| Décomposition des particules | - | Mobilité électrique | Mobilité électrique | Mobilité électrique |
| Système de comptage | CPC | CPC | CPC | Électromètre |
| plages de mesure | 7 et 2500 nm 7 et 1000 nm 10 et 1000 nm | 20 – 500 nm via 6 canaux 10 – 385 nm | 10 – 700 nm via 64 canaux | 10–193 nm (électrique) 253 nm–35.15 µm (optique) via 41 canaux |
| Implantation | zone industrielle, zone urbaine, zone rurale, Aéroport, Port. | zone urbaine | zone urbaine | Campagnes de mesures intérieures |
| Appareil homologué à surveillance par les AASQA en air ambiant (norme CEN/TS 16976) | oui | non | non | non |

La Figure 4 permet de mieux identifier les différentes gammes de taille des particules mesurées.

¹⁰ selon la norme CEN/TS 16976

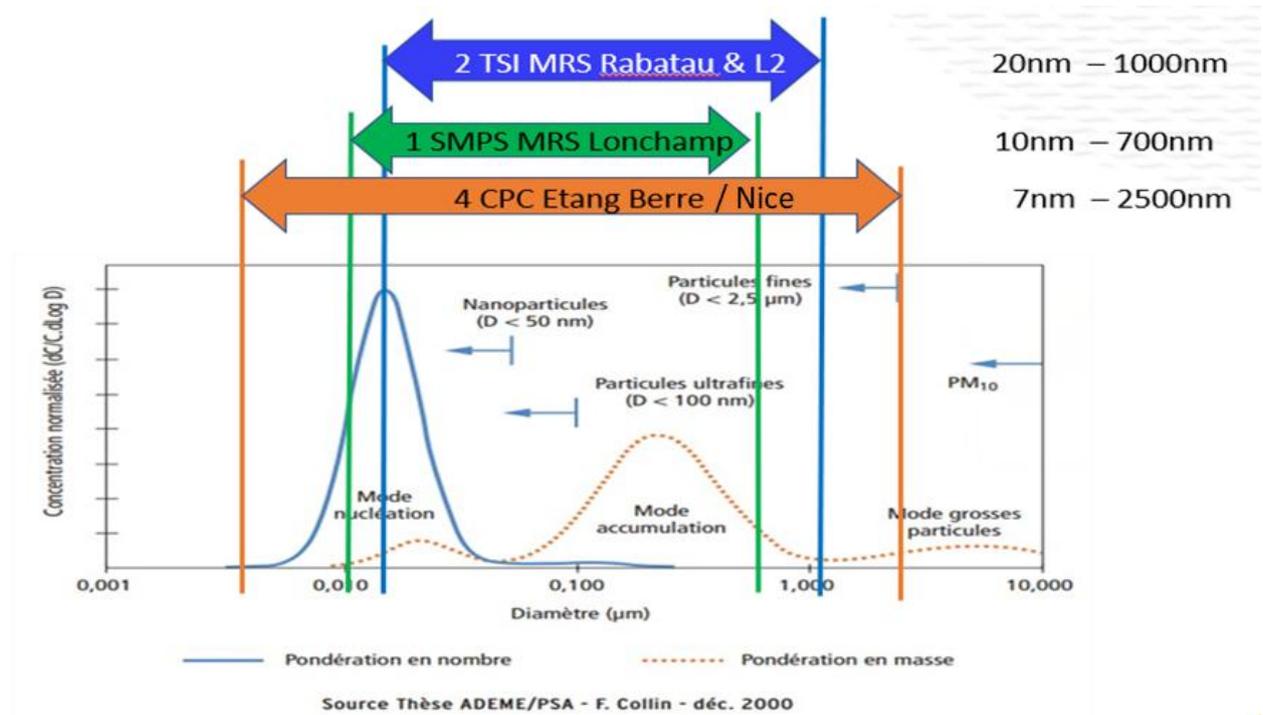


Figure 4 : Contribution des particules dans la masse et dans le nombre, selon la frange granulométrique des 3 types de matériels AtmoSud

Selon les caractéristiques des systèmes, ces appareils permettent de mesurer des gammes de tailles de particules différentes, et donc impliquent des résultats en nombre de PUF difficilement comparables d'un appareil à l'autre : un matériel réalisant des mesures sur une gamme de 7 nm à 1 µm comptabilise un nombre significativement plus important de particules qu'un matériel fonctionnant sur la gamme 10 nm à 1 µm.

Ainsi, selon les matériels et la gamme de mesure, tout ou partie du mode de nucléation est pris en compte. En revanche, tous les analyseurs mesurent bien le « mode accumulation ».

Ces matériels ont également des limites supérieures différentes entre eux mais, le nombre de particules supérieures à 1 µm étant quasi nul (courbe bleue, Figure 4), cela n'a que très peu d'influence sur les concentrations en nombre. Ce résultat est également observé dans d'autres études [9] et confirmé par la distribution granulométrique, avec un nombre de particules 1000 fois plus petit au-delà de 500 nm [Figure 5].

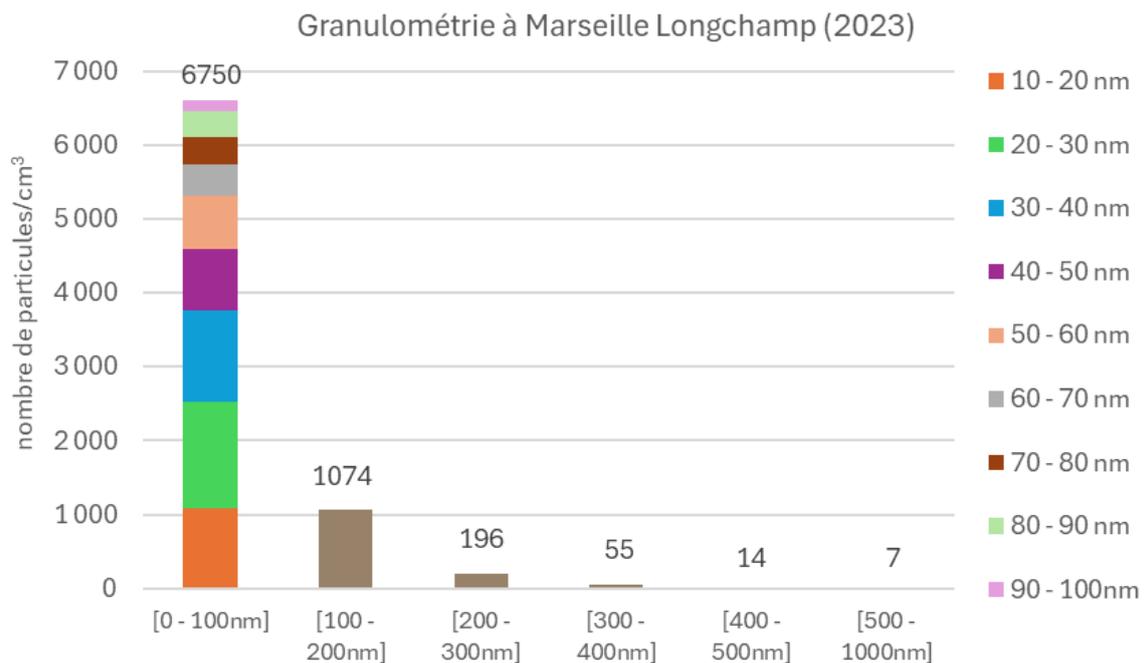


Figure 5 : Evolution du nombre de PUF selon leur taille granulométrique à Marseille Longchamp en 2023

En revanche pour la limite inférieure, le nombre de particules est plus variable et des comparaisons sont nécessaires pour déterminer l'influence des divers seuils bas de tailles de particules.

Pour cela, AtmoSud a procédé à des campagnes d'intercomparaison entre deux compteurs de particules mesurant dans des gammes différentes (Figure 6) :

- Une comparaison a été menée à Port-de-Bouc en 2018 sur une cinquantaine de jours entre les intervalles [20 nm – 1 µm] et [7 nm-2,5 µm]. Les résultats indiquent une corrélation correcte (65 %) mais une moyenne dans l'intervalle [7 nm-2,5 µm] supérieure de 66% à celle de l'intervalle [20 nm – 1 µm]. Cette différence s'explique par la prise en compte des particules de diamètre compris entre 7 nm et 20 nm.
- Une seconde campagne comparative s'est déroulée sur une douzaine de jours à l'aéroport de Nice (2024) entre les intervalles [7 nm – 2,5 µm] et [10 nm-1 µm]. Avec une excellente corrélation (99 %), la moyenne dans l'intervalle [10 nm-1 µm] est inférieure de 18 % à celle de l'intervalle précédent [7 nm-2,5 µm], et cohérent avec l'absence de prise en compte des particules de diamètre compris entre 7 nm et 10 nm. Cet abaissement de la moyenne est du même ordre de grandeur que les estimations faites au niveau national, évaluant à environ 25% ce changement d'intervalle de mesure.

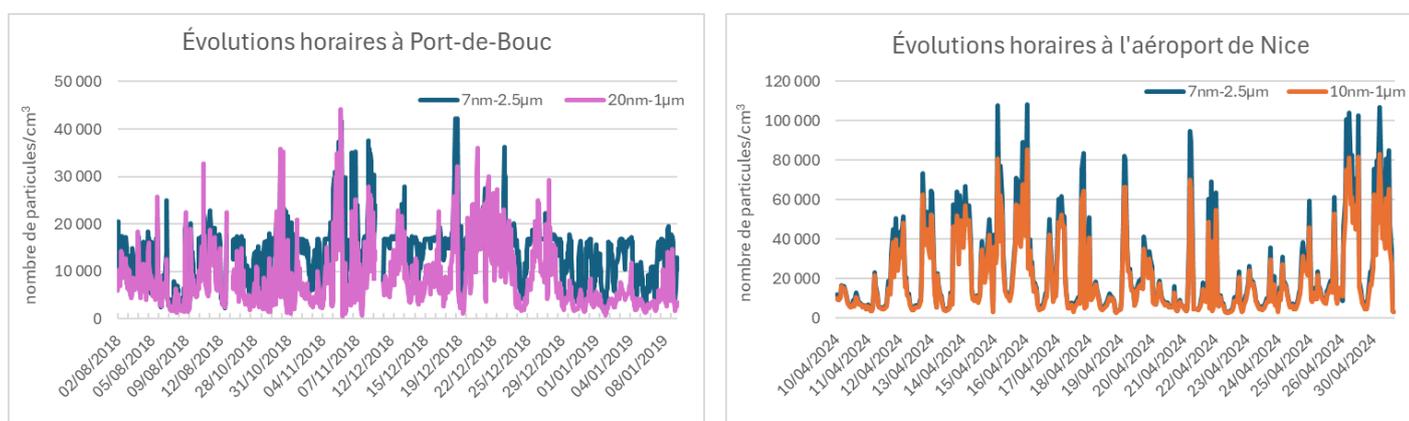


Figure 6 : Comparaison des mesures de PUF selon les intervalles à Port-de-Bouc en 2018 et à l'aéroport de Nice en 2024

► 2023, choix d'une référence métrologique nationale

Malgré la nécessité de surveillance des PUF, la diversité métrologique restait un frein à une évaluation homogène au niveau national et européen. Ainsi, en 2023, les recommandations nationales désignent l'intervalle [10 nm-1 µm] comme référence pour la mesure des PUF. Ce choix, motivé pour une harmonisation européenne, fait écho à la directive européenne sur la qualité de l'air adoptée en octobre 2024.

► Conclusion sur la mesure des PUF

En l'absence de réglementation, la surveillance a été réalisée dans une pluralité d'intervalles de mesure, avec des limites supérieures et inférieures différentes selon les études.

Malgré cette complexité pour une comparaison de celles-ci, des mesures granulométriques réalisées par SMPS confirment que les variations métrologiques de la limite supérieure n'ont pas d'impact sur le nombre de particules au-delà d'1 µm, voire 500 nm. Ce n'est pas le cas pour la limite inférieure, située autour du mode de nucléation et dont la prise en compte totale ou partielle influe sur le nombre total de PUF.

Les comparaisons réalisées sur les différents intervalles sont cohérentes avec les estimations réalisées au niveau national et montrent que l'exploitation des séries de mesures historiques par l'application de coefficients peut se faire avec un niveau de confiance adaptée à l'intervalle.

Pour des raisons d'uniformité à l'échelle européenne, l'intervalle de mesure [10 nm-1 µm] a été choisi en 2023 comme référence de mesure nationale. Il s'aligne ainsi avec celui précisé dans la directive européenne sur la qualité de l'air, adoptée en octobre 2024, dont la transposition en droit français est attendue fin 2026.

4. CE QU'IL FAUT RETENIR SUR LES PUF ET LEUR SURVEILLANCE

La mesure des PUF en air ambiant a débuté il y a une dizaine d'année.

La masse des particules ultrafines est tellement faible qu'elle n'affecte pas les mesures basées sur la concentration massique (PM10 et PM2.5) et leur mesure en nombre s'impose.

Comme pour tout polluant nouvellement étudié, les normes et les règles se définissent et évoluent au cours du temps. Jusqu'en 2023, il n'existait pas de recommandations métrologiques. Ainsi, les gammes de tailles de particules prises en compte dépendaient des capacités de chaque analyseur. Au regard des écarts notables de concentrations observées entre différentes gammes de taille (plus particulièrement sur le seuil inférieur de taille), il a été nécessaire de déterminer un intervalle homogénéisé à l'échelle nationale. Ce fut le cas en 2023, par le choix de l'intervalle [10 nm-1 µm] comme référence.

AtmoSud a mis en place des études d'évaluation de l'impact de ce changement d'intervalle de taille qui s'avèrent cohérentes avec les estimations faites au niveau national. Ainsi, il est possible de reconstituer les données de mesures historiques dans l'intervalle de référence [10 nm-1 µm] afin de suivre l'évolution des concentrations avant et après 2023 et garantir le maintien de l'historique d'AtmoSud.

CHAPITRE 2 : QU'EN EST-IL EN REGION PROVENCE-ALPES-COTE D'AZUR ?

1. QUELLE EST LA STRATEGIE D'IMPLANTATION ?

► 10 ans de mesures et le réseau de surveillance régionale des PUF le plus conséquent de France

En 2015, les premières mesures de PUF sont effectuées sur le site urbain de fond de Marseille Longchamp, puis à Port-de-Bouc. Au cours des années, et avec des évolutions météorologiques, le nombre de sites augmente, que ce soit par campagne temporaire ou sur des stations permanentes.

Ainsi, l'évaluation des PUF a été faite sur un total de **17 points de mesures** et dans **différents environnements** et a concerné différentes gammes de tailles de particules (Figure 7).

Cet ambitieux réseau de mesures couvre en effet l'ensemble des typologies, du site rural faiblement exposé, aux sites d'intérêts spécifiques comme les aéroports, les ports ou les zones industrielles en passant par les sites urbains.

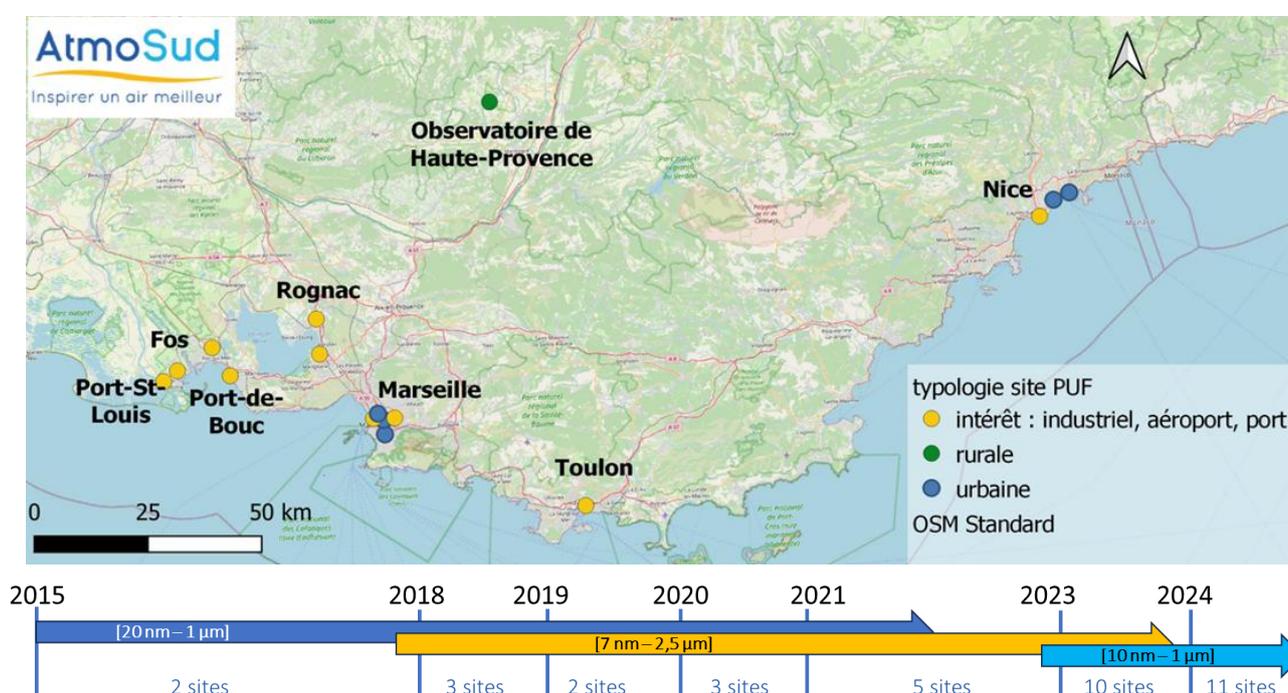


Figure 7 : Evolution et localisation des sites de mesures de PUF en région Provence-Alpes-Côte d'Azur

En 2025, AtmoSud gère le réseau de surveillance des PUF le plus important en France (Erreur ! Source du renvoi introuvable. Tableau 4) qui comprend une **dizaine de sites** dont sept stations de mesures permanentes, répartis entre la zone de l'Etang de Berre, Marseille et Nice, et complétées par des campagnes spécifiques.

Les données sont disponibles en ligne pour chaque site de mesure¹¹.

Tableau 4 : nombre de sites permanents mesurant les PUF dans les AASQA (mai 2025)

| AASQA | Air Breizh | Air Pays de la Loire | Airparif | Atmo Auvergne Rhône-Alpes | Atmo Bourgogne Franche-Comté | Atmo Grand Est | Atmo Hauts-de-France | Atmo Normandie | Atmo Nouvelle Aquitaine | Atmo Occitanie | AtmoSud | Ligair | Qualitair Corse |
|---|------------|----------------------|----------|---------------------------|------------------------------|----------------|----------------------|----------------|-------------------------|----------------|----------|----------|-----------------|
| Site fixe avec mesure de PUF / accès en ligne | 1 Non | 0 Non | 1 Non | 3 Oui | 0 Non | 1 Oui | 1 Non | 0 Non | 4 Oui | 2 Non | 7 Oui | 2 Non | 1 Non |

¹¹ <https://www.atmosud.org/dataviz/mesures-aux-stations>

► Une surveillance en air ambiant qui privilégie les bassins de forte population

En cohérence avec la stratégie nationale de surveillance des PUF et en intégrant les spécificités et besoins locaux de la région, AtmoSud équipe des sites dans différents environnements :

- En zone urbaine, sur des sites disposant de mesure réglementaire du NO₂ et si possible de la spéciation chimique des particules¹², afin de recueillir davantage d'informations sur l'air que respire la population au quotidien ;
- En zone rurale, sur des sites moins impactés par les sources de pollution, pour définir des niveaux de référence de fond ;
- En zone d'intérêt en raison de sources spécifiques de type Industrie¹³, transport maritime¹⁴, transport aérien¹⁰, et également des sites temporaires lors de campagnes ponctuelles. L'objectif est d'identifier des niveaux en lien avec ces sources de les comparer aux valeurs urbaines de fond et améliorer la connaissance des niveaux des PUF dans différents points du territoire.

► Des campagnes de mesure aussi en air intérieur

En air intérieur, depuis 2003, l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur réalise des campagnes de mesures nationales représentatives des parcs de bâtiments français dans des logements, écoles et bureaux. Dans ces grandes campagnes de mesure, les particules ultrafines n'ont été intégrées que dans la Campagne Nationale Bureau.

AtmoSud s'oriente également vers des campagnes dans des environnements intérieurs différents pour mettre en évidence des facteurs d'impact sur les concentrations en PUF. Ainsi des campagnes de mesure ont été menées :

- Dans des enceintes ferroviaires souterraines pour évaluer l'impact potentiel du déplacement du matériel roulant, des activités sur les quais et de l'air ambiant sur les concentrations intérieures en PUF ;
- Pour la mise en évidence de l'impact du chauffage bois sur les PUF à l'intérieur d'un logement ;
- Pour la mise évidence de l'efficacité de systèmes d'épuration d'air intérieur sur les concentrations de PUF.

Les données sur l'air intérieur sont regroupées dans le Chapitre 4.

► Conclusion sur la stratégie d'implantation en Provence-Alpes-Côte d'Azur

La surveillance des PUF en région Provence-Alpes-Côte d'Azur a débuté en 2015, disposant d'un historique important. Elle s'est renforcée au fil des années pour devenir le réseau le plus conséquent de France avec en 2025 une dizaine de sites de mesures dont 7 permanents.

Le dispositif déployé en région a consisté, en cohérence avec la stratégie nationale, à équiper les zones urbaines pour mieux connaître l'exposition des populations, la zone rurale pour identifier le niveau de fond et les nombreuses zones d'intérêts en région Sud, comme le pourtour industrialisé de l'Étang de Berre, les ports et les aéroports, grands émetteurs de PUF.

L'environnement intérieur a également fait l'objet de plusieurs campagnes de mesures depuis 2003 pour y étudier l'impact de nos activités, sachant que nous passons plus de 80 % de notre temps dans des locaux fermés.

¹² Le site de Marseille Longchamp dispose d'un appareil avec une métrologie différente pour la spéciation chimique des particules (ASCM), actuellement non recommandée par le LSCQA. Il a déjà fait l'objet en 2018 de mesure de PUF [9] (nombre de particules et granulométrie) dans la gamme : 20 nm - 1000 nm

¹³ Déploiement dans le cadre du « programme industriel d'AtmoSud », les études SCENARII [10] et POLIS [11] ont montré dans la zone de l'Étang de Berre, la présence de sources d'émissions à proximité des lieux d'habitation et de bassins de population, potentiellement impactés par la typologie et la fréquence des vents [12]

¹⁴ AtmoSud a mené au cours des dernières années des investigations portant sur l'impact des activités portuaires et aéroportuaires sur la qualité de l'air, à travers ses programmes « Port » et « Aéroport » [13, 14].

2. QUELS SONT LES NIVEAUX MOYEN ET MAXIMAL MESURES EN AIR AMBIANT ?

► Évolution du nombre journalier de particules depuis 2015

L'ensemble des mesures réalisées depuis 2015 est représenté en Figure 8, quel que soit l'intervalle de mesure (analyse en détail en Annexe 1).

Les évolutions montrent des variations conséquentes selon le type de sites, dont certains affichent des valeurs maximales élevées, en lien avec les sources présentes dans leur environnement.

Ces mesures constituent une base de données essentielle en raison de la pluralité des environnements étudiés et les données acquises suivant des séquences de mesure suffisamment longues pour une estimation robuste d'une valeur moyenne annuelle, permettent de caractériser chacun d'eux.

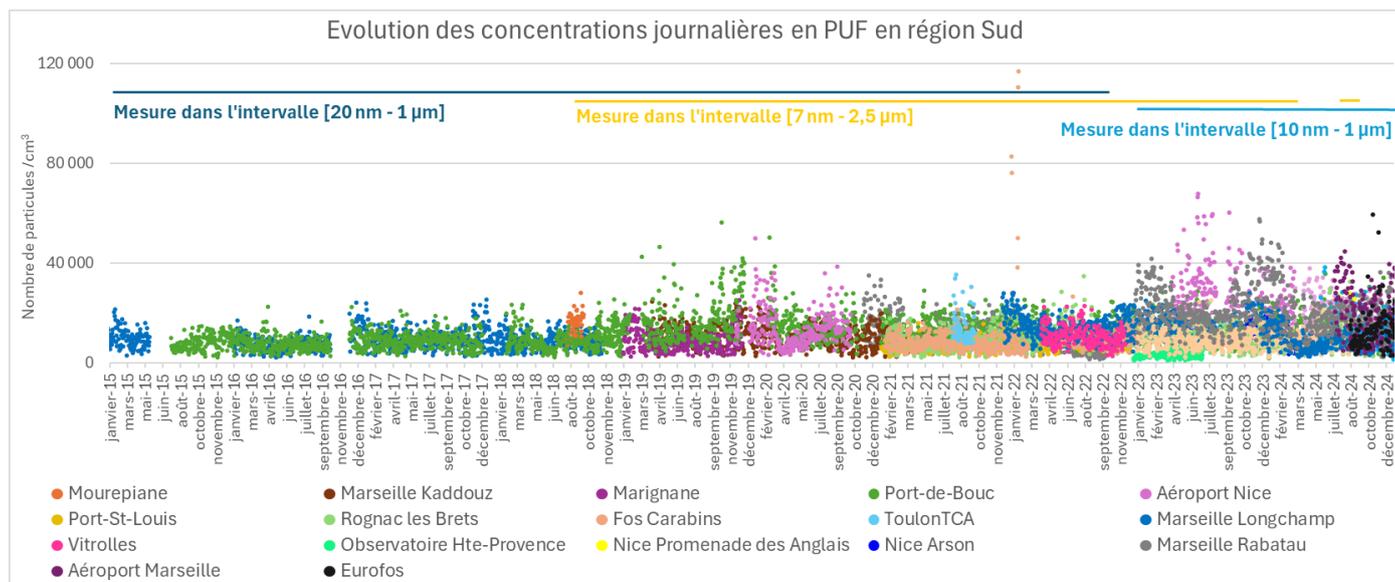


Figure 8 : Evolution des concentrations journalières en PUF sur l'ensemble des sites depuis 2015 en région Provence-Alpes-Côte d'Azur

► Nombre de particules moyen annuel selon les environnements

Les niveaux moyens présentés dans ce document sont basés sur les mesures réalisées en 2024, dans l'intervalle de référence [10 nm-1 µm]. Pour les environnements dont les mesures ont été réalisées avant cette date (dans un intervalle autre que la référence actuelle), un coefficient a été appliqué aux niveaux moyens. Le changement d'intervalle de mesure de [7 nm-2.5 µm] à [10 nm-1 µm] a été identifié par des études comparatives locales et confirmé au niveau national par un abattement du nombre de particules/cm³ d'environ 25 %.

La Figure 9 présente les niveaux moyens annuels selon les différents types d'environnements investigués.

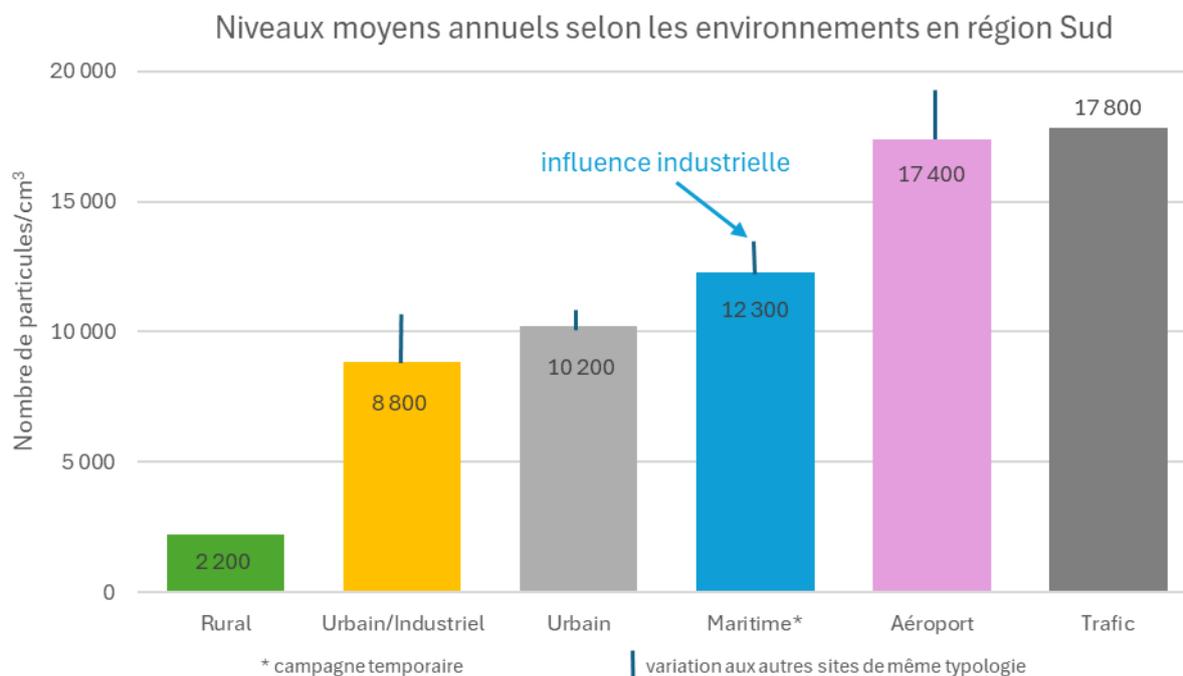


Figure 9 : Niveaux moyens annuels du nombre de particules ultrafines en région Provence-Alpes-Côte d'Azur (2024).

Le nombre de particules moyen le plus faible est relevé en zone rurale, autour de 2 200 particules/cm³. Cette concentration en particules augmente pour les sites où les sources sont plus nombreuses et/ou plus proches du point de mesure.

En effet, dans les villes moyennes du pourtour de l'Étang de Berre (situation urbaine sous influence industrielle, en jaune), les niveaux sont inférieurs à ceux des grandes métropoles Marseille et Nice (en gris clair) qui dépassent 10 000 particules/cm³ et pour lesquelles les sources sont plus nombreuses. **Ainsi le niveau moyen de PUF en milieu urbain est 5 fois plus élevé qu'en milieu rural.**

Le nombre de particules est également plus élevé avec la proximité des sources, qu'elles soient portuaires (bleu), aéroportuaires (violet) ou issues du trafic routier (gris foncé). Le cumul des sources, comme c'est le cas avec une campagne en environnement maritime, entraîne une hausse de la concentration. **Ainsi, le niveau des PUF dans les ports est 6 fois plus élevé qu'en milieu rural.**

Le nombre de particules le plus élevé est observé en milieu urbain en proximité du trafic routier et en contexte aéroportuaire. **Le niveau dans les aéroports et en proximité du trafic, routier et maritime, est 10 fois supérieur au niveau rural.**

En situation urbaine, il existe un facteur 2 entre le niveau de fond et le niveau de proximité trafic ou aéroport.

► Tendence depuis 2015

Le site de Port-de-Bouc est le seul à disposer d'un historique continu de mesures depuis 2015, permettant de suivre l'évolution des niveaux de PUF sur 10 ans.

Afin de s'affranchir des évolutions météorologiques successives, les mesures ont toutes été ajustées à l'intervalle de référence [10 nm-1 µm] par l'application de coefficients adaptés à l'intervalle, issus des études d'intercomparaison (Chapitre 1, §3).

En 10 ans, les variations de niveaux sont importantes mais aucune tendance claire ne se dégage (Figure 10). Les évolutions observées semblent davantage conjoncturelles, notamment avec la baisse entre 2020 et 2022, attribuée à la crise COVID et ses conséquences sur le transport et l'activité industrielle, puis une remontée des niveaux à partir de 2023, en lien avec la reprise d'un fonctionnement d'avant pandémie.

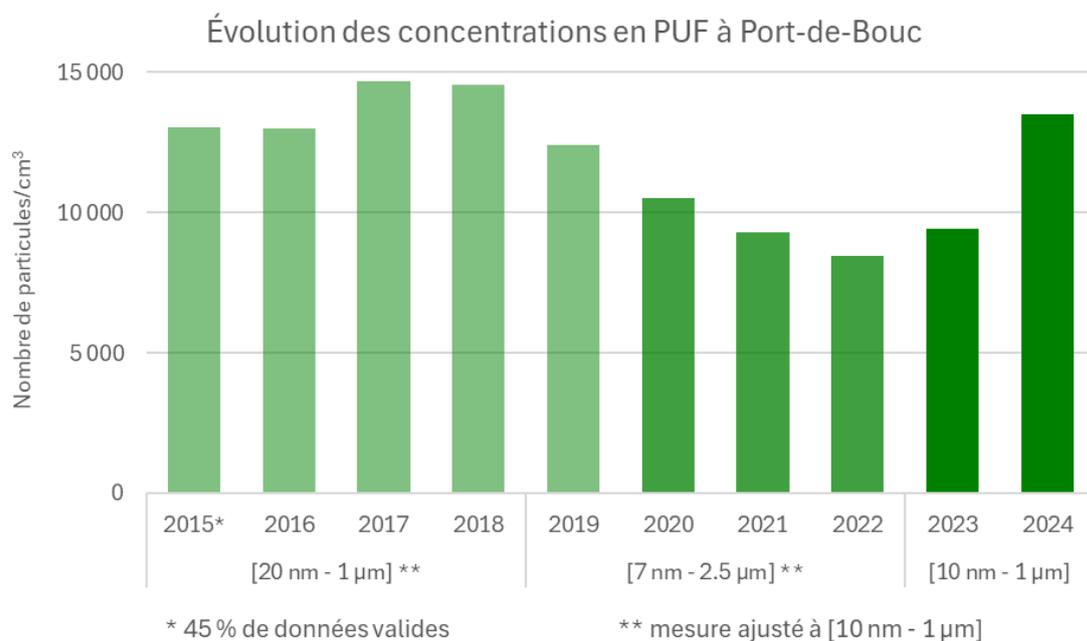


Figure 10 : Évolution des concentrations annuelles de PUF à Port-de-Bouc depuis 2015

Ces éléments convergent vers la poursuite de la surveillance afin de construire un socle solide de données de mesures.

► Nombre de particules maximal annuel selon les environnements

Pour les concentrations maximales, le milieu rural reste celui dans lequel les niveaux sont les plus faibles, y compris pour le maximum horaire à l'échelle annuelle (15 000 particules/cm³), mais le classement des autres types d'environnements est différent, car les fortes teneurs ponctuelles sont principalement influencées par les sources de proximité (Figure 11).

Ainsi, l'environnement urbain de fond (gris clair), dans les grandes agglomérations, comprend uniquement les sources urbaines. En revanche, l'environnement urbain/industriel (jaune) intègre celui des villes moyennes situées autour de l'Étang de Berre, où les sources urbaines sont moindres mais associées à un apport industriel, à l'origine des fortes concentrations ponctuelles.

De même, lorsqu'une source industrielle s'ajoute au maritime (en bleu), le nombre de particules augmente.

En proximité trafic (gris foncé), les sources sont plus proches qu'en situation urbaine de fond (gris clair) et les niveaux sont plus élevés.

Enfin, c'est dans les aéroports que le nombre maximal de particules est enregistré pouvant ponctuellement dépasser 200 000 particules/cm³, car le trafic aérien est une source importante de PUF, et actuellement le meilleur traceur pour identifier cette activité.

Niveau maximal annuel selon les environnements en région Sud

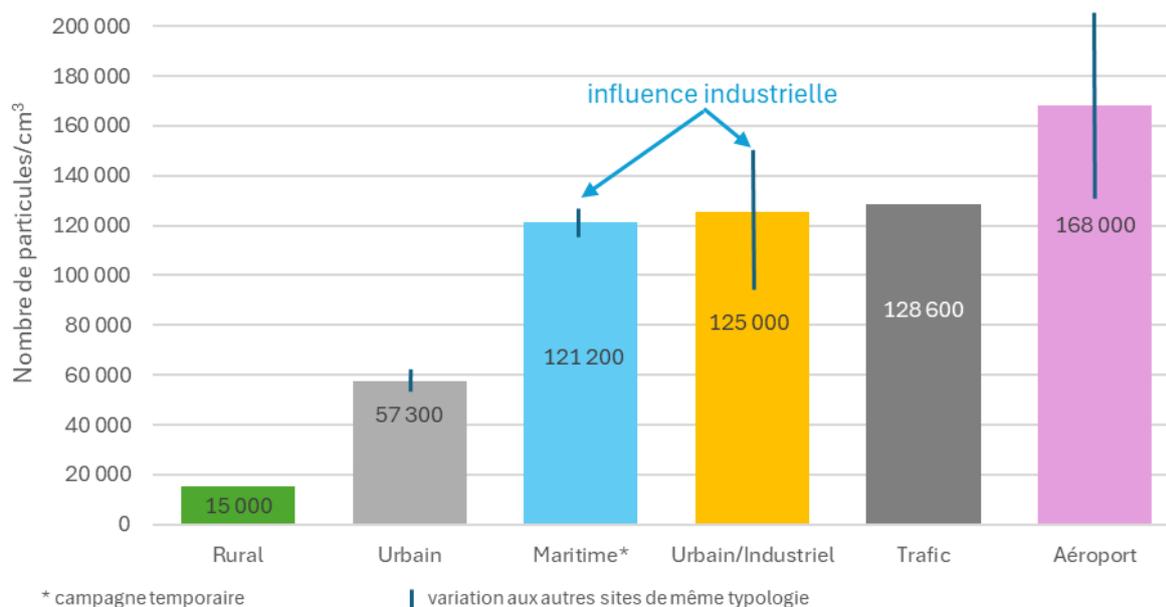


Figure 11 : Niveau maximal annuel du nombre moyen de particules ultrafines en région Sud (2024)

► Quel est l'impact sanitaire de ces niveaux sur l'exposition de la population ?

Il n'existe pas de valeur annuelle de référence pour les PUF. Mais le nombre de particules annuel dépasse la limite considérée comme basse par l'OMS à l'échelle journalière (1 000 particules/cm³), et ce dans tous les environnements.

Les niveaux annuels sont également supérieurs au seuil considéré comme haut par l'OMS à l'échelle journalière (10 000 particules/cm³) dans tous les environnements sauf pour certains sites en situation rurale et potentiellement dans des villes moyennes.

Cependant, la comparaison stricte du nombre journalier de particules/cm³ de chaque site avec les valeurs de l'OMS (Tableau 5), précise le taux de dépassement :

- La **limite basse** est très **nettement** dépassée dans tous les environnements, hormis pour quelques jours en zone rurale ;
La **limite haute**, elle, n'est **respectée qu'en situation rurale**. Son taux de dépassement varie selon les sites en fonction de la nature et du volume des sources ;
- Les **valeurs maximales horaires** des différents sites sont toutes **supérieures** à la valeur de l'OMS excepté en situation rurale (Tableau 5).

Pour les autres environnements, cette référence est majoritairement dépassée en situation de proximité trafic, qu'il soit routier, aéroportuaire ou maritime. L'influence industrielle conduit également à des dépassements.

Tableau 5 : pourcentage de dépassement des valeurs journalières et horaire de l'OMS par environnement

| Dépassement des valeurs journalières et horaire OMS | Rural | Urbain/industriel | Urbain fond | Maritime | Aéroportuaire | Urbain Trafic |
|---|-------|-------------------|-------------|-----------|---------------|---------------|
| Valeur basse (1000 particules/cm ³) | 95 % | 100 % | 100 % | 100 % | 100 % | 100 % |
| Valeur haute (10 000 particules/cm ³) | 0 % | 35 à 73 % | 34 à 42 % | 56 à 64 % | ~75 % | 88 % |
| Valeur horaire (20 000 particules/cm ³) | 0 % | 5 à 19 % | 5 à 7 % | ~ 17 % | ~30 % | 34 % |

► Comparaison avec les niveaux mesurés dans d'autres régions de métropole

Les PUF ont été et sont mesurées dans plusieurs régions de France mais encore peu d'AASQA les suivent en continu en stations fixes (Tableau 4). Elles ont privilégié des campagnes de mesures sur une période définie, souvent réalisées avant la mise en place d'une métrologie homogène. Ainsi, en raison de périodes de mesures, de matériels et d'intervalles différents, la comparaison des niveaux en région Provence Alpes-Côte d'Azur avec les autres régions n'est pas exhaustive et est présentée à titre informatif (Figure 12).

Néanmoins, compte-tenu de ces limites et des diversités d'implantation (taille des villes, distance de mesure aux sources aéroportuaires ou industrielles), les niveaux relevés sont en cohérence avec ceux mesurés dans différentes études [15,16,17,18].

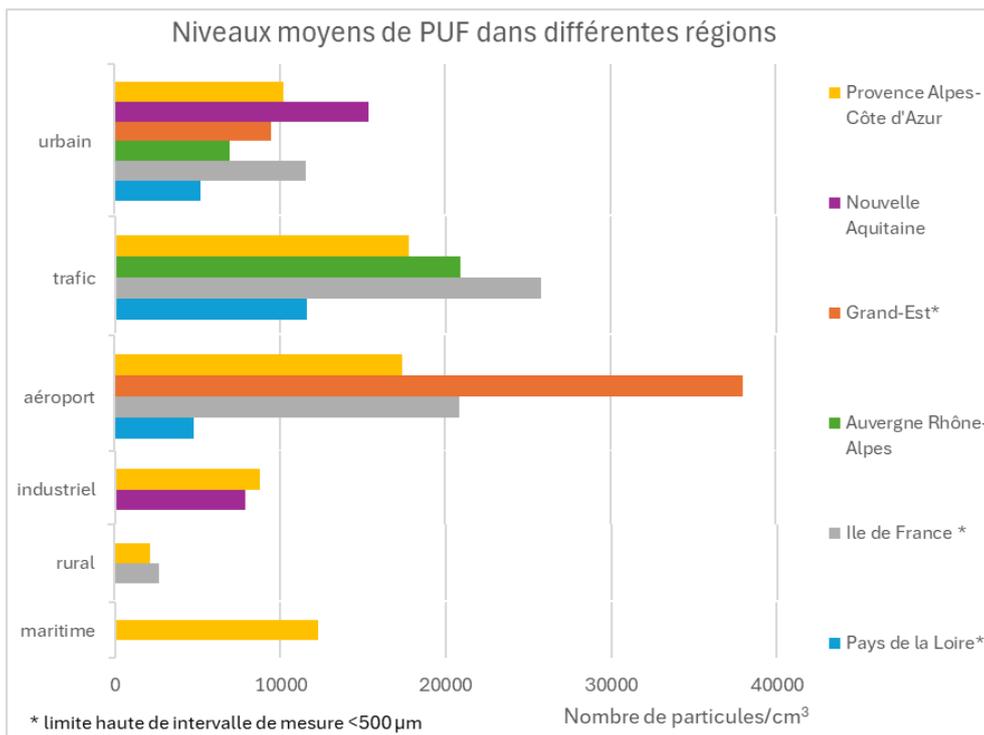


Figure 12 : comparaison des niveaux moyens en région Sud avec les données des autres régions (non exhaustif)

En l'absence de référence annuelle pour les valeurs de l'OMS, ces niveaux sont comparés avec la valeur haute journalière (10 000 particules/cm³) ;

- Elle est dépassée dans la plupart des régions en situation urbaine de proximité trafic ainsi que dans les zones aéroportuaires.
- En situation urbaine de fond, les niveaux sont influencés par la taille de l'agglomération.

► Conclusion sur les niveaux de PUF mesurés en air ambiant

C'est en zone rurale que le nombre de PUF (moyen et maximal) est le plus faible.

Les autres environnements affichent des niveaux moyens supérieurs, respectivement 5 fois pour l'urbain et urbain/industriel, 6 fois pour le maritime et jusqu'à 10 fois pour l'aéroportuaire et l'urbain trafic.

Les maxima horaires sont principalement influencés la proximité des sources. Les valeurs les plus élevées sont observées dans les aéroports.

En situation urbaine, le nombre de PUF (moyen et maximal) en proximité trafic est le double de celui en fond.

A l'exception de la zone rurale, les niveaux en PUF dépassent les valeurs considérées comme hautes par l'OMS à l'échelle journalière et horaire de l'OMS, indiquant une forte exposition de la population.

Comparativement aux mesures réalisées dans les autres régions, le nombre de de PUF observé en région Provence Alpes-Côte d'Azur est similaire aux valeurs moyennes nationales pour l'ensemble des environnements.

3. COMMENT EVOLUENT LES PUF DANS LES DIFFERENTS ENVIRONNEMENTS ?

Les niveaux de PUF observés sur les différents sites et leur évolution au cours du temps sont fonction de la présence de sources spécifiques, plus ou moins proches, mais également des conditions météorologiques et donc de la saison.

► Situation rurale

Les mesures en zone rurale révèlent un faible nombre de particules/cm³ comparé aux autres environnements étudiés. Les sources anthropiques sont limitées et les niveaux observés correspondent au **niveau de fond**.

Des valeurs élevées par rapport au niveau moyen (Figure 13) sont ponctuellement observées sans qu'une source puisse être identifiée. L'évolution mensuelle ne montre pas d'effet de saisonnalité marqué, mais les niveaux plus élevés en été résultent d'une formation d'aérosol secondaire par la photochimie.

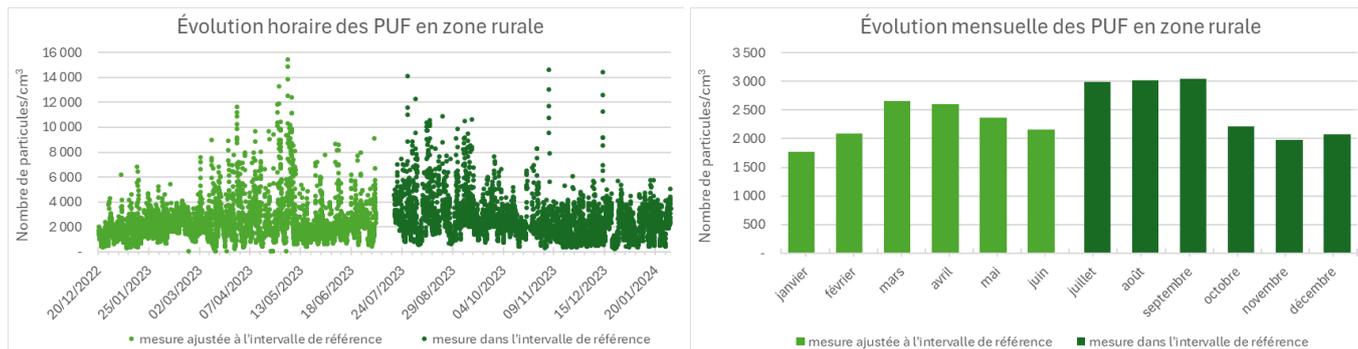


Figure 13 : Évolutions horaire et mensuelle des PUF en zone rurale

► Situation urbaine sous influence industrielle

Des campagnes de mesures de PUF en situation urbaine sous influence industrielle ont été réalisées dans plusieurs villes moyennes du pourtour de l'Étang de Berre.

Selon les sites, les niveaux mensuels présentent des variations importantes, ponctuellement influencées notamment par les activités industrielles à proximité (Figure 14). L'exemple du 16 février 2025, confirme l'origine industrielle du niveau de PUF avec la concomitance des pics de PUF et de dioxyde de soufre, traceur de l'activité industrielle, sur la station de mesure de Fos carabins.

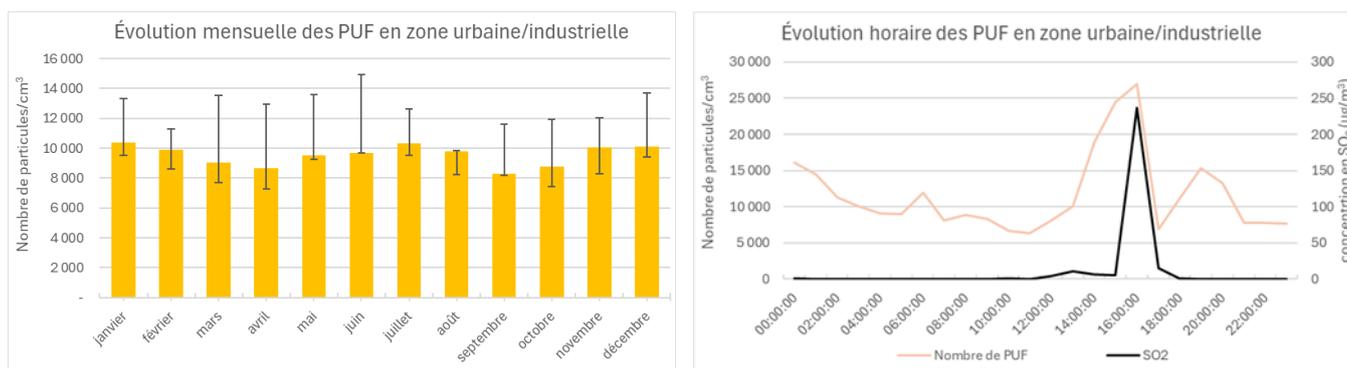


Figure 14 : Évolutions mensuelle et horaire des PUF en zone urbaine/industrielle

Ainsi, en raison des pics ponctuels en lien avec les industries proches, l'évolution mensuelle ne montre pas saisonnalité claire, pourtant un nombre élevé de particules est relevé en hiver et en été :

- En hiver, cette hausse est en partie due à des sources supplémentaires (trafic, chauffage) mais aussi à des conditions météorologiques stables qui limitent la dispersion des polluants.
- En été, une partie des PUF a une origine secondaire, c'est-à-dire qu'elles sont issues de transformation photochimique, processus similaire à la formation d'ozone. En effet, comme le montre le profil journalier saisonnier (Figure 15), le nombre de particules augmente aux heures les plus chaudes, lorsque la photochimie est la plus intense avec une évolution comparable à l'ozone.

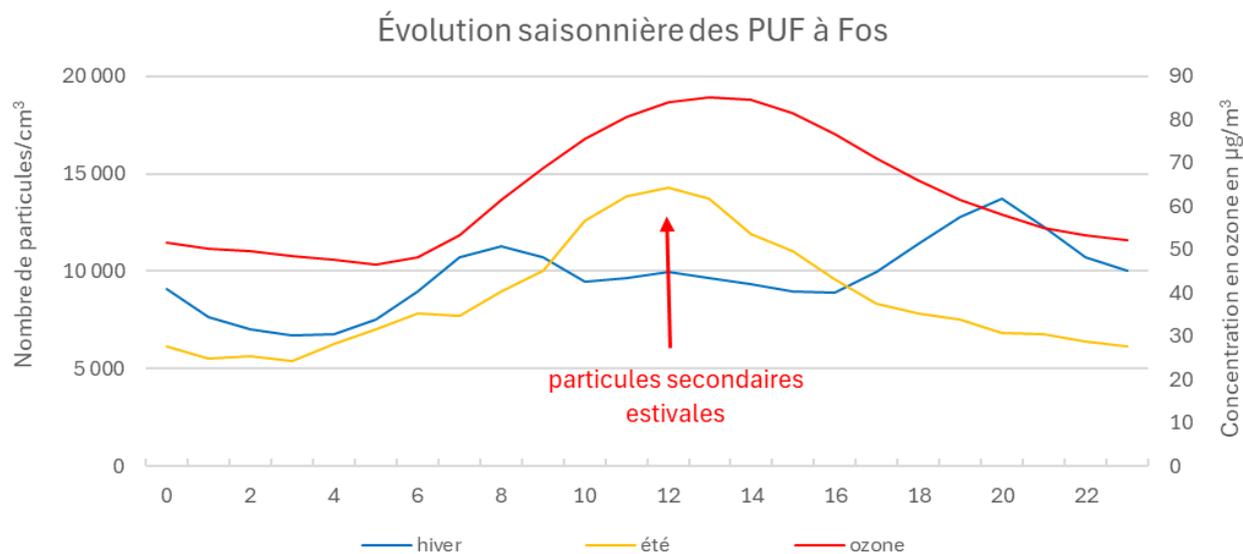


Figure 15 : Évolution saisonnière des PUF en zone urbaine/industrielle

► Situation urbaine

En milieu urbain, les PUF sont suivies en situation de fond et en proximité du trafic routier où le nombre de PUF est, comme indiqué précédemment, plus élevé. La bonne corrélation des profils journaliers du nombre de PUF et du NO₂, bon traceur du trafic routier, témoigne de l'origine routière des PUF et les définit également, à l'instar du NO₂, comme un bon indicateur de ce secteur en situation de proximité (Figure 16).

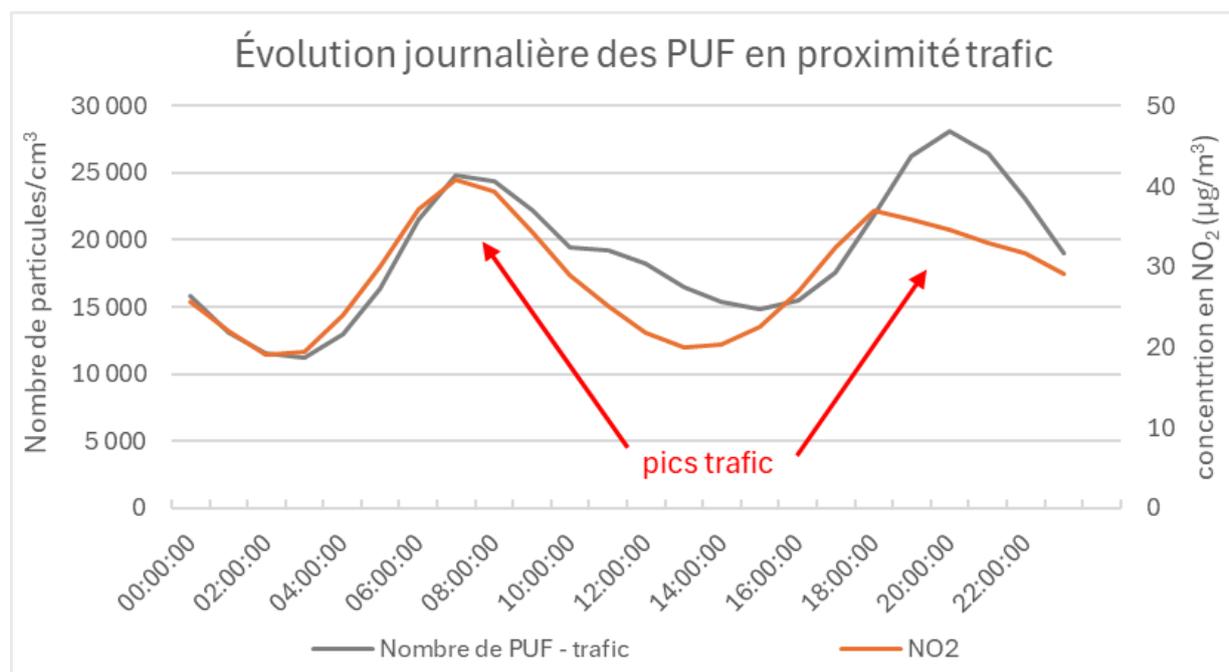


Figure 16 : Évolution journalière des PUF et du NO₂ en zone urbaine trafic (agglomérations de Marseille et Nice)

En situation de fond, l'influence du trafic routier est atténuée en raison de l'éloignement de ce type de sources, ainsi ce sont d'autres sources qui contribuent principalement à l'évolution des concentrations.

La comparaison avec le Black Carbon issu de combustion de biomasse, met notamment en évidence l'impact du chauffage au bois. Les pics de PUF observés la dernière semaine de décembre 2024, particulièrement froide, coïncident avec les pics de BCwb et révèlent ainsi la présence du chauffage au bois comme source de PUF (Figure 17).

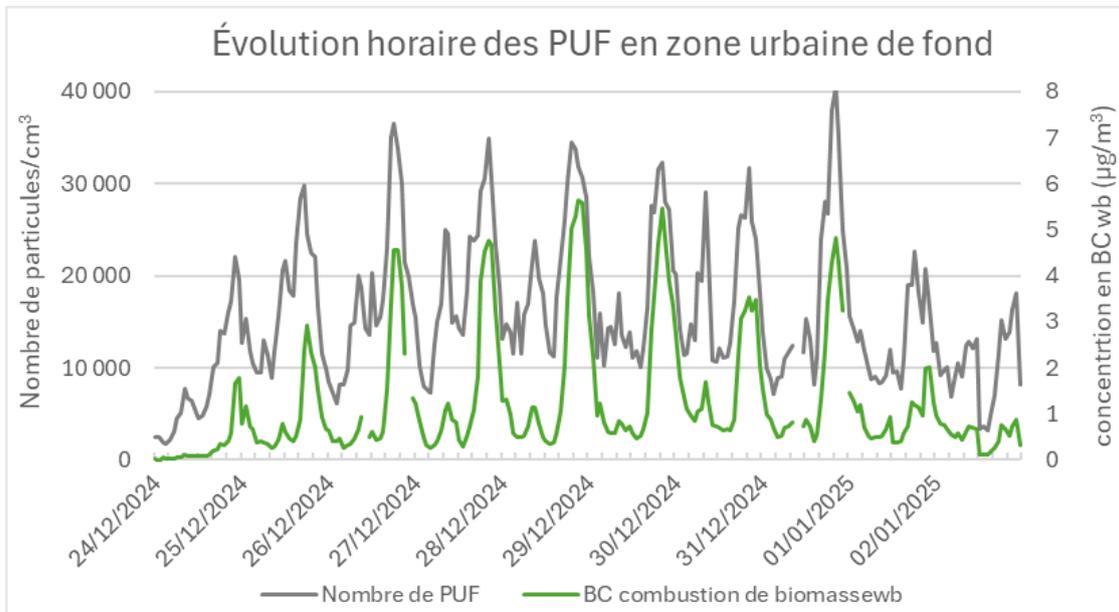


Figure 17 : Évolution horaire des PUF et du BC combustion de biomasse en zone urbaine de fond

L'évolution mensuelle en situation urbaine affiche une réelle saisonnalité (Figure 18). Les valeurs estivales, liées à un trafic moindre dans l'agglomération marseillaise, (durée de mesure insuffisante à Nice pour comparaison) sont plus faibles, que les niveaux en hiver dus à l'apport du chauffage au bois. La différence de niveaux selon la saison est donc fonction des sources, mais également des conditions atmosphériques, car en hiver, elles sont favorables à l'accumulation des polluants et ainsi une hausse des niveaux.

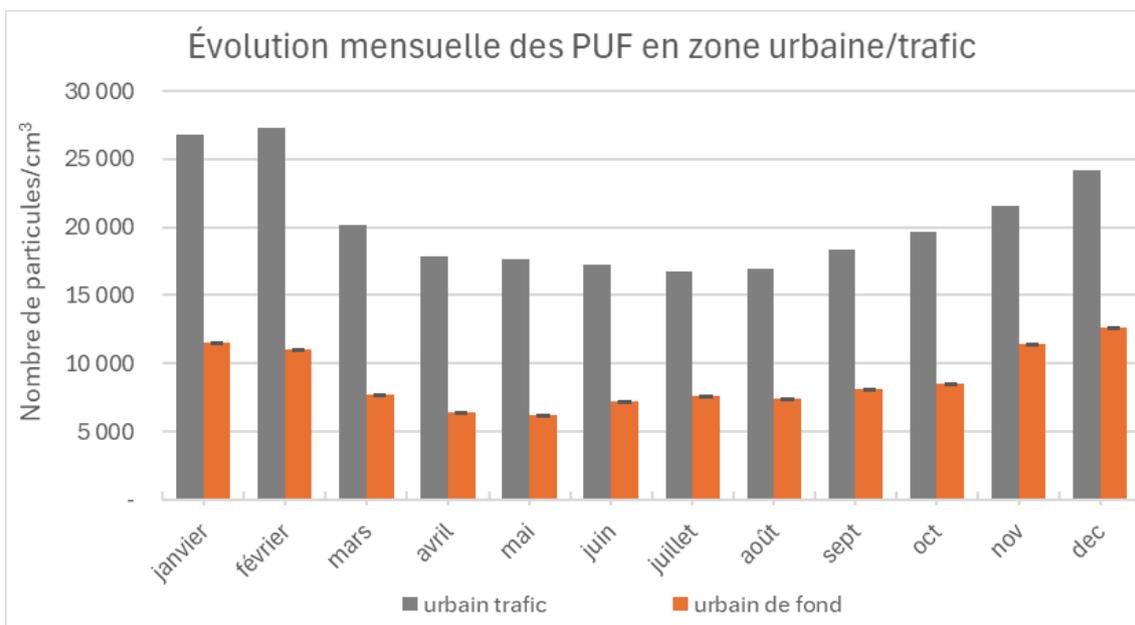


Figure 18 : Évolutions mensuelles des PUF en zone urbaine trafic et de fond

► Situation de proximité maritime

Les données de PUF en environnement maritime s'appuient sur des campagnes de mesures menées dans le cadre d'études spécifiques sur les zones portuaires et leur exposition aux panaches des navires.

La variabilité du nombre de PUF, qu'elle soit journalière ou mensuelle, dépend de l'activité maritime, avec une hausse des niveaux lorsque les navires sont à quai tout au long de la journée (valeur 20 fois plus faible la nuit) mais également durant les mois les plus attractifs (été et fin d'année) (Figure 19).

Néanmoins, les conditions climatiques contribuent également à une augmentation des niveaux, aussi bien en période chaude par processus photochimique de formation de particules secondaires, que lors des périodes de faible dispersion, notamment en hiver.

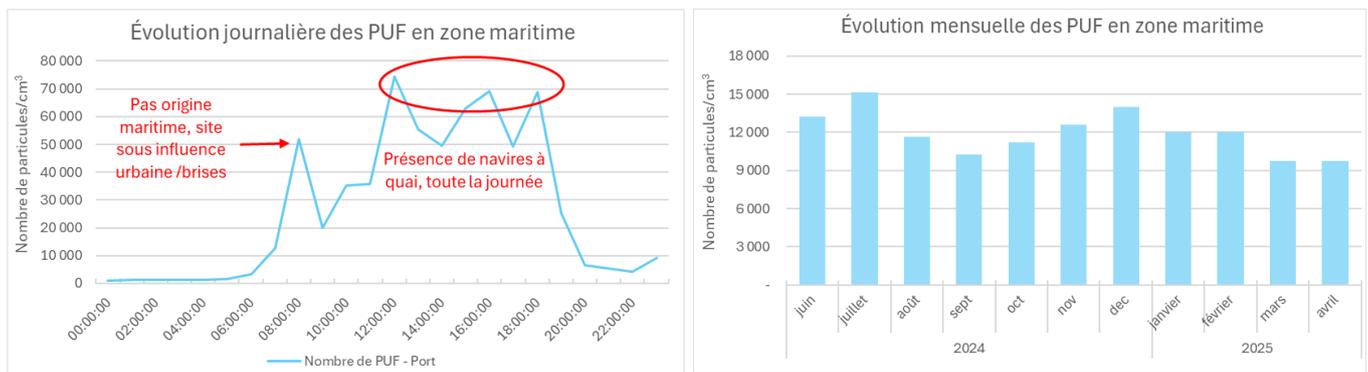


Figure 19 : Évolutions horaire et mensuelle des PUF en zone maritime

► Situation de proximité aéroportuaire

Le nombre de PUF est mesuré à la station permanente de l'Aéroport de Nice depuis 2023. Une première étude a été menée de janvier à octobre 2020, intégrant donc la période de confinement liée au COVID au cours de laquelle une chute d'environ 60 % du nombre de particules a été enregistrée. Sur l'évolution mensuelle, ces valeurs correspondent aux minima observés entre mars et juillet (Figure 20).

Par ailleurs, de juillet à décembre 2024, des mesures ont été réalisées à l'aéroport de Marseille-Provence consolidant ainsi les informations déjà disponibles en zone aéroportuaire.

A l'instar des zones maritimes, le nombre de PUF varie en fonction de l'activité journalière, avec une hausse des concentrations en journée et un niveau de fond plus faible la nuit (environ 5 fois), lorsque les aéroports sont fermés. Les variations saisonnières ressortent avec la forte affluence en période estivale, ainsi qu'en fin d'année.

L'impact des conditions météorologiques reste très présent avec une hausse estivale liée à l'apport des particules secondaires d'origine photochimique et une hausse hivernale due à la stabilité atmosphérique favorisant l'accumulation des polluants.

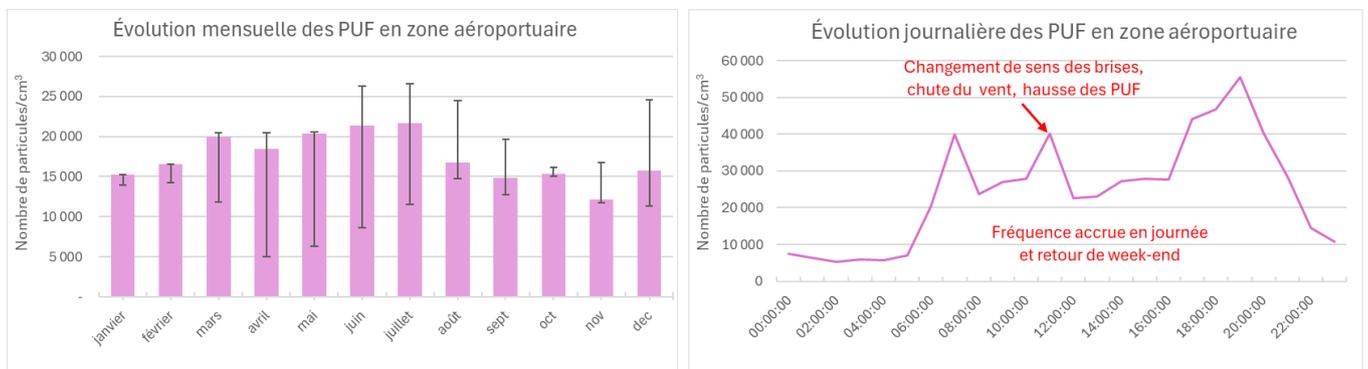


Figure 20 : Évolutions mensuelle et horaire des PUF en zone aéroportuaire

► Conclusion sur l'évolution des niveaux de PUF dans les différents environnements

La plupart des environnements présente une saisonnalité avec une augmentation du nombre de particules l'hiver, en raison de conditions atmosphériques stables favorables à l'accumulation des polluants. L'été, une hausse est également observée due à l'apport de particules secondaires formées par processus photochimique. En zone rurale, seul ce dernier processus est observé.

Cette saisonnalité est plus ou moins marquée selon les sources et leur proximité. Ainsi, l'influence du chauffage au bois, source supplémentaire les mois d'hiver, est davantage visible en milieu urbain de fond en période froide. En revanche, dans les environnements de proximité, l'influence de la source, est prédominante pour le nombre de particules. En zone maritime et aéroportuaire, l'affluence touristique se perçoit essentiellement l'été et en journée, alors qu'en zone sous influence industrielle, le nombre de particules évolue au gré de l'activité et ne présente pas de saisonnalité type.

4. CE QU'IL FAUT RETENIR DES PUF EN PROVENCE ALPES-COTE D'AZUR

La mesure des PUF est effective depuis 2015 en région Sud et s'est renforcée progressivement au cours du temps pour afficher en 2025, une dizaine de sites de mesure dont 7 en stations permanentes.

Le dispositif de surveillance a été déployé dans différents environnements permettant de disposer d'informations précieuses sur les niveaux en milieu rural, urbain ou en proximité des sources industrielles, maritimes et aéroportuaires.

Les figures 21 et 22 présentent le classement des différentes typologies de site, respectivement selon les concentrations moyennes ou les concentrations maximales annuelles.

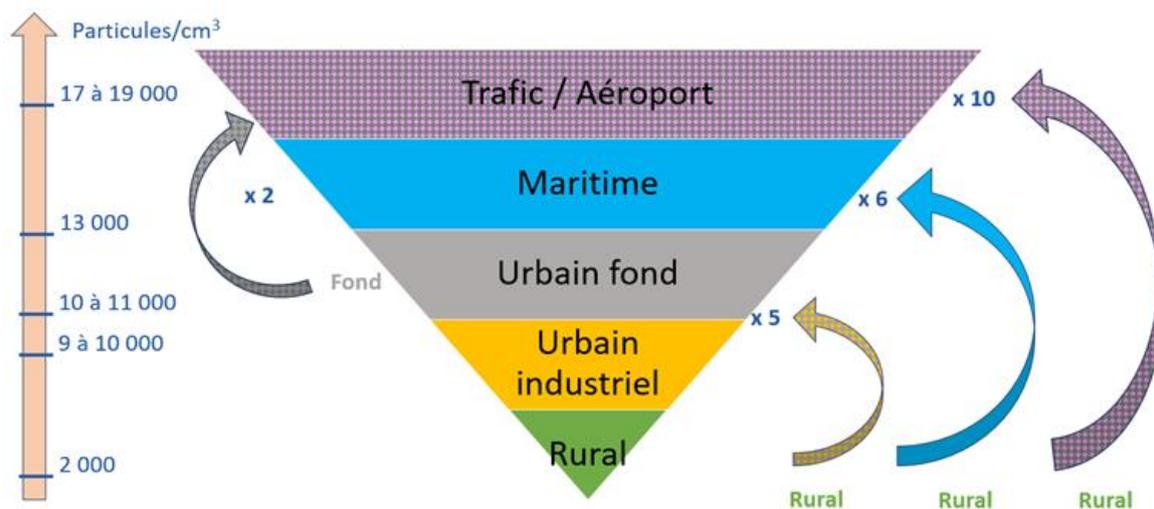


Figure 21 : illustration des niveaux moyens du nombre de PUF

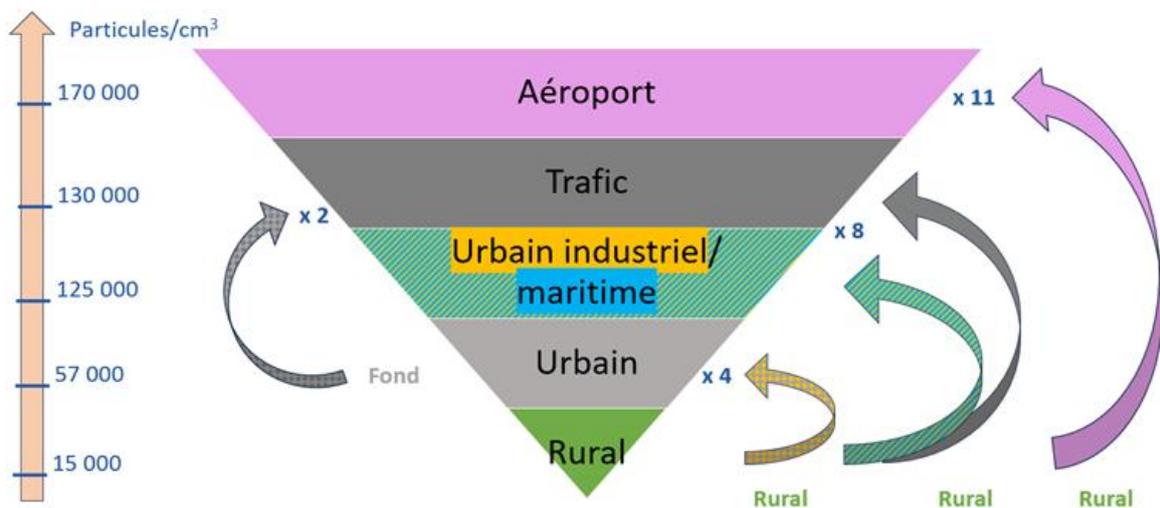


Figure 22 : illustration des niveaux maximaux du nombre de PUF

Le nombre de PUF évolue en fonction du nombre de sources, de leur proximité et de la saison. Selon les environnements, un ou plusieurs de ces paramètres dominent :

- En zone rurale, les niveaux sont très faibles et seules les conditions climatiques ont une influence sur les niveaux, avec un apport de PUF d'origine secondaire en été.
- En zone urbaine, les 3 critères agissent sur le nombre de PUF, puisqu'en proximité trafic, les niveaux sont plus élevés qu'en fond et qu'en hiver, et que le chauffage au bois, vient s'ajouter à la source routière. Cette source supplémentaire liée au résidentiel est d'autant plus visible en situation de fond. L'apport estival est également présent et la stabilité atmosphérique hivernale contribue à l'accumulation des polluants
- En zone sous influence industrielle, le nombre de sources et leur proximité détermine les niveaux de PUF. A l'instar de la zone urbaine, les saisons influencent les niveaux observés, avec les hausses estivales (formation

secondaire) et hivernale (chauffage, stabilité atmosphérique).

- Dans les contextes maritimes et aéroportuaires, le nombre de PUF dépend essentiellement de l'activité puisque les niveaux augmentent aux périodes d'affluence touristique (été et fin d'année) et sont très faibles la nuit notamment, lorsque l'activité s'arrête. Ces évolutions sont également majorées par la formation de particules secondaires due à la photochimie estivale et des conditions atmosphériques peu dispersives.
- La surveillance des PUF dans les plateformes aéroportuaires est particulièrement intéressante pour tracer l'impact du transport aérien.

CHAPITRE 3 : L'IDENTIFICATION DES SOURCES EN AIR AMBIANT PAR GRANULOMETRIE

La mesure du nombre total des PUF peut être couplée à celle de la granulométrie, permettant d'obtenir la distribution statistique du nombre de particules selon plusieurs classes de taille.

AtmoSud a réalisé les premières études granulométriques dès 2018 pour lesquelles l'intervalle de mesure est séparé en 6 classes de taille. D'autres matériels, acquis à partir de 2021, permettent de disposer de distributions granulométriques plus précises, divisant l'intervalle de mesure en 16 voire 136 canaux.

A l'exception de la zone rurale, la plupart des environnements a bénéficié de mesures granulométriques, et des campagnes spécifiques se poursuivent encore actuellement pour améliorer les connaissances de certaines typologies de sites.

1. ENVIRONNEMENT URBAIN INDUSTRIEL

Lors d'une étude comparative des particules en milieu urbain et industriel en 2018 [9], la répartition de la concentration en nombre des particules a été calculée sur les intervalles : [20-30 nm], [30-50 nm], [50-70nm], [70-100 nm], [100-200 nm], [> 200 nm].

A Port-de-Bouc, la dispersion des concentrations en particules ultrafines est plus importante entre [20-30 nm] qu'à Marseille (Figure 23). C'est la signature de l'activité industrielle et portuaire, en raison de la formation de particules secondaires d'acide sulfurique ou par photooxydation des composés organiques volatils [9].

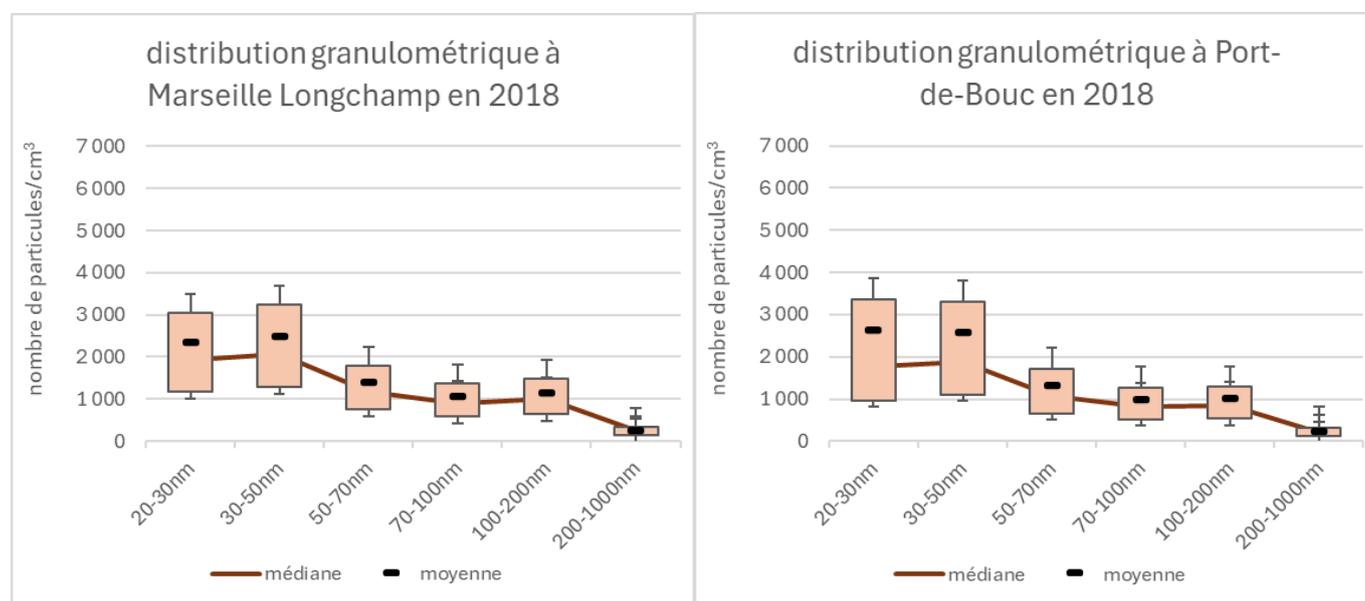


Figure 23 : distribution granulométrique à Port-de-Bouc comparé à Marseille Longchamp en 2018

En effet, au-delà des sources anthropiques liées aux différents secteurs d'activités (transport routier, transport maritime, transport aérien, résidentiel, industrie, agriculture...), les sites de la région Sud sont influencés par la production de particules ultrafines secondaires. Cet apport supplémentaire est notamment observé en saison chaude, par transformation photochimique de certains polluants.

Ainsi, le profil moyen journalier saisonnier confirme la formation de particules ultrafines en été, avec un pic aux heures les plus chaudes, entre 10h et 14h, (Figure 24). A Marseille Longchamp, les pics liés au trafic routier

apparaissent significativement, alors qu'à Port-de-Bouc, l'influence industrielle ressort davantage, caractérisée par des émissions épisodiques de dioxyde de soufre plus importantes en journée. La hausse du soir, visible en hiver, est majorée par des émissions de particules fines liées à la combustion de biomasse.

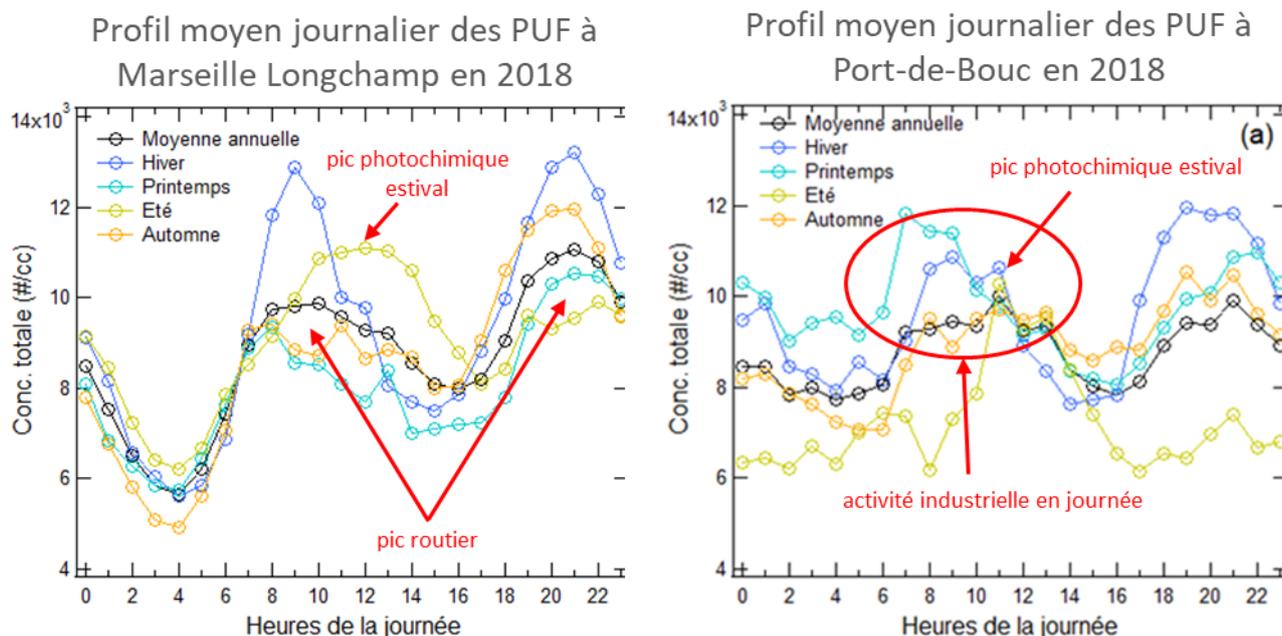


Figure 24 : profil moyen journalier annuel et saisonnier à Port-de-Bouc comparé à Marseille Longchamp en 2018

Ces variations journalières et saisonnières sont différentes selon les gammes de tailles de PUF, on peut donc en déduire les principaux facteurs d'influence (Figure 25) :

- En saison froide, le pic de fin de journée plus élevé en milieu urbain résulte de l'utilisation du chauffage urbain couplé aux émissions du trafic routier. Cette hausse apparait pour les très fines particules (diamètre < 50 nm), signature du trafic routier, mais également pour les particules de tailles comprises entre 100 et 200 nm, présentant une très bonne corrélation avec les émissions issues du brûlage de bois.
- En période chaude, le pic estival photochimique produit des particules très fines, de diamètre < 50 nm, quel que soit le site concerné.
- L'influence industrielle apparait davantage sur les particules de diamètre < 100nm dont le profil est très variable en cours de journée, au gré des émissions industrielles discontinues.
- La stabilité sur l'année du profil des particules de tailles 200-1000 nm ne révèle pas d'effet de saisonnalité particulière.

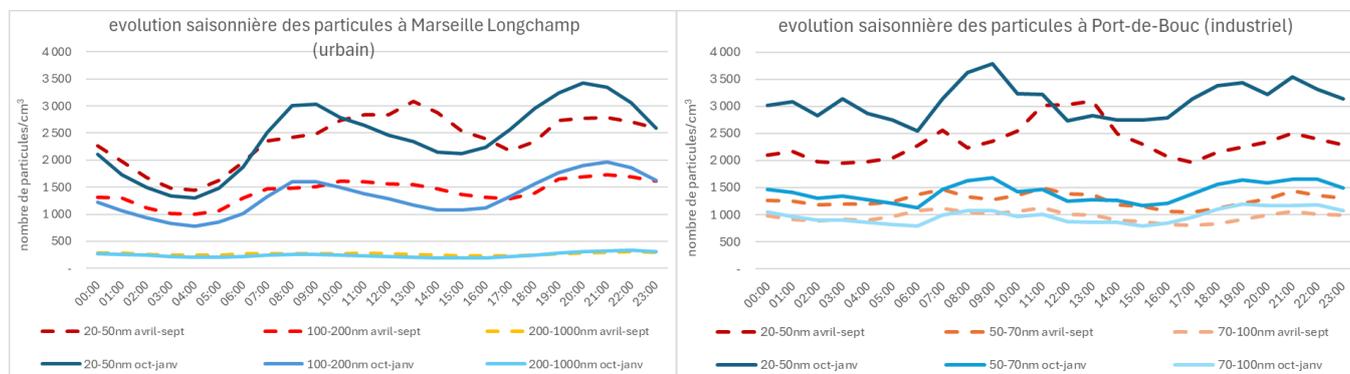


Figure 25 : évolution saisonnière des particules en 2018 selon leur taille à Port-de-Bouc comparé à Marseille Longchamp

2. ENVIRONNEMENT URBAIN FOND

La granulométrie des PUF en zone urbaine a été étudiée à Marseille Longchamp sur l'intervalle [10 nm-1 µm] en 18 canaux : ce sont les particules de tailles de 15 à 60 nm qui sont les plus nombreuses et plus particulièrement celles entre 20 et 40 nm (Figure 26).

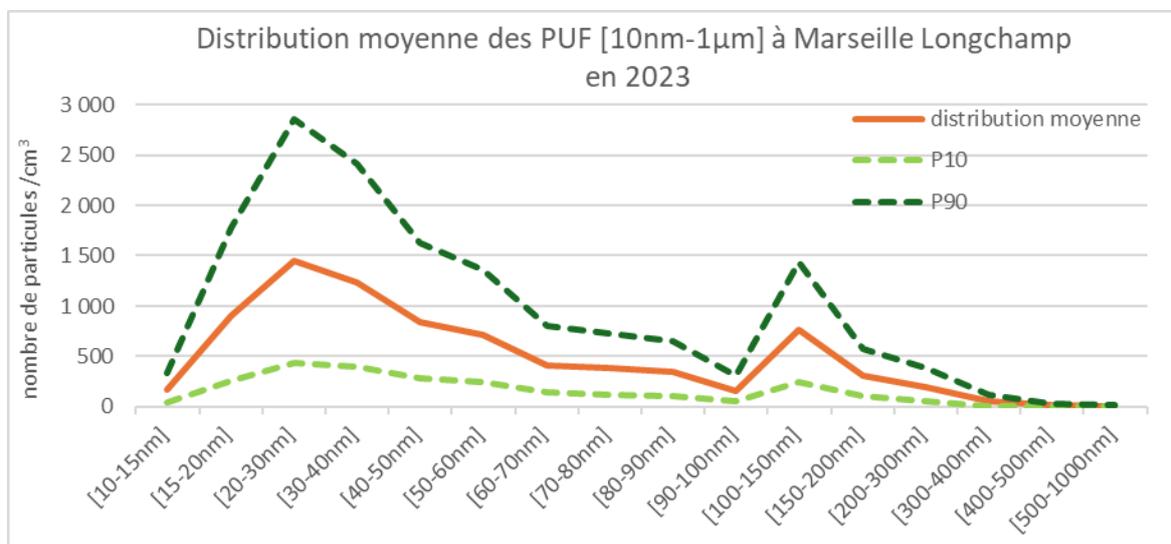


Figure 26 : Distribution granulométrique moyenne et percentiles des PUF en zone urbaine en 2023.

L'élévation du nombre de particules de l'intervalle [100-150 nm] n'est liée qu'au fait que cet intervalle est 5 fois plus large que ceux des tailles petites (50 nm contre 10 nm).

Les hausses de concentrations liées du trafic automobile ressortent, notamment sur les intervalles [20-30 nm] et [30-40 nm]. Ces intervalles correspondent aux particules secondaires formées par nucléation après échappement par l'émission de gaz chauds contenant des vapeurs de composés organiques volatils ou semi-volatils [19,20].

En revanche, la source du chauffage domestique n'apparaît pas clairement sur les distributions granulométriques. des études dans d'autres régions l'identifient entre 70 et 100 nm [15] ou entre 100 et 200 nm [21].

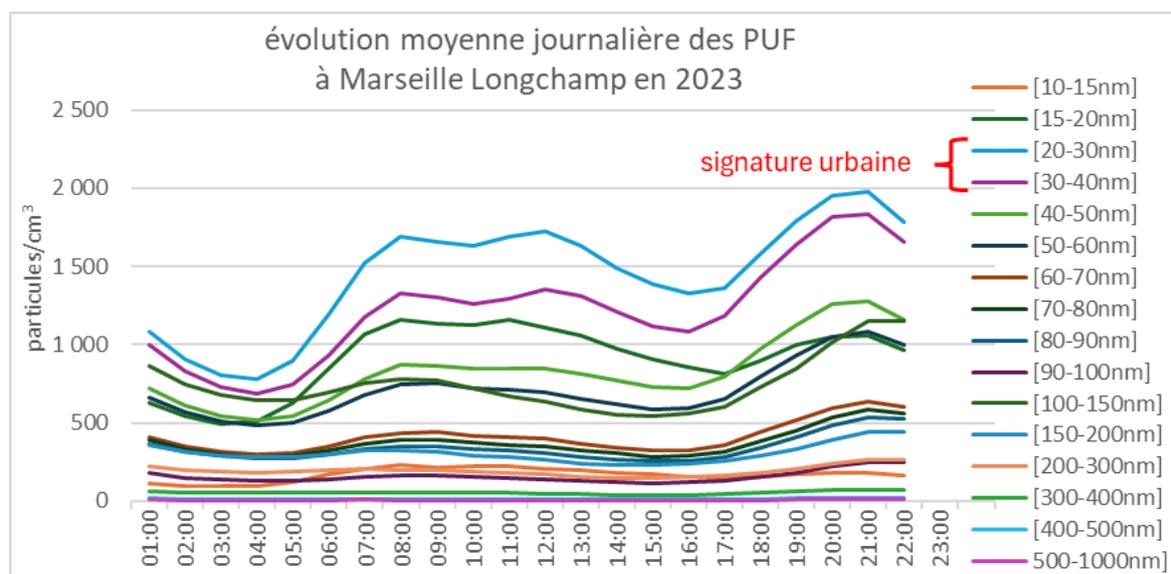


Figure 27 : profil moyen journalier des PUF à Marseille Longchamp selon les différents intervalles de taille.

3. ENVIRONNEMENT URBAIN TRAFIC

Entre novembre 2020 et octobre 2022, le site trafic de Marseille Rabatau a été équipé d'un compteur de particules séparant l'intervalle [20 nm - 1 µm] en 6 classes de taille : [20-30 nm], [30-50 nm], [50-70nm], [70-100 nm], [100-200 nm), [> 200 nm].

Ainsi, la distribution granulométrique montre une prépondérance des particules les plus fines, de tailles inférieures à 50 nm, confirmant la signature du trafic également observée sur le site urbain (Figure 28).

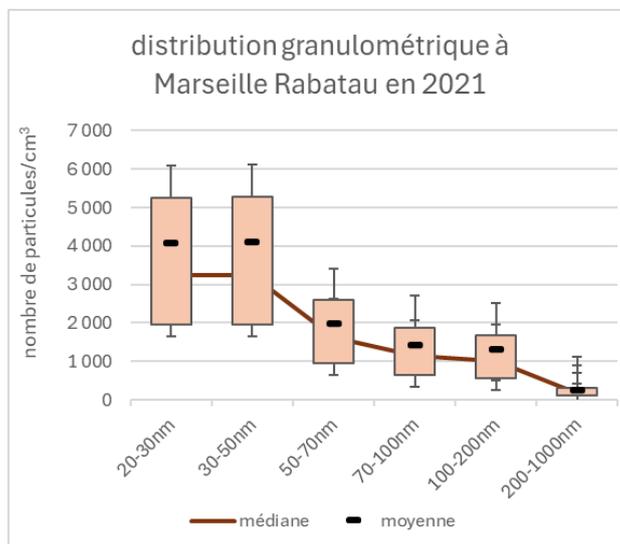


Figure 28 : distribution granulométrique à Marseille Rabatau en 2021

4. ENVIRONNEMENT MARITIME

AtmoSud participe à plusieurs projets internationaux sur l'impact du trafic maritime sur la qualité de l'air des environnements portuaires. Parmi les campagnes de mesures associées, celle réalisée en 2021 lors du projet PAREA¹⁵, a permis d'établir une distribution granulométrique à la passe Nord (site PEB - ferries pour la Corse) et la passe Sud (site Major - navires pour le Maghreb) du port de Marseille.

Les particules ultrafines issues de l'activité maritime montre un mode principal entre 30 et 40 nm (Figure 29).

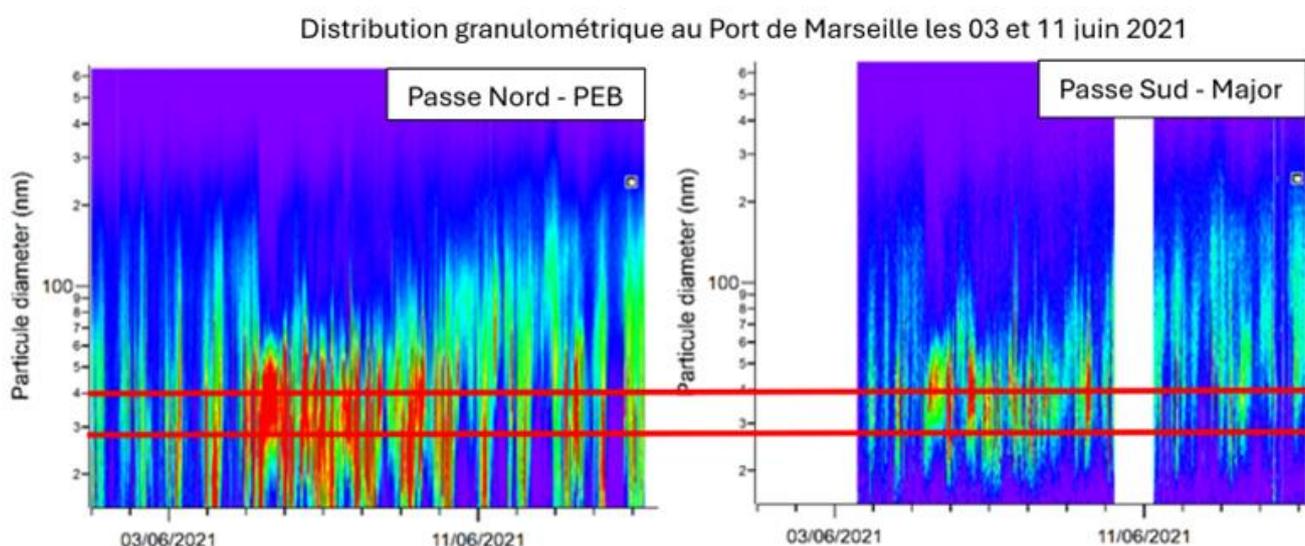


Figure 29 : distribution granulométrique des particules lors de la campagne « PAREA 2021 » sur les sites de mesures implantés au cœur de la zone portuaire pour les sites PEB (gauche) et MAJOR (droite)

¹⁵ Fiche étude PAREA <https://www.atmosud.org/etude/parea>

5. ENVIRONNEMENT AEROPORTUAIRE

A l'aéroport de Nice, des mesures granulométriques ont été effectuées en mars 2024 sur 136 intervalles de taille de 3 nm à 385 nm, avec un pas de temps de 5 minutes.

Ces mesures ont permis de définir la signature de cette zone d'intérêt, montrant en moyenne des particules plus nombreuses autour de 14 nm (Figure 30). Ceci est cohérent avec les précédentes études qui mettent en évidence un diamètre moyen compris entre 10 et 20 nm (mode nucléation) pour les particules les plus nombreuses [19,22,23].

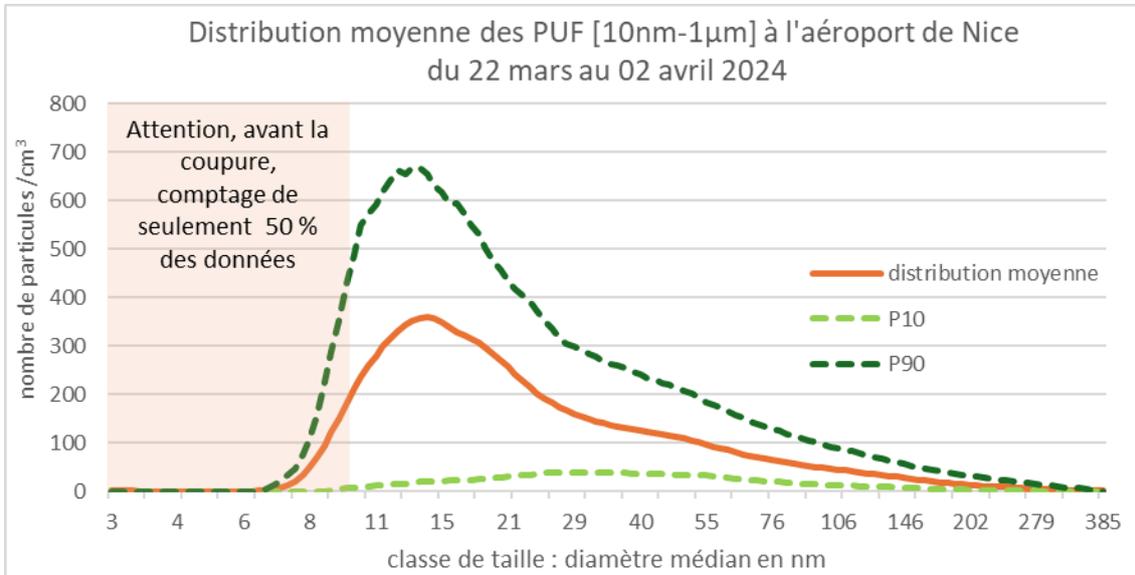


Figure 30 : Distribution granulométrique moyenne et percentiles des PUF en zone d'intérêt aéroport du 22 mars au 2 avril 2024

En zone d'intérêt aéroportuaire, les concentrations sont significativement supérieures aux autres types de site, notamment pour les plus petites particules, caractérisant ainsi l'activité de la zone.

La signature urbaine apparaît également en raison des nombreuses sources automobiles sur les plateformes et de la proximité de la ville (Figure 31).

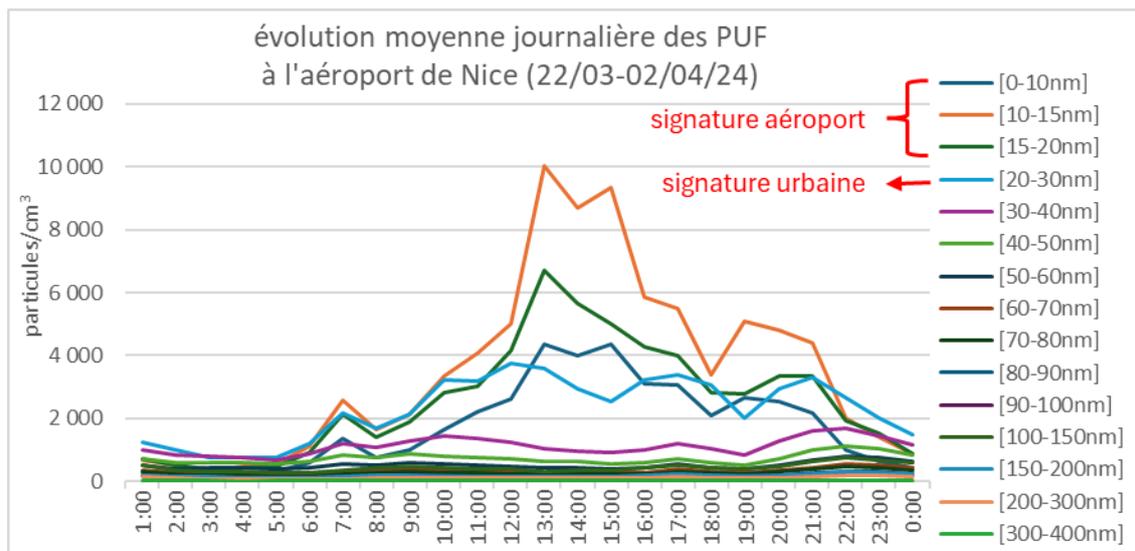


Figure 31 : profil moyen journalier des PUF à Nice Aéroport selon les différents intervalles de taille.

6. CE QU'IL FAUT RETENIR DE L'IDENTIFICATION DES SOURCES PAR GRANULOMETRIE

L'analyse granulométrique des PUF permet d'identifier leur origine et les sources potentielles associées. Cependant, ces différentes analyses granulométriques sont contraintes par la saison de mesure et le mélange des sources, nombreuses dans l'environnement urbain notamment ou industriel.

Ainsi, l'intervalle [20-60 nm] a été mis en évidence pour les sources urbaines de fond mais il comprend de fait l'intervalle [20-40 nm] où ressortent les sources trafic et l'intervalle [20-30 nm] dans lequel sont identifiées les sources industrielles.

L'environnement maritime se retrouve dans l'intervalle [30-40 nm].

La signature aéroportuaire a été caractérisée précisément autour de 14 nm, ce qui correspond à l'intervalle de la littérature [10-20 nm]¹⁶ sur le sujet.

La taille des particules issues du chauffage au bois reste cependant encore à déterminer précisément.

¹⁶ pour les particules ultra-fines issues des aéronefs, la littérature [16,17,18] s'accorde pour une taille comprise entre 10 et 20 nm, voire inférieure à 10 nm selon certains travaux.

CHAPITRE 4 : LES PUF EN AIR INTERIEUR

En France, les PUF en air intérieur ont été peu documentées. Les avis de l'ANSES [24] et du HCSP [25] abordent le sujet mais ne fournissent pas de statistiques de mesures et insistent sur la nécessité de réaliser des études spécifiques de PUF dans les environnements clos.

Parmi les campagnes nationales de mesures mises en place par l'OQAI dans les parcs de bâtiments français, seule la campagne nationale Bureaux intégrait des mesures intérieures de PUF. Dans cette étude sur 129 bâtiments de bureaux, la concentration médiane des particules ultrafines s'élevait à **6 900 particules par cm³**. Les principaux facteurs d'influence dans les bureaux sont l'ancienneté de la construction, l'absence d'un système de VMC, la saison estivale et la présence d'imprimantes et photocopieuses dans l'espace de travail.

Les études réalisées ces dernières années par AtmoSud sur les particules ultrafines en air intérieur ne visent pas à être représentatives des parcs de bâtiments mais ont pour objectif d'évaluer l'impact de certaines sources de PUF dans les espaces clos : matériel roulant dans les enceintes ferroviaires souterraines, systèmes de chauffage bois ou épurateurs d'air...

Dans cet objectif, le nombre total de particules ultrafines ne suffit pas, c'est l'analyse granulométrique et la distribution statistique des tailles de particules, qui permet d'évaluer l'impact des sources de pollution ou des solutions de remédiation sur les différentes classes de tailles de particules.

1. DANS LES ENCEINTES FERROVIAIRES SOUTERRAINES (EFS)

Dans l'enceinte ferroviaire souterraine du métro de Marseille, des mesures de particules ultrafines ont été réalisées au cours de la campagne de mesure de 2019 [26]. Les données granulométriques présentées en Figure 32 montrent que les fractions de particules les plus nombreuses sont centrées autour de la fraction 72 nm, et plus largement entre 20 et 250 nm.

Ces données sont cohérentes avec le rapport d'expertise de l'ANSES [27] qui indique que « la large majorité des particules en suspension dans les EFS est submicronique, les particules d'environ 30-40 nm de diamètre étant les plus nombreuses d'après quelques études ».

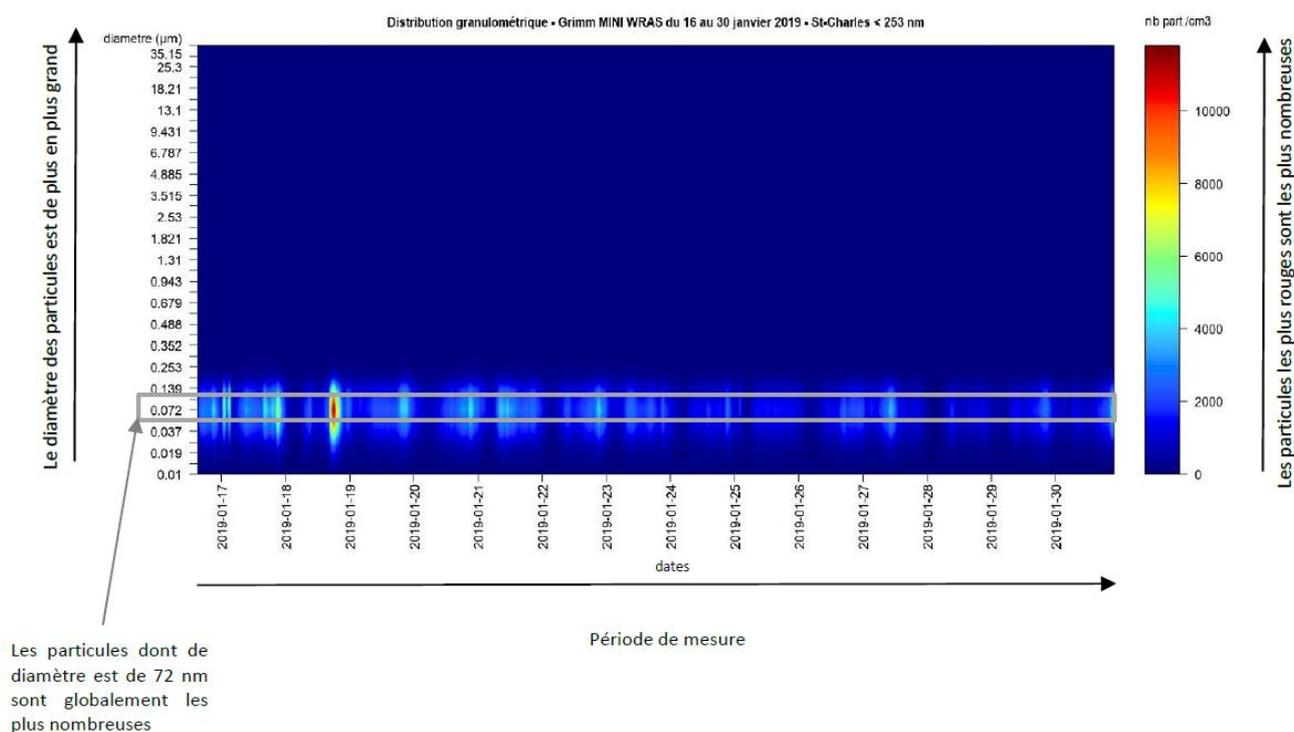


Figure 32 : Distribution statistique des particules de 10 nm à 35 µm sur le quai de la station St-Charles (campagne 2021)

La moyenne du nombre total de particules est de l'ordre de **9 000 particules/cm³**.

La représentation graphique de l'évolution du nombre de particules de chaque fraction de particule mesurée (présentée en Figure 33) montre que les particules inférieures à 600 nm ne sont pas significativement influencées par la fréquence de passage des rames, qui est plus importante aux heures de pointe de 7h à 9h et de 17h à 19h.

L'augmentation significative du nombre de particules de 10 à 600 nm observée autour de 21h est influencée par un apport essentiellement extérieur. Ce constat est observé sur toutes les stations échantillonnées.

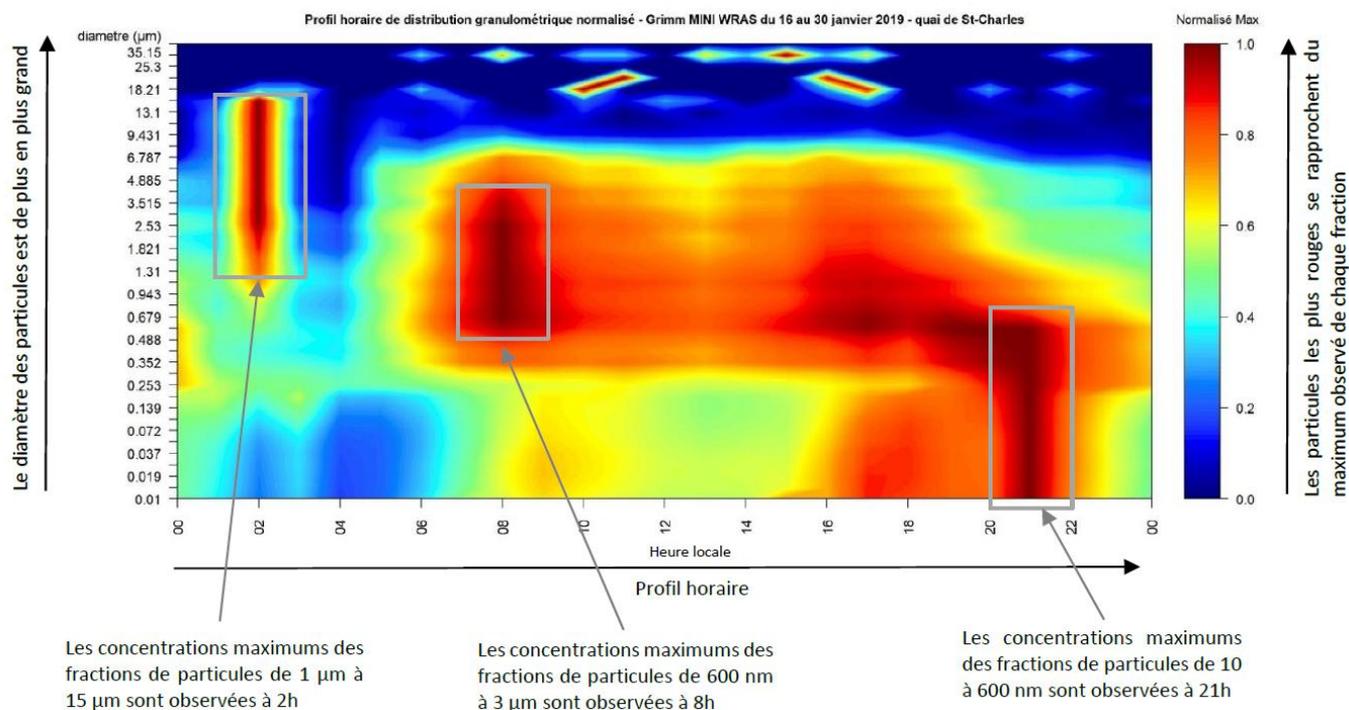


Figure 33 : Profil horaire de distribution granulométrique normalisé des particules : du 16 au 30 janvier 2019 sur le quai de la station de métro St-Charles

Le matériel roulant des enceintes ferroviaires souterraines ne représente pas une source particulière de particules ultrafines, dont les niveaux semblent essentiellement influencés par l'air ambiant.

2. DANS LE SECTEUR RESIDENTIEL – EXPERIMENTATION CHAUFFAGE BOIS

Le chauffage résidentiel et plus particulièrement le chauffage bois contribuent de manière significative aux concentrations extérieures en particules fines et ultrafines. Il est désormais bien documenté que la performance de ces systèmes de chauffage est un facteur déterminant sur les quantités de particules émises lors de la combustion. En effet, un système récent, dont l'efficacité de combustion et l'étanchéité à l'air sont maîtrisés est significativement moins émetteur de particules. C'est ainsi que des aides au financement du renouvellement d'anciens systèmes de chauffage bois sont apparues, comme le fond air-bois financé par le département des Bouches-du-Rhône.

Mais qu'en est-il en termes d'impact sur la qualité de l'air intérieur ?

Dans l'objectif de porter à connaissance les bénéfices attendus sur la qualité de l'air intérieur des modes de chauffage au bois récents et performants par rapport à des foyers ouverts, AtmoSud a mis en place une expérimentation dite « démonstrateur chauffage bois » dans un logement situé en périphérie de la ville de Marseille, en proximité d'une forêt de pins (typologie urbaine et influence de fond) [28]. Des mesures de PUF ont ainsi été réalisées, avant et après le remplacement du foyer ouvert par un insert Flamme Verte 7 étoiles.

Les résultats présentés dans le Tableau 6 montrent un nombre total moyen de PUF de **4 740 particules/cm³** en présence du foyer ouvert et de près de **400 particules/cm³** avec insert fermé performant, soit une baisse d'un facteur 10. Le changement du système de chauffage a résulté en la baisse des concentrations d'un facteur 15 à 30 selon les gammes de taille de PUF.

Tableau 6 : Concentrations des PUF en nombre de particules par cm³ avant et après changement du système de chauffage bois

| Nb. part./cm ³ | Période foyer ouvert (nov./déc. 2019) | | | Période insert flamme verte (janv./fév. 2020) | | |
|--|---------------------------------------|-------------|-------------|---|-------------|-------------|
| | Moyenne | P99 horaire | Max horaire | Moyenne | P33 horaire | Max horaire |
| Nombre total de particules (10 nm - 35 µm) | 4 742 | 29 455 | 58 919 | 372 | 2 062 | 4 196 |
| 10 – 14 nm | 17 | 103 | 220 | 1 | 4 | 12 |
| 14 – 19 nm | 56 | 314 | 737 | 2 | 15 | 42 |
| 19 – 27 nm | 124 | 686 | 1 604 | 5 | 33 | 96 |
| 27 – 37 nm | 176 | 1 539 | 3 556 | 10 | 77 | 221 |
| 37 – 52 nm | 530 | 3 044 | 6 778 | 18 | 158 | 434 |
| 52 – 72 nm | 757 | 4 531 | 9 743 | 24 | 255 | 631 |
| 72 – 100 nm | 958 | 5 939 | 12 282 | 30 | 383 | 821 |

Ces mesures montrent donc l'impact des émissions d'un foyer ouvert sur les concentrations intérieures en particules ultrafines mais également la diminution significative de PUF lors de la mise en place d'un système de chauffage au bois performant.

Cependant, elles ne peuvent pas être considérées représentatives d'un parc-type de logements équipés d'un système de chauffage au bois.

3. DANS UN BATIMENT D'ENSEIGNEMENT SCOLAIRE – EXPERIMENTATION EPURATEUR D'AIR

► Les concentrations observées en PUF

Dans le cadre d'une étude de l'impact d'épurateurs d'air dans un lycée, AtmoSud a mis en place des mesures de PUF par granulométrie :

- Les niveaux moyens pour une gamme de tailles de particules de [10 nm – 35 µm] lors des périodes sans épuration oscillent entre 2 000 et 8 000 particules/cm³ pour une première salle de classe et entre 1 000 et 10 000 particules/cm³ pour la seconde.
- Dans le réfectoire, les niveaux oscillent entre 2 000 et 15 000 particules/cm³.

Cependant, ces données de mesure sur deux semaines dans le lycée investigués ne sauraient être représentatives des concentrations habituellement observées dans les bâtiments d'enseignement secondaire.

► L'impact des épurateurs d'air

Depuis la pandémie de COVID, le marché des épurateurs d'air a bondi en raison des allégations de performance d'épuration des virus (réduction de la charge virale), en complément de l'efficacité annoncée pour les particules fines en condition de laboratoire. Trop peu d'études sont disponibles pour l'évaluation de leur efficacité en conditions réelles d'utilisation et quasiment aucune d'entre-elles aborde l'efficacité d'épuration sur les PUF.

AtmoSud a mené une étude pour l'évaluation de l'efficacité d'unités mobiles d'épuration dans des conditions réelles d'utilisation à l'intérieur d'un lycée sur divers polluants dont les PUF [29]. Deux salles de classes et un réfectoire ont ainsi été équipés. Dans la première salle de classe, deux unités mobiles avec filtration ont été installées¹⁷.

La Figure 34 montre que la mise en marche de l'épurateur d'air permet une diminution systématique et

¹⁷ type HEPA H13 : débits totaux de filtration supérieurs à 5 vol/h (2 400 m³/h pour une salle dont le volume est de 420 m³)

significative du nombre de particules.

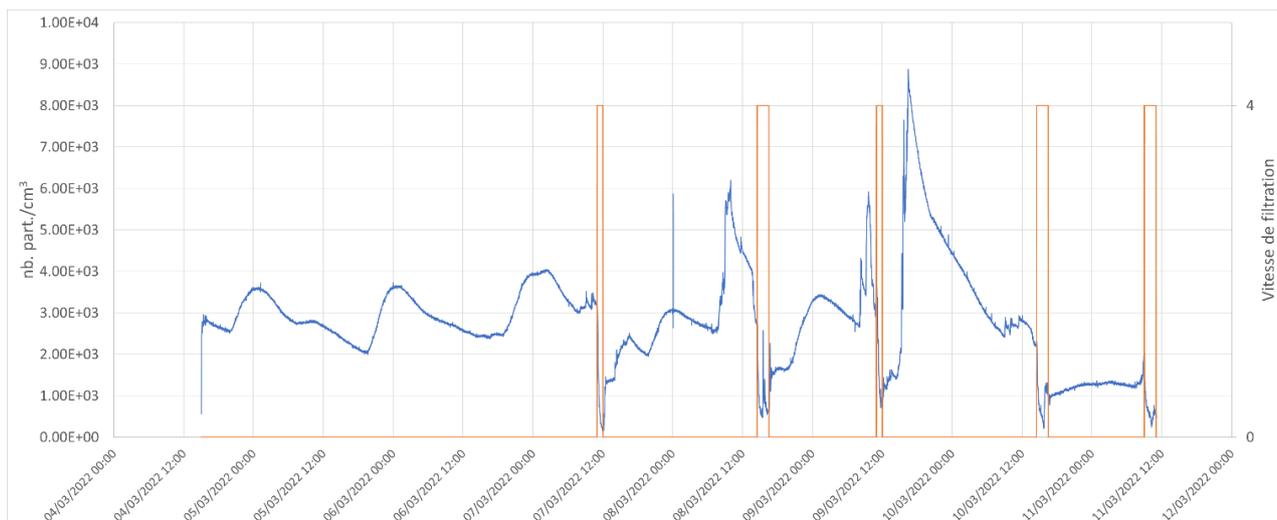


Figure 34 : Suivi du nombre total de particules de 10 nm à 35 µm en fonction de la mise en marche des épurateurs d’air dans la salle A326 du Lycée Diderot de Marseille

La Figure 35 illustre l’impact des périodes de filtration de l’épurateur sur les différentes tailles de particules mesurées. Les concentrations présentées sont normalisées par le min et le max de chaque classe de taille de particules afin de visualiser l’impact de l’épurateur sur chaque classe de taille.

On observe que la filtration particulière est efficace sur toutes les tailles de particules fines ou ultrafines.

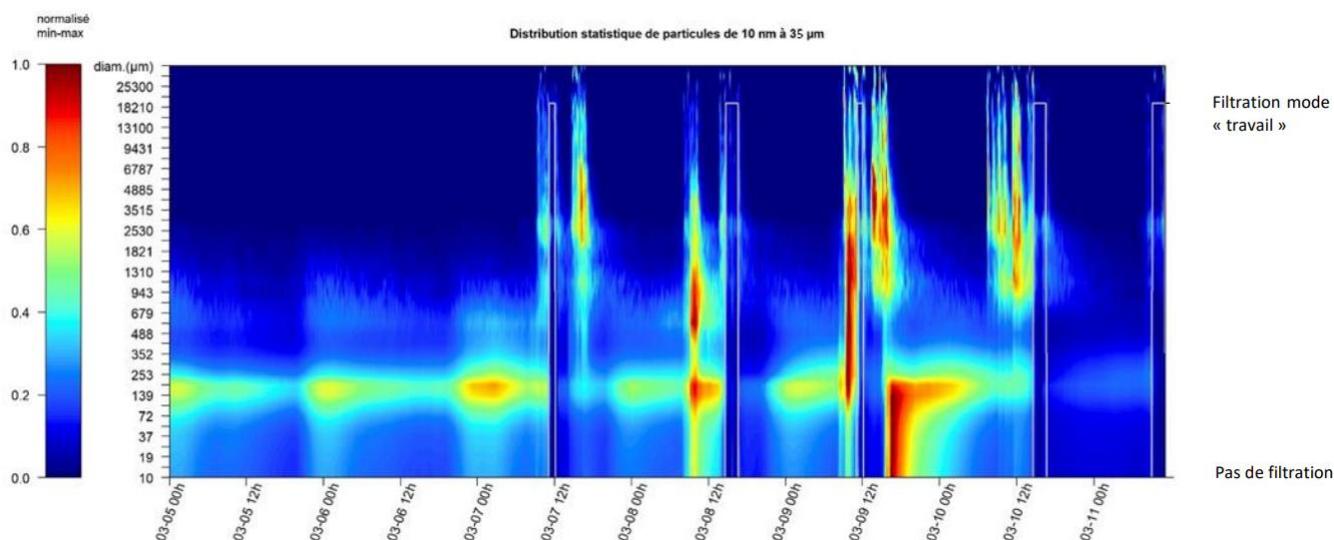


Figure 35 : Distribution statistique des particules de 10 nm à 35 µm en fonction de la mise en marche des épurateurs d’air dans la salle de classe A326 du Lycée Diderot de Marseille

Le Tableau 7 montre que le système d’épuration occasionne une efficacité d’épuration homogène de 70 % sur les 7 canaux des classes de tailles de 10 à 100 nm quand les portes et fenêtres de la classe sont fermées. Cette efficacité varie en fonction des configurations d’ouverture des portes et fenêtres (entre 40 et 70 %) mais reste homogène entre les différentes classes de particules ultrafines.

Tableau 7 : Efficacité d’épuration des gammes de particules de 10 nm à 2,5 µm dans la salle A326

| Gammes de particules (nm) | total counts | 10-14 | 14-19 | 19-27 | 27-37 | 37-52 | 52-72 | 72-100 | 100-139 | 139-193 | 193-253 | 253-298 | 298-352 | 352-414 | 414-488 | 488-576 | 576-679 | 679-800 | 800-943 | 943-1112 | 1112-1310 | 1310-1545 | 1545-1821 | 1821-2146 | Ouverture fenêtre | Ouverture porte |
|---------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------------|-----------------|
| Lundi 07/03 | -71% | -68% | -69% | -70% | -70% | -71% | -71% | -71% | -71% | -70% | -70% | -71% | -71% | -71% | -70% | -69% | -67% | -66% | -63% | -67% | -61% | -63% | -59% | non | non | |
| Mardi 08/03 | -70% | -68% | -70% | -71% | -72% | -71% | -71% | -69% | -69% | -67% | -63% | -62% | -62% | -64% | -64% | -65% | -62% | -56% | -51% | -45% | -50% | -47% | -39% | oui | non | |
| Mercredi 09/03 | -52% | -44% | -48% | -50% | -51% | -52% | -52% | -51% | -51% | -51% | -54% | -56% | -57% | -58% | -58% | -55% | -52% | -48% | -51% | -52% | -51% | -54% | -54% | oui | non | |
| Jeudi 10/03 | -61% | -54% | -56% | -58% | -60% | -60% | -61% | -62% | -61% | -61% | -63% | -63% | -64% | -65% | -64% | -63% | -62% | -61% | -59% | -58% | -60% | -60% | -57% | non | oui | |
| Vendredi 10/03 | -44% | -37% | -39% | -40% | -41% | -41% | -43% | -43% | -44% | -45% | -46% | -52% | -50% | -48% | -46% | -44% | -44% | -38% | -42% | -31% | -34% | -10% | -13% | -32% | non | oui |

Les concentrations de PUF observées hors période d'épuration dans les différentes pièces du lycée investigué sont comprises entre 1 000 et 15 000 particules par cm^3 .

Les épurateurs fournissant des débits supérieurs à 5 vol/h , avec une filtration H13, peuvent s'avérer efficaces pour réduire de manière significative le nombre de particules ultrafines dans les ambiances intérieures (dans les conditions où les fenêtres et portes sont fermées).

Ils ne doivent pas de substituer au renouvellement d'air mais peuvent limiter l'impact de l'entrée des particules ultrafines, notamment pour les bâtiments situés dans les environnements où la qualité de l'air ambiant est dégradée.

4. CE QU'IL FAUT RETENIR SUR LES PUF EN AIR INTERIEUR

En air intérieur, peu d'études françaises abordent le sujet des PUF. Seule la campagne nationale bureaux de l'OQAI (sur 129 bâtiments) a permis d'obtenir une médiane des concentrations de ces types de bâtiment de **6 900 particules/ cm^3** .

Les études conduites par AtmoSud sur les PUF en air intérieur ne visent pas à être représentatives des parcs-type de bâtiments, mais elles ont pour objectif d'évaluer l'impact de certaines sources de PUF dans les espaces clos.

Trois principales études ont été menées en ce sens :

- Dans les Enceintes Ferroviaires Souterraines (EFS), les niveaux moyens du nombre de particules sont de **9 000 particules/ cm^3** . Les mesures granulométriques ont permis de démontrer que le matériel roulant du métro de Marseille n'est pas à l'origine des concentrations intérieures de particules ultrafines, qui sont principalement influencées par les niveaux de concentrations de l'air extérieur.
- Dans les logements et vis à vis de l'impact du chauffage au bois, les niveaux moyens du nombre de particules sont de **4 700 particules/ cm^3** avec présence d'un foyer ouvert contre **400 particules/ cm^3** avec un insert performant. Le changement du système de chauffage a occasionné une baisse du nombre de PUF d'un facteur de 15 à 30 selon les gammes de tailles.
- Dans les salles de classe de lycée, des mesures pour l'évaluation de l'efficacité de techniques d'épuration d'air ont mis en évidence des niveaux moyens de **2 000 à 3 000 particules/ cm^3** . L'analyse granulométrique a montré une efficacité de la filtration des PUF significative et homogène en fonction des gammes de taille de PUF de l'ordre de 70 % quand les portes et fenêtres sont fermées.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] 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 »
- [2] Dalmora et al.(2016). Nanoparticulate mineral matter from basalt dust wastes, Chemosphere, Volume 144, February 2016, Pages 2013-2017. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653515302411?via%3Dihub>
- Dias et al., 2014, Nanominerals and ultrafine particles from coal fires from Santa Catarina, South Brazil, International Journal of Coal Geology, Volume 122, 1 February 2014, Pages 50-60 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166516213002784?via%3Dihub>
- Islam et al., 2019, Kronbauer et al., 2013, Geochemistry of ultra-fine and nano-compounds in coal gasification ashes: A synoptic view, Science of The Total Environment, Volumes 456–457, 1 July 2013, Pages 95-103 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969713002519?via%3Dihub>
- [3] Asma Beji. Caractérisation physico-chimique des particules émises hors échappement par le trafic routier. Génie des procédés. Université de Lyon, 2020. Français. NNT : 2020LYSE1206 .tel-03546512. <https://theses.hal.science/tel-03546512>
- [4] Mathissen, M., Scheer, V., Vogt, R., Benter, T., 2011. Investigation on the potential generation of ultrafine particles from the tire–road interface. Atmos. Environ. 45, 6172–6179. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.08.032>
- [5] Agudelo-Castañeda et al., 2019 Cluster analysis of urban ultrafine particles size distributions. Atmos. Pollut. Res., 10 (1) (2019), pp. 45-52, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1309104218303222?via%3Dihub>
- [6] Isabella Annesi-Maesano, 2017. The air of Europe: where are we going? Eur Respir Rev 2017;26(146).Extrait Pollution de l'air : actualités. La lettre du pneumologue. Vol XXII n°1 janv-fev 2019 https://www.edimark.fr/revues/la-lettre-du-pneumologue/n-1-fevrier-2019-copy/pollution-de-lair-actualites#dfliip-reader_trigger/3/
- [7] OMS (2021). Ligne directrice OMS relatives à la qualité de l'air – Résumé d'orientation. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/346555/9789240035423-fre.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [8] LCSQA (2021). Bilan des niveaux de concentrations particulières en nombre au sein du dispositif national en comparaison à l'échelle européenne – décembre 2021. https://www.lcsqa.org/system/files/media/documents/LCSQA2020_Bilan%20des%20niveaux%20de%20PNC_LNE_D%C3%A9cembre%202021.pdf
- [9] AtmoSud (2018). Plan de surveillance des particules dans la région Provence-Alpes-Côte d'Azur – granulométrie particules ultrafines. Bilan des mesures 2017 et bilan particule 2018 à Marseille et Port-de-Bouc. https://www.atmosud.org/sites/sud/files/content/migrated/atoms/files/mesures_granulometrie_bilan_2017_vf.pdf
https://www.atmosud.org/sites/sud/files/content/migrated/atoms/files/200124_bilan_pm_2018_atmosud.pdf
- [10] Numtech (2015). Projet Scenarii : évaluation des risques sanitaires liés aux émissions atmosphériques dans la zone de l'Étang de Berre et l'Ouest des Bouches-du-Rhône – novembre 2015. <https://www.atmosud.org/publications/projet-scenarii-simulation-de-scenarii-de-pollution-atmospherique-pour-une-evaluation>
- [11] Atmosud (2017). Projet POLIS « POLLuants d'Intérêt sanitaire » Rapport final – mars 2017. <https://www.atmosud.org/publications/etude-polluants-dinteret-sanitaire-resultats-2015-2016> et <https://www.atmosud.org/publications/etude-polluants-dinteret-sanitaire-resultats-2017>
- [12] Airfobep (2004) Bilan opérationnel du dispositif STERNES. <https://www.atmosud.org/publications/region-de-letang-de-berre-bilan-operationnel-du-dispositif-sternes>
- [13] Atmosud (2020) Quelle qualité de l'air pour les riverains des ports de Marseille et Nice. Synthèse des travaux

sur les ports. https://www.atmosud.org/sites/sud/files/content/migrated/atoms/files/200511_synthese_travaux_ports_2018.pdf

[14] Atmosud (2021). Analyse des Particules Ultrafines à l'aéroport de Nice (06) (janvier-octobre 2020). https://www.atmosud.org/sites/sud/files/medias/documents/2023-01/210527_rapport_puf_aeroport_nice.pdf

[15] Airparif (2023). Campagne de mesure parisienne sur les particules ultrafines. Disposer d'une meilleure compréhension de la variabilité des PUF dans Paris.(Volet n°1, mesures du 31 janvier au 5 mai 2022) https://www.airparif.fr/sites/default/files/document_publication/Rapport_PUF_Paris_hiver_printemps_2022.pdf

[16] Airparif (2024). Mesure de particules ultrafines autour de l'aéroport de Paris-Charles-de-Gaulle. <https://www.airparif.fr/etudes/2024/etude-mesure-de-particules-ultrafines-autour-de-laeroport-de-paris-cdg>

[17] AtmoGrandEst (2023). Campagne de mesure exploratoire des particules ultrafines sur la plateforme aéroportuaire de Bâle-Mulhouse. <https://www.atmo-grandest.eu/sites/grandest/files/medias/documents/2023-03/Campagne%20de%20mesure%20des%20particules%20ultrafines%20sur%20%27EuroAirport.pdf>

[18] L'essentiel sur le rapport final des campagnes de mesure de particules ultrafines dans les environs de l'aéroport. <https://www.airpl.org/rapport/l-essentiel-sur-le-rapport-final-des-campagnes-de-mesure-de-particules-ultrafines-dans-les-environs-de-l-aeroport>

[19] AtmoGrandEst (2020). Rapport bibliographique sur les particules ultrafines.

[20] O. Regniers, « Les particules diesel ultrafines : techniques de mesure à l'émission et à l'immission », 2006.

[21] AtmoNouvelle-Aquitaine (2022). Bilan annuel de la qualité de l'air en Nouvelle Aquitaine. https://www.atmo-nouvelleaquitaine.org/sites/nouvelleaquitaine/files/medias/documents/2023-06/AtmoNA_BAQA-2022_extrait_64pyreneesatlantiques_2023-06-16.pdf

[22] ACNUSA (2017). Particules ultrafines et aviation - Etude bibliographique.

[23] Airports Council International, « Ultrafines particules at airports - Current understanding of ultrafine particle emissions and concentrations at airports in 2018 », 2018.

[24] S. Zhang, Alexandre Thomasson, B. Mesbah, Pierre-Yves Guernion, F. Pin, *et al.* La surveillance des particules ultrafines en France. 31. Congrès Français sur les Aérosols (CFA 2018), Jan 2018, Paris, France. ineris-01863325

[25] Valeurs guides de qualité d'air intérieur - Particules, ANSES 2010. <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2004etVG007Ra.pdf>

[26] Valeurs repères d'aide à la gestion dans l'air des espaces clos : les particules. HCSP 2013. https://www.hcsp.fr/Explore.cgi/Telecharger?NomFichier=hcspr20130614_valrepgestairespclosparticules.pdf

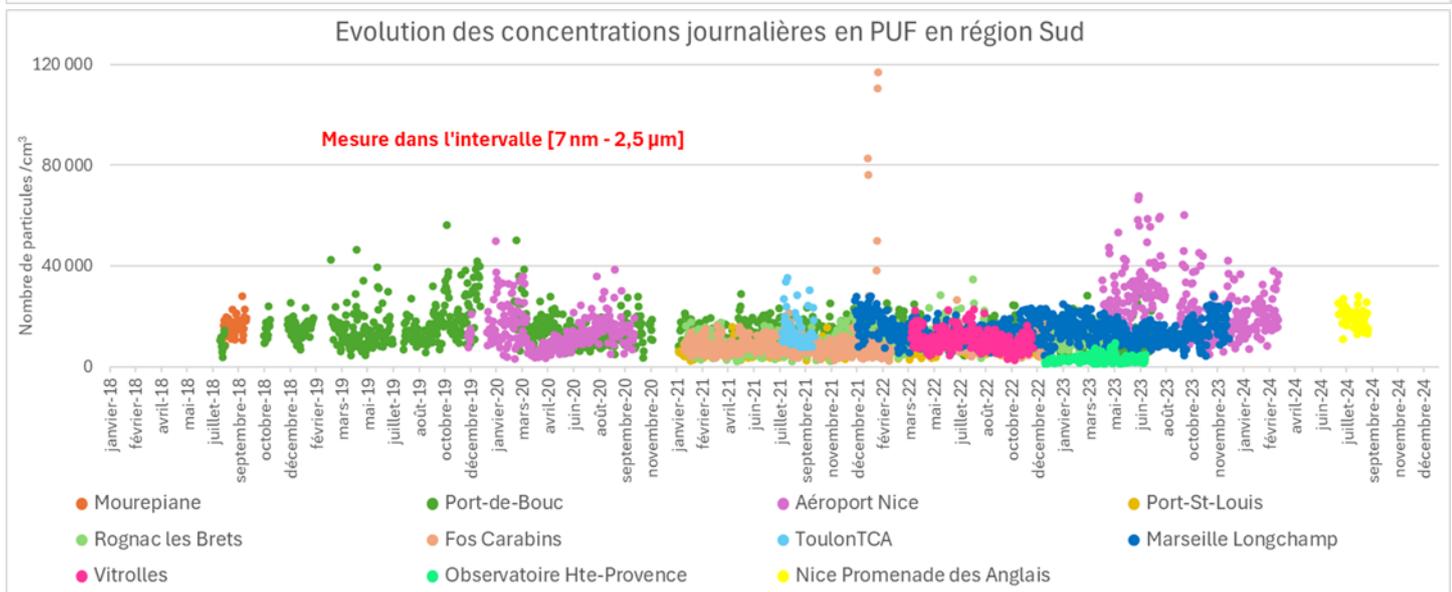
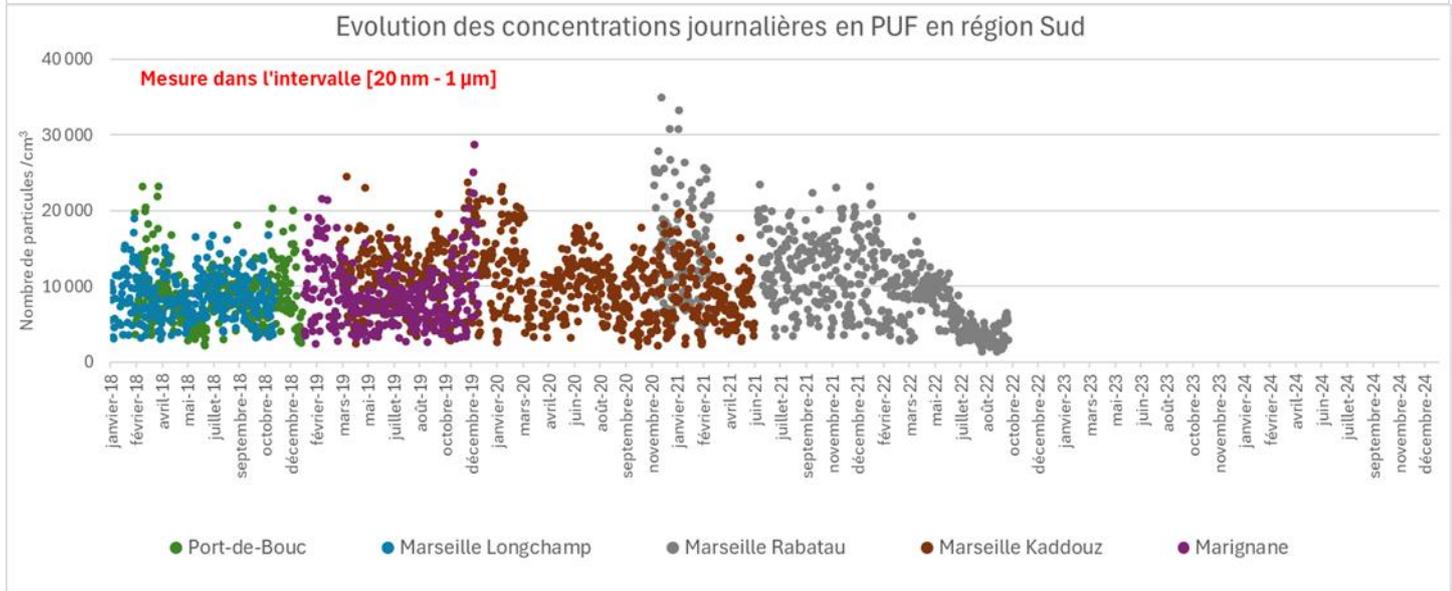
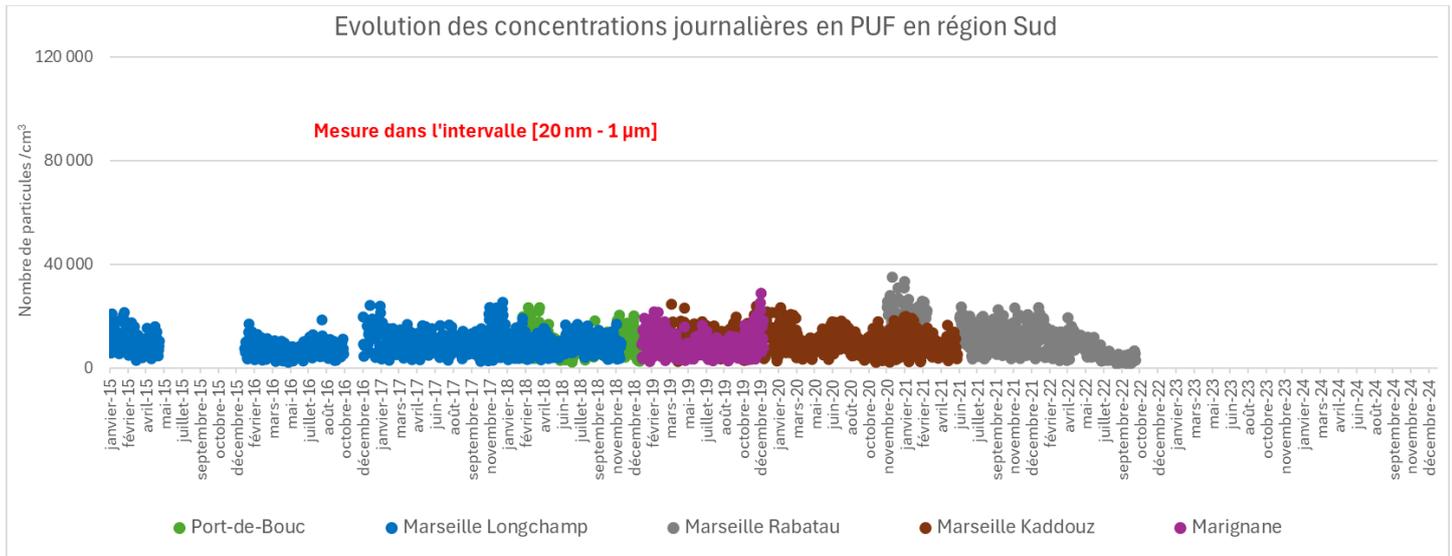
[27] Qualité de l'air intérieur du métro de Marseille Campagne 2019 – AtmoSud - Avis de l'Anses - Rapport d'expertise collective - Janvier 2021. https://www.atmosud.org/sites/sud/files/medias/documents/2023-01/201102_rapport_metro_rtm3-vf.pdf

[28] Pollution chimique de l'air des enceintes de transports ferroviaires souterrains et risques sanitaires associés chez les travailleurs - Avis de l'Anses - Rapport d'expertise collective - Septembre 2015. <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2011sa0265Ra.pdf>

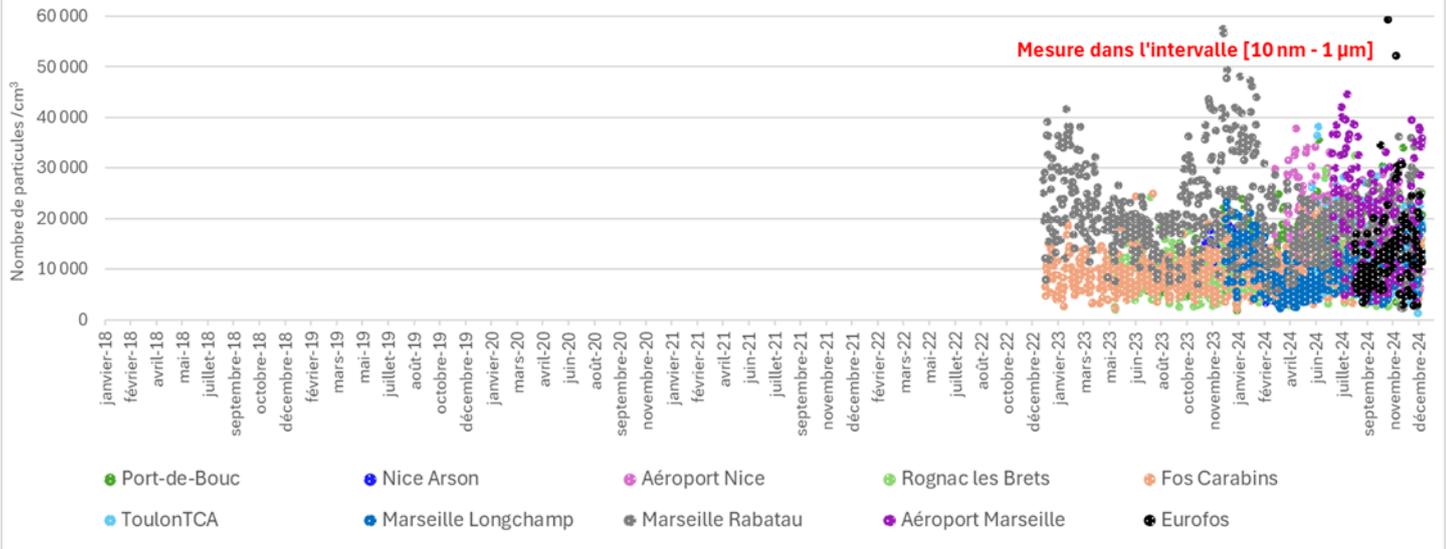
[29] Évaluation de l'efficacité d'un épurateur d'air intérieur en condition réelle d'utilisation Bâtiment d'enseignement secondaire - Lycée Diderot Marseille Juillet 2022. https://www.atmosud.org/sites/sud/files/medias/documents/2022-08/220722_Rapport_cPure_Diderot_Marseille.pdf

[30] Evaluation de la qualité de l'air sur et autour de la plateforme aéroportuaire de Marseille Provence, 2024. <https://www.atmosud.org/etude/evaluation-qualite-de-lair-autour-de-laeroport-marseille-provence-2024>

ANNEXE 1 : ÉVOLUTION DES CONCENTRATIONS JOURNALIÈRES DEPUIS 2015



Evolution des concentrations journalières en PUF en région Sud





www.atmosud.org

AtmoSud
Inspirer un air meilleur

A propos d'AtmoSud

Siège social

146 rue Paradis « Le Noilly Paradis »
13294 Marseille Cedex
Tel. 04 91 32 38 00
Fax 04 91 32 38 29
Contact.air@atmosud.org

Etablissement de Martigues

06Route de la Vierge
13500 Martigues
Tel. 04 42 13 01 20
Fax 04 42 13 01 29

Etablissement de Nive

37 bis avenue Henri Matisse
06200 Nice
Tel. 04 93 18 88 00

SIRET : 324 465 632 00044 – APE – NAF : 7120B – TVA intracommunautaire : FR 65 324 465 632