



2020

Rapport bibliographique sur les particules ultrafines (PUF)

PERSONNES EN CHARGE DU DOSSIER

Rédaction : *Mélodie Chatain, Ingénieure d'études*
Maxime Alter, Ingénieur « Air-Santé »
Relecture : *Cyril Pallares, Responsable Unité Surveillance réglementaire et permanente*
Approbation : *Emmanuelle Drab-Sommesous, Directrice déléguée*

Référence du modèle de rapport : COM-FE-001_5

Référence du projet : SURV-EN-370

Référence du rapport : SURV-EN-370_1

Date de publication : 04/02/2021

ATMO Grand Est

Espace Européen de l'Entreprise – 5 rue de Madrid – 67300 Schiltigheim

Tél : 03 88 19 26 66 - Fax : 03 88 19 26 67

Mail : contact@atmo-grandest.eu

SOMMAIRE

GLOSSAIRE	3
RÉSUMÉ	4
INTRODUCTION.....	5
1. GENERALITES SUR LES PARTICULES ULTRAFINES	7
1.1. DÉFINITION.....	7
1.2. RÉGLEMENTATIONS.....	7
1.3. MOYENS DE MESURE	8
2. SOURCES DES PARTICULES ULTRAFINES	10
2.1. TRAFIC ROUTIER	10
2.2. TRAFIC AÉRIEN.....	11
2.3. NUCLÉATION RÉGIONALE.....	12
2.4. AUTRES SOURCES	12
3. PROPRIÉTÉS DES PARTICULES ULTRAFINES	13
3.1. COMPORTEMENT DANS L'ATMOSPHÈRE	13
3.2. TENDANCES ET VARIATIONS	15
3.3. PROPRIÉTÉS ET COMPOSITIONS CHIMIQUES.....	17
4. EFFETS SANITAIRES ET ENVIRONNEMENTAUX DES PARTICULES ULTRAFINES	18
4.1. EXPOSITION	18
4.2. MÉCANISMES D'ACTION	19
4.3. EFFETS SANITAIRES	20
4.4. EFFETS ENVIRONNEMENTAUX	21
CONCLUSION	22

GLOSSAIRE

Couche limite : couche de l'atmosphère dont le flux d'air subit l'influence de la surface terrestre continentale ou océanique à une courte échelle temporelle (inférieure à la journée).

Diffusion : mécanisme de mouvement des particules de petites tailles dans l'air.

Dilution : mécanisme de baisse des concentrations d'un polluant par augmentation du volume d'air disponible pouvant le contenir.

Dispersion : mécanisme de mouvement d'un polluant par l'action du vent.

Inversion de température : dans la troposphère (premiers kilomètres de l'atmosphère), normalement l'air le plus chaud se trouve près du sol avec une diminution de la température de l'air avec l'altitude. Cependant, des phénomènes d'inversion de température peuvent se produire lorsque l'air près du sol se trouve plus froid. Dans ce cas, l'air le plus chaud se trouve en altitude et joue le rôle de « couvercle » empêchant l'air froid (plus lourd) de s'élever et donc se disperser dans l'atmosphère.

Mécanismes de clairance : mécanismes biologiques de suppression de tout corps étranger.

Mode : Lors de processus d'émissions de particules ou pour les particules retrouvées dans l'atmosphère, certaines tailles de particules peuvent être majoritaires par rapport aux autres : elles sont identifiées par un mode. Il existe 3 modes principaux : mode nucléation, mode accumulation et mode grossier :

- **Mode nucléation** : ce mode correspond aux particules ultrafines dont le diamètre est inférieur à 100 nm. Les particules de cette taille sont majoritairement secondaires et formées par le processus de nucléation d'où son nom.
- **Mode accumulation** : ce mode correspond aux particules fines dont le diamètre est compris entre 100 nm et 2,5 µm. Les particules de cette taille peuvent être directement émises ou issues de processus de grossissement de particules plus fines. Son nom est issu de leur temps de vie long dans l'atmosphère qui permet leur accumulation.
- **Mode grossier** : ce mode correspond aux particules grossières dont le diamètre est compris entre 2,5 et 10 µm. Ces particules sont des particules primaires émises directement par des sources naturelles et anthropiques (processus d'abrasion, sels marins).

Nucléation : mécanisme de conversion d'un gaz en particules dans des conditions particulières à l'origine de la formation des particules secondaires.

PM₁₀ (Particulate Matter : matière particulaire en français) : particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 10 µm.

PM_{2,5} (Particulate Matter : matière particulaire en français) : particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 2,5 µm.

Pression partielle d'un gaz x : pression du gaz x dans un mélange (par exemple l'air).

Pression de vapeur saturante : pression à laquelle un gaz est en équilibre avec ses autres états (liquide ou solide).

PUF (Particules Ultrafines) : particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 100 nm.

Sursaturation : phénomène apparaissant lorsque la pression partielle d'un gaz dans l'air est supérieure à sa pression de vapeur saturante.

RÉSUMÉ

Les particules ultrafines (PUF) ont été classées comme polluants prioritaires par l'ANSES en 2018. Atmo Grand Est a donc initié un projet interne basé sur l'amélioration des connaissances sur les particules fines et ultrafines dont ce rapport bibliographique fait partie. Les PUF présentent des propriétés physiques spécifiques compte tenu de leur faible taille. Elles contribuent peu à la concentration massique mais dominent largement la concentration en nombre. A l'heure actuelle, aucune réglementation n'implique directement les particules ultrafines mais une norme est en cours de rédaction pour la mesure de la concentration en nombre. Les particules ultrafines sont majoritairement émises par les processus de combustion et notamment le trafic routier en zone urbaine. Emises par différentes sources et soumises à de nombreux processus dans l'atmosphère, les particules ultrafines présentent une variabilité spatiale et temporelle importante. Les études sanitaires disponibles mettent en évidence une association entre l'exposition aux particules ultrafines et l'atteinte des systèmes cardiovasculaire et respiratoire. Les mécanismes d'actions des PUF sont associés à des processus spécifiques à cette gamme de particules. Les particules ultrafines sont notamment capables de se déposer dans la partie la plus profonde du système respiratoire (alvéoles pulmonaires) et de traverser les barrières biologiques puis d'être transloquées vers d'autres organes par le système sanguin. De plus, les PUF présentent une surface réactive plus importante qui favorise l'adsorption de composés potentiellement toxiques à leur surface. Ces différents processus ont été mis en évidence mais ils sont dépendants d'autres paramètres à l'image de la composition chimique et des barrières biologiques existantes dont l'efficacité est variable. Les mécanismes d'actions ne sont pas encore complètement élucidés à l'heure actuelle et les données disponibles ne permettent pas d'établir un lien de causalité direct entre les PUF et les effets sanitaires. L'augmentation du suivi des particules ultrafines est indispensable pour permettre une meilleure compréhension de leurs propriétés mais surtout pour réaliser des études épidémiologiques pour mieux caractériser leurs effets sanitaires et les mécanismes mis en jeu.

INTRODUCTION

La pollution atmosphérique est un enjeu majeur en France. D'une part, cette pollution a un coût : la commission d'enquête sénatoriale en 2015 a estimé entre 68 et 97 milliards d'euros par an le coût sanitaire et non sanitaire (impacts sur les rendements agricoles, érosion des bâtiments...) de la pollution de l'air extérieur[1]. D'autre part, la pollution atmosphérique est responsable de problème sanitaire, notamment sur le système respiratoire et le système cardio-vasculaire. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a classé la pollution de l'air extérieur comme cancérigène certain pour l'Homme.

Cette pollution est fortement associée à la présence de particules en suspension dans l'air. Les particules sont couramment appelées PM_{10} ou $PM_{2,5}$ (pour *Particulate Matter*, matière particulaire en anglais) en fonction de leur diamètre maximal égal à 10 ou 2,5 μm respectivement. Ces particules, de taille micrométrique sont invisibles à l'œil nu (Figure 1). Et pourtant, elles sont responsables de 48 000 décès par an d'après une estimation de Santé Publique France en 2016[2]. A l'heure actuelle, l'impact majeur des particules sur la santé humaine est clairement identifié. En 2009, l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) a indiqué qu'« il n'est pas possible d'observer un seuil de concentration en particules en deçà duquel aucun effet sanitaire ne serait constaté »[3].

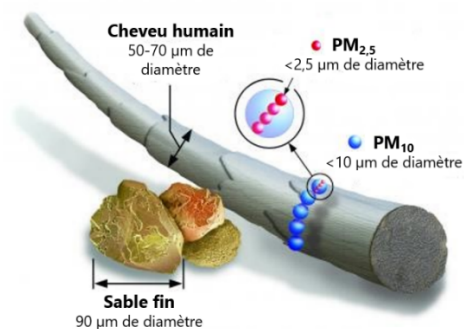


Figure 1 : Classification des particules (modifié de US-EPA, *Particulate Matter Pollution*[4])

Les particules sont soit primaires c'est-à-dire émises directement dans l'atmosphère sous forme particulaire, soit secondaires lorsqu'elles sont formées par des réactions (photo)chimiques dans l'atmosphère à partir de gaz précurseurs. Les sources de particules ou de gaz précurseurs de particules (NO_2 , NH_3 , SO_2 ...) peuvent être d'origine naturelle ou anthropique. Leur origine influence leur composition chimique et leur taille. Trois familles majeures (Figure 2) sont couramment utilisées :

- Les particules grossières définies comme les particules dont le diamètre est compris entre 10 et 2,5 μm . Cette famille est majoritairement associée à des processus physiques et contient majoritairement des particules formées suite à l'érosion des sols, par les pollens ou encore les embruns marins.
- Les particules fines sont définies comme les particules dont le diamètre est compris entre 2,5 et 0,1 μm . Ces particules sont issues directement des processus de combustion mais peuvent également être formées dans l'atmosphère.
- Les particules ultrafines définies comme les particules dont le diamètre est inférieur à 0,1 μm ($PM_{0,1}$). Cette famille est constituée de particules issues des processus de combustion ou formées à partir de gaz précurseurs.

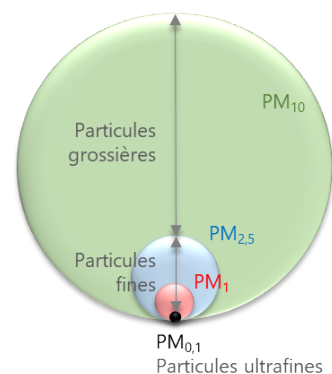


Figure 2 : Gamme de tailles particules

La plus petite gamme de particules, les particules ultrafines, est composée de particules plus de 100 fois plus fines que les PM_{10} . En 2018, l'ANSES a mené une étude d'identification, de catégorisation et d'hierarchisation des polluants non réglementés[5]. Les Particules Ultrafines (PUF) sont intégrées à la liste des polluants prioritaires dont le suivi doit être renforcé au niveau national compte tenu des données sanitaires disponibles. À la suite de cette déclaration, ATMO Grand Est a mis en place un projet dès la fin de l'année 2018 portant sur l'amélioration des connaissances sur les particules et notamment les particules ultrafines. Ce rapport bibliographique présente les connaissances disponibles à l'heure actuelle sur les PUF. Les propriétés générales, physiques et chimiques spécifiques des particules ultrafines sont évoquées ainsi que l'aspect sanitaire et environnemental.

1. GENERALITES SUR LES PARTICULES ULTRAFINES

1.1. DÉFINITION

Les particules ultrafines sont définies comme les particules dont le diamètre est inférieur à 0,1 µm soit 100 nm. Cette définition désormais acceptée par la majorité de la communauté scientifique a tout de même bien évolué au cours du temps. La spécificité de ces particules réside en grande partie dans leur petite taille. Cette dernière leur confère des propriétés physico-chimiques particulière qui influencent leur comportement dans l'atmosphère et leurs effets sanitaires.

A l'heure actuelle, deux grandes familles de particules de taille nanométrique sont définies :

- Les particules « intentionnelles » regroupent les particules de taille nanométrique fabriquées intentionnellement (souvent définies comme les nanomatériaux)[6]. Ces particules permettent d'obtenir des modifications de certaines propriétés du matériau à cette dimension (solubilité, réactivité chimique ou biologique). Les nanomatériaux les plus utilisés sont le noir de carbone (suie synthétique) et le dioxyde de titane respectivement utilisés comme pigment noir conducteur et pigment blanc et/ou anti-UV. Les nanomatériaux sont utilisés dans un grand nombre de domaine et principalement dans le médical (vectorisation de médicaments, imagerie biomédicale...), les cosmétiques (crèmes solaires, dentifrices, shampooing...) et le transport (peintures, pneumatiques, revêtements, additifs de carburant...). Plus de 350 000 tonnes de substances à l'état nanoparticulaire ont été déclarées sur le territoire national en 2018 avec plus de 300 catégories de substances différentes[7]–[9].
- Les particules nanométriques « non intentionnelles » sont émises indirectement par d'autres processus physiques (naturels ou anthropiques) ou formées dans l'atmosphère. Ces PUF « non intentionnelles » sont majoritairement issues du processus de combustion.

Bien que leurs émissions dans l'atmosphère soient peu estimées, l'Air Quality Expert Group[10] a mis en évidence certaines voies de transfert des nanoparticules vers le compartiment atmosphérique : perte pendant le processus de fabrication, libération lors de l'utilisation comme additif de combustion (nanoparticules de cérium notamment) ou rejets accidentels. Cependant, d'après les connaissances actuelles ces voies de transfert vers l'atmosphère restent faibles, les nanoparticules intentionnelles représentent donc une part non significative des particules nanométriques trouvées dans l'atmosphère[10], [11]. En qualité de l'air, les PUF correspondent donc majoritairement aux particules nanométriques non intentionnelles.

Compte tenu de leur taille, les particules ultrafines ne représentent qu'1 à 8% de la masse totale des particules dans l'atmosphère mais elle contribue à plus de 80% de la concentration en nombre en zone urbaine[12]. La mesure de la concentration en nombre (nombre de particules/cm³) est plus pertinente pour les PUF que la mesure massique (µg/m³), habituellement utilisée pour les particules plus grosses PM₁₀ ou PM_{2,5}.

1.2. RÉGLEMENTATIONS

- **Air ambiant**

Aujourd'hui, aucune réglementation en air ambiant n'existe au niveau européen ou international et aucun seuil n'est proposé pour la surveillance des particules ultrafines compte tenu de l'absence de données sanitaires suffisantes. Les seules particules concernées par une réglementation sont les PM₁₀ et les PM_{2,5} en concentration massique.

- **Emissions**

Une avancé réglementaire sur les PUF non intentionnelles a été déployée sur le contrôle des émissions véhiculaires grâce aux normes Euro. Les normes Euro ont été introduites en 1988 par l'Union européenne dans le but de réglementer les émissions polluantes des véhicules neufs par l'obligation de respecter des valeurs limites. La prise en compte des émissions massiques des particules apparaît en 1991 avec la norme Euro 1 mise en application en 1993 et la valeur limite d'émission à respecter a été divisée par 36 entre la norme Euro 1 et la dernière norme Euro 6 en application depuis 2013 (0,36 g/kWh et 0,01 g/kWh respectivement)[13]. La prise en compte de la concentration en nombre apparaît en 2011 avec la norme Euro 5b pour les véhicules diesels puis en 2014 pour les véhicules Essence (Euro 6b) avec une valeur limite de $6 \cdot 10^{11}$ particules/cm³. La mesure suit les travaux du programme Particle Measurement Protocol (PMP) sur la concentration en nombre des particules non volatiles d'un diamètre égal ou supérieur à 23 nm[14], [15]. L'intégration de la fraction volatile et d'un diamètre minimal de 10 nm dans les normes à venir (Euro 7) sont actuellement à l'étude afin de mieux rendre compte des émissions réelles[16]–[18].

- **Production**

Seules les nanoparticules manufacturées –particules intentionnelles - font l'objet de réglementations. A l'échelle nationale depuis 2013, les fabricants, importateurs ou distributeurs de substances à l'état nanoparticulaire doivent faire une déclaration chaque année des quantités et usages pour toute activité impliquant une quantité minimale de 100 grammes d'une substance à l'état nanoparticulaire. Ces déclarations sont stockées dans une base de données gérées par l'ANSES appelée RNano[19]. A l'échelle européenne, un certain nombre de réglementation rend obligatoire le signalement de substances nanoparticulaires dans la liste des ingrédients par la notion [nano] pour les biocides depuis 2012, les cosmétiques depuis 2013 ainsi que l'alimentaire depuis 2014 mais ces obligations sont peu suivies[11].

1.3. MOYENS DE MESURE

La mesure des particules ultrafines en masse n'étant pas pertinente, l'utilisation de la concentration en nombre permet d'être plus représentatif des PUF. Cependant, il faut toutefois noter qu'aucune mesure ne donne directement la concentration totale en PUF puisque les analyseurs comptent également des particules supérieures à 100 nm. D'autres métriques telles que la composition chimique, la surface ou le potentiel oxydant sont intéressantes mais les moyens de mesure disponibles restent limités et moins robustes à l'heure actuelle.

La mesure de la concentration en nombre est faite par comptage des particules dans la gamme de mesure de l'analyseur et la mesure de la distribution granulométrique permet d'obtenir la concentration en nombre pour plusieurs gammes de taille appelés canaux. Les analyseurs disponibles permettant ces mesures reposent sur les principes généraux présentés ci-dessous :

- Le compteur optique dont le principe est basé sur la mesure de la diffusion d'un rayonnement par la particule. Pour pouvoir être détectée, les particules sont préalablement grossies par condensation d'un fluide de travail (butanol, eau) leur permettant d'atteindre une taille de l'ordre du micromètre. Ce type d'analyseur appelé Condensation Particle Counter (CPC) est fortement utilisé dans les réseaux de mesures européens.
- Le granulomètre est constitué d'une partie permettant la séparation des particules en fonction de leur taille puis d'une partie de mesure par comptage de la charge, de la radioactivité ou des rayonnements X en fonction de l'instrument. Les granulomètres les plus développés appelés Mobility Particle Size Spectrometer (MPSS) sont plus coûteux et contraignants à l'utilisation que les compteurs optiques. Ils

ne permettent pas un comptage total mais l'information de distribution granulométrique fine peut permettre de dissocier des sources et de mieux comprendre les mécanismes de formation et de grossissement.

Seule la mesure de la concentration en nombre totale par un CPC est caractérisée par une spécification technique du Comité Européen de Normalisation (CEN) depuis 2016 (CEN/XP TS 16976) en passe de se transformer en norme en 2021. Un autre projet de norme sur la mesure de la distribution granulométrique est également en cours de rédaction.

2. SOURCES DES PARTICULES ULTRAFINES

Les PUF peuvent être d'origine naturelle ou anthropique et peuvent être primaires c'est-à-dire émises directement sous forme de particules, ou secondaires c'est-à-dire formées *in-situ* dans l'atmosphère par différents processus[20].

Les particules ultrafines primaires sont majoritairement anthropiques et émises par le transport routier notamment en zone urbaine avec plus de 60% des émissions[21]. D'autres sources anthropiques comme la combustion de biomasse, les activités de cuisine, l'industrie, l'agriculture et la construction et la démolition, peuvent également être à l'origine d'émissions de PUF primaires[10]. Les sources naturelles sont moins importantes mais comprennent majoritairement les feux de forêt et dans une moindre mesure les aérosols marins et volcaniques. Que ce soit d'origine anthropique ou naturelle, la combustion est à l'origine de la plus grande partie des PUF primaires.

Les particules ultrafines secondaires sont formées par des mécanismes physiques et/ou photochimiques exigeant des précurseurs gazeux et des conditions météorologiques particulières. Deux transformations sont mises en évidence :

- La condensation de vapeurs semi-volatiles, qui se produit notamment en sortie d'échappement en parallèle des émissions primaires de PUF. Les vapeurs semi-volatiles sont en effet capables de condenser dans des conditions de pression et de températures particulières pour former de nouvelles particules.
- La nucléation de précurseurs gazeux oxydés permet la formation de nouvelles particules (réaction favorisée par la photochimie) dans l'atmosphère. Elle est majoritairement associée à la nucléation de l'acide sulfurique mais d'autres composés oxydés peuvent également nucléer à l'image de certains composés biogéniques (terpènes...) dont l'oxydation est à l'origine d'aérosols organiques secondaires (AOS).

2.1. TRAFIC ROUTIER

Le trafic routier est la source majoritaire de particules ultrafine en zone urbaine. L'intégration des véhicules diesel dans le parc automobile a permis une baisse de la consommation de carburant associée à une diminution des émissions de dioxyde de carbone (Gaz à Effet de Serre, GES), de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures. Cependant, les émissions diesel sont associées à des émissions d'oxydes d'azote, d'HAP et de particules plus élevées que les moteurs essence[22]. De nombreuses études ont permis de montrer l'importance des émissions de PUF primaires et secondaires à l'échappement des véhicules, en particulier diesel, dont les émissions sont classées cancérigènes pour l'Homme par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) depuis 2012[23]. Les études mettent en évidence que les émissions de particules ultrafines en nombre par les moteurs diesel sont supérieures à celles des moteurs essence et similaires à celles des moteurs essence à injection directe[10], [18], [21], [24].

Le trafic routier est responsable d'émissions de particules présentant une distribution bimodale :

- Un mode accumulation entre 30 et 500 nm avec un maximum entre 100 et 200 nm de diamètre correspondant aux particules primaires formées dans le moteur et émises sous forme particulaire dont une partie est inférieure à 100 nm de diamètre (PUF). Leur émission est peu dépendante des paramètres externes (température, carburant, huile moteur...) ce qui permet de rendre leur mesure plus reproductible par rapport au mode nucléation. C'est pour cette raison qu'à l'heure actuelle les mesures

à l'échappement des normes Euro ne prennent en compte que les particules supérieures à 23 nm (voir partie 1.2).

- Un mode nucléation inférieur à 30 nm avec un maximum entre 10 et 20 nm de diamètre. Le mode nucléation correspond aux particules secondaires formées après échappement par l'émission de gaz chauds contenant des vapeurs de composés organiques volatils ou semi-volatils[22]. Lorsque les gaz refroidissent en se mélangeant à l'air, la pression de vapeur saturante de ces vapeurs devient supérieure à la pression ambiante : on parle alors de sursaturation ce qui provoque la condensation du gaz en particules[22], [25]. La formation de ces PUF reste fortement dépendante de nombreux paramètres externes : condensation favorisée par les faibles températures, processus de formation et composition dépendantes du régime moteur, de la composition du carburant et des huiles moteurs, du type de processus de post-traitement des gaz d'échappement... Après émission dans l'atmosphère, ces particules ont tendance à grossir par différents mécanismes (coagulation, condensation) mais le diamètre de ces particules peut également être divisé par deux par évaporation des matières condensables à leur surface[21].

Le trafic routier est donc associé à des émissions particulières associées à un mode de nucléation dominant la répartition en nombre et un mode accumulation constituant une part importante de la masse. Le mode accumulation n'est pas constitué uniquement de PUF contrairement au mode nucléation[22]. Compte tenu de leurs processus de formation différents, leur composition est également différente (voir partie 3.3).

2.2. TRAFIC AÉRIEN

Depuis les années 2000, les études sur les PUF associées à l'aviation se sont multipliées et ont mis en évidence la dangerosité sanitaire des particules ultrafines émises à proximité des aéroports[26].

Les études mettent en évidence un mode majoritaire des PUF issues du trafic aérien : la concentration en nombre totale est dominée par les particules du mode nucléation de diamètre compris entre 10 et 20 nm[10], [26], [27]. La concentration en nombre totale est généralement supérieure pour le trafic routier par rapport à l'aérien mais la part du trafic aérien domine si l'on étudie uniquement les fractions inférieures à 20 nm. Les concentrations les plus élevées sont mesurées pour les phases d'approche de l'avion (décollage/atterrissage) avec une contribution plus importante du trafic aérien en lui-même (moteurs d'avion) par rapport à la part du trafic routier dans et autour de l'aéroport (véhicules terrestres de chargement et autres)[10]. Les études mettent en évidence des augmentations des niveaux de PUF avec la densité du trafic aérien (matin et soirée).

Le mode de nucléation (10-20 nm) présente un pourcentage d'autant plus élevé que les mesures sont proches de l'aéroport. L'influence de l'aéroport est encore mesurée à 7 km voire jusqu'à 40 km sous les vents dans certaines études[26], [27]. La concentration diminue tout de même avec la distance à l'aéroport avec une influence de moins en moins marquée.

Les émissions importantes de particules ultrafines par les moteurs d'avion sont notamment dues à l'absence de législation sur la teneur en soufre dans les carburants des avions. Or, ce composé est un précurseur majeur de la formation de particules ultrafines secondaires. L'évolution de l'impact des émissions aériennes de particules ultrafines est susceptible d'augmenter avec l'augmentation du trafic aérien si aucune mesure n'est prise[10].

2.3. NUCLÉATION RÉGIONALE

La nucléation régionale correspond à la nucléation de précurseurs gazeux oxydés par des processus de conversion de ces gaz en particules secondaires. Ce phénomène se produit à l'échelle régionale et n'est pas directement liée à des émissions de particules primaires. Cette formation de particules secondaires peut devenir majoritaire sur certain site éloigné d'autres sources anthropiques (zone rurale par exemple) ou lorsque l'activité photochimique est intense (printemps/été). Les particules ainsi formées appartiennent au mode nucléation (diamètre < 30 nm).

Les gaz oxydés majoritairement impliqués dans la formation de ces PUF secondaires sont l'acide sulfurique (H_2SO_4), l'ammoniac (NH_3) ou encore certains composés organiques volatils (COV) anthropiques ou naturels[25]. Ces composés peuvent être émis naturellement ou par l'activité humaine (NH_3 ou COV) ou sont issus de l'oxydation d'autres gaz. L'acide sulfurique est principalement issu de l'oxydation du dioxyde de soufre (SO_2), majoritairement émis par les activités industrielles et les éruptions volcaniques ou le diméthylsulfure (DMS), majoritairement émis par l'activité phytoplanctonique[10], [28]. D'autres composés peuvent également nucléer après oxydation à l'image des composés iodés[10]. Deux mécanismes de formation majoritaires sont identifiés à partir de l'acide sulfurique :

- La nucléation homogène binaire : H_2SO_4/H_2O ;
- La nucléation homogène ternaire : $H_2SO_4/NH_3/H_2O$.

2.4. AUTRES SOURCES

- **Combustion de biomasse**

Le chauffage urbain associé à la combustion de biomasse (bois de chauffage) est une source importante de particules en zone urbaine. La combustion de biomasse peut émettre des particules ultrafines mais les études nationales mettent en évidence une corrélation plus importante entre cette source et les particules de diamètres compris entre 100 et 200 nm (mode accumulation)[29], [30] qui par définition ne sont pas des PUF. Les particules émises présentent tout de même une grande variabilité de composition et de taille en fonction du type de bois, du système de chauffage... Les particules associées à la combustion de biomasse présentent une saisonnalité très marquée en lien avec l'utilisation du chauffage avec des niveaux en saison froide plus élevés qu'en saison chaude[24], [29], [31], [32].

- **Autres transports**

Les autres moyens de transport à l'image du trafic maritime associé aux activités portuaires peuvent fortement contribuer à la concentration en nombre des particules ultrafines. Le trafic maritime est à l'origine d'émissions de PUF primaires et de précurseurs gazeux (SO_2 et COV). Seules les zones littorales sont concernées par ce type de source mais leur impact peut être notable dans ces zones[10], [24], [33].

- **Industrie**

Les activités industrielles peuvent être une source de particules ultrafines[20], [33]–[35] mais également une source d'émissions majeure des gaz précurseurs de particules ultrafines comme le SO_2 pouvant conduire à la formation de PUF par nucléation régionale. Les études à proximité d'industrie mettent en évidence des corrélations marquées des fractions les plus fines (20-50 nm) avec les concentrations en SO_2 associées à l'activité de l'industrie[24], [30], [36], [37]. Mais les processus de combustion de certaines industries peuvent également être à l'origine des PUF primaires comme les centrales électriques ou les incinérateurs de déchets[10], [32].

3. PROPRIÉTÉS DES PARTICULES ULTRAFINES

3.1. COMPORTEMENT DANS L'ATMOSPHÈRE

Les particules ultrafines et les précurseurs gazeux émis dans l'atmosphère présentent un comportement particulier régi par 7 mécanismes majeurs : la dilution, la nucléation, la condensation, la coagulation, l'évaporation, la déposition sèche et la déposition humide [10], [22], [24], [38]–[40] (Figure 3). Ces mécanismes vont influencer la formation, la dynamique et la durée de vie de ces particules dans l'atmosphère. Certains peuvent même agir comme des sources de PUF c'est-à-dire contribuer à la formation de ces particules tandis que d'autres peuvent agir comme des puits de PUF c'est-à-dire éliminer ces particules de l'atmosphère. De manière simplifiée, chaque mécanisme influe différemment sur la concentration en PUF selon ses propriétés :

- La dilution représente le mélange des particules ultrafines émises dans un volume d'air plus important. Ce mécanisme est valable pour tous polluants émis dans l'atmosphère. Il est associé à une diminution de la concentration en nombre.
- La nucléation est une source importante de formation de particules ultrafines à partir de gaz précurseurs, comme vu dans le chapitre précédent. La conversion de gaz en particules est à l'origine des particules ultrafines secondaires (source de PUF).
- La condensation est le phénomène par lequel des gaz peuvent soit se condenser sur des particules préexistantes soit former de nouvelles particules (comme à l'échappement). Dans le cas où les gaz se condensent sur des particules préexistantes, il n'y a pas formation de nouvelles particules mais une modification de la taille de ces particules. Dans le cas où les conditions de pression et température le permettent, les gaz peuvent condenser pour former de nouvelles particules (source de PUF).
- La coagulation est un phénomène par lequel les particules de tailles différentes s'assemblent pour former une particule plus grosse, à l'image des particules du mode nucléation. Ce mécanisme est à l'origine du grossissement des PUF avec le temps et la distance. La coagulation permet une diminution du nombre de particules plus fines associée à une modification de la distribution granulométrique par modification de la taille des PUF.
- L'évaporation se produit dans des conditions de température et pression particulières. Il s'agit du mécanisme opposé à la nucléation. En fonction de la quantité de gaz condensables présents dans la particule, soit l'évaporation va conduire à un passage total de la phase particulaire à la phase gazeuse (puits de PUF) soit l'évaporation va conduire à une réduction de la taille des particules par perte de la part volatile.
- La déposition sèche est liée au dépôt des particules au sol ou sur des surfaces par leurs mouvements (sédimentation, diffusion). Ce mécanisme est majoritairement lié à la sédimentation qui n'a aucun effet sur les particules les plus fines (mode nucléation). Ce phénomène est à l'origine d'une diminution de la concentration en nombre mais reste moins efficace que pour les particules plus grosses (puits de PUF).
- La déposition humide est liée au dépôt des particules de l'atmosphère par des précipitations (pluie, neige, grêle...). Ce phénomène appelé « lessivage » reste plus efficace sur les particules du mode accumulation et son impact sur les particules du mode nucléation est moins net. Il est à l'origine d'une diminution de la concentration en nombre (puits de PUF).

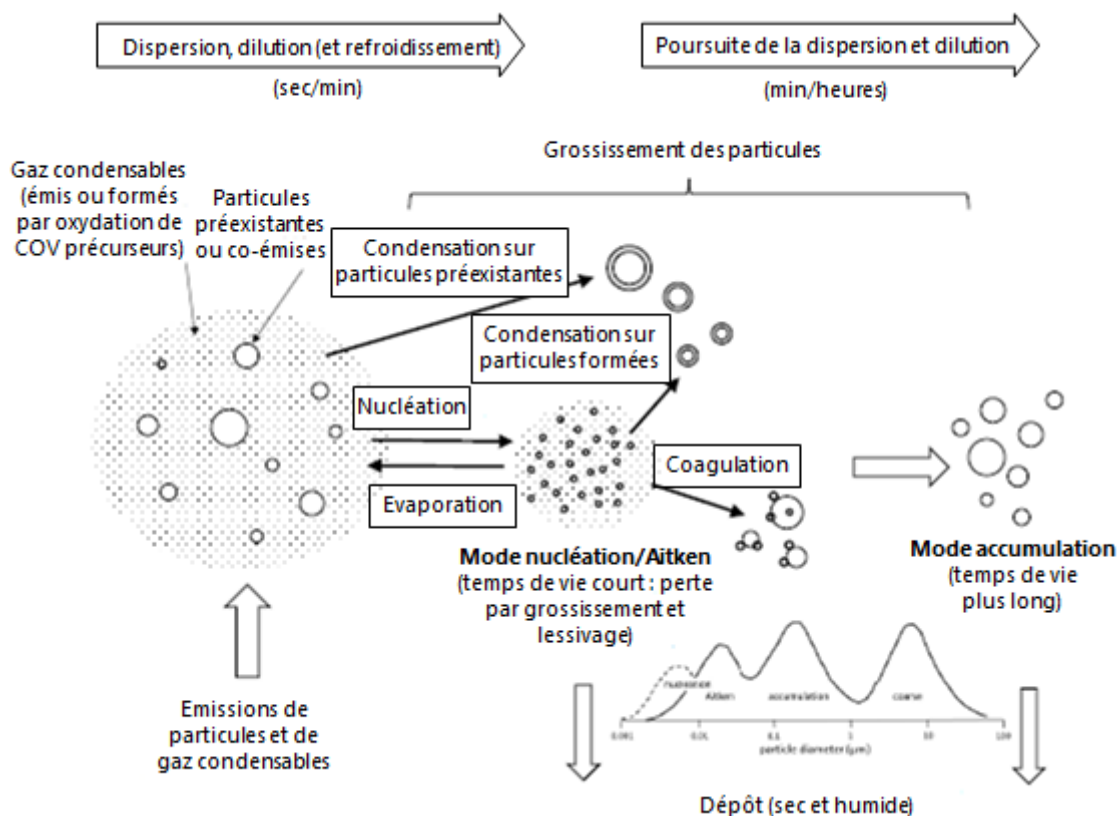


Figure 3 : Schéma des mécanismes majeurs des PUF dans l'atmosphère
(Extrait de Air quality expert group, UFP in the UK, 2018)

Comme certains mécanismes présentés précédemment, la présence de particules préexistantes dans l'atmosphère agit comme un puits pour les PUF par élimination des gaz précurseurs évitant la nucléation (coagulation ou condensation favorisées par la présence de particules).

Les paramètres météorologiques ont également des effets sur les niveaux de particules ultrafines[25] :

- Le vent : pour des vents supérieurs à 5 m/s, les niveaux en PUF diminuent grâce au phénomène de dispersion comme pour les particules plus grandes mais également grâce à l'augmentation de la coagulation liée à un meilleur mixage de l'air. De plus, les vents élevés permettent une perte de particules par dépôt et diffusion[25].
- Les précipitations : le processus de lessivage permettant une diminution des particules plus grosses est moins efficace sur les PUF et peut même permettre une augmentation des niveaux pour les particules dont le diamètre est inférieur à 150 nm d'après l'étude de Morawska *et al*[25]. L'augmentation des niveaux peut apparaître pendant la pluie ou juste après en lien avec la baisse des températures consécutives aux précipitations où la nucléation est favorisée grâce à une meilleure sursaturation combinée à une baisse des particules plus grosse sur lesquelles s'adsorber.
- La température : l'influence de la température dépend des processus de formation. Le processus de condensation à l'échappement est plutôt anti-corrélé à la température car il est favorisé par des températures froides[41]. Le processus de nucléation régional est plutôt favorisé par des températures élevées en lien avec l'augmentation concomitante du rayonnement (photochimie). Une fois les particules formées, les phénomènes d'inversion de températures restent associés à des hausses des concentrations en PUF comme pour les autres polluants.

- L'humidité relative : L'humidité relative influence principalement la formation de nouvelles particules du mode nucléation produites à l'échappement ou par nucléation régionale. La littérature met en évidence des résultats contrastés en fonction des études. La formation de particules ultrafines peut être favorisée par l'augmentation de l'humidité relative. La formation de nouvelles particules par nucléation régionale est associée à des journées présentant une humidité relative plus élevée que la moyenne[42] ou encore une humidité relative élevée permet de favoriser la nucléation binaire[43] et n'a pas d'effet sur la nucléation ternaire[44]. A l'échappement, la nucléation par condensation des gaz semi-volatils serait favorisée par de faibles températures et une forte humidité relative[41]. Cependant, la formation de nouvelles particules est également associée à des conditions météorologiques présentant une faible humidité relative[45]. A l'heure actuelle, l'influence réelle de l'humidité relative est à nuancer et reste relativement faible par rapport à l'influence d'autres paramètres comme la température[46] ou l'activité photochimique[42].

Les PUF et leurs précurseurs gazeux sont soumis à de nombreux phénomènes et paramètres modifiant leurs niveaux. Cette sensibilité multifactorielle est à l'origine de la forte variabilité spatiale et temporelle des PUF.

3.2. TENDANCES ET VARIATIONS

Les particules ultrafines présentent une variation temporelle et spatiale importante. Cette variabilité permet d'observer une diversité de résultats mais des tendances majeures sont mises en évidence dans la littérature.

- Les variations temporelles

Les variations temporelles s'observent à différentes échelles. Les niveaux de PUF présentent des variations saisonnières marquées qui diffèrent en fonction des sites :

- Site en zone urbaine : les niveaux de PUF sont dépendants des émissions primaires (trafic, chauffage) et donc de leur variation. Les PUF présentent donc des niveaux plus élevés en hiver (période froide) qu'en été (période chaude). Les conditions hivernales sont associées à des surémissions du trafic routier (démarrage à froid et formation de PUF par condensation favorisée à faibles températures) et à des émissions liées au chauffage[21], [25]. Ce type de comportement est majoritairement observé sur les stations urbaines, à l'image des études faites sur le territoire national[29]–[31], [36], [37].
- Site en zone rurale : l'influence des émissions primaires (trafic, chauffage) peut être plus faible que la formation de PUF secondaires en période chaude (nucléation régionale) favorisée par l'activité photochimique. Dans ce cas, les niveaux de PUF en été (période chaude) sont supérieurs aux niveaux hivernaux. Ce type de tendance est majoritairement observé sur les sites ruraux pour lesquels la faible influence urbaine entraîne une domination des niveaux en été lorsque l'activité photochimique est importante (nucléation régionale).

Les PUF présentent également des variations diurnes très marquées avec deux types de profils :

- En hiver, le profil journalier des PUF est similaire à celui des traceurs du trafic routier en zone urbaine avec deux pics matin et soir correspondant aux trajets domicile/travail. Les niveaux de PUF restent plus ou moins élevés la nuit en fonction de l'influence de la combustion de biomasse principalement pour la fraction 100 – 200nm[30], [31], [36], [37].
- En été, le profil journalier des PUF présente une courbe en cloche dans l'après-midi en lien avec la production photochimique de ces particules. Ce profil est similaire à celui d'autres polluants secondaires comme l'ozone. Il s'observe majoritairement pour les particules ultrafines les plus fines (< 30 nm) compte tenu du caractère secondaire des particules appartenant au mode nucléation. Cette augmentation dans l'après-midi peut apparaître dès le printemps en fonction des conditions

météorologiques. Sur certains sites, les pics associés à cette formation de PUF secondaires peuvent être plus élevés que les pics associés au trafic routier (matin et soir) lorsque l'activité photochimique est forte.

Ces variations sont d'autant plus marquées pour le mode nucléation par rapport au mode accumulation. Pour des sites sous influence industrielle par exemple, des variations diurnes différentes peuvent être observées en lien avec l'activité industrielle et les vents.

De manière générale les niveaux de particules ultrafines sont plus élevés la journée que la nuit en lien avec la baisse des émissions (trafic routier, photochimie) et les conditions météorologiques (couche limite plus élevée).

Les variations à long terme sont moins documentées mais les données disponibles indiquent que la concentration en nombre a eu tendance à diminuer entre 1990 et 2015 notamment en lien avec la baisse de la teneur en soufre dans les carburants[25]. Les évolutions à venir sont compliquées à estimer compte tenu des incertitudes liées à la formation de ces particules ultrafines. L'impact des processus de traitement des gaz d'échappement pour le trafic routier notamment est difficile à déterminer : leur efficacité de filtrage sur les PUF n'est pas établie à l'heure actuelle, leur durée de vie reste peu connue et ces systèmes peuvent favoriser la formation de PUF par nucléation de la fraction volatile[18], [25]. De plus, la diminution des niveaux de particules plus grosses au cours du temps peut-être un risque d'augmentation des PUF en favorisant les processus de nucléation et condensation.

- Les variations spatiales

Les PUF étant soumises à de nombreux processus dans l'atmosphère, elles présentent une forte variabilité spatiale. La distance à la source (trafic routier, industrie...) est un facteur déterminant sur le niveau de PUF. L'éloignement par rapport à un axe routier est associé à une diminution exponentielle des niveaux de particules ultrafines : une étude a mis en évidence une baisse des niveaux de 40% à seulement 10 m d'une route[21].

Ces tendances s'observent par rapport aux niveaux mesurés selon la typologie des sites. De manière générale, les niveaux suivent le schéma : site trafic/Site industriel > site de fond urbain > site de fond rural. Cette variabilité est confirmée par la figure ci-dessous extraite de Morawska et al[25]:

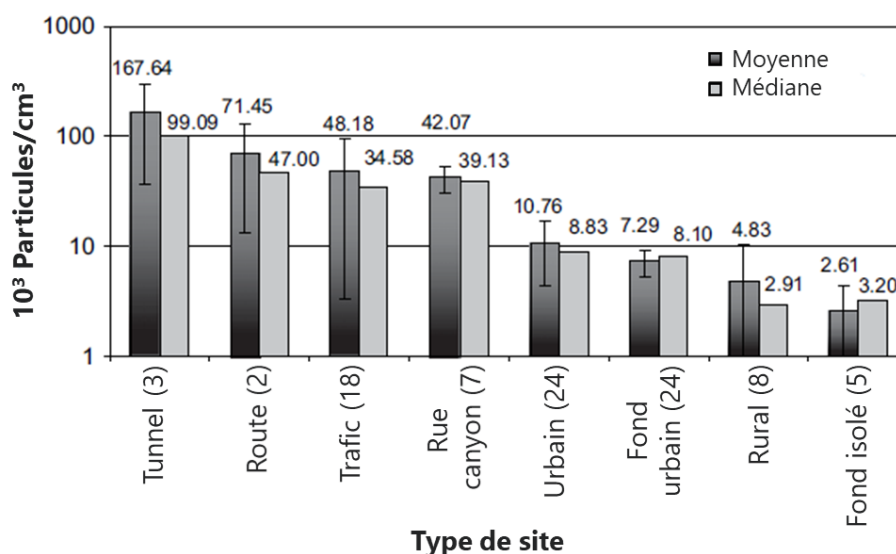


Figure 4 : Niveaux de particules ultrafines par typologie de site. Le nombre de site pour chaque type est indiqué entre parenthèses (Traduit de Morawska et al., *Ambient nano and ultrafine particles from motor vehicle emissions : Characteristics, ambient processing and implications on human exposure, 2008*)

De manière générale, le transport longue distance des PUF est faible. Ce sont les sources locales qui influent principalement les niveaux observés. Cette tendance est particulièrement vraie pour les particules les plus fines (< 50 nm) tandis que les PUF appartenant au mode accumulation peuvent être transportés.

3.3. PROPRIÉTÉS ET COMPOSITIONS CHIMIQUES

A l'image des particules plus grosses, la composition des particules ultrafines dépend notamment de leurs sources et de leur mécanisme de formation. De manière générale, les particules ultrafines primaires (mode accumulation) sont constituées de composés organiques et les particules ultrafines secondaires (mode nucléation) de matières inorganiques (sulfate, nitrate). D'autres composés peuvent également constituer les particules ultrafines dans une moindre mesure comme les ions (sodium et chlore) ou certains métaux (fer, titane)[10], [24], [25], [47]. Les études mettent en évidence que pour les composés inorganiques, la proportion de sulfate est plus importante que celle des nitrates, contrairement à ce qui est observé sur les PM_{2,5}. Cette composition est liée à la nucléation importante des composés soufrés.

En fonction de la saison, la composition chimique globale varie avec une augmentation des composés secondaires (sulfate, nitrate) par rapport aux composés organiques en été. Ces variations sont directement liées à la saisonnalité des sources majoritaires[25].

L'étude de la composition chimique des particules reste peu développée à l'heure actuelle compte tenu des difficultés de mesure associées. Pourtant, la connaissance de la composition chimique des PUF est indispensable car la toxicité des particules dépend de leur taille mais aussi de leur composition.

4. EFFETS SANITAIRES ET ENVIRONNEMENTAUX DES PARTICULES ULTRAFINES

4.1. EXPOSITION

- **Polluant émergent**

Notre exposition aux PUF a beaucoup varié au cours de l'histoire. Emises par des processus naturels, l'Homme est depuis toujours exposé à des composés de petite taille. La maîtrise de la combustion et sa généralisation a fortement augmenté l'exposition humaine. Les récentes recherches et méta-analyses des données sanitaires disponibles ont permis d'identifier les risques sanitaires associés aux PUF. C'est pourquoi les PUF sont qualifiées aujourd'hui de polluant émergent et leur suivi est fortement préconisé malgré l'absence de réglementations[48].

- **Difficultés liées à la mesure**

De nos jours, nos connaissances sur l'exposition sont très limitées : les appareils permettant la mesure de la concentration en nombre sont plus complexes et plus onéreux que les appareils de mesure de particules micrométrique en masse. De plus, la mesure de la concentration en nombre ne correspond pas directement à la mesure des PUF puisque les analyseurs comptent également des particules supérieures à 100 nm – qui par définition ne sont pas des PUF. Cette mesure n'étant pas réglementée, peu de stations de mesures sont équipées de ces analyseurs et, le plus souvent, une seule mesure par agglomération voire région est disponible. Or les concentrations en PUF sont sujettes à une grande variabilité spatiale[49], ce qui limite grandement la représentativité des données issues d'une unique station.

- **Difficulté de caractérisation**

En l'absence de norme de mesure à l'heure actuelle, les mesures de particules ultrafines sont difficilement comparables d'une étude à l'autre. Le diamètre mesuré le plus fin est variable d'une instrumentation à l'autre et les méthodes de mesure également. L'augmentation de mesures normées dans les prochaines années est indispensable pour permettre aux épidémiologistes d'accéder à des données robustes sur les niveaux de particules ultrafines[18], [50].

Il reste de nombreuses incertitudes sur les caractéristiques physico-chimiques des PUF qui influencent leur toxicité[51]. Cela rend difficile l'exploitation des données toxicologiques sur ces particules et limite grandement les possibilités de méta-analyse (analyse simultanée des résultats de plusieurs études).

- **Exposition multiple**

L'exposition liée à l'air intérieur est rarement caractérisée alors que certaines sources intérieures de PUF sont très importantes (cigarettes, activité de cuisson...)[10], [35] et que l'être humain passe plus de 80% de son temps à l'intérieur[52]. De plus, les sources de PUF sont à l'origine de l'émission simultanée d'autres polluants atmosphériques classiques pour lesquels des effets toxiques ont été constatés. L'influence individuelle des PUF est difficilement caractérisable à l'heure actuelle.

4.2. MÉCANISMES D'ACTION

- **Voie d'entrée**

Parmi les différentes voies d'entrée, la voie respiratoire semble être la plus importante et est la plus étudiée actuellement. L'ingestion et le contact cutané sont étudiés pour les particules intentionnelles, mais très peu étudié pour les particules non intentionnelles.

- **Dépôts dans les voies respiratoires**

Lors de l'inhalation, les particules entrent dans le système respiratoire. Le corps humain possède plusieurs mécanismes de défense pour arrêter ces particules. Plusieurs facteurs influencent les probabilités qu'une particule atteigne les alvéoles pulmonaires [50], [53], mais le diamètre de la particule semble être un facteur majeur. Ces mécanismes sont assez bien connus et peuvent être modélisés [54], globalement ce sont les $PM_{0,1}$ qui sont le plus susceptibles d'atteindre la partie la plus profonde de l'appareil respiratoire.

- **Mécanisme d'élimination**

En complément des défenses limitant l'entrée de particules dans le système respiratoire profond (alvéoles pulmonaires), le corps humain dispose de mécanismes de clairance des particules capturées par ces défenses. L'efficacité de ces mécanismes de clairance est incertain pour les PUF, des études montrent que certains de ces mécanismes seraient moins efficaces pour éliminer les PUF[55]. Une exposition quotidienne couplée à une élimination lente peut mener à une accumulation de polluants.

Des résultats sur modèle animal ont montré que le temps nécessaire pour éliminer 50% des particules manufacturées (TiO_2) présentes dans le système respiratoire était de 170 jours à 250 nm de diamètre et de 500 jours à 20 nm de diamètre [56]. Ces résultats sont spécifiques aux particules testées, mais compte tenu de leur taille similaire avec les PUF, ils posent la question de leur devenir dans le système respiratoire.

- **Barrières biologiques**

Les PUF ont la capacité de traverser les barrières biologiques de l'organisme. Une fois dans les alvéoles pulmonaires, les PUF peuvent traverser la barrière alvéolo-capillaire et ainsi passer dans le sang[57]. Une fois dans le système circulatoire, ces PUF peuvent être transportées dans tout l'organisme (translocation). Les autres barrières ne semblent pas plus efficaces : la barrière gastro-intestinale [58] et placentaire[59] semblent également laisser passer les $PM_{0,1}$. La barrière hémato-encéphalique, la plus efficace, protège le cerveau d'éventuels polluants présents dans le sang mais ne semble pas non plus être imperméable aux PUF. Une autre voie de translocation vers le cerveau via le nerf olfactif est également mise en évidence[60], [61]. Globalement la taille des particules semble jouer un rôle majeur dans le passage de ces barrières biologiques, même si d'autres facteurs influencent également ce phénomène[62]. Selon les propriétés de la particule et l'état biologique des cellules, ces particules pourraient traverser les membranes cellulaires[57].

- **Toxicité liée à la taille**

Les PUF se distinguent des autres particules par leur taille. À masse égale, ces particules de petite taille seront beaucoup plus nombreuses. Un grand nombre de petites particules dispose d'une surface de contact totale beaucoup plus importante, les rendant beaucoup plus réactives que des particules plus grandes à masse égale[18]. La petite taille des PUF leur permet de passer des barrières biologiques et donc d'affecter de nombreux organes.



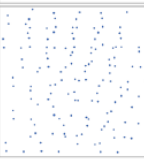
	10 μm (Coarse)	2.5 μm (Fine)	0.1 μm (Ultrafine)
			
Total mass	1	1	1
Particle number	1	64	1,000,000
Surface area per particle	1	0.0625	0.0001
Total surface area per mass	1	4	100

Figure 5 : Comparaison des surfaces des particules en fonction de leur taille[18]

De plus, leur surface spécifique étant plus grande, l'adsorption de composés potentiellement toxiques en surface est favorisée. Certains composés dont la toxicité et les effets mutagènes et cancérigènes sont avérés, comme les métaux ou les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), peuvent donc être adsorbés à la surface des particules. Les PUF pourraient alors agir comme un vecteur de composés toxiques dans les voies respiratoires et dans le système sanguin[50], [63]. Ces mécanismes théoriques sont encore largement inconnus tout comme le potentiel impact sur la santé. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour compléter les connaissances sur ce sujet.

- **Effets physiologiques**

De manière générale, les PUF semblent induire une réponse inflammatoire locale. Initialement située dans les poumons, cette inflammation peut avoir des conséquences systémiques soit par la translocation des PUF, soit par la diffusion des médiateurs de l'inflammation dans le sang. La présence de PUF est également associée à la génération accrue d'espèces réactives de l'oxygène (ERO) provoquant un stress oxydant[50], [64]. Les études mettent en avant une production de radicaux libres par les PUF plus importantes que pour les particules plus grosses[24], [65]. Les mécanismes d'inflammation et de stress oxydant sont liés. Ces mécanismes sont impliqués dans la toxicité de nombreux polluants de l'air, une inflammation chronique sur de longue durée contribue au développement et à l'aggravation d'une multitude de pathologies dites environnementales.

4.3. EFFETS SANITAIRES

Le rapport bibliographique rédigé par l'ANSES et publié en juillet 2019 confirme l'avis de 2018 du même organisme de classer les PUF en tant que polluants émergents prioritaires. L'analyse de la littérature disponible réalisée dans ce rapport de l'ANSES met en évidence que plusieurs études montrent des associations d'effets sanitaires entre les PUF et différentes catégories sanitaires. Les particules ultrafines sont associées à des effets sur la santé cardiovasculaire et la santé respiratoire pour une exposition à court terme. L'exposition à long terme aux PUF est également associée à des effets sur la santé cardiovasculaire. Le système cardiovasculaire et le système respiratoire sont les plus touchés par les particules ultrafines mais également les plus documentées[48].

Une association avec la santé neurologique et l'exposition long terme aux PUF a également été mise en évidence[48], [50]. Les effets seraient associés au mécanisme de translocation des PUF via le nerf olfactif notamment. Plus récemment une étude épidémiologiques a démontré un lien de corrélation entre exposition aux PUF et l'apparition de tumeur cérébrale, sans trouver de lien avec les polluants classiques[66]. Il faut cependant rester prudent sur l'interprétation de ces résultats, d'autres études seront nécessaires pour établir une éventuelle causalité. Des effets sur le développement des enfants lors d'exposition pendant la grossesse ou l'enfance, une augmentation du risque de diabète, d'hypertension et de cancers sont également pointés dans

certaines études[48], [50] mais des travaux supplémentaires sont indispensables pour conclure sur l'association avec les PUF.

Une exposition courte à des niveaux très élevés lors de certaines tâches comme le soudage entraîne également des effets rapides (4 à 8h après exposition) appelées « metal fume fever ». Cette atteinte est associée à l'inhalation de $PM_{0,1}$ et provoque l'apparition de malaise, de fièvre, de frissons, d'arthralgies et de myalgies à la suite de la génération d'espèces réactives de l'oxygène. Ces symptômes ponctuels finissent par disparaître sans traitement[67]. La littérature semble aussi mettre en évidence l'exacerbation de certaines pathologies respiratoires (asthme, BPCO) par l'exposition aux particules ultrafines. Certaines personnes – dites à risque – sont donc plus sensibles à la pollution atmosphériques : les personnes ayant une pathologies respiratoires, cardiaques ou encore les personnes diabétiques[50], [68].

4.4. EFFETS ENVIRONNEMENTAUX

Les particules ultrafines peuvent être à l'origine de perturbations environnementales. Elles sont associées à des effets directs et indirects sur le climat[20].

Les effets directs des particules ultrafines sont associés à leurs propriétés optiques. En fonction de leur composition chimique, elles sont capables d'absorber, de diffuser ou de réfléchir le rayonnement. Elles peuvent donc modifier l'équilibre thermique de l'atmosphère et le bilan radiatif.

Les effets indirects des particules ultrafines sont associés :

- A leur impact sur les précipitations. Les PUF émises à une altitude suffisante peuvent atteindre une taille stable de plusieurs dizaines de nanomètres. A cette taille, les particules vont agir comme des noyaux de condensation - à l'origine de la formation des gouttelettes d'eau dans les nuages[24]. Le régime de précipitations est donc modifié avec certaines zones où les nuages ainsi formés sont constitués de gouttelettes trop petites pour entraîner des précipitations ce qui conduit à une baisse locale des précipitations et d'autres zones où les conditions chaudes et humides provoquent des précipitations intenses, d'orages et de foudres. Les particules ultrafines peuvent être à l'origine d'un dérèglement du cycle hydrologique et du régime de précipitations. En fonction des zones, des périodes de sécheresse ou des inondations peuvent être observées et représentent *a fortiori* un danger pour l'Homme[18].
- A leur impact sur la couverture nuageuse. Leur action de noyaux de condensation est à l'origine d'une modification de la couverture nuageuse (forme, épaisseur) dont dépendent les propriétés optiques des nuages. Cet impact est à l'origine d'une modification du bilan radiatif[24].

Les PUF toxiques peuvent se retrouver dans d'autres compartiments comme le sol ou l'eau dans lesquels les effets à court et long terme restent peu connus à l'heure actuelle[24]. Une modification des propriétés chimiques et des interactions avec l'environnement en milieu aquatique est suspectée mais peu documentée[11].

CONCLUSION

Les impacts économiques et sanitaires de la pollution atmosphérique et notamment particulaire sont bien connus à l'heure actuelle. Cependant, en lien avec la réglementation en vigueur, la surveillance et les études sont majoritairement basées sur les particules PM_{10} et $PM_{2,5}$. Ces particules micrométriques dominent la masse de la matière particulaire atmosphérique mais ne sont pas représentatives des particules les plus fines : les particules ultrafines (PUF).

Les particules ultrafines sont définies comme les particules dont le diamètre est inférieur à $0,1 \mu m$ ($PM_{0,1}$). Compte tenu de leur faible taille, ces particules ne représentent qu'une faible part dans la masse des particules atmosphériques alors qu'elles dominent la concentration en nombre (nombre de particules/cm³). Cette métrique reste donc la plus représentative des niveaux de particules ultrafines mais n'est actuellement pas réglementée. De plus, les moyens de mesure disponibles pour cette mesure restent moins répandus que les analyseurs en masse habituellement utilisés pour la mesure des PM_{10} ou $PM_{2,5}$.

Les PUF sont majoritairement émises par les processus de combustion tant au niveau des sources naturelles qu'anthropiques. En zone urbaine, plus de 60% des émissions sont liées au trafic routier (combustion de carburant). Malgré cette domination du transport routier, d'autres sources peuvent devenir majoritaires localement. Le trafic aérien est notamment associé à de fortes émissions des PUF les plus fines de diamètre moyen compris entre 10 et 20 nm. La combustion de biomasse (chauffage urbain, feux de forêt) ou l'industrie contribuent également au niveau de particules ultrafines dans les zones où ces activités sont importantes. Au niveau régional, de nouvelles particules secondaires peuvent également être formées par nucléation dans l'atmosphère appelée « nucléation régionale ». Ce phénomène est associé à la nucléation de composés issus de la photooxydation de gaz dits gaz précurseurs dans l'atmosphère. Cette formation de particules secondaires est dépendante des conditions météorologiques (fort ensoleillement, faible vent...) mais également aux sources d'émission des gaz précurseurs. La transformation du gaz initial jusqu'à la particule n'est pas linéaire et peut se produire de manière différée par rapport à l'émission primaire du gaz.

Les niveaux en particules ultrafines mesurés sont dépendants des sources d'émissions de particules primaires (combustion) et des processus de formation de particules secondaires (nucléation, condensation). Les particules ultrafines sont soumises à une forte coagulation d'autant plus importante que leur diamètre est petit. Ces PUF peuvent également être supprimées de l'atmosphère par dépôt sec principalement par diffusion ou par lessivage par les précipitations. Cependant, ces phénomènes semblent moins efficaces sur les PUF les plus fines (< 20nm). Certains de ces processus à l'image de la coagulation sont rapides entraînant une forte variabilité spatiale et temporelle des PUF par rapport aux particules plus grosses dont les niveaux sont plus homogènes à l'échelle d'une agglomération.

Les mesures effectuées au niveau national et au niveau européen mettent en évidence des variations saisonnières et journalières marquées. De manière générale, en zone urbaine les niveaux de particules ultrafines présentent une saisonnalité marquée avec des niveaux plus élevés en période froide par rapport à la période chaude. Ces variations sont liées aux émissions plus importantes de PUF en hiver (surémission des moteurs à froid, chauffage). En zone rurale où les émissions primaires de PUF sont moins importantes, les niveaux peuvent être plus élevés en période chaude qu'en période froide en lien avec l'activité photochimique plus intense en été favorisant les phénomènes de nucléation régionale.

La composition des particules ultrafines reste similaire aux particules plus grosses. Elles sont majoritairement constituées de composés carbonés et de composés inorganiques. Leur composition dépend notamment de leur origine : les PUF primaires sont dominées par la fraction carbonée (carbone élémentaire) tandis que les PUF

secondaires sont plutôt associées à des composés inorganiques (sulfate, ammonium, nitrate). Contrairement aux $PM_{2,5}$, la part de sulfate est plus importante que celle du nitrate dans les PUF secondaires. La domination du sulfate est liée au rôle important des composés soufrés dans la formation des PUF par nucléation.

L'exposition des populations aux particules ultrafines est documentée depuis une trentaine d'années. Elles sont majoritairement associées à une exposition par inhalation bien que les autres voies d'entrée soient possibles mais moins documentées à l'heure actuelle. Ces particules ont des propriétés spécifiques compte tenu de leur faible taille. Elles ont la capacité de pénétrer très profondément dans le système respiratoire jusqu'aux alvéoles pulmonaires. Les particules ultrafines présentent également une surface réactive plus importante que les particules plus grandes à masse égale. Cette surface plus importante induit une réactivité plus élevée avec les cellules biologiques qui est également favorisée par leur petite taille. Les PUF sont aussi capables de traverser les barrières biologiques et de se transloquer dans l'organisme – c'est-à-dire être transportées par le système sanguin vers d'autres organes en plus de leur effet « direct » dans le système respiratoire. De plus, leur grande surface réactive est à l'origine d'une capacité plus élevée à adsorber des composés en surface. Des composés dont la toxicité est connue comme les métaux ou les HAP peuvent donc s'adsorber à la surface des PUF et ainsi seraient transportés dans l'organisme. Les particules ultrafines joueraient alors le rôle de vecteur de polluants toxiques à l'origine d'impacts sanitaires.

Les particules ultrafines sont associées à des effets sanitaires sur le système cardiovasculaire et le système respiratoire. Ces effets sont majoritairement associés à l'inflammation causée par leur présence et leur capacité à provoquer un stress oxydant plus important que les particules plus grosses à composition identique. Leur impact sur le système neurologique ou sur des maladies comme le diabète est supposé mais encore à l'étude à l'heure actuelle. Des études sont encore nécessaires pour mieux identifier et comprendre les mécanismes d'actions des particules ultrafines.

La littérature contient un certain nombre de données sanitaires sur les particules ultrafines depuis les années 90. Cependant, les difficultés de mesure et de caractérisation des PUF auxquelles la population est exposée ainsi que le manque de standardisation dans les mesures rendent difficiles l'identification précise des effets sanitaires des particules ultrafines. Le suivi de ces particules ultrafines doit être renforcé comme indiqué par l'ANSES dès 2018. Les analyseurs disponibles permettant d'obtenir la concentration en nombre doivent être pérennisés et standardisés tant au niveau national qu'international afin d'obtenir des données long terme comparables. Ces données sont nécessaires pour mieux comprendre les processus de formation et les variations des niveaux et pour mener des études épidémiologiques. Ces dernières sont indispensables pour établir des valeurs sanitaires et ainsi pouvoir réglementer et surveiller les niveaux de particules ultrafines dans le futur.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **J.-F. Husson**, « Rapport fait au nom de la commission d'enquête sur le coût économique et financier de la pollution de l'air », 2015.
- [2] **Santé publique France**, « Communiqué de presse - Impacts sanitaires de la pollution de l'air en France : nouvelles données et perspectives », 2016.
- [3] **ANSES**, « Pollution par les particules dans l'air ambiant : Synthèse des éléments sanitaires en vue d'un appui à l'élaboration de seuils d'information et d'alerte du public pour les particules dans l'air ambiant », 2009.
- [4] **US EPA**, « Particulate Matter Pollution », *US EPA*. <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics> (consulté le sept. 14, 2020).
- [5] **ANSES**, « Polluants "émergents" dans l'air ambiant - Identification, catégorisation et hiérarchisation de polluants actuellement non réglementés pour la surveillance de la qualité de l'air », 2018.
- [6] **Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire**, « Nanomatériaux », 2019. <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/nanomateriaux> (consulté le mai 19, 2020).
- [7] **ANSES**, « Eléments issus des déclarations des substances à l'état nanoparticulaire », 2018.
- [8] **Planetoscope**, « Consommation de nano-particules en France ». <https://www.planetoscope.com/matieres-premieres/1862-consommation-de-nano-particules-en-france.html> (consulté le mai 19, 2020).
- [9] **VeilleNanos**, « Le registre R-Nano - La déclaration annuelle des "substances à l'état nanoparticulaire" en France, obligatoire depuis 2013 », 2020. <http://veillenanos.fr/wakka.php?wiki=DeclarationObligatoireNanoFrance> (consulté le mai 19, 2020).
- [10] **Air Quality Expert Group**, « Ultrafine Particles (UFP) in the UK », 2018.
- [11] **Comité de la Prévention et de la Précaution**, « Nanoparticules : quels dangers, quels risques ? », 2020.
- [12] **L. Morawska et al.**, « Comprehensive characterization of aerosols in a subtropical urban atmosphere : particle size distribution and correlation with gaseous pollutants », *Atmos. Environ.*, vol. 32, n° 14, p. 2467-2478, 1998, doi: 10.1016/S1352-2310(98)00023-5.
- [13] **Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire**, « Normes euros d'émissions de polluants pour les véhicules lourds - Véhicules propres », 2017. <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/normes-euros-demissions-polluants-vehicules-lourds-vehicules-propres> (consulté le mai 19, 2020).
- [14] « Règlement (CE) N°715/2007 du Parlement Européen et du Conseil du 20 juin 2007 relatif à la réception des véhicules à moteur au regard des émissions des véhicules particuliers et utilitaires légers (Euro 5 et Euro 6) et aux informations sur la réparation et l'entretien des véhicules », *Journal Officiel de l'Union européenne*, 2007.
- [15] « Règlement (CE) N°2017/1154 de la Commission du 7 juin 2017 modifiant le règlement (UE) 2017/1151 complétant le règlement (CE) no 715/2007 du Parlement européen et du Conseil relatif à la réception des véhicules à moteur au regard des émissions des véhicules particuliers et utilitaires légers (Euro 5 et Euro 6) et aux informations sur la réparation et l'entretien des véhicules, modifiant la directive 2007/46/CE du Parlement européen et du Conseil, le règlement (CE) no 692/2008 de la Commission et le règlement (UE) no 1230/2012 de la Commission et abrogeant le règlement (CE) no 692/2008, ainsi que la directive 2007/46/CE du Parlement européen et du Conseil en ce qui concerne les émissions en conditions de conduite réelles des véhicules particuliers et utilitaires légers (Euro 6) », *Journal Officiel de l'Union européenne*, 2017.
- [16] **B. Martin**, « Les émissions de particules fines ». 2017.
- [17] **Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire**, « Contrôle des émissions de polluants », 2019. <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/controle-des-emissions-polluants> (consulté le mai 19, 2020).
- [18] **H.-S. Kwon, M. H. Ryu, et C. Carlsten**, « Ultrafine particles : unique physicochemical properties relevant to health and disease », *Exp. Mol. Med.*, vol. 52, p. 318-328, 2020, doi: 10.1038/s12276-020-0405-1.
- [19] **Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire et ANSES**, « Déclaration des substances à l'état nanoparticulaires ». <https://www.r-nano.fr/> (consulté le mai 19, 2020).
- [20] **S. Zhang et al.**, « La surveillance des particules ultrafines en France », présenté à Congrès Français sur les Aérosols (CFA 2018), 2018.
- [21] **P. Kumar et al.**, « Ultrafine particles in cities », *Environment International*, vol. 66, p. 1-10, 2014, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2014.01.013>.

- [22] **O. Regniers**, « Les particules diesel ultrafines : techniques de mesure à l'émission et à l'immission », 2006.
- [23] **Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC)**, « Communiqué de presse : Les gaz d'échappement des moteurs diesel cancérigènes », 2012.
- [24] **Atmo Hauts-de-France**, « Stratégie "Particules ultrafines" pour la région Hauts-de-France », 2017.
- [25] **L. Morawska et al.**, « Ambient nano and ultrafine particles from motor vehicle emissions : Characteristics, ambient processing and implications on human exposure », *Atmospheric Environment*, vol. 42, p. 8113-8138, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.050>.
- [26] **Autorité de contrôles des nuisances aéroportuaires (ACNUSA)**, « Particules ultrafines et aviation - Etude bibliographique », 2017.
- [27] **Airports Council International**, « Ultrafines particules at airports - Current understanding of ultrafine particle emissions and concentrations at airports in 2018 », 2018.
- [28] **R. J. Weber et al.**, « Measurements of new particle formation and UFP growth rates at a clean continental site », *J. Geophys. Res.*, vol. 102, p. 4375-4385, 1997, doi: <https://doi.org/10.1029/96JD03656>.
- [29] **Atmo Nouvelle-Aquitaine**, « Particules ultrafines - Bilan annuel 2017 », 2018.
- [30] **AtmoSud**, « Plan de surveillance des particules dans la région PACA, PUF Bilan des mesures 2016 », 2017.
- [31] **AtmoSud**, « Plan de surveillance des particules dans la région PACA, PUF Bilan des mesures 2017 », 2018.
- [32] **Atmo Hauts-de-France**, « Surveillance des particules ultrafines dans la région Hauts-de-France », 2019.
- [33] **A. Tobías et al.**, « Short-term effects of ultrafine particles on daily mortality by primary vehicle exhaust versus secondary origin in three Spanish cities », *Environ. Int.*, vol. 111, p. 144-151, févr. 2018, doi: [10.1016/j.envint.2017.11.015](https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.11.015).
- [34] **Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA)**, « Métrologie des polluants non réglementés : particules submicroniques », 2008.
- [35] **F. R. Cassee, L. Morawska, et A. Peters**, « White Paper - Ambient ultrafine particles : evidence for policy makers », 2019.
- [36] **Atmo AURA**, « Observatoire des particules ultrafines atmosphériques en Rhône-Alpes », 2016.
- [37] **Atmo Nouvelle-Aquitaine**, « Mesures exploratoires de particules ultrafines en Aquitaine », 2015.
- [38] **J. Sun et al.**, « Variability of black carbon mass concentrations, sub-micrometer particle number concentrations and size distributions : results of the German Ultrafine Aerosol Network ranging from city street to High Alpine locations », *Atmospheric Environment*, vol. 202, p. 256-268, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.12.029>.
- [39] **V. Crabbe**, « Toxicologie expérimentale des particules ultrafines atmosphériques », 2007.
- [40] **R. M. Harrison et al.**, « Measurement of number, mass and size distribution of particles in the atmosphere », *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, vol. 358, p. 2567-2580, 2000, doi: [10.1098/rsta.2000.0669](https://doi.org/10.1098/rsta.2000.0669).
- [41] **T. Rönkkö et al.**, « Effect of dilution conditions and driving parameters on nucleation mode particles in diesel exhaust : Laboratory and on-road study », *Atmospheric Environ.*, vol. 40, p. 2893-2901, 2006, doi: [10.1016/j.atmosenv.2006.01.002](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.01.002).
- [42] **A. Charron, W. Birmili, et R. M. Harrison**, « Factors influencing new particle formation at the rural site, Harwell, United Kingdom », *J. Geophys. Res.*, vol. 112, p. D14210, 2007, doi: [10.1029/2007JD008425](https://doi.org/10.1029/2007JD008425).
- [43] **R. C. Easter et L. K. Peters**, « Binary Homogeneous Nucleation : Temperature and Relative Humidity Fluctuations, Nonlinearity, and Aspects of New Particle Production in the Atmosphere », *J. Appl. Meteor.*, vol. 33, p. 775-784, 1994, doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1994\)033%3C0775:BHNTAR%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1994)033%3C0775:BHNTAR%3E2.0.CO;2).
- [44] **P. Korhonen et al.**, « Ternary nucleation of H₂SO₄, NH₃ and H₂O in the atmosphere », *J. Geophys. Res.*, vol. 104, p. 26349-26353, 1999, doi: <https://doi.org/10.1029/1999JD900784>.
- [45] **D. Rimnáková et al.**, « Atmospheric aerosols in suburb of Prague : The dynamics of particle size distributions », *Atmospheric Research*, vol. 101, p. 539-552, 2010, doi: [10.1016/j.atmosres.2010.10.024](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.10.024).
- [46] **A. Charron et R. M. Harrison**, « Primary particle formation from vehicle emissions during exhaust dilution in the roadside atmosphere », *Atmospheric Environment*, vol. 37, p. 4109-4119, 2003, doi: [10.1016/S1352-2310\(03\)00510-7](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(03)00510-7).
- [47] **G. R. Cass et al.**, « The chemical composition of atmospheric ultrafine particles », *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, vol. 358, p. 2581-2592, 2000, doi: [10.1098/rsta.2000.0670](https://doi.org/10.1098/rsta.2000.0670).
- [48] **ANSES**, « Particules de l'air ambiant extérieur - Effets sanitaires des particules de l'air ambiant extérieur selon les composés, les sources et la granulométrie », 2019.

- [49] **C. Samara et al.**, « Spatial and seasonal variations of the chemical, mineralogical and morphological features of quasi-ultrafine particles (PM_{0.49}) at urban sites », *Sci. Total Environ.*, vol. 553, p. 392-403, 2016, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.02.080.
- [50] **D. E. Schraufnagel**, « The health effects of ultrafine particles », *Exp. Mol. Med.*, vol. 52, p. 311-317, 2020, doi: 10.1038/s12276-020-0403-3.
- [51] **A.-K. Viitanen et al.**, « Workplace Measurements of Ultrafine Particles—A Literature Review », *Ann. Work Expo. Health*, vol. 61, p. 749-758, 2017, doi: 10.1093/annweh/wxx049.
- [52] « Grand Est Agence Régionale de Santé : Qualité de l'air intérieur », août 2020. <https://www.grand-est.ars.sante.fr/qualite-de-lair-interieur-7> (consulté le sept. 14, 2020).
- [53] **D. E. Schraufnagel et al.**, « Air Pollution and Noncommunicable Diseases », *Chest*, vol. 155, p. 409-416, 2019, doi: 10.1016/j.chest.2018.10.042.
- [54] **B. Alföldy et al.**, « Size-distribution dependent lung deposition of diesel exhaust particles », *J. Aerosol Sci.*, vol. 40, p. 652-663, 2009, doi: 10.1016/j.jaerosci.2009.04.009.
- [55] **W. Möller et al.**, « Deposition, Retention, and Translocation of Ultrafine Particles from the Central Airways and Lung Periphery », *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, vol. 177, p. 426-432, 2008, doi: 10.1164/rccm.200602-3010C.
- [56] **G. Oberdorster, J. Ferin, et B. E. Lehnert**, « Correlation between particle size, in vivo particle persistence, and lung injury. », *Environ. Health Perspect.*, vol. 102, p. 173-179, 1994, doi: 10.2307/3432080.
- [57] **N. R. Yacobi et al.**, « Mechanisms of Alveolar Epithelial Translocation of a Defined Population of Nanoparticles », *Am. J. Respir. Cell Mol. Biol.*, vol. 42, p. 604-614, 2010, doi: 10.1165/rcmb.2009-0138OC.
- [58] **J. J. Powell et al.**, « Immune Potentiation of Ultrafine Dietary Particles in Normal Subjects and Patients with Inflammatory Bowel Disease », *J. Autoimmun.*, vol. 14, p. 99-105, 2000, doi: 10.1006/jaut.1999.0342.
- [59] **R. A. Morales-Rubio et al.**, « In utero exposure to ultrafine particles promotes placental stress-induced programming of renin-angiotensin system-related elements in the offspring results in altered blood pressure in adult mice », *Part. Fibre Toxicol.*, vol. 16, 2019, doi: 10.1186/s12989-019-0289-1.
- [60] **L. Tian et al.**, « Correlation of regional deposition dosage for inhaled nanoparticles in human and rat olfactory », *Part. Fibre Toxicol.*, vol. 16, 2019, doi: 10.1186/s12989-019-0290-8.
- [61] **H. S. Sharma et A. Sharma**, « Nanoparticles aggravate heat stress induced cognitive deficits, blood-brain barrier disruption, edema formation and brain pathology », *Prog. Brain Res.*, vol. 162, p. 245-273, 2007, doi: [https://doi.org/10.1016/S0079-6123\(06\)62013-X](https://doi.org/10.1016/S0079-6123(06)62013-X).
- [62] **M. Geiser et W. G. Kreyling**, « Deposition and biokinetics of inhaled nanoparticles », *Part. Fibre Toxicol.*, vol. 7, 2010, doi: 10.1186/1743-8977-7-2.
- [63] **L. K. Limbach et al.**, « Exposure of Engineered Nanoparticles to Human Lung Epithelial Cells: Influence of Chemical Composition and Catalytic Activity on Oxidative Stress », *Environ. Sci. Technol.*, vol. 41, p. 4158-4163, 2007, doi: 10.1021/es062629t.
- [64] **Institut national de Veille Sanitaire (InVS)**, « Particules ultrafines et santé : apports des études épidémiologiques », 2008.
- [65] **K. Donaldson et al.**, « The Pulmonary Toxicology of Ultrafine Particles », *J. Aerosol Med.*, vol. 15, p. 213-220, 2002, doi: 10.1089/089426802320282338.
- [66] **S. Weichenthal et al.**, « Within-city Spatial Variations in Ambient Ultrafine Particle Concentrations and Incident Brain Tumors in Adults », *Epidemiology*, vol. 31, p. 177-183, 2020, doi: 10.1097/EDE.0000000000001137.
- [67] **C. Chang et al.**, « Physicochemical and toxicological characteristics of welding fume derived particles generated from real time welding processes », *Env. Sci Process. Impacts*, vol. 15, p. 214-224, 2013, doi: 10.1039/C2EM30505D.
- [68] **A. Ibaldo-Mulli et al.**, « Epidemiological Evidence on Health Effects of Ultrafine Particles », *J. Aerosol Med.*, vol. 15, p. 189-201, 2002, doi: 10.1089/089426802320282310.



Air • Climat • Energie • Santé

Espace Européen de l'Entreprise – 5 rue de Madrid – 67300 Schiltigheim
Tél : 03 88 19 26 66 - Fax : 03 88 19 26 67 - contact@atmo-grandest.eu
Siret 822 734 307 000 17 – APE 7120 B

Association agréée de surveillance de la qualité de l'air