



(ID Modèle = 454913)

Ineris - 206576 - 2740861 - v3.0

13/01/2026

Réévaluation des facteurs d'émission des particules totales (solide et condensable) du chauffage domestique au bois

Impacts sur les inventaires d'émission

Avec mise à jour 2025 des facteurs d'émission des poêles
à granulés et à bûches éco-conçus



PRÉAMBULE

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : DIRECTION MILIEUX ET IMPACTS SUR LE VIVANT

Rédaction : CEA Benjamin - COLLET Serge – COUVIDAT FLORIAN – CUNIASSE BENJAMIN

Vérification : FRABOULET ISALINE; COLETTE AUGUSTIN ; ALLEMAND NADINE

Approbation : MORIN ANNE - le 13/01/2026

Table des matières

1	Contexte.....	6
2	Méthodologie actuelle d'établissement des inventaires d'émission du chauffage résidentiel au bois	7
2.1	FE de TSP et classification d'appareils utilisés dans les inventaires européens (données TNO, Citepa et Lignes directrices EMEP 2019)	7
2.2	Méthodologie du Citepa pour établir l'inventaire national Français et son évolution au cours du temps	8
2.2.1	Données de parc.....	8
2.2.2	Facteurs d'émission de particules utilisés par le Citepa.....	9
2.3	Intérêts et limites associés aux méthodologies actuelles d'établissement des inventaires	9
2.3.1	Limites associées aux méthodes de prélèvement des émissions de particules et à l'absence de prise en compte de la fraction condensable.....	9
2.3.2	Intérêts et limites associés à la classification actuelle des appareils	10
3	Proposition et impact sur l'inventaire d'une nouvelle méthodologie.....	11
3.1	Bilan des données disponibles à l'Ineris en termes de facteurs d'émissions de TSP et de paramètres d'influence des émissions	11
3.1.1	Evolution des FE des TSP dans les études INERIS depuis 2001.....	11
3.1.2	Principaux paramètres d'influence du FE des TSP	12
3.2	Proposition d'une nouvelle classification par l'Ineris	13
3.2.1	Par type, par avancée technologique et par allure de combustion.....	13
3.2.2	Synthèse des propositions de l'Ineris en termes de FE des TSP (solide + condensable) et de catégories d'appareils.....	16
3.3	Impacts sur l'inventaire national	18
3.3.1	Impacts de la mise à jour des catégories d'appareils	19
3.3.2	Impacts sur les facteurs d'émission résultants	23
3.3.3	Impacts sur les émissions de PM2,5	23
4	Conclusion	26
5	Annexes	28
5.1	Facteurs d'émissions d'autres polluants issus du chauffage domestique au bois	28
5.2	Proposition de mise à jour des facteurs d'émission des poêles à granulés et des poêles éco-conçus	29

Liste des figures

Figure 1 : Frise d'évolution des facteurs d'émission des TSP (solides + condensables) basée sur les études réalisées par l'INERIS de 2001 à 2019.	11
Figure 2 : Evolution des FE des TSP exprimés en g/GJ selon les études Ineris, les inventaires du SINTEF et des lignes directrices EMEP 2019	15
Figure 3 : Evolution des rendements des appareils à partir des valeurs calculées avant et après renouvellement des appareils à bois chez les particuliers entre 2015 et 2019 (étude CARVE).....	16
Figure 4 : Evolution du nombre total d'appareils {bûches et granulés} de chauffage domestique au bois dans le parc français utilisé dans l'inventaire national entre 1990 et 2020.....	20
Figure 5 : Evolution de la proportion des poêles selon les catégories d'appareils en %	21
Figure 6 : Evolution de la proportion des foyers fermés et inserts selon les catégories d'appareils en %	21
Figure 7 : Evolution de la proportion des chaudières selon les catégories d'appareils en %	22
Figure 8 : Répartition de la consommation totale de biomasse dans le secteur résidentiel en %	22
Figure 9 : Evolution des facteurs d'émissions résultants (i.e. estimé à partir des consommations totales nationales) des particules (TSP) en g/GJ.	23
Figure 10 : Evolution des émissions nationales de PM _{2,5} liée à la combustion de bois dans le secteur résidentiel selon plusieurs méthodologies de calculs	24
Figure 11 : Evolution de la proportion des PM _{2,5} liée à la combustion du bois dans le secteur résidentiel par rapport au total national selon plusieurs méthodologies de calculs.....	25

Liste des tableaux

Tableau 1 : Valeurs de FE des TSP exprimés en g/GJ dans les inventaires du TNO, du Citepa et dans le Guidebook EMEP 2019.	7
Tableau 2 : Rendement énergétique des différentes catégories et classes d'appareils du parc national – Méthodologie actuelle.	8
Tableau 3 : Facteurs d'émission de TSP (hors condensables) – Méthodologie actuelle, (cité dans Autret et Rogaume 2011 : Etude Ineris 2008 : Évaluation de l'impact des appareils de chauffage à bois sur la qualité de l'air intérieur et extérieur).	9
Tableau 4 : Valeurs des FE des TSP (solides + condensables) et des particules solides exprimées en g/GJ avant 2005 à nos jours, définies par allure de combustion : nominale (AN), réduite (AR) ou non définies (AN et AR).	14
Tableau 5 : Correspondance entre la proposition de la nouvelle classification nationale et les différentes classifications des poêles à bois utilisées dans les inventaires du TNO, des lignes directrices EMEP 2019 et du Citepa illustrée selon la catégorie d'appareil (Tableau 5. A), les FE des TSP (Tableau 5. B).	17
Tableau 6 : facteurs d'émission en particules totales des poêles à granulés - données de la littérature (AN : allure nominale, AR : allure réduite, All : allumage, valeurs exprimées en mg/MJ d'énergie entrante).	31

Résumé

Les inventaires d'émissions de polluants des appareils de chauffage résidentiel au bois développés actuellement par la France et par les pays européens reposent sur un certain nombre de facteurs d'émissions (FE) par polluant dont les particules. Au sein de ces inventaires, les FE sont différenciés en fonction du type d'appareils et catégories d'appareils. Or, les FE actuels sont élaborés à partir de choix méthodologiques qui peuvent être différents induisant un impact sur l'inventaire. Ces choix portent sur :

- la manière de classer les types d'appareils selon leurs performances énergétiques et en termes d'émissions (tels que les appareils conventionnels, anciens, récents, performants). Ces différentes notions peuvent manquer de définitions précises,
- la procédure de test des appareils (phases de combustion testées, types d'allure de combustion nominale ou réduite, qualité du combustible) et la méthode de prélèvement du polluant (avec ou sans condensables pour les émissions de particules) utilisées pour la détermination des facteurs d'émissions, l'information n'est pas toujours disponible.

Cette note initialement publiée en 2022 présente :

- la méthodologie actuelle d'élaboration de l'inventaire d'émission national français,
- une proposition de révision de certains choix méthodologiques pour la France, en s'appuyant sur plusieurs études de l'Ineris réalisées depuis 2001, cette révision porte sur les FE des particules TSP (fractions solides + condensables) émises par les appareils de chauffage résidentiels au bois (poêles et foyers ouverts) en France depuis les années 1990 à nos jours,
- une réflexion sur une possible nouvelle classification des appareils dans l'inventaire national et de nouveaux FE qui prennent en compte :
 - les évolutions technologiques survenues en France depuis 1990 (<2005 : conventionnels ; 2005-2015 : Performants 1 ; 2015-2021 : Performants 2 et 2022 : Avancés/Eco-Design),
 - l'ensemble des TSP (*Total Suspended Particules* : solides et condensables),
 - l'usage de ces appareils selon l'allure de combustion (50 % nominale et 50 % réduite).

La nouvelle classification repose sur la description de quatre catégories d'appareils jugées plus représentatives du parc actuel que la classification retenue actuellement par le Citepa, auxquelles sont attribués des FE incluant les condensables :

- Appareils conventionnels (<2005),
- Appareils performants 1 - FV4* à FV5* (2005 – 2015),
- Appareils performants 2 – FV5* à FV7* (2015 – 2021),
- Appareils avancés, Eco-Design - FV7* (à partir de 2022).

L'impact de cette mise à jour méthodologique de deux natures différentes, évolution du parc et choix des facteurs d'émission (quatre ensembles de FE testés), a été évalué par le Citepa.

Cette étude d'impact a montré que la mise à jour méthodologique ne remet pas en cause l'atteinte des objectifs du PREPA pour les PM_{2,5} en 2020 par rapport à 2005 quel que soit l'ensemble de FE choisi. Le Citepa a présenté ces choix méthodologiques (basé sur l'ensemble de FE 4) au GCIIE (Groupe de Concertation et d'Information sur les Inventaires d'Émissions) en octobre 2022 pour validation.

La présente version est une mise à jour de la note de 2022, elle intègre les résultats des projets PerfPAG et Epochag publiés après 2022 et, sur la base de ces résultats, fait des propositions de catégorisation et de facteurs d'émissions pour les poêles à granulés et de modification du facteur d'émission pour les poêles à bûches avancés. Compte tenu du très faible taux de pénétration de ces appareils dans le parc français actuel, ces propositions n'ont pas fait l'objet d'une nouvelle étude d'impact sur l'inventaire national.

Pour citer ce document, utilisez le lien ci-après :

Institut national de l'environnement industriel et des risques, Réévaluation des facteurs d'émission des particules totales (solide et condensable) du chauffage domestique au bois, Verneuil-en-Halatte : Ineris - 206576 - v3.0, 13/01/2026.

1 Contexte

Au sein des aérosols, les espèces dites « condensables » désignent les composés présents sous forme gazeuse dans le conduit de fumées qui se condensent lors de leur entrée dans l'atmosphère du fait de la dilution et du refroidissement des fumées. Les émissions de ces composés peuvent représenter *in fine* une part significative des concentrations de particules dans l'air ambiant, en particulier pour les émissions dues au chauffage au bois. Denier Van Der Gon *et al.*, (2015)¹ a montré que la plupart des inventaires se basaient sur des facteurs d'émissions n'incluant pas les condensables. Les auteurs ont estimé que les émissions européennes de particules pouvaient être sous-estimées d'un facteur 2. En utilisant les modèles de qualité de l'air EMEP et PMCAMx, ils ont montré que l'inclusion des émissions de condensables dues au chauffage au bois dans les inventaires d'émission pouvait mener à une augmentation de plus de 50% des concentrations simulées de particules.

En 2020, un groupe d'experts s'est réuni (Simpson *et al.*, 2020)² dans le cadre des travaux de la Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance (CLRTAP) sur la question du traitement des condensables dans l'inventaire EMEP. Le groupe d'experts a recommandé que les condensables soient inclus dans les inventaires d'émissions de PM.

L'objectif de cette note est de présenter le détail du calcul des émissions de particules du chauffage au bois rapportées par la France et de proposer une évolution de la méthodologie qui reposerait sur des facteurs d'émissions (FE) incluant les fractions solide et condensable des aérosols émis par la combustion domestique du bois.

NB : une proposition de mise à jour des facteurs d'émission des poêles à granulés et des poêles à bûches avancés éco-design figurant dans la version initiale de cette note a été faite en 2025. Les nouvelles valeurs proposées sont présentées en annexe 5.2 du présent document.

¹ Denier Van Der Gon, H. A. C. *et al.* (2015) 'Particulate emissions from residential wood combustion in Europe - revised estimates and an evaluation', *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(11), pp. 6503–6519. doi: 10.5194/acp-15-6503-2015.

² Simpson, D. *et al.* (2020) *How should condensables be included in PM emission inventories reported to EMEP/CLRTAP?*

2 Méthodologie actuelle d'établissement des inventaires d'émission du chauffage résidentiel au bois

2.1 FE de TSP et classification d'appareils utilisés dans les inventaires européens (données TNO, Citepa et Lignes directrices EMEP 2019)

Les appareils résidentiels de chauffage au bois présentent des émissions de particules qui peuvent varier selon un certain nombre de paramètres tels que le type d'appareil (poêles à bûche, poêles granulés/insert, foyers ouverts), l'ancienneté, la technologie interne (air secondaire, re combustion, ...), l'allure de la combustion (nominale ou réduite), le respect des bonnes pratiques (l'humidité du bois).

Aujourd'hui, les inventaires d'émissions chargés de référencer les émissions du secteur résidentiel ne tiennent pas forcément compte de tous ces paramètres qui peuvent faire varier les FE de façon importante. Dans les inventaires du TNO³, du Citepa et dans les lignes directrices EMEP 2019⁴, les appareils sont classés selon le type (poêles ou chaudières), le combustible utilisé et selon la catégorie ancienne, nouvelle/performante, avancée (voir *Tableau 1*).

Cependant, un tel classement présente des limites. En effet, il peut être délicat de comparer ces inventaires entre eux car les terminologies employées pour classer les différents appareils ne sont pas les mêmes. Il n'est donc pas certain que les appareils étiquetés « Old », « New » ou « Advanced » d'un inventaire donné correspondent bien aux appareils dits « Traditional/Conventional », « Improved/High Efficiency » ou « New » d'un autre inventaire.

Par ailleurs, le fait d'intégrer les émissions des condensables ou non, qui est intimement liée à la méthode de prélèvement utilisée, n'apparaît pas comme une information clairement identifiée dans les inventaires.

Ainsi, d'un côté ces inventaires peuvent diverger dans la manière d'identifier les appareils, et d'un autre, manquer de transparence sur la manière dont ont été obtenus les FE (méthodes de prélèvement incluant ou non les condensables).

Tableau 1 : Valeurs de FE des TSP exprimés en g/GJ dans les inventaires du TNO, du Citepa et dans le Guidebook EMEP 2019.

1a) Facteurs d'émissions TNO étude de 2022

Technology	Poêles	Chaudières
Traditional	519	395
Improved	192	158
New	103	79
Pellet	26	35
Pellet+ESP	4	4

1b) Facteurs d'émissions Citepa, décembre 2020

Technology	Poêles	Chaudières
Anciens	651	232.5
Nouveaux	241.8	93
Perfomants	13.2	46.5

³ 20220131 PM small combustion France

⁴ EMEP/EEA: air pollutant emission inventory guidebook 2019

1c) Facteurs d'émissions **Guidebook EMEP 2019 (p79 to p83)**

Technology	Poêles	Chaudières
Conventional	800	500
High-efficiency	400	
Advanced / Ecolabelled	100	100
Pellet	62	62

Il apparaît donc nécessaire de réviser la méthodologie de classification des appareils résidentiels de chauffage au bois en France ainsi que les FE utilisés.

Le but de la révision de l'inventaire national est d'utiliser des FE de particules plus représentatifs de la réalité c'est-à-dire incluant les espèces condensables, de considérer les connaissances les plus récentes sur l'évolution des techniques de combustion et d'intégrer les pratiques des usagers.

2.2 Méthodologie du Citepa pour établir l'inventaire national Français et son évolution au cours du temps

2.2.1 Données de parc

Le parc d'appareils de combustion du bois dans le secteur résidentiel se décompose selon les catégories suivantes dans la méthodologie actuelle du Citepa :

- Chaudière ;
- Cuisinière ;
- Poêle ;
- Foyer fermé et insert ;
- Foyer ouvert.

Une distinction est également réalisée en fonction des classes suivantes (explications §3.4.1) :

- Appareil ancien (appareil mis sur le marché avant 1996) ;
- Appareil récent (appareil mis sur le marché après 1996) ;
- Appareil performant (appareil mis sur le marché à partir de 2001).

Les appareils considérés consomment du bois uniquement sous forme de bûches ou de granulés.

Les rendements énergétiques des différentes catégories et classes d'appareils sont présentés dans le Tableau 2 ci-dessous :

Tableau 2 : Rendement énergétique des différentes catégories et classes d'appareils du parc national – Méthodologie actuelle.

Rendement (%)	Chaudière	Cuisinière	Poêle	Foyer fermé et insert	Foyer ouvert
Appareil ancien	50	50	50	50	10
Appareil récent	70	60	60	60	
Appareil performant	85	80	80	75	

Note : les rendements énergétiques sont utilisés pour déterminer la consommation unitaire des appareils à partir des consommations unitaires présentées dans les enquêtes du CEREN exprimées par type d'usage utilisés pour l'inventaire.

Les facteurs d'émission utilisés dans les inventaires nationaux de SO₂, CO₂ et N₂O sont indépendants de la catégorie et de la classe d'appareil.

2.2.2 Facteurs d'émission de particules utilisés par le Citepa

Les facteurs d'émission de particules (hors condensables) pris en compte avant 2022 dans l'inventaire provenaient de l'étude réalisée par le Citepa en 2003 et étaient calculés pour les appareils performants et récents à partir d'un « ratio de performance » provenant des travaux EGTEI/GAINS. Ces facteurs d'émission sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 3 : Facteurs d'émission de TSP (hors condensables) – Méthodologie actuelle, (cité dans Autret et Rogaume 2011⁵ : Etude Ineris 2008 : Évaluation de l'impact des appareils de chauffage à bois sur la qualité de l'air intérieur et extérieur).

TSP (g/GJ)	Chaudières	Poêles	Cuisinières	FF/inserts	Foyers ouverts
Appareil ancien	250	700	700	700	750
Appareil récent	100	260	260	260	
Appareil performant	50	140	140	140	

Pour les émissions de particules liées aux granulés, un FE de 62 g/GJ provenant des lignes directrices EMEP/EEA est utilisé. Si la plupart de ces FE n'incluent pas les condensables, l'ordre de grandeur élevé des FE TSP pour les appareils anciens (poêles, cuisinières et foyers fermés/Inserts – 700 g/GJ) laisse supposer qu'ils partiellement inclus pour cette catégorie d'appareils.

La granulométrie appliquée pour les fractions de particules est la suivante :

PM₁₀ = 95 % TSP

PM_{2,5} = 93 % TSP

PM_{1,0} = 92 % TSP

2.3 Intérêts et limites associés aux méthodologies actuelles d'établissement des inventaires

2.3.1 Limites associées aux méthodes de prélèvement des émissions de particules et à l'absence de prise en compte de la fraction condensable

Le fait d'intégrer les émissions de condensables ou pas, qui est intimement lié à la méthode de prélèvement utilisée lors des mesures de concentrations de PM, n'est pas une information clairement identifiée dans les inventaires.

De manière générale, il existe 3 méthodes largement utilisées pour piéger les particules (voir Synthèse Ineris : DRC-17-164787-10342A).

- La première est la **méthode du filtre chauffé (EN16510 ou méthode EN_PME_TEST)** : l'échantillon prélevé dans le conduit de fumées est filtré à chaud. La masse de particules recueillie est déterminée par gravimétrie et ne représente que la fraction solide ; Contrairement à la méthode du filtre chauffé qui ne collecte que la fraction solide, les deux méthodes suivantes ont l'avantage de mesurer à la fois la fraction solide et condensable des particules.

⁵ Autret et Rogaume, 2011 : Production de chaleur à partir de bois - Émissions atmosphériques. Notions de base. *Technique de l'ingénieur*

- **La méthode par filtration à chaud suivie d'un piégeage par barbotage** la fraction condensable basée sur la méthode US EPA 5H. Après évaporation de l'eau ou du solvant de barbotage (Méthode INERIS dans l'isopropanol), la masse de particules collectée est additionnée à celle mesurée sur le filtre. Elle permet d'avoir une distinction des 2 fractions : solide et condensable ;
- La méthode par filtration après passage des fumées dans un **tunnel de dilution (NS 3058)** : la totalité des fumées sortant du foyer est collectée et diluée avec de l'air ambiant via une hotte d'aspiration (tunnel de dilution), un échantillonnage sur filtre est ensuite effectué. Du fait de la dilution, la température décroît et les espèces condensables se transforment en aérosols. Un échantillon est prélevé dans le tunnel de dilution et filtré. Contrairement à la méthode précédente, celle-ci ne permet pas de distinguer la contribution des 2 fractions.

2.3.2 Intérêts et limites associés à la classification actuelle des appareils

2.3.2.1 Classification EMEP :

La méthodologie de classification des appareils des lignes directrices EMEP 2019 (Tableau 1) pourrait être utilisée comme modèle. En effet, les terminologies de classification utilisées dans les lignes directrices font référence au degré de technologie intrinsèque des appareils et la classification d'un appareil dans telle ou telle catégorie dépend principalement de trois paramètres :

1. l'efficacité ou rendement énergétique,
2. l'autonomie entre deux chargements en combustible,
3. le niveau d'émission induit par une combustion incomplète.

Ainsi, le terme « **Conventional** », fait référence aux poêles radiants classiques avec un rendement entre **40 et 50%**, une autonomie entre deux chargements allant de **3h à 8h** et avec un fort niveau d'émission en **CO, COVNM, TSP et HAP**.

Sous le terme « **High-efficiency** », figurent les poêles traditionnels avec une meilleure utilisation de l'air secondaire dans la chambre de combustion. Leur rendement est compris entre **55 % et 75 %** et les émissions de polluants sont plus faibles, leur autonomie varie de **6 à 12 heures**. Ces poêles ont l'avantage de pouvoir être équipés d'un convertisseur catalytique afin de réduire les émissions dues à une combustion incomplète.

Enfin le terme « **Advanced** », fait référence aux poêles caractérisés par des entrées d'air multiples et le préchauffage de l'air de combustion secondaire par échange de chaleur avec les gaz de combustion chauds. Ce niveau de conception se traduit par une efficacité accrue (**près de 70 % à pleine charge**) et une **réduction des émissions de CO, TSP et de COVNM** par rapport aux poêles traditionnels. Au sein des poêles associés au terme « **Advanced** », figurent aussi ceux commercialisés sous un système d'éco labellisation qui vise à définir une meilleure efficacité et limiter les émissions. Plusieurs systèmes sont en place, tels que le label Flamme verte (en France).

Une piste de révision de l'inventaire d'émission national pourrait donc être de confronter ces trois terminologies (Conventionnel, Performant et Avancé) aux avancées technologiques des appareils du parc français survenues depuis les années 1990 dans le but de redéfinir l'évolution des FE des TSP de manière plus précise que ce qui est fait actuellement. Ce travail est présenté dans les § 3.4 et 3.5 de cette note.

2.3.2.2 Classification Citepa d'avant 2022

Les limites du classement Citepa d'avant 2022 est **1)** qu'il ne permet pas une réelle distinction (telle que présentée dans les lignes directrices EMEP 2019) entre les poêles à bois, **2)** que l'année charnière 1996 ne reflète pas l'évolution technologique des appareils en France, **3)** que la qualification « Performant » n'est pas assez précise pour identifier le type de poêles correspondant **4)** que l'allure de combustion n'est pas bien considérée, les FE utilisés ne reflètent pas l'usage réel des appareils et **5)** que les FE peuvent être sous-estimés selon la méthode de prélèvement des particules utilisées, ainsi, dans les études Ineris d'avant 2009 sur lesquelles sont basées certaines données du Citepa, les FE des particules calculés ne prenaient en compte que la fraction solide car la méthode de prélèvement utilisée était celle du filtre chauffé (voir §3.3 ci-dessus).

3 Proposition et impact sur l'inventaire d'une nouvelle méthodologie

3.1 Bilan des données disponibles à l'Ineris en termes de facteurs d'émissions de TSP et de paramètres d'influence des émissions

3.1.1 Evolution des FE des TSP dans les études INERIS depuis 2001

Depuis l'année 2001, plusieurs études réalisées par l'INERIS sur les émissions de particules des appareils résidentiels de chauffage au bois (Etude 2001⁶, Etude AFAC 2015⁷, Etude IDENTTECH 2016⁸, Etude ERFI 2016⁹, Etude CARVE 2019¹⁰) ont permis de calculer des FE. A partir de 2009, Ces FE des TSP ont évolué à la baisse avec le temps au gré des avancées technologiques des appareils résidentiels de chauffage au bois arrivant sur le marché national. La frise de la *Figure 1* illustre l'évolution des FE des TSP incluant les condensables calculés dans les différentes études INERIS depuis 2001 au regard de ceux obtenus dans des conditions analogues dans des études US EPA et du SINTEF (Norvège).

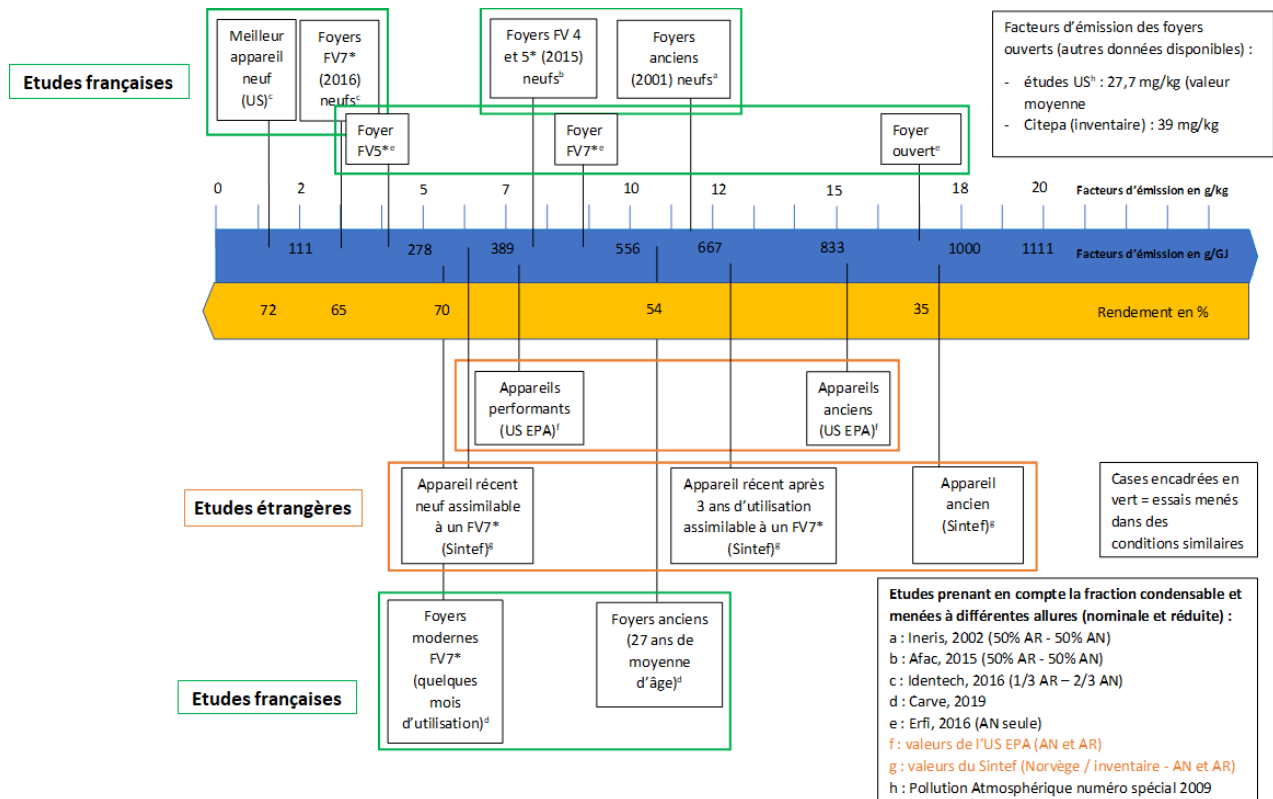


Figure 1 : Frise d'évolution des facteurs d'émission des TSP (solides + condensables) basée sur les études réalisées par l'INERIS de 2001 à 2019.

Encadrés verts : études françaises. Encadrés oranges : études étrangères

⁶ Ineris : DRC-02-25420-AIRE-n°271-SCo

⁷ Ineris : DRC-15-135959-11296A

⁸ Ineris : DRC-16-135957-02814A

⁹ Ineris DC-16-155779-09860A

¹⁰ Ineris : DRC-19-146451-03830A

Sur cette frise, l'étude CARVE qui consistait à évaluer l'impact sur les émissions du renouvellement des anciens appareils de 35 particuliers dans la vallée de l'Arve, montre des résultats avant et après renouvellement qui témoignent d'une baisse significative depuis 2001 des FE des TSP allant d'environ 600 g/GJ pour les appareils anciens (< avant 2005) à 280 g/GJ pour les appareils les plus récents (après 2015 et labellisés FV 7*). Cette étude indique aussi que les foyers remplacés étaient caractérisés par une durée d'utilisation de 27 ans en moyenne.

De la même manière, l'étude réalisée de 2001 et l'étude AFAC de 2015 sur un échantillon de plusieurs appareils à bois de technologies de 2001 et 2015, respectivement montre également une évolution à la baisse des FE des TSP de 640 g/GJ à environ 400 g/GJ.

3.1.2 Principaux paramètres d'influence du FE des TSP

Parmi les paramètres pouvant influencer le FE des TSP issues des appareils résidentiels de combustion au bois (voir Synthèse INERIS sur les études à l'émission sur la combustion du bois en foyers domestiques¹¹), trois principaux peuvent être distingués comme impactant fortement la quantité des émissions de particules :

- L'humidité du bois,
- L'allure de la combustion : nominale ou réduite,
- La maintenance de l'appareil.

Les études réalisées sur l'influence de l'humidité signalent toutes que les émissions de polluants augmentent lorsque le taux d'humidité du bois dépasse environ 22 % (% H sur masse brute). L'influence de l'humidité du bois, entre 22 % et 30 %, sur les TSP est comparable à celle du type d'appareil (ancienne/nouvelle génération)¹². L'utilisation d'un combustible sec (taux d'humidité inférieur à 22% sur masse brute) est donc préconisée¹³.

Les pratiques des usagers et notamment **l'allure de combustion** (réduction des entrées d'air pour limiter la puissance délivrée par l'appareil) ne sont pas identifiées dans les inventaires alors qu'il s'agit du principal facteur d'influence. Les études montrent qu'une allure **réduite** peut augmenter d'un facteur 3 les FE (Etude 2001¹⁴, AFAC 2015¹⁵ et CARVE 2019¹⁶). Le rapport Ademe sur les connaissances des usages liés au chauffage domestique au bois en France (ADEME 2018)¹⁷ montre qu'une part significative des usagers (25%) manipulent leurs appareils afin d'obtenir un feu au ralenti dit en « mode nuit » ou diminuent l'arrivée d'air (24%) pour limiter l'apport de chaleur. Ces deux pratiques peuvent s'apparenter à une allure réduite. **Aussi, nous proposons dans un premier temps, que dans les inventaires d'émission, les FE des TSP soient calculés selon 50% d'allure nominale et 50% d'allure réduite.**

Le troisième paramètre qui influence significativement les émissions est **l'entretien des appareils** dans le temps. Ainsi dans l'inventaire du SINTEF, encadré orange *Figure 1* (Seljeskog *et al.*, 2017¹⁸; Seljeskog, *et al.*, 2017¹⁹), il est montré que l'absence de maintenance d'un l'appareil pendant 3 ans peut faire augmenter le FE des TSP d'environ 45%. Alors qu'en France, le ramonage des conduits, l'enlèvement et l'évacuation des cendres sont relativement bien respectés par la majorité des usagers, **le changement du joint d'étanchéité de la porte** l'est beaucoup moins (ADEME *et al.*, 2018)¹⁵.

¹¹ Synthèse Ineris : DRC-17-164787-10342A

¹² Rapport Ademe : Qualicomb 2016

¹³ Rapport Ademe : Bois énergie et qualité de l'air – Les avis de l'Ademe 2015.

¹⁴ Ineris : DRC-02-25420-AIRE-n°271-SCo

¹⁵ Ineris: DRC-15-135959-11296A

¹⁶ Ineris: DRC-15-135959-11296A

¹⁷ Rapport Ademe *et al.* (2018) 'CONNAISSANCE DES USAGES LIÉS AU CHAUFFAGE DOMESTIQUE AU BOIS EN FRANCE - Enquête sur les pratiques d'utilisation des équipements domestiques de chauffage au bois', p. 53.

¹⁸ Seljeskog, M. *et al.* (2017) 'Variables Affecting Emission Measurements from Domestic Wood Combustion', *Energy Procedia*. The Author(s), 105(1876), pp. 596–603. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.361.

¹⁹ Seljeskog, M., Goile, F. and Skreiberg, O. (2017) 'Recommended Revisions of Norwegian Emission Factors for Wood Stoves', *Energy Procedia*. The Author(s), 105(1876), pp. 1022–1028. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.447.

Or, l'usage répété des appareils engendre des déformations et un vieillissement des joints d'étanchéité qu'il est important de remplacer afin d'éviter des entrées d'air non maîtrisées dégradant la qualité de la combustion et entraînant alors l'augmentation des émissions. L'étude CARVE¹⁴ montre que 30% des appareils anciens présentaient des excès d'air importants ce qui représentaient 80% des émissions.

3.2 Proposition d'une nouvelle classification par l'Ineris

3.2.1 Par type, par avancée technologique et par allure de combustion

En se basant sur l'historique de l'évolution technologique des appareils de combustion résidentiels au bois du parc français depuis 1990 à nos jours, il est possible d'identifier les catégories suivantes :

- **Les appareils avant 2005** peuvent être considérés comme **conventionnel/ancien**. Il y a en effet eu très peu d'évolution technologique en France des appareils de combustion domestique avant cette année,
- **A partir de 2005**, la technologie des appareils commence à évoluer de façon notable. Entre 2005 et 2010 l'arrivée sur le marché français d'appareils plus **performants**, équipés d'une introduction d'air secondaire dans la chambre de combustion (type FV 5*) mène à un saut technologique qui permet de réduire les émissions de particules lors de certaines phases de combustion,
- **A partir de 2015**, la vente des appareils FV4* et des appareils plus anciens est interdite, tous les appareils vendus (ou quasi) sont alors équipés d'un système de post-combustion (air secondaire - appareils **performants**)
- **Entre 2015 et 2021**, évolution constante des appareils (préchauffage de l'air secondaire, meilleure répartition des entrées d'air, meilleure étanchéité de la chambre notamment), sans changement technologique majeur (FV 7* : amélioration des appareils **performants** FV5*),
- **2022** : tous les appareils commercialisés respectent les critères Eco-design (au plus 5 g/kg soit 278 g/GJ). Pour les **appareils à combustion avancée**, la barre est à mettre à ce niveau. Il existe des appareils de ce type (notamment étrangers) depuis les années 2005 environ.

Selon cette nouvelle classification qui prend en compte les évolutions technologiques (label Flamme Verte, air secondaire, etc.), il est possible de redéfinir le classement des appareils de chauffage résidentiel au bois (poêles et inserts) en incluant également les allures de combustion et en considérant la fraction condensable des particules.

Quand cela ne s'avère pas possible de définir les FE des TSP en fonction de l'allure de combustion, il est possible d'estimer dans un premier temps une utilisation avec 50% d'allure nominale (AN) et 50% d'allure réduite (AR).

A partir de ces hypothèses, il est possible de proposer un nouveau classement présenté dans le tableau 4 associé à des facteurs d'émissions de particules incluant les condensables.

Tableau 4 : Valeurs des FE des TSP (solides + condensables) et des particules solides exprimées en g/GJ avant 2005 à nos jours, définies par allure de combustion : nominale (AN), réduite (AR) ou non définies (AN et AR).

TSP (solide + condensable) (g/GJ)	Poêles à bois/Inserts				Foyers Ouverts
	Conventionnels (avant 2005)	Performants 1 (2005 – 2015, FV4* et FV5*)	Performants 2 (2015 – 2021, FV5*en FV7*)	Avancés (2022, Eco design = FV7*)	
AN et AR	639* 590 ^b	417 ^a	282 ^b	128 ^c	932 ^d
AN	582*	271 ^a	141 ^e	114 ^c	-
AR	700*	563 ^a	423 ^e	148 ^c	-

Particules solides (g/GJ)	Poêles à bois/Inserts				Foyers Ouverts
	Conventionnels (avant 2005)	Performants 1 (2005 – 2015, FV4* et FV5*)	Performants 2 (2015 – 2021, FV5*en FV7*)	Avancés (2022, Eco design = FV7*)	
AN et AR	100 331 ^b	142 ^a	144 ^b	76 ^c	253 ^d
AN	43*	101 ^a	72 ^e	85 ^c	-
AR	161*	183 ^a	216 ^e	80 ^c	-

*, Estimations à partir de corrélations basées sur les résultats de l'étude Ineris 2001²⁰ (fraction solide)

a, Etude Ineris : AFAC 2015²¹

b, Etude Ineris : CARVE 2019²², estimations à partir de corrélations

c, Etude Ineris : IDENTTECH 2016²³

d, Etude Ineris : ERFI 2016²⁴

e, estimation selon 50% allure nominale et 50% allure réduite.

Les valeurs des FE de la première ligne du Tableau 4 (AN et AR) pour les différentes classes d'appareils et selon les années, indiquent qu'avec l'apparition des nouveaux appareils, une diminution d'environ 2,5% des par an est observée depuis les années 1990 (voir Figure 2).

²⁰ Ineris: DRC-02-25420-AIRE-n°271-SCo

²¹ Ineris: DRC-15-135959-11296A

²² Ineris: DRC-19-146451-03830A

²³ Ineris: DRC-16-135957-02814A

²⁴ Rapport Ineris : Etude ERFI, DRC-16-155779-09860A

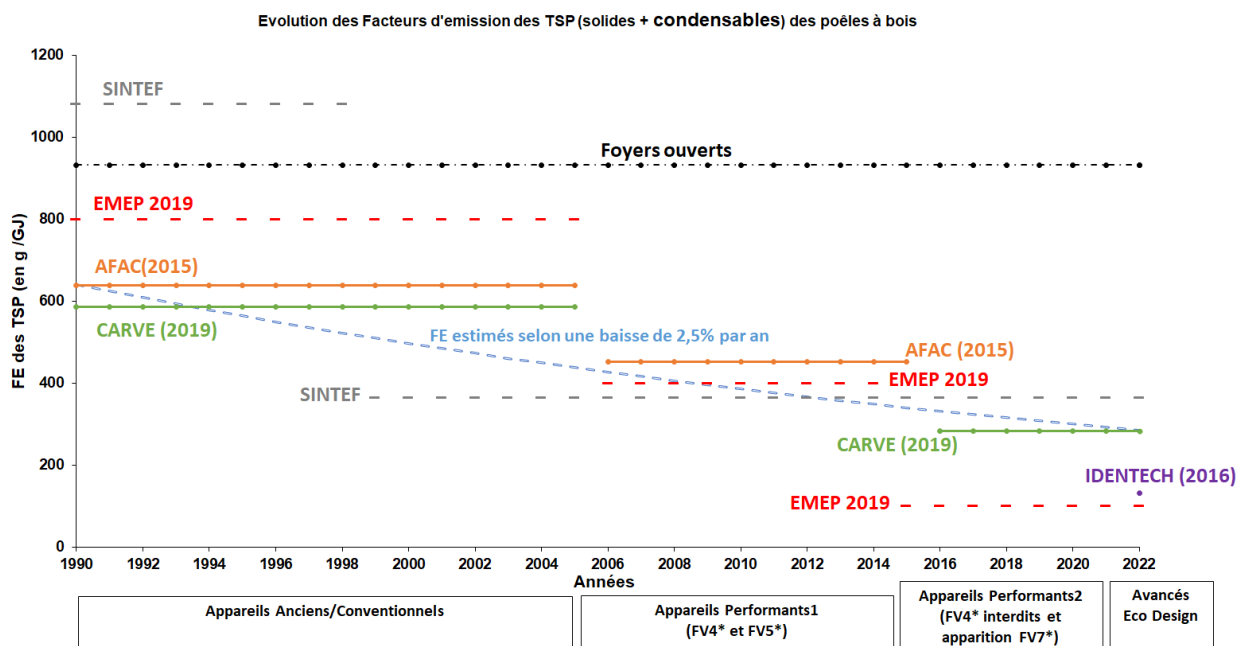


Figure 2 : Evolution des FE des TSP exprimés en g/GJ selon les études Ineris, les inventaires du SINTEF et des lignes directrices EMEP 2019

Cette diminution du FE des TSP de 2,5% par an correspond à une tendance qui a été obtenue à partir des FE calculés dans les études Ineris produites depuis les années 2001. Cette tendance de diminution observée semble tendre vers un FE des TSP de 280 g/GJ qui est compris entre celui de l'inventaire SINTEF (364 g/GJ) et celui de l'inventaire des lignes directrices EMEP 2019 (100 g/GJ).

Enfin, l'étude IDENTECH montre des FE parmi les plus faibles (environ 130 g/GJ) qui sont proches des valeurs des lignes directrices EMEP 2019 et du Citepa pour les appareils performants. Toutefois, cette valeur est à considérer avec précaution car les 4 appareils testés étaient parmi les appareils les plus performants du marché au moment de l'étude. Ces appareils n'étaient donc pas forcément représentatifs de l'ensemble du parc français de l'époque.

Le rendement des appareils est aussi une donnée nécessaire pour l'inventaire. Or, les progrès technologiques des appareils ont également conduit à une amélioration des rendements des appareils au cours du temps.

Lors de l'étude CARVE menée chez 35 particuliers de la vallée de l'Arve entre 2015 et 2019, les rendements des appareils ont été estimés à partir de la formule de calcul de la norme NF EN 16510, en prenant en compte les résultats des mesures suivantes : humidité du bois, température des fumées, température ambiante, teneurs en CO et CO₂ des fumées, ainsi que les caractéristiques connues des essences de bois brûlés (hêtre essentiellement, pouvoir calorifique inférieur (PCI) : 18380 kJ/kg sec). Pour les granulés, les caractéristiques n'étant pas connues précisément, une humidité de 7 % et un pouvoir calorifique inférieur de 17 774 kJ/kg sec ont été pris en compte.

A partir des résultats des rendements obtenus dans cette étude (54% pour les appareils anciens, 70% pour les appareils récents à bûche et 88% pour les appareils récents à granulés), il est possible d'estimer un gain d'environ + 1,2% par an pour les rendements des appareils à granulés (dans le cas du remplacement d'un appareil ancien à bûches par un appareil à granulés) et d'environ +0,7% par an pour les rendements des appareils à bûche depuis les années 1990 à nos jours (voir Figure 3).

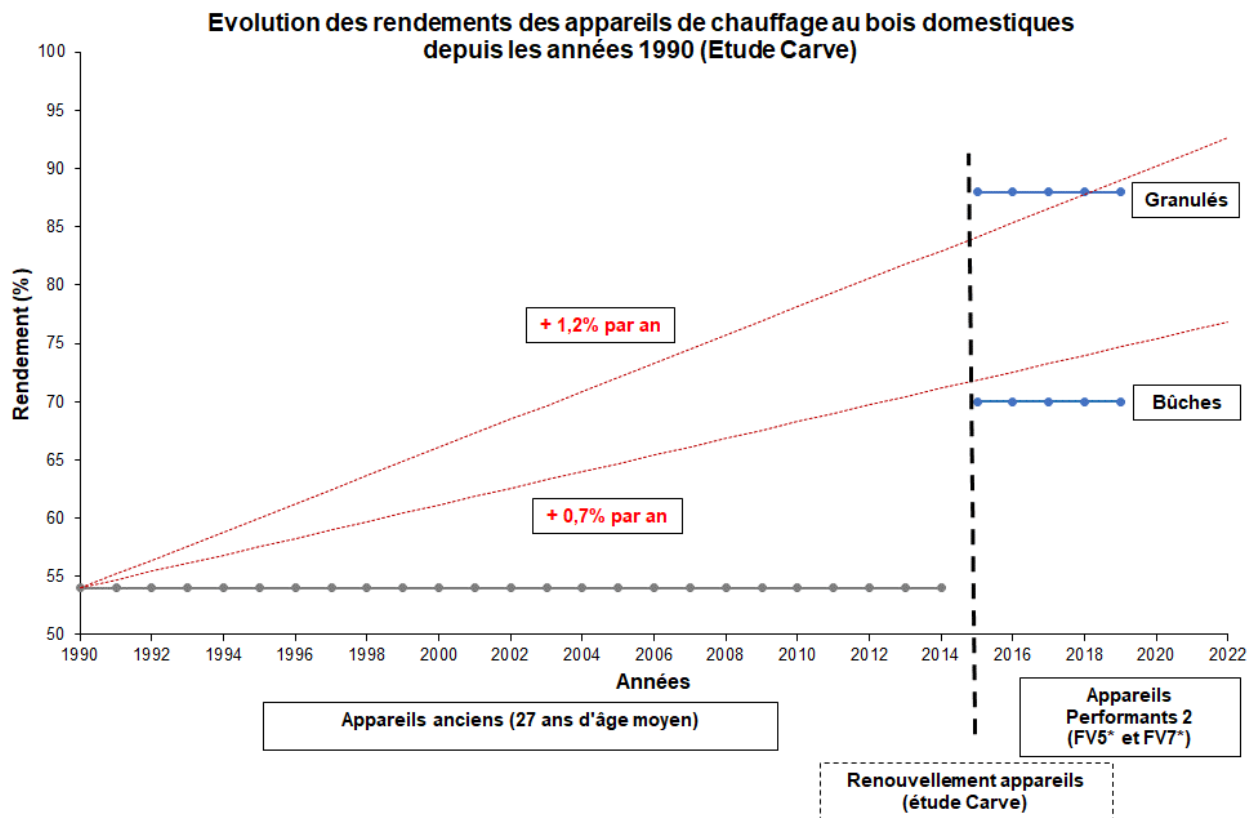


Figure 3 : Evolution des rendements des appareils à partir des valeurs calculées avant et après renouvellement des appareils à bois chez les particuliers entre 2015 et 2019 (étude CARVE).

Ainsi, avec les gains au niveau des rendements apportés par les nouveaux appareils mis sur le marché, la charge de bois nécessaire pour atteindre les puissances nominales des poêles annoncés par les constructeurs se voit réduite progressivement, favorisant ainsi une baisse de la consommation énergétique de la ressource bois et donc des émissions.

3.2.2 Synthèse des propositions de l'Ineris en termes de FE des TSP (solide + condensable) et de catégories d'appareils

3.2.2.1 Appareils à bûches

En se basant sur les études citées dans cette partie 3, l'Ineris propose une nouvelle classification des appareils avec les FE des TSP (solide + condensable) associés. Cette proposition de classification et les FE correspondants sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5 : Correspondance entre la proposition de la nouvelle classification nationale et les différentes classifications des poêles à bois utilisées dans les inventaires du TNO, des lignes directrices EMEP 2019 et du Citepa illustrée selon la catégorie d'appareil (Tableau 5. A), les FE des TSP (Tableau 5. B).

A.

Catégories	TNO (Klimont et al. 2002)	Guidebook EMEP 2019	Citepa (classification nationale actuelle)	Proposition de la nouvelle classification nationale
No Control	Traditional	Conventional	Anciens (< 1996)	Conventionnels (<2005)
Improved	Improved	High-Efficiency	Nouveaux (> 1996)	Performants 1 - FV4* à FV5* (2005 – 2015)
			Performants (après 2001)	Performants 2 – FV5* à FV7* (2015 – 2021)
New	New	Advanced		Avancés, Eco-Design - FV7* (à partir de 2022)

B.

FE TSP	TNO (Klimont et al. 2002)	Guidebook EMEP 2019	Citepa (classification nationale actuelle)	Proposition de la nouvelle classification nationale
No Control	519	800	651	solide+condensable 590 AN: 295 – AR:885
Improved	192	400	242	417 AN: 271 – AR:563
			130	282 AN: 141 – AR: 423
New	103	100		128* AN : 114 – AR : 148

AN – AR : 50% Allure Nominale – 50% Allure Réduite.

*une nouvelle valeur de facteur d'émission, basée sur les résultats des projets Epochag et Identech, a été proposée pour cette catégorie en 2025, elle est présentée en annexe 2.

Traditional stoves = Ce sont les poêles de chauffage traditionnels utilisant le bois ou le charbon comme combustible. Ils ont une conception de foyer simple à base de grille avec généralement une seule alimentation en air primaire et aucun élément de stockage de la chaleur (**TNO**).

Conventional stoves = Ce sont des poêles avec un faible rendement (40 à 50%) et des émissions importantes émises lors d'une combustion incomplète de polluants tels que les TSP, le CO, les COVN et les HAP (**EMEP 2019**).

High efficiency stoves = Ce sont des poêles traditionnels améliorés avec l'utilisation d'air secondaire dans la chambre de combustion. Cette catégorie renferme aussi les poêles anciens munit d'un convertisseur catalytique pour limiter les émissions lors d'une combustion dégradée (**EMEP 2019**).

Improved stoves = Ce sont des poêles améliorés disposant d'une alimentation en air secondaire et d'éléments de stockage de la chaleur dans la construction du foyer qui améliorent les performances de combustion et réduisent les émissions de particules par rapport aux poêles traditionnels (**TNO**).

Advanced stoves = Ce sont des poêles caractérisés par des entrées d'air multiples et le préchauffage de l'air de combustion secondaire par échange de chaleur avec les gaz de combustion chauds. Cette conception se traduit par une

efficacité accrue (près de 70 % à pleine charge) et une réduction des émissions de CO, de COVNM et de TSP par rapport aux poêles conventionnels. (EMEP 2019).

New stoves = Ce sont les poêles les plus les plus avancés du marché avec des caractéristiques de foyer, de construction et de circulation d'air et qui optimisent l'efficacité de la combustion (**TNO**).

3.2.2.2 Appareils à granulés

Étant donné la rareté des poêles à granulés dans le parc d'appareils de chauffage domestique avant 2015, et leur contribution limitée aux émissions nationales, seule une catégorie d'appareils (après 2015) a initialement été intégrée dans l'inventaire.

Une mise à jour de ces catégories et des valeurs de facteur d'émission associés, basés sur les résultats des projets Epochag et Perfpag, a été proposée en 2025, elle est présentée en annexe 2.

3.3 Impacts sur l'inventaire national

Le Citepa a évalué les impacts des changements méthodologiques proposés. Ceux-ci sont de deux natures bien distinctes :

- D'une part le décalage dans le temps des appareils moins émissifs tel que présenté dans le paragraphe 3.2.1 ;
- D'autre part, la modification des facteurs d'émissions précédemment utilisés : l'impact de quatre ensembles de facteurs d'émissions a été évalué.

Compte tenu de la très faible proportion d'appareils à granulés et d'appareils à bûches dits « avancés » dans le parc actuel, les propositions d'évolution de facteur d'émissions faites en 2025 sur ces appareils n'ont pas été prises en compte dans cette étude d'impact.

a) Les facteurs d'émissions de particules solides et condensables provenant de la méthode Tier 2 du guide EMEP/EEA 2019.

TSP (solide+ condensable)	Appareils à bûches					Appareil à granulés
	Chaudières	Poêles	Cuisinières	Inserts	Foyers ouverts	
	g/GJ					
appareil ancien (<2005)	500	800	800	800	880	
appareil récent (≥2005)	300	400	400	400		
appareil performant (2015-2021)	100	100	100	100		62

Aucun facteur d'émission n'étant disponible dans le guide EMEP/EEA 2019 pour des chaudières aux performances intermédiaires, le facteur d'émission TSP des chaudières dites « récentes » a été défini à partir de la moyenne des chaudières dites « anciennes » et « performantes ».

b) Les facteurs d'émissions de particules solides issues des études de l'Ineris.

TSP solides	Appareils à bûches					Appareil à granulés
	Chaudières	Poêles	Cuisinières	Inserts	Foyers ouverts	
	g/GJ					
appareil ancien (<2005)	170	331	331	331	253	
appareil récent (≥2005)	112	144	144	144		
appareil performant (2015-2021))	54	144	144	144		32

Pour les chaudières et les appareils à granulés, les FE des particules solides proviennent de la version mise à jour en juillet 2017 du guide EMEP/EEA 2016 (le guide 2019 le plus récent ne présente pas le détail entre particules totales et particules solides).

Aucun facteur d'émission n'étant disponible dans le guide EMEP/EEA 2019 pour des chaudières aux performances intermédiaires, le facteur d'émission TSP des chaudières dites « récentes » a été défini à partir de la moyenne des autres types de chaudières.

c) Les facteurs d'émissions de particules totales issues des études de l'Ineris

TSP (solide+condensable)	Appareils à bûches					Appareil à granulés
	Chaudières	Poêles	Cuisinières	Inserts	Foyers ouverts	
	g/GJ					
appareil ancien (<2005)	500	590	590	590	932	
appareil récent (≥2005)	300	417	417	417		
appareil performant (2015-2021))	100	282	282	282		62

Aucun facteur d'émission n'étant disponible dans le guide EMEP/EEA 2019 pour des chaudières aux performances intermédiaires, le facteur d'émission TSP des chaudières dites « récentes » a été défini à partir de la moyenne des autres types de chaudières.

d) Les facteurs d'émissions de particules solides et condensables issues des études de l'Ineris à l'exception des poêles et inserts anciens pour lesquels on utilise un FE issu du Guide EMEP/EEA 2019 (cela permet d'éviter un écart important aux lignes directrices sur ce type d'appareils).

TSP (solide+ et condensable)	Appareils à bûches					Appareil à granulés
	Chaudières	Poêles	Cuisinières	Inserts	Foyers ouverts	
	g/GJ					
appareil ancien (<2005)	500	800	800	800	932	
appareil récent (≥2005)	300	417	417	417		
appareil performant (2015-2021))	100	282	282	282		62

Aucun facteur d'émission n'étant disponible dans le guide EMEP/EEA 2019 pour des chaudières aux performances intermédiaires, le facteur d'émission TSP des chaudières dites « récentes » a été défini à partir de la moyenne des autres types de chaudières.

Cet ensemble de FE a été proposé par le Citepa au GCIIE (Groupe de Concertation et d'Information sur les Inventaires d'Emissions) en octobre 2022.

Les hypothèses de granulométrie sont restées inchangées, à savoir 95 % de PM₁₀ au sein des TSP et 93 % de PM_{2,5} au sein des TSP.

Des évolutions méthodologiques ultérieures pourront tenter de prendre mieux en compte l'impact de l'évolution de l'usage des appareils sur les émissions (allure, allumage, humidité du bois, etc.) en faisant l'hypothèse qu'une meilleure information du public permettra une amélioration des usages (éviter les allures réduites) mais aussi la mise sur le marché d'appareils ne permettant plus les réglages inadaptés. Cela pourrait avoir un impact important sur l'évolution des émissions.

3.3.1 Impacts de la mise à jour des catégories d'appareils

Hypothèses adaptées pour l'inventaire national :

- Les appareils dit « récents » dans les inventaires nationaux, désormais assimilés aux FV 4 et 5*, apparaissent donc à partir de 2005 dans les ventes annuelles. Leur taux de pénétration annuel augmente linéairement entre 2005 (20 % des ventes) jusqu'en 2010 (100 % des ventes). Dans le même temps, les taux de pénétration dans les ventes annuelles des appareils dit « ancien » diminuent linéairement en proportion inverse pour atteindre 0 % en 2010. Ces taux pourront être affinés par la suite si des données complémentaires le permettent. Des données existent bien concernant les ventes sur les FV 4* ou 5* mais ces proportions sur les labels ne

signifient pas pour autant que les autres appareils vendus ne sont pas tout aussi performants (des appareils importés ou non labellisés peuvent être tout aussi performants).

- Les appareils dit « performants » dans les inventaires nationaux, désormais assimilés aux FV 7*, apparaissent à partir de 2015 dans les ventes annuelles. Leur taux de pénétration annuel augmente linéairement entre 2015 (14 % des ventes) jusqu'en 2021 (100 % des ventes). Dans le même temps, les taux de pénétration dans les ventes annuelles des appareils dit « récents » diminuent linéairement en proportion inverse pour atteindre 0 % en 2021. Ces taux pourront être affinés par la suite si des données le permettent comme explicité plus haut.
- Pour les chaudières et les cuisinières, on suppose que les années charnières et que les taux de pénétration dans les ventes annuelles sont les mêmes que pour les poêles/inserts.

Les différents types d'appareil se répartissent dans le temps de la façon suivante :

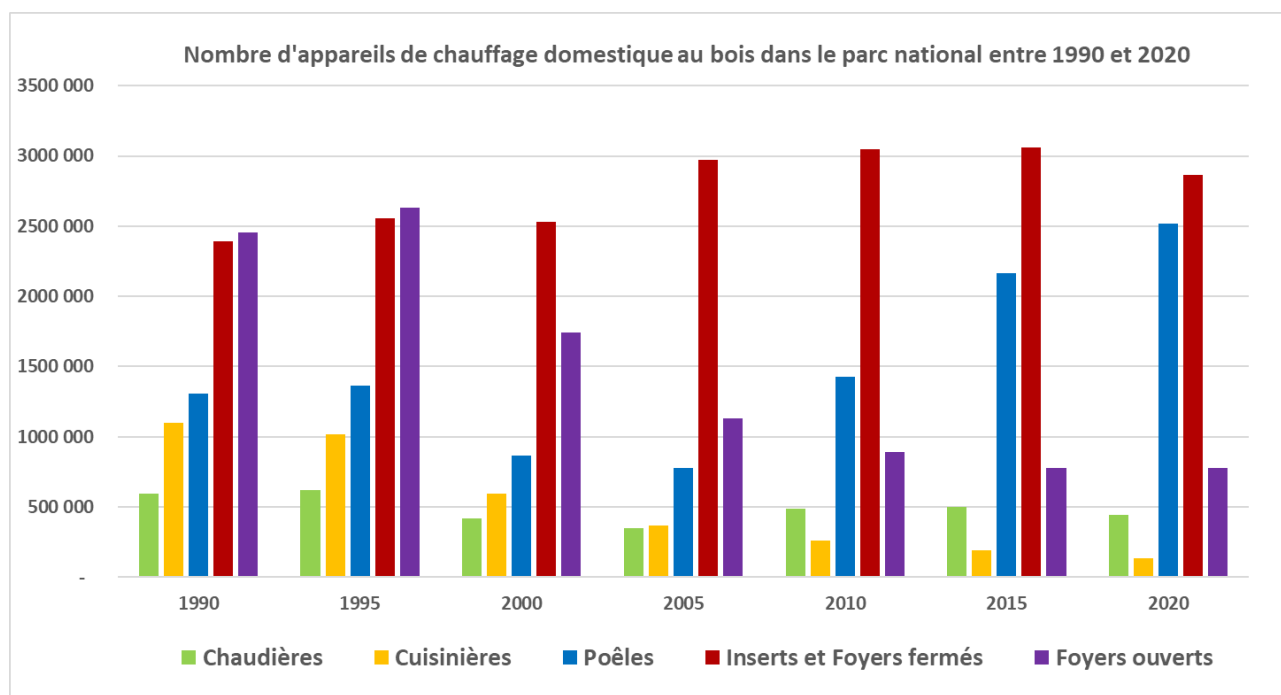


Figure 4 : Evolution du nombre total d'appareils {bûches et granulés} de chauffage domestique au bois dans le parc français utilisé dans l'inventaire national entre 1990 et 2020

En considérant ces hypothèses de taux de pénétration de chaque catégorie d'appareil, on obtient les évolutions de la proportion des catégories par type d'appareils illustrées ci-dessous (Figures 5, 6 et 7). Elle a été comparée à celle existante dans la dernière version des inventaires nationaux d'émissions.

Il est à noter qu'en combinant les chiffres de vente aux recensements du parc effectués lors des enquêtes de terrain, un important taux de renouvellement est constaté en France pour les poêles, de telle sorte qu'en 2020, plus aucun appareil pré-2005 n'apparaît. Dans la méthodologie du TNO, une fraction de 20% des « heating stoves » correspondant à la catégories « no control » avait été retenue.

L'étude de l'ADEME « Chauffage au bois domestique – Marchés et approvisionnement » portant sur l'année 2017 semble confirmer cette méthodologie en plaçant autour de 17% la part des poêles à bûche antérieurs à 2004 pour cette année. Des investigations complémentaires (non menées ici faute de temps) devront tout de même être menées pour éventuellement ralentir le remplacement des poêles dits « anciens » en lien avec les observations effectuées.

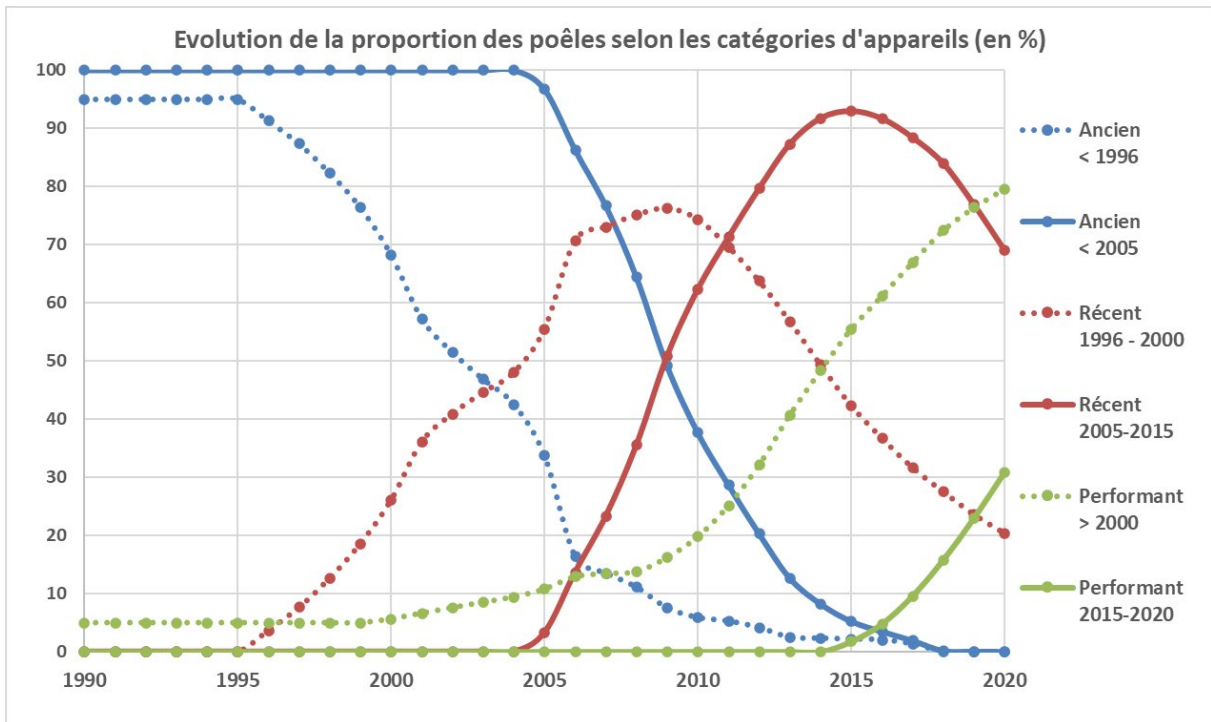


Figure 5 : Evolution de la proportion des poêles selon les catégories d'appareils en %.

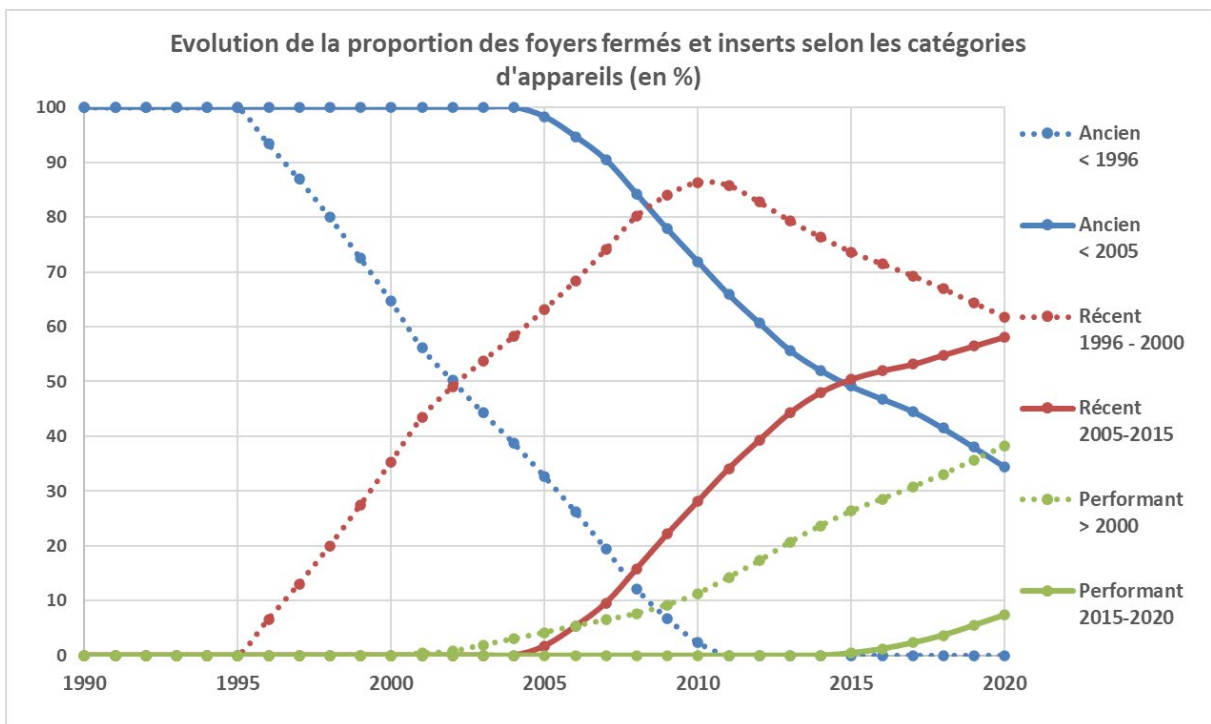


Figure 6 : Evolution de la proportion des foyers fermés et inserts selon les catégories d'appareils en %

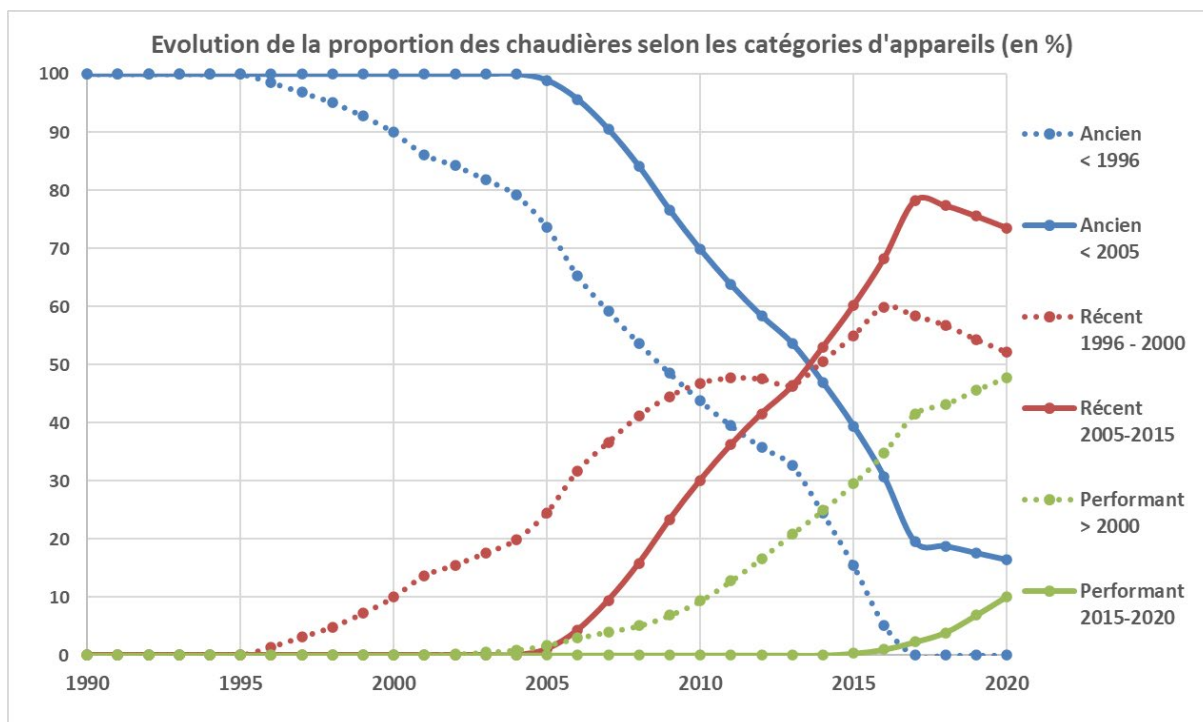


Figure 7 : Evolution de la proportion des chaudières selon les catégories d'appareils en %.

Ces nouvelles catégorisations des appareils décalent d'une dizaine d'année l'arrivée des catégories moins émissives.

Evolution des nouvelles consommations énergétiques par type d'appareils :

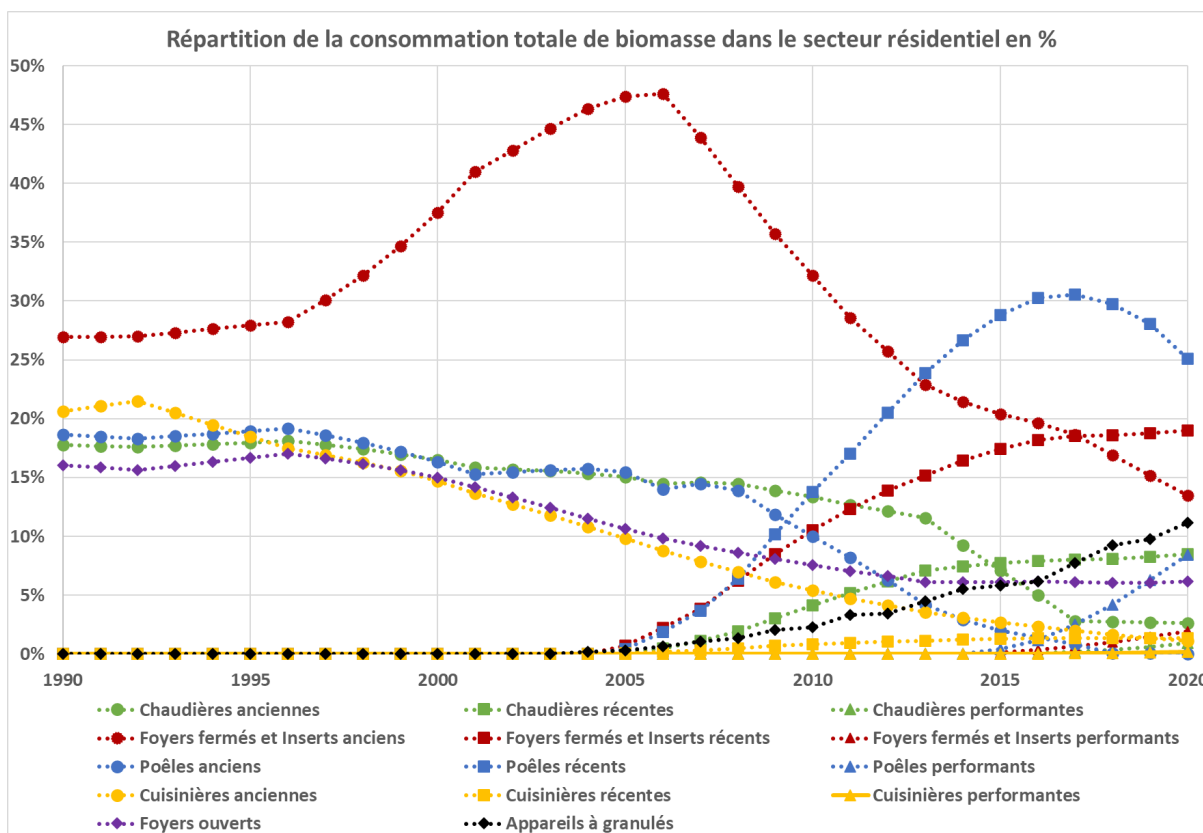


Figure 8 : Répartition de la consommation totale de biomasse dans le secteur résidentiel en %.

3.3.2 Impacts sur les facteurs d'émission résultants

Les facteurs d'émissions utilisés par le Citepa dans la dernière édition des inventaires nationaux semblaient être largement sous-estimés pour les appareils les plus récents et n'inclure les particules condensables (au moins partiellement) que pour les appareils anciens. La réévaluation des catégories d'appareil décale d'une dizaine d'années (de 1995 à 2005) le début de la réduction des émissions liées à l'utilisation d'appareils plus performants. Celle-ci est plus cohérente car fondée sur les évolutions technologiques associées à la mise en place progressive des différentes catégories du label Flamme Verte.

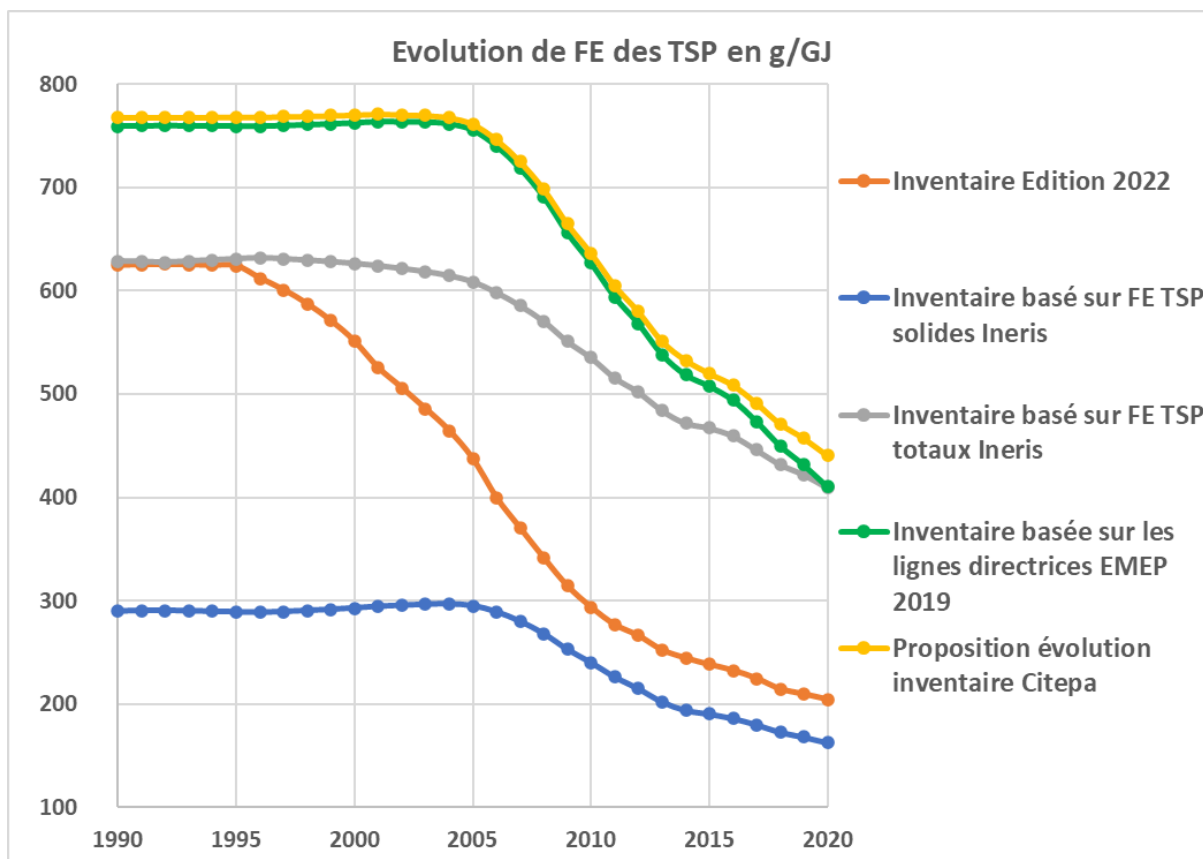


Figure 9 : Evolution des facteurs d'émissions résultants (i.e. estimé à partir des consommations totales nationales) des particules (TSP) en g/GJ.

3.3.3 Impacts sur les émissions de PM_{2,5}

Ces changements méthodologiques impliqueraient une forte hausse du niveau d'émissions totales de particules plus particulièrement dans les années les plus récentes où les facteurs d'émission utilisés n'impliquaient vraisemblablement pas les particules condensables. Ils sont illustrés sur la figure ci-dessous :

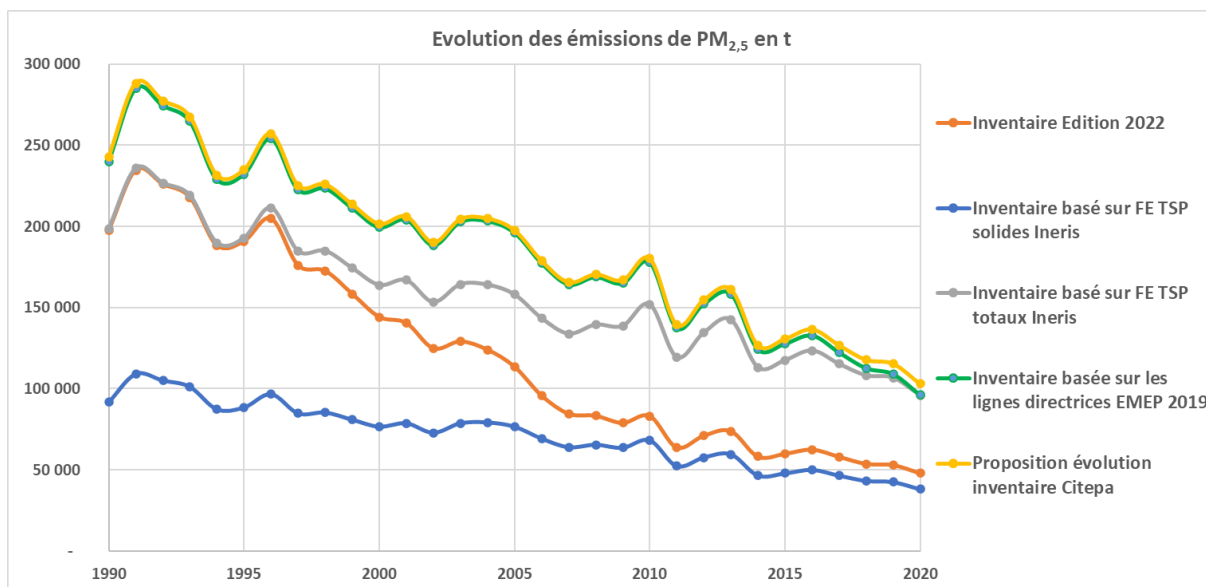


Figure 10 : Evolution des émissions nationales de $PM_{2,5}$ liée à la combustion de bois dans le secteur résidentiel selon plusieurs méthodologies de calculs

Les objectifs de réduction du PREPA concernant les $PM_{2,5}$ seraient affectés de la façon suivante :

$PM_{2,5}$	Réduction des émissions calculées entre 2005 et 2020
Inventaire Edition 2022	-58 %
Inventaire FE Ineris solides	-50 %
Inventaire FE Ineris totaux	-39 %
Inventaire FE EMEP/EEA totaux	-51 %
Proposition évolution inventaire CITEPA	-48 %
Objectif du PREPA 2020	-27 %

Dans la note d'impact qui sera transmise au GCIIIE en octobre 2022, l'objectif $PM_{2,5}$ du PREPA serait toujours respecté même si ce sera dans une moindre mesure. La pertinence de la comparaison à cet objectif peut être discutée puisqu'il ne mentionne pas spécifiquement les particules uniquement solides ou les particules totales, mais les travaux de l'IIASA sur lesquels ont été définis les engagements de réduction ne prenaient pas en compte les condensables ou très mal. Le recours aux procédures d'ajustement en cas de non-respect des engagements devrait être possible, compte tenu des changements méthodologiques.

Toutes choses étant égales par ailleurs, la proportion de la contribution du bois domestique aux émissions de $PM_{2,5}$ totales nationales serait affectée de la façon suivante :

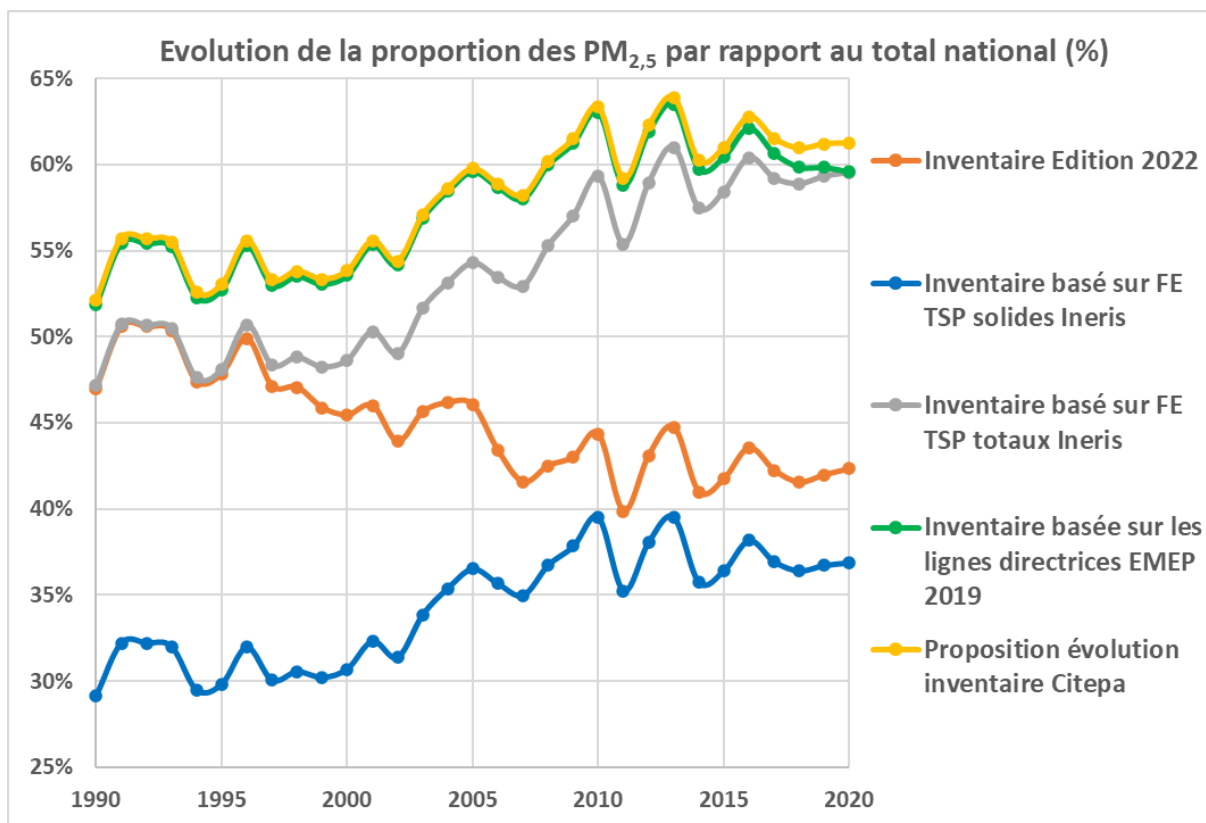


Figure 11 : Evolution de la proportion des PM_{2,5} liée à la combustion du bois dans le secteur résidentiel par rapport au total national selon plusieurs méthodologies de calculs

Ces évolutions méthodologiques amèneraient à augmenter la part des émissions en PM_{2,5} du bois domestique par rapport au total national de la façon suivante : En 2020, elles passeraient dans la proposition GCIIE de 42 % à 61 %.

De plus, la tendance de cette proportion sur la période 1990-2020 devient croissante alors qu'elle était décroissante dans la dernière édition de l'inventaire. Elle se stabilise sur la période 2010-2020.

4 Conclusion

Cette note a permis d'effectuer un travail approfondi sur l'état des connaissances en matière d'émissions de particules incluant les condensables issues des équipements domestiques de chauffage au bois. Ainsi, l'Ineris, a proposé une nouvelle classification des appareils, et des niveaux d'émission associés, pouvant être intégrée dans l'inventaire national des émissions géré par le Citepa. Cette proposition est basée sur les facteurs d'émission (FE) de particules incluant les condensables, qu'il a déterminés ces quinze dernières années, en conditions proches des usages réels, sur différentes générations d'appareils utilisés en France. La nouvelle classification, présentée ci-après repose à la fois sur la prise en compte de la fraction condensable dans les facteurs d'émissions et sur la description de quatre catégories d'appareils jugées plus représentatives du parc actuel que la classification Citepa :

- Appareils conventionnels (<2005),
- Appareils performants 1 - FV4* à FV5* (2005 – 2015),
- Appareils performants 2 – FV5* à FV7* (2015 – 2021),
- Appareils avancés, Eco-Design - FV7* (à partir de 2022).

Catégories FE TSP (g/GJ)	TNO (Klimont et al. 2002)	Guidebook EMEP 2019	Citepa (classification nationale actuelle)	Proposition de la nouvelle classification nationale <i>solide+condensable</i>
No Control	Traditional 519	Conventional 800	Anciens (< 1996) 651	Conventionnels (<2005) 590
		High-Efficiency 400	Nouveaux (> 1996) 242	
Improved	Improved 192		Performants 1 - FV4* à FV5* (2005 – 2015) 417	
			Performants 2 – FV5* à FV7* (2015 – 2021) 282	
New	New 103	Advanced 100		Avancés, Eco-Design - FV7* (à partir de 2022) 128 (cf. 5.2)

Cette classification datant de 2022 a été complétée par une proposition de catégorisation des poêles à granulés, et de mise à jour du facteur d'émission pour les poêles à bûches avancés sur la base des données des projets EPOCHAG et PerfPAG (cf. annexe 5.2).

Les différentes évolutions méthodologiques proposées par l'Ineris et les travaux du Citepa pour mieux les prendre en compte et donc améliorer l'inventaire des émissions, permettent à la fois :

- De mieux catégoriser les différents appareils de chauffage domestique au bois et leurs performances, en liant leurs performances de façon plus adaptée aux évolutions techniques liées notamment à la mise en place du label Flamme Verte qui caractérise en France l'amélioration technologique des appareils depuis de nombreuses années et ceux, jusqu'en 2022 au moins (à partir de 2022, les valeurs limites du règlement 1185/2015 deviennent le minimum à respecter dans le label). En effet, les catégories utilisées jusqu'à présent dans l'inventaire ne correspondaient qu'imparfaitement aux améliorations techniques apportées au fil de l'évolution du label et des techniques de combustion associées.
- D'améliorer la connaissance des émissions de particules de ces appareils (en lien avec la labellisation Flamme verte) à partir de plusieurs études réalisées par l'Ineris sur des appareils présents en France et caractéristiques de ce parc français et prenant en compte les émissions des condensables.

Le travail a permis d'homogénéiser la prise en compte des condensables dans les émissions particulières pour l'ensemble des types d'appareils et au fur et à mesure de leurs améliorations techniques.

L'impact de cette mise à jour méthodologique qui est de deux natures différentes, évolution du parc et choix des facteurs d'émission a été évalué par le Citepa. Pour le choix des FE, quatre ensembles ont été testés :

- 1) FE de particules solides et condensables provenant de la méthode Tier 2 du guide EMEP/EEA 2019,
- 2) FE de particules solides issus des études de l'Ineris,
- 3) FE de particules solides et condensables issus des études de l'Ineris,
- 4) FE de particules solides et condensables issus des études de l'Ineris à l'exception des poêles et inserts anciens pour lesquels on utilise un FE issu du Guide EMEP/EEA 2019.

Cette étude d'impact a montré que la mise à jour méthodologique ne remet pas en cause l'atteinte des objectifs du PREPA pour les PM_{2,5} en 2020 par rapport à 2005, quel que soit l'ensemble de FE choisi. Le Citepa a présenté ces choix méthodologiques basé sur l'ensemble de FE 4) au GCIE (Groupe de Concertation et d'Information sur les Inventaires d'Émissions) en octobre 2022 pour validation.

Les suites et perspectives de ce travail concernent :

- Un exercice d'estimation en cours pour une projection à 2030 afin d'éclairer la question de l'atteinte des engagements du PREPA mais aussi des objectifs du plan bois ;
- L'intégration des FE et catégories des appareils commercialisés à partir de 2022 et des poêles à granulés proposés en annexe 5.2 ;
- Une réflexion identique pour les chaudières (bûches, plaquettes et granulés) ;
- Une réflexion sur la transposition de ce travail à d'autres polluants émis par les appareils de chauffage résidentiel au bois tels que CO, NOx, COVT, CH₄, HAP (dont B(a)P) et Black Carbon ;
- D'autres pistes d'améliorations méthodologiques restant encore à explorer, notamment les évolutions depuis 1990 des pratiques d'usages de ces appareils et leurs impacts sur les émissions de particules (allure réduite, allure nominale notamment). Des modifications des hypothèses d'allures prises dans cette note pourraient permettre une première approche de leur prise en compte dans les futures éditions des inventaires et notamment être en mesure de mieux estimer l'impact que pourraient avoir les campagnes d'information sur la pratique d'une combustion mieux maîtrisée.

5 Annexes

5.1 Facteurs d'émissions d'autres polluants issus du chauffage domestique au bois.

Polluants	CO	CO ₂	NO _x	COVT	CH ₄	HAP (8 éléments)	Benzo (a) pyrène	BC
Unités	g/GJ	kg/GJ	g eq. NO ₂ /GJ	g eq. C/GJ	g/GJ	mg/GJ	mg/GJ	g/GJ
CHAMPROBOIS 2013^a (FV4* et FV5*) = Appareils performants1								
AN	2832	-	62	-	-	1400	-	-
AR	3800	-	39	-	-	486	-	-
AFAC 2015^b (FV4* et FV5*) = Appareils performants2								
AN	2944	93	60	547	192	685	64	17
AR	4256	90	49	1002	255	377	37	10
IDENTECH 2016^c (FV5* à FV7*) = Appareils Avancés								
AN	2099	95	69	389	145	-	-	37
AR	2023	93	55	426	157	-	-	28
ERFI 2016^d (Foyer ouvert)								
AN (Pleine charge)	4704	93	93	1618	-	-	-	-
AR (Charge partielle)	5074	92	99	1584	-	-	-	-
ERFI 2016^d (Poêle ancien) = Appareils Anciens/Conventionnels								
AN	2652	93	74	233	-	-	-	-
AR	3514	92	68	553	-	-	-	-
CARVE 2019^e (poêles anciens < 2005 renouvelés par FV7*) = Appareils Anciens renouvelés en Avancés (Eco-Design FV7*)								
AN+AR (avant renouvellement)	3635	-	-	-	-	-	-	-
AN+AR (après renouvellement)	2188	-	-	-	-	-	-	-

a : FE moyens calculés à partir des 2 appareils testés (1 appareil FV4* et 1 appareil FV5*).

b : FE moyens calculés à partir des 4 appareils testés (4 appareils : 2 FV4* et 2 FV5*).

c : FE moyens calculés à partir des 4 appareils testés (Scan, Supra, Chazelles et Quadra-Fire).

d : FE moyens calculés à partir des émissions d'un foyer ouvert et d'un poêle ancien en amont des systèmes de filtration testés

e : Valeurs moyens des FE du CO sans différenciation des allures avant et après renouvellement des appareils anciens.

5.2 Proposition de mise à jour des facteurs d'émission des poêles à granulés et des poêles éco-conçus

Au moment de la rédaction de la présente note, en 2022, les données disponibles sur les appareils à granulés et sur les appareils à bûches les plus performants (avancés éco-design) étaient insuffisantes, ce qui rendait nécessaire une mise à jour ultérieure des facteurs d'émission pour ces deux catégories.

Poêles à granulés

Ces appareils figurent parmi les plus performants du marché, tant du point de vue énergétique qu'environnemental. Des rendements élevés sont régulièrement atteints, allant jusqu'à environ 85% (mesurés sur toute une saison de chauffe, PerfPAG 2022) à 88% (mesures ponctuelles in situ, Carve 2019), grâce à un mélange efficace et un bon ratio entre l'air comburant et le combustible, à la petite taille des granulés qui facilite la circulation de l'air, et à l'alimentation automatique en combustible.

Les poêles à granulés offrent généralement cinq niveaux de puissance, ajustés en fonction de la quantité de combustible introduite dans la chambre. À chaque niveau, la quantité d'air (préétablie par le fabricant) est ajustée en fonction de la nouvelle quantité de combustible pour éviter les excès d'air trop importants qui pourraient altérer la qualité de la combustion. Cet ajustement est parfois perfectible (PerfPAG 2022).

L'utilisateur peut utiliser son poêle en mode manuel, allumant et éteignant l'appareil à sa guise, ou en mode automatique, sans intervention. Dans ce dernier cas, l'utilisateur programme simplement la température souhaitée et règle éventuellement le niveau de puissance de l'appareil (cette dernière opération est plus souvent effectuée par l'installateur).

En conditions réelles d'utilisation, les appareils présentent généralement des niveaux de polluants relativement bas (PerfPAG 2022). Cependant, pour certains d'entre eux, les émissions augmentent significativement à faible puissance (qui correspond généralement à 30% de la puissance nominale) et le rendement diminue d'environ 5 points, ce qui souligne une gestion moins efficace de l'apport en air à cette puissance (caractérisé par un excès d'air trop important). À faible allure, la fréquence d'introduction des granulés dans le creuset est plus longue ce qui rend la combustion plus instable et plus difficile à contrôler.

L'amélioration des performances des appareils à granulés peut s'avérer difficile à quantifier précisément au cours des deux dernières décennies, car elle est étroitement liée à l'évolution simultanée de la qualité des granulés pendant cette période.

Étant donné la rareté des poêles à granulés dans le parc d'appareils de chauffage domestique avant 2015, et leur contribution limitée aux émissions nationales, seules deux catégories d'appareils sont proposées :

- Avant 2015 : ces appareils anciens peuvent se caractériser par des réglages d'air non optimisés, des périodes d'allumage et d'extinction très émissives. De nombreux appareils de cette catégorie ne fonctionnent qu'en mode marche/arrêt ;
- Après 2015 : ces appareils ont été conçus pour émettre peu de particules grâce à une meilleure prise en compte des performances environnementales.

Pour ces appareils, seuls quelques protocoles, tel que BeReal, prennent en compte les phases de transition entre les allures, l'allumage et l'extinction, qui sont généralement plus émissifs. Les facteurs d'émission sont le plus souvent déterminés à une ou plusieurs allures en régime stable de fonctionnement de l'appareil.

Les facteurs d'émission des poêles à granulés sont bien plus faibles que ceux des poêles à bûches. **Un facteur d'émission moyen de l'ordre de 32 mg/MJ peut ainsi être établi pour les appareils modernes.** Les valeurs les plus faibles sont observées lors des études les plus récentes (Epochag 2023, 20 mg/MJ). Il n'est pas observé une forte différence entre les appareils anciens (45 mg/MJ) et modernes (32 mg/MJ). Pourtant il est probable que la combustion de ces appareils ait été améliorée notamment à allure réduite ces dernières années mais les valeurs obtenues dans la littérature ne le mettent pas en évidence de manière flagrante. Il n'est pas exclu que compte tenu du faible nombre d'études, une sélection d'appareils plus ou moins représentatifs du parc lors de la réalisation d'études (des appareils haut de gamme étant souvent sélectionnés) biaise légèrement les résultats à ce niveau. La faible évolution des facteurs d'émission met également en évidence que des granulés de qualité sont

disponibles sur le marché depuis au moins une douzaine d'années. Des granulés de moindre qualité étant, bien entendu, à l'origine de plus fortes émissions.

Sur ces appareils, la combustion est relativement optimisée et la formation de matière organique est minimisée, ce qui fait considérablement chuter les facteurs d'émission en particules par rapport aux appareils à bûches. La proportion de composés inorganiques dans les particules peut ainsi atteindre plus de 50%. Le carbone suie représente généralement moins de 20% des émissions de particules mais peut augmenter significativement lorsque l'appareil dysfonctionne.

Poêles à bûches avancés/éco-conçus

Pour les appareils à bûches les plus récents, avancés éco-design, l'étude Epochag met en évidence que les facteurs d'émission de particules totales peuvent varier considérablement, de 43 à 565 g/GJ, en fonction de l'allure et de l'essence testé. **En se basant sur les résultats de cette étude ainsi que sur ceux du projet Identech, un facteur d'émission moyen de 206 g/GJ est estimé pour ces appareils (77g/GJ à allure nominale et 336 g/GJ à allure réduite).** Une valeur similaire a été obtenue par Skreiberg et al. (2023) lors d'essais réalisés selon la norme norvégienne (NS 3058).

Tableau 6 : facteurs d'émission en particules totales des poêles à granulés - données de la littérature (AN : allure nominale, AR : allure réduite, All : allumage, valeurs exprimées en mg/MJ d'énergie entrante).

Poêles à granulés	Allure	Combustible	PMT g/GJ	Références bibliographiques
ancien	All	granulés, 8%	9	Schmidl et al. 2011
	AN	granulés, 8%	8	
	AR	granulés, 8%	3	
ancien	AN, modulant	granulés, 8%	16	Boman et al. 2011
	AR, modulant	granulés, 8%	34	
ancien	AN, tout ou rien	granulés, 8%	23	
	AR, tout ou rien	granulés, 8%	40	
ancien	AN avec allumage	certifié, 7%	67	Ogzen et al. 2014
	AN avec allumage	non certifié, 7%	150	
ancien	All	résineux, 8%	92	Orasche et al. 2012
	AN	résineux, 8%	22	
ancien	AN	6%	27	Kistler et al. 2012
	AR	6%	17	
ancien	AN	<12%	108	Kindbom et al. 2016
	AR	<12%	164	
ancien	AN	granulés, 6-8%	32	Priestley et al. 2023
	AR	granulés, 6-8%	98	
ancien	AN		58	Win et al. 2014
	AI		45	
	AR		58	
ancien	AN	mélange, 8%	28	Vicente et al. 2015b
moderne (avec sonde Lambda)		résineux, <10%	12	Fachinger et al. 2017
		mélange, < 10%	19	
moderne	AN	sapin, 12%	17	Schmidt et al. 2018 (fraction solide)
	AN	hêtre, 9%	57	
	AN	chêne, 11%	49	
moderne (4 appareils)	BeReal	granulés, 8%	28	Klauser et al. 2018
	BeReal	granulés, 8%	33	
	BeReal	granulés, 8%	35	
	BeReal	granulés, 8%	38	
moderne (4 appareils)	similaire BeReal	mélange, 2-7%	58	Morin et al. 2022a
	similaire BeReal	mélange, 2-7%	37	
	similaire BeReal	mélange, 2-7%	26	
	similaire BeReal	mélange, 2-7%	50	
moderne	AN	commercial, 8%	46	Venturini et al. 2018
	AR	commercial, 8%	78	
moderne (19 appareils)	BeReal	résineux, 6%	12	PerfPAG 2022 (fraction solide)
	BeReal	mélange, 6%	15	
moderne (3 appareils)	AN	résineux, 7%	13	Epochag 2023
	AR (30%)	résineux, 7%	16	
	AN	résineux, 7%	16	
	AI (50%)	résineux, 7%	45	
	AN	résineux, 7%	15	
	AI (50%)	résineux, 7%	15	
Moy. générale			42	
Moy. ancien	Hors allumage		45	
Moy. moderne			32	

Bibliographie

- Boman C., Pettersson E., Westerholm R., Boström D., Nordin A. (2011). Stove Performance and Emission Characteristics in Residential Wood Log and Pellet Combustion, Part 1: Pellet Stoves. *Energy & Fuels* 25, 307-314.
- Epochag (2023). Émissions primaires et secondaires de particules par des appareils de chauffage domestique à granulés. Ouvrage disponible en ligne : <https://librairie.ademe.fr/>.
- Fachinger F., Drewnick F., Gieré R., Borrmann S. (2017). How the user can influence particulate emissions from residential wood and pellet stoves: emission factors for different fuels and burning conditions. *Atmos. Environ.* 158, 216-226.
- Identech (2016). Ineris : DRC-16-135957-02814A.
- Kindbom K., Mawdsley I., Nielsen O.-K., Saarinen K., Jonsson K., Aesestad K. (2016). Emission factors for Short Lived Climate Pollutants (SLCP) emissions from residential wood combustion in the Nordic countries. Nordic Council of Ministers, www.norden.org/nordpub.
- Kistler M., Schmidl C., Padouvas E., Giebl H., Lohninger J., Ellinger, R., Bauer, H., Puxbaum, H. (2012). Odor, gaseous and PM₁₀ emissions from small scale combustion of wood types indigenous to central Europe. *Atmos. Environ.* 51, 86-93.
- Klauser F., Carlon E., Kistler M., Schmidl C., Schwabl M., Sturmlechner R., et al. (2018). Emission characterization of modern wood stoves under real-life oriented operating condition. *Atmos. Environ.* 192, 257-66.
- Morin B., Allen G., Marin A., Rector L., Ahmadi M. (2022). Impacts of wood species and moisture content on emissions from residential wood heaters. *Journal of the Air & Waste Management Association* 72, 7, 647-661. DOI:10.1080/10962247.2022.2056660.
- Orasche J., Seidel T., Hartmann H., Schnelle-Kreis J., Chow J.C., Ruppert H., Zimmermann R. (2012). Comparison of emissions from wood combustion. Part 1: emission factors and characteristics from different small-scale residential heating appliances considering particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH)-Related toxicological potential of particle-bound organic species. *Energy Fuels* 26, 6695-6704.
- Ozgen S., Caserini S., Galante S., Giugliano M., Angelino E., Marongiu A., Hugony F., Migliavacca G., Morreale C. (2014). Emission factors from small scale appliances burning wood and pellets. *Atmos. Environ.* 94, 144-153.
- PerfPAG (2022). Performances réelles de poêles à granulés. Campagnes de mesure in situ des performances énergétiques et environnementales. Ouvrage disponible en ligne : <https://librairie.ademe.fr/>.
- Priestley M., Kong X., Pei X., Hammes J., Bäckström D., Pathak R., Pettersson J., Hallquist M. (2023). Pros and cons of wood and pellet stoves for residential heating from an emissions perspective. *Environmental Science: atmospheres*, 3, 717.
- Schmidl C., Luisser M., Padouvas E., Lasselsberger L., Rzaca, M., Ramirez-Santa Cruz C., Handler M., Peng G., Bauer H., Puxbaum H. (2011). Particulate and gaseous emissions from manually and automatically fired small scale combustion systems. *Atmos. Environ.* 45, 7443-7454.
- Schmidt G., Trouvé G., Leyssens G., Schönnenbeck C., Genevray P., Cazier F., Dewaele D., Vandembilcke C., Faivre E., Denance Y., Le Dreff-Lorimier C. (2018). Wood washing: Influence on gaseous and particulate emissions during wood combustion in a domestic pellet stove. *Fuel Processing Technology* 174, 104-117. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.02.020>.
- Skreiberg O., Seljeskog M., Kausch F., Khalil R. (2023). Emission Levels and Emission Factors for Modern Wood Stoves. *Chemical Engineering Transactions* Vol. 105.
- Venturini E., Vassura I., Agostini F., Pizzi A., Toscano G., Passarini F. (2018). Effect of Fuel Quality Classes on the Emissions of a Residential Wood Pellet Stove. *Fuel* 211, 269-77, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.09.017>.

Vicente E.D., Duarte M.A., Tarelho L.A, Nunes T.F., Amato F., Querol X., Colombi C., Gianelle V., Alves C.A. (2015). Particulate and gaseous emissions from the combustion of different biofuels in a pellet stove. *Atmos. Environ.* 120, 15-27, 10.1016/j.atmosenv.2015.08.067.

Win K.M., Persson T. (2014). Emissions from residential wood pellet boilers and stove characterized into start-up, steady operation, and stop emissions. *Energy & Fuels* 28(4), 2496-2505.

