

# CAMPAGNE D'ANALYSES DES CENDRES DE CHAUFFERIES BIOMASSE

---

Campagne de mesures 2018-2019

---

**SYNTHESE**

Avril  
2021



EXPERTISES

En partenariat avec :

## REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée avec l'aide d'un Comité de pilotage composé de :

- Pour l'ADEME :
  - Simon THOUIN, Ingénieur biomasse, Pilote de la mission - service Forêt, Alimentation et Économie.
  - Jérôme MOUSSET, Directeur Production et Energie Durable,
- Pour les professionnels :
  - FEDENE :
    - Marie DESCAT, responsable du pôle chaleur renouvelable et de récupération,
    - Michel BOYADJIAN, ENGIE,
    - Victor DESENCLOS, IDEX énergie,
    - Martial PARMENTIER, CORIANCE,
    - Karim TABET, DALKIA.
  - CIBE :
    - Clarisse FISCHER, Déléguée générale,
    - Stéphane COUSIN, Conseiller technique
    - Bruno CHIEZE, Direction commerciale et grands projets Compte-R,
    - Rémy AUBRY, Responsable R&D et formation WEISS France.
- Pour le Prestataire :
  - Dominique PLUMAIL, Directeur,
  - Baptiste GUIBERT, Ingénieur Projet,
  - Solveig BOURGEOIS, Ingénieure Projet.
- Pour le ministère de la transition écologique et solidaire :
  - DGEC, Services de l'efficacité énergétique et de la qualité de l'air :
    - Claire ROSEVEGUE, Adjointe au Chef de Bureau de la Qualité de l'Air,
    - Lydie GHEERAERT, Chargée de mission Emissions dans l'air des ICPE", Installations de combustion et Tours aéroréfrigérantes,
    - Louis-Marie DENOYEL, Chargé de mission Chaleur renouvelable,
  - DGPR : Rime EL KHATIB, Chargée de mission au Bureau de la Planification et de la Gestion des Déchets.

## CITATION DE CE RAPPORT

**ADEME, PLUMAIL D., BOURGEOIS S., GUIBERT B, DESANGLOIS G., CEDEN, Biomasse Conseil, FIBOIS. 2019.** Campagne d'analyses des cendres de chaufferies biomasse – 2018-2019. 18 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'oeuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

**Ce document est diffusé par l'ADEME**

**ADEME**

20, avenue du Grésillé

BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 18MAR000528

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par CEDEN  
46, Rue Gloria – 76130 Bois-Guillaume – tel : 02 35 12 44 77

Coordination technique - ADEME : Simon THOUIN  
Direction/Service : Direction Productions et Energies Durables  
Service Forêt Alimentation et Bioéconomie

# SOMMAIRE

<b>1. LE CONTEXTE .....</b>	<b>5</b>
1.1. Contexte et objectifs.....	5
1.2. Bilan national biomasse énergie .....	5
<b>2. LA METHODE .....</b>	<b>7</b>
2.1. Méthodologie .....	7
2.2. Principales limites de la méthode .....	8
<b>3. LES RESULTATS.....</b>	<b>9</b>
3.1. Les combustibles bois.....	9
3.2. Les cendres : propriétés physiques et taux .....	9
3.3. Composition des cendres : .....	9
3.3.1. Les éléments traces métalliques.....	9
3.3.2. Les composés organiques .....	11
3.3.3. La valeur agronomique des cendres.....	11
3.4. La conformité au regard des seuils réglementaires de l'arrête du 3 août 2018.....	12
3.4.1. Première obligation : teneurs maximales.....	12
3.4.2. Seconde obligation : les quantités maximales épandues.....	13
<b>4. LES ENJEUX DU RETOUR AU SOL DES CENDRES .....</b>	<b>14</b>
4.1. Enjeux environnementaux.....	14
4.1.1. Les flux d'éléments traces métalliques.....	14
4.1.2. Les flux d'éléments neutralisants et fertilisants.....	15
4.2. Enjeux économique .....	16

# 1. Le contexte

## 1.1. Contexte et objectifs

Depuis la fin des années 2000 et la mise en place du Fonds Chaleur, les installations de biomasse énergie se sont fortement développées, en particulier sur des gammes de moyennes puissances (< 20 MW). Avec la montée en puissance de la filière, la meilleure valorisation possible des cendres produites est essentielle au regard de la transition énergétique et de l'économie circulaire.

Les cendres sont un résidu de la combustion de biomasse. Leurs caractéristiques dépendent de la qualité du combustible et de la qualité de la combustion.

Selon les technologies, on retrouve 3 grands types de cendres :

- Les cendres sous foyer
- Les cendres sous multi-cyclone
- Les cendres sous équipement de traitement de fumées (de type filtre à manches et électrofiltres).

A ce jour, le mode de valorisation des cendres biomasse le plus développé est l'épandage agricole.

Les arrêtés ICPE 2910 « déclaration » et « enregistrement » autorisent depuis 2013, l'épandage des cendres « sous équipement de combustion », sous réserve de respect de teneurs seuils en éléments traces organiques et métalliques.

La fiche technique combustion n°7 du MTES précise qu'en l'état actuel des connaissances, les cendres « sous équipement de combustion » doivent être considérées comme les cendres sous foyer à l'exclusion d'un éventuel mélange de cendres « sous foyer » et « sous multicyclone ».

Les installations de combustion biomasse sur la gamme de moyenne puissance (ICPE 2910 « déclaration » et « enregistrement ») recueillant très majoritairement sous le même convoyeur humide les cendres « sous foyer » et « sous multicyclone »; une majorité d'installations sont ainsi exclues d'une possibilité d'épandage.

Dans ce contexte, **une campagne d'analyse des cendres biomasse**, élaborée conjointement avec le MTES, l'ADEME et les professionnels de la filière est lancée. Elle doit fournir une meilleure visibilité sur les caractéristiques des cendres, et permettre une éventuelle évolution réglementaire sur l'épandage des cendres « sous foyer » et « sous multicyclone » collectées en mélange.

Les principaux objectifs visés par l'étude sont les suivants :

- Analyser les caractéristiques physico-chimiques des différents types de cendres (Eléments Traces Métalliques (ETM), Composés Traces Organiques (CTO), Valeurs agronomiques, ...);
- Evaluer les teneurs en éléments chimiques des différents types de cendres au regard des seuils et flux réglementaires d'épandage agricole;
- Evaluer les enjeux nationaux environnementaux et économiques de la valorisation agricole des cendres biomasse.

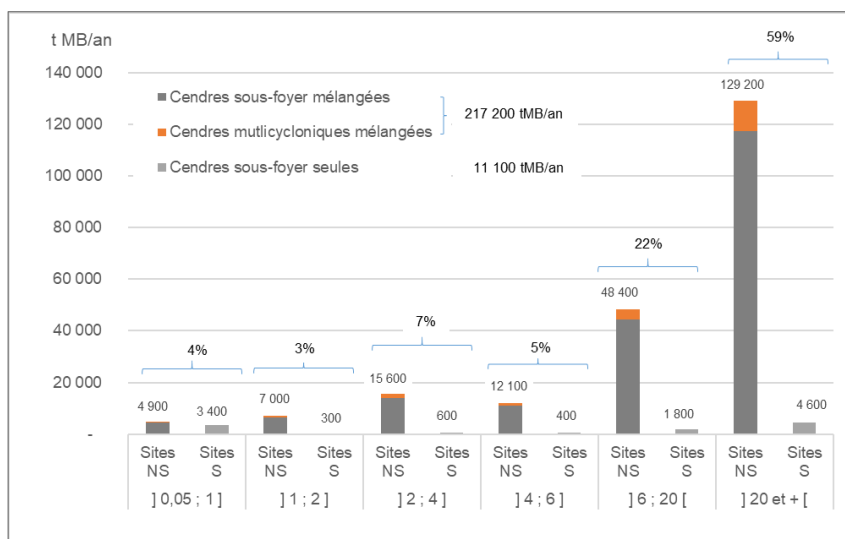
## 1.2. Bilan national biomasse énergie

En France, on dénombre 6 550 chaufferies biomasse.

Catégorie de puissance	Chaufferies bois		Puissance installée		Consommations	
	nombre	%	MW	%	MWh PCI/an	%
] 0,05 ; 1 ]	5 450	83	1 040	12	2 350 000	6
] 1 ; 2 ]	400	6	570	7	1 750 000	5
] 2 ; 4 ]	350	5	870	10	3 000 000	8
] 4 ; 6 ]	100	2	580	7	2 320 000	6
] 6 ; 20 [	190	3	1 900	22	8 250 000	22
] 20 & + [	60	1	3 700	43	19 350 000	52
<b>Total</b>	<b>6 550</b>	<b>100</b>	<b>8 660</b>	<b>100</b>	<b>37 020 000</b>	<b>100</b>

Tableau 1 : Nombre de chaufferies biomasse en France métropolitaine et consommation de biomasse - Source : CIBE

À l'échelle nationale, le flux de cendres sous foyer seules ou en mélange s'élèvent à 228 000 t/an. Les chaufferies de plus de 20 MW sont les moins nombreuses, mais elles génèrent près de 60 % du flux de cendres sous foyer.



Site S = chaufferie dont la collecte des cendres sous-foyer et sous multicyclone est séparée

Site NS = chaufferie dont la collecte des cendres sous-foyer et sous multicyclone n'est pas séparée

Figure 1 : Estimation de la production de cendres de biomasse en France métropolitaine

## 2. La méthode

### 2.1. Méthodologie

La campagne d'analyses portant sur 30 sites ICPE 2910A a été engagée durant la saison de chauffage 2018/2019. Le panel est constitué :

- de 13 sites dont la collecte des cendres sous-foyer et sous multicyclone est séparée (Sites S)
- de 17 sites dont la collecte des cendres sous-foyer et sous multicyclone est effectuée en mélange (Sites NS)

Les différents types de cendres étudiés dans le cadre de cette étude sont :

- Pour les chaufferies dont la collecte des cendres est séparée (Sites S):
  - Les cendres sous-foyer séparées (CF);
  - Les cendres multicycloniques séparées (MCS);
- Pour les chaufferies dont la collecte des cendres est en mélange (Sites NS):
  - Les cendres sous-foyer et sous-multicyclone, également appelées cendres mixtes (CM);
  - Les cendres multicycloniques non séparées (MCNS), qui ont été nécessitées un aménagement d'un système de prélèvement spécifique.

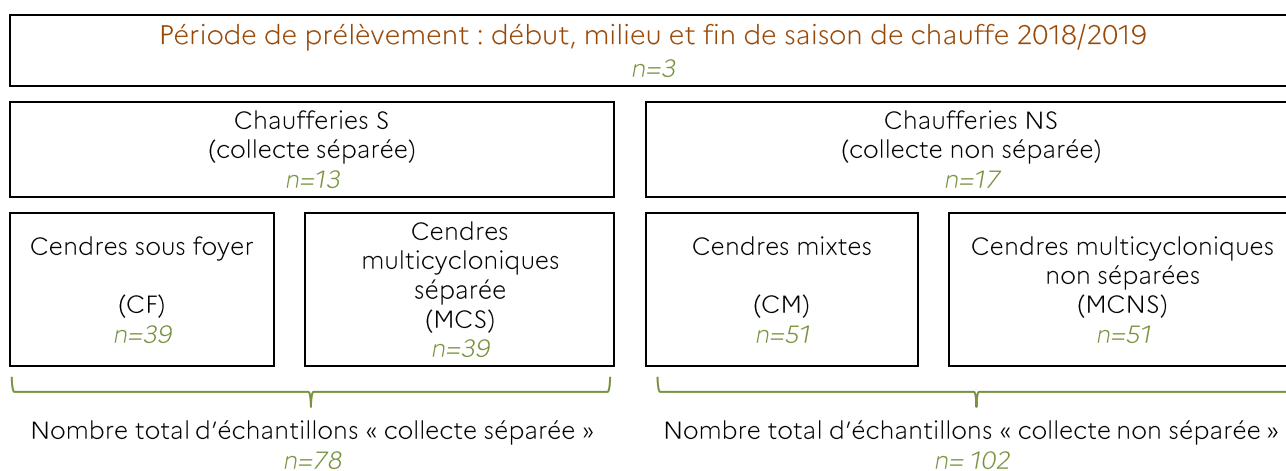


Figure 2 : Résumé du plan d'échantillonnage

Des **prélèvements de combustibles** ont également été réalisés, soit 1 prélèvement par chaufferie ( $n=30$ ) et par campagne ( $n=3$ ), ce qui représente au total **90 échantillons de bois**.

Ces prélèvements visent à caractériser les combustibles bois utilisés et d'identifier une éventuelle influence de la qualité de ceux-ci sur la composition et/ou le taux de cendres.

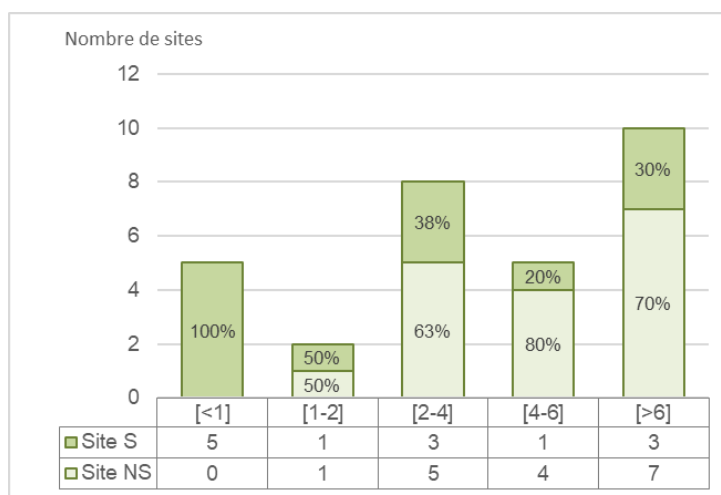


Figure 3 : Nombre de chaufferies selon le mode de séparation des cendres et par gamme de puissance bois

## 2.2. Principales limites de la méthode

- Le panel des sites ne séparant pas les cendres sous foyer et les cendres multicycloniques (type NS) ont pour la plupart nécessité un aménagement pour extraire ponctuellement les cendres multicycloniques. Pour prélever ces dernières, les installations ont dû être arrêtées puis redémarrées. Cet arrêt a entraîné une modification des conditions de la combustion (baisse de la charge chaudière, refroidissement ponctuel du foyer, modification brusque des volumes d'air introduit, fonctionnement en régime transitoire suite au redémarrage de l'installation...), et ainsi modifier la qualité des cendres multicycloniques (MCNS) collectées séparément pour les besoins de la campagne.
- Bien que 90 échantillons de combustible bois aient été analysés, la relation statistique entre la composition des combustibles bois et celle des cendres n'a pu être clairement établie. Les échantillons de biomasse ne correspondent pas exactement aux cendres prélevées après la combustion.



## 3. Les résultats

### 3.1. Les combustibles bois

Les analyses montrent que les combustibles bois utilisés lors de la campagne de caractérisation des cendres 2018/2019 respectent les seuils de la procédure SSD pour les bois d'emballage.

- Les teneurs en mercure, en PCP et en PCB sont, sauf exception, en dessous de la limite de quantification.
- Le plomb et l'arsenic présentent des concentrations inférieures au seuil de quantification (excepté un échantillon présentant une teneur en plomb particulièrement élevée, et un échantillon présentant une teneur en arsenic particulièrement élevée)
- Le cadmium n'est pas détecté dans les 2/3 des échantillons et sur le 1/3 restant les teneurs sont au maximum 5 à 6 fois inférieures au seuil de la procédure SSD pour les bois d'emballage.
- Le cuivre, le chrome et le zinc sont décelés dans plusieurs échantillons, mais à des teneurs inférieures aux seuils de l'arrêté du 29 juillet 2014 relatif aux seuils de la procédure SSD pour les bois d'emballage (excepté un échantillon présentant une teneur en zinc particulièrement élevée).

### 3.2. Les cendres : propriétés physiques et taux

Les cendres CF et CM présentent des masses volumiques similaires. Les cendres sous-foyer et sous-multicyclone collectées en mélange proviennent d'une extraction par voie humide (16/17), alors que les cendres collectées séparément sont extraites par voie sèche (9/13). Le taux de matière minérale est plus élevé dans les cendres CF que dans les cendres CM.

Le taux global de cendres fluctue entre 0,79 et 3,14 % de la matière sèche du combustible.

Les taux de cendres (exprimés en % de la MS des cendres sur la MS du combustible) s'élèvent en moyenne à :

- Cendres sous-foyer : 1,78 (Sites S) à 1,82 % (Sites NS),
- Cendres multicycloniques (Site S) : 0,20 à 0,30 %.
- Poussières de filtration (Sites S et Sites NS) : 0,10 à 0,16 %.

La répartition massique (% de la MS) entre les types de cendres est en moyenne la suivante :

- Cendres sous-foyer : 82 %,
- Cendres multicycloniques : 10 %,
- Poussières de filtration : 8 %.

### 3.3. Composition des cendres :

#### 3.3.1. Les éléments traces métalliques

Les résultats en matières d'éléments traces métalliques des différents types de cendres analysées sont présentés ci-dessous.

mg/kgMS	Teneurs moyenne cendres sous foyer (CF)	Teneurs moyenne cendres mixtes (CM)	Teneurs moyennes Cendres multicycloniques séparées (MCS)	Teneurs moyennes Cendres multicycloniques non séparées (MCNS)	Seuils réglementaires épandage
Cr	71,2	108,9	72,1	125,1	1000
Ni	24,9	25,4	29,1	31,5	200
Cu	100,0	172,4	118,0	205,6	1000
Zn	124,6	326,6	613,0	1759,8	3000
Cd	1,3	4,7	11,2	27,3	10
Pb	25,6	44,9	52,1	193,8	800
Hg	0,10	0,11	0,11	0,15	10

Tableau 2 : Résultats teneurs moyennes en ETM dans les cendres sous-foyer, mixtes et multicycloniques

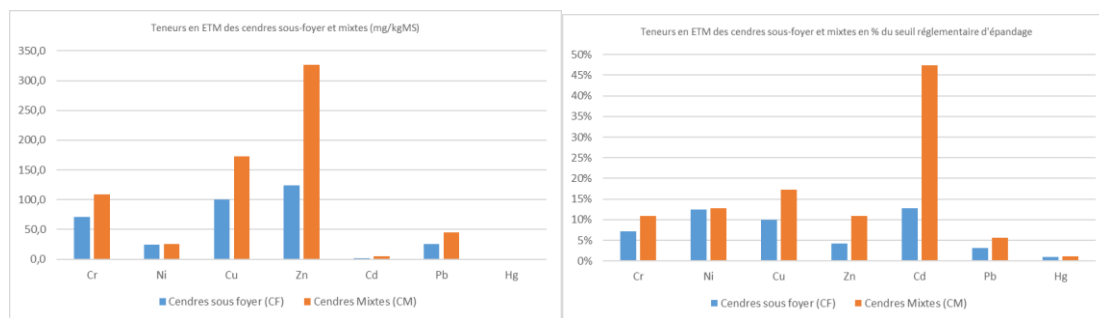


Figure 3 : Résultats teneurs moyennes en ETM dans les cendres sous-foyer et mixtes

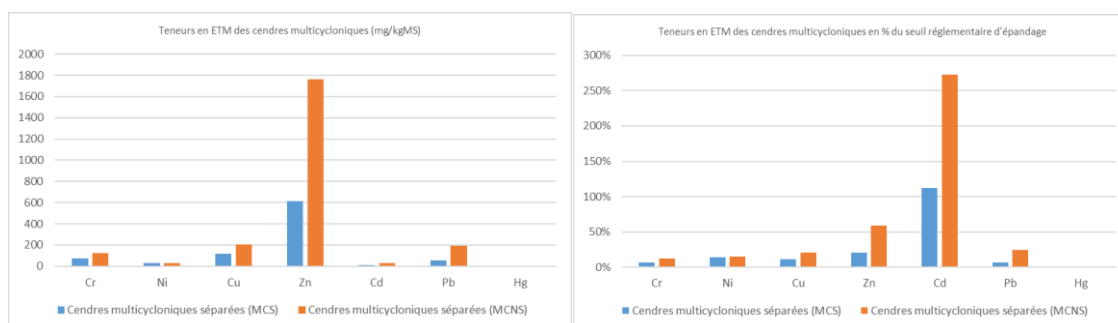


Figure 4 : Résultats teneurs moyennes en ETM dans les cendres multicycloniques

Les ETM les plus présents dans les **cendres sous-foyer et cendres mixtes** sont les oligo-éléments zinc, cuivre et chrome.

Les ETM les plus présents dans les **cendres sous multicyclones des installations séparées (MCS)** sont le zinc, et dans une moindre mesure le cuivre et le chrome.

Pour les **cendres sous multicyclones des installations non séparée (MCNS)**, les ETM les plus présents sont également le zinc, et dans une moindre mesure le cuivre et le chrome, ainsi que le plomb.

Les **cendres sous foyers (CF)** présentent des teneurs en ETM plus faibles que les **cendres mixtes (CM)**, sauf pour le nickel où les teneurs sont relativement équivalentes.

Les **cendres multicycloniques** présentent globalement des **teneurs en ETM plus élevées** que les **cendres sous foyer ou mixtes**.

- Les **cendres multicycloniques** présentent des teneurs en **chrome, cuivre et nickel** légèrement plus élevées (relativement équivalente) que les **cendres sous foyer ou mixtes**.
- Les **cendres multicycloniques** présentent des teneurs en **zinc, cadmium et plomb** plus élevées que les **cendres sous foyer ou mixtes** (en particulier pour les MCNS dont les teneurs sont nettement plus élevées, pour les MCS les teneurs sont légèrement plus élevées).

Les **cendres sous foyers (CF)** et les **cendres mixtes (CM)** présentent de faibles teneurs en éléments traces métalliques, inférieures aux teneurs des **seuils réglementaires de l'épandage** (à l'exception de 6 échantillons qui ne respectent pas le seuil réglementaire pour le cadmium).

- Les **cendres sous-foyer** présentent des teneurs moyennes en ETM entre 3 et 12% des seuils réglementaires d'épandage suivant les ETM, sauf pour le mercure qui semble quasi absent.
- Les **cendres mixtes** présentent des teneurs moyennes en ETM entre 6 et 17% des seuils réglementaires d'épandage suivant les ETM, à l'exception du mercure (qui semble également quasi absent), et à l'exception du **cadmium** dont la **teneur moyenne** correspond à 47% du seuil du seuil réglementaire d'épandage.

Les **cendres multicycloniques des installations séparées (MCS)** présentent des teneurs en éléments traces métalliques plus faibles que les **cendres multicycloniques des installations non séparées (MCNS)**, en particulier concernant le cadmium, le zinc et le plomb. Les teneurs en nickel restent relativement équivalentes entre les MCS et MCNS.

Il est difficile d'expliquer ces écarts importants entre les cendres MCS et MCNS ; 1 hypothèse peut néanmoins être avancée :

- Le protocole de prélèvement des cendres multicycloniques non séparées (MCNS), qui pourrait avoir une conséquence sur la formation de cendres plus riches en éléments traces métalliques.
- La qualité du combustible (dans le cadre de l'étude la corrélation directe entre combustible et cendres n'a pu être vérifiée).

Ces deux pistes mériteraient des analyses complémentaires pour être confirmées.

Les cendres multicycloniques présentent des teneurs moyennes en éléments traces métalliques qui restent faibles, inférieures aux teneurs des seuils réglementaires de l'épandage, à l'exception du cadmium.

- A l'exception du cadmium, les cendres multicycloniques des installations séparées (MCS) présentent des teneurs moyennes en ETM entre 7 et 20% des seuils réglementaires d'épandage, sauf pour le mercure qui semble quasi absent. Le cadmium présente une teneur moyenne correspondant à 112% du seuil réglementaire (légèrement au dessus du seuil réglementaire)
- A l'exception du cadmium, les cendres multicycloniques des installations non séparées (MCNS) présentent des teneurs moyennes en ETM entre 13 et 59% des seuils réglementaire d'épandage, sauf pour le mercure qui semble quasi absent. Le cadmium présente une teneur moyenne élevée correspond à 273% du seuil du seuil réglementaire (près de 3 fois supérieur au seuil réglementaire)

### 3.3.2. Les composés organiques

Les cendres sous foyers (CF) et les cendres mixtes (CM) présentent des teneurs en HAP et PCB très faibles, en grandes majorités sous les seuils de quantification et systématiquement sous les seuils réglementaires d'épandage.

Les cendres multicycloniques présentent des teneurs en HAP et PCB très faibles, en grandes majorités sous les seuils de quantification et donc sous les seuils réglementaires d'épandage ; à l'exception de rares échantillons sur les HAP. Leur présence est alors corrélée avec des difficultés de combustion (taux d'O<sub>2</sub> dans les fumées excessives ou trop basses, température de foyer trop basse...).

Les cendres sous foyer, mixtes et multicycloniques contiennent peu de dioxines et furanes (PCDD/F), à l'exception de quelques rares échantillons aux teneurs plus élevées principalement sur des cendres MCNS (multicycloniques non séparées). Ces teneurs plus élevées sur les MCNS peut s'expliquer par leur mode de prélèvement (arrêt thermostatique de la chaudière pour installer le bac de prélèvement, puis relance de la chaudière pour la production de cendres multicycloniques). Une autre voie d'explication de teneurs plus élevées en dioxines et furanes peut être la qualité du combustible (par exemple des traces de PCP et de chlore), rappelons néanmoins que dans le cadre de l'étude la corrélation directe entre combustible et cendres n'a pu être vérifiée.

Il est également rappelé qu'il n'existe pas aujourd'hui de seuils réglementaires à l'épandage sur les dioxines, des réflexions sont néanmoins en cours pour introduire des seuils.

### 3.3.3. La valeur agronomique des cendres

Les cendres présentent un intérêt agronomique pour les sols et les cultures en raison de leurs teneurs en éléments fertilisants et neutralisants :

- La valeur neutralisante des cendres se manifeste principalement par des teneurs élevées en chaux et en magnésie :
  - Chaux : 240 à 500 kg CaO/tonne MB,
  - Magnésie : 20 à 40 kg MgO/tonne MB,
  - La valeur fertilisante des cendres est évaluée par leurs teneurs en potasse et en phosphate :
    - Potasse : 30 à 75 kg K<sub>2</sub>O/tonne MB,
    - Phosphore : 13 à 22 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/tonne MB.

Des écarts de composition ont été identifiés :

- Ils résultent, tout d'abord de la composition initiale des combustibles bois ;
- On peut ensuite émettre l'hypothèse que les écarts de composition entre les catégories de cendres (CF et CM) sont aussi liés au mode d'extraction par voie humide. Le mode d'extraction des cendres sous foyer influence leur valeur agronomique. La présence d'un lit d'eau, qui permet de refroidir les cendres extraites, stoppe instantanément la combustion. On en déduit une perte par lessivage de certaines substances minérales et une dilution par la présence d'eau, les

résultats étant toujours ramenés par rapport à la matière brute dans le domaine de la fertilisation ; A noter que les cendres multicycloniques présentent des valeurs agronomiques similaires au cendres sous foyer.

Compte tenu des caractéristiques agronomiques des cendres sous foyer, la **dose à épandre** varie de **1 à 4 t/hectare tous les 3 ans**. Cette dernière doit cependant être adaptée à la composition des cendres sous foyer à épandre, ainsi qu'aux besoins des sols et des cultures.

### 3.4. La conformité au regard des seuils réglementaires de l'arrête du 3 août 2018

Dans la réglementation, l'autorisation d'épandre sur les terres agricoles est subordonnée au respect de 2 obligations :

- Les **cendres sous foyer** doivent respecter des **teneurs maximales** en éléments traces métalliques (ETM) et en composés traces organiques (CTO);
- Les **quantités d'ETM et de CTO épandues** par m<sup>2</sup> de sol sont **limitées** par période de 10 ans.

#### 3.4.1. Première obligation : teneurs maximales

Plus 93% des analyses de cendres sous foyer et sous foyer mixtes (CF et CM) respectent les seuils réglementaires de l'épandage.

- Pour les Sites S, **l'ensemble des échantillons** de cendres sous foyer (CF) respectent les seuils de la réglementation.
- Pour les Sites NS, **88 % des échantillons** de cendres mixtes (CM) respectent le seuil de la réglementation. Le seul facteur de non-conformité concerne le **cadmium pour 12% des analyses**.
- 

	Seuil réglementaire d'épandage	Teneurs en éléments polluants									
		Cendres sous-foyer (CF)					Cendres mixtes (CM)				
	Valeurs (mg/kgMS) <i>sauf PCDD/F (ng I-TEQ/kg MS)</i>	Moyenne	95 <sup>e</sup> percentile	Max	Conformité		Moyenne	95 <sup>e</sup> percentile	Max	Conformité	
				Nb de Valeurs	Nb de sites				Nb de Valeurs	Nb de sites	
<b>Cadmium (Cd)</b>	10	1,3	3,9	9,6	100%	100%	4,7	11,0	19,4	88%	69%
<b>Chrome (Cr)</b>	1 000	71,2	220	275	100%	100%	109	200	370	100%	100%
<b>Cuivre (Cu)</b>	1 000	100	150	284	100%	100%	172	490	631	100%	100%
<b>Nickel (Ni)</b>	200	24,9	48,0	52,1	100%	100%	25,4	44,0	46,5	100%	100%
<b>Plomb (Pb)</b>	800	25,6	56	500	100%	100%	44,9	152	265	100%	100%
<b>Zinc (Zn)</b>	3 000	124,6	450	995	100%	100%	327	1110	1450	100%	100%
<b>Mercure (Hg)</b>	10	0,1	0,1	0,11	100%	100%	0,11	0,2	0,23	100%	100%
<b>Benzo(a)pyrène</b>	2	0,06	0,06	0,34	100%	100%	0,05	0,05	0,09	100%	100%
<b>Benzo(b)fluoranthène</b>	2,5	0,11	0,08	2,3	100%	100%	0,05	0,05	0,1	100%	100%
<b>Fluoranthène</b>	5	0,06	0,05	0,31	100%	100%	0,05	0,05	0,1	100%	100%
<b>PCB</b>	0,8	0,01	0,01	0,01	100%	100%	0,01	0,01	0,02	100%	100%
<b>PCDD/F</b>	<i>pas de seuil réglementaire</i>	4,3	11,0	18,8	-	-	5,1	9,6	67,4	-	-
<b>Arsenic (As)</b>	<i>pas de seuil réglementaire</i>	5,32	17,2	94,9	-	-	8,12	37,9	67,8	-	-

Tableau 3 - Conformité des cendres sous-foyer (CF) et mixtes (CM) au regard des seuils réglementaires d'épandage

Pour les sites disposant d'une collecte séparée, **50 % des échantillons de cendres multicycloniques (MCS)** respectent les seuils réglementaires de l'épandage. Le principal facteur de non-conformité concerne le **cadmium** et dans une moindre mesure les **HAP**.

	Seuil réglementaire d'épandage	Teneurs en éléments polluants				
		Cendres multicycloniques séparées (MCS)			Conformité	
	Valeurs (mg/kgMS) <i>sauf PCDD/F (ng I-TEQ/kg MS)</i>	Moyenne	95 <sup>e</sup> percentile	Max	Nb de Valeurs	Nb de sites
Cadmium (Cd)	10	11,2	24,2	28,4	51%	15%
Chrome (Cr)	1 000	72,1	220	257	100%	100%
Cuivre (Cu)	1 000	118	180	242	100%	100%
Nickel (Ni)	200	29,1	60	70,8	100%	100%
Plomb (Pb)	800	52,1	120	150	100%	100%
Zinc (Zn)	3 000	613,0	1440	1750	100%	100%
Mercure (Hg)	10	0,11	0,11	0,2	100%	100%
Benzo(a)pyrène	2	1,09	3,96	22	87%	77%
Benzo(b)fluoranthène	2,5	2,02	17,14	33	82%	77%
Fluoranthène	5	0,78	2,5	14	95%	92%
PCB	0,8	0,01	0,0104	0,01	100%	100%
PCDD/F	<i>pas de seuil réglementaire</i>	10,1	43,1	58,8	-	-
Arsenic (As)	<i>pas de seuil réglementaire</i>	4,84	12,9	14,5	-	-

Tableau 4 – Conformité des cendres multicycloniques séparées (MCS) au regard des seuils réglementaires d'épandage

### 3.4.2. Seconde obligation : les quantités maximales épandues

Les flux cumulés sur 10 ans en substances polluantes apportées sur les sols à l'occasion de l'épandage des cendres CF ou de cendres CM sont présentés dans le tableau ci-après. Ces apports correspondent à 3 épandages triennaux.

L'exercice a été réalisé en tenant compte d'un besoin par les sols en chaux de 325 kg/ha/an, ce qui correspond à une dose d'épandage de 2 tMB/ha pour les cendres CF et 4 tMB/ha pour les cendres CM.

Types de cendres		Cendres CF		Cendres CM	
Apport triennal par ha sur 10 ans		3 apports x 2 tMB/ha par apport		3 apports x 4 tMB/hectare par apport	
Éléments	Flux cumulé maximal autorisé sur 10 ans (g/m <sup>2</sup> )	g/m <sup>2</sup>	% du seuil	g/m <sup>2</sup>	% du seuil
Cadmium	0,015	0,0008	5%	0,0041	27%
Mercure	0,015	0,0001	0%	0,0001	1%
Zinc	4,5	0,0711	2%	0,2811	6%
Chrome	1,5	0,0385	3%	0,0935	6%
Cuivre	1,5	0,0524	3%	0,1512	10%
Plomb	1,5	0,0131	1%	0,0399	3%
Nickel	0,3	0,0131	4%	0,0217	7%
Zn+Cr+Cu+Ni	6	0,1498	2%	0,4939	8%
7 principaux PCB	0,0012	0	0%	0	1%
Fluoranthène	0,0075	0	0%	0	1%
Benzo(b)fluoranthène	0,004	0,0001	1%	0	1%
Benzo(a)pyrène	0,003	0	1%	0	1%

Tableau 5 – Flux cumulés en substances polluantes dans les sols après un apport triennal de cendres CF et CM sur une période de 10 ans

Sur 10 ans, 6 tonnes de cendres CF (soit 5,4 t MS) ou 12 t de cendres CM (soit 8,4 t MS) auront été épandues.

On constate que les doses appliquées par ha sont à l'origine d'apports en ETM faibles et dans des proportions très inférieures à la réglementation.

En matière de flux d'éléments traces métalliques cumulés, la dose appliquée n'excède pas, dans cet exemple, de 1 à 27% du flux maximal admissible. Les apports d'ETM sur 10 ans sont relativement faibles, et la marge de manœuvre significative.

## 4. Les enjeux du retour au sol des cendres

Les flux de cendres sous foyer et mixtes sont estimés à 228 000 tonnes MB/an. A partir des résultats de l'étude, on peut estimer par extrapolation qu'un peu plus de 200 000 t/an respecteraient les exigences réglementaires en matières d'épandage agricole (teneurs et flux de polluants). Les enjeux environnementaux et économiques du retour au sol de ces cendres par épandage agricole ont été évalués.

### 4.1. Enjeux environnementaux

#### 4.1.1. Les flux d'éléments traces métalliques

A l'échelle nationale, les éléments traces métalliques contenus dans les 228 000 tonnes de cendres sous foyer et mixtes de chaufferies biomasse sont estimés à environ 110 t/an.

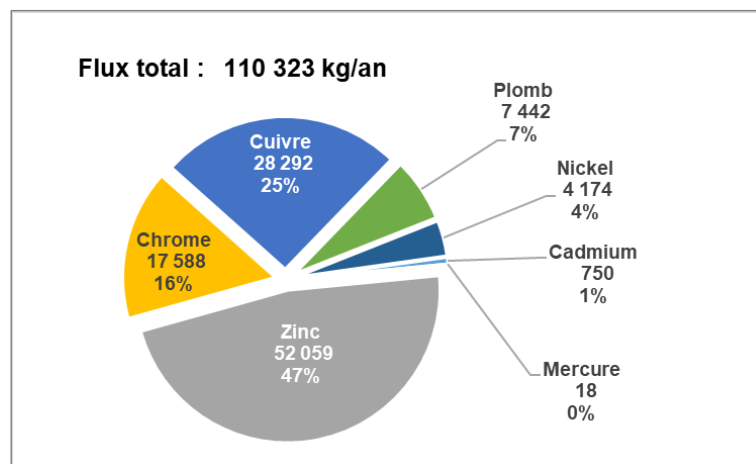


Figure 5 : Répartition par éléments du flux annuel d'ETM contenus dans les cendres de chaufferies biomasse à l'échelle nationale (CF+ CM)

La quasi-totalité de ce flux (96,7%) émane des cendres mixtes (106,6 t/an).

A partir des résultats de l'étude, on peut estimer par extrapolation qu'environ 191 000 t/an de cendres mixtes respecteraient les exigences réglementaires en matières d'épandage agricole (teneurs et flux de polluants). Ces cendres «conforme à un épandage agricole» présentent une teneur en éléments traces métalliques plus faibles, avec un flux en ETM d'environ 78 t/an.

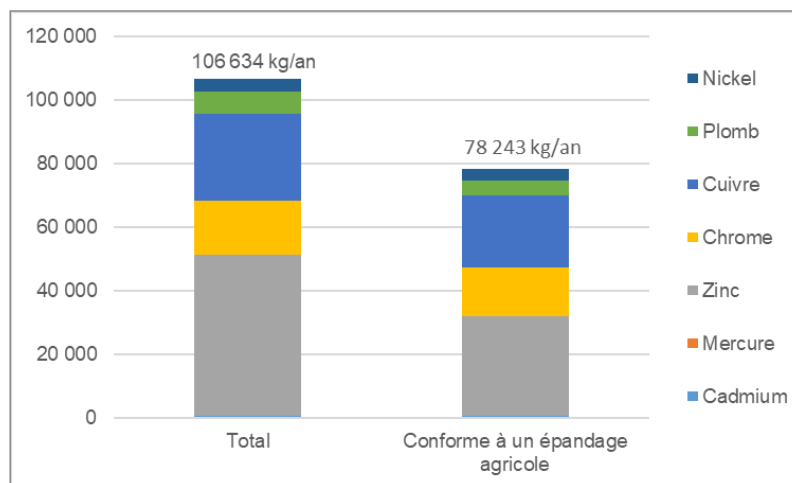


Figure 6 : Flux en ETM des cendres mixtes (CM) totaux et conformes aux seuils réglementaires de l'épandage agricole

Les flux de cendres sous foyer sont estimés à un peu plus de 11 000 t MB/an. L'intégralité est conforme aux seuils d'épandage agricole. Les flux d'éléments traces métalliques s'élèvent à 3,7 t/an.

Les flux d'ETM entrant sur les sols agricoles de France Métropolitaine sont estimées à 22 390 t/an, la part liée à l'épandage des cendres sous-foyer et mixtes ne représenterait qu'environ 0,37%.

Les flux de cadmium, plomb et mercure entrant sur les sols agricoles de France Métropolitaine sont estimées à 762 t/an, la part liée à l'épandage des cendres sous-foyer et mixtes ne représenterait qu'environ 0,7%.

Les flux de cadmium entrant sur les sols agricoles de France Métropolitaine sont estimées à 54 t/an, la part liée à l'épandage des cendres sous-foyer et mixtes ne représenterait qu'environ 0,5%.

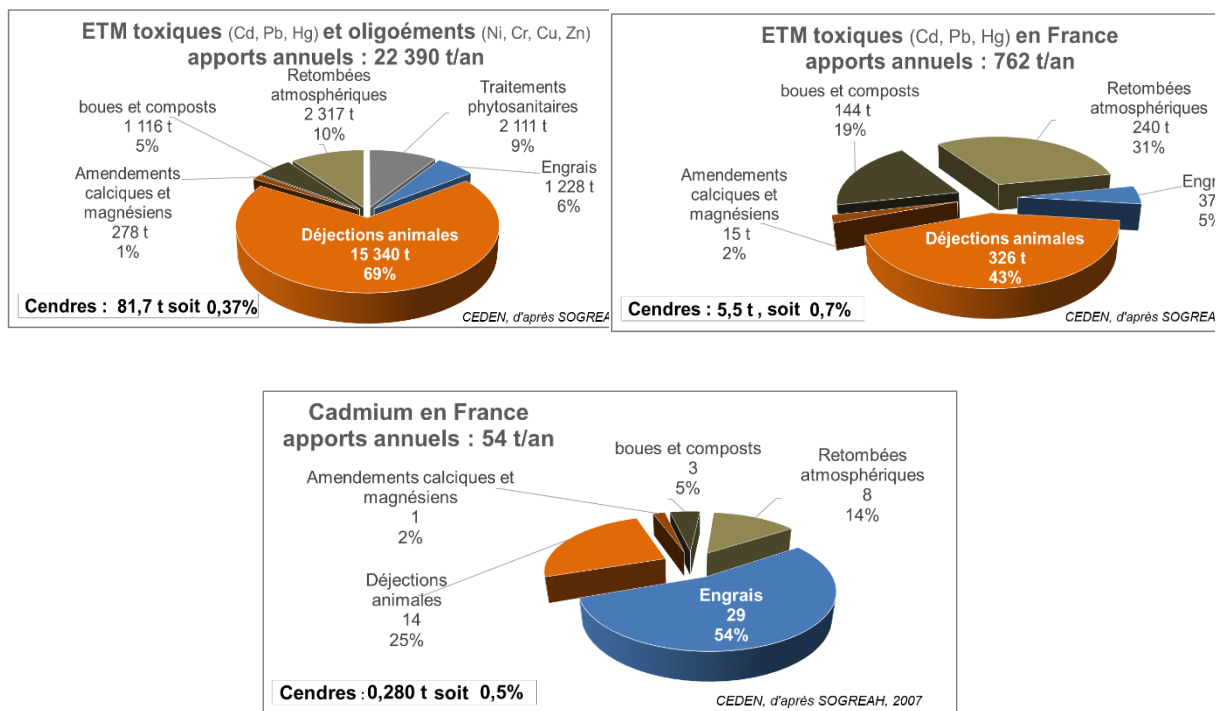


Figure 7 : Les apports en ETM à l'échelle nationale au regard des apports potentiels liés au recyclage agricole des cendres (CF + CM)

Les apports en ETM à l'échelle nationale des cendres sous foyer et mixtes sont globalement faibles et affectent peu le stock des sols en éléments traces métalliques.

Le cadmium issu de la combustion du bois provient essentiellement de la biosphère (mobilisation par l'arbre au cours de sa croissance, récupération dans les cendres à l'occasion de la combustion et retour sur les sols agricoles). L'épandage agricole s'inscrit dans le cycle biogéochimique de la matière, alors que celui provenant des engrais et amendements commerciaux contribue à un enrichissement en éléments traces métalliques des écosystèmes (exploitation minière et déstockage des éléments traces du sous-sol, métaux lourds inclus).

#### 4.1.2. Les flux d'éléments neutralisants et fertilisants

A l'échelle nationale, les quantités d'éléments fertilisants et neutralisants contenue dans les 200 000 t/an de cendres sous-foyer et mixtes respectant les exigences réglementaires en matières d'épandage agricole (teneurs et flux de polluants) sont estimées à près de 67 000 tonnes/an. L'essentiel est composé de chaux (CaO), et dans une moindre mesure, de potasse (K<sub>2</sub>O). Environ 91 % de cette richesse est contenue dans les cendres mixtes.



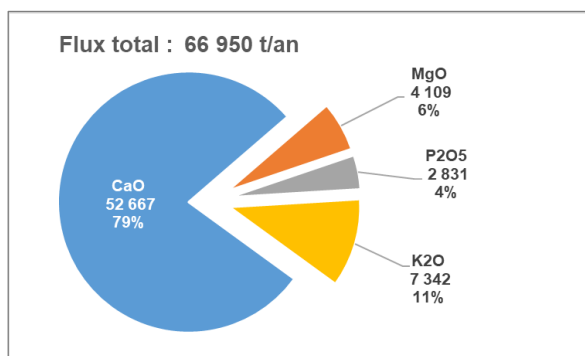


Figure 8 : Évaluation du flux annuel d'éléments neutralisants et fertilisants contenus dans les cendres des chaufferies biomasse à l'échelle nationale

Du point de vue de l'agriculteur, le recours aux cendres permet de limiter la consommation d'engrais et amendements minéraux. L'UNIFA estimait cette consommation à 5 400 000 t pour la campagne 2016/2017.

Parallèlement, l'épandage d'un peu plus de 200 000 t/an de cendres à raison de 2 à 4 t/ha mobiliserait chaque année 50 000 à 100 000 ha, soit 0,1 à 0,2 % de la surface agricole utile de la France métropolitaine. Les surfaces concernées sont faibles et n'obèrent pas la possibilité de valoriser d'autres MAFOR.

Les fertilisants et amendements basiques du commerce que les cendres remplacent suivent un cycle de fabrication, de transport et de livraison particulièrement énergivores. Le retour au sol de ces dernières permet donc de réduire l'empreinte énergétique de l'agriculture française. Dans le contexte actuel, le recyclage agricole des cendres pourrait représenter une économie indirecte d'énergie estimée à 22 000 TEP/an, ce qui représenterait un gain de l'ordre de 50 000 t éq-CO<sub>2</sub> par an.

## 4.2. Enjeux économique

L'impact économique de trois principaux scénarios de gestion des cendres biomasse a été étudié :

- L'épandage agricole des cendres mixtes;
- La réalisation de travaux pour séparer les cendres multicycloniques (hors génie civil) et ainsi, préserver l'épandage en agriculture des cendres sous foyer. Cette option conduit l'exploitant à stocker les cendres multicycloniques en décharge de déchets non dangereux ou dangereux ;
- L'enfouissement en décharge de déchets non dangereux des cendres mixtes

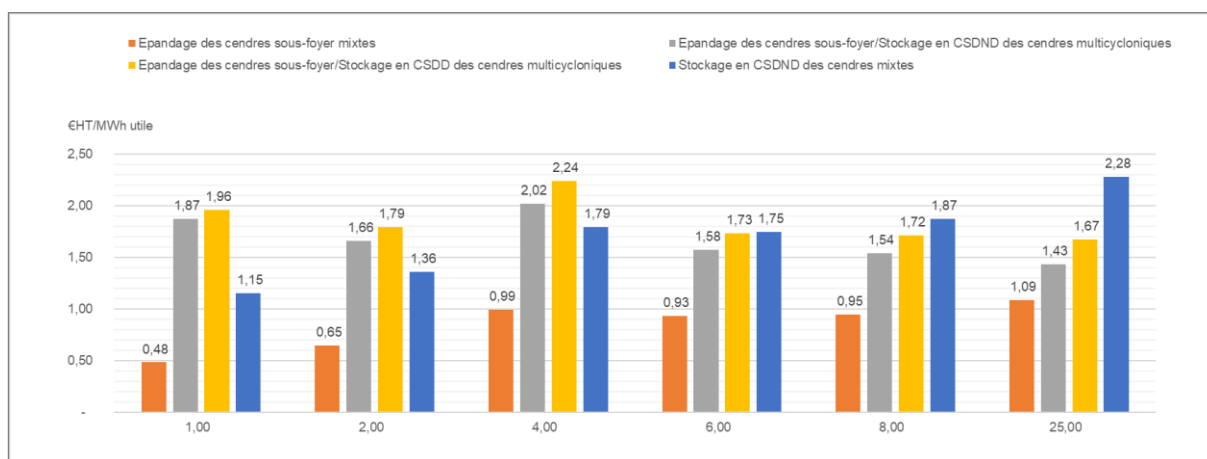


Figure 9 : Coût en €/MWh de la gestion des cendres en fonction de la puissance

Sous réserve que les cendres respectent les seuils réglementaires, l'épandage agricole des cendres mixtes est la solution la moins coûteuse pour l'exploitant de chauffage. Le coût de gestion des cendres pour ce premier scénario est compris entre 0,48 et 1,09 €/MWh (suivant la puissance de l'installation).



Les solutions de **séparation des cendres multicycloniques / sous foyer**, ou **d'enfouissement des cendres mixtes** auraient une incidence à la hausse du coût de la chaleur biomasse par rapport à la solution d'épandage des cendres mixtes.

- Pour les installations inférieures à 6 MW :
  - L'enfouissement de l'intégralité des cendres apparaît la solution alternative à l'épandage des cendres mixtes la moins coûteuse, elle suscite néanmoins une augmentation de 0,70 à 0,80 €/MWh (+80 à +140 % d'augmentation par rapport à l'épandage des cendres mixtes),
  - Le maintien de l'épandage (suite à des travaux de séparation) représente un surcoût de 1 à 1,5 €/MWh (+100 à +300 % d'augmentation par rapport à l'épandage des cendres mixtes). En effet, l'amortissement des travaux pour de faibles quantités de cendres est particulièrement pénalisant pour les petites installations.
- **Pour les installations à partir de 6 MW**, le maintien de l'épandage agricole (suite à des travaux de séparation) s'avère la solution alternative à l'épandage des cendres mixtes la moins coûteuse, mais elle suscite une augmentation de 0,35 à 0,80 €/MWh du coût de gestion des cendres (+30 à +85 %).

Si on considère que le coût de revient de la chaleur bois s'élève de 40 à 70 € HT/MWh, la **conséquence sur le coût de la chaleur fluctue entre 1 et 3 %**, ce qui constitue une charge supplémentaire non négligeable dans un contexte difficile du développement du bois énergie.

A l'échelle nationale, le montant des investissements pour aménager (travaux de séparation des cendres sous-foyer et multicycloniques) les **1100 chaufferies** de plus de 1 MW concernées est estimé à **près de 67 millions d'euros**. Une estimation par gamme de puissance est détaillée dans le tableau ci-dessous.

Puissance utile chaudière	kW	1000	2000	4000	6000	10000	25000
Investissement par installation	€ HT	34 600 €	36 750 €	60 700 €	68 030 €	106 500 €	159 750 €
Investissement à l'échelle nationale	€ HT	13 840 000 €	8 085 500 €	7 900 100 €	6 803 000 €	20 235 000 €	9 585 000 €

Tableau 6 – Estimation coût des travaux d'aménagement par gamme de puissance

## L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

### LES COLLECTIONS DE L'ADEME



#### FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



#### CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



#### ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



#### EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



#### HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



## CAMPAGNE D'ANALYSES DES CENDRES DE CHAUFFERIES BIOMASSE

Cette mission vise à réaliser une campagne d'analyse distincte de cendres sous foyer, de cendres sous multicyclone et de cendres mixtes sous foyer et sous multicyclone.

**Les objectifs poursuivis sont multiples :**

- Analyser les caractéristiques physico-chimiques des cendres sous foyer, des cendres sous multicyclone et cendres mixtes (sous foyer et multicyclone). Cette caractérisation porte sur les éléments traces métalliques (ETM), les composés traces organiques (CTO), sur la valeur agronomique ... ;
- Évaluer les teneurs en éléments chimiques et des différentes qualités de cendres au regard des seuils réglementaires d'épandage ;
- Comparer suivant le type de cendres les substances fertilisantes et de polluants épandues ;
- Actualiser les valeurs de référence des caractéristiques des cendres de chaufferies biomasse industrielles et collectives

*Cette étude vise à caractériser les différents types de cendres biomasse et à évaluer les teneurs en éléments chimiques au regard des seuils réglementaires d'épandage agricole.*

