

LE BOIS ENERGIE ET LES PARTICULES

"ÉMISSIONS, FACTEURS D'ÉMISSION, CONCENTRATIONS, DE QUOI PARLE T'ON ?"

Messages et chiffres clés présentés lors du webinaire du 2 octobre 2024

En collaboration avec



LIEN ENTRE ÉMISSIONS ET CONCENTRATIONS

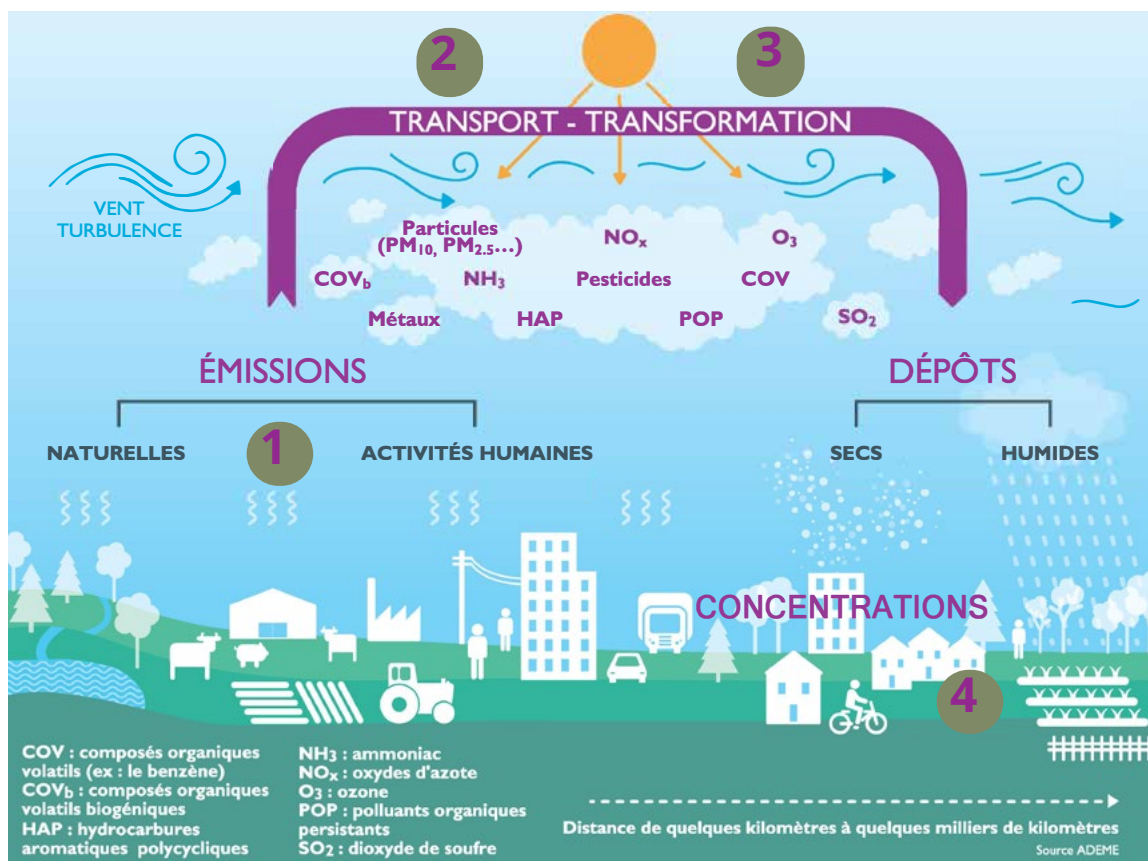
La pollution de l'air est l'un des plus grands risques environnementaux pour la santé (selon l'OMS : [https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)).

La pollution de l'air a également des impacts négatifs sur les écosystèmes, sur la végétation, sur les cultures, sur le bâti et donc sur l'économie.

Les particules présentes dans l'air ambiant se distinguent par leur taille. Les particules grossières PM_{10} (diamètre inférieur à $10\text{ }\mu\text{m}$) sont principalement émises par des processus mécaniques d'abrasion, comme l'usure des freins, des pneus ou la remise en suspension des poussières du sol. Les particules fines $PM_{2,5}$ (diamètre inférieur à $2,5\text{ }\mu\text{m}$, incluses dans la fraction PM_{10}) ont majoritairement pour origine des processus de combustion (chauffage domestique, moteur thermique, procédés industriels...) ou des réactions physico-chimiques entre certains précurseurs dans l'atmosphère qui peuvent conduire à des particules secondaires. La toxicité des particules en suspension dans l'air ambiant dépend de leur taille, mais aussi de leur composition chimique, ces deux paramètres pouvant varier dans l'espace et dans le temps.

Selon Santé Publique France, près de 40 000 décès seraient attribuables chaque année à une exposition aux $PM_{2,5}$ (personnes âgées de 30 ans et plus). Concernant la morbidité attribuable à l'exposition à long terme à la pollution de l'air, Santé Publique France a notamment évalué dans son étude parue en janvier 2025 que près de 30 000 cas d'asthme chez l'enfant et près de 60 000 cas d'hypertension artérielle seraient évitables chaque année avec une diminution des concentrations de particules dans l'air à des valeurs équivalentes aux valeurs guides de l'Organisation Mondiale de la Santé.

LE CYCLE DE LA POLLUTION DE L'AIR



- 1 Les émissions sont les quantités de polluants émises directement par des sources naturelles ou les activités humaines. Pour le bois énergie, il s'agit des polluants en sortie de cheminée. Elles sont différentes selon les lieux et les moments (variations saisonnières et journalières). Elles concernent les polluants primaires (particules (PM), oxydes d'azote (NO_x), oxydes de soufre (SO_x), ammoniac (NH_3), composés organiques volatils (COV), métaux, monoxyde de carbone (CO)...
- 2 Après émission, les polluants se déplacent, réagissent et se transforment.
- 3 Les polluants secondaires (ozone, particules...) sont formés dans l'air à partir de polluants primaires « précurseurs » (ex : NO_x , COV, NH_3 , méthane (CH_4)), notamment sous l'action du rayonnement solaire, de l'humidité, de la chaleur...
- 4 Le niveau de pollution auquel la population est exposée est caractérisé par les concentrations en polluants dans l'air ambiant (souvent exprimé en μg de polluant par m^3 d'air, $\mu\text{g}/\text{m}^3$). En un endroit donné, ce niveau résulte de relations complexes entre les quantités de polluants primaires ou secondaires, émises localement ou transportées à courte ou longue distance, ainsi que de la météorologie et de la topographie qui vont influencer sur la réactivité entre les polluants et sur les mouvements des masses d'air. La surveillance des concentrations repose sur le suivi :
 - ♦ de la pollution de fond qui correspond à des niveaux de concentration représentatifs de la qualité de l'air d'un secteur géographique étendu (tel qu'une ville, une région ou un pays), englobant des polluants atmosphériques issus de diverses sources d'émissions naturelles et anthropiques.
 - ♦ de la pollution de proximité qui correspond aux concentrations élevées auxquelles on est exposé, près d'une source d'émission de polluants dans l'air (industries, axes routiers, bâtiments résidentiels ou tertiaires...).

LA RELATION ENTRE ÉMISSIONS ET CONCENTRATIONS N'EST NI SIMPLE, NI PROPORTIONNELLE, CEPENDANT **LA RÉDUCTION DES ÉMISSIONS** PAR L'ENSEMBLE DES SECTEURS / ACTIVITÉS QUI EN SONT À L'ORIGINE EST LE PRINCIPAL LEVIER POUR **AMÉLIORER LA QUALITÉ DE L'AIR**.

DES RÉGLEMENTATIONS SUR LES CONCENTRATIONS ET SUR LES ÉMISSIONS

A l'échelle européenne, la gestion de la qualité de l'air est encadrée d'une part par la limitation des émissions de polluants atmosphériques (Directive 2016/2284/CE, dite directive NEC, en complément des directives sectorielles relatives aux installations de combustion de taille moyenne (MCP), aux appareils domestiques de chauffage au bois (Ecoconception), aux émissions industrielles (IED), Normes Euro, etc.) et d'autre part par l'encadrement des concentrations de polluants dans l'air ambiant extérieur (Directive 2008/50/CE, révisée en UE/2024/2881).

A l'échelle française, le respect des objectifs de réduction des émissions de polluants atmosphériques est assuré par le PREPA (Plan national de Réduction des émissions de polluants atmosphériques). La version actuelle regroupe le programme d'actions plurisectoriel d'amélioration de la qualité de l'air sur la période 2022 à 2025. Ce plan contient 127 actions portant sur 4 secteurs d'activités (industrie, transport, résidentiel/tertiaire et agriculture) selon 2 axes (amélioration des connaissances, mobilisation des acteurs locaux). Concernant le chauffage au bois, le PREPA intègre le plan national de réduction des émissions du chauffage au bois domestique.

A l'échelle locale, des plans d'actions complémentaires sont mis en place via les PPA (Plan de Protection de l'Atmosphère), les plans locaux sur le chauffage au bois domestique ou encore les plans qualité de l'air des Plan climat-air-énergie territoriaux PCAET).

LES ÉMISSIONS LIÉES AU BOIS-ÉNERGIE

Les inventaires nationaux quantifient les émissions françaises depuis 1990. Ils doivent respecter des exigences de transparence, de cohérence, de comparabilité, d'exhaustivité et d'exactitude. Ils suivent les méthodologies des lignes directrices internationales rédigées par le GIEC en ce qui concerne les gaz à effet de serre, et par l'Agence Européenne de l'Environnement (AEE) pour les polluants atmosphériques.

Ils permettent notamment de s'assurer de l'atteinte ou non des objectifs Climat de la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) et de réduction d'émissions de polluants du PREPA ou de protocoles internationaux (Göteborg ou Aarhus).

Ils sont publiés chaque année par le Citepa à travers le [rapport et les bases de données SECTEN](#), de même que la méthodologie des inventaires nationaux dans le [rapport et la base de données OMINEA](#).

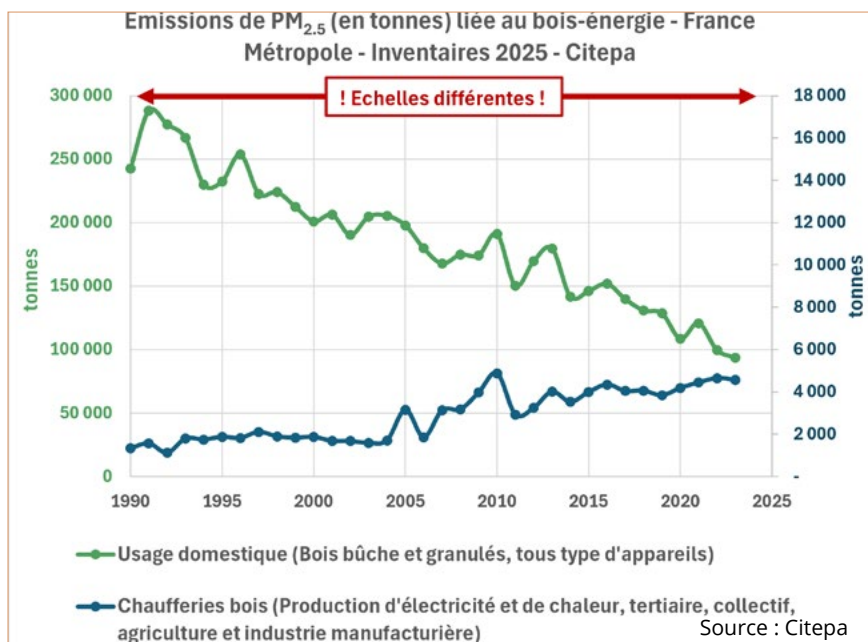
La contribution aux émissions nationales des chaufferies biomasse (production d'électricité, chauffage urbain, industrie manufacturière et secteur tertiaire) est certes en hausse depuis 1990 mais reste très inférieure à celles du bois domestique. En 2023, les chaufferies bois totalisaient presque 3% des émissions nationales de particules fines PM_{2,5} alors que le chauffage domestique au bois en constituait 58%.



Chaufferie collective bois Besançon - Crédit Christian Weiss - ADEME.

Les émissions de particules fines PM_{2,5} du chauffage domestique au bois ont diminué de 61% entre 1990 et 2023. Cette baisse est principalement liée :

- ♦ Aux remplacements, dans le parc national, des appareils peu performants par des appareils moins émetteurs, notamment depuis les années 2000 ;
- ♦ À l'utilisation croissante depuis 2004 d'appareils à granulés moins émissifs en particules fines que les appareils bois bûches ;
- ♦ À la baisse du nombre total de cheminées ouvertes utilisées ;
- ♦ A une baisse de 26% de la consommation de bois sur la même période.





(*) Dans les inventaires nationaux, les émissions sont déterminées en multipliant les données d'activités (consommation de biomasse) par des facteurs d'émission spécifiques¹ selon le type et la génération d'appareil. Ces facteurs sont issus d'essais réalisés en conditions réelles de fonctionnement et non de conditions de laboratoire pour la certification des appareils. Ils sont exprimés en masse de polluant émis par quantité de bois brûlé lors de la combustion : g/GJ. Par exemple, en tenant compte des facteurs d'émissions du tableau ci-dessous et des rendements des installations², pour une même production de chaleur un foyer ouvert émettra 260 fois plus de particules qu'un poêle à granulés.

Bois domestique			Facteur d'émission - particules totales ³ (g/GJ)	Chaudières bois en 2023	Facteur d'émission - Particules totales (g/GJ)	
Bûches	Foyers ouverts		932	Production d'électricité	[0,5-1,9]	
	Chaudières	Appareils anciens	500	Chauffage urbain	>50MW	[1,7-2,6]
		Appareils récents	300		20-50MW	13
		Appareils performants	100		[1-20] MW FC ⁴	16,8
	Poêles et inserts	Appareils anciens	800		[1-20] MW hors FC ⁴	100
		Appareils récents	417	Tertiaire	<1MW	100
		Appareils performants	282		>50MW	0,4
		Appareils Ecoconception	128		[1-50] MW FC ⁴	16,8
	Cuisinières	Appareils anciens	800		[1-50] MW hors FC ⁴	100
		Appareils récents	417		<1MW	100
		Appareils performants	282		>50MW	[0,1-37]
Granulés	Chaudières		20	Industrie manufacturière	[1-50] MW FC ⁴	16,8
	Poêles		30		[1-50] MW hors FC ⁴	100

Tableau : Facteurs d'émission des particules des différents secteurs du bois-énergie dans les inventaires nationaux (Rapport SECTEN 2025)

¹ Les facteurs d'émission intègrent la fraction dite "condensables" des particules. Cette fraction est principalement constituée d'espèces organiques semi-volatiles présentes sous forme gazeuse dans le conduit de fumées et qui se condensent dès leur entrée dans l'atmosphère du fait de la dilution et du refroidissement des fumées et participent ainsi aux émissions particulaires. Cette fraction augmente lorsque la qualité de combustion se dégrade.

² Caractérisation technique et segmentation du parc des appareils de chauffage domestique au bois en maison individuelle, ADEME, 2015. rendement 10% pour les foyers ouverts et 85% pour les poêles à granulés

³ Pour le bois domestique, des hypothèses de granulométrie uniformes sont appliquées : les PM10 constituent 95% des particules totales et les PM2.5 en constituent 93 %.

⁴ Le sigle "FC" fait référence aux chaudières bois financées par le Fonds Chaleur qui ont montré de meilleures performances en matière d'émissions..

^(*) Des mises à jour ont été réalisées depuis le webinaire concernant les données d'émission.

En synthèse

- ◆ L'amélioration des performances des appareils, en lien avec une meilleure qualité de combustion, entraîne une réduction significative des émissions de particules totales en masse. Cependant, pour caractériser plus finement les particules émises, les mesures complémentaires de composition chimique, de nombre et de taille deviennent de plus en plus pertinentes.
- ◆ Plus on améliore la qualité de la combustion (poêles à bûches performants, poêles à granulés, chaudières), plus la part de composés inorganiques dans les émissions particulières augmente et celle de matière carbonée diminue. Cela entraîne une diminution de la formation de particules secondaires.
- ◆ Toutefois, cette réduction massique des émissions ne s'accompagnerait pas d'une diminution significative du nombre de particules émises (données encore limitées), mais plutôt d'une réduction de leur taille et d'une modification de leur composition chimique. En particulier, pour les appareils les plus performants, le diamètre moyen des particules primaires émises diminue.
- ◆ En conditions réelles de fonctionnement, les émissions restent fortement influencées par plusieurs facteurs : les conditions d'utilisation des appareils (allure, charge introduite, etc.), leur entretien, la qualité du combustible (humidité, essence de bois, etc.), ainsi que les caractéristiques de l'installation (dimensionnement, tirage).
- ◆ Concernant les chaudières de puissance plus importantes, les meilleures performances s'expliquent par une meilleure qualité de combustion mais également par la présence de systèmes de filtration réduisant fortement les émissions de particules.

PART DU BOIS ÉNERGIE DANS LES PARTICULES EN SUSPENSION DANS L'AIR AMBIANT



Pour estimer la contribution du bois énergie aux concentrations de particules présentes dans l'air ambiant, deux approches complémentaires peuvent être mobilisées : la modélisation des concentrations dans l'air ambiant à partir des émissions des sources ou l'analyse de la composition chimique des particules en suspension directement dans l'air ambiant.

La première repose sur l'utilisation d'outils numériques, qui reproduisent l'ensemble des phénomènes atmosphériques (paramètres météorologiques, émissions, réactions physico-chimiques etc...) afin d'estimer les concentrations et les sources à l'origine de ces concentrations. On parle alors de modélisation de la qualité de l'air. Ces outils permettent de simuler la qualité de l'air et de comprendre quels secteurs contribuent à la pollution, en fonction des territoires et des périodes.

La seconde s'appuie sur la mesure de certains marqueurs chimiques caractéristiques de certaines sources de pollution dans des particules collectées dans l'air ambiant. Ces mesures, couplées avec des approches d'analyses statistiques, permettent d'évaluer l'origine des particules.

*** Modélisation des concentrations dans l'air ambiant**

Les résultats présentés ici ont été obtenus avec le modèle CHIMERE (CNRS/IPSL/Ineris) alimenté par des données d'inventaires spatialisées des émissions (CAMS) et des conditions météorologiques (Météo France) pour l'année 2021. Cette approche intègre les composés condensables (cf ci-dessus), ce qui améliore la simulation de la fraction organique des particules en hiver.

La méthode dite « de coupure » a été utilisée pour estimer précisément la contribution de chaque secteur d'activités aux concentrations modélisées. Elle consiste à comparer les concentrations résultantes obtenues avec le modèle intégrant l'ensemble des sources d'émissions avec celles obtenues en supprimant entièrement les émissions d'un secteur d'activité donné.

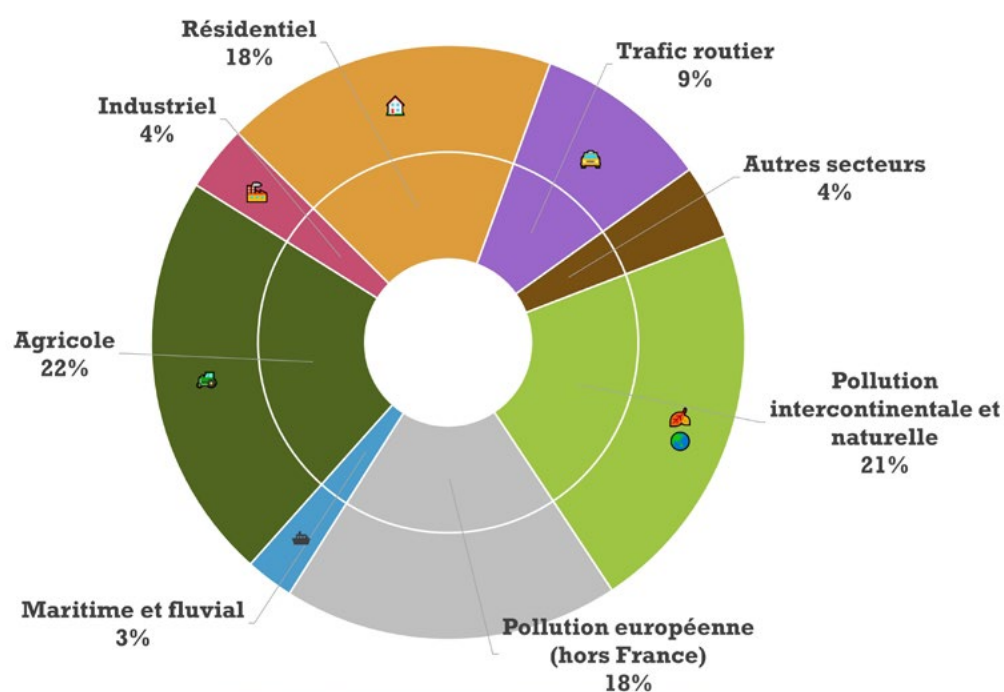
Les contributions des secteurs suivants ont pu être différenciées : « résidentiel – émissions françaises » (contenant principalement les émissions du chauffage au bois résidentiel, mais également des chaufferies collectives du secteur tertiaire et pour moins de 1%, la combustion dans les bâtiments du secteur tertiaire et militaire. Le brûlage des déchets à l'air libre ainsi que les feux de forêt ne sont pas inclus dans ce secteur), « trafic routier – émissions françaises », « maritime », « industrie – émissions françaises (comprenant également les chaufferies bois industrielles) », « agricole – émissions françaises », « autre secteur – émissions françaises » (déchets, aviation, solvants), « pollution européenne » (hors France) et « origine naturelle + pollution intercontinentale » (pollution anthropique hors Europe et, suivant les polluants, toutes sources naturelles comme les poussières désertiques, les sels de mers, les émissions de la végétation etc...)

(*) Des mises à jour ont été réalisées depuis le webinaire concernant les contributions des sources modélisées.

Moyenne annuelle
nationale modélisée

En moyenne annuelle sur l'ensemble du territoire national (hors DROM) et hors proximité de sources (ex. trafic, industries) le **secteur résidentiel, majoritairement le chauffage domestique au bois**, contribue pour 18% aux concentrations de $PM_{2,5}$ mesurées dans l'air ambiant.

**IMPACT POTENTIEL DES SECTEURS D'EMISSIONS SUR LES
CONCENTRATIONS DE $PM_{2.5}$ DANS L'AIR AMBIANT
(France entière - concentrations de fond)**



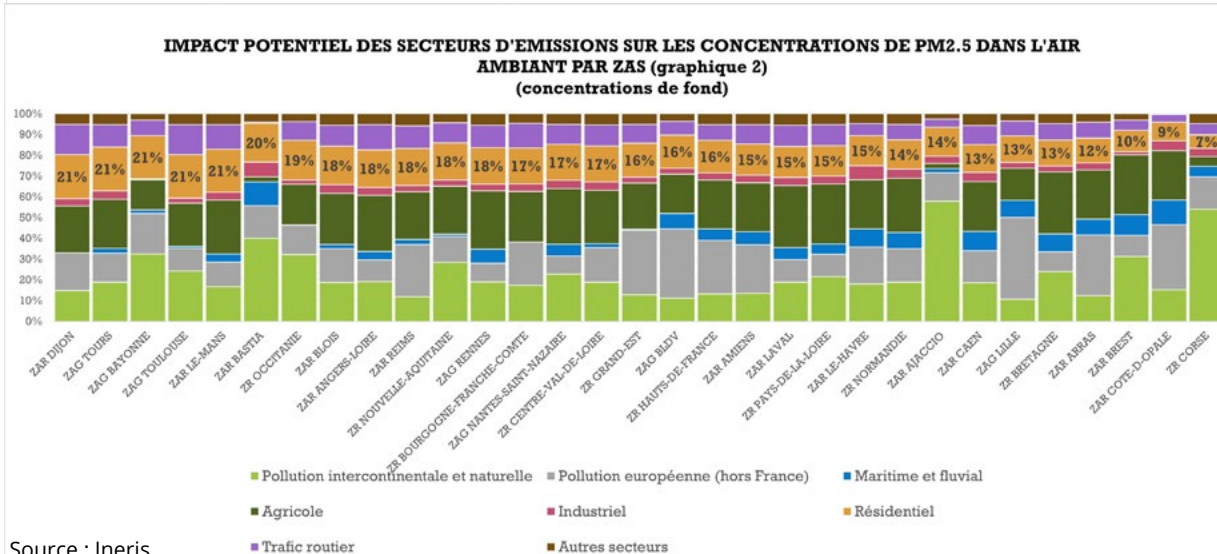
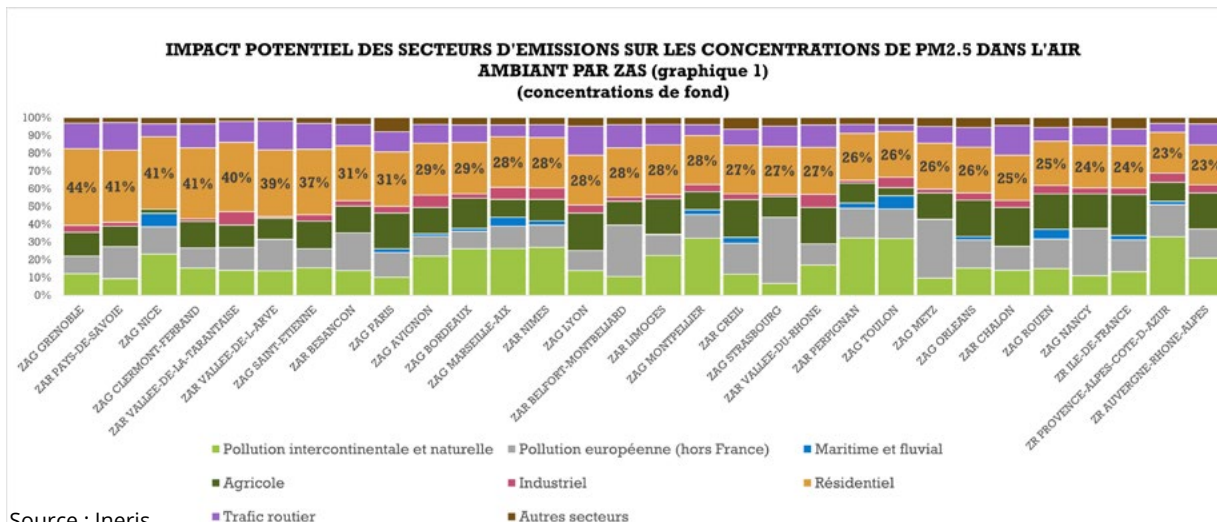
Source : Ineris

Modélisation de la contribution des secteurs d'émissions aux concentrations de fond de l'année 2021.

La modélisation permet de quantifier spatialement et temporellement cette contribution pour appuyer les politiques locales (ZFE, PPA, plans locaux de chauffage au bois, etc.).

Variations géographiques modélisées

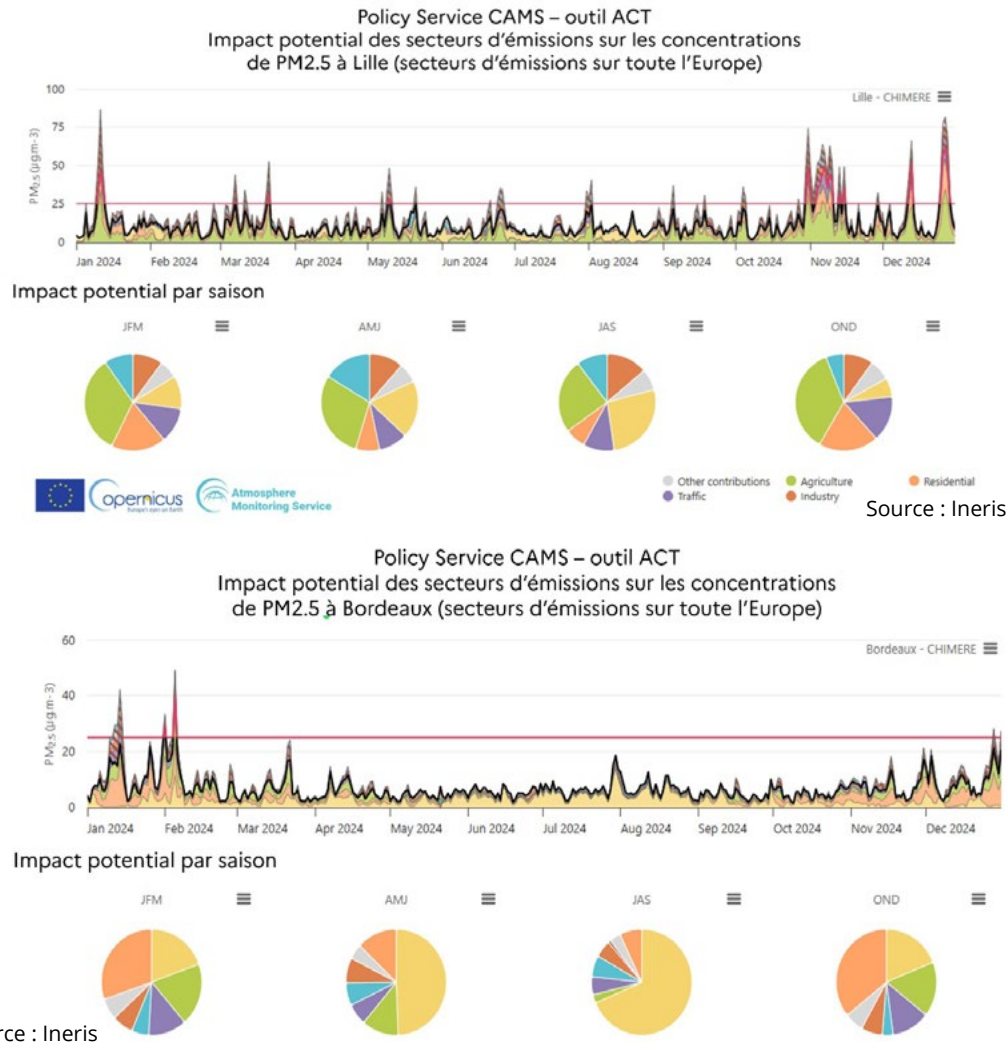
Cette contribution en moyenne annuelle évolue fortement suivant les zones géographiques : elle **peut atteindre plus de 40%** dans les vallées alpines encaissées et soumises à des émissions importantes de ce secteur, mais aussi dans la zone urbaine de Nice. Elle est autour de **28% pour certaines zones urbaines denses** (Paris, Bordeaux, Marseille, Lyon, Strasbourg) et varie plus généralement de **7% (Corse) à 27% pour les autres zones de surveillance**, selon les conditions météorologiques et les usages du chauffage au bois. A noter que cette proportion varie également selon la part de pollution transfrontalière qui influence la contribution relative du secteur résidentiel-tertiaire français (ZAG de Lille par exemple), pour laquelle la contribution relative n'est que de 13% du fait d'une part importante de contribution transfrontalière).



NOTE : Estimations réalisées sur les zones administratives de surveillance (ZAS), découpage territorial permettant une surveillance appropriée aux problématiques locales. Les ZAS se composent de Zone Régionale (ZR), de Zone Agglomération (ZAG) et de Zone A Risque (ZAR). Sur ces graphiques, ces ZAS sont classées par ordre décroissant de la part du secteur résidentiel.

Variations saisonnières
modélisées

Les variations saisonnières sont également importantes : un pic en hiver et un minimum en été avec des proportions dépendant des zones géographiques. Par exemple, selon l'outil "Policy Service" du service Copernicus CAMS, en 2024 à Bordeaux, la contribution du résidentiel était de 35% en Automne/Hiver et de moins de 5% en été.



La modélisation montre que le chauffage au bois résidentiel est un levier important de réduction des PM_{2.5} au niveau national et un levier majeur en hiver, voire prépondérant dans certaines zones.

Comme toute modélisation, ces résultats sont assortis d'incertitudes liées aux données annuelles disponibles en émissions et en concentrations (ici données nationales de l'année 2021), à la météorologie, aux incertitudes inhérentes au modèle lui-même ou encore à la méthodologie de « coupure » permettant l'attribution sectorielle. Des travaux spécifiques de modélisation utilisant des données consolidées aux niveaux des territoires (ex. inventaires) peuvent être également conduits en local, notamment avec les AASQA (Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air), afin de quantifier spatialement et temporellement cette contribution pour appuyer les politiques locales.

Mesures dans l'air ambiant

Depuis 2006, le programme CARA (Caractérisation chimique des particules) du LCSQA (Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air) permet d'étudier les sources à l'origine des particules mesurées dans l'air ambiant à partir de l'analyse de leur composition chimique.

Il est donc possible d'identifier et de quantifier la part de la combustion de biomasse dans les particules mesurées directement dans l'air ambiant. Cependant, l'analyse chimique seule ne permet généralement pas de distinguer les différentes sources de combustion de biomasse, telles que le chauffage au bois, les brûlages de déchets verts, les écobuages ou les feux de forêt, ces sources émettant des traceurs similaires.

Ce programme repose sur une vingtaine de points de prélèvements répartis dans toute la France sur lesquels des prélèvements quotidiens d'échantillons d'air ambiant sont réalisés par les AASQA. Les analyses chimiques de ces échantillons réalisées dans les laboratoires de l'Ineris ou en collaboration (notamment avec IGE, LSCE, LCME...) permet de quantifier la présence de traceurs/marqueurs de sources. Le programme CARA a initialement porté sur les PM_{10} , car elles constituaient la granulométrie principalement surveillée et la plus documentée au moment de son lancement ; il s'est ensuite élargi aux fractions plus fines grâce notamment aux évolutions des équipements et à l'émergence des préoccupations concernant des granulométries plus fines. Ces points de prélèvements sont progressivement équipés depuis plusieurs années par des appareils de mesures automatiques opérés par les AASQA qui permettent d'avoir des informations sur la composition chimique des particules en temps réel.

L'utilisation de profils sources et de méthodes de type « source apportement » (analyse multivariée) permet, à partir de ces résultats de mesures, de déterminer les contributions de différentes sources aux concentrations de particules mesurées dans l'air ambiant.

Contributions mesurées

Les PM_{10} (données issues de quinze sites français, 2012 à 2016, LCSQA 2017)

En hiver, 12 à 70 % de la masse des PM_{10} provient de la combustion de biomasse (majoritairement chauffage domestique au bois) :

- > **12 à 40 %** dans de nombreux sites urbains (ex. Lyon, Talence, Aix-en-Provence)
- > **20 à 30 %** sur deux sites en proximité du trafic routier
- > **Plus de 70 %** dans un site localisé en vallée alpine

A l'échelle nationale, **la moyenne annuelle** sur dix sites urbains est comprise **entre 15 et 20 %**.

Si l'analyse avait porté sur les $PM_{2,5}$, les contributions attribuées à la combustion de biomasse auraient été au moins équivalentes, voire plus marquées. En effet, les particules issues de la combustion du bois se situent majoritairement dans la fraction des $PM_{2,5}$.

Par exemple, les résultats obtenus sur le site de Talence (Gironde), un des plus impactés par la combustion de biomasse des villes étudiées en 2013 (LCSQA, 2015) montrent, après une année de mesures continues, que la masse des $PM_{2,5}$ attribuable à la combustion de biomasse est de l'ordre de :

- > **40 à 50 %** en hiver (chauffage au bois)
- > **25 %** en moyenne annuelle

On observe une variabilité temporelle et spatiale de ces contributions. La contribution de la combustion de biomasse est quasi nulle en été. Elle est plus forte dans les zones résidentielles chauffées majoritairement au bois.

Ces résultats confirment ceux obtenus par la modélisation et soulignent la complémentarité mesure/modèle.

Pour approcher l'effet de la composition chimique des particules et leur toxicité potentielle, des indicateurs indirects et qualitatifs ont été développés tels que la mesure du potentiel oxydant (PO). Le PO des particules permet d'évaluer la capacité des particules à provoquer un stress oxydatif, mécanisme impliqué dans l'inflammation et les maladies respiratoires et cardiovasculaires. Il existe plusieurs tests pour mesurer le PO. Les tests menés sur quinze sites de mesure en air ambiant en France (Weber et al., ACP, 2021) montrent que les particules issues de la combustion (biomasse et trafic routier) sont celles qui déclenchent les réponses oxydatives les plus marquées, tous tests confondus.

Webinaire du 2 octobre 2024 : Le bois énergie et les particules

Accéder aux présentations :

- ◆ [Pollution de l'air : émissions, facteurs d'émission, concentrations... De quoi parle t'on ?](#)
- ◆ [Inventaires nationaux, méthodologie bois-énergie, comparaisons internationales](#)
- ◆ [Emissions primaires du chauffage domestique au bois](#)
- ◆ [Modélisation des émissions et contribution des sources de particules aux concentrations dans l'air ambiant](#)
- ◆ [Quantification de la contribution de la combustion de biomasse aux niveaux des particules fines en air ambiant](#)
- ◆ [Plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques](#)

[Accéder aux « Questions & Réponses » du webinaire](#)



**Isabelle
Augeven-Bour**
Ingénieure à l'ADEME



**Benjamin
Cuniasse**
Ingénieur au Citepa



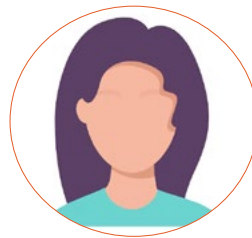
Serge Collet
Ingénieur à l'Ineris



Elsa Real
Ingénieure Modélisation
Atmosphérique à l'Ineris



Olivier Favez
Ingénieur à l'Ineris



**Julia Pereira da
Ponte**
Cheffe de Pôle au
Bureau de la qualité
de l'air (MTECT)



Marc Durif
Directeur du
LCSQA