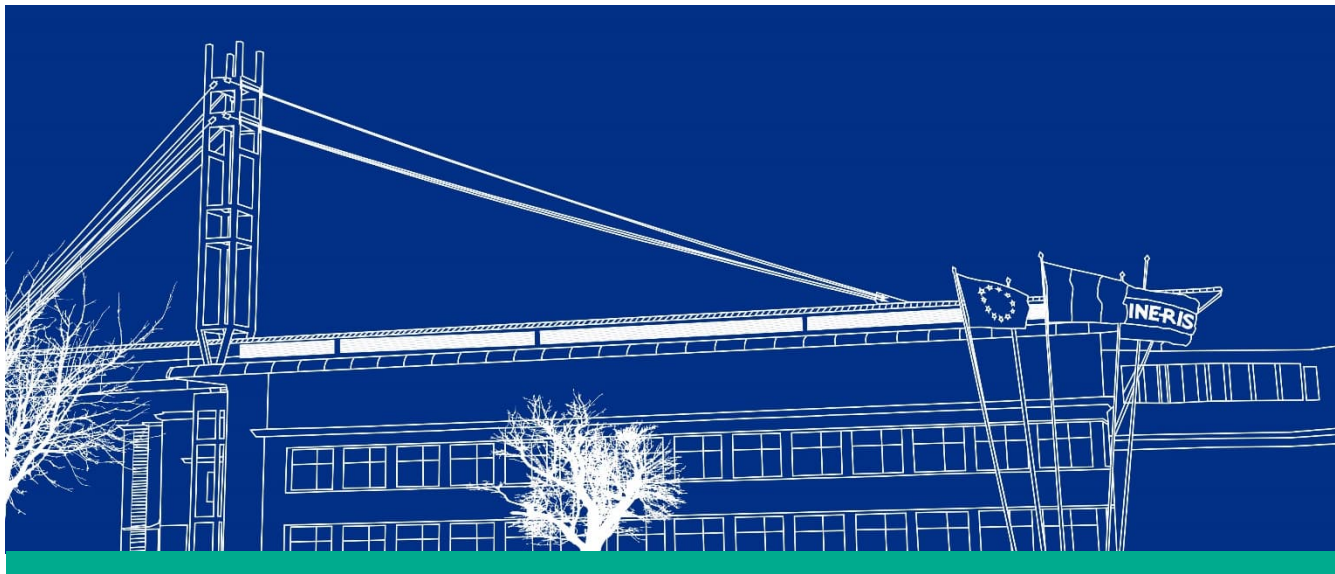




(ID Modèle = 454913)

Ineris - 227377 - 2796527 - v1.0

06/12/2024

Etude des teneurs en dioxines/furanes et en polychlorobiphényles de type dioxine dans les cendres et les suies des installations de chauffage domestique ainsi que dans les cendres volantes des unités biomasse

Etude répondant au considérant 5 du règlement sur les Polluants Organiques Persistants (POPs)

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 équivalent 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 SITES ET TERRITOIRES

Rédaction : WOLANIN Julie

Vérification : COLLET SERGE

Approbation : DUPLANTIER STEPHANE - le 06/12/2024

Liste des personnes ayant participé à l'étude : Pauline MOLINA, Céline DUPUIS, Les Ramoneurs Girondins, Hérisson 67, Âtre services ramonage, La Centrale des Ramoneurs.

Table des matières

Glossaire	7
1 Introduction	8
2 Contexte de l'étude	9
2.1 Le règlement POP	9
2.2 Substances préoccupantes concernées par l'étude	9
2.2.1 Les dioxines/furanes (PCDD/F)	9
2.2.2 Les PCB de type dioxine (PCB-dl)	10
2.3 Contexte de l'étude	10
3 Définition des combustibles considérés dans cette étude et des résidus générés lors de leur combustion	12
3.1 Les combustibles	12
3.1.1 La biomasse	12
3.1.2 Le bois	13
3.1.3 Le charbon	14
3.1.4 Le fioul domestique	14
3.2 Les résidus de combustion	14
3.2.1 Les cendres	14
3.2.2 Les suies	14
4 La combustion en foyer domestique	16
4.1 La combustion du bois	16
4.2 Émissions de polluants liés à la combustion du bois	17
4.3 Paramètres de combustion influençant les émissions de polluants	18
4.3.1 Qualité du bois	18
4.3.2 Caractéristiques des appareils	19
4.3.3 Conditions de combustion et modes d'utilisation	20
4.4 Conditions de fonctionnement, performances des appareils domestiques et répartition sur le territoire national	21
5 La combustion dans les unités alimentées avec de la biomasse	24
6 Conditions de formation des PCDD/F et des PCB-dl	27
6.1 Conditions de formation des dioxines/furanes (PCDD/F)	27
6.1.1 Émissions dans l'air	27
6.1.2 Synthèse des dioxines	27
6.1.3 Origine du chlore dans la biomasse et plus particulièrement le bois	28
6.2 Conditions de formation des PCB de type dioxines (PCB-dl)	30
6.3 Synthèse des principaux paramètres à considérer pour la présente étude	31
7 Synthèse des données bibliographiques déjà disponibles	32
7.1 Préambule : méthodes de calcul des concentrations des substances visées	32
7.2 Cendres et suies des installations de chauffage domestique	32
7.3 Cendres volantes des installations biomasses	35
7.4 Conclusion de la synthèse bibliographique	40
8 Campagne nationale en France métropolitaine au niveau des installations de chauffage domestique au bois	41

8.1	Description des échantillons collectés.....	41
8.2	Résultats d'analyse	43
8.2.1	Informations générales sur la méthode d'analyse	43
8.2.2	Qualité des mesurages	43
8.2.3	Échantillons résultant d'une combustion maîtrisée	44
8.2.4	Résultats sur les échantillons de cendres des installations domestiques.....	44
8.2.5	Résultats sur les échantillons de suies des installations domestiques	45
8.2.6	Echantillons mix	46
8.2.7	Echantillons de cendres composites.....	47
8.2.8	Sommes des dioxines sans facteurs TEF	47
8.2.9	Données par congénères pour les échantillons les plus émetteurs	49
8.3	Synthèse et interprétation des données	52
9	Conclusion	54
10	Références.....	56
11	Annexes	60

Table des figures

Figure 1 : Structures chimiques des PCDD/F et PCB-dl.....	10
Figure 2 : Typologie des combustibles biomasse (source : http://www.ragt-energie.fr)	13
Figure 3 : La combustion de bois (extrait de [Brandelet, B. (2016)])	17
Figure 4 : Répartition des essences de bois dans la forêt française métropolitaine	18
Figure 5 : Répartition des volumes des bûches par grandes régions en 2017 [extrait de ADEME (2018)]	19
Figure 6 : Évolution de la répartition des différents types d'appareils de chauffage domestique au bois dans le parc français [extrait de Citepa (2023)].....	23
Figure 7 : Schéma d'une installation alimentée avec de la biomasse [source : Les centrales biomasse : fonctionnement, avantages et inconvénients Be Atex (be-atex.com)].....	24
Figure 8 : Informations concernant les 55 échantillons de cendres collectées a) répartition géographique b) répartition en nombre par type de foyer.....	41
Figure 9 : Informations concernant les 96 échantillons de suies collectées a) répartition géographique b) répartition en nombre par type de foyer.....	42
Figure 10 : Répartition des appareils de chauffage domestique au bois en 2021 (source : Panorama Chaleur Renouvelable)	42
Figure 11 : Répartition des valeurs des PCDD/F (en vert) et PCB-dl (en rouge) en TOTAL TEQ WHO-2005 pour les échantillons de cendres	44
Figure 12 : Répartition des valeurs des sommes des dioxines/furanes des échantillons de cendres par gamme de valeurs et par type de foyer.....	45
Figure 13 : Répartition des valeurs des sommes des PCDD/F (en vert) et PCB-dl (en rouge) en TOTAL TEQ WHO-2005 pour les échantillons de suies	45
Figure 14 : Répartition des valeurs des sommes des dioxines/furanes des échantillons de suies par gamme de valeurs et par type de foyer.....	46
Figure 15 : Sommes des PCDD/F en TOTAL TEQ WHO-2005 pour les cinq échantillons de cendres composites	47
Figure 16 : Somme des dioxines (en rouge) et des furanes (en bleu) sans facteurs de pondération pour les échantillons de suies et de cendres en provenance de poêles à granulés	48
Figure 17 : Somme des dioxines (en rouge) et des furanes (en bleu) sans facteurs de pondération pour les échantillons de suies en provenance de foyers fermés/insert a) 8 échantillons ayant plus de furanes que de dioxines b) 22 échantillons ayant plus de dioxines que de furanes – un échantillon (n° 228) a été retiré de cette figure en raison d'une teneur trop importante en dioxines qui aurait écrasé tous les autres échantillons.....	48

Figure 18 Somme des dioxines (en rouge) et des furanes (en bleu) sans facteurs de pondération pour les échantillons en provenance de foyers ouverts a) échantillons de suies (échantillon 223 retiré afin d'éviter un écrasement des autres histogrammes) b) échantillons de cendres (échantillon 214 retiré)	49
Figure 19 : Profils de concentrations par congénères PCDD (dioxines) pour les échantillons de suies ayant des concentrations en PCDD/F comprises entre 100 et 500 ng/kg	50
Figure 20 : Profils de concentrations par congénères PCDF (furanes) pour les échantillons de suies ayant des concentrations en PCDD/F comprises entre 100 et 500 ng/kg	50
Figure 21 : Profils de concentrations par congénères PCDD (dioxines) pour les échantillons de suies ayant des concentrations en PCDD/F comprises entre 500 et 1 000 ng/kg	50
Figure 22 : Profils de concentrations par congénères PCDF (furanes) pour les échantillons de suies ayant des concentrations en PCDD/F comprises entre 500 et 1 000 ng/kg	51
Figure 23 : Profils de concentrations par congénères PCDD (dioxines) pour les échantillons de suies ayant des concentrations en PCDD/F comprises entre 1 000 et 5 000 ng/kg	51
Figure 24 : Profils de concentrations par congénères PCDF (furanes) pour les échantillons de suies ayant des concentrations en PCDD/F comprises entre 1 000 et 5 000 ng/kg	51
Figure 25 : Echantillon n° 257.	63
Figure 26 : Echantillon n°258.	63
Figure 27 : Echantillon n°259.	64
Figure 28 : Echantillon n°260.	64
Figure 29 : Echantillon n°261.	64

Table des illustrations

Tableau 1 : Caractéristiques de certaines biomasses [Rogaume (2009)]	12
Tableau 2 : Synthèse des appareils de combustion domestique en lien avec leur performance énergétique [Ademe (2016)]. Les lignes grisées correspondent aux rendements énergétiques les plus faibles.	22
Tableau 3 : Régimes ICPE possibles des centrales biomasse. Les différents régimes de classement sont : régime d'autorisation (A), d'enregistrement (E), de déclaration (D, et un C peut être ajouté si l'installation est soumise au contrôle périodique par organisme agréé)	25
Tableau 4 : Synthèse des données disponibles sur les teneurs en dioxines/furanes dans les cendres des installations domestiques. Les valeurs supérieures au nouveau seuil du règlement POP sont indiquées en rouge.	32
Tableau 5 : Synthèse des données disponibles sur les teneurs en dioxines/furanes dans les suies des installations domestiques. Les valeurs supérieures au nouveau seuil du règlement POP sont indiquées en rouge.	33
Tableau 6 : Synthèse des données disponibles sur les teneurs en dioxines/furanes dans les cendres des installations biomasses. Les lignes grisées correspondent aux études françaises. Les valeurs supérieures au nouveau seuil du règlement POP sont indiquées en rouge.	35
Tableau 7 : Incertitudes analytiques	43
Tableau 8 : Échantillons de suies et de cendres résultant d'une combustion maîtrisée. Expression des résultats sur Produit Brut (PB).	44
Tableau 9 : Sommes des PCDD/F et PCB-dl en TOTAL TEQ WHO-2005 pour les trois échantillons mix	46
Tableau 10 : Facteurs d'équivalence toxique (FET) pour les PCDD, PCDF et PCB-dl en fonction de la nomenclature utilisée	61

Résumé

Le règlement sur les Polluants Organiques Persistants (POP) a été révisé en 2022. Dans l'annexe IV, la ligne relative aux dioxines/furanes (PCDD/F) inclut ainsi les PCB de type dioxine (PCB-dl) et leur teneur seuil dans les déchets a été abaissée de 15 à 5 µg/kg. Les cendres et les suies issues des installations de chauffage des foyers domestiques ainsi que les cendres volantes issues des unités biomasse pour la production de chaleur et d'électricité sont des flux de déchets qui pourraient être impactés par l'abaissement de cette valeur seuil. Chaque état membre doit donc collecter des données sur son territoire national afin de statuer sur le caractère POP ou non de ces déchets.

Concernant les cendres et les suies des installations de chauffage domestiques, les données issues de la littérature ont été jugées insuffisantes et des échantillons ont été collectés sur le territoire national. 55 échantillons de cendres, 96 échantillons de suies ainsi que 3 échantillons issus de cuves d'aspirateurs des ramoneurs ont ainsi été collectés. Tous les types de foyer ont été concernés par cette campagne. Au regard des valeurs des sommes des PCDD/F mesurées dans les 55 échantillons de cendres collectés, aucun des échantillons n'est classé POP (valeurs inférieures à 5 µg/kg PB) et seulement 2% des échantillons ont des teneurs en dioxines/furanes > 0,5 µg/kg PB. Parmi les 96 échantillons de suies collectés, un seul échantillon est classé POP (valeur supérieure à 5 µg/kg PB). Par ailleurs, 15% des échantillons de suies (soit 14 échantillons) ont une teneur élevée en dioxines (> 0,5 µg/kg PB). Les teneurs en PCB-dl mesurées dans tous les échantillons sont très faibles et aucun enjeu de dangerosité n'est à considérer pour ces substances dans ces déchets. Sur la base des échantillons collectés et des analyses réalisées, les cendres et les suies issues des installations de chauffage domestique au bois ne sont donc pas des déchets POPs.

Pour les installations biomasse, un certain nombre de données récentes sur les teneurs en dioxines dans les cendres volantes sont disponibles dans la littérature. Ces données ont été jugées suffisantes et aucun échantillon de cendres volantes n'a donc été collecté. Au regard des valeurs présentées dans la littérature, les cendres volantes des installations biomasse ne sont pas des déchets POPs.

Abstract

The POPs (Persistent Organic Pollutants) Regulation has been revised in 2022. In Annex IV, the limit value in waste for polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDDs, dioxins) and polychlorinated dibenzofurans (PCDFs, furans) now includes dioxin-like polychlorinated biphenyls (dl-PCBs). Moreover, their threshold content in waste has been lowered from 15 to 5 µg/kg. Domestic burning soot and ashes, as well biomass power production fly ashes, are waste streams that could be impacted by the lowering of this threshold value. Members States must collect information on the presence of PCDD/PCDF and dl-PCBs in ashes and soot from private households and fly ashes from biomass units for heat and power production.

For domestic burning (of wood and coal) soot and ashes, due to lack of data, samples were collected all over France. A total of 55 ash samples, 96 soot samples and 3 samples from chimney sweep vacuum tanks were collected. All types of home burners were considered. With regard to total WHO-TEQ values measured in the 55 ash samples collected, none of the samples were classified as POPs waste (values below 5,000 ng/kg), and 2% of the samples had dioxin/furan levels > 500 ng/kg. Concerning the 96 soot samples collected, only one was classified as POPs waste (value above 5,000 ng/kg). Nevertheless, 15% of the soot samples (i.e. 14 samples) contained high levels of dioxins (> 500 ng/kg). PCB-dl levels measured in all samples were very low. Based on the samples collected and the analyses carried out, ash and soot from domestic wood burning are therefore not classified as POPs waste.

For biomass plants, a number of recent data on dioxin levels in fly ashes are available in the literature. These data were considered as sufficient and no fly ash samples were collected. By considering the values presented in the literature, fly ash from biomass power plant are not considered as POPs waste.

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

Institut national de l'environnement industriel et des risques, Etude des teneurs en dioxines/furanes et en polychlorobiphényles de type dioxine dans les cendres et les suies des installations de chauffage domestique ainsi que dans les cendres volantes des unités biomasse, Verneuil-en-Halatte : Ineris - 227377 - v1.0, 06/12/2024.

Mots-clés :

Cendres, suies, dioxines, PCDD/F, PCB-dl, POP

Glossaire

ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
CIRC	Centre International de Recherche sur le Cancer
CIBE	Comité Interprofessionnel du Bois- Energie
COV	Composés Organiques Volatils
DDT	Dichlorodiphényltrichloroéthane
ETM	Éléments Trace Métalliques
FV	Flamme Verte
HAP	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
ICPE	Installations Classées pour la Protection de l'Environnement
IPCS	Programme International sur la Sécurité Chimique
LECES	Laboratoire d'Etudes et de Contrôle de l'Environnement Sidérurgique
MS	Matière Sèche
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
OTAN	Organisation du Traité de l'Atlantique Nord
PB	Produit Brut
PCB	Polychlorobiphényles
PCB-dl	Polychlorobiphényles de type dioxine
PCDD/F	Substances polychlorodibenzo-p-dioxines et dibenzofuranes
PCP	Pentachlorophénol
PCS	Pouvoir calorifique
PE	Polyéthylène
POP	Polluants Organiques Persistants
PVC	PolyChlorure de Vinyle
TCDD	2,3,7,8-tétrachlorodibenzo-p-dioxine, surnommée dioxine de Seveso
TEF	Facteur d'Equivalence Toxique
TTCR	Taillis à Très Courte Rotation
VLE	Valeurs Limites d'Emission

1 Introduction

Ce rapport est réalisé dans le cadre de l'opération A du programme d'appui SIT-06 intitulée « Caractérisation des déchets ».

À la suite de la révision en 2022 du règlement sur les Polluants Organiques Persistants (POP)¹ par le règlement 2022/2400 du 23 novembre 2022², l'annexe IV relative aux substances polychlorodibenzo-p-dioxines et dibenzofuranes (PCDD/F) inclut désormais les polychlorobiphényles de type dioxine (PCB-dl). Les PCB de type dioxines sont les suivants : PCB 77, PCB 81, PCB 105, PCB 114, PCB 118, PCB 123, PCB 126, PCB 156, PCB 157, PCB 167, PCB 169 et PCB 189. De plus, leur teneur seuil dans les déchets passe de 15 à 5 µg/kg ($\sum_j(\text{PCDD}_j \times \text{TEF}_j) + \sum_j(\text{PCDF}_j \times \text{TEF}_j) + \sum_j(\text{PCB}_j \times \text{TEF}_j)$), avec les TEF (Facteurs d'Equivalence Toxiques) de la nomenclature WHO-TEQ (OMS).

Les cendres et les suies issues des installations de chauffage des foyers domestiques ainsi que les cendres volantes issues des unités biomasse pour la production de chaleur et d'électricité sont des flux de déchets qui pourraient être impactés par l'abaissement de cette valeur seuil. En application de l'article 1^{er} du règlement modificatif 2022/2400 du 23 novembre 2022 modifiant l'article 21bis du règlement POP, cette limite de 5 µg/kg leur sera applicable à partir du 1^{er} janvier 2024 pour les cendres volantes des unités biomasse et à partir du 1^{er} janvier 2025 pour les cendres et les suies des foyers domestiques.

Afin de préparer la mise en œuvre de ces dispositions et le cas échéant, établir des modes de gestion appropriés pour la collecte et le traitement de ces déchets, le considérant 5 du règlement modificatif 2022/2400 demande aux états membres de collecter des données sur leur territoire national sur les teneurs en PCDD/F et en PCB-dl mesurées dans les cendres et suies issues du chauffage domestique ainsi que dans les cendres volantes des unités biomasse. Ces données détermineront si ces flux de déchets sont en deçà ou non de cette limite de 5 µg/kg et, le cas échéant, permettront la mise en place d'une gestion adéquate de ces déchets (collecte séparée et traitement en conséquence) en fonction des résultats obtenus. Ces informations devront être disponibles au plus tard le 1^{er} juillet 2026.

La présence d'autres substances listées dans l'annexe IV du règlement POP est peu probable. Ainsi, dans cette étude, il est considéré que seules les PCDD/F et PCB-dl sont susceptibles de classer les cendres et les suies des installations domestiques ainsi que les cendres volantes des unités biomasse comme des déchets POPs.

¹ Règlement (UE) 2019/1021 du parlement européen et du conseil du 20 juin 2019 concernant les polluants organiques persistants

² Règlement (UE) 2022/2400 du parlement européen et du conseil du 23 novembre 2022 modifiant les annexes IV et V du règlement (UE) 2019/1021 concernant les polluants organiques persistants

2 Contexte de l'étude

2.1 Le règlement POP

D'après l'article 7 du règlement POP, les déchets qui sont constitués de substances figurant sur la liste de l'annexe IV du règlement POP, à des concentrations supérieures aux teneurs seuils indiquées, « *sont éliminés ou valorisés sans retard injustifié et conformément à l'annexe V, partie 1, du présent règlement de manière à ce que les POP qu'ils contiennent soient détruits ou irréversiblement transformés de telle sorte que les déchets et rejets restants ne présentent plus les caractéristiques de POP* »³.

Par ailleurs, en application de la décision 2014/955/UE⁴, les déchets POP présentant une teneur en PCDD/F excédant les limites de concentration indiquées à l'annexe IV du règlement POP ont également le statut de déchet dangereux.

2.2 Substances préoccupantes concernées par l'étude

2.2.1 Les dioxines/furanes (PCDD/F)

Le terme « dioxines » renvoie à deux familles de composés : les polychlorodibenzo-p-dioxines (PCDD) et les polychlorodibenzo-p-furanes (PCDF). Leurs structures chimiques sont présentées sur la Figure 1. Il existe actuellement 210 congénères identifiés et présents dans l'environnement. La position ainsi que le nombre de chlores associés aux cycles aromatiques sont propres à chacun des congénères. Les congénères chlorés en position latérale (2,3,7,8) sont les molécules les plus toxiques de cette famille de polluants. Dix-sept congénères considérés comme les plus toxiques (7 PCDD et 10 PCDF) sont aujourd'hui inscrits dans le règlement POP.

Les sept dioxines les plus toxiques sont les suivantes :

- 2,3,7,8-Tétra-ChloroDibenzoDioxine (2,3,7,8-TCDD),
- 1,2,3,7,8-Penta-ChloroDibenzoDioxine (1,2,3,7,8-PeCDD),
- 1,2,3,4,7,8-Hexa-ChloroDibenzoDioxine (1,2,3,4,7,8-HxCDD),
- 1,2,3,6,7,8-Hexa-ChloroDibenzoDioxine (1,2,3,6,7,8-HxCDD),
- 1,2,3,7,8,9-Hexa-ChloroDibenzoDioxine (1,2,3,7,8,9-HxCDD),
- 1,2,3,4,6,7,8-Hepta-ChloroDibenzoDioxine (1,2,3,4,6,7,8-HpCDD),
- Octa-ChloroDibenzoDioxine (OCDD).

La dioxine TCDD est la seule dioxine classée par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) comme substance « cancérogène pour l'homme », elle est considérée comme la plus toxique.

Les dix furanes les plus toxiques sont les suivantes :

- 2,3,7,8-Tétra-ChloroDibenzoFurane (2,3,7,8-TCDF),
- 1,2,3,7,8-Penta-ChloroDibenzoFurane (1,2,3,7,8-PeCDF),
- 2,3,4,7,8-Penta-ChloroDibenzoFurane (2,3,4,7,8-PeCDF),
- 1,2,3,4,7,8-Hexa-ChloroDibenzoFurane (1,2,3,4,7,8-HxCDF),
- 1,2,3,6,7,8-Hexa-ChloroDibenzoFurane (1,2,3,6,7,8-HxCDF),
- 2,3,4,6,7,8-Hexa-ChloroDibenzoFurane (2,3,4,6,7,8-HxCDF),
- 1,2,3,7,8,9-Hexa-ChloroDibenzoFurane (1,2,3,7,8,9-HxCDF),
- 1,2,3,4,6,7,8-Hepta-ChloroDibenzoFurane (1,2,3,4,6,7,8-HpCDF),
- 1,2,3,4,7,8,9-Hepta-ChloroDibenzoFurane (1,2,3,4,7,8,9-HpCDF),
- Octa-ChloroDibenzoFurane (OCDF).

³ Les opérations autorisées pour ce traitement sont listées dans la partie 1 de l'annexe V du règlement POP :

- Traitement physico-chimique (D9),
- Incinération à terre (D10),
- Utilisation principale comme combustible ou autre moyen de produire de l'énergie, à l'exclusion des déchets contenant des PCB (R1),
- Recyclage ou récupération des métaux et des composés métalliques, [...] (R4).

⁴ Décision de la Commission du 18 décembre 2014 modifiant la décision 2000/532/CE établissant la liste des déchets, conformément à la directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil

Ces substances sont très stables thermiquement, peu biodégradables, insolubles dans l'eau et présentent une forte affinité pour les graisses. Ainsi, elles vont s'accumuler dans les tissus graisseux et persister très longtemps [Afssa (2005)].

Dioxins and dioxin-like compounds (DLCs)



Figure 1 : Structures chimiques des PCDD/F et PCB-dl

2.2.2 Les PCB de type dioxine (PCB-dl)

Les polychlorobiphényles (PCB) sont des composés aromatiques chlorés. Leur structure chimique (Figure 1) est composée d'au moins un groupe biphényle pouvant comporter jusqu'à cinq atomes de chlore en substitution des hydrogènes [Afssa (2005)]. Il existe actuellement 209 congénères de PCB classés en deux catégories : les PCB de type dioxine (PCB dioxine-like ; PCB-dl) et les autres PCB (PCB Non dioxin-like ; PCB-ndl). Les PCB-dl ont une structure plane, similaire aux dioxines et ne représentent qu'une faible proportion (<10% des congénères) de la totalité des PCB. 12 PCB-dl sont évalués comme les plus toxiques pour la santé humaine et sont inscrits dans le règlement POP : 4 ortho (77, 81, 126 et 169) et 8 non-ortho (105, 114, 118, 123, 156, 157, 167 et 189).

Les dioxines (PCDD), les furanes (PCDF) et les PCB de type dioxine (PCB-dl) ont un mécanisme de toxicité proche (liaison avec les mêmes récepteurs cellulaires, récepteurs nommés Ah). Tout comme les dioxines, les PCB-dl sont très peu solubles dans l'eau et très solubles dans les graisses [Fiche PCB].

2.3 Contexte de l'étude

L'étude réalisée pour la Direction générale de l'environnement (Commission européenne) [European Commission, Directorate-General for Environment (2021)] en préparation au règlement modificatif 2022/2400 liste les principaux flux de déchets potentiellement impactés par les modifications du règlement POP (règlement 2022/2400 du 23 novembre 2022). Les cendres et suies issues des installations de chauffage des foyers domestiques ainsi que les cendres volantes issues de la production d'énergie à partir de la biomasse y sont identifiées.

Les cendres des foyers domestiques sont actuellement majoritairement éliminées avec les ordures ménagères et parfois, elles sont épandues dans les jardins par les particuliers (propriétés fertilisantes). Les suies collectées par les ramoneurs sont la plupart du temps acheminées en déchèteries (benne « tout venant »).

Pour les cendres volantes, une valorisation en agriculture est possible sous certaines conditions mais en pratique, peu respectent les seuils autorisés et la norme engrais (éléments fertilisants). En effet, les cendres volantes concentrent les éléments volatiles au cours de la combustion qui se condensent sous forme de fines particules. Elles sont donc plus concentrées en métaux lourds (plus généralement appelés Éléments Trace Métalliques ou ETM) et en éléments organiques (tels que les dioxines) que les cendres sous-foyer qui sont généralement épandues. Ainsi, elles peuvent suivre des filières de valorisation en amendement (amendements minéraux basiques), surtout lorsqu'elles sont mélangées aux autres cendres collectées (foyer, sous chaudière). Dans le cadre d'une collecte séparée, elles sont, en pratique et la plupart du temps, gérées comme des déchets dangereux en l'absence de caractérisation complémentaire. Ainsi, les cendres volantes de chaudières bois sont la plupart du temps non valorisées et plutôt enfouies dans des installations de stockage pour déchets dangereux [RECORD 14-0913/1A (2016)]. De plus, la gestion des cendres est différente en fonction du statut de l'installation et de sa puissance nominale totale (voir chapitre 5).

Cette étude vise à apporter des informations qui permettront d'anticiper les conséquences et impacts principaux (en termes de coûts et de bénéfices pour les opérateurs de gestion de déchets) d'un classement « déchets dangereux POP » de ces déchets. En effet, en plus de la mise en place d'une collecte séparée, ces flux de déchets seraient alors redirigés vers l'incinération pour déchets dangereux, vers la mise en décharge de déchets dangereux ou alors vers le stockage souterrain de déchets dangereux.

Cela entraînerait des conséquences non négligeables sur les coûts et les bénéfices des opérateurs de gestion de déchets et autres parties prenantes [Final report for DG Environment (2021)]. Les tonnages maximaux susceptibles d'être affectés sont :

- pour les suies et les cendres de bois domestique et de charbon : 36 000-145 000 t qui ne pourront plus être utilisés dans l'agriculture et 181 000-723 000 t qui iront en décharge (pour déchets dangereux) ou en stockage souterrain ;
- pour les cendres volantes et autres résidus de la production d'énergie à partir de la biomasse : 8 000-33 000 t qui ne pourront plus être utilisées dans l'agriculture, la construction ou les applications géotechniques et 27 000-110 000 t qui iront en décharge de produits dangereux ou en stockage souterrain.

3 Définition des combustibles considérés dans cette étude et des résidus générés lors de leur combustion

Les éléments principaux des combustibles d'origine biomasse ou fossile sont le carbone et l'hydrogène. La biomasse se différencie des combustibles fossiles par sa forte teneur en oxygène (~44% pour le bois en comparaison de 0,3% pour le pétrole ou de 1 à 10% pour le charbon) [Rogaume (2009)]. Cette caractéristique explique en partie les différences de pouvoir calorifique (PCS) observées entre ces différents combustibles : PCS⁵ d'environ 19 000 kJ.kg⁻¹ pour le bois, de l'ordre de 40 000 kJ.kg⁻¹ pour le pétrole et de 35 000 kJ.kg⁻¹ pour le charbon [Rogaume (2009)]. Enfin, les combustibles biomasses sont la plupart du temps humides, ce qui a un impact sur la qualité de la combustion, à contrario des combustibles fossiles dont l'humidité est très faible.

3.1 Les combustibles

3.1.1 La biomasse

- **Généralités :**

L'Article L211-2 du code de l'énergie définit la biomasse comme étant « *la fraction biodégradable des produits, des déchets et des résidus d'origine biologique provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales, de la sylviculture et des industries connexes, y compris la pêche et l'aquaculture, ainsi que la fraction biodégradable des déchets, notamment les déchets industriels ainsi que les déchets ménagers et assimilés lorsqu'ils sont d'origine biologique* ». La biomasse comprend ainsi toutes les matières organiques qui sont en mesure de libérer de l'énergie par combustion directe ou à la suite d'une étape de transformation. Ainsi elle comprend notamment les fractions biodégradables des déchets industriels tout comme le bois issu directement de la forêt. Il est important de noter que la rubrique 2910 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) fournit une définition différente de la biomasse qui est explicitée dans le chapitre 5.

Chaque type de biomasse possède des caractéristiques qui lui sont propres en termes d'humidité, de composition chimique, de pouvoir calorifique, ou de teneur en cendres (Tableau 1).

Tableau 1 : Caractéristiques de certaines biomasses [Rogaume (2009)]

Type de biomasse	PCS en kJ/kg	Taux de cendres (%)
épicéa	20 060	0,77
sapin	19 970	1,04
peuplier	20 290	1,36
paille de blé	18 100	6,40
graines de blé	18 150	7,27
colza	21 550	6,60

Différentes filières de valorisation énergétique de cette biomasse existent : la voie thermique (combustion, pyrolyse ou gazéification), la méthanisation ou encore la production de biocarburants. Dans les unités de production de chaleur et d'énergie (combustion), en plus de la biomasse forestière, de la biomasse dite résiduelle est également utilisée afin de la valoriser et de diversifier les intrants.

⁵ PCS : Pouvoir Calorifique Supérieur - le PCS correspond à la quantité totale de chaleur dégagée à volume constant par la combustion d'un kg ou d'un Nm³ du combustible, à pression atmosphérique (1,01325 bar).

- **Biomasse dans les installations industrielles**

La biomasse utilisée dans les installations industrielles peut être d'origine végétale ou animale et provenir des gisements de la filière bois, de la filière agricole, de la filière industrielle ou de cultures énergétiques (une représentation de ces différentes typologies est proposée sur la Figure 2) :

- Les ressources ligneuses : le bois issu de l'exploitation forestière (bûches, plaquettes, granulés) ainsi que les résidus de la récolte (petites branches, souches), le bois issu de l'exploitation agricole (ex : le bois issu de la taille des vignes), le bois issu des zones urbaines (ex : espaces verts) ainsi que le bois déchet (matériaux de conditionnement tels que les palettes, matériaux de l'ameublement et matériaux des chantiers de démolition)
- Les produits et sous-produits agricoles : cultures alimentaires (maïs, blé, colza, canne à sucre, palmier à huile) ; résidus agricoles (poussières de céréales, pailles, sarments, bois de taille, cannes de maïs, etc.), effluents d'élevage (fumiers, lisiers)
- Les cultures énergétiques dédiées : espèces herbacées pérennes (miscanthus, switchgrass, reed canary grass, etc), taillis à très courtes rotations (TTCR – saule, peuplier, robinier, eucalyptus), cultures céréalières annuelles (triticale, sorgho)
- Les produits et sous-produits industriels : déchets des industries de transformation du bois (écorces, copeaux, sciure, boues issues de la pâte à papier, liqueur noire), déchets des industries agroalimentaires (bagasse, marc de raisin, marc de café, pulpes, pépins, drèches)

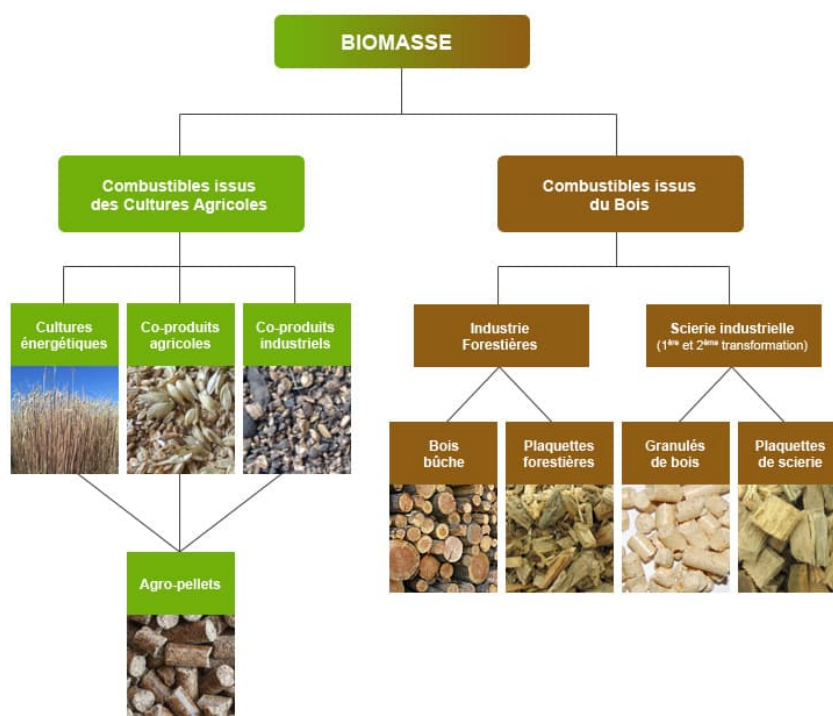


Figure 2 : Typologie des combustibles biomasse (source : <http://www.ragt-energie.fr>)

3.1.2 Le bois

Le bois est constitué de cellulose (40 à 50%), de lignine (23 à 33%) et d'hémicellulose (10 à 30%) ainsi que d'une faible proportion d'éléments inorganiques (<1%) [Rogaume (2009) ; Sawerysyn (2012)]. La teneur en éléments minéraux va dépendre des espèces (résineux ou feuillus), des essences de bois mais aussi de la quantité d'écorce présente. Ainsi, du bois sec naturel est composé principalement de carbone (~50%), d'oxygène (~44%) et d'hydrogène (~6%) [Rapport Ineris DRC-17-164787-08043A]. En très faible quantité, le bois contient également des composés azotés (0,04 à 0,96% sur sec), des composés soufrés (0,02%) ainsi que du chlore (0,001 à 0,03%) [Collet (2000)].

Le terme bois « naturel » renvoie à du bois présentant une teneur en polluants faible (sans ajouts, liés à un traitement ou autre par l'homme et sans contamination particulière liée à la pollution des sols ou par voie aérienne). La présence de chlore, ainsi que d'autres éléments métalliques, dans le bois (et

dans la biomasse de manière générale) va dépendre de leurs teneurs dans les sols, du facteur de transfert racinaire et de la pollution atmosphérique [Rapport Ineris DRC-12-126318-06147A-V2 (2013)].

Enfin, le bois n'est jamais complètement sec : il est constitué « d'eau de constitution » et « d'eau libre ». L'humidité du bois est comprise entre 5% pour un bois dit « sec » et 70% pour un bois dit « humide ». Un bois sera qualifié de « sec » s'il contient moins de 12% d'eau (en poids) [Collet (2000)].

3.1.3 Le charbon

En fonction des types de charbon (tourbe, lignite, houille) et de ses caractéristiques (gisements, origine, conditions de formation), les concentrations en éléments inorganiques sont plus ou moins importantes. L'anhracite (houille), composée à plus de 90% de carbone avec une faible humidité < 5%, est le charbon principalement utilisé pour le chauffage domestique⁶. Malgré son pouvoir calorifique élevée et son faible coût, sa combustion génère dans l'atmosphère des quantités non négligeables de soufre, d'oxyde d'azote et de gaz à effet de serre.

3.1.4 Le fioul domestique

Le fioul est un combustible liquide issu du raffinage du pétrole, plus spécifiquement des coupes moyennes du pétrole non pures (fractions de C16 à C17 à C18). Sa composition chimique moyenne est la suivante : ~ 86,5% de carbone, 13,3% d'hydrogène, < 0,2% de soufre, entre 50 et 400 ppm d'azote⁷. Il peut y avoir aussi < 0,1% de sédiments et < 0,5% de résidus divers. Un certain nombre d'additifs (antigel, antioxydant, etc.) peuvent y être ajoutés afin d'améliorer ses propriétés. Ainsi, la composition du fioul domestique varie fortement en fonction de l'origine du pétrole raffiné (hydrocarbures d'origine minérale ou de synthèse) ainsi que de la formulation du mélange final. Le chauffage domestique au fioul contribue grandement à la pollution de l'air et à l'émission de gaz à effet de serre. Le fioul va essentiellement produire des suies lors de sa combustion.

3.2 Les résidus de combustion

Lors de la combustion de biomasse ou de charbon, deux types de résidus peuvent se former : des résidus incombustibles (cendres) et des résidus combustibles qui n'ont pas brûlés (suies).

3.2.1 Les cendres

Les cendres proviennent de la matière inorganique non combustible, initialement présente dans la biomasse ou le charbon introduit dans le foyer et sont générées quel que soit la qualité de la combustion (complète ou incomplète). Il s'agit d'un résidu solide grisâtre.

De manière générale, la biomasse contient les éléments inorganiques suivants qui vont se retrouver dans les cendres :

- des éléments non volatils : calcium (Ca), magnésium (Mg), aluminium (Al), etc.
- des éléments volatils : sodium (Na), potassium (K), soufre (S), chlore (Cl)
- des métaux lourds volatils : zinc (Zn), cadmium (Cd), plomb (Pb), etc.

Ces éléments minéraux sont retrouvés dans les cendres sous formes de sels ou d'oxydes [Académie d'Agriculture de France (2015)].

De manière plus spécifique, les cendres volantes (particules fines de taille moyenne de 10 µm) sont distinguées des cendres sous-foyer et renvoient aux cendres récupérées au niveau des équipements d'épuration des fumées (cendres recueillies sous cyclone et sous filtre) et aux poussières émises à l'atmosphère, dans les installations alimentées avec de la biomasse.

3.2.2 Les suies

La suie est un résidu solide carboné (50 à 70% de carbone suie) de couleur noire formé lors de la combustion incomplète de la biomasse ou des hydrocarbures fossiles. En effet, une combustion complète n'engendre que des cendres, pas de suies. Ainsi, la suie est un terme générique représentant

⁶ La teneur en carbone du charbon va augmenter avec son ancienneté (sa formation).

⁷ Source : La composition du fioul domestique - Proxi-TotalEnergies

les émissions carbonées réfractaires émises par les processus de combustion [DRC-17-164787-10342A (2018)]. Ces suies font partie des particules fines $PM_{2,5}$ (de diamètre inférieur à 2,5 μm , les particules de suies font 50 nm de diamètre environ mais elles s'agglomèrent entre elles pour former des amas de plus grandes tailles qui restent très souvent < 1 μm).

Durant les phénomènes de combustion, une partie des suies est rejetée dans l'environnement via les fumées de combustion et une autre partie est déposée dans les parois des conduits des installations (formation dans les zones les plus froides). Ces suies peuvent contenir différents polluants organiques plus ou moins volatils tels que des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), des dioxines/furanes (PCDD/F) ou encore des métaux lourds (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn). Ces substances organiques vont se condenser et s'agglomérer à la surface des particules de suies.

4 La combustion en foyer domestique

Ce chapitre traite essentiellement de la combustion de bois en foyer domestique et ne traite pas de la combustion de charbon ou de biomasse autre que le bois (ex : cultures agricoles) même si le considérant (5) du règlement modificatif 2022/2400 mentionne « les cendres et les suies provenant des ménages » au sens large et peut donc inclure les combustibles biomasse et fossile pour les foyers domestiques. En effet, les installations de chauffage fonctionnant au charbon sont minoritaires en France (le recours aux combustibles minéraux solides tels que le charbon dans le sous-secteur du chauffage, eau chaude sanitaire et cuisson domestique était de 4% en 1990 et a pratiquement disparu depuis les années 2000 [Citepa (2023)]) et sont amenées à disparaître chez les particuliers. De plus, les chaudières au fioul et au charbon ne peuvent plus être vendues depuis le 1^{er} juillet 2022⁸. Enfin, la majorité des installations au fioul lourd et du charbon a été substituée, notamment par des installations au gaz naturel⁹.

De plus, les émissions particulières (PM₁₀, PM_{2,5}, PM_{1,0} et carbone suie) sont très majoritairement dues (> 99%) à la combustion de bois dans le secteur résidentiel-tertiaire [Citepa (2023)] justifiant également cette focalisation sur le bois. À noter que ces émissions liées au chauffage domestique ont fortement diminué depuis les années 1990, du fait notamment de la mise sur le marché d'équipements plus performants¹⁰ au niveau du rendement énergétique et de la réduction des émissions polluantes du fait d'améliorations technologiques (label Flamme Verte¹¹, introduction d'air secondaire dans la chambre de combustion, meilleure étanchéité, etc.), de la baisse de l'utilisation des foyers ouverts et de l'augmentation des équipements de combustion plus performants et moins polluants tels que les appareils fonctionnant aux granulés de bois par les particuliers.

4.1 La combustion du bois

La combustion est une réaction chimique exothermique à haute température entre un comburant (oxygène de l'air) et un combustible (bois ou charbon) majoritairement composé de carbone et d'hydrogène. Une combustion se déroule selon les quatre étapes suivantes [Rogaume (2009) ; Khan et al. (2009)] :

- Le séchage du combustible
- La pyrolyse
- Les réactions d'oxydation en phase gazeuse : combustion des gaz de pyrolyse
- La combustion du solide résiduel

Le bois ne brûlant pas naturellement, sa combustion doit être initiée par une source externe (allumage) afin de le pyrolyser. En premier lieu, le bois va d'abord sécher (évaporation de l'eau) vers 100°C. Lors des processus de combustion, une augmentation progressive de la température se produit et des composés volatils issus de la décomposition quasi-simultanée des trois constituants principaux du bois se forment.

Ensuite, la matière organique du bois est décomposée en gaz, liquide et solide (résidu charbonneux) lors de la pyrolyse. Les gaz combustibles dégagés par la combustion du bois (gaz de pyrolyse) vont s'enflammer à partir de 300°C et s'oxyder en présence d'air [Rogaume (2009) ; Collet (2000)]. Des flammes apparaissent alors dues à l'inflammation de ces gaz. En théorie, une température élevée, idéalement, entre 850°C et 1000°C, conduit à une dégradation totale du combustible et à l'oxydation des gaz émis. La chaleur dégagée lors de l'inflammation des gaz combustibles va permettre la

⁸ Décret n° 2022-8 du 5 janvier 2022 relatif au résultat minimal de performance environnementale concernant l'installation d'un équipement de chauffage ou de production d'eau chaude sanitaire dans un bâtiment

⁹ En 1990 ; utilisation de combustibles minéraux solides (charbon ou agglomérés) de 7% et du fioul lourd de 9%. Depuis les années 2000 : utilisation négligeable [Citepa (2023)].

¹⁰ Le règlement 2015/1185 impose depuis 2022 pour les nouveaux équipements individuels de chauffage au bois mis sur le marché des limites d'émission de particules.

¹¹ Le label Flamme Verte (5, 6 ou 7 étoiles), créé en 2000 par l'Ademe et le SER (Syndicat des Energies Renouvelables), est un label assurant aux particuliers des appareils performants répondant à des exigences de qualité en termes de rendement énergétique et d'émissions polluantes. Les valeurs des seuils d'émission distinguent les 5, 6 et 7 étoiles des appareils labellisés Flamme Verte.

combustion des matières solides restantes. Un schéma de la combustion du bois est proposé sur la Figure 3.

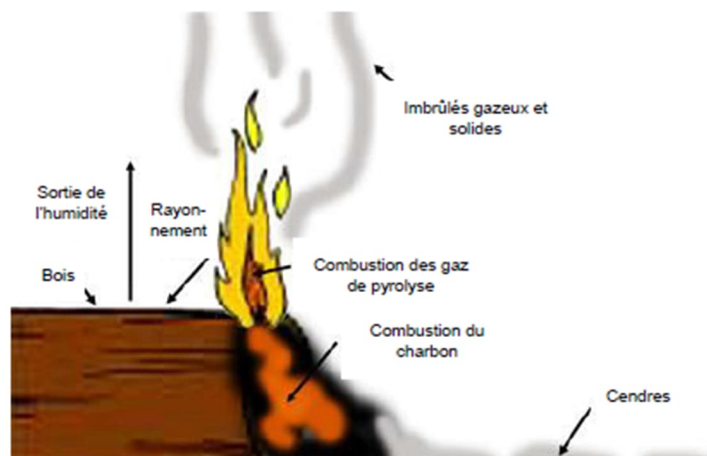


Figure 3 : La combustion de bois (extrait de [Brandelet, B. (2016)])

En théorie, une combustion complète va générer du dioxyde de carbone (CO_2), de la vapeur d'eau, des résidus solides (cendres et poussières) et produire de la chaleur. En pratique, les appareils de combustion domestiques ne permettent pas de réaliser une combustion complète du fait notamment de l'hétérogénéité du bois [Rogaume (2009)]. Néanmoins, il est possible de s'en rapprocher en optimisant et maîtrisant les conditions d'utilisation et d'entretien des appareils ainsi qu'en sélectionnant des combustibles de qualité. En général, la température de combustion d'un appareil de chauffage domestique au bois oscille entre 550°C et 700°C [Brandelet (2016)] qui va dépendre entre autres, du taux d'humidité du bois et de la quantité d'air en excès. Un bois humide va abaisser la température de combustion. Du bois finement divisé (sciures, granulés) va favoriser des combustions de qualité. Une bonne combustion est importante dans la mesure où l'oxydation du bois peut générer des produits imbrûlés tels que du monoxyde de carbone, des composés organiques volatils (COV) ou encore des particules (sues). Le maintien de températures suffisantes dans toute l'installation permet de minimiser la production d'imbrûlés (dans les zones froides) et de garantir des réactions d'oxydation optimales. De plus, un apport en oxygène optimal permet une bonne oxydation des éléments et des gaz émis (rapport combustible / air). Lorsque les conditions optimales sont réunies, en fin de combustion, il ne devrait rester théoriquement que des cendres (environ 1% de la masse introduite, mais ce pourcentage varie en fonction de l'essence et du type de bois).

4.2 Émissions de polluants liés à la combustion du bois

Les polluants émis lors de mauvaises conditions de combustion vont dépendre de nombreux paramètres détaillés dans la partie suivante (4.3).

Une combustion complète peut émettre, en très faibles quantités et selon la composition chimique initiale du combustible : des oxydes d'azote, du dioxyde de soufre, des cendres, des métaux lourds. Une combustion incomplète va émettre ces mêmes composés ainsi que des quantités plus ou moins importantes de polluants gazeux et particuliers carbonés : du monoxyde de carbone (CO), du méthane (CH_4), des composés organiques volatils (COV) tels que les BTEX (Benzène – Toluène – Éthylbenzène – Xylènes), des composés organiques toxiques tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ou les dioxines/furanes (PCDD/F), ainsi que des particules fines et ultra-fines PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$, $\text{PM}_{1,0}$ (sues, particules organiques condensables (goudron), composés organiques semi-volatils ou non) [Collet (2000) ; Rapport d'étude DRC-08-70801-15219A (2008)].

Le taux et la qualité des cendres collectées sont des bons indicateurs de la « qualité » de la combustion et du combustible. Plus les conditions de combustion sont dégradées, plus les quantités de cendres générées seront importantes. La quantité de cendres va notamment varier en fonction de l'essence de bois utilisée. Plus le bois va contenir d'écorces, plus il va générer une quantité importante de cendres.

Les ordres de grandeur des taux de cendres générées lors de bonnes conditions de combustion sont les suivants : de 0,2 à 1% pour le bois sans écorce, de 1 à 3% pour le bois de branches et de 3 à 7% pour les écorces¹².

De plus, la présence de suies dans les conduits permet également d'estimer la qualité de la combustion : plus les conditions de combustion sont dégradées, plus les quantités de suies générées seront importantes. Les suies sont inflammables et sont actuellement classées comme cancérogènes pour l'homme (Groupe 1) [National Toxicology Program (NPT) 2021]. Ces particules primaires formées lors d'une combustion incomplète vont impliquer une perte de rendement de l'installation dans la mesure où elle est composée de matière organique non oxydée.

4.3 Paramètres de combustion influençant les émissions de polluants

Une synthèse des principaux facteurs influençant les performances énergétiques et environnementales des installations de chauffage au bois est présentée ci-dessous [Collet (2000) ; Note de synthèse N°DRC-17-164787-10342A (2018), Rapport Ineris DRC-17-164787-08043A (2018)].

4.3.1 Qualité du bois

Humidité du bois : une humidité > 25% va augmenter fortement les émissions de polluants et fortement dégrader le rendement [Note de synthèse N°DRC-17-164787-10342A (2018)]. En effet, la forte quantité de vapeur d'eau générée va refroidir le foyer, diminuer la température des gaz de combustion et ainsi dégrader la qualité de la combustion. Ainsi, plus le bois est humide, plus la combustion est ralentie. On notera que le taux d'humidité de bois mélangés tels que sous forme de granulés ou de bûches compressées est inférieur à celui du bois dit « naturel ».

Essence de bois : deux grandes familles de bois sont utilisées par les particuliers : les résineux (sapins, épicéas, pin d'Orégon, etc.) et les feuillus (chêne, châtaignier, hêtre, noyer, merisier, peuplier, etc.) ayant des compositions chimiques différentes. La combustion de bois tendre (tels que quelques conifères et les résineux) va souvent émettre plus de polluants que celle des bois durs (tels que la plupart des feuillus). Ainsi, les bois les plus adaptés pour la combustion domestique sont les feuillus durs tels que le charme, le hêtre, l'orme, le robinier ou le frêne¹³. Le bois pour le chauffage domestique en France provient à 64% de la forêt, à 23% de l'entretien des vergers ou de haies et à 13% de la récupération [Ademe (2018)]. En France métropolitaine, la forêt est majoritairement composée de feuillus (Figure 4 : 67% de la superficie forestière).

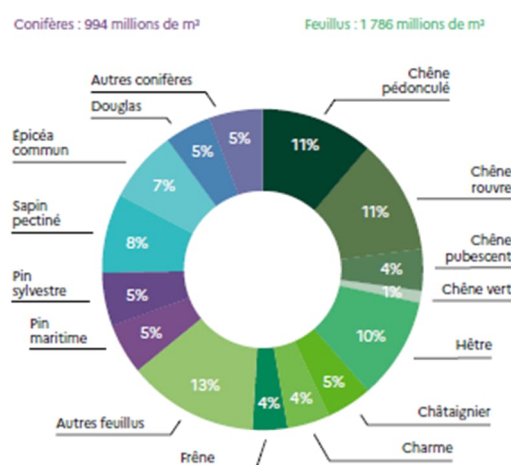


Figure 4 : Répartition des essences de bois dans la forêt française métropolitaine¹⁴

¹² Source : Le bois énergie : Production de cendres et émissions de polluants ; Agence Locale de l'Energie des Ardennes (ALE 08)

¹³ Le chêne est un bois plus dense et plus difficile à brûler (les foyers sont plutôt conçus pour bien brûler du hêtre).

¹⁴ Source : Inventaire Forestier National – Mémento, Edition 2022 réalisé par l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière)

Parmi les feuillus, le chêne (pédonculé, rouvre, pubescent et vert) est l'essence majoritaire. Ainsi, en France, le chêne est l'essence la plus proposée par les revendeurs (89%) suivi du hêtre (par 74% de revendeurs) [ADEME (2023)]. En 2013, 79% des utilisateurs de bois pour le chauffage domestique se chauffaient ainsi avec du feuillu dur [Ademe (2018)]. Cependant, d'autres essences telles que le charme ou le frêne, dont la combustion est moins connue et étudiée en comparaison au chêne et au hêtre, sont aussi largement commercialisées. Une idée de la répartition des essences par régions est donnée sur la Figure 5.

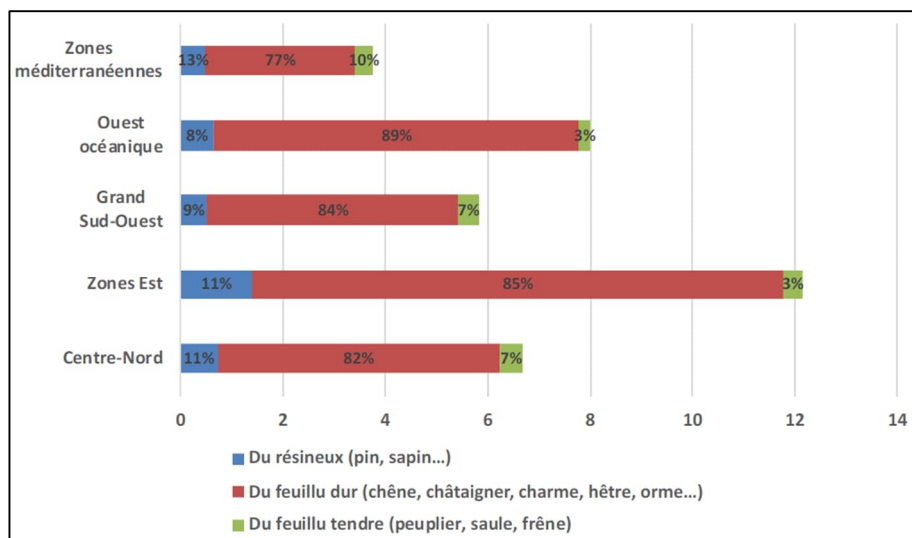


Figure 5 : Répartition des volumes des bûches par grandes régions en 2017 [extrait de ADEME (2018)]

Présence ou non d'écorce : l'écorce est plus humide que le bois. Son épaisseur varie en fonction des essences de bois. De plus, sa présence peut dans certains cas, ralentir le séchage « naturel » du bois en créant une barrière.

Origine du bois : variabilité de composition du bois selon la zone géographique (climat, certains fonds naturels peuvent être plus ou moins chargés en polluants, etc.), accumulation d'une quantité significative de chlore inorganique selon si le bois se situe en bordure de mer, s'il s'agit de bois flottés (ayant séjournés en mer) ou stockés dans l'eau de mer, etc.

Le recours à du bois non naturel : une qualité médiocre du combustible tels que l'utilisation de déchets (ordures, matériaux d'emballage, etc.) ou de bois souillés ou traités (colles, résines, adjuvants), altérés par des indésirables, des matériaux d'emballages, bois de récupération, bois aggloméré, lambris, etc. va favoriser l'émission de polluants. Bien que cela soit interdit, certains déchets ménagers sont parfois brûlés avec du bois pour réduire le coût du chauffage et pour éliminer certains déchets [Timonen et al. (2021)].

4.3.2 Caractéristiques des appareils

Ancienneté des appareils : un appareil récent plus performant peut émettre « jusqu'à 13 fois moins de particules fines qu'un foyer fermé antérieur à 2002 et jusqu'à 30 fois moins qu'un foyer ouvert, moyennant des pratiques d'installation, d'utilisation adéquates et d'entretien » [Ademe (2019)]. Ainsi, un remplacement des appareils anciens permet de réduire de façon non négligeable la part des polluants émis. En effet, la performance et la technologie des appareils a évolué avec les normes et les labels destinés à réduire les émissions polluantes (ajout d'arrivée d'air secondaire, meilleure étanchéité, automatisation de la gestion des entrées d'air, etc.).

Type d'appareil : chaudière, cuisinière, poêle à granulés ou à bûches, foyer fermé et insert, foyer ouvert. Une synthèse des performances de ces appareils est présentée dans la section 4.4.

Les techniques de post-traitement des fumées : certains appareils peuvent être équipés de systèmes spécifiques de traitement des fumées tels que de filtre catalytique, d'échangeur air-braises ou d'électrofiltre. Ces systèmes ne sont pas intégrés initialement aux appareils. Une installation séparée en sortie de conduit de cheminée ou dans la chambre de combustion peut être réalisée sur demande. Cependant, ces systèmes sont coûteux et difficiles à installer dans certains cas et n'ont pas d'influence

sur les rendements énergétiques. Les efforts sur les conditions d'utilisation des appareils sont donc à prioriser et à optimiser.

Confinement : un milieu confiné favorise une bonne combustion (ex : les foyers ouverts conduisent systématiquement à des combustions incomplètes).

Installation : un bon dimensionnement du dispositif de chauffage par rapport au logement et au type de combustible utilisé (un surdimensionnement de l'appareil entraîne une utilisation à faible allure) avec des réglages adéquats ainsi que la présence d'un conduit d'évacuation adapté permettent d'optimiser la qualité de la combustion. De plus, les appareils installés devraient être adaptés au type d'essence utilisé par les particuliers. En effet, le besoin en apport d'air dans la chambre de combustion va dépendre du type d'essence.

Vieillesse des appareils : au cours du temps, les appareils se détériorent (usures et déformations) entraînant une perte d'étanchéité de l'appareil occasionnant des entrées d'air parasites entraînant des conséquences sur la qualité de la combustion (excès d'air trop important).

4.3.3 Conditions de combustion et modes d'utilisation

De manière générale, un procédé de combustion est optimisé via la règle des « 4T » : Teneur en dioxygène, Temps de séjour, Température et Turbulence.

Teneur en oxygène : un excès d'air trop important va refroidir le foyer alors qu'un excès d'air trop faible va conduire à la formation d'imbrulés

Temps de séjour : il correspond au temps de passage des gaz dans la chambre de combustion [Brandelet, B. (2016)]. Un temps de séjour trop court va conduire à une combustion incomplète (mauvais mélange air/combustible, mauvais transfert de chaleur, etc.) alors qu'un temps de séjour trop important va refroidir le foyer.

Température : la température de combustion recommandée est comprise entre 850 et 1000°C alors qu'en pratique dans les appareils domestiques, la température de combustion est généralement comprise entre 550 et 700°C [Brandelet, B. (2016)]. Des températures élevées dans toutes les zones de combustion favorisent une combustion complète.

Turbulence : une bonne combustion est favorisée lorsqu'un bon mélange des molécules de gaz / dioxygène est assurée.

D'autres paramètres influencent également la qualité de la combustion.

Charge de bois : une trop grande charge de combustible peut obturer certaines entrées d'air secondaires alors qu'une charge trop faible peut refroidir la chambre de combustion

Allure de fonctionnement : la possibilité de restreindre les entrées d'air permet de ralentir la combustion (fonctionnement à allure réduite). Le recours à une combustion lente et dégradée permet de maintenir un niveau de chaleur sur une durée plus importante (ex : la nuit) ou de diminuer la puissance de chauffe mais favorise la formation de polluants. Toutefois, s'il est nécessaire de diminuer la puissance de chauffe, une diminution de la charge de bois est recommandée par rapport à une restriction des entrées d'air. La plupart des notices décrivent un fonctionnement à allure réduite, en conseillant d'augmenter simultanément la charge introduite et de restreindre les arrivées d'air.

L'entretien des appareils : un ramonage régulier permet d'allonger la durée de vie des appareils et éviter des mauvaises conditions de combustion (encrassement dû au dépôt de suie, de goudron ou de cendres). Le ramonage doit être réalisé par un professionnel 1 à 2 fois par an selon les cas¹⁵. Le ramonage permet également de limiter les feux de cheminée et de réduire les risques d'intoxication au monoxyde de carbone tout en améliorant la qualité de l'air.

Mode/technique d'allumage : un allumage à froid va générer jusqu'à 6 fois plus de particules du fait d'une combustion incomplète par rapport à un allumage par le haut [Ademe (2019)]. De plus, 80% des émissions de polluants se produisent durant le premier quart d'heure après un allumage à froid de la première charge de combustible ou à chaud lors du rechargement [Note de synthèse N°DRC-17-164787-10342A (2018)]. Un allumage « inversé » (par le haut, c'est-à-dire que l'allume feu est placé en « haut » de la charge construite en plusieurs étages du plus gros morceau en bas au plus fin en haut,

¹⁵ A titre indicatif, une surconsommation de ~10% est généralement observée avec un dépôt de 1mm de suie [Ademe (2019)].

permettant au feu de se propager vers le bas) est moins émetteur de particules et de polluants qu'un allumage par le bas à froid en évitant un emballement de la combustion. En effet, un allumage par le haut permet au bois de monter en température progressivement. Par ailleurs, un allumage à chaud (via la consommation initiale d'une précharge) est recommandé par rapport à un allumage à froid.

Ces mêmes paramètres sont à prendre en compte afin d'évaluer la performance des installations fonctionnant au charbon et des unités alimentées avec de la biomasse autre que du bois.

4.4 Conditions de fonctionnement, performances des appareils domestiques et répartition sur le territoire national

Parmi les différents types de combustibles utilisés pour le chauffage au bois domestique, on retrouve les bûches, les bûches densifiées, les granulés et les plaquettes forestières. Le bois sous forme de bûches est le plus consommé en France (90%) par rapport aux granulés (9%) et les autres types tels que les briquettes reconstituées et les plaquettes forestières et industrielles (1%) [Ademe (2019)]. La forte consommation du bois bûche est expliquée par sa facilité d'approvisionnement et son faible coût. Néanmoins, la consommation du granulé tend à augmenter du fait de ses nombreux avantages (combustible propre et simple à stocker, faible taux de cendres limitant le nettoyage du foyer, etc.) [Brandelet, B. (2016)].

Les appareils de combustion domestique comprennent les cuisinières, les foyers ouverts, les foyers fermés et inserts, les poêles et chaudières à bûches et à granulés dont la puissance est inférieure ou égale à 70 kW. De plus, il est important de distinguer les appareils anciens (mis sur le marché avant 1996), les appareils récents (mis sur le marché après 1996) et les appareils performants (mis sur le marché à partir de 2005). Des réflexions sont en cours afin de faire évoluer cette classification, en prenant en compte l'évolution du parc actuel par rapport aux performances des appareils afin de mieux refléter les années d'introduction des différentes technologies d'appareils (qui permettent une réduction des émissions polluantes) dans le parc. En effet, les appareils ont largement évolué au cours des vingt dernières années. L'Ineris [Rapport Ineris - 206576 – 2740861 (2022)] a proposé la classification suivante : appareils conventionnels (<2005), appareils performants 1 - FV4* à FV5* (2005 – 2015), appareils performants 2 – FV5* à FV7* (2015 – 2021) et appareils avancés, Eco-Design - FV7* (à partir de 2022). Cette classification est validée pour les émissions de poussières et a été incluse dans la dernière mise à jour de l'inventaire. La mise en place de normes réglementaires¹⁶ sur les nouvelles installations domestiques (exigences d'écoconception) permet de proposer des solutions limitant la production de particules et la contamination de l'air mais aussi des résidus de combustion tels que les cendres et les suies.

Quelques informations sur ces installations sont données dans le Tableau 2 ci-dessous. Les chaudières à bois récentes et à granulés sont les équipements les plus performants aujourd'hui mis sur le marché : ils permettent une combustion quasi-complète avec des rendements > 90% grâce aux dernières avancées technologiques (combustion étagée de l'air, capteurs de régulation de l'air admis, électrofiltres, label Flamme verte, etc.) [Collet (2009)]. En 2017, en France, la majorité des appareils vendus (81%) étaient labellisés Flamme Verte [ADEME (2019)], label qui rend compte des performances en termes de rendement énergétique et de réduction des émissions polluantes.

En 2021, il y avait plus de 7,2 millions d'utilisateurs de chauffage au bois, 7,4 millions en 2021 et il en était attendu 9,5 millions pour 2023 [Ademe (2019)]. L'évolution de la répartition entre les différents types d'appareils en France est présentée sur la Figure 6. Aujourd'hui, les équipements majoritaires sur le territoire français sont les foyers fermés/inserts ainsi que les poêles. La proportion des foyers ouverts et des cuisinières a considérablement diminué au cours des dernières années avec la montée progressive d'appareils plus performants (foyers fermés/inserts, poêles et chaudières à granulés) ayant un impact positif sur la qualité de l'air et la toxicité des résidus générés (cendres et suies).

Enfin, il est important de noter que selon une enquête de l'Ademe de 2017 basée sur un total de 1000 utilisateurs de chauffage bois [Ademe (2018)], la moitié des utilisateurs de chauffage au bois (47%) l'utilisent comme mode de chauffage principal, 23 % comme chauffage d'appoint régulier, 13% comme chauffage d'appoint exceptionnel et 17 % comme chauffage d'agrément. Néanmoins, le nombre d'utilisateurs de chauffage au bois comme mode de chauffage principal est amené à croître face à la

¹⁶ Règlement 2015/1185 : depuis 2022, les équipements de chauffage au bois domestique mis sur le marché doivent respecter des limites d'émissions de particules, de composés organiques gazeux, de monoxyde de carbone et d'oxydes d'azote.

hausse des prix de l'énergie. L'utilisation de chauffage au bois est plus importante dans les zones péri-urbaines et rurales par rapport aux zones urbaines ; et de manière générale, les utilisateurs de chauffage au bois sont principalement ceux vivant dans des maisons (par rapport aux appartements) [Ademe (2019)].

Tableau 2 : Synthèse des appareils de combustion domestique en lien avec leur performance énergétique [Ademe (2016)]. Les lignes grisées correspondent aux rendements énergétiques les plus faibles.

Catégorie d'équipement	Rendements énergétiques	Informations complémentaires
Foyers ouverts (cheminée)	Faible, entre 10 et 15 %	Combustion incomplète Les facteurs d'émission en PCDD/F des foyers ouverts sont les plus élevés [Rapport d'étude DRC-08-70801-15219A (2008)]
Insert, foyer fermé	Appareil de plus de 10 ans : ~ 30 à 60% & avant 2002 : 45% Appareil récent : ~ 60 à 80% - 2002-2007 : 60% et >2007 ou fermé « Flamme Verte » : 80%	
Poêles à bûches et de masse anciens (plus de 10 ans)	~ 40 à 60%	
Chaudières anciennes	< 70%	
Foyers modernes à combustion avancée (poêles de masse, poêles radiants, poêles catalytiques, etc.)	> 70%	Plusieurs entrées d'air Préchauffage de l'air de combustion secondaire
Chaudières/Poêles à bois (bûches ou plaquettes) modernes	Élevés à régime normal, > 75%	Combustion régulée et optimisée
Poêles et chaudières à granulés	Élevés, > 85%	Équipés d'un ventilateur afin de fournir l'air de combustion Combustible du type bois granulé obligatoire, donc de qualité contrôlée Poêles à granulés, un des équipements les plus performants du marché (bon ratio air/combustible, faible taille des granulés, alimentation automatique en combustible possible) Les granulés sont produits principalement avec des sous-produits résineux des industries de première transformation du bois (minimum de 30% afin de permettre l'agglomération) mais de plus en plus de granulés ont recours au feuillus du fait des tensions actuelles sur l'approvisionnement en résineux

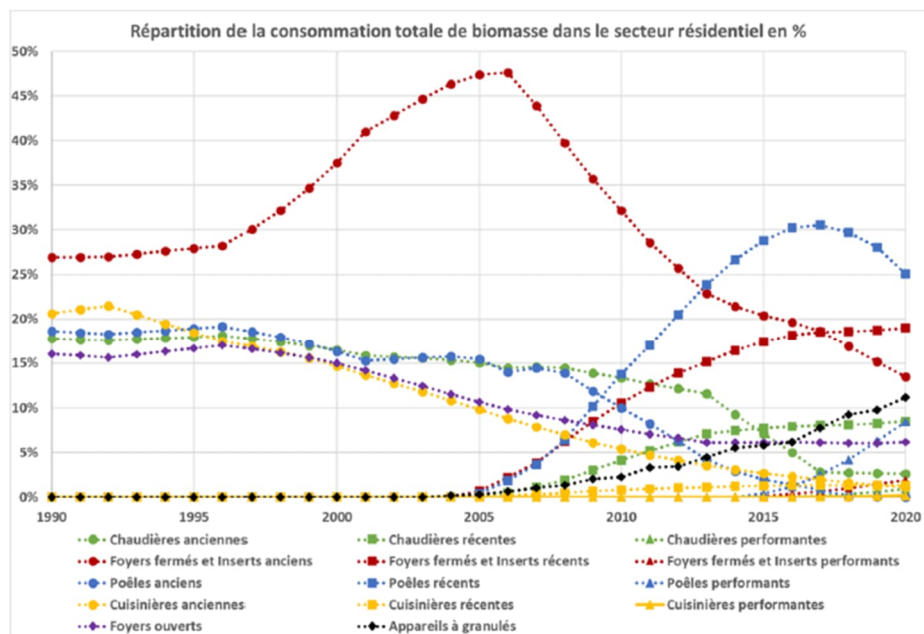


Figure 6 : Évolution de la répartition des différents types d'appareils de chauffage domestique au bois dans le parc français [extrait de Citepa (2023)].

5 La combustion dans les unités alimentées avec de la biomasse

Les centrales biomasse comprennent les chaufferies biomasse ainsi que la cogénération biomasse (production simultanée de chaleur et d'électricité à partir de biomasse).

En France, il existe un grand nombre de chaudières biomasse qui produisent de la chaleur mais pas d'électricité : plus de 5 000 installations en fonctionnement dans les secteurs du collectif et de l'industrie pour des puissances allant de 50 kW à plus de 50 MW ont été identifiées¹⁷. Une cartographie des différentes installations est proposée sur le site du CIBE (Comité Interprofessionnel du Bois- Energie).

En 2021, la France comptait 62 centrales de cogénération à la biomasse solide. Lors de la cogénération, une centrale biomasse va produire de l'électricité et de la chaleur à partir de la combustion de la matière organique (d'origine végétale ou animale). L'eau présente initialement dans une chaudière est chauffée par la combustion de la biomasse libérant ainsi de la vapeur d'eau. Cette dernière est envoyée sous pression vers des turbines pour les faire tourner. Celles-ci vont actionner un alternateur qui va alors produire de l'électricité. Le schéma type d'une installation alimentée avec de la biomasse est présentée sur la Figure 7. La vapeur dégagée est ensuite recyclée et recondensée afin d'être réutilisée dans la chaudière lors d'un nouveau cycle de combustion.

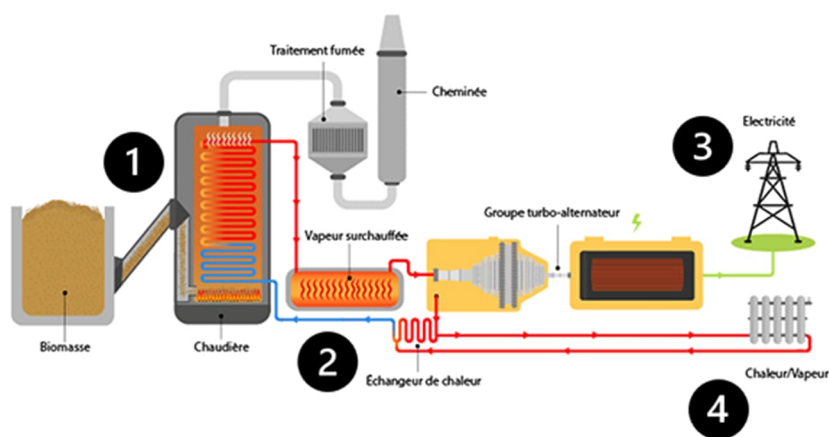


Figure 7 : Schéma d'une installation alimentée avec de la biomasse [source : Les centrales biomasse : fonctionnement, avantages et inconvénients | Be Atex (be-atex.com)]

Les principaux équipements de combustion de la biomasse sont : les fours à grilles, les fours à lit fluidisé et les spreader stockers [RECORD 14-0913/1A (2016)]. Les quantités de cendres sous foyer et volantes générées seront différentes selon les équipements. En fonction du régime des installations (régime d'autorisation (A), d'enregistrement (E) ou de déclaration (D)), des conditions sur l'origine de la biomasse et des teneurs en certains éléments sont imposées.

Les centrales biomasse peuvent relever des rubriques de la nomenclature des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) détaillées dans le Tableau 3. On notera qu'il n'existe pas de réglementation spécifique pour les chaudières de puissance nominale totale comprise entre 0 MW et 1 MW. Cependant, elles doivent respecter des seuils d'émission de poussière (Fond Chaleur) [LECES (2016)]. On entend par « biomasse », au sens de la rubrique 2910 :

- a) Les produits composés d'une matière végétale agricole ou forestière susceptible d'être employée comme combustible en vue d'utiliser son contenu énergétique ;
- b) Les déchets ci-après :
 - i) Déchets végétaux agricoles et forestiers ;
 - ii) Déchets végétaux provenant du secteur industriel de la transformation alimentaire, si la chaleur produite est valorisée ;

¹⁷ Source : Biomasse, touchez du bois - Le Fonds Chaleur (ademe.fr)

- iii) Déchets végétaux fibreux issus de la production de pâte vierge et de la production de papier à partir de pâte, s'ils sont coïncinérés sur le lieu de production et si la chaleur produite est valorisée ;
- iv) Déchets de liège ;
- v) Déchets de bois, à l'exception des déchets de bois susceptibles de contenir des composés organiques halogénés ou des métaux lourds à la suite d'un traitement avec des conservateurs du bois ou du placement d'un revêtement tels que les déchets de bois de ce type provenant de déchets de construction ou de démolition.

La réglementation des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) impose aux installations de combustion des valeurs limites d'émission (VLE) de certains polluants en termes de rejets atmosphériques et en teneurs en certains éléments dans les cendres et sont des installations surveillées. Le cadre réglementaire et les normes vont dépendre de sa puissance, du type d'appareil de combustion (turbines, moteurs, chaudières, fours), des combustibles et de son statut (D, E, A).

Les arrêtés ministériels de prescriptions générales applicables sont listés ci-dessous :

- Arrêté du 3 août 2018 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement soumises à déclaration au titre de la rubrique 2910. Les installations de 1 MW à 2 MW sont soumises à déclaration et contrôles périodiques au titre de la rubrique 2910 des ICPE depuis le 20 décembre 2018.
- Arrêté du 3 août 2018 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations relevant du régime de l'enregistrement au titre de rubrique 2910 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement
- Arrêté du 3 août 2018 relatif aux installations de combustion d'une puissance thermique nominale totale inférieure à 50 MW soumises à autorisation au titre des rubriques 2910, 2931 ou 3110.
- Arrêté du 3 août 2018 relatif aux installations de combustion d'une puissance thermique nominale totale supérieure ou égale à 50 MW soumises à autorisation au titre de la rubrique 3110

Tableau 3 : Régimes ICPE possibles des centrales biomasse. Les différents régimes de classement sont : régime d'autorisation (A), d'enregistrement (E), de déclaration (D, et un C peut être ajouté si l'installation est soumise au contrôle périodique par organisme agréé)

Activités concernées	N° rubrique	Désignation de la rubrique	Régime
Chaudière	2910-A	Combustion à l'exclusion des activités visées par les rubriques 2770, 2771, 2971 ou 2931 et des installations classées au titre de la rubrique 3110 [...] A. Lorsque sont consommés exclusivement, seuls ou en mélange, du gaz naturel, des gaz de pétrole liquéfiés, du biométhane, du fioul domestique, du charbon, des fiouls lourds, de la biomasse telle que définie au a) ou au b) i) ou au b) iv) de la définition de la biomasse, des produits connexes de scierie et des chutes du travail mécanique de bois brut relevant du b) v) de la définition de la biomasse, de la biomasse issue de déchets au sens de l'article L. 541-4-3 du code de l'environnement, ou du biogaz provenant d'installations classées sous la rubrique 2781-1, si la puissance thermique nominale de l'installation est : 1. Supérieure ou égale à 20 MW, mais inférieure à 50 MW	E
		2. Supérieure à 1 MW, mais inférieure à 20 MW	DC
Chaudière	2910-B	Combustion à l'exclusion des installations visées par les rubriques 2770, 2771 et 2971. B. Lorsque sont consommés seuls ou en mélange des produits différents de ceux visés en A, ou de la biomasse telle que définie au b) ii) ou au b) iii) ou au b) v) de la définition de la biomasse :	

Activités concernées	N° rubrique	Désignation de la rubrique	Régime
		1. Uniquement de la biomasse telle que définie au b) ii) ou au b) iii) ou au b) v) de la définition de la biomasse [...], avec une puissance thermique nominale supérieure ou égale à 1 MW, mais inférieure à 50 W	E
		2. Des combustibles différents de ceux visés au point 1 ci-dessus, avec une puissance thermique nominale supérieure ou égale à 0,1 MW, mais inférieure à 50 MW	A
Chaudière	3110	Combustion de combustibles dans des installations d'une puissance thermique nominale totale égale ou supérieure à 50 MW	A

Les différentes VLE sont spécifiées dans les arrêtés précédents. Pour le cas spécifique des dioxines (PCDD/F), la réglementation impose les dispositions suivantes :

- Pour les rejets atmosphériques des installations soumises aux rubriques 2910 et 3110 : 0,1 ng/m³ I-TEQ à 6 % O₂,
- Pour les cendres volantes issues de la combustion de déchets répondant au b) (v) de la définition de biomasse dans les installations relevant du régime de l'enregistrement au titre de rubrique 2910 : 400 ng I-TEQ/kg MS.

6 Conditions de formation des PCDD/F et des PCB-dl

6.1 Conditions de formation des dioxines/furanes (PCDD/F)

Les dioxines sont des sous-produits des processus de combustion incomplète formés de manière non intentionnelle essentiellement à basse température (< 450°C) en présence de dioxygène, de carbone et de chlore. Les PCDD/F sont principalement formés au cours de processus thermiques tels que l'incinération des déchets, les activités industrielles ou domestiques ainsi que les processus accidentels. La combustion de bois (pour le chauffage résidentiel) ou celle de biomasse (pour la production de chaleur ou d'électricité) peuvent être à l'origine de la formation de dioxines. La formation des PCDD/F va dépendre de plusieurs paramètres comme de la nature et de la teneur en chlore du combustible, de l'essence de bois, de sa teneur en métaux lourds (tels que le cuivre qui sert de catalyseur de réaction), de la présence de composés chlorés et des conditions de fonctionnement des systèmes de combustion (qualité de la combustion, maintenance de l'appareil, mode de refroidissement des fumées, etc.) [Référentiels combustibles bois énergie de l'ADEME (2017)].

Il est important de souligner que les dioxines vont être détruites à des températures supérieures à 850°C avec un temps de séjour d'au moins 2 secondes, en présence d'oxygène.

Les PCDD/F sont des substances persistantes et lipophiles qui peuvent s'accumuler dans les matières riches en carbone telles que les suies.

6.1.1 Émissions dans l'air

Même si les émissions dans l'air en PCDD/F liées à un système de chauffage domestique et les teneurs en PCDD/F dans les résidus (cendres et suies) de ces installations ne sont pas directement corrélées, leurs émissions dans l'air sont un bon indicateur de leur présence dans ces résidus.

La principale source des émissions de PCDD/F en France est le secteur du résidentiel/domestique (72% en 2021) [Citepa (2023)]. De manière générale, le secteur résidentiel/tertiaire¹⁸ contribue à 72% des émissions nationales de dioxines et furanes [Citepa (2023)]. La proportion de ces émissions en lien avec la combustion domestique a diminué depuis les années 1990 notamment par l'amélioration des installations de chauffage fonctionnant au bois et la nette diminution du recours au charbon. Néanmoins, le chauffage au bois contribue toujours fortement à ces émissions (par la présence notamment d'installations peu performantes). Le secteur de la transformation d'énergie (incinération des ordures ménagères avec récupération d'énergie) était la principale source dans les années 1990 mais les émissions ont très fortement baissé depuis les années 2000 du fait de la mise en place de valeurs limites sur les rejets atmosphériques.

6.1.2 Synthèse des dioxines

Il existe deux types de mécanismes de formation de dioxines. Ces deux types de réactions peuvent se produire de façon simultanée et indépendante dans des zones distinctes des systèmes de combustion [Trouve et al. & RECORD 96-0208/1A (1997)].

La première est la synthèse à partir d'un précurseur organique ou de composés intermédiaires (il s'agit d'hydrocarbures aromatiques chlorés ayant une structure similaire aux dioxines tels que les chlorobenzènes et les chlorophénols) et se déroule en phase gazeuse et à haute température (400-800°C). Ces précurseurs sont convertis en dioxines par oxydation et réduction à haute température.

La deuxième est appelée synthèse « de Novo »¹⁹ et combine du carbone organique résiduel, de l'oxygène et du chlore (chlorures métalliques) en présence d'un catalyseur métallique (le cuivre est l'un des éléments métalliques le plus efficace comme catalyseur - Cu(II) based – habituellement CuO ou CuCl₂) [Baraket N. (2022)]. Son principe repose sur une dégradation oxydante de la macromolécule de carbone en trois étapes [Trouve et al. & RECORD 96-0208/1A (1997)]. Cette réaction se déroule lors du refroidissement des gaz à des températures comprises entre 200 et 450°C. Lors de cette synthèse, la matrice de carbone est convertie en dioxines via des réactions d'oxydation et de chloration simultanées à 200-450°C en présence d'oxygène [Baraket N. (2022)].

¹⁸ Les émissions des feux de déchets verts, des feux de véhicules et de brûlage de câbles sont incluses dans ce secteur.

¹⁹ Le terme latin « de novo » signifie la formation d'une molécule complexe à partir de molécules ou de matières simples [Baraket N. (2022)].

6.1.3 Origine du chlore dans la biomasse et plus particulièrement le bois

Les PCDD/F peuvent se former dès qu'un combustible contenant du chlore subit une combustion dans de mauvaises conditions. Ainsi leur production est directement liée à la présence de chlore dans le combustible de départ, ce qui n'est pas le cas ou en quantités très faibles dans le bois naturel. Néanmoins, le bois ou la biomasse peuvent dans certains cas contenir des teneurs non négligeables en chlore (ex : forte fixation de chlore sur les écorces en général [Collet (2009)] ou utilisation de produits phytosanitaires) et conduire à la formation de dioxines et furanes lorsque les conditions de combustion sont dégradées (incomplètes, voir section 4.3).

• Teneurs en chlore dans les combustibles

Le bois :

Un ordre de grandeur des teneurs naturelles en chlore dans le bois est donné ci-dessous [Rapport Ineris DRC-12-126318-06147A-V2 (2013)] :

- Bois résineux : entre 23 et 300 mg/kg MS²⁰, avec une valeur moyenne de 93,2 mg/kg MS sur la base de 6 échantillons analysés,
- Ecorce de bois résineux : entre 150 et 165 mg/kg sur la base de 2 échantillons analysés,
- Bois feuillus : entre 1,2 et 85,2 mg/kg MS, avec une valeur moyenne de 42,4 mg/kg MS sur la base de 8 échantillons analysés.

À titre comparatif, sur la base de 8 échantillons, les teneurs en chlore dans les déchets de bois (ex : contamination avec des insecticides et fongicides) varient entre 300 et 4 000 mg/kg MS. De plus, dans certaines régions, le bois naturel peut avoir accumulé une quantité non négligeable de chlore inorganique. La proximité avec des zones maritimes (mer – présence de NaCl tels que les bois flottés riches en NaCl) peut augmenter les teneurs en chlore dans le bois.

La biomasse :

En fonction du type de biomasse et de son origine, les teneurs en éléments inorganiques tels que le chlore vont varier. Par exemple, la paille de blé présente des teneurs plus importantes en chlore (2,2% MS) par rapport à la paille d'avoine (1,50% MS), la paille d'orge (0,98% MS) ou encore la tige de tournesol (0,9% MS) [PIEDNOIR (2017)].

Un ordre de grandeur de la teneur en chlore de différentes biomasses est proposé dans la littérature [Rogaume (2009)] :

- 0,01% (% massique) pour l'épicéa, le sapin, l'écorce de sapin, le hêtre, le chêne, l'érable, le peuplier ;
- 0,02% pour l'écorce de chêne ;
- 0,15% pour le miscanthus ;
- 0,21% pour la paille de blé et les graines de maïs ;
- 0,25% pour la paille d'orge ;
- 0,30% pour les graines d'orge et le sorgho ;
- 0,35% pour la paille de maïs ;
- 0,43% pour les graines de blé ;
- 0,45% pour le colza.

Cependant, ces teneurs peuvent varier en fonction de différents paramètres tels que la zone géographique, les cultures sélectionnées, les conditions de croissance, le moment de la récolte, la pollution des sols, etc. De manière générale, les résidus agricoles ont des teneurs en éléments inorganiques (tels que le chlore) plus importantes par rapport au bois.

De plus, il a été montré que la combustion de biomasses particulières telles que les céréales et la paille, contenant de plus grandes teneurs en chlore que le bois naturel, émettait plus de dioxines et furanes [DRC-12-126318-06147A-v2 (2013)].

²⁰ MS : Matière Sèche

Le charbon :

Les teneurs en chlore moyennes sont de : 340 ppm pour l'antracite, 340 ppm pour le bitumeux, 120 ppm pour le sous-bitumeux et de 120 ppm pour la lignite²¹.

- **Déchets de bois pouvant être utilisés comme combustible :**

Un résumé des différents matériaux de bois utilisés en remplacement du bois naturel dans les foyers domestiques est présenté ci-après [Collet (2000)]. Ces matériaux contiennent des teneurs en chlore plus ou moins importantes, pouvant conduire à la formation de dioxines. Pour rappel, des déchets de bois peuvent être utilisés dans les installations biomasse de puissance > 1 MW s'ils répondent au b (v) de la définition de biomasse au sens de la rubrique 2910.

Déchets de bois traités :

Les déchets de bois sont très souvent contaminés par des métaux lourds et/ou des substances toxiques (traitements contre les moisissures, UV ou l'incendie). De plus, les constituants de ces matériaux bois tels que les colles, les vis et les agrafes d'assemblage du bois peuvent être source de contaminants.

Les déchets de bois souillés ou traités (colles, résines, adjuvants) peuvent être des matériaux d'emballages (cartons, papiers, etc. qui sont souvent traités ou souillés par des encres par exemple), des bois de récupération, des piquets de jardin, des montants de barrière, des palettes CFF (Chemins de fer fédéraux), des cageots, des morceaux de meuble, des bois agglomérés, poutres, lambris, etc. Même sans traitement spécifique, comme c'est le cas par exemple des emballages destinés au contact alimentaire, ils peuvent contenir des résines ou des colles (par exemple, les contreplaqués ou les panneaux de particules).

Le combustible peut aussi provenir de bois prévus initialement pour un usage en extérieur et donc fortement traités tels que des clôtures, berges, mobilier urbain, etc.

Dans une moindre mesure pour les particuliers, des déchets de bois issus des chantiers (mobilier, éléments en bois provenant de la déconstruction, etc.) peuvent être utilisés comme combustible et ils peuvent être souillés par des produits chimiques (peintures, colles, produits d'imprégnation) ou assemblés avec d'autres types de matériaux (matériaux plastiques tels que le chlorure de polyvinyle, source importante de chlore, des clous, des vis, etc.)

Les principaux produits organiques chlorés de traitement du bois pouvant être retrouvés dans les déchets de bois (déchets de bois de démolition, bois d'extérieur) sont : le PCP (pentachlorophénol), le DDT (dichlorodiphényltrichloroéthane), le lindane ou les PCB (polychlorobiphényles). Le recours à ces composés est fortement réglementé ou interdit²² depuis plusieurs décennies. Ces composés se retrouvent donc souvent à l'état de traces dans les déchets de bois et ne suffisent pas à générer par combustion des teneurs importantes en dioxines. Mais compte tenu de leur forte utilisation par le passé, notamment le PCP, des déchets de bois peuvent encore être contaminés. Le PCP (et ses dérivés) a été utilisé par le passé comme insecticide et fongicide notamment pour le traitement des bois d'extérieur et de construction. De plus, certains produits commerciaux du PCP pouvaient déjà contenir des dioxines, produits de réaction secondaire lors de la synthèse du PCP (Hansen et al. (2004)). Le bois peut également être ignifugé avec des produits chlorés tels que de la peinture intumescente à base de paraffines chlorées.

La combustion de déchets de bois contaminés (souillés ou traités) augmente le niveau de dioxines de deux à trois ordres de grandeurs par rapport à du bois non traité [Tame et al. (2007)]. En comparaison avec du bois naturel, des facteurs d'émissions en PCDD/F plus importants (20 à 250 fois supérieurs) ont été mesurés en présence de bois contenant des déchets [Launhardt et al. (1998) & Schatowitz et al. (1994)].

²¹ Source : Indiana Center for Coal Technology Research; COAL CHARACTERISTICS; Brian H. Bowen, Marty W. Irwin

²² Ces composés sont inscrits dans l'annexe I du règlement POP sans valeur limite relative à leur présence en tant que contaminants non intentionnels à l'état de trace et inclus dans les annexe IV (limites de concentration de 100 mg/kg pour le pentachlorophénol et ses sels et esters, 50 mg/kg pour le DDT, 50 mg/kg pour l'hexachlorocyclohexanes, y compris le lindane, 50 mg/kg pour les PCB) et V (limites de concentration de 1 000 mg/kg pour le pentachlorophénol et ses sels et esters, 5 000 mg/kg pour le DDT, 5 000 mg/kg l'hexachlorocyclohexanes, y compris le lindane, 50 mg/kg pour les PCB).

Les résidus de cultures :

Les unités biomasses peuvent être alimentées par des résidus de cultures. Cependant, certaines cultures telles que les pailles ou les graines contiennent des taux non négligeables de chlore liés à l'utilisation de produits phytosanitaires [Rogaume (2009)].

Les résidus biomasse :

Certaines installations biomasses peuvent être alimentées par de la biomasse végétale (paille, bois...) mais peuvent aussi recourir à de la biomasse animale (carcasses), des déjections (fientes) et boues d'épuration, et des déchets (bois en fin de vie, liqueurs noires, déchets plastiques) [RECORD 14-0913/1A (2016)]. Tous ces résidus de biomasse peuvent contenir du chlore en quantité plus ou moins importante.

6.2 Conditions de formation des PCB de type dioxines (PCB-dl)

Alors que les PCDD/F sont des sous-produits non intentionnels formés lors de processus de combustion incomplète, les PCB sont des composés chimiques synthétiques industriels ajoutés intentionnellement dans certains produits par l'homme. Les PCB sont des substances très stables qui se décomposent qu'à de très fortes températures $> 1\,000^{\circ}\text{C}$ [Citepa (2023)]. Depuis 1987, la production ainsi que la commercialisation des PCB est interdite en France.

La présence de PCB-dl dans les émissions est ainsi liée à leur présence initiale dans les combustibles brûlés.

D'une part, les combustibles tels que le bois naturel peuvent contenir des PCB. Cette contamination aux PCB s'explique par la présence de PCB dans l'environnement (air, sols, eau) du fait de contaminations « historiques » (liées aux activités anciennes), de contaminations « accidentelles » (à proximité des lieux de production et d'élimination, déversements liés à des fuites tels que les fuites de transformateurs et condensateurs contenant des PCB, d'explosions, d'incendies ou autres rejets, de l'incinération industrielle de déchets ménagers) ainsi que d'une mauvaise gestion des déchets contenant des PCB concernés par le passé. Malgré l'interdiction des PCB, on les retrouve encore aujourd'hui dans l'environnement du fait de leur extrême persistance.

D'autre part, les PCB sont présents dans certains déchets que les particuliers peuvent utiliser comme combustibles (présence de PCB comme additif ignifugeant dans les matières plastiques, comment agent plastifiant et adhésif dans les peintures, laques, vernis, colles, etc. ou encore dans certains produits phytosanitaires tels que le pentachlorophénol). Ainsi, la combustion de ce type de déchets peut être à l'origine d'émissions de PCB.

Notons que la présence de PCB-dl dans les déchets (cendres et suies) étudiés dans ce rapport n'a pas de lien direct avec la présence de PCDD/F dans la mesure où les origines de ces substances sont différentes. Le seul lien pouvant exister est la présence éventuelle de traces de furanes comme impuretés des PCB lors de leur synthèse [Afssa (2005)] ou lors de la dispersion dans l'environnement de PCB et des PCDD/F générés lors de l'incinération de déchets industriels contenant dès le départ des PCB (mais cas rares car non conforme à la réglementation).

Pour rappel, les PCB-dl ne représentent qu'une faible proportion ($< 10\%$ des congénères) de la totalité des PCB. À noter que les émissions de PCB dans le secteur de la transformation d'énergie (comprenant la combustion de la biomasse) ont drastiquement diminué depuis 20 ans par la mise en place de traitement des rejets atmosphériques pour le respect de valeurs seuils (voir chapitre 5) dans les directives européennes [Citepa (2023)].

6.3 Synthèse des principaux paramètres à considérer pour la présente étude

- **Condition nécessaire : la présence de chlore**

La concentration et la forme sous laquelle se trouve le chlore (composés organo-chlorés ou forme minérale de type sels) et/ou la présence de précurseurs organiques (PCB, PCP, etc.) sont des facteurs déterminants dans la formation des dioxines. La présence de chlore dans le combustible de départ est donc un prérequis. En présence de bois naturel, peu de dioxines devraient être émises, et ce quelles que soient les conditions de combustion. Il est rappelé que certaines biomasses ont des teneurs naturelles en chlore suffisamment élevées pour induire des émissions de dioxines. De plus, certains bois naturels peuvent être fortement chlorés du fait des embruns marins. Enfin, l'écorce du bois contient une forte proportion de substances inorganiques et notamment du chlore. Ainsi, la présence d'écorce favorise la formation de dioxines. Il est rappelé que l'introduction de bois traités dans un foyer domestique est interdite.

Pour cette étude, une attention particulière sera ainsi portée, dans la mesure du possible, à l'origine géographique du bois utilisé, à l'introduction de produits contaminés ou de déchets souillés avec des composés chlorés (emballages plastiques, bois traités, prospectus, etc.) mais aussi à l'essence de bois. En effet, la combustion de certaines essences telles que le sapin peut émettre plus de dioxines que celle du hêtre ou du bouleau [Collet (2000)].

De manière générale, pour la combustion de bois, il faut privilégier les résidus de bois n'ayant pas ou peu (teneurs proches du bois « naturel ») subis de traitement (à base de composés chlorés, des métaux lourds, des composés organohalogénés).

On notera en complément que le paramètre « particulier/usage domestique » a une forte influence sur la production de dioxines. En effet, certains vont brûler des ordures, des déchets ménagers (comme du PVC) ou encore d'autres matériaux (comme du papier imprimé) dont ils veulent absolument se débarrasser sans les jeter à la poubelle. Ainsi, les habitudes des particuliers ont une grande influence sur la qualité du combustible de départ et certaines pratiques doivent être bannies.

- **Mauvaise qualité de la combustion :**

En cas de teneurs en chlore non négligeables dans le combustible, les conditions de combustion vont déterminer la formation ou non de dioxines. Ainsi, l'ensemble des paramètres énoncés dans la section 4.3 (fonctionnement à allure réduite, appareils anciens ou foyers ouverts, refroidissement lent des fumées après la combustion (formation de dioxines dans les zones de post-combustion entre 200 et 400 °C), la façon de démarrer le feu, de l'entretenir et de l'alimenter en air, etc.) contribuent à des conditions de combustion dégradées et peuvent ainsi conduire à la formation de dioxines.

Une attention particulière sera portée aux équipements présentant des performances environnementales et énergétiques insuffisantes tels que les foyers ouverts ou les appareils à bûches car ce sont ceux les plus susceptibles de générer des dioxines lors de la combustion de bois ou de déchets contenant du chlore.

7 Synthèse des données bibliographiques déjà disponibles

Une synthèse des données bibliographiques sur les teneurs en dioxines (PCDD/F) dans les cendres et les suies des foyers domestiques ainsi que dans les cendres volantes des unités biomasse est présentée ci-dessous. Des études étrangères sont également incluses.

7.1 Préambule : méthodes de calcul des concentrations des substances visées

Le principe de calcul de la teneur en dioxines est brièvement décrit dans cette section. Dans le cas des dioxines, il s'agit de mélanges complexes de congénères. Chaque congénère est associé à un degré de toxicité spécifique représenté par le Facteur d'Equivalence Toxique (TEF). Le TEF permet une évaluation de la toxicité d'un congénère particulier par rapport à un autre. La toxicité globale du mélange de congénères est calculée en sommant les concentrations de chaque congénère, pondérées par leurs TEFs respectifs.

Il est important de noter que toutes les études n'utilisent pas les mêmes Facteurs d'Equivalence Toxiques (TEF). En effet, deux systèmes d'Equivalence Toxiques peuvent être utilisés :

- I-TEQ (ou I-TEF) : mis en place par l'Organisation du Traité de l'Atlantique Nord (OTAN) en 1989,
- WHO-TEQ (ou WHO-TEF, souvent abrégé TEF ou TEQ) : mis en place par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et le Programme International sur la Sécurité Chimique (IPCS) en 1998.

Le règlement POP utilise la nomenclature OMS/IPCS (WHO-TEQ). Les deux nomenclatures considèrent les 17 congénères (7 PCDD sur 75 et 10 PCDF sur 135) classés POPs. Le système OMS/IPCS inclut en plus les 12 PCB de types dioxines.

En l'absence de données sur les concentrations individuelles des composés analysés (10 PCDF et 7 PCDD), il est impossible de passer d'un système à un autre (I-TEQ ou WHO-TEQ). Les données du système I-TEQ (OTAN) sont tout de même conservées dans cette synthèse bibliographique, à titre indicatif, car elles permettent de donner des ordres de grandeurs et de mettre en avant les conditions « favorables » à la formation de dioxines. En effet, généralement, il y a peu de différence sur le résultat global entre les deux. Une description plus détaillée des différences entre ces deux nomenclatures est présentée dans l'Annexe 1.

7.2 Cendres et suies des installations de chauffage domestique

Une synthèse des données disponibles dans la littérature sur les teneurs en dioxines dans les cendres et les suies en provenance des ménages est présentée dans les Tableau 4 (cendres) et Tableau 5 (suies). Seule l'étude de BiPRO (2005) visant à faciliter la mise en œuvre de certaines dispositions relatives aux déchets du règlement POP ainsi que certaines études plus anciennes (< 2005), présentent des valeurs au-dessus de la limite de concentration modifiée (5 µg/kg) pour la somme des PCDD/F et des PCB-dl.

Tableau 4 : Synthèse des données disponibles sur les teneurs en dioxines/furanes dans les cendres des installations domestiques. Les valeurs supérieures au nouveau seuil du règlement POP sont indiquées en rouge.

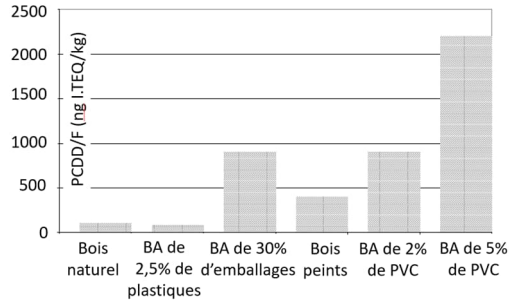
Référence	Installation domestique / Localisation	Origine des cendres	Concentration de la somme des PCDD/F
BiPRO (2005)	Chauffage domestique (Europe)	Cendres (combustible fossile)	Moyenne = 0,056 ; Min = 0,00022 ; Max = 0,15 µg WHO-TEQ /kg
		Cendres (combustible bois)	Moyenne = 0,11 ; Min = 0,0001 ; Max = 0,5 µg WHO-TEQ /kg (PCB : 10 - 20 µg/kg)

Référence	Installation domestique / Localisation	Origine des cendres	Concentration de la somme des PCDD/F
Hedman et al. (2006)	Combustion résidentielle de biocombustibles - 4 types de poêles et de chaudières (Suède)	Cendres (différents types de granulés et de bois de chauffage ont été brûlés)	WHO-TEQ (µg/kg) Entre < 0,0009 (chaudière moderne, bouleau, pleine charge) et 0,68 (vieille chaudière : bouleau + papier + plastique ; air réduit ; combustion lente)
Vandermark en et al. (2016)	Systèmes de chauffage domestique en Belgique Collecte de 22 échantillons différents de cendres de bois	Cendres (granulés de bois probablement traités avec des conservateurs chimiques ou contenant d'autres contaminants, tels que de la colle) Cendres (palettes de bois) résidus solides (combustion du bois)	(0,01) BEQ µg TCDD ²³ -eq./kg (0,0058) BEQ µg TCDD-eq./kg BEQ : Bio-analytical equivalent 0,0006 to 0,0086 µg TEQ/kg La concentration en PCB-dl mesurée dans cette étude est très faible comparée à celle des dioxines.

Tableau 5 : Synthèse des données disponibles sur les teneurs en dioxines/furanes dans les suies des installations domestiques. Les valeurs supérieures au nouveau seuil du règlement POP sont indiquées en rouge.

Référence	Installation domestique / Localisation	Origine des suies	Concentration de la somme des PCDD/F
Bacher et al. (1992)	Cheminée d'une ancienne ferme dans le sud de l'Allemagne	Suies (bois naturel brûlé, non traité) prélevées lors du ramonage annuel	755 ng TEQ-WHO ₉₈ /kg
Dumler-Gradl et al. (1995)	Cheminées domestiques dans la région de Bavière (Allemagne)	81 échantillons de suies avec différents couples bois/foyer	entre 4 et 42 048 ng I.TEQ/kg
Van Oostdam (1995)	Colombie-Britannique (Canada)	Suies (bois naturel et bois traités) Contaminations possibles du combustible par des	86 à 335 ng I.TEQ/kg (dont un foyer brûlant du bois chargé en sel marin/zone côtière donnant une teneur en dioxines de 7 706 ng I.TEQ/kg)

²³ TCDD : la TCDD 2,3,7,8-tétrachlorodibenzo-p-dioxine est la plus toxique des dioxines.

Référence	Installation domestique / Localisation	Origine des suies	Concentration de la somme des PCDD/F
		chlorophénols utilisés dans les industries du bois ainsi que dans les effluents des usines de pâte à papier utilisant le blanchiment au chlore. 459 échantillons ont été analysés	Concentration moyenne : 211 ng I-TEQ/kg = 246 ng TEQ-WHO ₉₈ /kg.
Collet (2000) Launhardt (1998)	Essais réalisés en Allemagne en 1998 sur des poêles et petites chaudières	Suies (foyers alimentés avec des déchets de bois contenant du chlore)	BA : Bois additionné 
Thoma (1998)	Chaudières domestiques fonctionnant au bois, au charbon, au bois/charbon ou au pétrole dans la région de Bayreuth, en Allemagne	suies (poêles bois/charbon) suies (d'une chaudière de chauffage central au bois) suies (d'un poêle à bois)	900 ng I-TEQ/kg 1 500 ng I-TEQ/kg 7 500 ng I-TEQ/kg
Bartet et al. (2001)	Foyers domestiques (pays non spécifié)	suies de foyers mixtes bois/charbon	de 50 à 10 065 ng/kg I-TEQ
U.S. EPA (2004)	Poêles à bois et des foyers domestiques (Région Ouest des États-Unis)	suies de foyers domestiques à bois	de 112 à 2 643 ng I-TEQ /kg MS
BiPRO (2005)	Chauffage domestique (Europe)	Suies (combustible fossile) Suies (bois)	Moyenne = 6,15 ; Min = 0,05 ; Max = 10 µg WHO-TEQ /kg Moyenne = 3,99 ; Min = 0,02 ; Max = 14,4 µg WHO-TEQ /kg (PCB : 0,03 - 0,11 mg/kg)

Les études citées dans les tableaux ci-dessus n'ont pas été réalisées en France et sont assez anciennes. Elles sont donc peu représentatives des consommations (catégories et performances des équipements de combustion) et utilisations actuelles (type et origine du combustible bois) en France. Les dépassements observés ne sont pas représentatifs de la situation actuelle du fait notamment de

l'évolution du parc des installations domestiques au cours des vingt dernières années par rapport aux performances et aux émissions des appareils (Figure 6). Des données complémentaires obtenues sur le territoire national s'avèrent donc nécessaires. Une campagne de mesure nationale a donc été réalisée.

En conclusion, la synthèse bibliographique de Collet (2000) a permis de mettre en évidence des teneurs en dioxines et furanes dans les cendres comprises entre 30 et 720 ng I.TEQ/kg lors de la combustion de bois naturel. Cette teneur est fortement impactée (20 à 250 fois supérieures à celle du bois non traité) lors de la combustion de bois additivés (bois peints, bois contenant des emballages ou des matières plastiques en PVC, bois chargé en sels lié à un stockage dans l'eau de mer).

7.3 Cendres volantes des installations biomasses

Les données bibliographiques sur les teneurs en dioxines dans les cendres volantes des unités biomasse pour la production de chaleur et d'électricité est présentée dans le Tableau 6. Quelques études récentes sont mentionnées, notamment les études du LECES pour l'ADEME concernant l'évaluation des performances énergétiques et environnementales de chaufferies biomasse. Certaines études étrangères sont incluses en complément, mais cette bibliographie sur les études réalisées en dehors de la France n'est pas exhaustive.

Tableau 6 : Synthèse des données disponibles sur les teneurs en dioxines/furanes dans les cendres des installations biomasses. Les lignes grisées correspondent aux études françaises. Les valeurs supérieures au nouveau seuil du règlement POP sont indiquées en rouge.

Référence	Installation / Origine	Cendres volantes	Concentration en PCDD/F
OFEFP (1996)		Cendres volantes sous cyclone (bois naturel)	800 ng I.TEQ/kg
		Cendres volantes sous filtre (bois usagés)	environ 4 000 ng I.TEQ/kg
LECES (2008)	9 installations alimentées (France)	cendres volantes	entre 0,7 et 116,5 ng I.TEQ/kg à l'exception d'une chaudière à bois (6 924 ng I.TEQ/kg probablement lié à une contamination du bois brûlé)
LECES (2014)	10 installations biomasse de puissance comprise entre 360 kW et 15 MW : 4 chaudières de puissance unitaire inférieures à 2 MW et 6 chaudières comprises entre 2 et 10 MW	Cendres volantes : il s'agit de trémies de filtres à manches (6 installations) et d'électrofiltres (3 installations) Il n'a pas été identifié de composés organochlorés de type pesticide dans les combustibles Neuf installations sur 10 ont recours à du broyat d'emballages bois (dénommé bois industriel ou bois fin de vie) en proportion plus ou moins importante.	Entre 0.05 et 8 505 ng ITEQ/kg MS avec une valeur médiane de 263 ng ITEQ/kg MS et une valeur moyenne de 1425 ng ITEQ/kg MS La valeur de 8 505 ng ITEQ/kg, <u>la seule au-dessus de la limite du règlement POP</u> , est liée aux mauvaises conditions de combustion pendant les mesures (faible taux de charge).
LECES (2016)	10 installations biomasse de	Cendres volantes : il s'agit des fines	Entre 5.8 et 4 201 ng ITEQ/kg MS avec une valeur médiane

Référence	Installation / Origine	Cendres volantes	Concentration en PCDD/F
	puissance comprise entre 300 kW et 21 MW : 3 chaudières de puissance unitaire inférieure à 2 MW, 6 chaudières comprises entre 2 et 10 MW et une chaudière de 21 MW. Chaudières récentes (démarrées entre 2012 et 2014).	d'électrofiltre (4 installations), des fines de filtre à manches (4 installations), des fines d'un mixte de multi-cyclones et d'électrofiltre (1 installation), des fines d'un mixte de multi-cyclones et d'un filtre à manches (1 installation). Six installations utilisent en complément du broyat d'emballages bois (dénommé bois industriel ou bois fin de vie) en proportion plus ou moins importante. Il n'a pas été identifié de composés organochlorés de type pesticide dans les combustibles.	de 1 156 et une valeur moyenne de 1 092 ng ITEQ/kg MS Site 5 : 1 065 ng ITEQ/kg MS. Le site 5 utilise des déchets de bois (refus de pulpeur, traverses, ...) et des mousses.
RECORD 14-0913/1A (2016)	Installations industrielles et collectives (bois bûche exclus) Cendres issues de chaufferies collectives au bois	cendres volantes (bois naturel) cendres volantes (déchets de bois contenant des composés chlorés) Les combustibles peuvent être des plaquettes forestières ou bocagères, des connexes de la transformation du bois, des plaquettes et des broyats issus des élagages urbains, des bois en fin de vie propres (palettes).	entre 0 et 400 ng I.TEQ/kg > 700 ng I.TEQ/kg
Référentiels combustibles bois énergie de l'ADEME (2017)	Installation biomasse	L'arrêté du 24 septembre 2013 ²⁴ précise que les cendres volantes issues de la combustion de déchets répondant au b (v) ²⁵ de la définition de biomasse respectent les teneurs suivantes : dioxines et furanes : 400 ng.I-TEQ/kg.	

²⁴ Arrêté du 24 septembre 2013 relatif aux prescriptions généralement applicables aux installations relevant du régime de l'enregistrement au titre de la rubrique 2910-B de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement

²⁵ Les produits susceptibles d'être brûlés en installation classée 2910B doivent être conformes à la définition b)v) de la biomasse, au sens de la rubrique 2910 de la nomenclature des ICPE : « déchets de bois, à l'exception des déchets de bois qui sont susceptibles de contenir des composés organiques halogénés ou des métaux lourds à la suite d'un traitement avec des conservateurs du bois ou du placement d'un revêtement, y compris notamment les déchets de bois de ce type provenant de déchets de construction ou de démolition ».

Référence	Installation / Origine	Cendres volantes	Concentration en PCDD/F
Rapport N° DRC-18-171115-03897A (2018)	Chaudières biomasse localisées dans le Haut-Rhin (68) : 3 campagnes de prélèvements de cendres sur la chaudière de Colmar (puissance nominale de 8 MW) et 2 chaudières biomasse de la chaudière de Mulhouse Illberg (puissances nominales de 4 et 8 MW)	Cendres multicyclone Les biomasses brûlées sont des plaquettes forestières (feuillus en majorité).	Concentration en PCDD/F // PCB-dl [ng TEQ/kg MS (OTAN)] 1,93-56,33 // 3,6E-05 -0,27 (Colmar) ; 4,21-11,45 // 0,13-0,36 (Mulhouse 4 MW) ; 18,42-44,7 // 0,45-1,64 (Mulhouse 8 MW).
Rapport Ineris-180235-07692-v2.0 (2019)	Campagne nationale d'analyse : cendre de chaudière de biomasse, issus de 30 sites différents Il s'agit d'installations de combustion soumises à autorisation et à déclaration, au titre de la rubrique 2910 ainsi que d'installations soumises à enregistrement au titre de la rubrique 2910-B.	222 échantillons de cendres sous foyer, multi cycloniques et mixtes	entre 0,8 et 1 010 ng TEQ _{OMS} /kg de MS. PCB-dl non intégrés car teneurs très faibles 61 échantillons ont des teneurs inférieures aux limites de quantification
Pohlandt et al. (1994)	installations de combustion de bois ----- essais de combustion de bois imprégnés avec de produits inorganiques (sels de bore,	cendres volantes ----- cendres volantes (bois faiblement contaminé) cendres volantes (bois fortement contaminé)	121 et 215 ng I.TEQ/kg 52,1 ng I.TEQ/kg 89,6 ng I.TEQ/kg

Référence	Installation / Origine	Cendres volantes	Concentration en PCDD/F
	de chrome et de cuivre) sur une petite installation		
Oehme et <i>al.</i> (1995)	3 installations (de puissance comprise entre 110 et 850 kW) équipées de filtres performants (filtres céramiques et filtres à manches) en Suisse	Cendres volantes (bois naturel) Cendres volantes (bois traités au PCP)	entre 117 et 372 ng I.TEQ/kg 722 à 7 620 ng I.TEQ/kg
Luthe et <i>al.</i> (1997)	chaudière électrique (Canada)	cendres volantes sous électrofiltre (déchets de bois chargés en sels (teneur en chlore allant de 0,15 à 0,70 %)	1 300 à 8 040 ng I.TEQ/kg
Dyke et <i>al.</i> (1997)	installation industrielle alimentée avec du bois traité	cendres volantes	891 – 1 070 ng I.TEQ/kg
Broeker et <i>al.</i> (1997)	installation industrielle alimentée en bois contaminés (Allemagne)	cendres volantes	30 et 23 300 ng I.TEQ/kg
Yamamura et <i>al.</i> (1999)	incinérateurs de déchets industriels : combustion de déchets de bois de démolition (Japon)	cendres volantes	6 700 ng I.TEQ/kg
Wunderli et <i>al.</i> (2000)	une vingtaine d'installations en Suisse	cendres volantes (bois naturel) cendres volantes (déchets de bois (peints, encollés, déchets issus de construction, démolition à l'exclusion de déchets contenant du PVC et de bois imprégnés)) cendres volantes (résidus de bois	entre 1,5 et 4 ng I.TEQ/kg entre 730 et 21 000 ng I.TEQ/kg entre 18 et 6300 ng I.TEQ/kg

Référence	Installation / Origine	Cendres volantes	Concentration en PCDD/F
		transformés mécaniquement)	
BiPRO (2005)	Incinération de déchets non dangereux	Cendres volantes	Moyenne = 1,5 ; min=0,0 ; max = 35 µg WHO-TEQ /kg
	Incinération de déchets dangereux	Cendres volantes	Moyenne = 0,3 ; min=0,0002 ; max =2 µg WHO-TEQ /kg
	Production d'électricité à partir de biomasse	Cendres volantes	Moyenne = 1,1 ; min=0,001 ; max = 16 µg WHO-TEQ /kg
Lopes et al. (2020)	4 chaudières de centrales électriques à biomasses forestières au Portugal Trois chaudières sont des systèmes à lit fluidisé bouillonnant (BFB) La quatrième chaudière est un four à grille (GF).	cendres volantes Les BFB (Bubbling Fluidized Bed systems) consomment principalement des résidus de biomasse forestière (FBR), composés d'écorces et de branches déchetées d'eucalyptus utilisés pour la fabrication de pâte à papier et de boues de papier (provenant du traitement primaire et secondaire des eaux usées). Des quantités variables d'autres résidus forestiers sont utilisées, tels que des restes de pin. Le GF consomme également des FBR, des résidus de pin et d'eucalyptus et parfois des résidus agricoles provenant de la production d'huile d'olive ou de l'industrie du bois.	35–1 139 ng TEQ/kg WHO₂₀₀₅-TEQ Les biomasses présentent des teneurs en Cl (0,04-0,28%) pouvant conduire à la formation de PCDD/Fs.

Sur les 258 échantillons de cendres (volantes, sous foyer ou mixtes) issus d'installations françaises recensés dans la littérature (cellules grisées du Tableau 6), seuls deux échantillons ont des valeurs en dioxines supérieures au nouveau seuil du règlement POP (valeurs de 6 924 ng I.TEQ/kg et de 8 505 ng ITEQ/kg). Ces deux dépassements observés restent exceptionnels et sont liés soit à une contamination probable du bois brûlé soit à des conditions de combustion mal maîtrisées (faible taux de charge). **Au regard de ces données, les cendres volantes des unités biomasse ne sont pas considérées comme des déchets POPs.**

Concernant les études étrangères, excepté pour l'étude de Lopes et al. (2020), elles sont assez anciennes (< 2005) et donc peu représentatives des conditions de fonctionnement actuelles des

installations, notamment au niveau de la nature des intrants, du fait de la mise en place progressive d'un cadre réglementaire de plus en plus contraignant dès les années 1997.

Il est rappelé qu'excepté les installations de moins de 2 MW (et moins de 1 MW depuis 2018), les autres installations sont réglementées et soumises à des valeurs limites en termes de rejets atmosphériques et teneurs en éléments dans les cendres [LECES (2016)]. Cet encadrement réglementaire des installations permet de limiter les teneurs en polluants dans les cendres et permet de rester confiant quant à la faible probabilité de retrouver des teneurs élevées (supérieures au seuil du règlement POP) en dioxines dans les cendres volantes des unités biomasse. De plus, les biomasses consommées par ces installations sont fortement contrôlées. Les dépassements observés ici correspondent soit à des études anciennes (avant les années 2000) soit à des conditions mal maîtrisées (mauvaises combustion et/ou contamination inattendue du bois). Une campagne nationale au niveau des installations biomasse ne s'avère donc pas nécessaire.

7.4 Conclusion de la synthèse bibliographique

Très peu de données sur les teneurs en PCB-dl ont été trouvées dans la littérature : certaines études les incluent mais elles restent minoritaires.

Peu de données sont disponibles sur les teneurs en dioxines dans les cendres et les suies des installations de chauffage domestiques et ces données sont très anciennes. Des mesures complémentaires s'avèrent donc nécessaires et les résultats de la campagne nationale réalisée sont présentées dans la section suivante. Il est souligné qu'au vu de la diversité des foyers, matrices combustibles et origines géographiques possibles, il sera difficile de garantir une bonne représentativité de tous les cas possibles.

Concernant les cendres volantes des unités biomasses de puissance supérieure à 1 MW, de nombreuses données sont disponibles dans la littérature. Concernant les installations françaises, des données sur 258 échantillons de cendres sont disponibles et seulement 2 échantillons dépassent le seuil du règlement POP. Ces données sont donc représentatives et aucun échantillon complémentaire n'a été collecté dans le cadre de cette étude. **Les cendres volantes des unités biomasse ne sont donc pas considérées comme des déchets POPs.**

8 Campagne nationale en France métropolitaine au niveau des installations de chauffage domestique au bois

Afin de compléter les données issues de la littérature, une collecte d'échantillons de cendres et de suies issues des installations de chauffage domestiques au bois a été réalisée. La collecte des échantillons a été focalisée sur la France métropolitaine. Les territoires d'outre-mer n'ont pas été pris en compte dans cette étude.

8.1 Description des échantillons collectés

Des échantillons de cendres et de suies issus des foyers domestiques ont été collectés en 2023 et 2024 en France métropolitaine, pour tout type d'installations fonctionnant au bois. Pour rappel, les foyers fonctionnant au charbon et fioul ont été écartés de cette étude (voir section 4). 159 échantillons ont été analysés et sont répartis comme suit :

- 55 échantillons de cendres ;
- 96 échantillons de suies ;
- 3 échantillons appelés « mix » issus des cuves d'aspirateurs des ramoneurs correspondant à des foyers ouverts + fermés ;
- 5 échantillons « composites » réalisés à partir des échantillons de cendres de couleur similaire (photos en Annexe 2).

Les types de foyer concernés par ces échantillons sont les suivants : foyer ouvert, foyer fermé/insert, poêle à bois, poêle à granulés, chaudière à granulés et chaudière à bois.

La majorité des échantillons ont été collectés par des entreprises de ramonage qui ont accepté de réaliser ces collectes de manière volontaire. Certains échantillons ont été collectés auprès de particuliers directement.

De manière générale, en cas de formation de dioxines, les suies vont concentrer plus de dioxines que les cendres car leur structure plus poreuse leur permet de capter une plus grande quantité de polluants organiques. Ainsi, un nombre plus important d'échantillons de suies que de cendres a été collecté.

La collecte a été réalisée sur plusieurs zones géographiques afin de prendre en compte la variabilité géographique de la composition du bois (en supposant que dans le cas de foyers utilisant des bûches, les essences de bois utilisées sont locales), notamment leur teneur en chlore (voir section 6.1).

Les répartitions géographiques et par type de foyer pour les échantillons de cendres et de suies sont présentées sur les Figure 8 et Figure 9. Quasiment toutes les régions sont concernées par cette collecte.

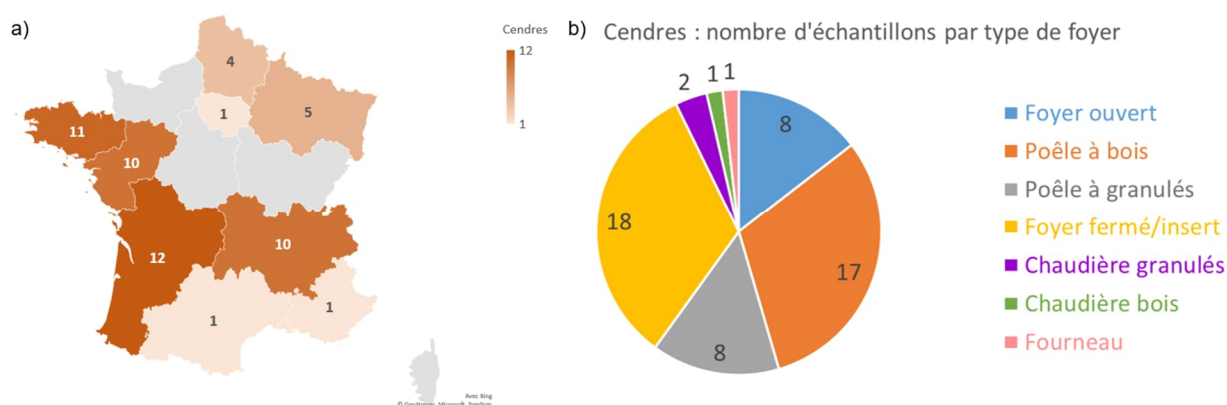


Figure 8 : Informations concernant les 55 échantillons de cendres collectés a) répartition géographique b) répartition en nombre par type de foyer

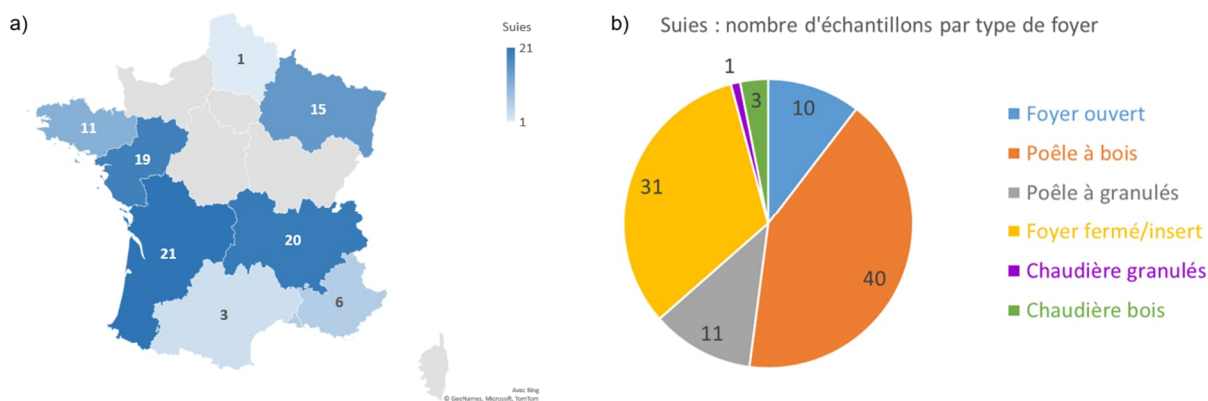


Figure 9 : Informations concernant les 96 échantillons de suies collectées a) répartition géographique b) répartition en nombre par type de foyer

En 2021 en France, les foyers fermés/inserts ainsi que les poêles à bûches sont les foyers majoritaires (Figure 10). Parmi les échantillons collectés, les foyers fermés/inserts et les poêles à bois sont effectivement les plus représentés (Figure 8b et Figure 9b) donc en accord avec la situation nationale.

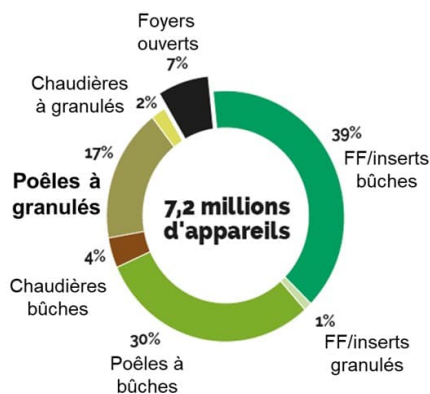


Figure 10 : Répartition des appareils de chauffage domestique au bois en 2021 (source : Panorama Chaleur Renouvelable)

Les échantillons ont été collectés dans des pots en polyéthylène (PE) de 500 mL fournis initialement par l'Ineris. Des pots en PE ont été choisis plutôt que des pots en verre afin de faciliter la collecte des échantillons par les ramoneurs (pots plus légers et faciles à manipuler, éviter la casse, moins lourds à transporter lors de collectes multiples sur une journée). Afin de réaliser les collectes dans les mêmes conditions pour tous les échantillons, les cendres sont également collectées dans des pots en PE avec comme consigne donnée aux particuliers de prélever des cendres froides. Ceci permet de limiter la possible adsorption de dioxines sur les pots en PE. Tous les échantillons collectés sont réceptionnés par l'Ineris, pesés puis envoyés pour analyses en PCCD/F et PCB-dl. Les analyses ont été sous-traitées au laboratoire MicroPolluant Technologies.

On notera que la représentativité de l'échantillon ne sera pas assurée dans cette étude pour les échantillons de cendres collectés. En effet, les échantillons de cendres ne proviennent généralement que du ou des derniers cycles de combustion (les cendres étant vidées régulièrement). Ainsi, il sera impossible d'affirmer si les concentrations mesurées sont représentatives ou non de tout le cycle d'utilisation du foyer par le particulier (son mode d'utilisation pouvant varier). À contrario, les échantillons de suies collectées correspondent à environ une saison de combustion (le ramonage étant effectué ponctuellement) et une quantité représentative de la suie issue d'un ramonage du foyer visé est collectée et envoyée pour l'analyse : l'échantillon correspond donc à environ une (ou une demie) saison de chauffe et il est donc plus représentatif des conditions d'utilisation du foyer.

Un questionnaire (présenté en Annexe 3) a été associé à chaque échantillon collecté et complété par les particuliers ou les ramoneurs fournissant les échantillons. L'objectif est de préciser pour chaque échantillon les paramètres pouvant influencer la formation des PCCD/F et PCB-dl au regard des conclusions énoncées dans la section 6.3. Dans la mesure du possible, il est demandé de préciser les

conditions de combustion (fonctionnement normal et fonctionnement à allure réduite) et les autres éléments brûlés notamment au moment de l'allumage.

8.2 Résultats d'analyse

8.2.1 Informations générales sur la méthode d'analyse

Les concentrations en PCDD/F et PCB-dl sont exprimées en total WHO-TEQ. Dans les cas où certaines substances ont des concentrations inférieures à la limite de quantification (LQ), la valeur de la concentration de la substance non mesurable est fixée à la valeur de la LQ.

Les valeurs de concentrations sont exprimées sur matière brut. Le règlement POP ne précise pas si les concentrations seuils sont à considérer sur matière sèche ou matière brute. À l'exception de 4 échantillons, toutes les autres valeurs des teneurs en matières sèches sont supérieures à 90% (et 106/159 échantillons ont une valeur > 95%). Ainsi, l'impact de l'expression du résultat sur matière brut ou matière sèche n'est pas conséquent.

8.2.2 Qualité des mesurages

Les analyses ont été réalisées par le laboratoire MicroPolluant Technologies. Les incertitudes analytiques sur les concentrations pour chacune des substances ainsi que l'erreur sur l'estimation du taux de récupération des marqueurs sont précisées ci-dessous. Ce marqueur est ajouté dans l'échantillon avant analyse afin de s'assurer que l'analyse effectuée est bien quantitative. Ce marqueur d'extraction est introduit avant extraction et suit tout le processus de préparation de l'échantillon (extraction, purification silice et alumine, concentration).

Tableau 7 : Incertitudes analytiques

Substance dioxine (PCDD)	Incertitude (%)	Substance furane (PCDF)	Incertitude (%)
2, 3, 7, 8 TCDD	15%	2, 3, 7, 8 TCDF	15%
1, 2, 3, 7, 8 PeCDD	15%	1, 2, 3, 7, 8 PeCDF	25%
1, 2, 3, 4, 7, 8 HxCDD	45%	2, 3, 4, 7, 8 PeCDF	25%
1, 2, 3, 6, 7, 8 HxCDD	45%	1, 2, 3, 4, 7, 8 HxCDF	15%
1, 2, 3, 7, 8, 9 HxCDD	25%	1, 2, 3, 6, 7, 8 HxCDF	15%
1,2,3,4,6,7,8 HpCDD	15%	2, 3, 4, 6, 7, 8 HxCDF	20%
OCDD	25%	1, 2, 3, 7, 8, 9 HxCDF	25%
		1,2,3,4,6,7,8 HpCDF	10%
		1,2,3,4,7,8,9 HpCDF	20%
		OCDF	25%
ITEQ	10%		

Les concentrations mentionnées dans les rapports d'analyse sont les concentrations mesurées et corrigées des taux de récupération des marqueurs. Les marqueurs d'extraction peuvent être perdus lors des différentes étapes de préparation de l'échantillon. Les taux de récupération associés peuvent ainsi être inférieurs à 100 %. Par exemple, un taux de récupération de 50% signifie que 50% du composé a été perdu lors de l'extraction / analyse. La fourchette cible pour les marqueurs C13 est comprise entre :

- 30 et 150 % pour les congénères tétra, penta, hexa-chlorosubstitués ;
- 20 et 150 % pour les congénères hepta et octa-chlorosubstitués.

Concernant les données issues des 159 échantillons analysés :

- pour les PCDD/F : 47 échantillons / 159
- pour les PCB-dl : 13 échantillons / 159

présentent au moins une substance en dehors de ces critères. Bien que ces valeurs ne respectent pas les seuils définis, l'impact sur les résultats reste faible à modéré, car ils sont corrigés en fonction du taux de récupération.

Par ailleurs, ces analyses n'ont pas été dupliquées.

8.2.3 Échantillons résultant d'une combustion maîtrisée

Parmi les échantillons collectés, 4 échantillons sont représentatifs de ce qui peut être collecté sur des installations dont la combustion est réalisée dans de bonnes conditions et avec un combustible approprié (bois étuvé). Les résultats des analyses sont présentés dans le Tableau 8. Les valeurs sont très faibles, en accord avec ce qui est attendu sur ce type de combustion.

Tableau 8 : Échantillons de suies et de cendres résultant d'une combustion maîtrisée. Expression des résultats sur Produit Brut (PB).

Type de foyer	Type de combustible	Substance/ matériau utilisé pour l'allumage	Type d'échantillon (N° échantillon)	Somme PCDD/F TEQ max (ng/kg de PB)	Somme PCB- dl TEQ max (ng/kg de PB)
Foyer fermé (15 kW)	Bois étuvé (chêne, hêtre, frêne)	Petits bois, allumes feux, fibre de bois	Suies (204)	8,2	0,6
			Cendres (199)	5,3	0,3
Poêle à bois (8 kW)		Petits bois, allumes feux	Suies (206)	8,6	0,9
			Cendres (207)	7,1	0,5

8.2.4 Résultats sur les échantillons de cendres des installations domestiques

Les valeurs de concentrations des dioxines/furanes > 500 ng/kg sont susceptibles d'être liées à l'ajout de bois adjuvanté. En effet, d'après le rapport Ineris DRC-12-126318-06147A-V2 (2013), les teneurs en dioxines et furanes dans les cendres volantes sont comprises entre 0 et 400 ng I.TEQ/kg pour le bois naturel et supérieure à 700 ng I.TEQ/kg lors de la combustion de déchets de bois contenant des composés chlorés. Pour rappel, la valeur limite du règlement POP est de 5 000 ng/kg.

Les valeurs des sommes en TOTAL TEQ WHO-2005 des PCDD/F d'une part ainsi que des PCB-dl d'autre part des 55 échantillons de cendres collectés sont présentées sur la Figure 11. Ainsi, la majorité des échantillons (91% des échantillons) ont des teneurs en dioxines/furanes < 100 ng/kg, 4 échantillons (soit 7% des échantillons) ont une valeur comprise en 100 et 500 ng/kg et 1 seul échantillon a une teneur très élevée (entre 1000 et 5 000 ng/kg). Pour les PCB-dl, tous les échantillons ont des valeurs faibles (< 50 ng/kg de PB soit moins de 1% de la valeur seuil) : les données relatives aux PCB-dl ne seront donc pas interprétées dans la suite de ce rapport car elles n'influent pas sur les conclusions.

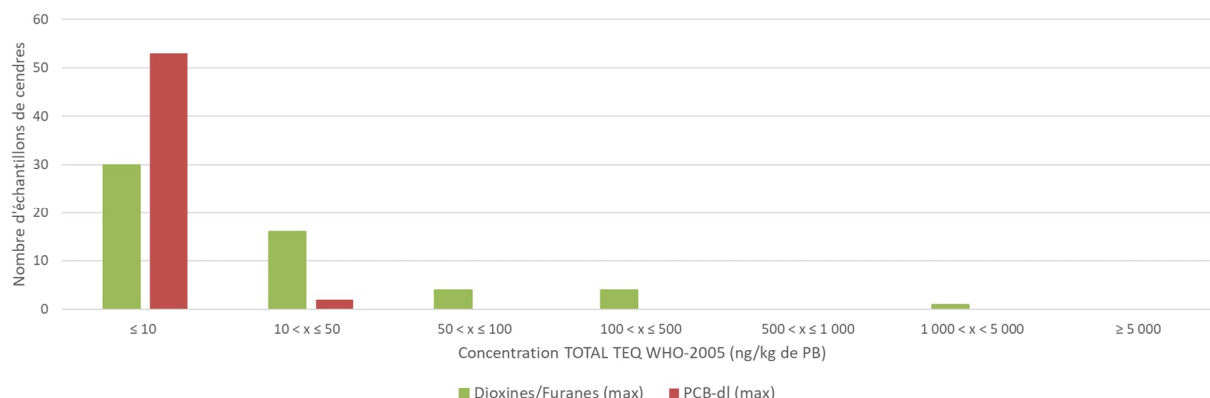


Figure 11 : Répartition des valeurs des PCDD/F (en vert) et PCB-dl (en rouge) en TOTAL TEQ WHO-2005 pour les échantillons de cendres

La Figure 12 montre la répartition par type de foyer des données présentées sur la Figure 11. Les plus fortes concentrations ont été observées dans les poêles à granulés dans le cadre de cette campagne (3 échantillons/11 échantillons sur les poêles à granulés > 100 ng/kg PB). Un échantillon issu d'un foyer fermé/insert et 1 échantillon issu d'une chaudière granulés ont des valeurs > 100 ng/kg.

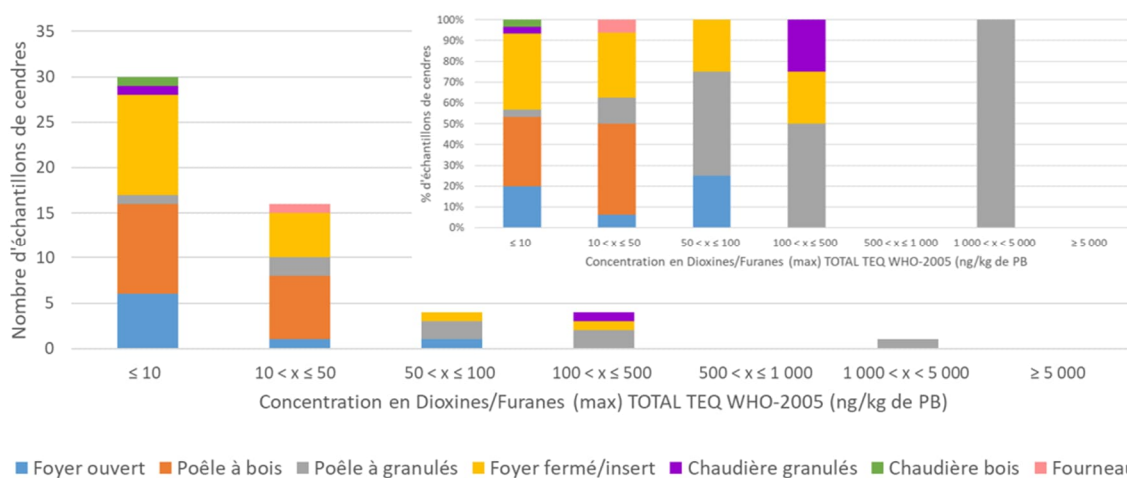


Figure 12 : Répartition des valeurs des sommes des dioxines/furanes des échantillons de cendres par gamme de valeurs et par type de foyer

Ainsi, au regard des valeurs des sommes des PCDD/F mesurées dans les 55 échantillons de cendres collectés, **aucun des échantillons de cendres ne dépasse la valeur seuil de 5 000 ng/kg du règlement POP.**

Peu d'informations ont été collectées via les questionnaires sur les conditions d'allumage, les conditions de fonctionnement et les essences utilisées (remplissage partiel des questionnaires), il n'est pas possible de relier les taux élevés observés à certains paramètres particuliers.

8.2.5 Résultats sur les échantillons de suies des installations domestiques

Les valeurs des sommes en TOTAL TEQ WHO-2005 2005 des PCDD/F d'une part ainsi que des PCB-dl d'autre part des 96 échantillons de suies collectés sont présentées sur la Figure 13. Ainsi, la majorité des échantillons (70% des échantillons) ont des teneurs en dioxines/furanes < 100 ng/kg, 15 échantillons (soit 16% des échantillons) ont une valeur comprise en 100 et 500 ng/kg et 14 échantillons (soit 15%) ont une teneur élevée (> 500 ng/kg). Un seul échantillon dépasse la valeur seuil du règlement POP de 5 000 ng/kg. Pour les PCB-dl, tous les échantillons ont des valeurs < 100 ng/kg de PB. Comme pour les échantillons de cendres, les données relatives aux PCB-dl ne seront donc pas interprétées dans la suite de ce rapport car elles n'influent pas sur les conclusions.

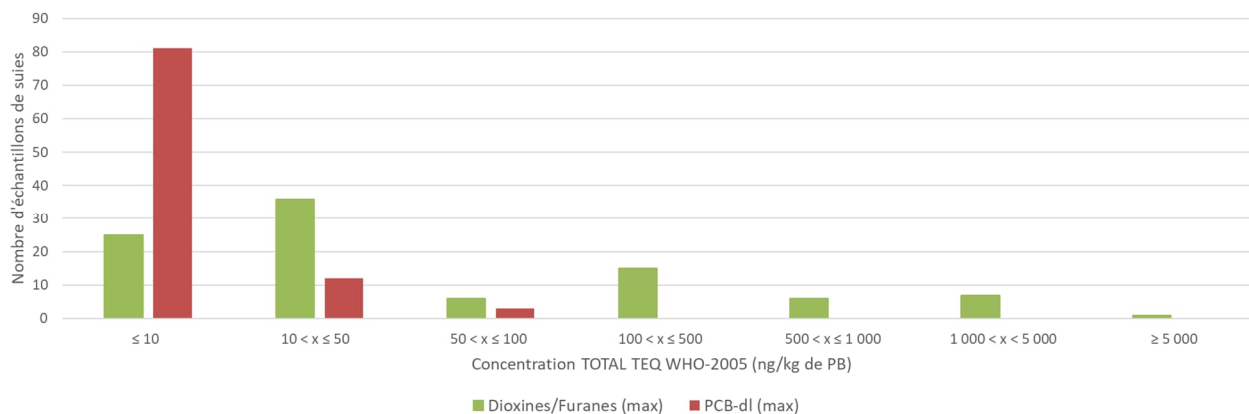


Figure 13 : Répartition des valeurs des sommes des PCDD/F (en vert) et PCB-dl (en rouge) en TOTAL TEQ WHO-2005 pour les échantillons de suies

La Figure 14 montre la répartition par type de foyer des données présentées dans la Figure 13. Il en ressort que les types de foyers à l'origine des plus fortes teneurs en PCDD/F sont les foyers ouverts, les poêles à bois et les poêles à granulés.

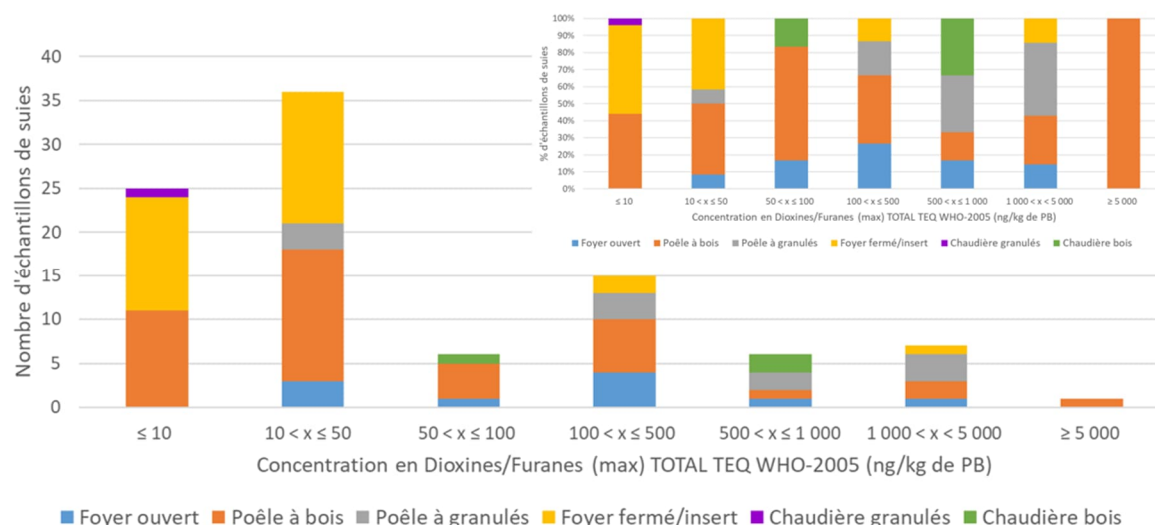


Figure 14 : Répartition des valeurs des sommes des dioxines/furanes des échantillons de suies par gamme de valeurs et par type de foyer

Ainsi, au regard des valeurs des sommes des PCDD/F mesurées dans les 96 échantillons de suies collectés, un seul échantillon de suie est classé POP (valeur supérieure à 5 000 ng/kg). Pour cet échantillon issu d'un poêle à bois, aucune information supplémentaire (par exemple si des déchets ont été introduits ou non) n'a pu être collecté via le questionnaire associé.

Afin de mieux caractériser l'origine des échantillons les plus émetteurs (somme des dioxines > 100 ng/kg PB), une attention particulière a été portée aux questionnaires en lien avec ces échantillons. Dans la majorité des cas, il s'agit de conditions de fonctionnement normale. Il s'agit de chauffage principal ou d'appoint (pas de cas dominant). Certains déclarants ont mis en évidence la présence de déchets ou de matériau utilisé pour l'allumage : papier, journal/prospectus, petits bois, allume-feu, pomme de pin, cube allume feu végétal, bougie, carton/emballages cartonnées, palette. La majorité des déclarants n'ont pas indiqué d'utilisation de déchets particuliers.

Néanmoins, il est difficile à ce stade d'interpréter plus finement ces résultats dans la mesure où le remplissage des questionnaires et les niveaux d'informations retrouvées sont très variables d'un échantillon à l'autre.

8.2.6 Echantillons mix

Trois échantillons ont été collectés dans les cuves des aspirateurs utilisés lors du ramonage. Ces échantillons viennent de Gironde et sont un mélange de suies/cendres en provenance de foyers ouverts et fermés. Les résultats obtenus sur ces trois échantillons sont précisés dans le Tableau 9 ci-dessous.

Tableau 9 : Sommes des PCDD/F et PCB-dl en TOTAL TEQ WHO-2005 pour les trois échantillons mix

	Somme PCDD/F TEQ max (ng/kg de PB)	Somme PCB-dl TEQ max (ng/kg de PB)
Mix 1	5,1	0,38
Mix 2	149,3	0,76
Mix 3	2,6	0,32

Ces échantillons sont représentatifs de ce qui peut être collectés habituellement lors du ramonage. Au regard des valeurs retrouvées dans ce tableau, les trois échantillons de mix ont des valeurs faibles en sommes des PCDD/F et PCB-dl : ils ne sont pas classés POP.

8.2.7 Echantillons de cendres composites

La couleur des cendres est un paramètre important à considérer. Les cendres ont généralement une couleur « gris clair » témoignant d'une composition majoritaire en éléments minéraux. Lorsque les cendres ont une couleur plus foncée (proche du noir) ; cela témoigne de la présence d'une fraction non négligeable de matière organique (ou peut-être dû à un mélange avec des suies). La couleur des cendres donne ainsi une indication de la qualité de la combustion.

Ainsi, afin d'obtenir des valeurs représentatives par qualité de combustion, cinq échantillons composites de cendres ont été formés en mélangeant des cendres ayant des couleurs similaires. Les photos de ces mélanges sont présentées dans l'annexe 2. Les échantillons utilisés pour former les cinq échantillons composites sont ceux qui étaient disponibles au moment de leurs réalisation et qui avaient une quantité suffisante (> 100 g) afin de pouvoir réaliser des analyses individuelles ainsi que former l'échantillon composite.

Les valeurs des sommes des PCB-dl de ces cinq échantillons sont faibles (< 30 ng/kg PB). Les valeurs des sommes des PCDD/F pour les cinq échantillons composites (référéncés n°257 à 261) sont présentées sur la Figure 15. Les valeurs en dioxines sont très faibles (< 25 ng/kg PB). Ces échantillons de cendres ne sont donc pas classés POP.

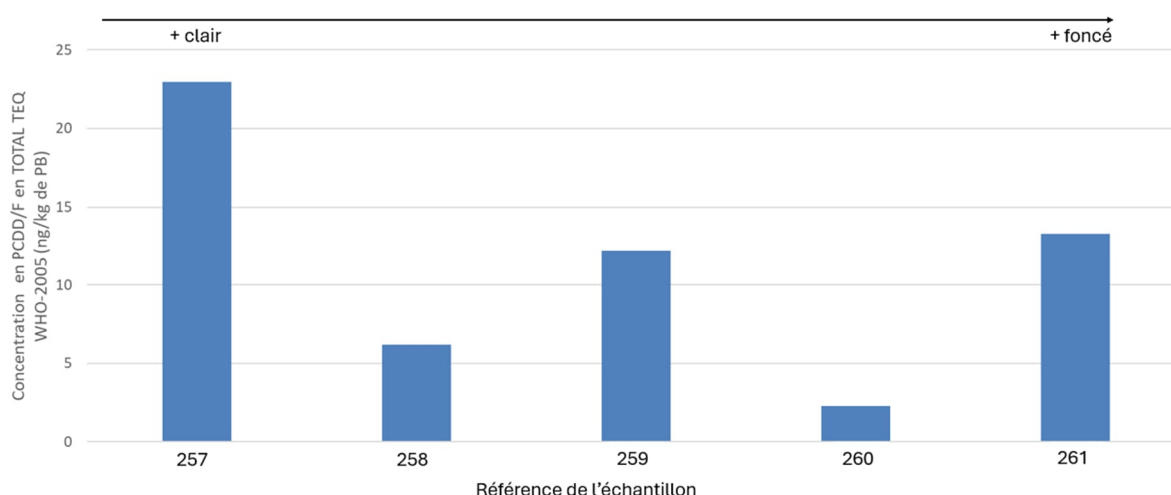


Figure 15 : Sommes des PCDD/F en TOTAL TEQ WHO-2005 pour les cinq échantillons de cendres composites

8.2.8 Sommes des dioxines sans facteurs TEF

Une analyse des sommes des PCDD/F sans considérer les facteurs d'équivalences toxiques (TEF) a été réalisée par type de foyer afin de comprendre si un mécanisme de formation de ces composés est majoritaire ou non. En effet, deux mécanismes différents permettent de générer les dioxines et les furanes conduisant à des profils de congénères différents (voir section 6.1.2). Les dioxines sont plutôt formées à partir de précurseurs alors que les furanes par une synthèse dite « de novo ». La formation préférentielle de dioxines ou de furanes va dépendre entre autres, de la nature du combustible mais aussi de sa composition chimique (ex : teneur en cuivre) [Baraket N. (2022)].

- **Poêles à granulés :**

Pour quasiment tous les échantillons issus des poêles à granulés, la formation de furanes domine par rapport à celle des dioxines (voir Figure 16). Pour les poêles à granulés, la synthèse « de novo » semble donc majoritaire conduisant principalement à la formation de furanes.

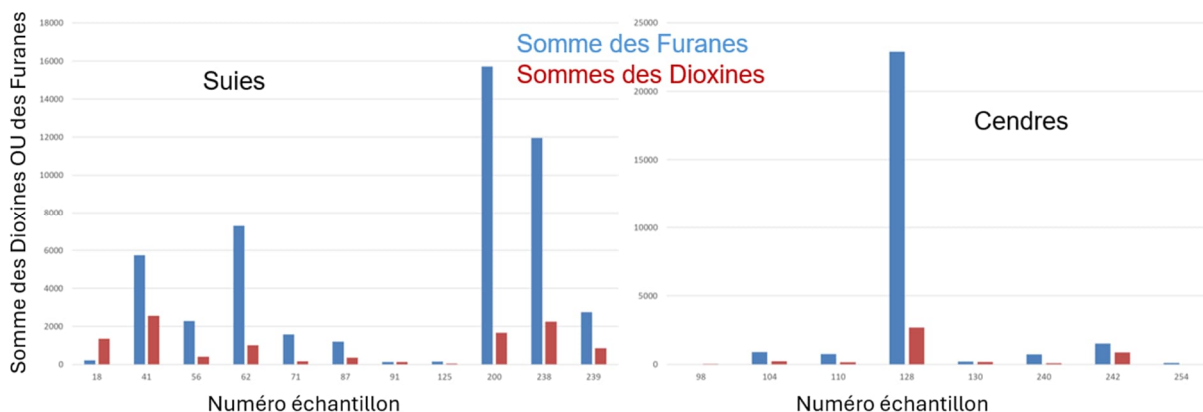


Figure 16 : Somme des dioxines (en rouge) et des furanes (en bleu) sans facteurs de pondération pour les échantillons de suies et de cendres en provenance de poêles à granulés

- **Foyer fermé/insert :**

Pour le cas des foyers fermés/inserts, la formation des dioxines semble être majoritaire dans le cas des suies. En effet, pour les suies, 8 échantillons/31 forment majoritairement des furanes alors que 23 échantillons/31 forment majoritairement des dioxines (Figure 17). L'utilisation probable de bois avec des teneurs plus ou moins élevées en chlore ainsi que de déchets de bois est supposée sur ce type de foyers (certains questionnaires l'ont mentionné) du fait de la prédominance des dioxines par rapport aux furanes. Une analyse des questionnaires sur les 23 échantillons de suies/31 générant principalement des dioxines a été réalisée mettant en avant une utilisation majoritaire comme chauffage d'appoint et l'utilisation par certains particuliers de déchets de bois (cagette, allume feu, journal, etc.). Parmi ces 23 échantillons, 5 échantillons sont issus d'une combustion lente et 4 échantillons contiennent du bistre²⁶.

À noter que pour beaucoup d'échantillons, les questionnaires n'ont été que partiellement renseignés ne permettant qu'une interprétation partielle de ces résultats.



Figure 17 : Somme des dioxines (en rouge) et des furanes (en bleu) sans facteurs de pondération pour les échantillons de suies en provenance de foyers fermés/insert a) 8 échantillons ayant plus de furanes que de dioxines b) 22 échantillons ayant plus de dioxines que de furanes – un échantillon (n° 228) a été retiré de cette figure en raison d'une teneur trop importante en dioxines qui aurait écrasé tous les autres échantillons

Pour ce qui est des échantillons de cendres, aucun mécanisme ne semble majoritaire : 10 échantillons de cendres/18 contiennent plus de furanes que de dioxines. Pour les deux cas, il s'agit de chauffages d'appoint principalement.

²⁶ Le bistre est une couche noirâtre qui se dépose sur les parois intérieures du conduit de cheminée et est composé de résidus de combustion. Cette substance ressemble à du goudron.

- **Foyer ouvert :**

Pour les foyers ouverts, la présence de dioxines semble majoritaire dans les suies alors que dans les cendres, les furanes sont majoritaires (Figure 18).

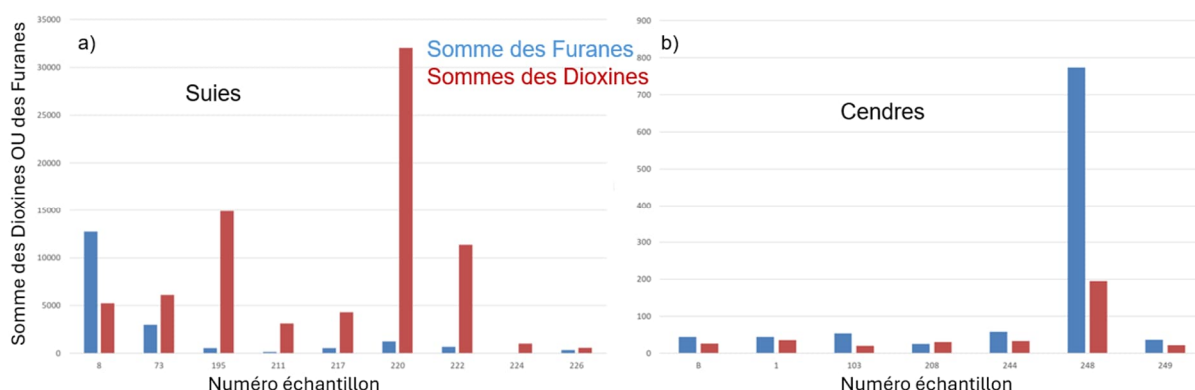


Figure 18 Somme des dioxines (en rouge) et des furanes (en bleu) sans facteurs de pondération pour les échantillons en provenance de foyers ouverts a) échantillons de suies (échantillon 223 retiré afin d'éviter un écrasement des autres histogrammes) b) échantillons de cendres (échantillon 214 retiré)

- **Poêle à bois :**

Enfin, pour les poêles à bois, les dioxines semblent majoritairement se former (pour ce qui est des suies) :

- 15 échantillons / 40 contiennent plus de furanes que de dioxines
- 25 échantillons / 40 contiennent plus de dioxines que de furanes

L'émission majoritaire de dioxines peut être liée à l'introduction possible de déchets dans le cas des poêles à bois. Néanmoins, ces éléments n'ont pas été renseignés dans les questionnaires. En comparaison avec les poêles à granulés, les échantillons de cendres/suies sont plus homogènes pour les poêles à granulés (composition homogène des granulés et absence de combustibles autres que les granulés y compris à l'allumage) ce qui est cohérent avec la formation préférentielle de furanes. À contrario, pour les poêles à bois, les résultats sont plus variables du fait de l'hétérogénéité des résidus en lien avec le fait que l'utilisateur a pu introduire des déchets de temps à autre.

Pour les cendres, aucune tendance n'est ressortie.

Enfin, pour les échantillons en provenance de chaudières à bois (3 suies et 1 cendres), chaudières à granulés (1 suie et 2 cendres), les valeurs des sommes étaient similaires entre les dioxines et les furanes.

8.2.9 Données par congénères pour les échantillons les plus émetteurs

Une étude plus approfondie par congénère a été réalisée sur les échantillons les plus émetteurs (somme des PCDD/F > 100 ng/kg PB) afin d'observer s'il y a un profil de concentration type et si un congénère est prédominant ou non. La proportion des différents congénères dans les échantillons va dépendre du type de combustible mais aussi de la technologie de combustion [Baraket N. (2022)]. Les profils de concentrations par congénères ont ainsi été extraits et sont présentés sur les figures suivantes. Pour rappel, les dioxines 2,3,7,8-TCDD et 1,2,3,7,8-PeCDD sont les plus toxiques (facteurs TEF maximaux de 1 dans l'annexe 1).

- **Suies :**

Les données par congénères sont représentées sur les figures ci-dessous.

Pour des concentrations en PCDD/F comprises entre 100 et 500 ng/kg : Figure 19 (dioxines) et Figure 20 (furanes).

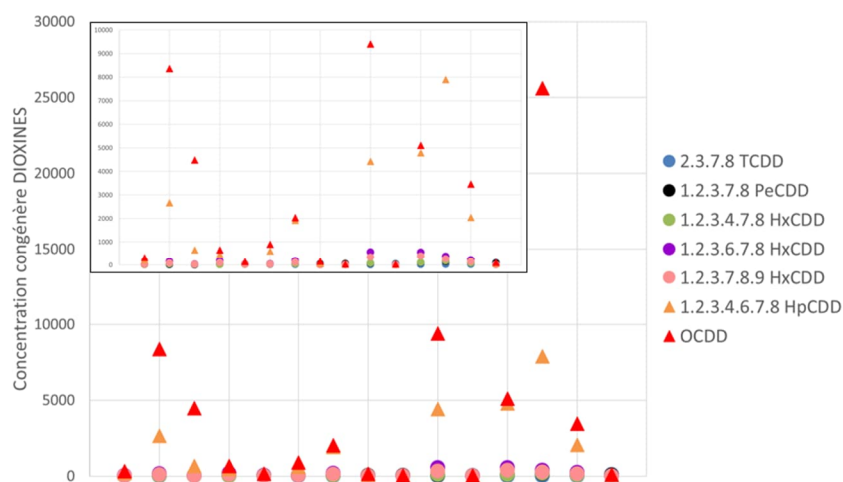


Figure 19 : Profils de concentrations par congénères PCDD (dioxines) pour les échantillons de suies ayant des concentrations en PCDD/F comprises entre 100 et 500 ng/kg

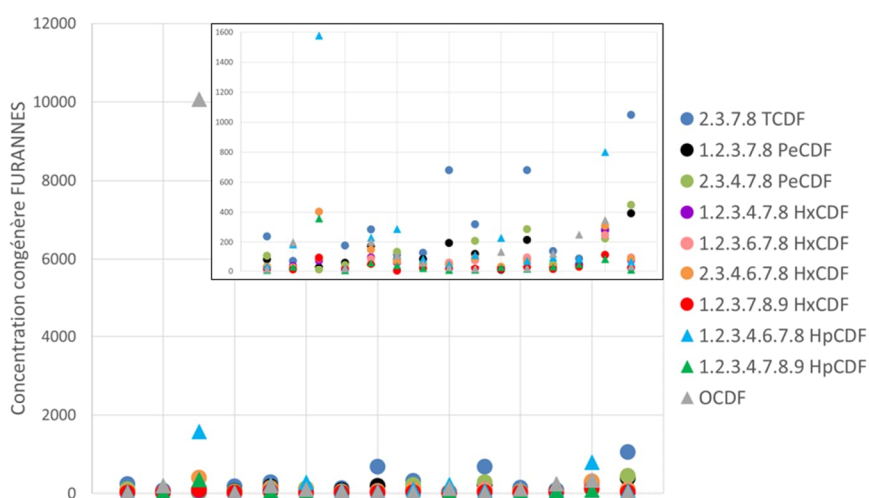


Figure 20 : Profils de concentrations par congénères PCDF (furanes) pour les échantillons de suies ayant des concentrations en PCDD/F comprises entre 100 et 500 ng/kg

Pour des concentrations en PCDD/F comprises entre 500 et 1 000 ng/kg : Figure 21 (dioxines) et Figure 22 (furanes).

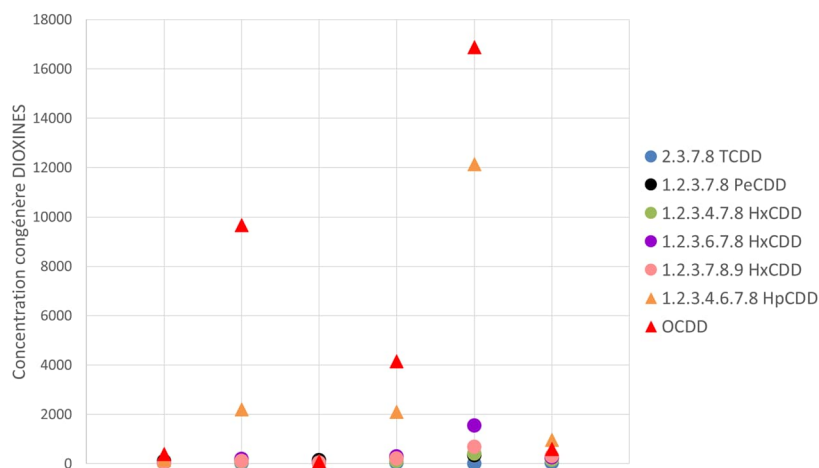


Figure 21 : Profils de concentrations par congénères PCDD (dioxines) pour les échantillons de suies ayant des concentrations en PCDD/F comprises entre 500 et 1 000 ng/kg

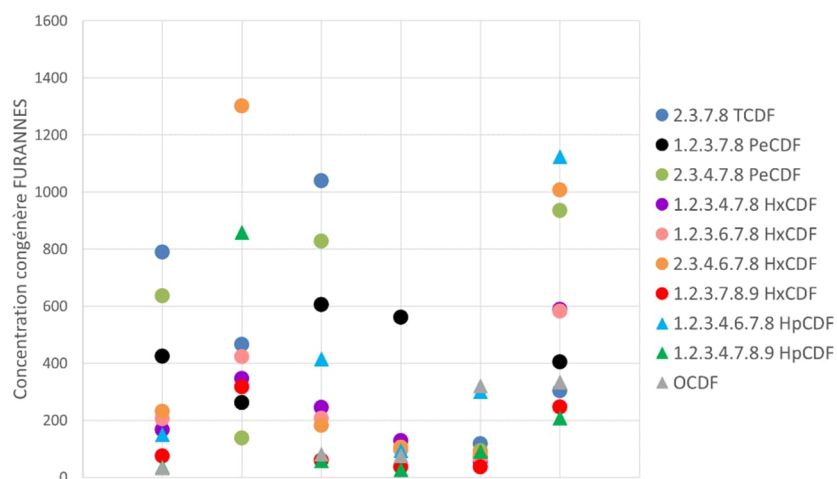


Figure 22 : Profils de concentrations par congénères PCDF (furanes) pour les échantillons de suies ayant des concentrations en PCDD/F comprises entre 500 et 1 000 ng/kg

Pour des concentrations en PCDD/F comprises entre 1 000 et 5 000 ng/kg : Figure 23 (dioxines) et Figure 24 (furanes).

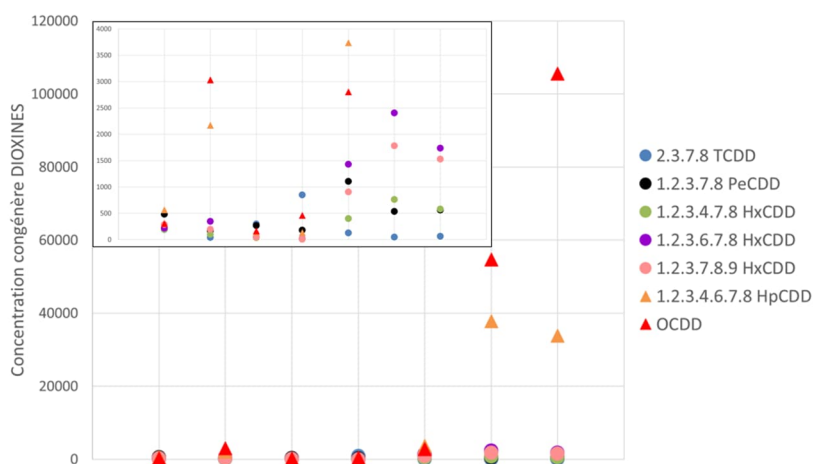


Figure 23 : Profils de concentrations par congénères PCDD (dioxines) pour les échantillons de suies ayant des concentrations en PCDD/F comprises entre 1 000 et 5 000 ng/kg

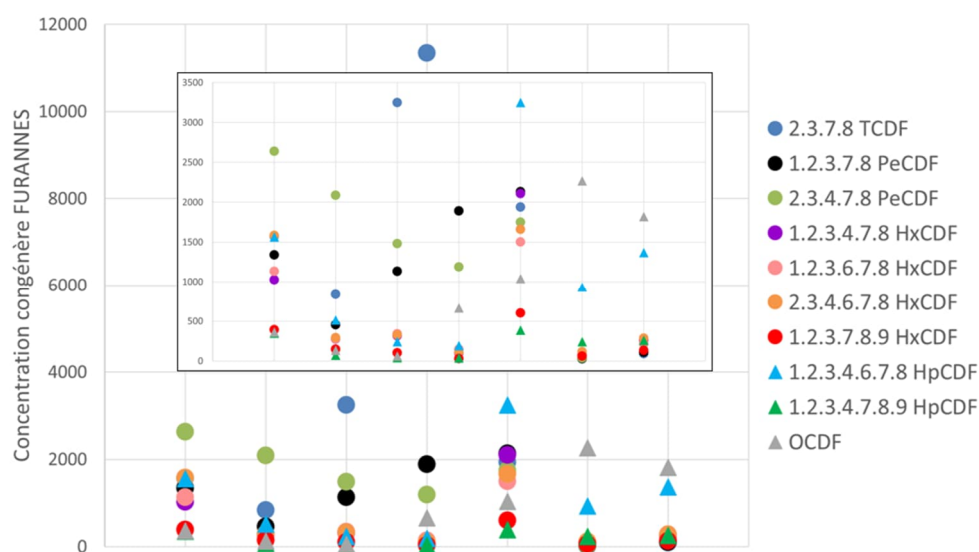


Figure 24 : Profils de concentrations par congénères PCDF (furanes) pour les échantillons de suies ayant des concentrations en PCDD/F comprises entre 1 000 et 5 000 ng/kg

Les congénères dioxines les plus chlorées (hepta - HpCDD et octa - OCDD) sont les plus présentes dans les suies. Dans le cas des furanes, la substance la moins chlorée (tétra – TCDF) prédomine. A titre comparatif, dans la thèse de Nada BARAKET, les éléments suivants issue de la littérature sont précisés [Baraket N. (2022)] :

- dans les fumées issues de la combustion de déchets de bois d'ameublement dans un réacteur tubulaire horizontal à 850°C : les congénères PCDD les moins chlorés sont le plus présents [Moreno et al. (2016)]
- dans les fumées émises par plusieurs combustions de mélanges de déchets de bois (des mélanges de bois, lignite, bois de poteaux, MDF), les congénères de PCDD les plus présents sont les moins chlorés [Samaras et al. (2001)]
- dans les fumées lors de la combustion du bois massif dans un réacteur tubulaire horizontal à 850°C, les congénères de PCDD les plus présents sont les plus chlorés [Moreno et al. (2016)]

Il est important de préciser que la déchloration est plus importante pour les PCDF que pour les PCDD, en accord avec les résultats [Brandelet, B. (2016)].

- **Cendres :**

Pour les échantillons de cendres, contrairement aux suies, aucune tendance claire n'a pu être identifiée.

8.3 Synthèse et interprétation des données

La campagne nationale réalisée a permis de collecter 55 échantillons de cendres, 96 échantillons de suies ainsi que 3 échantillons appelés « mix » issus des cuves d'aspirateurs.

Pour les échantillons de cendres, la majorité des échantillons ont des teneurs faibles en dioxines/furanes (< 100 ng/kg). Seulement 5 échantillons ont des valeurs plus importantes mais inférieures au seuil du règlement POP et sont issues de poêles à granulés, de foyer fermé et de chaudières à granulés.

Pour les suies, deux tiers des échantillons ont des teneurs faibles en dioxines/furanes (< 100 ng/kg). Le reste des échantillons ont des valeurs plus importantes et sont principalement issues de foyers ouverts, de poêles à bois et de poêles à granulés. Un seul échantillon dépasse la valeur seuil du règlement POP de 5 000 ng/kg et est issu d'un poêle à bois – aucune autre information n'est disponible sur cet échantillon. Pour les échantillons de suies ayant les plus fortes teneurs en PCDD/F (> 100 ng/kg), les congénères dioxines les plus chlorées sont les plus présentes alors que pour les furanes, il s'agit de la substance la moins chlorée (tétra – TCDF).

À partir des résultats obtenus sur les échantillons collectés, plusieurs hypothèses peuvent être avancées quant à l'origine de la présence de dioxines dans ces échantillons, sans mention particulière de l'introduction de déchets contenant du chlore dans le foyer.

- **Présence de chlore et lien avec le combustible :**

En théorie, des teneurs de la somme des dioxines > 500 ng/kg est un indicateur que des déchets ont été probablement introduits dans le foyer (voir section 8.2.4) ; dans ces cas la proportion de dioxines devrait être supérieures à celles des furanes. Néanmoins, en l'absence d'indications de la présence ou non de ces déchets dans les questionnaires, il n'a pas été possible de relier ces fortes teneurs à des déchets particuliers.

Dans les cas de l'utilisation de briquettes (bûches condensées), il peut y avoir dans certains cas à la marge des composants différents du bois, pouvant être à l'origine de chlore mais la grande majorité est composée purement de biomasse. Les caractéristiques des briquettes sont réglementées par la norme NF EN ISO 17225-3. De plus, la norme NF EN ISO 17225-7 impose des critères sur la provenance de biomasse herbacée, fruitière, aquatique ou des mélanges et assortiments. Des déchets peuvent être introduits tels que des déchets de production de café, des déchets de production d'huile de palme, du carton, etc. et certaines briquettes commerciales peuvent aussi contenir de la cire ou des excréments animaliers [Projet DENSICOMB (2022)].

Il existe de nombreux articles sur l'influence des embruns marins (exposition du bois au sel marin ou bien utilisation de sel sur les routes). En effet, des teneurs plus élevées en chlore sont souvent observées dans le bois exposé aux embruns marins. Ainsi, une comparaison en fonction des distances à la mer du foyer (en faisant l'hypothèse de sources locales en bois) a été réalisée. Néanmoins, il n'a pas été possible de conclure par rapport à ce paramètre.

- **Qualité de combustion et conditions de fonctionnement de l'appareil de chauffage :**

Les entretiens avec différentes entreprises de ramonage ont révélé qu'une grande partie des utilisateurs ne savent pas vraiment ce qu'est une combustion complète et n'ont pas forcément conscience des impacts d'une mauvaise combustion sur la qualité de l'air et la toxicité des résidus formés.

- **Les poêles à granulés :**

Pour le cas particulier des poêles à granulés, les hypothèses suivantes peuvent être avancées :

- il existe deux types de fonctionnement : un fonctionnement normal ou en dysfonctionnement (manque d'air local). Dans ce dernier cas, un dysfonctionnement va créer beaucoup plus de suies que prévu et pourrait engendrer des émissions de dioxines (observé dans 1 cas sur 3) [ADEME (2022)] ;
- les dioxines peuvent principalement se former pendant les phases transitoires (combustion moins bien maîtrisée lors des changements de puissances) ou lors de la fin de combustion (phase d'arrêt du poêle) /nettoyage automatisé (forte injection d'air pour brûler les imbrulés) ou lors de l'allumage. Le bois contient du chlore en faible quantité qui peut se retrouver dans les cendres (potentiel de chlore imbrulé). Cependant, le chlore est en grande partie volatilisé sur les installations à forte puissance avec formation majoritaire de HCl et aussi de sels tels que KCl [Sommersacher et al. (2012)]. La formation de dioxines a probablement lieu, en particulier pour les poêles à granulés, lors de la phase de démarrage et/ou de refroidissement lorsque les conditions de combustion sont moins bien maîtrisées. Lors de la phase de refroidissement en particulier, la température dans les foyers n'est pas assez élevée ;
- les échantillons concentrés en dioxines issus de poêles à granulés contiennent majoritairement des furanes, en accord avec leur potentiel de formation lors de la phase d'arrêt du poêle (fin de la combustion = conditions dégradées) et s'il reste du chlore dans les cendres ;
- les poêles à granulés produisent très peu de cendres et de suies. Ainsi, si des dioxines sont émises, elles se retrouvent fortement concentrées du fait de la faible quantité de résidus générés. Il serait alors pertinent d'exprimer les taux de dioxines par rapport au % de combustible introduits pour tous les foyers et comparer les données obtenues de cette manière²⁷. Néanmoins, les taux de combustibles introduits ne sont pas connus pour les échantillons collectés ;
- La norme NF EN ISO 17225-28 garantit la qualité des granulés pour les consommateurs (teneur en chlore pour les granulés de classe A1 < 0.02% et A3 < 0.03%). Néanmoins, les entretiens réalisés avec laboratoires de recherche ont mis en évidence qu'il peut exister des lots de granulés qui ne répondent pas aux normes de fabrication.
- Il faut très peu de chlore pour former des dioxines (Cl en mg/kg alors que dioxines exprimées en ng/kg).

²⁷ Les taux de cendres sont d'environ 0.5% pour les granulés, 1 à 2% pour les bûches mais s'il y a beaucoup d'écorce, ce taux peut être supérieur.

9 Conclusion

Les principaux paramètres entraînant la présence de PCDD/F et PCB-dl dans les cendres et les suies des foyers domestiques ainsi que les cendres volantes des unités biomasse sont la présence de chlore et la mauvaise qualité d'une combustion. Ainsi, l'emploi de combustibles avec des teneurs en chlore négligeables (bois bûche, non contaminé ou souillé par des produits chlorés) reste le meilleur moyen de limiter la production et l'émission de dioxines lors des combustions réalisées dans les installations de chauffage domestiques et dans les unités biomasse de plus fortes puissances (> 1 MW). En cas de présence de chlore dans le combustible de départ, les principaux paramètres à prendre en compte afin de se rapprocher d'une combustion complète et réduire les émissions de dioxines (mais aussi des autres polluants de façon plus globale) par les foyers domestiques sont synthétisés ci-dessous ; les acteurs qui ont un rôle par rapport à ces paramètres sont également précisés :

- Installateurs : dimensionnement de l'installation, tirage adapté
- Fabricants d'appareils : meilleurs efficacité et performances énergétiques de l'appareil, notice promouvant les bonnes pratiques et sans référence à des pratiques générant des polluants (ex : le fonctionnement à allure réduite), vieillissement
- Utilisateurs : qualité du combustible, charge introduite, mode d'allumage, allure de marche, gestion des entrées d'air, entretien mais aussi remplacement des vieux appareils, sensibilisation à l'utilisation des appareils dans des conditions de combustion complètes (par l'Ademe, les fabricants, les ramoneurs, etc.)
- Fournisseurs de bois : Humidité, dimension des bûches, essence, présence d'écorce, qualité des combustibles non contaminés par des substances chlorées

Les teneurs en PCDD/F et en PCB-dl dans ces cendres et suies issues du chauffage domestique mais également dans les cendres volantes des unités biomasse ont été recherchées afin de les positionner par rapport à la teneur seuil de 5 µg/kg du règlement POP concernant ces polluants dans les déchets.

Concernant les résidus (suies et cendres) des foyers domestiques, peu de données sur les teneurs en dioxines sont disponibles dans la littérature et elles concernent majoritairement des études assez anciennes (< 2006). Étant donné l'évolution du parc des installations domestiques au cours des vingt dernières années, ces données ne sont pas représentatives des modes de consommation actuels des Français. Une campagne de mesure nationale a donc été réalisée qui a conduit à collecter 55 échantillons de cendres, 96 échantillons de suies ainsi que 3 échantillons issus de cuves d'aspirateurs de ramoneurs. Tous les types de foyer ont été concernés par cette campagne : foyer ouvert, foyer fermé/insert, poêle à bois, poêle à granulés, chaudière à granulés et chaudière à bois. Les poêles à bois ainsi que les foyers fermés/inserts sont les foyers les plus représentés dans cette campagne nationale. Bien que chaque échantillon ait été accompagné d'un questionnaire sur les conditions d'usage de l'appareil de combustion concerné, peu d'informations ont été collectées.

Au regard des valeurs des sommes des PCDD/F mesurées dans les 55 échantillons de cendres collectés, aucun des échantillons n'est classé POP (valeurs inférieures à 5 000 ng/kg PB). Un seul échantillon de cendres issu d'un poêle à granulés a une teneur en dioxines/furanes > 500 ng/kg PB. D'après la bibliographie, les valeurs de concentrations des dioxines/furanes > 500 ng/kg sont susceptibles d'être liées à l'ajout de bois adjuvanté ou de déchets ou à des conditions de combustion dégradées soit sur la totalité de la combustion (ex. en cas d'apport d'air bridé) soit lors de certaines phases (démarrage, changement de puissance).

Parmi les 96 échantillons de suies collectés, un seul échantillon est classé POP (valeur supérieure à 5 000 ng/kg PB). Cet échantillon est issu d'un poêle à bois et aucune information n'est disponible dans le questionnaire associé concernant les combustibles brûlés. Néanmoins, 15% des échantillons de suies (soit 14 échantillons) ont une teneur en dioxines/furanes élevée (> 500 ng/kg PB). Les types de foyers à l'origine des plus fortes teneurs en PCDD/F sont les foyers ouverts, les poêles à bois et les poêles à granulés.

Enfin, les teneurs en PCB-dl mesurées dans tous les échantillons sont très faibles. Les cendres et les suies issues des installations de chauffage domestique au bois ne sont donc pas des déchets POPs.

Concernant les installations biomasse, leur encadrement réglementaire, notamment par la mise en place de VLE dans les rejets atmosphériques et les cendres, permet de limiter la présence de polluants tels que les dioxines dans les cendres volantes. Ces installations doivent donc continuer à être surveillées, d'autant plus que leur nombre est amené à croître au cours des prochaines années (mix énergétique). Sur les cendres volantes, un certain nombre de données sur les teneurs en

dioxines/furanes sont disponibles dans la littérature et les études ont été réalisées sur des périodes plus récentes. Ces données sont donc représentatives et sont jugées suffisantes. Aucun échantillon de cendres volantes n'a donc été collecté. Au regard des valeurs présentées dans la littérature, les cendres volantes des installations biomasse ne sont pas des déchets POPs.

10 Références

Académie d'Agriculture de France (2015) ; La combustion du bois contribue-t-elle à la pollution de l'air ?

Ademe (2016) - Se chauffer au bois

Ademe (2018), Solagro, Biomasse Normandie, BVA. Étude sur le chauffage domestique au bois : Marchés et approvisionnement. 97 pages

Ademe (2019). Les avis de l'ADEME - La chauffage domestique au bois - Mai 2019.

Ademe (2023) - Jean Claude Migette, Marie Calvin, CODA Stratégies. 2023. Enquête sur les prix des combustibles bois pour le chauffage domestique en 2022, 103 pages

Afssa (2005). Dioxines, furanes et PCB de type dioxine : Evaluation de l'exposition de la population française.

Bacher, Reiner, Max Swerev, and Karlheinz Ballschmiter. "Profile and pattern of monochloro-through octachlorodibenzodioxins and-dibenzofurans in chimney deposits from wood burning." *Environmental science & technology* 26.8 (1992): 1649-1655.

Baraket, N. (2022). Étude et compréhension de la formation et de la destruction de dioxines lors de la combustion de déchets bois en chaudières automatiques (Doctoral dissertation, Université de Lorraine).

Bartet, Bernard, Guillaume Pepin, and Michel Nomine. "Dioxine dans les MIOM Teneurs observées et étude préliminaire de leur potentiel de transfert vers l'environnement." *Colloque MIOM 2001*. Oct 2001, Orléans, France. pp.118-123. ineris-00972239

Brandelet, B. (2016). Caractérisation physico-chimique des particules issues du chauffage domestique au bois (Doctoral dissertation, Université de Lorraine).

BiPRO (2005): Study to facilitate the implementation of certain waste related provisions of the Regulation on Persistent Organic Pollutants (POPs):
https://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/pops_waste_full_report.pdf

Björn Hedman, Morgan Näslund, and Stellan Marklund; Emission of PCDD/F, PCB, and HCB from Combustion of Firewood and Pellets in Residential Stoves and Boilers - *Environ. Sci. Technol.* 2006, 40, 4968-4975.

Quaß, Ulrich, Michael Fermann, and G. Broeker. "Identification of relevant industrial sources of dioxins and furans in Europe (The European Dioxin Inventory). Final report." (1997).

Cheruiyot, N.K., Lee, W.J., Yan, P., Mwangi, J.K., Wang, L.C., Gao, X., Lin, N.H. and Chang-Chien, G.P. (2016). An Overview of PCDD/F Inventories and Emission Factors from Stationary and Mobile Sources: What We Know and What is Missing. *Aerosol Air Qual. Res.* 16: 2965-2988.

Citepa, 2023. Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques. Bilan des émissions en France de 1990 à 2022. Rapport Secten éd. 2023.

Collet Serge. Les émissions de polluants par les foyers domestiques. *Pollution Atmosphérique : climat, santé, société*, 2009, Numéro special mars, pp.83-90.

Collet Serge (2000) ; Rapport INERIS –DRC-n°00/60-MAPA-SCo-25420 ; Facteurs d'émission - Emissions de dioxines, de furanes et d'autres polluants liés à la combustion de bois naturels et adjuvants ; MINISTERE DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE ET DE L'ENVIRONNEMENT

Dumler-Gradl, R., H. Thoma, and O. Vierle. "Research program on dioxin/furan concentration in chimney soot from house heating systems in the Bavarian area." *Organohalogen Comp* 24 (1995): 115-118.

Dyke P. H., Foan C., Wenborn M., Coleman P. J., A review of dioxin releases to land and water in the UK, *The science of the total environment*, 207, pp 119-131, 1997

Esteban 2014-2016. Santé publique France (2014). Imprégnation de la population française adulte par les PCB, dioxines et furanes. Programme national de biosurveillance,

European Commission, Directorate-General for Environment, Upson, S., Footitt, A., BiauDET, H. et al., Study to support the assessment of impacts associated with the review of limit values in waste for POPs listed in Annexes IV and V of Regulation (EU) 2019/1021 – Final report for DG Environment, Publications Office of the European Union, 2021, <https://data.europa.eu/doi/10.2779/63162>

Fiche PCB ; PREFECTURE DE LA REGION RHONE-ALPES. Fiche rédigée par la CIRE Rhône Alpes. Janvier 2010.

Hansen C. L., Hansen E., Survey of dioxin emissions from PCP-treated wood, Danish Environmental Protection Agency, Project n°940, 2004

Khan, A. A., de Jong, W., Jansens, P. J., & Spliethoff, H. (2009). Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. *Fuel processing technology*, 90(1), 21-50.

Launhardt T, Strehler A, Dumler-Gradl R, Thoma H, Vierle O. PCDD/F – and HAP – emission from house heating systems. *Chemosphere* 1998 ; 37 : 2013-20

Leces, Evaluation de performances énergétiques et environnementales de chaufferies biomasse, Etude réalisée pour le compte de l'ADEME, 2008

LECES, Evaluation des performances énergétiques et environnementales de chaufferies biomasse, Etude réalisée pour le compte de l'ADEME, 2014

LECES, Evaluation des performances énergétiques et environnementales de chaufferies biomasse, Etude réalisée pour le compte de l'ADEME, 2016

Lopes, H.; Proença, S. Insights into PCDD/Fs and PAHs in Biomass Boilers Envisaging Risks of Ash Use as Fertilizers. *Appl. Sci.* 2020, 10, 4951.

Luthe C., Karidio I., Uloh V., Towards controlling dioxins emissions from power boilers fuelled with salt-laden wood waste, *Chemosphere*, Vol. 35, pp 557-574, 1997.

Michael Oehme and Markus D. Müller; Levels and congener patterns of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in solid residues from wood-fired boilers. Influence of combustion conditions and fuel type; Volume 30, Issue 8, April 1995, Pages 1527-1539.

Moreno, A. I., Font, R., & Conesa, J. A. (2016). Characterization of gaseous emissions and ashes from the combustion of furniture waste. *Waste management*, 58, 299-308.

National Toxicology Program, Department of Health and Human Services; Report on Carcinogens, Fifteenth Edition; Soots (NPT) 2021

Note de synthèse N°DRC-17-164787-10342A (2018) ; Synthèse des études à l'émission réalisées par l'INERIS sur la combustion du bois en foyers domestiques

Oehme, M.; Müller, M.D. Levels and congener patterns of polychlorinated Dibenzo-p-dioxins and Dibenzofurans in solid residues from wood-fired boilers. Influence of combustion conditions and fuel type. *Chemosphere* 1995, 30, 1527–1539.

OFEFP (1996), Incinération de déchets, de bois usagé et des résidus de bois, dans des chauffages au bois et en plein air

Paradiz, Bostjan, et al. "Dioxin emissions from coal combustion in domestic stove: Formation in the chimney and coal chlorine content influence." *Thermal Science* 19.1 (2015): 295-304.

PIEDNOIR Brice (2017) ;Thèse de doctorat : Comportement en combustion de résidus de biomasse : mise en évidence de synergies par mélange sous forme de granulés ; thèse délivrée par l'UNIVERSITE DE PERPIGNAN VIA DOMITIA

Pohlandt K., Marutzky R., Concentration and distribution of polychlorinated dibenzo-p-dioxin (PCDD) polychlorinated dibenzofuran (PCDF) in wood ash, *Chemosphere*, Vol. 28, pp 1311-1314, 1994

Rapport d'étude DRC-08-70801-15219A : Evaluation de l'impact des appareils de chauffage domestiques à bois que la qualité de l'air intérieur et extérieur (2008) – contrat ADEME – Nadine ALLEMAND, Jean-Luc BESOMBES, Serge COLLET, Corinne MANDIN, Jacques RIBERON, Eva LEOZ-GARZIANDIA

Rapport Ineris DRC-09-103316-10816A - Facteurs d'émission de polluants des installations de chauffage domestique au gaz et au fioul (2009)

Rapport Ineris DRC-12-126318-06147A-v2 - Serge Collet - Note sur l'assimilation d'un produit (bois faiblement adjuvanté) à un combustible de référence et sur la surveillance des installations classées dans la rubrique 2910B (2013)

Rapport Ineris-180235-07692-v2.0– Roseline BONNARD - Eléments pour la fixation d'une valeur limite réglementaire en PCDD/F dans les cendres de biomasse destinées à l'épandage (2019)

Rapport N° DRC-18-171115-03897A – Cécile RAVENTOS - Prélèvement de cendres générées dans des chaufferies biomasse (68) en vue de la caractérisation des cendres (2018)

Rapport Ineris DRC-17-164787-08043A – Serge COLLET - Influence de divers paramètres sur les performances environnementales et énergétiques des appareils domestiques fonctionnant au bois (2018).

Rapport INERIS-DRC-19-170785-00117A - Sabine Guerin et Serge Collet – Emissions atmosphériques de dioxines et de furannes bromés lors de feux accidentels de déchets contenant des substances bromées (2019)

Rapport Ineris - 206576 - 2740861 - v2.0 - CEA Benjamin - COUVIDAT FLORIAN – CUNIASSE BENJAMIN - Réévaluation des facteurs d'émission des particules totales (solide et condensable) du chauffage domestique au bois : Impacts sur les inventaires d'émission (2022)

RECORD 14-0913/1A ; Valorisation des cendres issues de la combustion de biomasse ; Revue des gisements et des procédés associés (2016)

RECORD 96-0208/1A ; Conditions et mécanismes de formation à basses températures (200 à 400°C) des dibenzodioxines, dibenzofurannes polychlorés : Etude bibliographique (1997)

Référentiels combustibles bois énergie de l'ADEME – Définition et exigences (2017) - Blandine ROBERT, Gaëtan REMOND, Rémi GROVEL, Vincent NAUDY, Isabelle ZDANEVITCH, Serge COLLET, Hélène PARTAIX

Rogaume, Y. (2009). La combustion du bois et de la biomasse. Pollution Atmosphérique, Climat, Santé, Société, Numéro spé, 65–82
Sawerysyn, J. (2012). La Combustion Du Bois Et Ses Impacts Sur La Qualité De L ' Air. Air Pur, 81(2009), 7–16.

Samaras, P., Skodras, G., Sakellaropoulos, G. P., Blumenstock, M., Schramm, K. W., & Kettrup, A. (2001). Toxic emissions during co-combustion of biomass–waste wood–lignite blends in an industrial boiler. Chemosphere, 43(4-7), 751-755.

Schatowitz B, Brandt G, Gafner F et al. Dioxin emissions from wood combustion. Chemosphere 1994 ;29 : 2005-13

Sommersacher P., Brunner T., Obernberger I. (2012). Fuel indexes: a novel method for the evaluation of relevant combustion properties of new biomass fuels. Energy & Fuels 26, 380-390.

J. SCHOBING, A. MEYER, G. LEYSSENS, N. ZOUAOU, F. CAZIER, D. DEWAELE, P. GENEVRAY, C. PUSCA, F. GOUTIER. Emissions de polluants générés par la combustion de bûches densifiées - Projet DENSICOMB : Application aux appareils domestiques, (2022).

Serge COLLET (Ineris), Céline LE DREFF (CSTB), Brice GUENEGO (Wigwam Conseil), Claire ROUSSEY (Wigwam Conseil), Céline LABOUBEE (Solagro), ADEME, 2022. PERFORMANCES REELLES DE POELES A GRANULES. 69 pages.

Tame, N.W.; Dlugogorski, B.Z.; Kennedy, E.M. Formation of dioxins and furans during combustion of treated wood. Prog. Energy Combust. Sci. 2007, 33, 384–408.

Thoma, H. "PCDD/F-concentrations in chimney soot from house heating systems." Chemosphere 17.7 (1988): 1369-1379.

- Timonen, H., Mylläri, F., Simonen, P., Aurela, M., Maasikmets, M., Bloss, M., ... & Rönkkö, T. (2021). Household solid waste combustion with wood increases particulate trace metal and lung deposited surface area emissions. *Journal of Environmental Management*, 293, 112793.
- Trouve Gwenaëlle, Delfosse Lucien. La formation des dioxines dans les incinérateurs : Quel mécanisme ?. *Environnement, Ingénierie & Développement*, 1998, N°11 - 3ème Trimestre 1998, pp.17-26.
- U.S. EPA. 2004. Exposure and Human Health Reassessment of 2,3,7,8-Tetrachlorodibenzo-P-Dioxin (Tcdd) and Related Compounds National Academy Sciences (External Review Draft) (2004). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/600/P-00/001Cb.
- Van Oostdam, Jay C., and J. EH Ward. "Dioxins and furans in the British Columbia environment." (1995).
- Vandermarken, Tara & Boonen, Imke & Van Langenhove, Kersten & Goeyens, Leo & Denison, Michael & Croes, Kim & Elskens, Marc. (2016). In vitro reporter gene activity of PCDD/Fs and dl-PCBs in wood ash from domestic heating systems (Belgium) using the H1L7.5c1 CALUX Bioassay - Poster @ Dioxin 2016 Conference at Firenze.
- Vernois, M., & Deglise, X. (2015). La combustion du bois contribue-t-elle à la pollution de l'air. *Rapport Académie d'Agriculture de France*
- Wunderli S., Zennegg M., Dolezal I., Gujer E., Moser U., Wolfensberger M., Hasler P., Noger D., Studer C., Karlaganis G., Determination of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzo-furans in solid residues from wood combustion by HRGC/HRMS, *Chemosphere*, Vol. 40, pp 641-649, 2000
- Yamamura K., Ikeguchi T., Uehara H., Study on the emission of dioxins from various industrial wastes incinerators, *Organohalogen Compounds*, Vol. 41, pp 287-292, 1999

11 Annexes

La liste des annexes est présentée ci-dessous :

- Annexe 1 : Les systèmes d'Equivalence Toxiques : I-TEQ (OTAN) et WHO-TEQ (OMS)
- Annexe 2 : Photos des échantillons de cendres composites
- Annexe 3 : Questionnaire

Annexe 1 : Les systèmes d'Equivalence Toxiques : I-TEQ (OTAN) et WHO-TEQ (OMS)

La toxicité d'un mélange complexe de dioxines est calculée à partir de la somme des concentrations individuelles des congénères (7 PCDD sur 75 et 10 PCDF sur 135) multipliées par leur facteur d'équivalence toxique (TEF) respectifs. Chaque valeur TEF reflète la toxicité d'un congénère particulier. La nomenclature OMS inclue en plus les 12 congénères de PCB de type dioxines (PCB-dl).

Tableau 10 : Facteurs d'équivalence toxique (FET) pour les PCDD, PCDF et PCB-dl en fonction de la nomenclature utilisée

	Composés	I-TEQ OTAN (1989)	WHO-TEQ OMS (1998)	WHO-TEQ OMS 2005
Dioxines (PCDD)	2,3,7,8-TCDD	1	1	1
	1,2,3,7,8-PeCDD	0,5	1	1
	1,2,3,4,7,8-HxCDD	0,1	0,1	0,1
	1,2,3,6,7,8-HxCDD	0,1	0,1	0,1
	1,2,3,7,8,9-HxCDD	0,1	0,1	0,1
	1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0,01	0,01	0,01
	1,2,3,4,6,7,8,9-OCDD	0,001	0,0001	0,0003
Furanes (PCDF)	2,3,7,8-TeCDF	0,1	0,1	0,1
	1,2,3,7,8-PeCDF	0,05	0,05	0,03
	2,3,4,7,8-PeCDF	0,5	0,5	0,3
	1,2,3,4,7,8-HxCDF	0,1	0,1	0,1
	1,2,3,6,7,8-HxCDF	0,1	0,1	0,1
	1,2,3,7,8,9-HxCDF	0,1	0,1	0,1
	2,3,4,6,7,8-HxCDF	0,1	0,1	0,1
	1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0,01	0,01	0,01
	1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0,01	0,01	0,01
	1,2,3,4,6,7,8,9-OCDF	0,001	0,0001	0,0003
PCB de type dioxines	PCB 77		0,0001	0,0001
	PCB 81		0,0001	0,0003
	PCB 105		0,0005	0,00003
	PCB 114		0,0005	0,00003
	PCB 118		0,0001	0,00003
	PCB 123		0,0001	0,00003
	PCB 126		0,1	0,1
	PCB 169		0,01	0,03
	PCB 156		0,0005	0,00003
	PCB 157		0,0005	0,00003
	PCB 167		0,00001	0,00003
	PCB 189		0,0001	0,00003

Le congénère le plus toxique (2,3,7,8-TCDD) est arbitrairement fixé à 1.

Les valeurs des TEF sont fréquemment ré-évaluées par l'OMS en fonction de l'évolution des connaissances sur la toxicité des substances. La dernière révision date de 2005 (WHO-TEQ OMS 2005). L'inclusion de nouvelles substances (comme des dioxines bromées) est en cours d'évaluation.

Pour rappel, le règlement POP utilise le système WHO-TEQ (OMS) plus pénalisant. Les différentes valeurs de facteurs d'équivalence toxique, en fonction de la nomenclature utilisée, sont répertoriées dans le Tableau 10.

Annexe 2 : Photos des échantillons de cendres composites

Les photos des échantillons de cendres ayant servi à former les échantillons de cendres composites sont présentés ci-dessous. Les échantillons sont classés du plus clair au plus foncé.



Figure 25 : Echantillon n° 257.



Figure 26 : Echantillon n°258.



Figure 27 : Echantillon n°259.



Figure 28 : Echantillon n°260.



Figure 29 : Echantillon n°261.

Annexe 3 : Questionnaire

<u>Etude des teneurs en PCDD/PCDF et PCB-dl des cendres et suies de foyers domestiques</u>	
Echantillon de cendres ou de suies ?	
Nom de la personne ou de l'entreprise ayant réalisé le prélèvement	
Lieu (ville) du prélèvement	
Date du prélèvement	
Type de foyer	
Puissance nominale (si connue)	
Usage de l'appareil (chauffage principal, appoint, agrément)	
Ramonage effectué (2 fois par an, 1 fois par an, moins d'une fois par an)	
Conditions de fonctionnement (combustion normale ou lente, si arrivée d'air bridée, etc.)	
Type de combustible / Essences de bois utilisées	
Origine géographique du bois (si connue)	
Humidité (si connue)	
Substance/matériau utilisé pour l'allumage	
Présence de déchets de bois (papier, carton, prospectus, emballages plastiques, bois peints, etc.)	
Prélèvement (sur une ou plusieurs combustions)	
Remarques éventuelles	

