

CARACTERISATION DE L'EXPOSITION AUX PARTICULES ULTRAFINES PAR LA SURFACE DEPOSEE

K. Sartelet^{*,1}, L. Lugon¹, S. Park¹ et F. Gaie-Levrel²

¹CEREA, Ecole nationale des ponts et chaussées, Institut Polytechnique de Paris, EdF R&D, IPSL, Marne la Vallée, France

²Airparif, Observatoire de la qualité de l'air en Ile-de-France, Paris, France

*Courriel de l'orateur : karine.sartelet@enpc.fr

TITLE

Characterization of Exposure to Ultrafine Particles Using Deposited Surface Area

RESUME

Les particules ultrafines (PUF, <100 nm) présentent de fortes concentrations en nombre et la capacité de franchir des barrières biologiques, notamment après leur dépôt dans les alvéoles pulmonaires et la région olfactive. Leur distribution en taille, leur composition et leurs concentrations ont été simulées pour l'hiver 2020–2021 à l'aide de la chaîne CHIMERE/MUNICH/SSH-aerosol sur trois domaines imbriqués, en s'appuyant sur les inventaires d'émissions européens et franciliens. L'exposition humaine a été quantifiée via la surface déposée (LDSA), en particulier dans les alvéoles pulmonaires et la région olfactive, avec un dépôt systématiquement plus élevé chez les enfants que chez les adultes. La croissance hygroscopique des particules dans l'organisme (jusqu'à 99,5 % d'humidité relative) a été intégrée grâce au facteur de croissance issu de la théorie de Köhler, permettant une estimation réaliste et cohérente de l'exposition aux PUF.

ABSTRACT

Ultrafine particles (UFP, <100 nm) exhibit high number concentrations and the ability to cross biological barriers, particularly after depositing in the pulmonary alveoli and in the olfactory region. Their size distribution, composition, and concentrations were simulated for winter 2020–2021 using the CHIMERE/MUNICH/SSH-aerosol modeling chain over three nested domains, based on European and Paris-region emission inventories. Human exposure was quantified using the deposited surface area (LDSA), especially in the alveolar and olfactory regions, with systematically higher deposition in children than in adults. Hygroscopic growth inside the body (up to 99.5% relative humidity) was accounted for through the growth factor derived from Köhler theory, enabling a realistic and consistent estimation of exposure to UFP.

MOTS-CLÉS : particules ultrafines, arbre respiratoire, dépôt, alvéole, olfactif

KEYWORDS: ultrafine particles, respiratory tract, deposited surface, alveolus, olfactory

Les particules ultrafines (PUF) se caractérisent par des concentrations en nombre élevées mais une faible masse, et possèdent la capacité de traverser certaines barrières biologiques, ce qui leur confère un potentiel d'effets systémiques. Elles ne sont pas encore prises en compte dans les réglementations basées sur la masse (PM_{2.5}, PM₁₀), leur contribution massique étant négligeable.

Les associations entre l'exposition aux UFP et la mortalité ou les hospitalisations sont moins cohérentes que pour les PM_{2.5}, mais des effets spécifiques ont été mis en évidence, notamment des impacts respiratoires et cardiovasculaires différés, en particulier chez les enfants. De plus, un ensemble de travaux récents fait émerger des preuves concernant des effets neurologiques. Les mesures en concentrations massiques ne reflètent pas toujours de manière adéquate les réponses biologiques, alors que plusieurs études toxicologiques ont montré que la surface particulaire y est étroitement liée. La surface est également identifiée comme la mesure de dose la plus pertinente pour la toxicité aiguë des PUF dans le poumon et plus largement des particules atmosphériques sub-microniques.

1. MODELISATION DE LA QUALITE DE L'AIR

La qualité de l'air a été simulée à l'aide de la chaîne de modèles CHIMERE/MUNICH/SSH-aerosol (Sartelet et al. 2025). Les simulations couvrent une période de trois mois, du 1er décembre 2020 au 28 février 2021, avec une chimie détaillée et une dynamique des aérosols complète. Elles incluent à la fois les polluants réglementés (NO₂, O₃, PM_{2.5}, PM₁₀) et les polluants émergents, notamment les PUF en termes de distributions granulométriques en nombre et concentrations en nombre, ainsi que la composition chimique particulaire (carbone suie, composés organiques, inorganiques et poussières).

La configuration du modèle repose sur trois domaines imbriqués :

(i) FRA9, couvrant la France et l'Europe de l'Ouest (1476 × 1566 km²) avec une résolution de 9 km x 9 km ;

- (ii) IDF3, correspondant à la région Île-de-France (495 × 513 km²) en résolution 3 km x 3 km;
- (iii) IDF1, englobant le Grand Paris en résolution 1 km x 1 km.

Les conditions aux limites du domaine FRA9 proviennent des réanalyses CAMS.

Les émissions sont décrites à partir de l'inventaire EMEP (0,1° × 0,1°) pour l'Europe et des inventaires détaillés d'Airparif pour l'Île-de-France. Concernant les émissions de PUF, elles sont estimées par secteur d'activité à partir des ratios PM_{0,1}/PM₁ et PM₁/PM_{2,5} et leur distribution en taille est prescrite selon Park et al. (2025).

L'évaluation du modèle montre que les concentrations simulées, pour l'ensemble des polluants réglementés et émergents, présentent un bon accord avec les observations sur les stations rurales, périurbaines, urbaines de fond et trafic. Les performances atteignent les indicateurs statistiques les plus exigeants.

2. DEVENIR DES PARTICULES DEPOSEES

La Lung-Deposited Surface Area (LDSA) représente la surface des particules déposées dans l'appareil respiratoire humain (extrathoracique ET, trachéobronchique TB et alvéolaire AL), en tenant compte de leur efficacité de dépôt dépendante de la taille. Le dépôt dans la région alvéolaire (LDSA_{AL}) est particulièrement pertinent, car la clairance mucociliaire y étant faible, les particules présentent une rétention à long terme, susceptible d'induire une inflammation persistante, ainsi qu'une éventuelle translocation des PUF vers la circulation sanguine. Dans la région extrathoracique (ET), une fraction des PUF peut emprunter la voie olfactive et atteindre le cerveau par transport neuronal, impliquant une attention particulière au LDSA dans la région olfactive (LDSA_{Olf}).

2.1. Calcul du LDSA

Dans chaque région de l'appareil respiratoire, la LDSA est estimée à partir de la distribution granulométrique en nombre et de la fonction de dépôt pulmonaire évaluée avec le modèle Multiple-Path Particle Dosimetry (MPPD v3.04 (Miller et al. 2016)) pour un adulte masculin en bonne santé au repos ainsi que pour un enfant de 3 ans. Pour les particules de diamètre aérodynamique inférieur à 100 nm, la LDSA dans la région olfactive (LDSA_{Olf}) est déduit du dépôt en région ET à partir d'une paramétrisation basée sur des simulations de mécanique des fluides numériques (Garcia et al., 2015).

Pour la comparaison entre modèle et mesures, la LDSA est déduite des distributions en nombre simulées et mesurées avec des MPSS (mobility particle size spectrometer) aux stations de mesures d'Airparif (Genevilliers, Paris 1er - Les Halles, Tremblay en France, Bois-Herpin), en considérant des particules sèches, conformément aux conditions expérimentales. De bonnes comparaisons modèle/mesures sont obtenues, comme détaillé dans le Tableau 1.

Tableau 1. Comparaison des moyennes simulées et obtenues à partir de mesures MPSS aux stations d'Airparif pour LDSA_{AL} et LDSA_{Olf} résultant du dépôt des PUF

	LDSA _{AL} (µm ² cm ⁻³)	LDSA _{Olf} (µm ² cm ⁻³)
Mesure	7,2	0,038
Modèle	6,9	0,030

2.2. Diamètres particuliers dans l'organisme et calcul de la LDSA

Sauf lors des comparaisons directes avec les mesures, la LDSA simulée tient compte de la croissance hygroscopique des particules liée à l'absorption d'eau lorsqu'elles pénètrent dans l'organisme, où l'humidité relative peut atteindre 99,5 %. L'absorption d'eau par les particules contenant des composés inorganiques ou organiques hydrophiles, aux humidités relatives ambiantes, est calculée au cours de la simulation 3D grâce au module SSH-aerosol (Sartelet et al. 2025b) de la chaîne de modèles multi-échelle.

Le diamètre humide des particules inhalées est déterminé à partir de leur facteur de croissance (GF), qui relie la taille d'une particule à une humidité relative donnée à sa taille sèche, conformément à la théorie de Köhler. Le paramètre d'hygroscopicité (κ) est déduit des sorties du modèle 3D en comparant les diamètres humide et sec aux conditions ambiantes. À partir de ces valeurs de κ , le facteur de croissance dans les conditions corporelles est calculé à la température de l'organisme (309 K) et pour une humidité relative de 99,5 % via un processus itératif intégrant les effets de la courbure de Kelvin.

Les concentrations de LDSA sont ensuite obtenues à partir des fractions de dépôt issues du modèle MPPD, en utilisant les diamètres particulaires correspondants à une humidité relative de 99,5 %, représentative des conditions des voies respiratoires.

Comme l'absorption d'eau augmente artificiellement le diamètre des particules sans contribuer à leur toxicité, la LDSA est corrigée par le ratio de masse sèche à masse humide, de façon à exclure la fraction aqueuse non toxique et à ne considérer que le dépôt des composés particulaires réellement pertinents.

Le dépôt des PUF dans les alvéoles pulmonaires (LDSA_{AL}) montre de fortes disparités spatiales, et il est très fortement influencé par le trafic (Figure 1). La Figure 2 montre que le dépôt des PUF dans les alvéoles est considérablement plus élevé si l'absorption d'eau par les particules n'est pas pris en compte, et les disparités spatiales sont légèrement plus faibles. Le dépôt dans les alvéoles pulmonaires est plus élevé pour les enfants de 3 ans que les adultes (Figure 3).

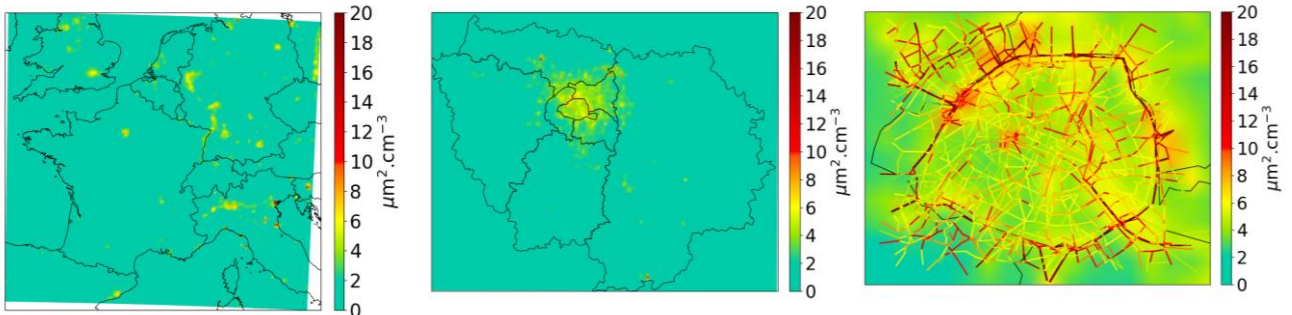


Figure 1. Dépôt des PUF dans les alvéoles pulmonaires d'adultes en France, Île-de-France et Paris

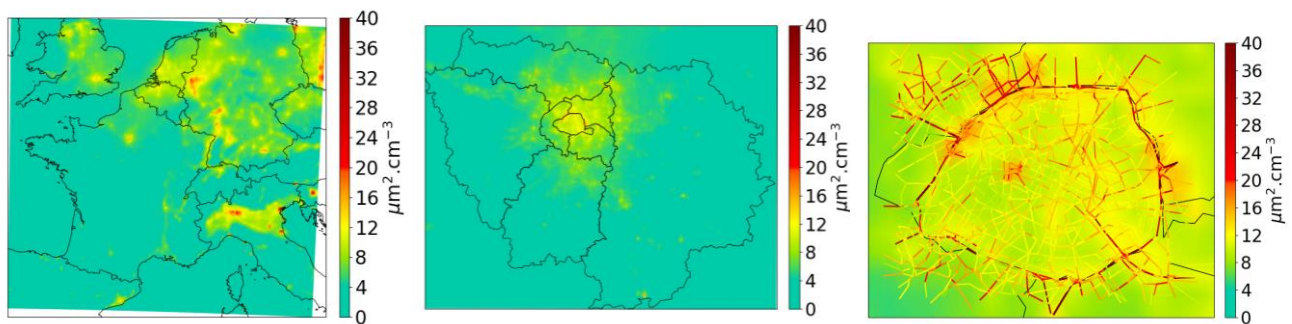


Figure 2. Dépôt des PUF dans les alvéoles pulmonaires d'adultes en France, Île-de-France et Paris sans prise en compte de l'absorption d'eau par les PUF (Facteur deux entre la barre de couleur de la Figure 1 et la Figure 2).

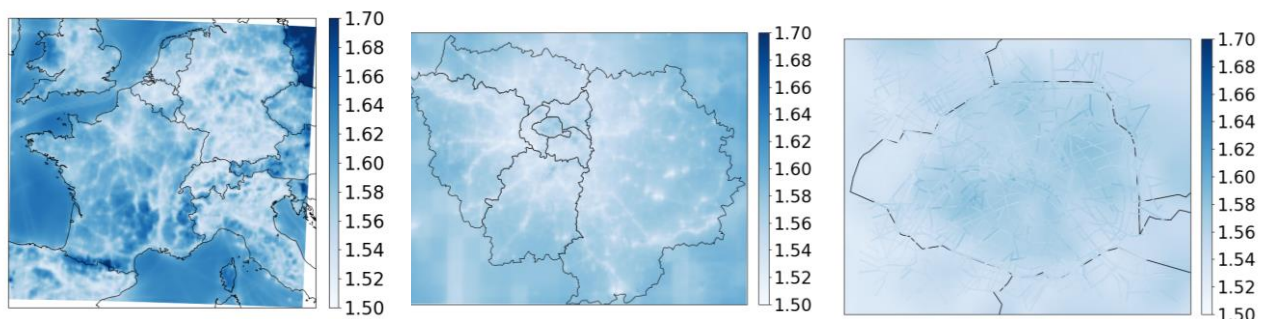


Figure 3. Ratio entre le dépôt des PUF dans les alvéoles pulmonaires d'enfants de trois ans et d'adultes en France, Île-de-France et Paris

Cette étude a bénéficié de financements du projet de recherche français ENZU (Evolution du Nombre de particules en Zones Urbaines) dans le cadre du programme AQACIA/ADEME, ainsi que du PEPR Villes

Durables (Agence Nationale de la Recherche, projet URBHEALTH ANR-24-PVD0007). Ce projet a également bénéficié de ressources informatiques et de stockage fournies par GENCI, France, au TGCC, grâce à l'allocation A0170114641 sur le supercalculateur Joliot-Curie, partition ROME.

Garcia G. J. M., J. D. Schroeter, and J. S. Kimbell (2015). Olfactory deposition of inhaled nanoparticles in humans. *Inhal. Toxicol.*, 27(8):394–403.

Miller J., B. Asgharian, J.D. Schroeter, and O. Price. (2016) Improvements and additions to the Multiple Path Particle Dosimetry model. *J. Atmos. Sci.*, 99:14–26.

Park S., L. Lugon, O. Jacquot, Y. Kim, A. Baudic, B. D'Anna, L. Di Antonio, C. Di Biagio, F. Dugay, O. Favez, V. Ghersi, A. Gratién, J. Kammer, J.-E. Petit, O. Sanchez, M. Valari, J. Vigneron, and K. Sartelet. (2025) Population exposure to outdoor NO₂, black carbon, and ultrafine and fine particles over Paris with multi-scale modelling down to the street scale. *Atmos. Chem. Phys.*, 25(6):3363–3387.

Sartelet K., J. Kerckhoffs, E. Athanasopoulou, L. Lugon, J. Vasilescu, J. Zhong, G. Hoek, C. Joly, S.-J. Park, C. Talianu, S. van den Elshout, F. Dugay, E. Gerasopoulos, A. Ilie, Y. Kim, D. Nicolae, R. M. Harrison, and T. Petäjä (2025). Air pollution mapping and variability over five European cities. *Environ. Int.*, 199:109474.

Sartelet K., Z. Wang, Y. Kim, V. Lannuque, and F. Couvidat (2025b). Advanced modeling of gas chemistry and aerosol dynamics with SSH-aerosol v2.0. *EGUsphere*, 2025:1–41.