



## **DEVELOPPEMENT D'UN INVENTAIRE D'EMISSIONS DE PARTICULES ULTRAFINES EN NOMBRE**

### **Synthèse méthodologique**

#### **Date de parution**

Octobre 2025

#### **Contact**

Pilote de projet - Damien Bouchard : [damien.bouchard@atmosud.org](mailto:damien.bouchard@atmosud.org)

#### **Références**

AFI-000307 / Num rapport-01

Rédacteur : Thomas Goutorbe

Vérificateur : Damien Bouchard

## Résumé

### ► Inventaires de particules en nombre : un travail pionnier

AtmoSud a entrepris en 2025 un travail précurseur en France avec l'élaboration d'un inventaire en nombre de particules sur la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Ce rapport méthodologique regroupe et explique les différents choix techniques qui ont été privilégiés dans l'élaboration de l'inventaire à la maille communale.

### ► Structure de l'inventaire des émissions de particules en nombre

La méthodologie s'appuie sur une synthèse bibliographique des études existantes à l'international et de l'utilisation de données et de l'analyse des données d'activité disponibles dans les inventaires AtmoSud déjà existants.

Les facteurs d'émission proviennent de diverses sources dont certaines sont locales, et leur niveau de détail varie d'un secteur à l'autre. Si la majorité des facteurs d'émission sont liés à l'activité, certains sont parfois exprimés en fonction des émissions de particules en masse.

Les données sont calculées selon le même niveau de découpage que les polluants classiques, avec un détail notamment par année, par activité détaillées (snap3) et par énergie.

### ► Distribution granulométrique

Les émissions de particules en nombres sont réparties dans 15 tranches de tailles différentes à partir de profils de distribution granulométriques, issus de l'exploitation de travaux de recherche et de données locales. Cette répartition permet d'identifier les secteurs majoritairement émetteurs sur chacune des tranches et d'analyser les gammes de tailles les plus émettrices.

### ► Perspectives et évolution

Cette première méthodologie issue de travaux exploratoires permet d'avoir un inventaire communal des particules en nombre par secteur, contribuant à l'amélioration des connaissances et ouvrant la porte à une réflexion nouvelle sur les enjeux des émissions de particules.

Les travaux sont à enrichir en ce sens, notamment à travers la recherche de facteurs d'émission et de profils granulométriques plus récents, plus détaillés, évolutifs selon les années, et si possible davantage propres à la région. Les évolutions méthodologiques pourront être menées avec le concours de tous les acteurs locaux, étatiques, et scientifiques.

## SOMMAIRE

|       |                                                                       |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------|----|
| I     | Introduction .....                                                    | 4  |
| I.1   | Qu'est-ce qu'un inventaire des émissions ?.....                       | 4  |
| I.2   | Quelles sont les caractéristiques des inventaires AtmoSud ? .....     | 4  |
| I.3   | Définition des PUF .....                                              | 5  |
| I.4   | Quelles sont les particules prises en compte dans l'inventaire ?..... | 5  |
| II    | Méthologie de calcul des émissions PUF .....                          | 6  |
| II.1  | Méthodologie globale de calcul.....                                   | 6  |
| II.2  | Transport routier .....                                               | 7  |
| II.3  | Maritime .....                                                        | 8  |
| II.4  | Aérien .....                                                          | 9  |
| II.5  | Ferroviaire.....                                                      | 10 |
| II.6  | Fluvial.....                                                          | 10 |
| II.7  | Résidentiel .....                                                     | 10 |
| II.8  | Tertiaire .....                                                       | 11 |
| II.9  | Industrie.....                                                        | 12 |
| II.10 | Agriculture .....                                                     | 13 |
| II.11 | Incendies de forêts .....                                             | 13 |
| II.12 | Synthèse des facteurs d'émission par secteur .....                    | 14 |
| III   | Distribution granulométrique .....                                    | 14 |
| IV    | Perspectives d'amélioration .....                                     | 16 |

## I INTRODUCTION

AtmoSud réalise de manière périodique un inventaire communal air-climat-énergie, incluant des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre ([www.cigale.atmosud.org](http://www.cigale.atmosud.org)). Pour compléter les inventaires d'émissions de particules déjà présent (PM10, PM2.5), une méthodologie a été mise en place pour constituer un inventaire des particules ultrafines (PUF) en nombre. Ainsi, l'objectif de ce rapport est de fournir les principes méthodologiques qui ont été nécessaires à la réalisation de cet inventaire à la maille communale sur la région Provence-Alpes-Côte d'Azur.

### I.1 Qu'est-ce qu'un inventaire des émissions ?

L'inventaire des émissions est un répertoire regroupant la liste de l'ensemble des polluants présents sur le territoire régional. Il permet de quantifier et qualifier, pour chaque activité émettrice d'un territoire, les quantités de polluants et de gaz à effet de serre émises sur un intervalle de temps. Les résultats de l'inventaire des émissions peuvent prendre la forme de tableaux chiffrés ou de cartes. Lorsque les émissions sont spatialisées, on parle de cadastre des émissions.



Il est important de ne pas confondre émissions et concentration.

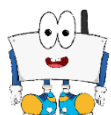
*Les émissions de polluants correspondent aux quantités directement rejetées dans l'atmosphère par les activités humaines (cheminées d'usine ou de logements, pots d'échappement, agriculture...) ou par des sources naturelles (végétation, sols, etc.). Là où les concentrations de polluants, elles, correspondent à la quantité de polluants présents dans un volume d'air et caractérisent la qualité de l'air que l'on respire.*

### I.2 Quelles sont les caractéristiques des inventaires AtmoSud ?

Les inventaires d'émissions produits par AtmoSud présentent plusieurs spécificités qui les rendent particulièrement adaptés à l'analyse territoriale. Ils sont construits à l'échelle communale, ce qui permet de suivre les émissions à l'échelle la plus fine du territoire. Les données sont également annuelles, avec un décalage de deux ans pour chaque année en raison du temps nécessaire à la consolidation des données.

L'inventaire est calculé de manière détaillée pour chaque secteur d'activité selon la nomenclature SNAP (Selected Nomenclature for Air Pollution) qui permet une classification standardisée et plus précise des sources d'émission, regroupées par activités. Cette structuration est complétée par la prise en compte du type d'énergie consommée, ce qui permet d'affiner encore les estimations.

Les calculs sont d'abord réalisés dans des modules sectoriels avec un grand niveau de détail et des données fines. Les données sont ensuite compilées dans une table agrégée dont le niveau de détail est moins important. Ces inventaires, qui servent à la création de l'inventaire global, sont bien plus détaillés dans le secteur qu'ils représentent respectivement.



*A chaque mise à jour de l'inventaire, en complément de l'ajout de nouvelles années, l'ensemble des données historiques sont actualisées pour prendre en compte les divers changements méthodologiques et assurer une comparabilité entre les années. Les données d'inventaire sont versionnées afin d'assurer la traçabilité et expliquer les évolutions des données diffusées.*

### I.3 Définition des PUF

Les particules ultrafines (PUF) sont des particules atmosphériques de diamètre inférieur à 100 nanomètres. De par leur petite taille, les PUF présentent des caractéristiques physico-chimiques plus dangereuses que les PM10 ou PM2,5 (respectivement de diamètre inférieur à 10 et 2,5 micromètres) car elles sont capables de pénétrer profondément dans l'organisme, de franchir la barrière pulmonaire et d'atteindre la circulation sanguine. Les PUF sont émises à la fois par des sources anthropiques (transport routier, maritime, aérien...) ainsi que par des sources naturelles (feux de forêt, éruptions volcaniques...).



*À ce jour, il n'existe pas de seuil réglementaire spécifique en France ou en Europe concernant les particules ultrafines, contrairement aux PM10 et PM2,5 qui sont encadrées par la directive européenne sur la qualité de l'air. Cependant, les PUF suscitent une attention croissante dans la communauté scientifique et chez les acteurs de la surveillance de la qualité de l'air, en raison de leurs potentiels risques sanitaires et de leur caractère encore peu étudié.*

Dans ce contexte, la mise en place d'un inventaire des émissions de particules ultrafines en nombre de particules constitue donc un enjeu crucial.

### I.4 Quelles sont les particules prises en compte dans l'inventaire ?

Les inventaires d'émissions de particules ultrafines tiennent compte à la fois des particules solides et semi-volatiles car les particules semi-volatiles peuvent influencer considérablement les émissions et nécessiter des stratégies de contrôle distinctes des émissions liées aux particules solides (Gieschaskiel, 2022).

La taille des particules prises en compte dans les inventaires est comprise entre 10 et 300 nm.

En effet, les particules de taille inférieure à 10 nm sont produites en grande quantité lors de la phase de nucléation à partir d'échanges gazeux mais elles ont une durée de vie courte (Visschedijk, 2022) car trop instables. De plus, elles sont assez difficiles à mesurer. Par ailleurs, la limite de 10 nm est conforme à la directive sur la qualité de l'air pour les mesures en air ambiant.

De l'autre côté, les particules de taille supérieure à 300 nm sont peu nombreuses par rapport aux gammes de taille inférieures. Elles vont donc compter beaucoup dans la masse mais peu dans le nombre de particules.

*Les émissions de particules en nombre sont généralement estimées selon 10 à 15 tranches granulométriques (entre 10 et 300 nm). Une de ces tranches s'arrête autour de 100 nm qui est la limite officielle de taille des particules ultrafines. La taille des tranches et leur nombre ont été décidé selon les besoins et les spécifications des outils de modélisation de la qualité de l'air utilisés dans le cadre du projet Eucaari.*

*Enfin, il est à noter qu'environ 85 à 90 % des particules en nombre sont présentes à l'émission dans la gamme 10 – 100 nm selon la littérature (Van Mil, 2024).*

De plus, comme dans les inventaires de polluants atmosphériques classiques, les émissions prises en compte sont uniquement les émissions primaires. C'est-à-dire que les particules secondaires formées à partir de gaz précurseurs selon des réactions chimiques atmosphériques complexes ne sont pas comptabilisés dans l'inventaire.

L'inventaire PUF prend en compte les particules de 10 à 300 nanomètres de diamètre

## II METHOLOGIE DE CALCUL DES EMISSIONS PUF

### II.1 Méthodologie globale de calcul

La méthodologie globale du calcul est la même pour chaque secteur d'émissions, elle est basée sur la combinaison d'un facteur d'émission et d'une activité, selon l'équation type suivante :

$$\text{Émission} = \text{Activité} * \text{Facteur d'émission}$$

Dans cette méthode, les facteurs d'émission sont donc exprimés en nombre de particules par unité d'activité

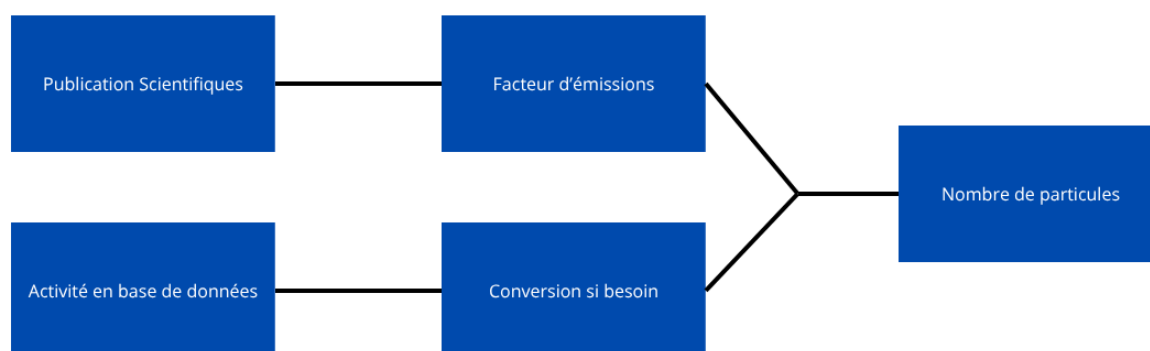
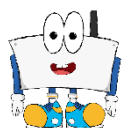


Figure 1 : Logigramme de la méthodologie de calcul classique

Plusieurs types de facteurs d'émission ont été utilisés pour réaliser cet inventaire :

- Les facteurs d'émission relatifs à une activité, exprimés en nombre de particules émis pour une activité définie. Exemple : nombre de particules par kilomètre parcouru, nombre de particules par GJ consommé.
- Les facteurs d'émission exprimés par rapport aux émissions massiques d'un autre polluant. Exemple : nombre de particules par kilogramme de PM2.5 émis.



Les facteurs d'émission propres à une activité (consommation, km parcouru, etc.) sont utilisés en priorité. En effet, ils sont considérés plus précis car dépendant d'un indicateur, et par ailleurs la corrélation entre nombre de particules et masse n'est pas toujours vérifiée.

La méthodologie est adaptée pour chaque secteur, à différents niveaux de détails, en fonction des facteurs d'émission et des données d'activités disponibles.

A l'exception du secteur aérien dont les calculs ont été intégrés au module de calcul sectoriel, les calculs d'émissions sont réalisés en post-traitement de l'inventaire communal. Cette étape est réalisée à partir d'une table de sortie de l'inventaire contenant toutes les données agrégées pour l'ensemble des secteurs. Pour certains secteurs, des données d'activité plus fines que celles disponibles dans la table agrégées sont nécessaires : des ajustements ont été réalisés et sont décrits dans la méthodologie détaillée pour chaque secteur, documentée dans les sections suivantes.

## II.2 Transport routier

Le secteur du transport routier rentre parfaitement dans la méthodologie classique du calcul. Les facteurs d'émission proviennent des études suivantes.

| Type de FE          | Unité                   | Source          |
|---------------------|-------------------------|-----------------|
| Combustion          | Particules / km         | Ketzel, 2021    |
| Abrasion des freins | Particules / km / frein | Mathissen, 2023 |
| Abrasion des pneus  | Particules / km         | Khardi, 2024    |

Tableau 1 : Facteurs d'émission du secteur routier

Des facteurs d'émission pour la combustion sont aussi donnés dans les travaux COPERT<sup>1</sup>, mais les facteurs de Ketzel ont été privilégiés pour plusieurs raisons. D'abord une question d'homogénéité avec la gamme de taille utilisée dans l'inventaire pour l'ensemble des secteurs (10-300nm). Et ensuite, bien que les deux études proposent des facteurs d'émission par type de véhicule, ceux de Ketzel sont aussi évolutifs au cours des années ce qui permet un calcul plus précis et cohérent avec les évolutions du secteur routier.

Les facteurs d'émission retenus (Ketzel), sont regroupés par type de véhicules mais pas par norme Euro ou par type de carburant. Ces facteurs sont donnés pour les années 2001, 2008, 2010 et 2017. Il a été calculé par la suite les facteurs correspondants aux autres années, par interpolation pour les années entre 2001 et 2017 puis par simple duplication de 2017 jusqu'à aujourd'hui.

L'activité utilisée en entrée est le nombre de kilomètres parcourus en millions de kilomètres pour chaque type de véhicule (voiture, moto, camion), issus des données d'entrée utilisées dans le module de calcul du secteur routier. Il est considéré que le nombre de freins moyen par type de véhicules est le suivant :

- **Véhicules particuliers et utilitaires légers** : 4 freins
- **Véhicules lourds** : 9,2 freins en moyenne (calculé depuis les données d'AtmoSud)
- **2 roues** : 2 freins

<sup>1</sup> COPERT : Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport

## II.3 Maritime

Pour le secteur maritime, les facteurs d'émission sont issus des travaux de thèse<sup>2</sup> de Lise Le Berre sur les émissions des navires en zone portuaire dans la région Provence-Alpes Côte d'Azur, avec notamment des analyses sur les émissions en nombre de particules ultrafines. Il a été possible d'exploiter directement les données brutes des résultats de l'étude pour déterminer de facteurs d'émission.

Dans les travaux de thèse, les données d'émissions sont évaluées à l'aide de deux types de capteurs, un capteur CPC<sup>3</sup> et un capteur SMPS<sup>4</sup> ayant chacun leurs spécificités.

| Type de Capteur | Plage de tailles | Distribution granulométrique |
|-----------------|------------------|------------------------------|
| CPC             | 2,5-3000nm       | Non                          |
| SMPS            | 15-660nm         | Oui                          |

Tableau 2 : Comparatif des spécificités des capteurs

Les données issues du capteur SMPS ont été privilégiées du fait des informations sur la distribution granulométrique des particules.

Ce détail granulométrique permet de récupérer les facteurs d'émission par tranche de taille, recombinaison pour obtenir le facteur global sur la tranche 15-300nm (le SMPS ne fournit pas d'information en dessous de 15nm) qui coïncide presque avec la gamme 10-300 nm utilisée pour les autres secteurs.

Pour compléter le facteur d'émissions et obtenir les données de la tranche 10-15nm manquante, les données de granulométrie du secteur maritime issues de l'exploitation de l'inventaire réalisé par le TNO<sup>5</sup> sur la région (cf section Distribution granulométrique) ont été utilisées.

Dans un premier temps il a été considéré que les données 15-16 nm issues de l'exploitation du SMPS (thèse) sont applicables pour l'ensemble de la tranche 13-16 nm, correspondant à une des tranches détaillées dans les données de l'inventaire TNO.

En second lieu, l'exploitation de l'inventaire TNO sur le secteur maritime a permis d'établir un ratio d'évolution des contributions entre la tranche 10-13nm et 13-16nm.

Ce ratio a été appliqué aux données 13-16nm défini à partir de l'exploitation des données de thèse afin de reconstituer des données pour la tranche 10-13nm. Ces données ont également pu être utilisées pour la création des profils de distribution granulométriques.

<sup>2</sup> Le Berre, Impact des activités maritimes sur la qualité de l'air : Caractérisation physico-chimique des émissions des navires en zone portuaire (thèse de doctorat 2024).

<sup>3</sup> CPC = Condensation Particle Counter

<sup>4</sup> SMPS = Scanning Mobility Particle Sizer

<sup>5</sup> RI-Urbans (Research Infrastructures Services Reinforcing Air Quality Monitoring Capacities in European Urban & Industrial Areas): <https://riurbans.eu/>



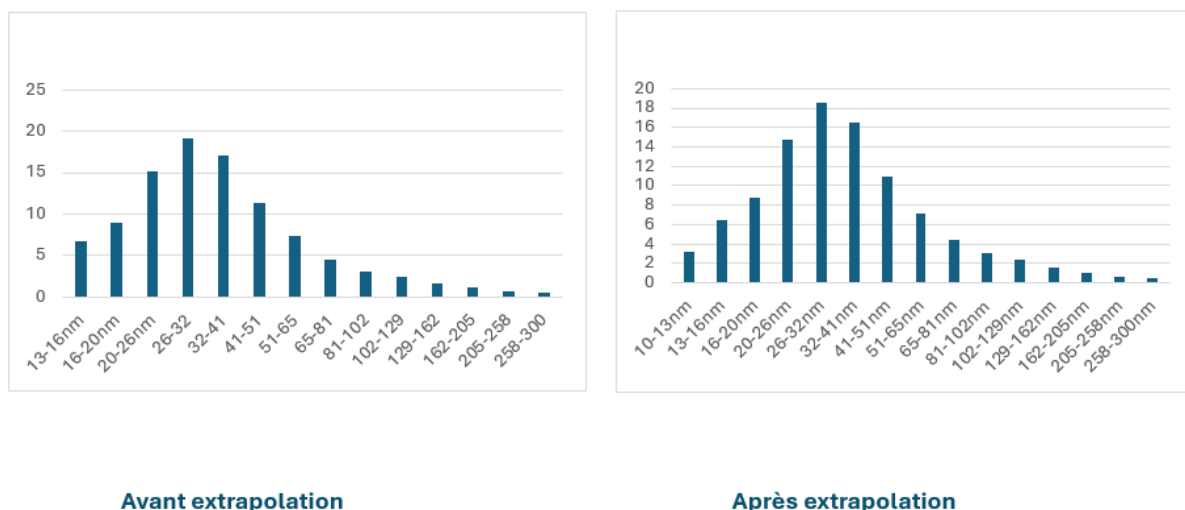


Figure 2 : Distribution granulométrique maritime avant et après extrapolation

Les facteurs d'émission utilisés sont détaillés par phases de trajet, mais pas par différents types de bateaux. Ils sont exprimés en nombre de particules par kilogramme de fuel consommé. Les données de consommation utilisées sont issues des calculs de l'inventaire d'AtmoSud pour le secteur maritime.

## II.4 Aérien

Les facteurs d'émission du secteur aérien proviennent des études suivantes :

| Type de FE              | Unité                   | Source                  |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Avions                  | Particules / kg de fuel | Van Mil ,2024           |
| Avions à pistons        | Particules / kg de fuel | FOCA, 2015 <sup>6</sup> |
| Hélicoptères (kérosène) | Particules / kg de fuel | FOCA, 2015              |
| Hélicoptères (Avgas)    | Particules / kg de fuel | FOCA, 2015              |

Les facteurs d'émission de la FOCA ont été recalculés depuis leurs données brutes par AtmoSud selon la méthodologie expliquée par la documentation de la FOCA<sup>7</sup>, afin de s'assurer de la cohérence des résultats. Il a aussi été décidé que par manque de données sur le sujet, les avions à pistons prendraient comme facteur d'émission la même valeur que les hélicoptères Avgas.

Tous les calculs du secteur aérien pour les émissions de particules ultrafines ont été réalisés dans le schéma sectoriel de l'aérien et non en post-traitement comme la plupart des autres secteurs. Les données de consommation utilisées sont issues des données de l'inventaire d'AtmoSud.

<sup>6</sup> Office Fédéral de l'Aviation Civile (Suisse)

<sup>7</sup> Voir bibliographie

## II.5 Ferroviaire

Par manque de données de facteurs d'émission de PUF liées l'abrasion dans le secteur Ferroviaire, les émissions de ce secteur ne prennent en compte que la combustion. Le facteur d'émissions retenu pour la combustion provient de l'article de Krasowsky, 2015 et s'exprime en particules par kilogramme de carburant consommé. En base, les données de consommation utilisées sont issues des données de l'inventaire d'AtmoSud pour le secteur ferroviaire.

## II.6 Fluvial

Le facteur d'émissions retenu pour le secteur Fluvial provient de l'étude d'Egel, 2023 et s'exprime en particules par kilogramme de carburant consommé. Les données de consommation utilisées sont issues des données de l'inventaire d'AtmoSud pour le secteur fluvial.

## II.7 Résidentiel

Pour le secteur résidentiel, des facteurs d'émission sont disponibles pour la combustion de bois et de fioul, mais pas pour le gaz ou d'autre combustibles. La combustion de gaz émettant peu de particules ultrafines, il a été décidé de négliger cette énergie. Les facteurs d'émission du secteur résidentiel proviennent des études suivantes :

| Type de chauffage       | Combustible | Unité                  | Source          |
|-------------------------|-------------|------------------------|-----------------|
| Chaudière bois ancienne | Bois        | Particules / Pétajoule | Johansson, 2004 |
| Chaudière bois récente  | Bois        | Particules / Pétajoule | Johansson, 2004 |
| Poêle à bois récent     | Bois        | Particules / Pétajoule | Paasonen, 2013  |
| Poêle à bois récent     | Bois        | Particules / Pétajoule | Paasonen, 2013  |
| Poêle à pellets récent  | Bois        | Particules / Pétajoule | Paasonen, 2013  |
| Poêle à pellets ancien  | Bois        | Particules / Pétajoule | Paasonen, 2013  |
| Tous confondus          | Fioul       | Particules / Pétajoule | Johansson, 2004 |

Tableau 3 : Facteurs d'émission du secteur résidentiel

Les facteurs d'émission disponibles pour le chauffage au bois dépendent du type d'appareil de chauffage utilisé. Le détail des consommations par type d'appareil n'est pas disponible dans les tables compilées utilisées pour le calcul en post-traitement des émissions PUF.

A partir de données détaillées issues de tables intermédiaires du module de calcul du secteur résidentiel, des facteurs d'émission moyen par commune ont été calculés selon la méthodologie suivante

1. Calcul de ratios de consommation de chaque catégorie d'appareil de chauffage au bois par commune et par année
2. Calcul d'un facteur d'émissions pondéré par commune et par année, en combinant les ratios de consommation et les facteurs d'émission par catégorie d'équipement
3. Les facteurs d'émission résultants sont appliqués aux consommations de bois communales pour le secteur résidentiel issues de l'inventaire AtmoSud

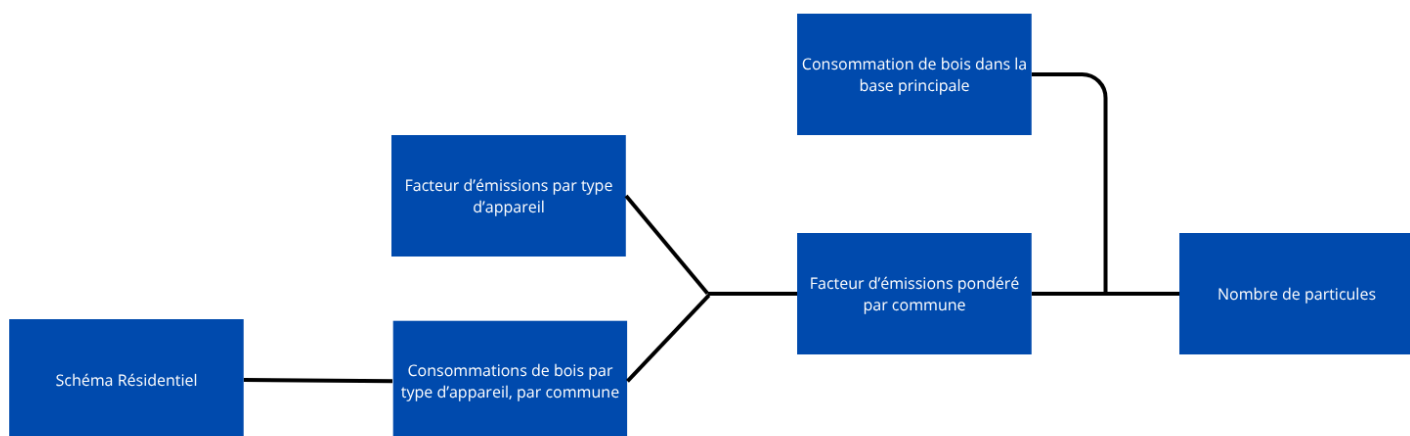


Figure 3 : Logigramme du calcul du secteur Résidentiel

## II.8 Tertiaire

Par défaut, les facteurs d'émission du secteur Tertiaire sont considérés identiques à ceux du secteur Résidentiel, les mêmes hypothèses sur l'omission du gaz ont aussi été adoptées. Les facteurs d'émission proviennent de la même étude :

| Type de chauffage       | Combustible | Unité                  | Source          |
|-------------------------|-------------|------------------------|-----------------|
| Chaudière bois ancienne | Bois        | Particules / Pétajoule | Johansson, 2004 |
| Tous confondus          | Fioul       | Particules / Pétajoule | Johansson, 2004 |

Tableau 4 : Facteurs d'émission du secteur tertiaire

Il est considéré que tous les appareils de chauffage au bois utilisés pour ce secteur correspondent à des chaudières et seront classés dans le groupe de chauffage « chaudière bois ancienne » de l'étude Johansson, 2004. Les données de consommation utilisées sont issues des données de l'inventaire d'AtmoSud.

## II.9 Industrie

Dans le contexte de la création de l'inventaire des particules ultrafines, le secteur industriel au sens large regroupe les émissions de l'industrie, des déchets ainsi que de la production d'énergie. Tous les facteurs d'émission du secteur proviennent de l'étude de Visschedijk, 2022 et s'expriment en particules par kilogramme de PM0.3. Ces facteurs d'émission sont classés dans 3 catégories selon leur niveau de détails, par ordre de priorité :

- A. Détail en par activité (snap3) et par type d'énergie
- B. Détail par type d'énergie.
- C. Facteurs d'émission génériques au secteur industriel
  - Pour les émissions liées au process : « procédés »
  - pour les activités de combustion : « petites sources d'émissions ».

Dans la base de données inventaire, les émissions massiques de particules du secteur industriel sont calculées et consolidées pour les PM10 et PM2.5, mais pas pour les PM0.3 ou les PM1.

En vue de pouvoir calculer les émissions PUF de l'industrie à partir des PM2.5, il est nécessaire de convertir les facteurs d'émission exprimés en nombre de particules/kg PM0.3 en nombre de particules/kg PM2.5.

**La construction des facteurs d'émission exprimés en nombre de particules / kg de PM2.5 a été réalisée selon la méthodologie suivante :**

- I. Conversion de nb/kg/PM0.3 à nb/kg PM1 via les ratios donnés par la documentation (Visschedijk, 2022)
- II. Création de ratios kg PM2.5/kg/PM1 pour chaque triplets (année, activité, énergie) à travers l'exploitation de la BDD OMINEA du CITEPA., grâce à la division des facteurs d'émission PM2.5 par ceux des PM1. Pour les triplets manquants, un ratio moyen est recalculé.
- III. Application des ratios PM2.5/PM1 aux FE préalablement convertis en nb/kg PM1

À partir des FE convertis en nb/kg de PM2.5, les émissions de PUF sont calculés à partir des données d'émission de PM2.5 pour les secteur industriel selon l'ordre de priorité A, B, C défini ci-avant

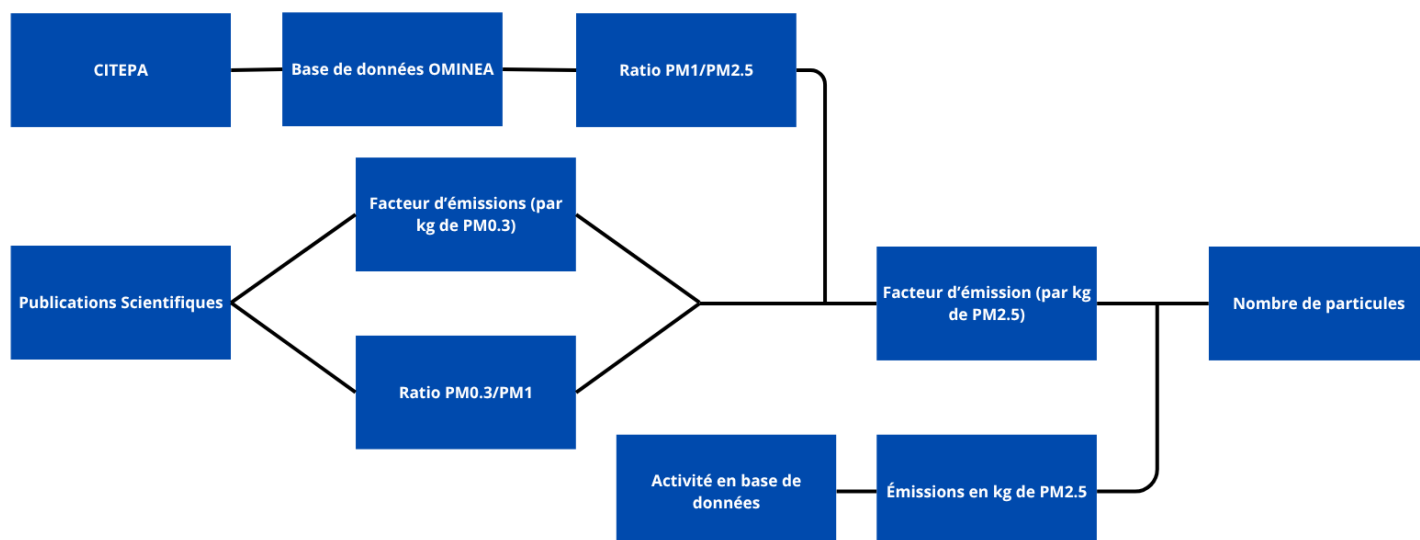


Figure 4 : Logigramme du calcul du secteur Industriel

## II.10 Agriculture

Pour la combustion d'engins agricoles, le facteur d'émission utilisé provient de Hedberg, 2002. Il est exprimé en particules par gramme de PM2.5 et il est valable pour toutes les énergies disponibles pour cette activité en base.

Pour le reste des activités du secteur, il n'existe pas de facteurs d'émission dans la littérature. De plus, l'étude des données de l'inventaire du TNO <sup>8</sup> indique que pour des régions fortement agricoles telles que la Bretagne, le secteur de l'Agriculture représente moins de 1 % des émissions de particules ultrafines. Sachant que la région Provence-Alpes-Côte d'Azur est une région très peu agricole, il est considéré que les émissions hors combustion agricole sont négligeables.

Pour calculer les émissions de PUF, le facteur d'émission est appliqué aux données d'émission de PM2.5 liées à la combustion issues de l'inventaire Atmosud.

## II.11 Incendies de forêts

Pour le secteur des incendies de forêts, le facteur d'émission retenu provient de l'article Janhäll, 2009. Ce facteur est exprimé en particules par kilogramme de biomasse brûlée.

L'activité des feux de forêt utilisée en base étant en la superficie brûlée, il est nécessaire de convertir ce facteur d'émission.

Un ratio pour déterminer le nombre de kilogrammes de biomasse dans un hectare de forêt a été calculé à partir de documents scientifiques de l'inventaire forestier IGN<sup>9</sup>, et appliqué au facteur d'émission d'origine. Les émissions de PUF ont été calculées à partir de ce facteur d'émission et des données de surfaces incendiées disponibles en base.

<sup>8</sup> RI-Urbans (Research Infrastructures Services Reinforcing Air Quality Monitoring Capacities in European Urban & Industrial Areas): <https://riurbans.eu/>

<sup>9</sup> [https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/IFN\\_Publi\\_2010\\_PACA.pdf](https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/IFN_Publi_2010_PACA.pdf)

## II.12 Synthèse des facteurs d'émission par secteur

Le tableau ci-dessous récapitule les différents types de facteurs d'émission utilisés pour calculer les émissions pour chaque secteur. Il est à noter qu'à l'exception du transport routier, les facteurs d'émission sont considérés identiques selon les années.

| Secteur                   | Type de FE        | Unité (nombre / x ) | Source                       |
|---------------------------|-------------------|---------------------|------------------------------|
| Routier (Combustion)      | Par activités     | /km                 | Ketzel,2021                  |
| Routier (Abrasion, Frein) | Par activités     | /km / frein         | Mathissen, 2023              |
| Routier (Abrasion, Pneu)  | Par activités     | /km                 | Khardi, 2024                 |
| Aérien                    | Par activités     | /kg de fuel         | Van Mil, 2024 / FOCA, 2015   |
| Maritime                  | Par activités     | /kg de fuel         | Le Berre, 2024               |
| Ferroviaire(Combustion)   | Par activités     | /kg de fuel         | Krasowsky, 2015              |
| Fluvial                   | Par activités     | /kg de fuel         | Egel, 2023                   |
| Résidentiel/ Tertiaire    | Par activités     | / PJ                | Paasonen,2013/Johansson,2004 |
| Industrie                 | Selon masse de PM | /kg PM2.5           | Visschedijk, 2022            |
| Agriculture(Combustion)   | Selon masse de PM | /g PM2.5            | Hedberg, 2002                |
| Biogénique                | Par activités     | /kg biomasse brûlée | Janhäll, 2009                |

Tableau 5 : Récapitulatif des types de facteurs d'émission utilisés

## III DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE

La distribution granulométrique des émissions est essentielle pour comprendre et analyser les inventaires de particules en nombre. Elles décrivent comment les particules sont réparties selon différentes tranches de taille.

Étant donné que les facteurs d'émission utilisés sont sur une gamme 10-300nm, les émissions déterminées à partir de ces facteurs sont calculées indépendamment de leur taille à l'intérieur de cette gamme.

Afin de répartir ces particules selon les différentes gammes de taille, les données d'émissions de l'inventaire du TNO<sup>10</sup> - qui propose des résultats selon 15 tranches granulométriques- ont été exploitées afin de construire des profils pour l'ensemble du territoire régional. Le principe est de procéder à la

[https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/memento\\_2022.pdf](https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/memento_2022.pdf)

<sup>10</sup> RI-Urbans (Research Infrastructures Services Reinforcing Air Quality Monitoring Capacities in European Urban & Industrial Areas): <https://riurbans.eu/>

somme les émissions calculées par le TNO sur le territoire Provence-Alpes-Côte d’Azur pour chaque secteur d’activité et chaque gamme de taille, puis de comparer au total par secteur toutes tranches confondues afin de recalculer les distributions granulométriques sectorielles. Pour le secteur maritime, une granulométrie régionale a été construite à partir des données brutes des travaux de thèse de Lise LE BERRE ,complétées par une extrapolation indexée sur la granulométrie déduite de l’inventaire du TNO (cf section II.3). Grâce à cette méthodologie, 15 tranches granulométriques couvrant l’ensemble de la plage 10-300 nm ont été créées pour tous les secteurs, à l’exception du biogénique et du ferroviaire.

| Tranche     | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Taille (nm) | 10-13 | 13-16 | 16-20 | 20-26 | 26-32 | 32-41 | 41-51 | 51-65 |

| Tranche     | 9     | 10     | 11      | 12      | 13      | 14      | 15      |
|-------------|-------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Taille (nm) | 65-81 | 81-102 | 102-129 | 129-162 | 162-205 | 205-258 | 258-300 |

Tableau 6 : Liste des tranches granulométriques utilisées

Le graphique suivant compile les profils de distribution granulométrique des particules ultrafines pour chacun des secteurs :

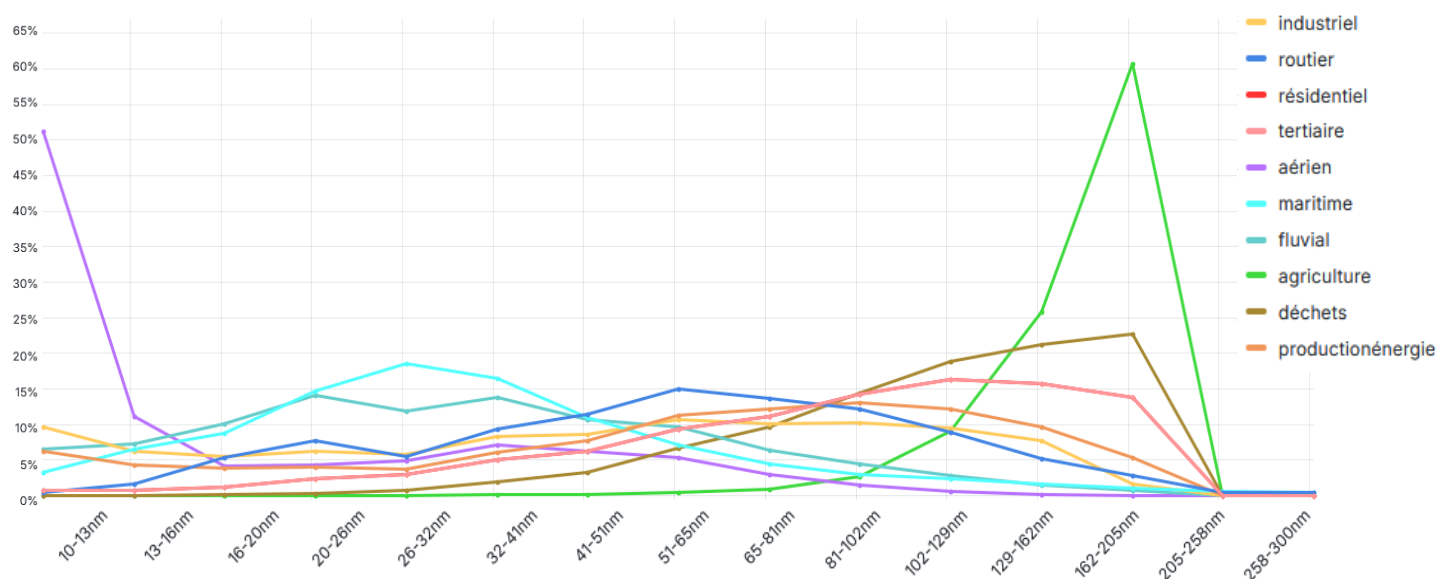
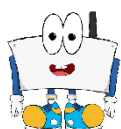


Figure 5 : Profil de distribution granulométrique des émissions PUF par secteur (en pourcentage des émissions du secteur)

Il est notamment identifié que les émissions de particules du transport aérien sont concentrées dans les tranches de petites taille, dont la moitié pour la tranche 10-13 nm. Pour le résidentiel, l’agriculture ou les déchets, les particules émises seront d’un diamètre plus conséquent.



Pour répartir les données d’émissions de PUF selon ces 15 tranches, il convient de multiplier les données d’émission de l’inventaire des particules ultrafines (10-300nm) par les profils de distribution de granulométrie propres à chacun des secteurs. Il est à noter que la distribution est considérée identique pour toutes les années.

## IV PERSPECTIVES D'AMELIORATION

Ce travail initié en 2025 marque la mise en place du premier inventaire régional en nombre des particules ultrafines sur la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, une avancée significative dans la surveillance de ce polluant encore peu encadré.

Toutefois, plusieurs pistes d'amélioration méthodologiques ont été identifiées, notamment en ce qui concerne les facteurs d'émission et la granulométrie associée.

Tout d'abord, un besoin important de travaux de recherche supplémentaires est nécessaire pour enrichir les connaissances en vue d'améliorer la qualité et la précision des facteurs d'émission disponibles. Certains facteurs utilisés sont soit très anciens, soit peu spécifiques et avec un détail, ce qui contraint la finesse du calcul d'inventaire pour certaines activités.

Pour le secteur industriel par exemple, il conviendrait de disposer de nouveaux facteurs d'émission, qui ne soit plus exprimés en fonction d'une masse de PM<sub>2.5</sub> mais en fonction de données d'activité, et si possible spécifiques à chaque type d'industrie.

Il serait aussi préférable d'avoir des facteurs d'émission davantage détaillés pour le transport routier, notamment selon la norme euro et la carburation.

De même pour le transport maritime, une amélioration pourrait être de définir des facteurs d'émission par type de navire et de réaliser les calculs au sein du schéma sectoriel.

Par ailleurs, des données de granulométrie sont encore indisponibles pour des secteurs importants comme les incendies de forêt ou le ferroviaire, rendant impossible la répartition des émissions par classe de taille dans ces secteurs. Ces absences freinent une analyse complète et détaillée sur l'ensemble des sources. De plus, la granulométrie par secteur est considérée uniforme et appliquée à l'ensemble du secteur, alors que ces distributions peuvent sans doute varier suivant le type de combustible utilisé ou selon les sous-secteurs pour les secteurs très diversifiés.

Enfin, il est important de souligner que les facteurs d'émission et les profils granulométriques sont considérés non évolutifs dans le temps, à l'exception du transport routier. Ceci représente un point crucial d'amélioration. En effet, beaucoup de secteurs d'activité évoluent au cours des années avec les améliorations technologiques. L'importance de cette évolution est parfaitement illustrée par le secteur routier, où l'évolution à la baisse - division par 8 entre 2001 et 2017 pour les véhicules légers - de ces facteurs d'émission montre l'impact du renouvellement automobile.

Des éléments similaires pour les secteurs les plus émetteurs à minima (maritime, aérien...) seraient très utiles, y compris pour le chauffage au bois pour lequel l'enjeu des particules est de premier plan.

Des travaux avec les acteurs locaux, étatiques et scientifiques pourraient permettre de disposer de facteurs d'émission plus robustes et de granulométries plus exhaustives avec les activités du territoire régionale.

À terme, ces améliorations permettront de renforcer la fiabilité, la précision et la pertinence des inventaires de PUF en nombre, et donc d'en faire un outil pleinement opérationnel pour les décideurs publiques.



## BIBLIOGRAPHIE

- Ketzel, M., Frohn, L.M., Christensen, J.H., Brandt, J., Massling, A., Andersen, C., Im, U., Jensen, S.S., Khan, J., Nielsen, O.-K., Plejdrup, M.S., Manders, A., Kumar, P., Raaschou-Nielsen, O., 2021. Modelling ultrafine particle concentrations at address resolution in Denmark from 1979 to 2019 – Part 2: street scale modelling and evaluation. Submitted to *Atmospheric Environment* February 2021.
- Mathissen, T., Grigoratos, S., Gramstat, A., Mamakos, R.T., Vedula, C., Agudelo, J., Grochowicz, B., Giechaskiel, Interlaboratory Study on Brake Particle Emissions Part II : Particle Number Emissions, *Atmosphere*, 2023, 14(3)
- Khardi S, Emission Factors of Tyre Wear Particles Emitted by Light Road Vehicles in Real Driving Conditions: A New Challenge for Clean Road Transport to Improve Urban Air Quality, *Atmosphere* 2024, 15(6), 665, <https://doi.org/10.3390/atmos15060665>
- Le Berre, Impact des activités maritimes sur la qualité de l'air : Caractérisation physico-chimique des émissions des navires en zone portuaire (thèse de doctorat 2024).
- Krasowsky, N., Daher, C., Sioutas, G., Ban-Weiss, Measurement of particulate matter remissions from in use locomotives, *Atmospheric Environment*, 113, 187-196, 2015.
- Paasonen, P., Visschedijk, A., Kupiainen, K., Klimont, Z., Denier van der Gon, H., & Kulmala, M. (2013). Aerosol particle number emissions and size distributions: implementation in the GAINS model and initial results. IIASA Interim Report. IIASA, Laxenburg, Austria: IR-13-020.
- Johansson, L. S., Leckner, B., Gustavsson, L., Cooper, D., Tullin, C., and Potter, A.: Emission characteristics of modern and oldtype residential boilers fired with wood logs and wood pellets, *Atmos. Environ.*, 38, 4183–4195, 2004
- Visschedijk, Denier van der Gon H, UFP emissie in de Rijnmond regio in 2019, TNO 2022 R10616 report, <https://publications.tno.nl/publication/34640146/CDap7f/TNO-2022-R10616.pdf>
- Hedberg, E., Kristensson, A., Ohlsson, M., Johansson, C., Johansson, P. Å., Swietlicki, E., Vesely, V., Wideqvist, U., and Westerholm, R.: Chemical and physical characterization of emissions from birch wood combustion in a wood stove, *Atmos. Environ*, 36, 4823-4837, 2002.
- Janhäll, S., Andreae, M. O., and Pöschl, U.: Biomass burning aerosol emissions from vegetation fires: particle number and mass emission factors and size distributions, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 1427–1439, doi:10.5194/acp-10-1427-2010, 2010.
- FOCA, Guidance on the Determination of Helicopter Emissions, Theo Ringlisbacher and Lucien Chabbey, Edition 2 – December 2015, [https://www.bazl.admin.ch/dam/bazl/de/dokumente/Fachleute/Regulationen\\_und\\_Grundlagen/guidance\\_on\\_the\\_determinationofhelicopteremissions.pdf.download.pdf/guidance\\_on\\_the\\_determinationofhelicopteremissions.pdf](https://www.bazl.admin.ch/dam/bazl/de/dokumente/Fachleute/Regulationen_und_Grundlagen/guidance_on_the_determinationofhelicopteremissions.pdf.download.pdf/guidance_on_the_determinationofhelicopteremissions.pdf)

## GLOSSAIRE

### Définitions

**Capteur SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) :** Instrument de mesure permettant de classer les particules selon leur taille et de mesurer leur distribution granulométrique.

**Capteur CPC (Condensation Particle Counter) :** Capteur permettant de compter les particules ultrafines présentes dans l'air, en les faisant grossir par condensation pour qu'elles deviennent détectables.

### Sigles

**TNO :** Organisation néerlandaise pour la recherche scientifique appliquée

**CITEPA :** Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique

**OMINEA :** L'organisation et les méthodes des inventaires nationaux des émissions atmosphériques

**COPERT :** Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport

### Polluants

**PUF :** Particules d'un diamètre < 100 nm

**PM 10 :** Particules d'un diamètre < 10 µm

**PM 2.5 :** Particules d'un diamètre < 2,5 µm

## AtmoSud, votre expert de l'air en région Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur



### Un large champ d'intervention : air/climat/énergie/santé

La loi sur l'air reconnaît le droit à chaque citoyen de respirer un air qui ne nuise pas à sa santé. Dans ce cadre, AtmoSud évalue l'exposition des populations à la pollution atmosphérique et identifie les zones où il faut agir. Pour s'adapter aux nouveaux enjeux et à la demande des acteurs, son champ d'intervention s'étend à l'ensemble des thématiques de l'atmosphère : polluants, gaz à effet de serre, nuisances, pesticides, pollens... Par ses moyens techniques et d'expertise, AtmoSud est au service des décideurs et des citoyens.

### Des missions d'intérêt général

La loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie du 30/12/1996 confie la surveillance de la qualité de l'air à des associations agréées :

- Connaître l'exposition de la population aux polluants atmosphériques et contribuer aux connaissances sur le changement climatique
- Sensibiliser la population à la qualité de l'air et aux comportements qui permettent de la préserver
- Accompagner les acteurs des territoires pour améliorer la qualité de l'air dans une approche intégrée air/climat/énergie/santé
- Prévoir la qualité de l'air au quotidien et sur le long terme
- Prévenir la population des épisodes de pollution
- Contribuer à l'amélioration des connaissances\*

### Recevez nos bulletins

Abonnez-vous à l'actualité de la qualité de l'air : <https://www.atmosud.org/abonnements>

### Conditions de diffusion

AtmoSud met à disposition les informations issues de ses différentes études et garantit la transparence de l'information sur le résultat de ces travaux. A ce titre, les rapports d'études sont librement accessibles sur notre site Internet.

Les données contenues dans ce document restent la propriété intellectuelle d'AtmoSud. Toute utilisation de données ou de documents (texte, tableau, graphe, carte...) doit obligatoirement faire référence à AtmoSud. Ce dernier n'est en aucun cas responsable des interprétations et publications diverses issues de ces travaux et pour lesquels aucun accord préalable n'aurait été donné.



[www.atmosud.org](http://www.atmosud.org)

#### 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](mailto:Contact.air@atmosud.org)

##### Etablissement de Martigues

06 Route 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

**AtmoSud**  
Inspirer un air meilleur