

CAMPAGNE D'ANALYSES DES CENDRES DE CHAUFFERIES BIOMASSE

Campagne de mesures 2018-2019

RAPPORT



EXPERTISES

Avril
2021

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 Énergie 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. 247 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

RÉSUMÉ.....	6
1. GENERALITES.....	7
1.1. Contexte du projet.....	7
1.2. Valorisation agronomique des cendres.....	8
1.2.1. Cadre réglementaire.....	8
1.2.2. Condition de retour au sol des cendres.....	9
1.2.3. Innocuité des cendres : conditions minimales requises.....	11
1.3. Limites de l'étude.....	12
2. METHODOLOGIE.....	14
2.1. Objet de l'approche statistique.....	14
2.1.1. Détermination du nombre d'échantillons.....	14
2.1.2. Types de cendres et la terminologie.....	14
2.2. Choix des sites.....	15
2.2.1. Méthodes.....	15
2.2.2. Présentation des chaufferies.....	15
2.3. Plan d'échantillonnage.....	19
2.3.1. Résumé du plan d'échantillonnage.....	19
2.3.2. Période d'échantillonnage.....	20
2.3.3. Méthodes de prélèvement et aménagement des sites.....	21
2.4. Mesures réalisées et métadonnées relevées.....	22
2.4.1. Paramètres analysés sur les cendres et le combustible bois.....	22
2.4.2. Métadonnées.....	23
2.4.3. Autres données disponibles.....	23
2.4.4. Bases de données cendres et combustibles.....	24
2.5. Analyses des données.....	24
2.5.1. Méthodes descriptives.....	24
2.5.2. Autres analyses.....	26
3. EXPLOITATION DES RESULTATS	27
3.1. Caractéristiques des combustibles.....	27
3.1.1. Flux de bois réceptionnés et flux de cendres évacuées.....	27
3.1.2. Qualité des combustibles.....	30
3.2. Métadonnées de fonctionnement des chaufferies.....	45
3.2.1. Taux de charge.....	45
3.2.2. Taux d'oxygène.....	46
3.2.3. Température de chambre de combustion.....	47
3.2.4. Durée des prélèvements.....	48
3.2.5. Les approvisionnements en bois.....	49
3.3. Caractéristiques des cendres.....	50
3.3.1. Similarité dans les caractéristiques des cendres.....	50
3.3.2. Paramètres physico-chimiques.....	52
3.3.3. Valeur agronomique.....	56
3.3.4. Eléments traces métalliques (ETM).....	64
3.3.5. Composés traces organiques (CTO).....	77
3.4. Relation entre la composition des cendres, le combustible, les caractéristiques des chaufferies et les paramètres de fonctionnement de l'installation.....	85
3.4.1. Influence de la nature des combustibles.....	85

3.4.2.	Incidence de la technologie sur les caractéristiques des cendres.....	86
3.4.3.	Incidence des paramètres de combustion sur les caractéristiques des cendres	87
3.5.	Conformité des cendres.....	88
3.5.1.	Conformité au regard des seuils réglementaires de l'arrête du 3 août 2018.....	88
3.5.2.	Conformité au regard de la norme engrais NFU 42-001	91
3.5.3.	Evolution des normes « amendements minéraux basiques et engrais ».....	95
3.6.	Approches comparatives comparaison avec d'autres produits fertilisants	96
3.7.	Flux de substances fertilisantes et polluantes : les conditions de l'épandage.....	98
3.7.1.	Rappel des contraintes agronomiques et réglementaires	98
3.7.2.	Calcul de la dose à épandre	99
3.7.3.	Flux cumulés en substances polluantes	101
3.8.	Bilan national et enjeux du retour au sol	104
3.8.1.	Production de cendres à l'échelle nationale.....	104
3.8.2.	Enjeux environnementaux	106
3.8.3.	Enjeux financiers du retour au sol des cendres	114
4.	RECAPITULATIF DES PRINCIPAUX POINTS A RETENIR	117
5.	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	122
6.	INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES.....	125
7.	SIGLES ET ACRONYMES.....	129
8.	ANNEXES	130
	Annexe 1 – Fiches techniques par chaufferie (confidentielles).....	130
	Annexe 2 - Protocoles de prélèvement.....	131
	Annexe 3 – Liste des paramètres analysés dans les cendres et les combustibles.....	135
	Annexe 4 – Méthodes d'analyse des données appliquées.....	185
	Annexe 5 – Distribution des données de cendres.....	190
	Annexe 6 – Analyses statistiques complémentaires.....	196
	Annexe 7 – Synthèse des caractéristiques physico-chimiques des 5 cendres multicycloniques de type MCNS (Groupe 3), des combustibles bois associés et des paramètres de combustion.....	199
	Annexe 8 – Caractéristiques des cendres.....	200
	Annexe 9 – Données complémentaires : Bilan national et enjeux financiers et environnementaux	242

RÉSUMÉ

Les chaufferies bois produisent des cendres sous foyer qui présentent un intérêt agronomique pour les sols et les cultures en raison de leurs teneurs en éléments fertilisants et neutralisants. Ce retour au sol présente des atouts environnementaux et économiques. Il participe au caractère vertueux de la filière bois énergie et s'inscrit dans une logique d'économie circulaire.

Les arrêtés ICPE 2910 « déclaration » et « enregistrement » autorisent depuis 2013 l'épandage des cendres « sous équipement de combustion », sous réserve du respect de teneurs seuils en éléments traces organiques et métalliques. En l'état actuel des connaissances, ces cendres excluent un éventuel mélange de cendres sous foyer et sous multicyclone. Or, en grande majorité, les installations de combustion biomasse sur la gamme de moyenne et forte puissance (installations soumises à « déclaration » et à « enregistrement ») recueillent, sous le même convoyeur, les cendres « sous foyer » et « sous multicyclone ».

Dans ce contexte et au regard des impacts économiques et environnementaux qui pourraient découler de cette exclusion de l'épandage des mélanges de cendres sous foyer et sous multicyclone, l'ADEME a lancé une vaste campagne de caractérisation des cendres de biomasse pour établir un premier référentiel sur la composition des cendres de biomasse. Cette campagne a pour vocation d'apporter un éclairage nouveau sur les enjeux de la collecte en mélange de ces cendres.

À cet effet, 30 chaufferies ont été sélectionnées sur le territoire métropolitain sur la base de différents critères (mélange ou non des cendres sous foyer et multicycloniques, puissance, répartition géographique...) dans la perspective de procéder, au travers de 3 campagnes de prélèvement, à la caractérisation des cendres sous foyer et multicycloniques.

Les paramètres agronomiques de base, les éléments traces métalliques et les composés organiques traces ont ainsi été mesurés dans les quatre types de cendres (cendres sous foyer, cendres en mélange, cendres multicycloniques séparées et cendres multicycloniques non séparées) et les combustibles. Des métadonnées sur les caractéristiques des installations, mais également sur les conditions de fonctionnement à l'occasion de prélèvement, ont été recueillies (en particulier, certains paramètres de combustion), notamment lorsqu'il a fallu aménager les sites collectant en mélange les cendres afin de récupérer séparément l'échantillon de cendres cycloniques à analyser.

Après une présentation de la méthodologie, les caractéristiques des combustibles, les métadonnées de fonctionnement des chaufferies et les caractéristiques des cendres sous foyer et multicycloniques sont présentées. Cette caractérisation distingue les sites séparant les cendres (S) et ceux ne les séparant pas (NS).

Avec le concours des exploitants de chauffage, les taux et proportions de cendres ont été estimés en fonction de la puissance des installations, ce qui a permis d'apporter un éclairage sur les flux produits à l'échelle nationale et sur les enjeux environnementaux et économiques.

Les cendres sous foyer, les cendres mixtes et les cendres multicycloniques ont été qualifiées précisément. Une fiche par éléments présente les résultats statistiques de l'analyse ; il y figure la moyenne, les bornes de l'intervalle de confiance à 95 %, la médiane, ainsi que la dispersion de l'échantillon.

Diverses approches ont été réalisées, notamment dans la perspective d'établir des relations entre la composition des cendres et le type de combustibles employés ou les caractéristiques des chaufferies. Une analyse de la conformité vis-à-vis de la réglementation en vigueur et des normes d'application obligatoire a également été entreprise.

La conformité des cendres à l'épandage a été examinée à la lumière de leur composition physicochimique, mais également en termes de flux de substances polluantes apportés au sol.

Le flux de cendres est estimé à 245 000 t/an à l'échelle de l'Hexagone. Le bilan national résume également les enjeux environnementaux du retour au sol des cendres en termes d'incidence sur la charge tellurique en éléments traces, d'apport en éléments neutralisants et fertilisants, et de réduction des gaz à effet de serre. Enfin, les enjeux économiques pour les professionnels de l'énergie et de l'agriculture sont abordés.

1. Généralités

1.1. Contexte du projet

De tout temps, les cendres de bois ont été valorisées dans les jardins, sur les massifs de fleurs, au pied des arbres ou dans les champs. Elles comprennent en effet une forte teneur en potasse, mais également en chaux et en magnésie, leur conférant un intérêt agronomique notable reconnu par la profession agricole.

A ce jour, le mode de valorisation des cendres de biomasse le plus développé en France et en Europe est l'épandage agricole (RECORD, 2015). L'utilisation en forêt suscite de plus l'intérêt des propriétaires et gestionnaires, puisqu'elle permettrait de boucler en grande partie le cycle biogéochimique des matières minérales (hors azote) par un retour au sol des éléments exportés du milieu (Projet RESPIRE financé par l'ADEME, 2018).

Des alternatives à l'épandage ont été examinées à l'occasion de programmes R&D à l'échelle européenne : en cimenterie pour leur pouvoir pouzzolanique, en technique routière et pour la fabrication des céramiques pour leur charge minérale ... Finalement, cette perspective concerne davantage les cendres volantes que les cendres sous foyer, ces dernières se prêtant mieux à la valorisation agronomique.

Si les enjeux économiques d'un retour au sol ne peuvent être négligés, ils ne doivent pour autant pas effacer les risques environnementaux. Ceux-ci sont principalement liés à l'augmentation de la charge minérale du sol en éléments traces métalliques, dont certains sont des oligoéléments (cuivre, chrome, nickel, bore...), mais d'autres, des micropolluants (cadmium, plomb, mercure). L'épandage agricole de cendres trop concentrées en éléments métalliques pourrait ainsi nuire à l'activité biologique du sol et à la plante, ainsi qu'à l'écosystème.

Le bois contient des sels minéraux, dont la proportion est plus ou moins importante en fonction des essences et de l'écosystème dans lequel se développe le végétal (et notamment le sol). Ces matières sont indispensables à la croissance de l'arbre qu'il puise dans le sol via son réseau racinaire : il s'agit principalement de nutriments majeurs et d'oligoéléments. Mais l'arbre capte également les micropolluants métalliques, et en particulier le cadmium. Mélangés à l'eau, ces substances participent à l'élaboration de la sève, qui irrigue le végétal jusqu'aux feuilles en empruntant les vaisseaux du bois. Elles se propagent et deviennent constitutives de la matière ligneuse. Néanmoins, les matières minérales se concentrent dans l'écorce, dont la proportion est plus importante dans les branches les plus fines.

La combustion de la biomasse dans une chaudière est une réaction thermochimique, qui se produit à haute température et aboutit à la production d'énergie, d'une part, et à l'émission de particules minérales qui sont extraites à des niveaux différents de la chaufferie, d'autre part. On récupère ainsi :

- Sous la grille de combustion, les **cendres sous-foyer**. Elles sont évacuées par voie sèche ou par voie humide selon les technologies ;
- Au niveau d'un premier étage du traitement des fumées, les **cendres multicycloniques**. Elles sont composées de particules grossières et lourdes, l'effet centrifuge permettant de les séparer des fumées. Le multicyclone faisant corps au foyer ou étant à sa proximité immédiate, ces cendres sont évacuées, dans la majorité des cas, par gravité vers le convoyeur d'extraction des cendres sous-foyer. Comme elles sont entraînées par les fumées, elles sont également assimilables à des cendres volantes au sens de la réglementation ;
- Au pied du filtre à manches ou de l'électrofiltre, les **poussières de filtration**. Elles sont composées de particules fines capturées par un média filtrant ou un champ électrique à haute tension.

À noter que la condensation des fumées permet également de piéger ces substances minérales, y compris lorsqu'elles se présentent sous la forme de fines particules.

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

La fiche interprétative 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 et forte puissance (ICPE 2910 « déclaration » et « enregistrement ») recueillent 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 et suite aux demandes des professionnels, l'Administration a proposé de conduire une campagne d'analyse des cendres sur la base d'un cahier des charges élaboré conjointement avec les

professionnels de la filière. Cette campagne a pour objectif de fournir à l'Administration une meilleure connaissance des caractéristiques des cendres et, pour les professionnels, de disposer d'une analyse statistique fiable et indépendante. Cette campagne a pour vocation d'apporter un éclairage nouveau sur la problématique de la collecte de mélange des cendres « sous-foyer » et des « cendres multicycloniques », une actualisation de la fiche interprétative n°7 pouvant en résulter.

Ce document constitue le rapport final de la campagne d'analyses des cendres de chaufferies biomasse 2018-2019. Il présente la méthodologie utilisée (choix des sites, protocoles de prélèvements, analyses réalisées, analyses des données...), l'exploitation des résultats et une synthèse des principaux résultats et enjeux.

Définition et objectifs de la mission

Cette mission vise à réaliser une campagne d'analyse distincte de cendres sous foyer, de cendres sous multicyclone et de cendres mixtes ou mélangées sous foyer et sous multicyclone. Un panel d'installations de combustion de biomasse a été sélectionné par les professionnels de la FEDENE et du CIBE :

- 1^{er} groupe : 13 chaufferies produisent des cendres sous foyer et des cendres multicycloniques séparément
- 2nd groupe : 17 chaufferies produisent des cendres collectées en mélange.

Pour la plupart des chaufferies du 2nd groupe, des aménagements ont été réalisés pour extraire les cendres sous-multicyclone.

Les objectifs poursuivis sont multiples :

- Analyser les caractéristiques physico-chimiques des cendres sous foyer, des cendres sous multicyclone et des 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 les différentes quantités 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.

1.2. Valorisation agronomique des cendres

1.2.1. Cadre réglementaire

Dès l'instant où le combustible utilisé en chaufferie respecte les arrêtés du 3 août 2018 relatif aux installations de combustion, les cendres, quelle que soit leur nature, sont assimilées à des déchets non dangereux au sens de l'article L. 541-1 du code de l'environnement.

Dans la nomenclature des déchets, elles répondent aux codes suivants :

- 10 01 01 : mâchefer, scories et cendres sous chaudières provenant d'autres installations de combustion,
- 10 01 03 : cendres volantes de tourbe et de bois non traités provenant d'autres installations de combustion.

Dans les 2 cas, le producteur en est responsable jusqu'à leur élimination ou valorisation finale, même lorsque le déchet est transféré à un tiers (article L541-1-1 et L541-2 du Code de l'environnement). La valorisation est donc envisageable si le produit présente un intérêt agronomique ou technique, conjugué à un avantage économique pour l'utilisateur final. En l'occurrence, rappelons que l'épandage est autorisé par les arrêtés du 3 août 2018 relatifs aux installations de combustion.

L'intérêt pour le sol et/ou la plante des cendres doit être confirmé pour justifier leur retour au sol.

La **valorisation agronomique des cendres** peut, au regard des articles L255-2 à L255-13 du Code rural, emprunter deux voies :

- La **logique « produit »**. Lorsque les cendres respectent les exigences d'un engrais ou d'un amendement, leur utilisation est possible sans plan d'épandage. Dans ce cas, il faut qu'elles puissent bénéficier d'une autorisation de mise sur le marché ou répondre à une norme rendue

d'application obligatoire. La norme NFU 42-001 (engrais) est actuellement la seule envisageable pour les cendres, mais leur richesse en éléments nutritifs demeure souvent insuffisante pour atteindre les exigences requises ;

- La **logique « déchet »** lorsque les cendres ne peuvent relever de la logique produit :
 - Pour les **chaufferies de plus de 1 MW** (rubrique 2910 des ICPE), le retour au sol doit s'effectuer dans le cadre d'un plan d'épandage encadré par l'annexe III de l'arrêté du 3 août 2018 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations soumises à déclaration au titre de la rubrique 2910 (1 à 20 MW) ou par l'annexe II de l'arrêté du 3 août 2018 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations relevant du régime de l'enregistrement au titre de la rubrique 2910 (20 à 50 MW) de la nomenclature des ICPE.
 - Les **chaufferies de moins de 1 MW** sont soumises au règlement sanitaire départemental : l'épandage est proscrit, ce qui empêche toute valorisation agronomique, sauf si les cendres respectent une norme en vigueur.

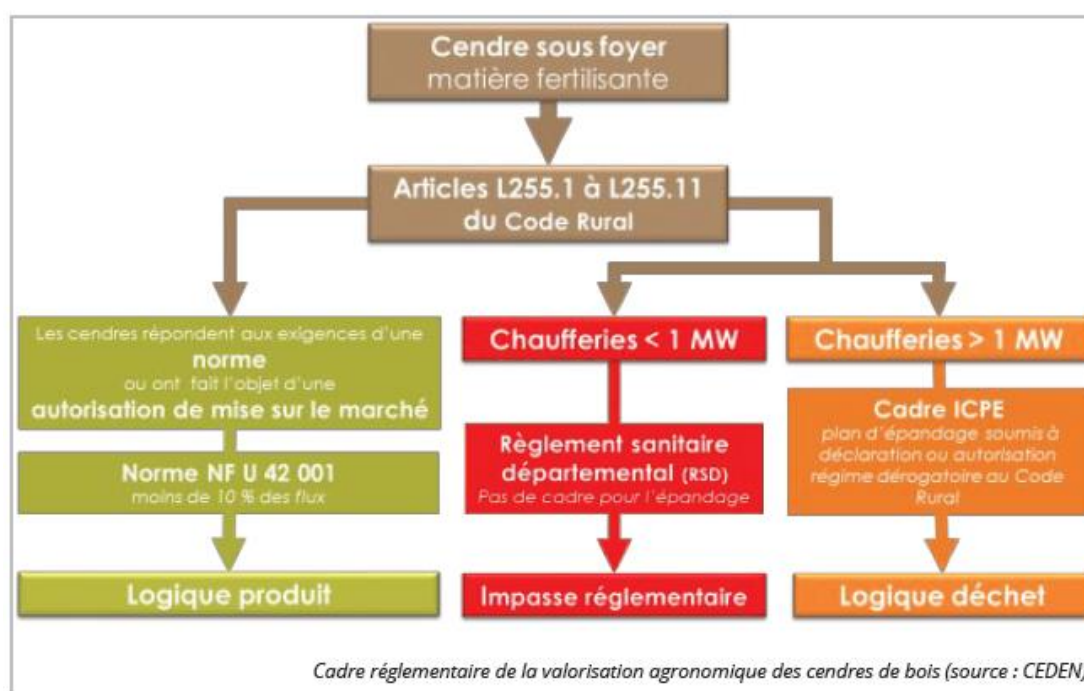


Figure 1 : Cadre réglementaire de la valorisation agronomique des cendres de bois

1.2.2. Condition de retour au sol des cendres

1.2.2.1. Les cendres disposent d'une autorisation de mise sur le marché ou respectent une norme

L'épandage des cendres dans le cadre d'une « logique produit » est envisageable si elles sont reconnues comme matières fertilisantes. Les matières fertilisantes sont des produits destinés à assurer la nutrition des végétaux et/ou à améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. Pour obtenir ce statut, deux voies sont envisageables :

- Soit elles bénéficient d'une autorisation de mise sur le marché, qui est accordée par l'ANSES à l'issue d'un processus d'évaluation de la demande déposée par l'entreprise souhaitant commercialiser le produit ;
- Soit elles répondent aux exigences d'une norme rendue d'application obligatoire par un arrêté pris sur le fondement du décret n° 2009-697 du 16 juin 2009 relatif à la normalisation, ce qui permet d'être dispensé de l'autorisation de mise sur le marché (AMM).

La mise sur le marché et l'utilisation des matières fertilisantes sont encadrées par les articles L.255-1 à L.255-11 du Code rural et de la pêche maritime.

« Autorisation de mise sur le marché »

Pour la mise sur le marché d'un produit, un dossier est à déposer par le demandeur auprès de la Direction des autorisations de mise sur le marché de l'ANSES. Le dossier comporte des précisions sur les conditions d'emploi, sur l'absence d'effets nocifs sur la santé humaine, sur la santé animale et sur l'environnement, ainsi que sur son efficacité à l'égard des végétaux et des sols. À l'issue de l'instruction, l'agence délivre une autorisation de mise sur le marché pour une durée de 10 ans.

Plusieurs produits fabriqués à partir de cendres de biomasse, notamment de bagasse (Guadeloupe, La Réunion...), ont ainsi obtenu une autorisation de mise sur le marché par l'ANSES en 2015.

La mise en place d'un plan d'épandage en forêt ne pouvant raisonnablement être amorti pour un unique apport pendant la vie d'un peuplement, une démarche commune à Biocombustibles SAS et à Bois Énergie France est actuellement conduite en Normandie dans la perspective d'une valorisation d'un produit fabriqué à partir de cendres des chaufferies collectives au bois.

« Norme engrais » – NFU 42-001

Les cendres peuvent rentrer dans la norme NFU 42-001 dans la catégorie « engrais composés P, K » avec la dénomination « cendres végétales ». Pour bénéficier de cette appellation, les cendres doivent respecter les teneurs minimales suivantes :

- La concentration cumulée en azote (N), en phosphore (P_2O_5) et en potasse (K_2O) doit être supérieure à 7% de la matière brute (MB) ;
- La concentration en phosphore (P_2O_5) doit être supérieure à 2 % de la matière brute ;
- La concentration en potasse (K_2O) doit être supérieure à 5 % de la matière brute.

Dans cette hypothèse, les cendres ont un statut de produit mais ce cas est assez rare (1 analyse sur 10 environ).

« Norme compost » – NFU 44-051

L'amendement à la norme NFU 44-051 actualisé en décembre 2010 (NF U44-051/A1) fixe la liste des matières autorisées dans les composts (de déchets verts notamment). Notons que les cendres des chaufferies biomasse étaient antérieurement admises, ce qui constituait un moyen d'enrichir les amendements organiques en éléments basiques

Si les cendres produites dans les chaufferies collectives au bois sont considérées comme un déchet, l'incorporation de cendres de chaufferie bois aux composts de déchets verts n'est plus autorisée, au risque de conférer de facto le statut de déchet au compost résultant du mélange.

Si elles respectent en revanche la norme NFU 42 001, les cendres sont alors assimilées à un produit et leur mélange un compost est autorisé. Le mélange est en effet assimilé à un enrichissement à partir d'un engrais minéral.

« Normes amendements minéraux basiques » - NFU 44-001, NFU 44-203

Compte tenu de leur haute valeur neutralisante, qui leur est procurée par leur forte teneur en chaux (CaO) et en magnésie (MgO), les cendres pourraient être considérées comme un amendement basique minéral (NFU 44-001), pouvant simultanément présenter une richesse en éléments nutritifs (NFU 44-203).

Dans le contexte actuel, les cendres ne figurent pas dans la liste des matières autorisées pour aucune de ces deux normes : elles ne peuvent donc pas être valorisées au titre de leur haute valeur neutralisante.

La norme NFU 44-203 est actuellement en révision. Une réflexion est en cours pour intégrer à cette norme les cendres des chaufferies biomasse ; les résultats de la présente étude associés à des mesures complémentaires permettront d'alimenter les travaux de révision menés par le BN FERTI (Bureau de Normalisation Fertilisation).

1.2.2.2. Les cendres sont valorisées dans le cadre d'un plan d'épandage

Les cendres extraites par voie sèche ou humide sous équipement de combustion peuvent être épandues, sous réserve du respect des dispositions des arrêtés du 3 août 2018 relatifs aux prescriptions générales applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement soumises à déclaration (annexe III) ou relevant du régime de l'enregistrement (annexe II) au titre de la rubrique 2910 des ICPE.

L'arrêté du 3 août 2018 prévoit un plan d'épandage par chaufferie, soumis selon les cas à déclaration, à enregistrement ou à autorisation.

Le plan d'épandage suppose la réalisation d'une étude préalable, comprise dans l'étude d'impact, démontrant sa faisabilité technique et agronomique :

- L'intérêt agronomique et l'innocuité des cendres doivent être démontrés ;

- Le sol doit être apte à les recevoir. A cet effet, des analyses de sol sont réalisées. Elles doivent être représentatives de la qualité des sols. Une analyse doit être réalisée par unité culturale ;
- Les conditions d'utilisation des cendres au champ sont déterminées au regard des besoins des cultures (dose d'épandage, périmètre, fréquence d'apport...).

Ensuite, le plan d'épandage doit faire l'objet d'un suivi très rigoureux. Il s'agit :

- D'une caractérisation physico-chimique des cendres,
- D'un programme prévisionnel d'épandage,
- D'un cahier de suivi des épandages (quantités, parcelles),
- D'un bilan récapitulatif annuel (bilan agronomique) transmis aux services de l'Etat (DREAL).

1.2.3. Innocuité des cendres : conditions minimales requises

L'annexe III de l'arrêté du 3 aout 2018 relatif aux installations de combustion soumises à déclaration et l'annexe II de l'arrêté du 3 aout 2018 relatif aux installations de combustion soumises à enregistrement fixent des teneurs limites à ne pas dépasser à la fois dans les cendres (seuils exprimés en mg/kgMS) et en termes de flux cumulés maximaux apportés sur les sols (en g/m² sur 10 ans). Ces teneurs limites en éléments polluants concernent :

- Les éléments traces métalliques (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn),
- Les composés traces organiques (PCB, HAP).

A noter, qu'aucun seuil n'est à ce jour fixé pour les dioxines/furannes. Des études sont cependant en cours au niveau européen afin de fixer des valeurs limites.

L'innocuité des cendres est également examinée dans le cadre d'une valorisation des cendres sous le statut de produit (norme engrais, AMM). Les seuils fixés sont généralement plus contraignants que pour les cendres épandues dans le cadre d'un plan d'épandage.

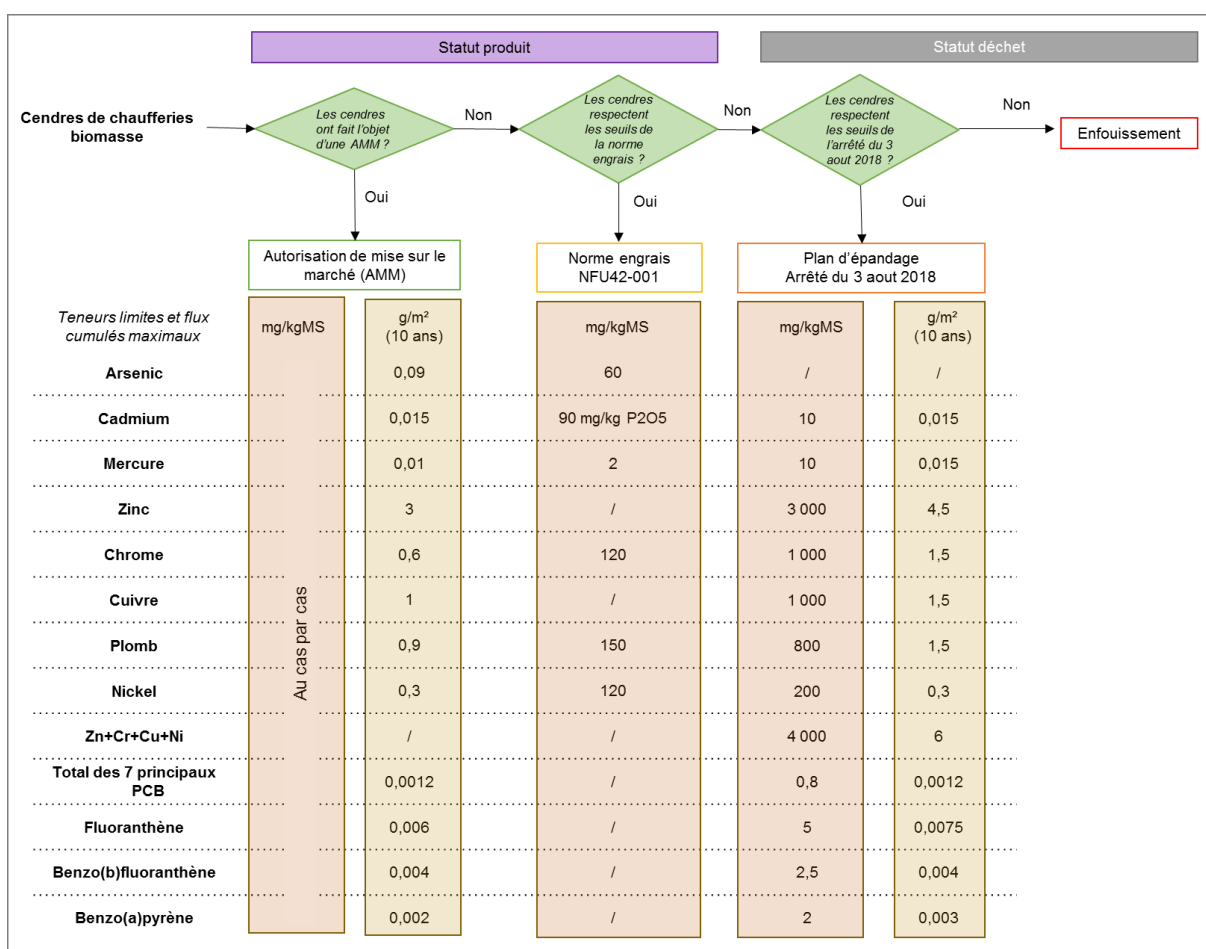


Figure 2 : Résumé du processus de valorisation agronomique des cendres d'une chaufferie biomasse -Source : CEDEN

1.3. Limites de l'étude

La présente mission a été conduite sur la base d'un cahier des charges défini conjointement par le ministère de la transition écologique et solidaire, les professionnels (FEDENE et CIBE) et l'ADEME. Si les objectifs de la mission étaient initialement clairement fixés, les méthodes et moyens mis en œuvre pour les atteindre ont introduit certaines limites à l'exercice. Les remarques formulées ci-dessous en précisent les contours.

Les sites séparant les cendres sous foyer et les cendres multicycloniques

L'un des objectifs a consisté en la caractérisation des cendres multicycloniques. Ce besoin a conduit les professionnels à identifier les sites collectant d'ores et déjà les cendres multicycloniques séparément. Il s'est avéré que le nombre de chaufferies de moyenne et forte puissance procédant à cette séparation est limité en France. Alors que l'objectif initial était de retenir 15 sites, 13 chaufferies seulement séparant ces deux types de cendres ont pu être intégrées au panel.

Parmi celles-ci, on constate une surreprésentation des chaufferies de faible puissance (inférieure à 1 MW), qui utilisent, compte tenu des technologies disponibles, un bois sec et finement divisé (plaquettes de scieries et/ou forestières ressuyées). Les flux de cendres produites sont faibles et l'évacuation n'est pas régulière, ce qui a constitué un handicap dans les analyses quantitatives (estimation des taux de cendres et proportions par type de cendres).

Parallèlement, deux chaufferies de très forte puissance séparent également les cendres. Les cendres multicycloniques ont pu en conséquence être caractérisées, mais l'une d'entre elles les recycle thermiquement (double combustion), l'installation évacuant en conséquence des cendres sous foyer, d'un côté, et des poussières de filtration, de l'autre. À noter que les technologies des 2 chaufferies sont très différentes de celles rencontrées dans les installations de plus faible puissance, les proportions de chaque type de cendres étant par exemple notablement différentes.

Les sites ne séparant pas les cendres sous foyer et les cendres multicycloniques

Au total, 17 chaufferies du panel ne séparent pas les cendres sous foyer et les cendres multicycloniques. Pour 13 d'entre elles, il a fallu adapter l'installation pour récupérer une quantité suffisante de cendres multicycloniques en vue de les analyser (au moins 2 kg).

La nature des travaux à réaliser a été définie en étroite relation avec les constructeurs. Deux commentaires peuvent être soulignés :

- Pour limiter le nombre d'interlocuteurs, les 2 constructeurs français (Compte.R et WEISS) ont été sollicités de façon privilégiée (il s'agit des deux constructeurs les plus présents sur la gamme de chaufferie étudiée). Pour autant, les constructeurs étrangers proposent des technologies identiques de collecte en mélange des cendres sous foyer et sous multicyclone. Cette pratique n'est donc **pas spécifique aux constructeurs français** ;
- Les travaux réalisés ont nécessité un arrêt de la chaufferie à l'occasion de la 1^{ère} campagne de prélèvements (perçement du conduit d'évacuation des cendres multicycloniques, pose des supports et du bac de récupération), puis un redémarrage à l'issue d'un refroidissement du foyer (45 à 60 minutes). Un **arrêt thermostatique d'une longue durée entraîne un refroidissement du foyer** ou une **modification brusque des volumes d'air introduits**, ce qui peut avoir pour conséquence de perturber la combustion et de produire une quantité temporairement plus importante de particules imbrûlées dans les fumées et de contaminants potentiellement associés, susceptibles d'être capturés dans des proportions inhabituelles dans le multicyclone. Les caractéristiques physico-chimiques des cendres multicycloniques obtenues peuvent en conséquence être modifiées pour certains paramètres compte tenu de la perturbation générée (augmentation du carbone organique total, teneur plus élevée en métaux lourds, présence de dioxines/furanes ...). Durant la 2^{ème} et la 3^{ème} campagne, les sites équipés d'une chaudière de marque Compte.R ont également connu un arrêt, mais de plus courte durée (installation du bac de prélèvement dans le conduit). Pour les chaudières de marque WEISS, l'arrêt n'a pas été nécessaire. En effet, une séparation physique du circuit des fumées et du circuit d'évacuation des cendres est assurée par une écluse, qui garantit la parfaite étanchéité des circuits.

La relation entre la composition des combustibles bois et la composition des cendres

Les combustibles bois ont également été caractérisés. L'objectif poursuivi initialement était plutôt d'identifier les causes d'une éventuelle altération de la qualité des cendres sous foyer et/ou multicycloniques en recherchant la présence du polluant considéré dans le combustible. Bien que 90 échantillons de combustible bois aient été analysés, il n'a pas été possible d'établir une relation statistique entre la composition des combustibles bois et la qualité des cendres.

Néanmoins, les éléments traces métalliques présents dans les cendres (ETM) proviennent du combustible bois. Les polluants organiques (HAP...)¹, ainsi que les molécules synthétisées (dioxines/furanes), devraient être dégradées lors de la combustion ; leur présence dans les cendres témoigne d'une combustion incomplète ou dégradée, les métadonnées relatives aux paramètres de combustion participant à la compréhension des résultats analytiques obtenus.

Les taux de cendres

Les taux de cendres ont été estimés à partir de données communiquées par les exploitants de chauffage sur les années civiles 2017 et/ou 2018 ou sur la saison de chauffage 2018/2019. Ces données sont les flux de combustibles bois et de tous les types de cendres produites par l'installation (cendres sous-foyer, cendres multicycloniques le cas échéant et poussières de filtration).

Le taux de cendres étant calculé sur la base des flux de matière sèche, les teneurs en matière sèche des cendres sous foyer et sous multicyclone de la campagne de prélèvements ADEME ont été retenues. En ce qui concerne les combustibles, les exploitants réalisent régulièrement des analyses de la matière sèche ; les tonnages et la siccité des combustibles bois ont été recueillis, parfois sur plusieurs années pour conforter l'approche.

En ce qui concerne les poussières de filtration, le taux a été calculé en retenant l'hypothèse que ces cendres ne contenaient aucune trace d'eau.

À noter que certaines installations collectant séparément les cendres multicycloniques évacuent néanmoins ces dernières en mélange aux poussières de filtration ou cendres sous-foyer ; dans ce cas, il n'a pas été possible de distinguer le taux de cendres cycloniques. Enfin, et comme évoqué ci-dessus, les installations de faible puissance (4 chaufferies de moins de 1 MW) n'ont pu fournir d'informations exploitables pour estimer la proportion de cendres multicycloniques.

Néanmoins, l'ensemble des analyses physico-chimiques a été réalisé ; l'absence de ces données quantitatives ne remet pas en cause l'exploitation statistique et sa robustesse.

La représentativité

L'ambition n'est pas de disposer d'un panel de chaufferies bois représentatif de l'ensemble des installations en fonctionnement à l'échelle nationale. Les installations de faible puissance (chaufferie de moins de 1 MW) et les installations de très forte puissance (équipant les industries du bois, de l'agroalimentaire, de la chimie...) sont notablement sous représentées ainsi que les installations séparant les deux types de cendres considérées.

L'objectif recherché est d'améliorer les connaissances en caractérisant les cendres sous foyer et les cendres multicycloniques ; cette campagne permet en outre de disposer d'un référentiel national sur la composition des cendres des chaufferies collectives et industrielles.

Le panel de chaufferies a été arrêté pour disposer d'une vision de la variété des situations existantes ; les résultats statistiques permettent néanmoins d'établir une extrapolation des flux de substances minérales susceptibles d'être épandus sur les sols agricoles (éléments basiques et nutritifs, éléments traces métalliques, composés traces organiques).

¹ Les PCB ont été également analysés, mais ils sont absents du combustible bois, et par conséquent, des cendres sous foyer et multicycloniques.

2. Méthodologie

La méthodologie de prélèvement a consisté à :

- Déterminer le nombre d'échantillons minimal nécessaire ;
- Sélectionner les sites au regard de différents critères : type de collecte des cendres, puissance, exploitant, répartition géographique ... ;
- Appliquer une méthode d'échantillonnage et de prélèvement standardisée, mais prenant en compte les spécificités des différents sites.

2.1. Objet de l'approche statistique

2.1.1. Détermination du nombre d'échantillons

Dans le cadre de la campagne d'analyse « cendres ADEME », le nombre d'analyses préconisé par **type de cendres** est de **45** pour disposer d'une analyse statistique robuste. L'objectif visait d'abord à éclater le panel de chaufferies (30 sites) en deux groupes équivalents. Il a ensuite été arrêté de procéder à 3 prélèvements par site :

- Le but initial était le suivant : 15 installations bénéficiant d'une récupération séparée des cendres multicycloniques et des cendres sous-foyer, d'une part, et 15 installations bénéficiant d'une collecte en mélange, d'autre part ;
- Le nombre de répétitions par site : 3 campagnes conduites respectivement en début, en milieu et en fin de saison de chauffe.

Le nombre d'échantillons collectés à l'échelle nationale permet ainsi de procéder à une analyse statistique d'une bonne fiabilité.

2.1.2. Types de cendres et la terminologie

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

- Pour les chaufferies du 1^{er} groupe dont la collecte des cendres est séparée (Sites S) :
 - Les cendres sous-foyer séparées (CF) ;
 - Les cendres multicycloniques séparées (MCS) ;
 - Les cendres sous-foyer et sous-multicyclone reconstituées (CFMC), dont les caractéristiques physico-chimiques sont estimées à partir d'une répartition massique des 2 types de cendres précédents (CF et MCS) et de leur composition respective ;
- Pour les chaufferies du 2nd groupe 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.

Compte tenu du nombre réduit d'installations de moyenne et forte puissance séparant les cendres multicycloniques, le nombre d'installations de type S a dû être ramené à treize sites et le nombre d'installations de type NS est passé à dix-sept sites. L'augmentation du nombre de sites de type NS ne remet pas en question la fiabilité des analyses statistiques.

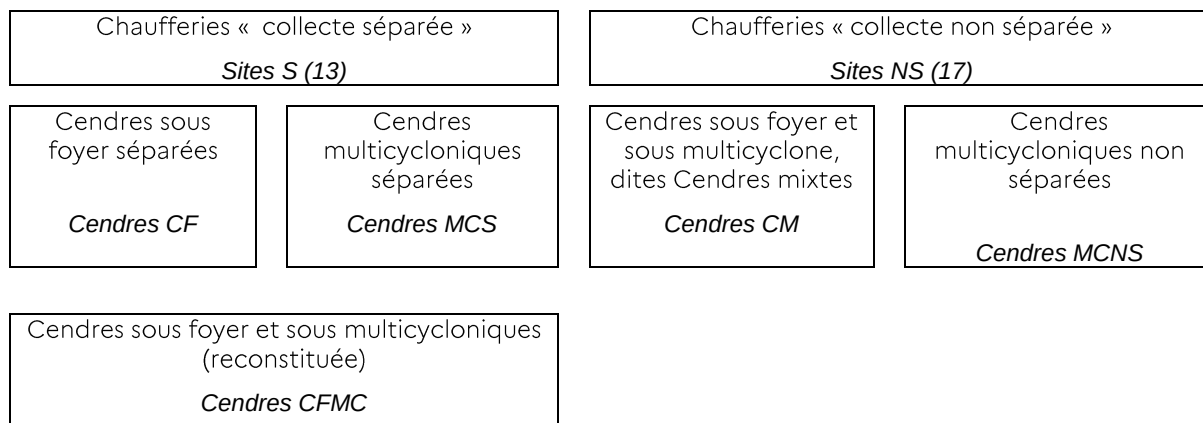


Figure 3 : Les différents types de cendres

2.2.Choix des sites

2.2.1. Méthodes

Afin de sélectionner les chaufferies suivies dans le cadre de l'étude ADEME, une approche multicritère a été entreprise. Elle prend en considération les critères suivants :

- La répartition géographique,
- La puissance des installations,
- Les constructeurs,
- L'exploitant de chauffage,
- La faisabilité technique,
- La cohérence des circuits organisés pour la campagne de prélèvements.

2.2.2. Présentation des chaufferies

Les 30 chaufferies retenues pour l'étude sont présentées dans le tableau ci-après.

Sur les 30 chaufferies sélectionnées :

- 13 chaufferies présentent une collecte des cendres sous-foyer et multicycloniques séparée (Site S),
- 17 chaufferies présentent une collecte des cendres sous-foyer et multicycloniques non séparée (Site NS).

Sur l'ensemble des sites NS, 13 (sur 17) ont nécessité un aménagement afin de séparer/prélever les cendres sous-foyer et sous-multi-cyclone (voir tableau 3).

Site n°	Puissance bois (en kW)		ICPE		Types de cendres sous-foyer	Traitement de fumées	Séparation des cendres multicycloniques Site NS : non séparée Site S : séparée
	Totale installée	Chaudière étudiée	Rubrique	Régime			
1	2 000	2 000	2910A	DC	humide	MC+FAM	NS
2	19 900	19 900	2910A	DC	humide	MC+FAM	S
3	1 410	600	2910A	DC	sèche	MC+FAM	S
4	14 800	7 400	2910A	DC	sèche	MC+EF	NS
5	4 000	4 000	2910A	DC	humide	MC+FAM	NS
6	5 500	5 500	2910A	DC	humide	MC+FAM	NS
7	600	600	2910A	DC	sèche	MC+EF	S
8	1 250	1 250	2910A	DC	sèche	MC	S
9	3 500	3 500	2910A	DC	humide	MC+FAM	NS
10	4 300	4 300	2910A	DC	humide	MC+FAM	NS
11	12 600	6 300	2910A	DC	humide	MC+FAM	NS
12	2 500	2 500	2910A	DC	sèche	MC+EF	S
13	8 000	6 200	2910A	DC	humide	MC+FAM	NS
14	4 500	4 500	2910A	E	humide	MC+FAM	S
15	4 000	1 500	2910A	DC	humide	MC+FAM	NS
16	14 000	14 000	2910A	E	humide	MC+FAM	S
17	500	500	2910A	DC	sèche	MC	S
18	7 000	7 000	2910A	DC	humide	MC+FAM	NS
19	2 200	2 200	2910A	DC	humide	MC+FAM	S
20	700	700	2910A	DC	sèche	MC	S

Site n°	Puissance bois (en kW)		ICPE		Types de cendres sous-foyer	Traitement de fumées	Séparation des cendres multicycloniques Site NS : non séparée Site S : séparée
	Totale installée	Chaudière étudiée	Rubrique	Régime			
21	9 650	5 900	2910A	DC	humide	MC+FAM	NS
22	12 300	8 600	2910A	E	humide	MC+FAM	NS
23	22 000	8 800	2910A	E	humide	MC+FAM	NS
24	2 500	2 500	2910A	DC	sèche	MC	S
25	890	890	2910A	DC	sèche	MC+EF	S
26	3 200	3 200	2910A	DC	humide	MC+FAM	NS
27	57 000	57 000	2910A	E	humide	MC+FAM	S
28	8 400	8 400	2910A	DC	humide	MC+FAM	NS
29	8 600	3 200	2910A	E	humide	MC+FAM	NS
30	6 000	3 000	2910A	DC	humide	MC+EF	NS

DC : déclaration – E : enregistrement – MC : multicyclone – FAM : filtre à manches – EF : électrofiltre

Tableau 1 : Présentation des chaufferies expertisées

2.2.2.1. Fiche technique détaillée par site

Pour chaque site, une fiche technique détaillée (cf le contenu détaillé d'une fiche en annexe 1) a été réalisée et fournie à l'ADEME (dossier indépendant et confidentiel). Ces fiches sont abondamment illustrées, en particulier par des photographies de points précis concernant les aménagements réalisés. Les résultats d'analyses de cendres et de combustibles bois issus des 3 campagnes de prélèvements des cendres 2018-2019 y sont joints en annexe. Chaque fiche est remise à l'exploitant de chauffage.

2.2.2.2. La répartition géographique

La sélection des sites a été réalisée de manière à disposer d'une bonne représentativité des chaufferies biomasse en terme de répartition sur le territoire. La carte ci-après localise les sites retenus.

Parmi les chaufferies retenues, les Sites S sont plus concentrés dans l'est de la France, alors que les Sites NS sont plus présents dans l'ouest. Aucun enseignement ne peut être tiré de ce constat, si ce n'est qu'il était plus facile pour les exploitants d'identifier des chaufferies présentant une séparation des cendres dans le territoire où le nombre de chaufferies est historiquement plus élevé !

En outre, il est plus facile de rentabiliser économiquement des chaufferies de faible puissance (qui sont équipées de systèmes de collecte séparée des cendres sous foyer et multicycloniques) dans des régions où le climat est plus sévère.

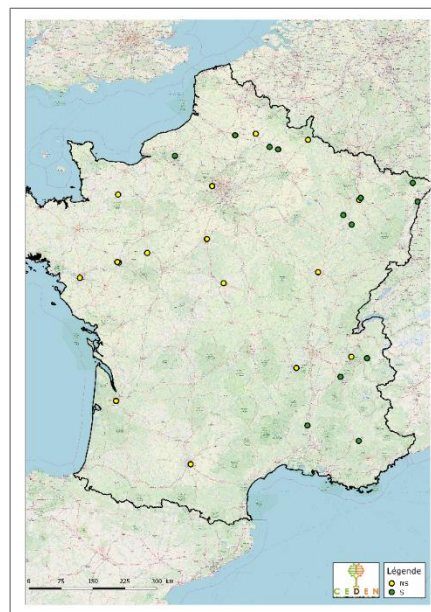


Figure 4 : Localisation des sites retenus

2.2.2.3. La répartition des chaufferies par gamme de puissance

2.2.2.3.1. La représentativité nationale

Le parc de chaufferies biomasse en France compte 6 600 installations supérieures à 50 kW réparties entre différentes gammes de puissance (source : CIBE). La puissance cumulée de ces installations s'élève à 8 610 MW et la consommation annuelle de bois est de l'ordre de 37 000 000 MWh PCI/an (soit une consommation de combustible bois de l'ordre de 13 millions de tonnes de matière brute /an).

Catégorie s de puissance (MW)	Nombre de sites		Puissance bois cumulée (MW)		Consommation de bois (MWhPCI/an)	
	Campagne Cendres 2018-2019	France entière	Campagne Cendres 2018-2019 ^{*1}	France entière	Campagne Cendres 2018-2019 ^{*2}	France entière
] 0,05 ; 1]	5	5 450	3,25	1 040	13 420	2 350 000
] 1 ; 2]	2	400	3,25	570	15 688	1 750 000
] 2 ; 4]	7	350	21,90	870	96 536	3 000 000
] 4 ; 6]	4	100	20,30	580	88 144	2 320 000
] 6 et + [	12	250	193,95	5 600	937 772	27 600 000
Total	30	6 550	242,65	8 660	1 151 560	37 020 000

^{*1}- Les valeurs du tableau correspondent à la puissance totale bois de l'installation.

^{*2}- Les consommations de bois sont approximatives. L'intégralité des données relatives au consommation de bois n'a pas pu être obtenue. Les données sont parfois partielles (année incomplète), voire manquantes pour certaines chaufferies.

Source : CEDEN, avec le concours du CIBE

Tableau 2 : Nombre de sites, puissance bois cumulée (MW) et consommation annuelle bois (MWhPCI/an) par catégorie de puissance de chaufferies bois à l'échelle nationale et de la Campagne ADEME-Cendres 2018-2019.

La Campagne ADEME-Cendres 2018-2019 porte sur 0,46 % seulement du nombre d'installations inventoriées en France, mais sur 2,8 % de la puissance installée et 3,1 % des consommations de bois (exprimées en énergie finale).

La campagne n'a pas pour vocation d'être représentative de la situation nationale. Néanmoins, cette approche permet de situer les enjeux ; une estimation plus précise de la production de cendres dans l'Hexagone est proposée par la suite.

Comparé au nombre de chaufferies biomasse recensées à l'échelle nationale, **les petites chaufferies sont sous représentées dans la présente étude**. Toutefois, l'objectif de cette expertise était de sélectionner un nombre relativement équivalent de sites dans chaque gamme de puissance.

2.2.2.3.2. Les chaufferies expertisées

La sélection des sites a été réalisée de manière à couvrir toutes les gammes de puissance :

- 5 chaufferies inférieures à 1 MW,
- 2 chaufferies de 1 et 2 MW,
- 8 chaufferies de 2 et 4 MW,
- 5 chaufferies de 4 et 6 MW,
- 10 chaufferies supérieures à 6 MW.

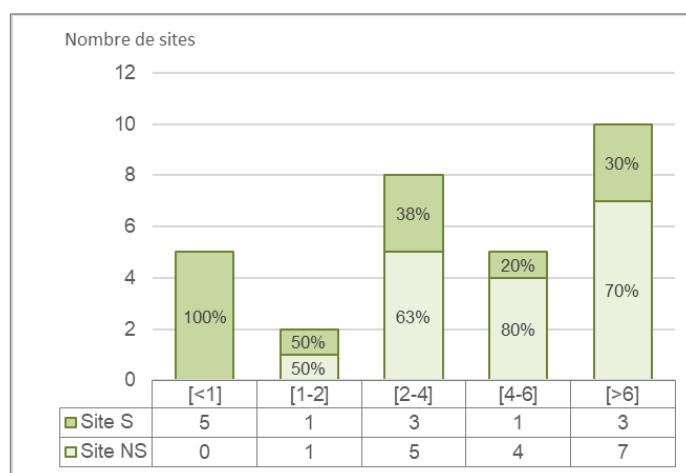
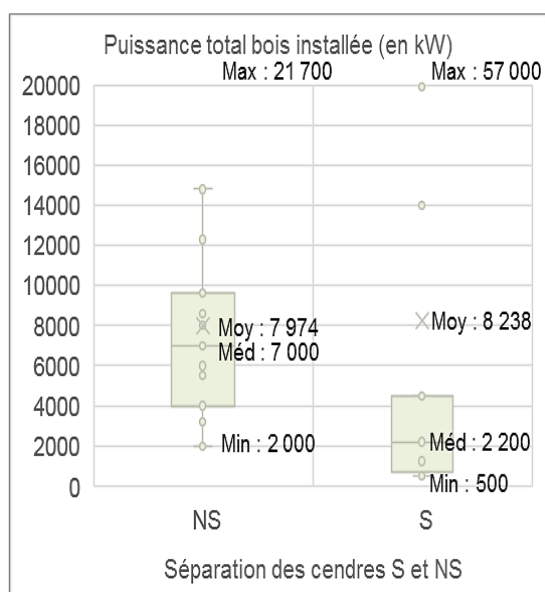


Figure 5 : Nombre de chaufferies selon le mode de séparation des cendres et par gamme de puissance bois

La séparation des cendres sous-foyer et des cendres multicycloniques est plus courante sur les chaufferies de faible puissance (moins d'1 MW : 100% des sites). La difficulté à identifier des sites séparant les cendres sous foyer et les cendres multicycloniques, en particulier pour les chaufferies de moyenne et forte puissance, s'est progressivement traduite par la réduction du nombre de sites concernés (13 chaufferies seulement, au lieu de 15 tel que le protocole le prévoyait initialement).

Pour ces sites, il en résulte une puissance moyenne élevée de 8,2 MW, mais une puissance médiane de 2,2 MW ; mais en excluant le Site 27 (57 MW), les valeurs chutent respectivement à 4,2 MW et 1,7 MW. Même en excluant cette installation, on observe toujours un écart important entre la moyenne et la médiane, ce qui témoigne du faible nombre d'installations de forte puissance intégré dans le panel (mais aussi, de leur fort impact sur la moyenne).

Pour les 17 sites où la collecte des cendres sous foyer et multicycloniques est en mélange, la moyenne se situe à 8,0 MW et la médiane, à 7,0 MW. Globalement, ces installations présentent une plus forte puissance que les précédentes, ce qui peut avoir une incidence, notamment sur les conditions d'approvisionnement en combustible bois (mix combustible plus important).



Aide à la lecture de la figure

Cette représentation sous la forme d'une boîte à moustache fournit :

- La puissance minimale, représentée par la limite basse (moustache) ;
- Le 1^{er} quartile (Q1), représenté par le trait du bas de la boîte à moustache ;
- La valeur médiane (Q2), matérialisée par le trait central ;
- Le 3^{ème} quartile (Q3), représenté par le trait du haut de la boîte à moustache ;
- La puissance maximale, représentée par la limite haute (moustache) ;
- La moyenne des puissances, symbolisée par une croix.

Les valeurs exceptionnelles sont représentées par des ronds (cf. paragraphe 2.6.4 pour plus d'informations sur la méthode d'analyse).

Figure 6 : Comparaison de la puissance bois des installations en fonction du type de récolte des cendres séparée/non séparée

2.2.2.3.3. La répartition des chaufferies par exploitant

Les 4 principaux acteurs économiques exerçant une activité d'exploitation de chauffage sur le territoire national ont été associés à la campagne. Le nombre de chaufferies dépend du marché de chaque acteur et d'un respect des critères de choix ; il en résulte la répartition suivante :

- CORIANCE : 2 sites,
- DALKIA : 12 sites,
- ENGIE Cofely : 10 sites,
- IDEX : 6 sites.

Pour chaque exploitant, le ratio entre le nombre de sites avec une collecte séparée et non séparée des cendres multicycloniques (sites S ou NS) est sensiblement équivalent.

2.2.2.3.4. La répartition des chaufferies par constructeur

Un exercice identique a été entrepris avec les constructeurs de chaudières français Compte-R et Weiss :

- 13 sites sont équipés d'une chaudière Compte-R,
- 7 sites sont équipés d'une chaudière WEISS ;
- 10 sites ont été mis en œuvre par d'autres constructeurs (Kolbach, Viessmann, AGROforst, Bioflamm, Hertz, KABLITZ, LLT et VYNCKE).

Les deux constructeurs français ont fortement été impliqués dans le Comité de pilotage de la mission en raison des aménagements à réaliser en chaufferies. Ces 2 constructeurs totalisent en effet les 16 sites retenus disposant d'une collecte en mélange. Notons que la collecte en mélange des cendres sous foyer et cendres multicycloniques n'est pas une spécificité des constructeurs français. Les autres constructeurs de chaudières de moyenne et forte puissance proposent également des technologies de ce type ; à l'inverse, Compte-R et WEISS peuvent proposer des solutions d'extraction séparée et par voie sèche.

Ces 2 constructeurs restent néanmoins les plus représentés sur le territoire national. En outre, le Comité de pilotage ne pouvait, pour des questions d'organisation, être ouvert à tous les constructeurs, d'une part, et il fallait réduire le nombre de cas d'aménagement-type (faisabilité, conséquences, fiabilité...), d'autre part.

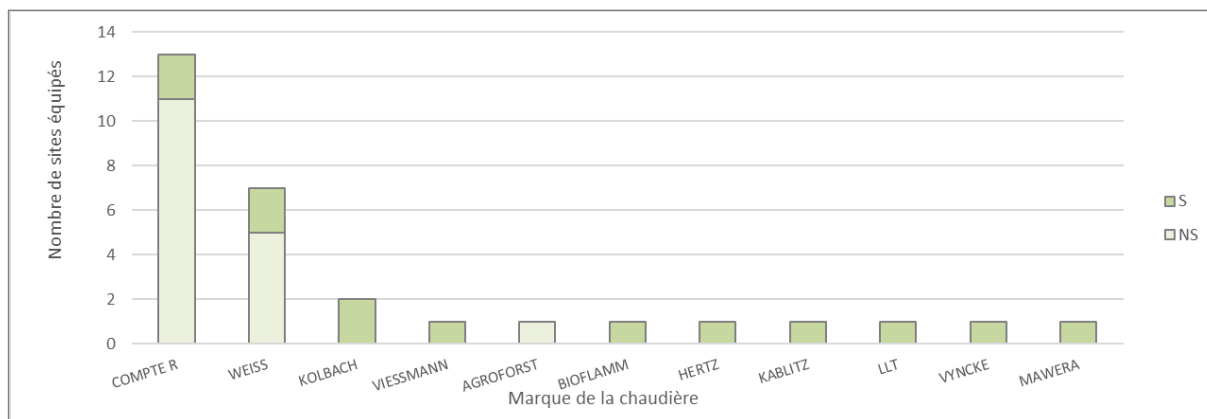


Figure 7 : Nombre de sites équipés par constructeurs de chaudière

2.3. Plan d'échantillonnage

2.3.1. Résumé du plan d'échantillonnage

Les cendres ont été prélevées à trois périodes au cours de la saison de chauffe 2018-2019. Le plan d'échantillonnage des cendres est résumé dans la figure ci-après.

Période de prélèvement : début, milieu et fin de saison de chauffe 2018/2019

$n=3$

Chaufferies S
(collecte séparée)

$n=13$

Chaufferies NS
(collecte non séparée)

$n=17$

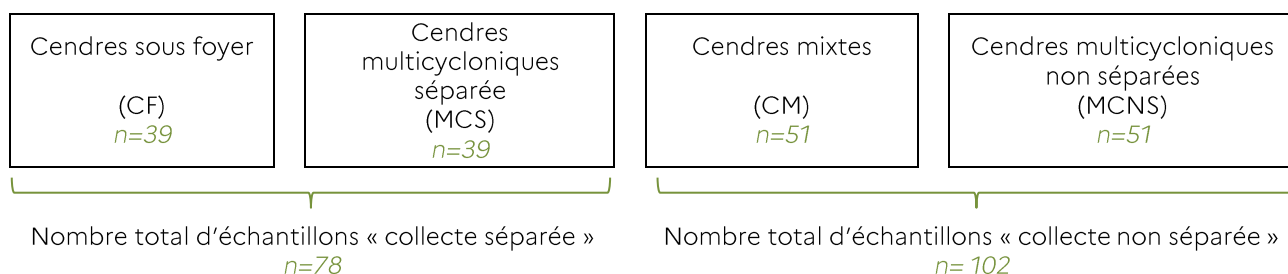


Figure 8 : Résumé du plan d'échantillonnage

Au total, le nombre d'échantillons se répartit comme suit :

- Cendres sous-foyer : 90,
 - dont les cendres séparées (CF) : 39,
 - dont les cendres sous-foyer mixtes (CM) : 51,
- Cendres multicycloniques : 90,
 - dont les cendres multicycloniques séparées (MCS) : 39,
 - dont les cendres multicycloniques non-séparées (MCNS) : 51.

Au total, **180 échantillons** ont été élaborés au cours des **trois campagnes** de prélèvement.

Simultanément, des **prélèvements de combustibles** ont 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 permettent de 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.

2.3.2. Période d'échantillonnage

L'échantillonnage s'est déroulé en trois étapes :

- La première campagne de prélèvements (correspond au début de saison de chauffe) a débuté le 19 novembre 2018 et s'est terminée le 07 janvier 2019. Un aménagement dans les conduites d'évacuation des cendres multicycloniques a été nécessaire sur 13 sites.
- La deuxième campagne de prélèvements (milieu de saison de chauffe) s'est déroulée du 08 février 2019 au 12 mars 2019.
- La troisième campagne de prélèvements (fin de saison de chauffe) s'est tenue du 18 mars 2019 à fin juin 2019.

Le planning détaillé pour chaque chaufferie et par campagne de prélèvements est présenté dans le tableau ci-dessous.

Site n°	Campagne 1	Campagne 2	Campagne 3	Site	Remarque
1	10/01/2019	28/02/2019	18/03/2019	NS	Aménagement réalisé
2	20/11/2018	25/02/2019	21/03/2019	S	
3	20/12/2018	26/02/2019	09/04/2019	S	
4	27/11/2018	14/02/2019	05/04/2019	NS	
5	20/12/2018	21/02/2019	11/04/2019	NS	
6	05/12/2018	05/03/2019	26/03/2019	NS	Aménagement réalisé
7	21/11/2018	27/02/2019	19/03/2019	S	
8	27/11/2018	11/02/2019	20/03/2019	S	
9	16/01/2019	07/03/2019	27/03/2019	NS	Aménagement réalisé
10	04/12/2018	04/03/2019	25/03/2019	NS	Aménagement réalisé
11	10/12/2018	08/03/2019	29/03/2019	NS	Aménagement réalisé
12	18/12/2018	14/02/2019	26/03/2019	S	
13	03/01/2019	14/03/2019	01/04/2019	NS	Aménagement réalisé
14	24/12/2018	21/02/2019	19/03/2019	S	
15	04/01/2019	07/03/2019	28/03/2019	NS	Aménagement réalisé
16	19/11/2018	18/02/2019	22/03/2019	S	
17	21/12/2018	22/02/2019	18/04/2019	S	

Site n°	Campagne 1	Campagne 2	Campagne 3	Site	Remarque
18	19/12/2018	28/02/2019	15/04/2019	NS	
19	19/12/2018	07/03/2019	12/04/2019	S	
20	20/11/2018	25/02/2019	21/03/2019	S	
21	15/01/2019	28/03/2019	28/08/2019	NS	Aménagement réalisé
22	06/12/2018	27/03/2019	17/04/2019	NS	Aménagement réalisé
23	26/11/2018	14/03/2019	16/04/2019	NS	Aménagement réalisé
24	29/11/2018	08/02/2019	25/03/2019	S	
25	29/11/2018	20/02/2019	25/03/2019	S	
26	12/12/2018	11/03/2019	01/04/2019	NS	Aménagement réalisé
27	18/12/2018	22/02/2019	18/04/2019	S	
28	11/12/2018	06/03/2019	27/03/2019	NS	
29	22/11/2018	20/03/2019	08/04/2019	NS	Aménagement réalisé
30	21/11/2018	27/02/2019	19/03/2019	NS	Aménagement réalisé

Tableau 3 : Planning des campagnes de mesures 2018-2019

2.3.3. Méthodes de prélèvement et aménagement des sites

Les prélèvements des cendres

Lorsque les cendres sous foyer et les cendres sous cyclones sont collectées simultanément, rappelons que des aménagements ont dû être réalisés en chaufferie pour récupérer séparément les échantillons de cendres multicycloniques caractérisées à 3 reprises au cours de la campagne d'analyse.

Plusieurs protocoles de prélèvement des cendres, spécifiques à chaque technologie, ont été établis (cf. annexe 2).

Ces aménagements consistent en la **mise en place d'un bac en acier** en travers de la gaine d'évacuation gravitaire des cendres multicycloniques vers l'extracteur des cendres sous-foyer. Le bac repose sur 2 tiges filetées ayant nécessité le percement de 4 trous ; les tiges sont fixées depuis l'extérieur par 4 boulons, l'étanchéité étant garantie par des rondelles. Sauf exception, les tiges filetées n'ont pas été démontées entre les prélèvements (gain de temps et réduction de la durée de l'arrêt thermostatique de la chaudière).

L'évacuation des cendres multicycloniques est gravitaire ; les gaines sont systématiquement équipées d'une trappe de visite, qui a été utilisée pour insérer le bac (cf. annexe 2).

Les cendres sont évacuées vers une benne couverte à l'aide d'un convoyeur à chaînes. Les cendres sous-foyer sont extraites par voie humide.

Les travaux d'aménagement ont été réalisés à l'occasion de la première campagne de prélèvements. On distingue à ce titre 2 technologies :

- Le filtre multicyclonique est équipé d'une écluse permettant de garantir la parfaite étanchéité entre le circuit des fumées et le circuit d'évacuation des cendres. Dans ce cas, la trappe de visite peut être librement ouverte sans incidence sur les conditions de la combustion. Par sécurité, les travaux d'aménagement ont été réalisés, chaudière à l'arrêt. Par contre, le bac de prélèvement a été mis en place sans arrêter l'installation. Les cendres multicycloniques et la gaine d'évacuation ne sont pas en contact direct avec le lit d'eau.
- La gaine d'évacuation des cendres multicycloniques plonge dans le lit d'eau, ce qui permet de garantir l'étanchéité du circuit des fumées. Les cendres multicycloniques tombent dans le lit d'eau, la forte humidité pouvant occasionner des agrégats, voire des colmatages (constat sur 2 sites). La trappe ne peut être ouverte sans un arrêt préalable de la chaudière (45 à 60 minutes pour l'aménagement et 30 minutes à plusieurs jours parfois pour les prélèvements).

Il est à noter que l'**arrêt de la chaudière bois** avant le prélèvement peut avoir une **incidence sur les conditions de la combustion** (refroidissement du foyer à l'occasion d'un arrêt thermostatique de la chaudière de longue à très longue durée), et par voie de conséquence, sur les résultats analytiques.

Le prélèvement des combustibles bois

Pour élaborer un échantillon le plus représentatif possible du combustible bois utilisé, les exploitants ont conservé leur propre prélèvement constitué lors de chaque livraison ; ces échantillons ont servi de prélèvements élémentaires, à partir duquel un quartage a permis de constituer l'échantillon transmis au laboratoire.

Le lien entre la qualité des combustibles et la qualité des cendres peut s'avérer difficile à établir. Il faut donc considérer que les analyses physico-chimiques des combustibles bois constituent un simple indicateur d'une éventuelle altération de la qualité des combustibles, une recherche ayant été conduite lorsqu'une dégradation de la qualité des cendres sous foyer ou multicycloniques a été constatée.

2.4. Mesures réalisées et métadonnées relevées

2.4.1. Paramètres analysés sur les cendres et le combustible bois

Les échantillons de cendres et de combustibles, une fois prélevés et conditionnés, ont été analysés par le laboratoire EUROFINS.

Les analyses réalisées sur les cendres sont résumées dans le tableau ci-après.

Les méthodes analytiques utilisées pour caractériser les combustibles et les cendres sont présentées en annexe 3, de même que les limites de quantification et les incertitudes des méthodes analytiques.

	Bois	Cendres	Origine possible de la pollution dans les cendres
Paramètres physico-chimiques			
Granulométrie	X		
Humidité %PB	X	X	
pH / Conductivité sur brut		X	
Matières minérales (MM)		X	
Pouvoir calorifique : PCS et PCI (kJ/kg)	X		
Micropolluants – Eléments traces			
Eléments traces métalliques (mg/kgMS)			
Métaux toxiques : Pb, Cd, Hg	X	X	ETM combustible
Oligo-éléments : Zn, Cr, Cu, Ni, As	X	X	ETM combustible
Molybdène (Mo), sélénium (Se)		X	
Composés traces organiques			
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques	X (16)	X (3)	Problème de combustion (à démontrer)
PCB au nombre de 7	X	X	
PCP Pentachlorophénol (mg/kgMS)	X		
Dioxines (17 PCDD/F)		X	Chlore et organochlorés (PCP et PCB) combustible et problème de combustion (à démontrer)
Pesticides	X		
Autres éléments minéraux			
Chlore	X		
Halogènes	X		
Valeurs agronomiques			
Valeur neutralisante :			
Mg - MgO		X	
Ca - CaO		X	
Valeur fertilisante :			
P - P ₂ O ₅		X	
K - K ₂ O		X	

	Bois	Cendres	Origine possible de la pollution dans les cendres
Na – Na ₂ O		X	
Azote total	X	X	
Azote organique, ammoniacal, nitrique, uréique		X	
Elément majeur : S	X	X	
Matière organique (Perte au feu à 550 °C)	X	X	
Carbone Organique Total		X	

Tableau 4 : Résumé des analyses réalisées sur le combustible et les cendres

2.4.2. Métadonnées

Lors de la visite des sites, divers éléments d'informations ont été collectés :

- Pour toutes les installations, les caractéristiques suivantes :
 - Puissance biomasse (MW) ;
 - Technologie et marque chaudière ;
 - Type de cendres (humide, sèche) ;
 - Nature de cendres : non séparée, séparée ;
- Pour les installations où les cendres multicycloniques ne sont pas séparées, un relevé de plusieurs paramètres pour rechercher l'éventuelle cause d'un écart de composition :
 - Les paramètres de fonctionnement de la chaudière :
 - Le taux de charge de la chaudière
 - Le taux d'O₂ dans les fumées
 - La température de la chambre de combustion ;
 - Les conditions de prélèvement des cendres multicycloniques :
 - La durée d'arrêt de l'installation
 - La durée du prélèvement des cendres MCNS.

Ces métadonnées seront utiles à l'exploitation statistique et l'analyse des résultats statistiques, notamment dans le but de rechercher une éventuelle influence du mode de prélèvement sur la qualité des cendres multicycloniques.

2.4.3. Autres données disponibles

Au-delà des résultats analytiques fournis par le laboratoire et des métadonnées, un jeu de données a été constitué lors des visites ou de contacts auprès du gestionnaire ou des responsables régionaux des sites de combustion.

Les paramètres suivants ont ainsi été recueillis :

- Bois : quantité (en tonnes de MB et MS) et qualité (type de combustibles) ;
- Cendres : quantité de cendres sous-foyer et volantes, et le cas échéant, multicycloniques (en tonnes de MB, et lorsqu'une analyse physicochimique a été réalisée, en tonnes de MS).

Ces données ont été collectées sur la saison 2017 ou 2018 (ou les 2) ou l'hiver 2017/2018. Pour 5 sites, les informations concernant la saison de chauffe 2018/2019 (durant laquelle les prélèvements ont été réalisés) ont été fournies.

Ces informations permettent de réaliser un bilan annuel des livraisons de combustibles et d'enlèvement des cendres. Elles constituent le support à l'établissement du taux de cendres afin de déterminer les enjeux quantitatifs du retour au sol des sous-produits de la combustion. Elles ont également participé à la compréhension de certains résultats analytiques.

Notons qu'aucune information n'a pu être obtenue pour 4 installations. Il s'agit pour l'essentiel de chaufferies de faible puissance, dont la production de cendres est difficile à établir, l'évacuation n'étant pas régulière (moins d'une fois par an), et à mettre simultanément en relation avec une consommation de combustible bois.

2.4.4. Bases de données cendres et combustibles

Deux bases de données ont été élaborées à partir des résultats analytiques de la Campagne cendres 2018-2019 : une base de données relative aux cendres sous foyer et aux cendres multicycloniques et une base de données relative au combustible.

De manière générale, la méthode d'analyse utilisée y est indiquée, ainsi que, le cas échéant, la limite de quantification pour chaque analyse.

Parallèlement, divers fichiers de calcul ont également été transmis à l'ADEME ; ils sont le support de la plupart des graphiques présentés dans ce rapport.

2.5. Analyses des données

Rappel des attentes du Ministère, de l'ADEME et des professionnels et références des chapitres où l'information et/ou le traitement des données sont fournies :

- L'analyse comparative des résultats par prélèvement et par installation (CF, CM, MCS, MCNS) :
Cf. paragraphe « 3.3. Caractéristiques des cendres », cf. paragraphe « 3.4. Relations entre la composition des cendres, des combustibles bois, les caractéristiques des chaufferies et les paramètres de fonction de l'installation »
- L'analyse comparative des résultats par rapport aux seuils réglementaires d'épandage :
Cf. paragraphes « 3.5. Conformités des cendres ».
- L'analyse comparative des résultats par rapport à des campagnes antérieures réalisées sur les cendres de combustion biomasse :
Cf. paragraphe « 3.6. Approches comparatives ».
- L'analyse des flux de substances fertilisantes et polluantes suivant le type de cendres :
Cf. paragraphe « 3.3. Caractéristiques des cendres », cf. paragraphe « 3.7 Flux de substances fertilisantes » et Cf paragraphe « 3.8. Bilan national et enjeux du retour au sol »
- L'analyse des similitudes et différences des résultats obtenus entre installations :
Cf. paragraphes « 3.3. Caractéristiques des cendres »

2.5.1. Méthodes descriptives

L'analyse descriptive vise à utiliser différents indicateurs (descripteurs) pour décrire le jeu de données et interpréter la distribution observée (médiane, quartile, moyenne, écart-type...).

Les résultats analytiques ont été traités selon différentes approches :

- Une analyse par **boîte à moustache** pour chacun des éléments étudiés. Elle permet d'obtenir un aperçu de la dispersion de la série de données.
- Une analyse par **intervalle de confiance** pour chacun des contaminants étudiés.

2.5.1.1. Boîte à moustache

Une analyse par boîte à moustache (diagramme de Tukey) a été réalisée pour chaque élément ou contaminant afin d'apprécier la dispersion des données par type de cendres (CF, CM, MCS, MCNS).

Les boîtes à moustache fournissent :

- Le 1^{er} quartile (Q1),
- La médiane (Q2),
- Le 3^{ème} quartile (Q3),
- Les valeurs minimales et maximales (hors valeurs atypiques),
- La moyenne (représentée par une croix).

Rappelons que le premier quartile correspond à la donnée de la série qui sépare les 25% inférieurs des données et le troisième quartile, les 75 % inférieurs des données de la série.

L'écart interquartile est la différence entre le 1^{er} et 3^{ème} quartile : il constitue statistiquement un critère de dispersion de la série.

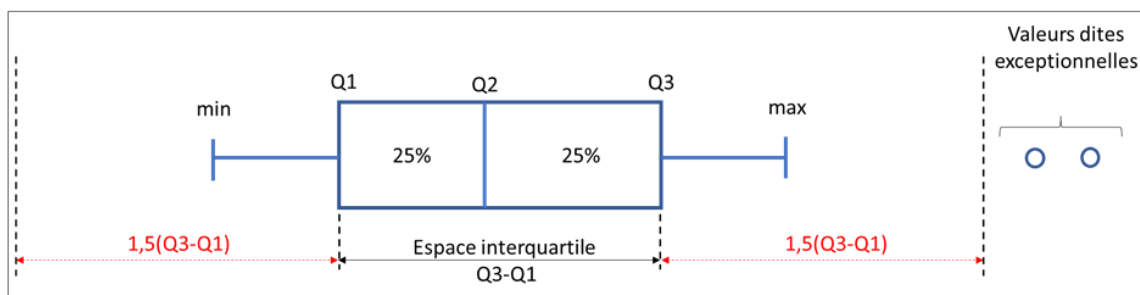


Figure 9 : Illustration d'une boîte à moustache et détection des valeurs atypiques

Valeurs exceptionnelles :

Une valeur exceptionnelle est une observation anormalement élevée ou basse. Ces valeurs atypiques peuvent conduire à des interprétations trompeuses. Par exemple, un ensemble de données inclut les valeurs suivantes : 1, 2, 3 et 34. La valeur moyenne (10), qui est notamment supérieure à la majorité des données (1, 2, 3), est considérablement influencée par le point de données extrême (34). Dans ce cas, la valeur de la moyenne laisse à penser que les valeurs de données sont plus élevées qu'elles ne le sont vraiment. Il convient d'examiner les valeurs exceptionnelles au cas par cas afin d'en rechercher la cause (erreur d'échantillonnage, erreur d'analyse de laboratoire, mode de prélèvement, qualité du bois, paramètre de fonctionnement...). Dans le diagramme de Tukey, les valeurs exceptionnelles sont identifiées avec la règle de l'écart supérieur à 1,5 x écart interquartile (Q1-Q3).

Pour information, aucune valeur n'a été retirée de l'analyse, hormis un échantillon de cendres CM (site 10 au cours de la campagne 1) pour lequel les valeurs agronomiques ont été exclues car elles apparaissaient aberrantes (problème analytique).

2.5.1.2. Intervalle de confiance

Un intervalle de confiance encadre une valeur réelle que l'on cherche à estimer à l'aide de mesures prises par un procédé aléatoire. Lorsqu'un intervalle de confiance à 95 % est fourni pour une grandeur, cela signifie que cet intervalle a 95 % de chances de contenir la valeur qu'aurait donnée un échantillonnage exhaustif (population mère).

Lorsque les données suivent une loi normale, l'intervalle de confiance se calcule selon l'équation suivante :

$$I_c = \left[\bar{x} - t_\alpha \frac{s}{\sqrt{n}} ; \bar{x} + t_\alpha \frac{s}{\sqrt{n}} \right]$$

Avec :

I_c = intervalle de confiance

$\bar{x}$ = moyenne observée

t_α = coefficient fonction du niveau d'erreur α

s = écart-type observé

n = taille de l'échantillon

Lorsque les données ne suivent pas une loi normale, la méthode statistique dite du « bootstrap » permet de s'affranchir des hypothèses de normalité des données. Le « bootstrap » est une technique d'inférence statistique permettant, par une simulation de rééchantillonnage (en général 1 000 répétitions), de définir les intervalles de confiance pour une estimation (exemple : moyenne).

Une analyse descriptive préliminaire de la dispersion des données a montré que les données ne suivaient pas une loi normale (cf. annexe 6), pour la majorité des paramètres étudiés. Par conséquent, la **méthode du bootstrap** a été appliquée. Cette analyse a été réalisée à l'aide du logiciel de statistique R (<http://www.R-project.org>).

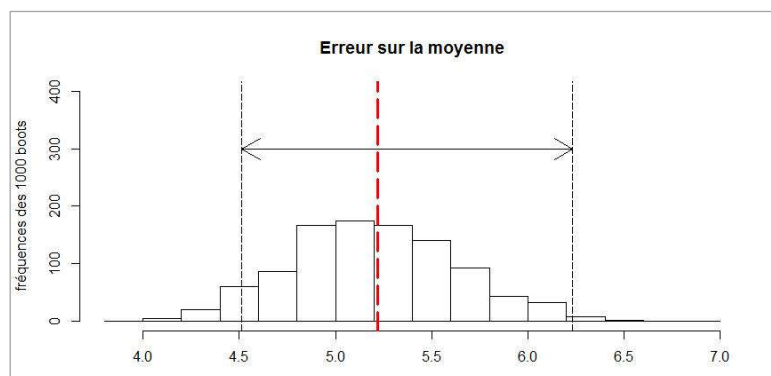


Figure 10 : Exemple de résultats de Bootstrap

2.5.2. Autres analyses

En complément, des analyses descriptives et des analyses multivariées (ACP et CAH) ont été réalisées afin de mettre en évidence :

- des différences potentielles entre les types de cendres produites,
- des similarités entre échantillons,
- de potentielles relations entre les paramètres (métadonnées incluses).

Ces analyses sont présentées en détail en annexe 4.

Elles ont pour objectif de procéder à un **classement des échantillons** en fonction de leurs caractéristiques et de **mettre en évidence les similarités**, ce qui permet de les rapprocher. Ces approches ne sont pas présentées dans le texte ; elles ont principalement **servi à comprendre la nature des points communs** entre les échantillons et à identifier les paramètres à examiner plus précisément.

3. Exploitation des résultats

3.1. Caractéristiques des combustibles

3.1.1. Flux de bois réceptionnés et flux de cendres évacuées

Les tonnages de bois réceptionnés sur les installations de combustion, ainsi que les flux de cendres évacuées, sont présentés dans le tableau ci-après.

Ces données ont pour vocation d'évaluer :

- Le taux de cendres, le but étant de vérifier la relation entre le taux de cendres et le taux de matières minérales contenues dans le combustible bois. Tout d'abord, le taux de cendres (T_{cendres}) est le rapport entre la matière sèche contenue dans les cendres (MS_{cendres}) et la matière sèche du combustible bois (MS_{biomasse}). Sur une période donnée, il se calcule ainsi :

$$T_{\text{cendres}} (\%) = \frac{\sum MS_{\text{cendres}}}{\sum MS_{\text{biomasse}}} \times 100$$

- Les parts respectives de cendres multicycloniques et de cendres sous-foyer. Cette répartition peut uniquement être calculée sur les sites où ces cendres sont collectées séparément (site S).

À noter que les exploitants ont également communiqué les éléments d'information sur les poussières de filtration (cendres volantes), ce qui permet d'établir un taux de cendre globale à l'échelle du site.

Selon les installations, les cendres multicycloniques (MC) sont évacuées :

- En commun avec les cendres sous-foyer (site NS),
- Sur les Site S.
 - Séparément des cendres sous-foyer et des poussières de filtration,
 - Conjointement avec les poussières de filtration (FAM ou EF), lorsque les cendres multicycloniques sont dirigées vers un unique centre de stockage de déchets dangereux (comme les poussières de filtration).

Difficultés rencontrées pour estimer les proportions de cendres multicycloniques

Les flux de combustible bois et les flux de cendres produites doivent provenir d'une période identique pour établir le taux de cendres. Les informations transmises ne sont pas systématiquement exploitables.

- Pour les sites en collecte séparée (S), les flux de cendres évacuées ont pu être transmis par les exploitants pour la plupart des chaufferies. Dans le cas des chaufferies de faible puissance, les quantités de cendres sont en effet faibles et les flux stockés en big bag ne sont pas évacués régulièrement (moins d'une fois par an, et pour les cendres multicycloniques ou les poussières de filtration, parfois tous les 2 ou 3 ans). Pour 4 sites (sur 13), les données n'ont ainsi pu être exploitées.
- Les cendres multicycloniques sont, pour 2 chaufferies (sites n° 16 et n° 24), évacuées vers les mêmes sites de traitement et conjointement avec les poussières de filtration, ce qui ne permet pas d'appréhender la proportion de cendres MC (un unique bordereau d'évacuation). Dans un cas, les cendres multicycloniques sont réintroduites dans l'installation de combustion (sites n° 27) et pour 2 chaufferies, elles sont mélangées aux cendres sous foyer (sites n° 17 et n° 20).

Les flux de bois réceptionnés varient fortement : de 150 et 83 000 tMS/an selon les installations. Le site 27 n'est pas indiqué sur la figure.

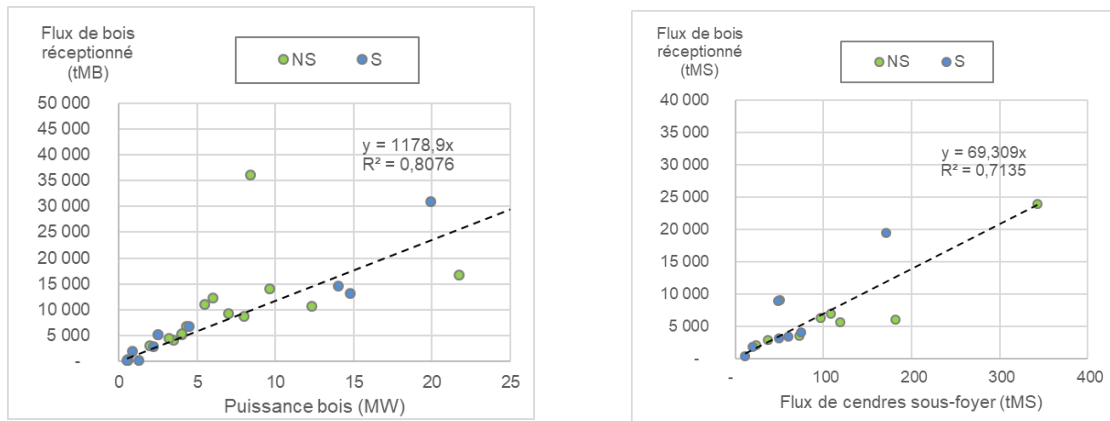


Figure 11 : Relation entre les consommations de bois et les puissances bois et les quantités de cendres sous-foyer produites

N° de site	Séparation des cendres	Période	Début Période	Fin période	Puissance bois (MW)	Biomasse brute (tMB)	Humidité bois (%)	Biomasse sèche (tMS)	Cendres sous-foyer (tMS)	Cendres multicycloniques (tMS)	Cendres FAM/EF (tMS)	Cendres multicycloniques-FAM/EF (tMS)
1	NS	2017/2018	01/10/2017	30/04/2018	2,0	2 832	36,8	1 791	27,1		3,8	
2	S	2017	01/01/2017	31/12/2017	19,9	30 708	37,4	19 211	170,6	90,4	75,4	
2	S	2018	01/01/2018	31/12/2018	19,9	28 184	37,4	17 647	177,0	76,5	53,6	
3	S	2018	01/01/2018	31/12/2018	0,6							
4	NS	2017 et 2018	01/01/2017	31/12/2018	14,8	27 433	37,3	17 213	251,0		79,7	
5	NS	2017/2018	06/11/2017	30/11/2018	4,0	5 134	39,7	3 096	52,2		1,7	
6	NS	2017	05/01/2017	05/12/2017	5,5	10 425	36,4	6 632	101,4		11,4	
7	S	2018-2019	01/09/2018	30/04/2019	0,6	418	25,0	314				
8	S	2018	01/01/2018	31/12/2018	1,25							
9	NS	2019	21/01/2019	21/05/2019	3,5	3 407	35,5	3 269	39,4			
10	NS	2018	5/03/2018	17/12/2018	4,3	4 392	33,4	2 924	47,0			
11	NS	2016	01/01/2016	31/12/2016	12,6	15 815	36,9	10 011	206,3			
11	NS	2017	01/01/2017	31/12/2017	12,6	17 953	36,9	11 333	189,3			
12	S	2017-2018	01/09/2017	31/08/2018	2,5	5 192	41,1	3 058	66,0	7,6	4,4	
13	NS	2018	01/01/2018	31/12/2018	8,0	4 655	37,4	2 915	88,6		2,1	
13	NS	2019	01/01/2019	27/02/2019	8,0	4 027	40,2	2 409	30,7		2,0	
14	S	2018	02/01/2018	31/12/2018	4,5	6 718	39,6	4 060	74,0	7,0	3,0	
15	NS	2017-2018	01/01/2017	01/01/2018	4,0	5 413	35,9	3 469	72,3		5,4	
16	S	2016	01/01/2016	31/12/2016	14,0	14 611	35,2	9 468	48,4			33,6
17	S	2016-2017	29/09/2016	03/03/2017	0,5	222	28,8	158		2,5		
18	NS	2017	01/01/2017	31/12/2017	7,0	9 209	34,6	6 020	167,6		7,4	
18	NS	2018	01/01/2018	31/12/2018	7,0	8 777	34,6	5 737	130,9		6,9	
19	S	2017	01/01/2017	31/12/2017	2,2	2 911	36,9	1 836	19,8	4,5	1,8	
20	S	2011-2015	01/01/2011	31/12/2015	0,7	2 612	39,4	1 583		24,3		
21	NS	2018	02/01/2018	31/12/2018	9,7	13 995	40,0	8 397			19,8	
22	NS	2018	01/01/2018	31/12/2018	12,3	10 533	40,8	6 241	96,7		6,5	
23	NS	2017	01/01/2017	31/12/2017	21,7	30 584	29,0	21 704	358,8		56,2	
23	NS	2018	02/01/2018	26/11/2018	21,7	26 599	29,6	18 720	363,9		65,7	
24	S	2017	01/01/2017	31/12/2017	2,5	5 160	34,9	3 361	59,9			20,0
25	S	2018-2019	01/09/2018	31/08/2019	0,9	1 937	42,5	1 114				
26	NS	2018-2019	01/09/2018	28/02/2019	3,2	4 550	36,7	2 880	38,40		3,5	
27	S	2017	01/01/2017	31/12/2017	57,0	138 563	40,1	82 964	1 380,0		937,0	
27	S	2018	01/01/2018	05/10/2018	57,0	103 241	40,6	61 362	1 210,8		517,0	
28	NS	2018	01/01/2018	31/12/2018	8,4	18 265	34,9	11 892	212,7		7,28	
28	NS	2017	01/01/2017	31/12/2017	8,4	17 707	33,3	11 807	254,7		14,74	
29	NS	2017	05/01/2017	26/12/2017	8,6	7 847	32,8	5 271	99,8			
29	NS	2018	01/01/2018	31/12/2018	8,6	11 615	32,8	7 801	116,4			
30	NS	2017	01/01/2017	31/12/2017	6,0	10 982	38,8	6 725	137,6			
30	NS	2018	01/01/2018	31/12/2018	6,0	12 273	38,8	7 515	174,0			

I Tableau 5 : Tonnages de bois réceptionnés et flux de cendres évacuées par site

3.1.2. Qualité des combustibles

Aide à la lecture des figures

Les figures ci-après présentent les valeurs obtenues au cours des 3 campagnes de prélèvement par site. Cette représentation sous la forme d'une boîte à moustache fournit les informations suivantes :

- La valeur la plus faible obtenue au cours des 3 campagnes est représentée par la limite basse ;
- La valeur médiane obtenue au cours des 3 campagnes est matérialisée par le trait central ;
- La valeur la plus élevée obtenue au cours des 3 campagnes est représentée par la limite haute ;
- La moyenne des trois campagnes est symbolisée par une croix.

3.1.2.1. Humidité

L'humidité des combustibles bois est comprise entre 19,9 et 52,3 %MB. Certains sites montrent des écarts importants d'humidité entre les campagnes (8 et 16), mais les extrêmes se situent globalement dans une fourchette de +/- 5 % par rapport à la moyenne.

Hormis sur quelques sites (16,15, 8,13), les écarts d'humidité sont relativement modestes : ils ne sont pas de nature à perturber les conditions de la combustion.

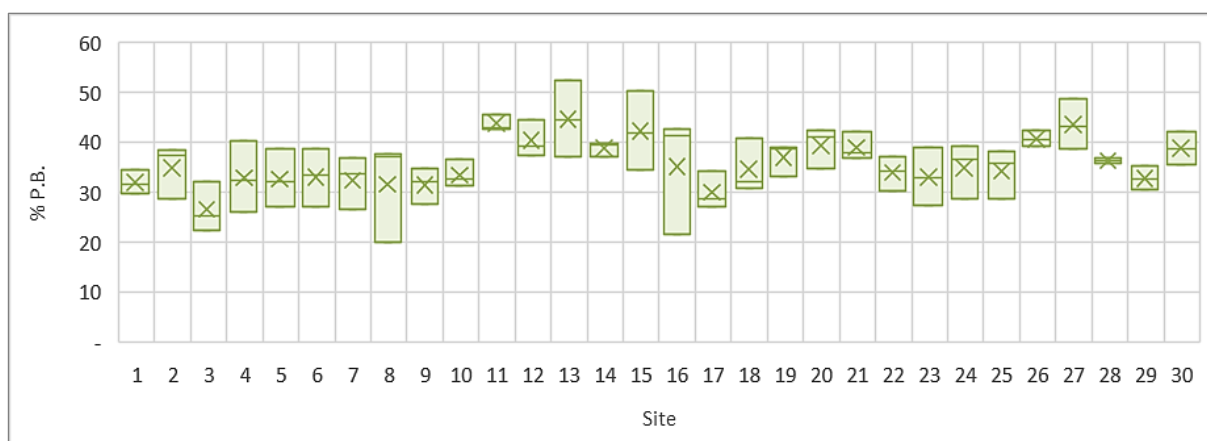


Figure 12 : Humidité (%MB)

3.1.2.2. Pouvoir calorifique inférieur (PCI)

Le PCI d'un combustible bois fluctue en fonction de l'humidité, du taux de matières minérales et de l'essence. Pour information, le graphique suivant présente le PCI anhydre du bois en fonction des essences. Celui-ci varie de 4 890 (peuplier) à 5 400 (mélèze) kWh/tonne MS selon l'essence.

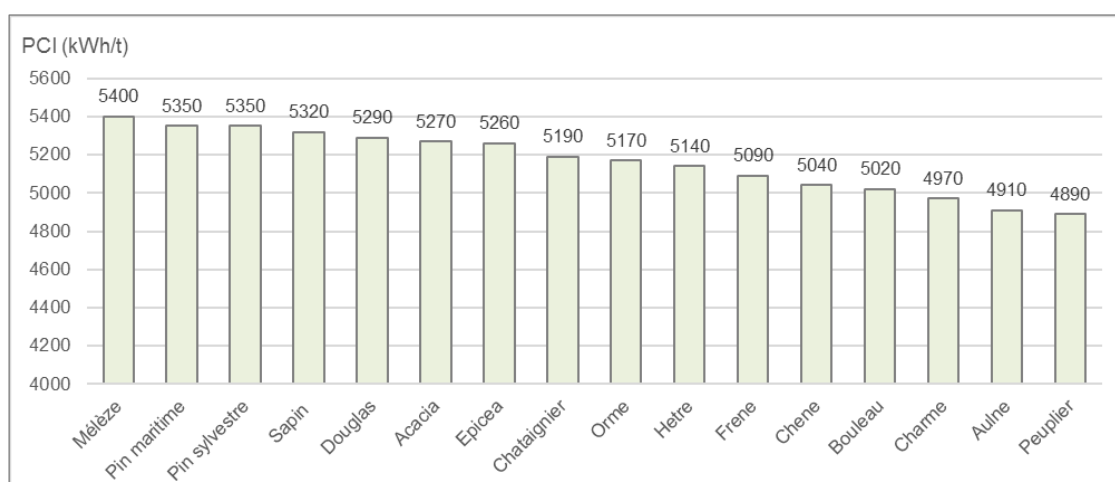


Figure 13 : PCI anhydre (matières minérales incluses) en fonction de l'essence du bois (source : ADEME, 2001)

Les essences résineuses ont un PCI légèrement plus élevé que les essences feuillues. Selon les territoires, il est donc probable de constater quelques écarts, les essences des combustibles fluctuant selon la localisation des chaufferies. Les chaufferies étant réparties sur l'ensemble du territoire national, l'essence peut avoir une influence mais très restreinte sur le contenu énergétique des combustibles utilisés.

Le pouvoir calorifique inférieur anhydre, hors matières minérales, des combustibles bois est compris entre 4 970 et 5 500 kWh/tMS, ce qui correspond à la différence entre bois provenant de feuillus et un bois résineux.

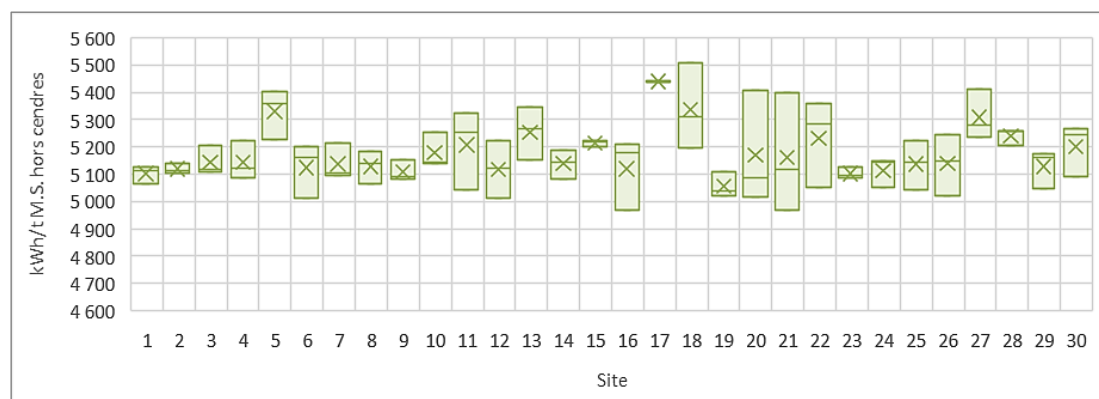


Figure 14 : PCI anhydre hors matières minérales (hors cendres)

Des écarts relativement importants sont constatés sur les sites 21, 20 et 18 : au maximum +/- 6 % par rapport à la moyenne. Ces écarts restent dans l'absolu assez modestes. Ils reflètent la variété des approvisionnements, qui ne sont cependant pas de nature à altérer la qualité des cendres ou les conditions de la combustion.

Pour les sites avec collecte des cendres séparée, le PCI moyen est de 3 040 kWh/t MB (Sites S), contre 2 964 kWh/t MB pour les autres (Sites NS).

Le PCI diminue progressivement avec l'augmentation de la puissance des installations. Pour les sites dont la puissance est inférieure à 1 MW, il s'élève à plus de 3,1 MWh/tonne de matière brute (les technologies des installations de faibles puissances n'acceptent globalement que du bois à très faible taux d'humidité).. À l'opposé, il est en moyenne inférieur à 2,8 MWh/tonne de matière brute pour les sites dont la puissance excède la barrière des 6 MW.

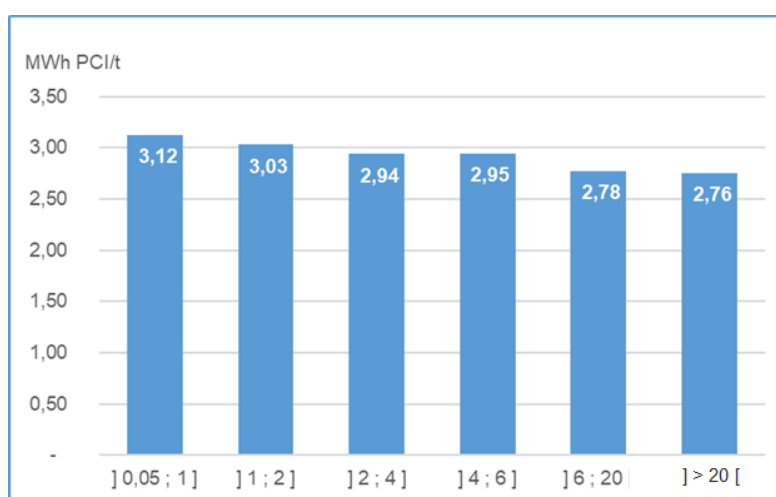


Figure 15 : PCI sur brut en fonction de la puissance des installations

3.1.2.3. Taux de matière minérale et taux de cendres

3.1.2.3.1. Taux de matière minérale dans les combustibles

Sur 90 échantillons, le taux de matières minérales contenues dans les combustibles bois se situe aux alentours de 2 à 3 % de la matière sèche. Quelques échantillons de bois (3) présentent cependant des taux de matières minérales extrêmes. Deux sites sont concernés :

- Site 18 : 2 valeurs élevées à 5,5 % et à 11,7 % de la matière sèche,
- Site 29 : taux de matières minérales de 7,2 % de la matière sèche.

Les matières minérales ne sont pas combustibles ; elles contribuent à la dégradation du pouvoir calorifique du combustible livré. Un taux élevé révèle souvent une forte proportion d'écorces, laquelle peut dépasser, pour certains combustibles, le seuil de 15 % (certains résineux...). D'autres combustibles sont également concernés : bois bocager, bois élagage, certains produits connexes de scieries (écorces ...) ...

Lors de la combustion, un taux élevé de matières minérales peut également abaisser le point de fusibilité des cendres et susciter des difficultés d'exploitation.

Parallèlement, les combustibles présentant un taux de fines élevé doivent être aussi surveillés, les matières minérales se concentrant plus particulièrement dans cette fraction.

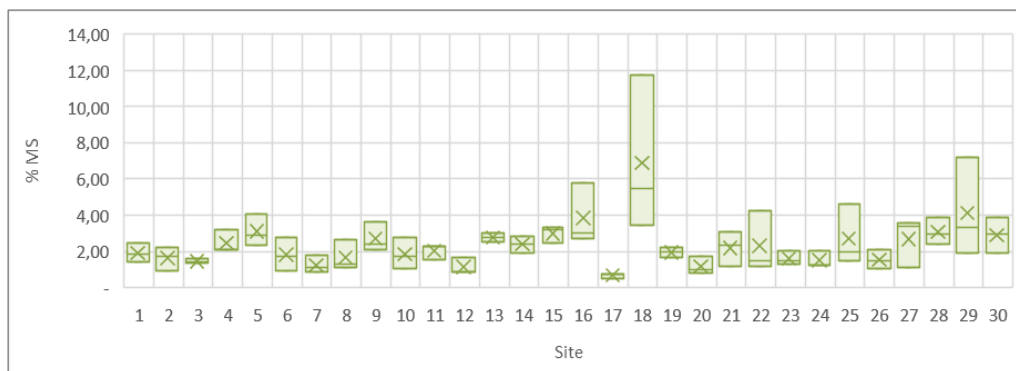


Figure 16 : Taux de matières minérales (%MS)

3.1.2.3.2. Taux de cendres en chaufferie

Taux de cendres par site

Hormis sur 4 sites (n° 3, n° 7, n° 8 et n° 25), on dispose d'éléments d'information pour estimer le taux de cendres sous foyer, le taux de cendres multicycloniques et le taux de poussières de filtration, ainsi que la répartition de chacun de ces 3 segments des sous-produits de la combustion. Néanmoins, il convient de noter que :

- Les cendres multicycloniques sont mélangées :
 - aux cendres sous foyer sur les sites n° 17 et n° 20 ;
 - aux poussières de filtration sur les sites n° 24 et n° 16 ;
- Les cendres multicycloniques sont recyclées en combustion sur le site n° 27 (57 MW).

La production de poussières de filtration n'a pas été transmise pour les sites n° 9, n° 10, n° 11, n° 29 et n° 30.

Pour certains sites, les données de plusieurs années ont pu être recueillies, ce qui contribue à consolider l'approche suivante. Pour information, le **bilan présenté ci-dessous a été élaboré à partir de la combustion de 622 653 t MB de combustible bois (390 526 t MS)**.

En combustion, il convient de rappeler que l'essentiel des matières minérales se retrouve dans les cendres, quels que soient leur nature et leur lieu de collecte en chaufferie.

Un bilan « matière » spécifique conduit sur quelques sites mériterait néanmoins d'être lancé ultérieurement pour confirmer les chiffres suivants (par exemple, lors des prochaines campagnes « bilan des chaufferies » régulièrement lancé par l'ADEME).

N° de site	Période	Séparation des cendres	Taux de cendres (% sec/sec)					Taux global de cendres (% sec/sec)
			sous-foyer	sous foyer + multicycloniques	multicycloniques	poussières de filtration	multicycloniques + poussières de filtration	
1	2017/2018	NS	1,51			0,21		1,72
2	2017	S	0,89		0,47	0,39		1,75
2	2018	S	1,00		0,38	0,30		1,69
4	2018	NS	1,46			0,46		1,92
5	2017 et 2018	NS	1,69			0,06		1,74
6	2017/2018	NS	1,53			0,17		1,70
9	2017	NS	1,20					nc
10	2018-2019	NS	1,61					nc
11	2018	NS	2,06					nc
11	2019	NS	1,67					nc
12	2018	S	2,16		0,25	0,14		2,55
13	2016	NS	3,04			0,07		3,11
13	2017	NS	1,28			0,08		1,36
14	2017-2018	S	1,82		0,17	0,07		2,07
15	2018	NS	2,08			0,16		2,24
16	2019	S	0,51				0,35	0,87
17	2018	S		1,22				1,22
18	2017-2018	NS	2,78			0,12		2,91
18	2016	NS	2,28			0,12		2,40
19	2016-2017	S	1,05		0,24	0,10		1,40
20	2017	S		1,54				1,54
21	2018	NS	1,49			0,24		1,72
22	2017	NS	1,55			0,10		1,65
23	2011-2015	NS	1,65			0,26		1,91
23	2018	NS	1,94			0,35		2,29
24	2018	S	1,78				0,60	2,38
26	2017	NS	1,34			0,12		1,46
27	2018	S	1,66			1,13		2,79
27	2017	S	1,97			0,84		2,82
28	2018-2019	NS	1,79			0,06		1,85
28	2018-2019	NS	2,16			0,12		2,28
29	2017	NS	1,89					nc
29	2018	NS	1,49					nc
30	2018	NS	2,05					nc
30	2017	NS	2,32					nc

nc : non calculé (en l'absence de données sur les poussières de filtration)

Tableau 6 : Taux de cendres (en % de la matière sèche des cendres/matière sèche du combustible)

Estimation des taux de cendres par type de cendres

Rappelons que le taux de cendres est exprimé en % de matière sèche et en fonction de la matière sèche contenue dans le combustible bois (% sec/sec).

Les taux de cendres fluctuent très fortement selon les sites :

- Le **taux global de cendres** varie selon les sites dans la fourchette suivante : de **0,87 à 3,11 %**.
- Dont :
 - Cendres sous-foyer : 0,51 à 3,04 %,
 - Cendres multicycloniques : 0,17 à 0,47 %,
 - Poussières de filtration : 0,06 à 0,46 % (1,13 % pour le sites n° 27)

Il n'est cependant pas possible de faire le lien entre le tableau 6 (taux de cendres) et la figure 16 (teneur en matière minérale) en raison de périodes de référence distinctes. En effet, le taux global de cendres peut varier d'une année sur l'autre (exemple des sites n° 2, n° 13, n° 11, n° 13, n° 23, n° 27, n° 29, n° 28 et n° 30 pour lesquelles le bilan sur 2 saisons a été établi).

Relation entre le taux global de cendres et la puissance totale de la chaufferie bois et le type de collecte

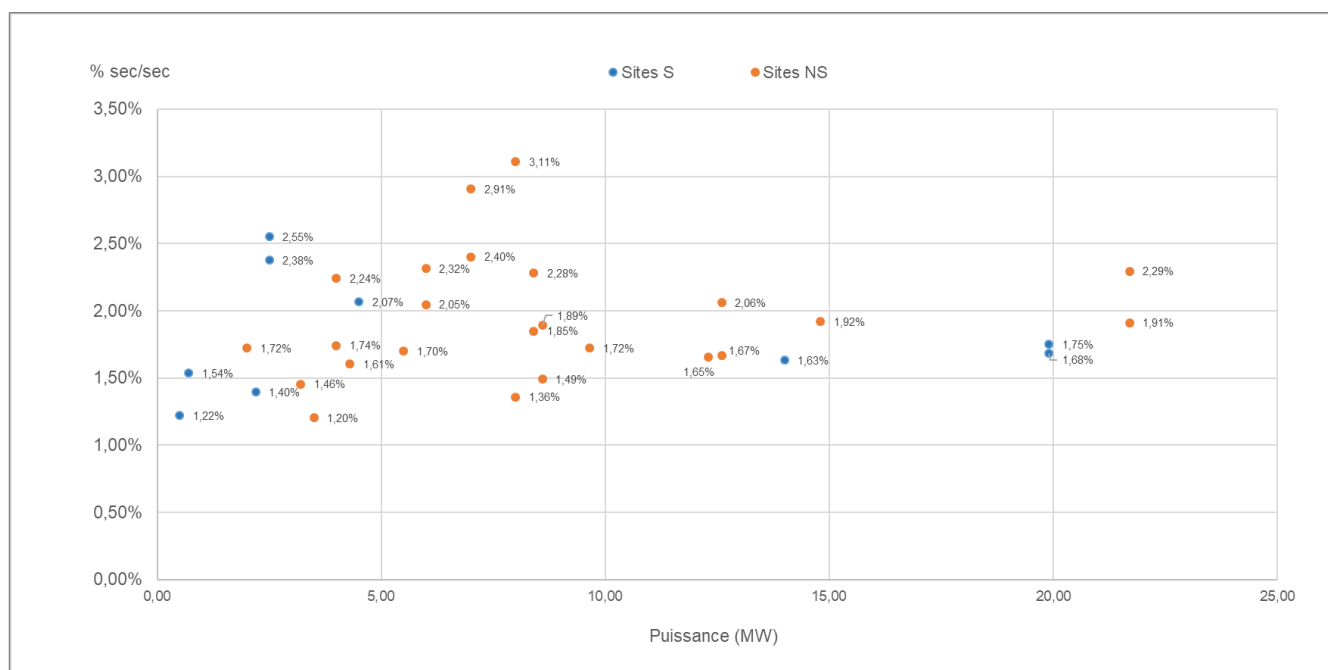


Figure 17 : Taux global de cendres en fonction de la puissance bois

En moyenne, le taux global de cendres s'élève à :

- tous sites confondus : 1,98 %,
- hors chaufferies de plus de 20 MW : 1,82 %.

Le taux global de cendres ne fluctue donc pas substantiellement en fonction du mode de collecte des cendres en chaufferie.

Relation entre le taux de cendres et le type de collecte

En fonction du type de site (NS et S), le taux de cendres est estimé selon la puissance des installations et en fonction du mode de gestion adopté pour chaque type de cendres produit :

- Pour les Sites NS : i) cendres sous-foyer et ii) poussières de filtration ;
- Pour les Sites S : i) cendres sous-foyer, ii) cendres sous-foyer + multicycloniques, iii) cendres multicycloniques, iv) cendres multicycloniques + poussières de filtration et v) et poussières de filtration.

Les sites NS

Pour les Sites NS, le bilan est établi à partir des installations de 17 sites. Il porte sur 185 772 t MS de combustible, 3 382 t MS de cendres sous foyer et 294 t MS de poussières de filtration.

Le taux de cendres sous-foyer fluctue de 1,32 à 1,92 % de la matière sèche contenue dans le combustible, et le taux de cendres volantes, de 0,14 à 0,30 %.

La moyenne s'établit ainsi :

- Cendres sous foyer : 1,82 %,
- Poussières de filtration : 0,16 %.

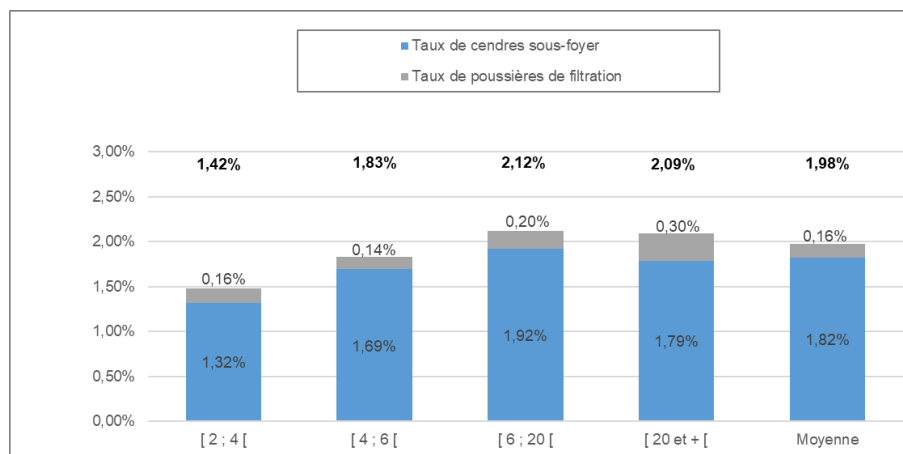


Figure 18 : Taux global de cendres en fonction de la puissance bois pour les Sites NS

Pour les Sites NS, le taux de cendres sous-foyer fluctue entre 86 et 92 %. En moyenne, les cendres sous-foyer représentent 92 % du taux global de cendres, le reste correspondant aux poussières de filtration (8 %).

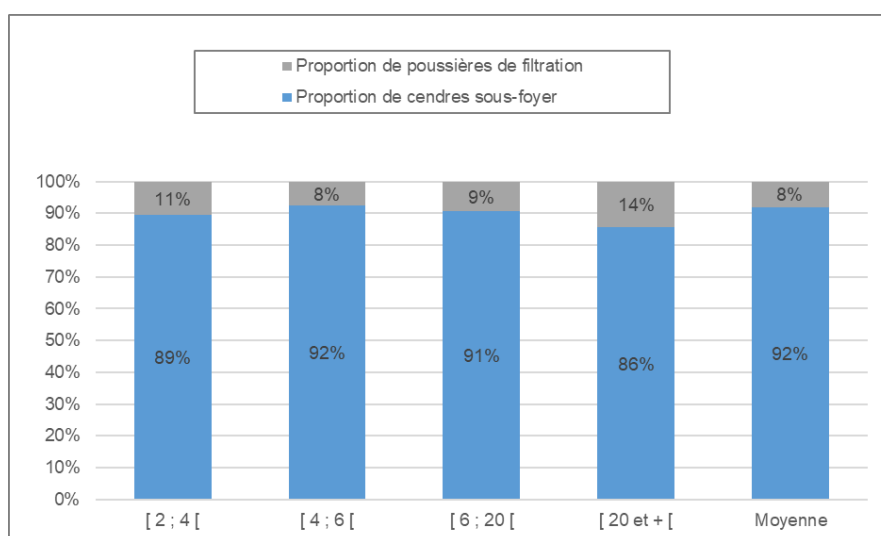


Figure 19 : Répartition entre cendres sous-foyer et poussières de filtration pour les Sites NS

Les sites S

Les sites n° 2 et n° 27 ont été écartés de cette analyse (en raison d'une technologie d'injection du bois dans le foyer et de combustion aboutissant à des quantités et proportions de cendres volantes très différentes des chaufferies couramment rencontrées pour de plus faible puissance)².

² Site n°2 – cendres sous-foyer – 0,94% / cendres multicycloniques – 0,43% / poussières de filtration – 0,35%
 Site n° 27 (spreader stoker) : cendres sous foyer – 1,80 % / poussières de filtration – 1,01 %
 Les bilans des sites n° 2 et n° 27 s'appuient sur 181 184 t MS de combustible, de 2 938 t MS de cendres sous foyer, 157 t MS de cendres multicycloniques et 1 583 t MS de poussières de filtration.

Pour les sites S, les cendres multicycloniques sont parfois mélangées, soit avec les cendres sous-foyer, soit avec les poussières de filtration ; ce traitement est justifié par la destination commune de ces déchets (agriculture ou enfouissement).

Pour les plus petites chaufferies, des cendres sous-foyer sont mélangées aux cendres multicycloniques (site n° 17 et n° 20). Le taux moyen du mélange de cendres pour les petites chaufferies s'élève à 1,50 % de la matière sèche du combustible. Ce cas n'est pas représenté dans le graphique ci-dessous.

Pour les chaufferies de 2 à 6 MW (sites n° 2, n° 12, n° 14 et n° 19), le taux de cendres sous foyer s'élève à 1,78 %. Le taux de cendres multicycloniques est de 0,21 % et les poussières de filtration, de 0,10 %, soit un total de 0,31 %. On constate que le flux total des cendres multicycloniques et des poussières de filtration peut être 2 fois supérieure (0,60 % sur le site n° 24 où ces deux types de cendres sont mélangées).

Ce bilan est établi à partir de 6 installations. Il porte sur 21 782 t MS de combustible, 268 t MS de cendres sous foyer et 82 t MS de cendres multicycloniques et/ou poussières de filtration.

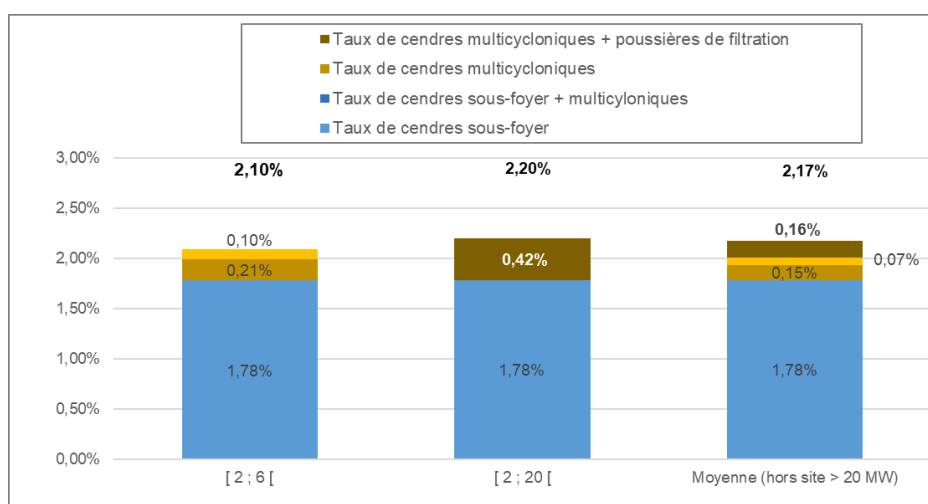


Figure 20 : Taux global de cendres en fonction de la puissance bois pour les Sites S

La répartition entre les différents types de cendres est la suivante :

- Cendres sous-foyer : 81 à 85 %,
- Mélange Cendres multicycloniques/Poussières de filtration : 15 à 19 %.

Le nombre de sites renseignés est relativement faible. Cependant, les résultats de cette approche confirment les données bibliographiques disponibles : Étude RECORD portant sur un état de l'art de la gestion des cendres en Europe (2015) et Études réalisées par l'ADEME sur les bilans de chaufferie biomasse (2014, 2016).

A noter cependant que certains constructeurs tendent actuellement à modifier leur technologie pour réduire les flux de cendres multicycloniques, ce qui a pour conséquence d'augmenter les flux de poussières de filtration au détriment des volumes de cendres multicycloniques. On constate par ailleurs que la répartition sur le site n° 2 aboutit à une proportion de Cendres multicycloniques/Poussières de filtration de 55 %/45 %. On propose en conséquence de retenir cette répartition entre les 2 types de cendres volantes.

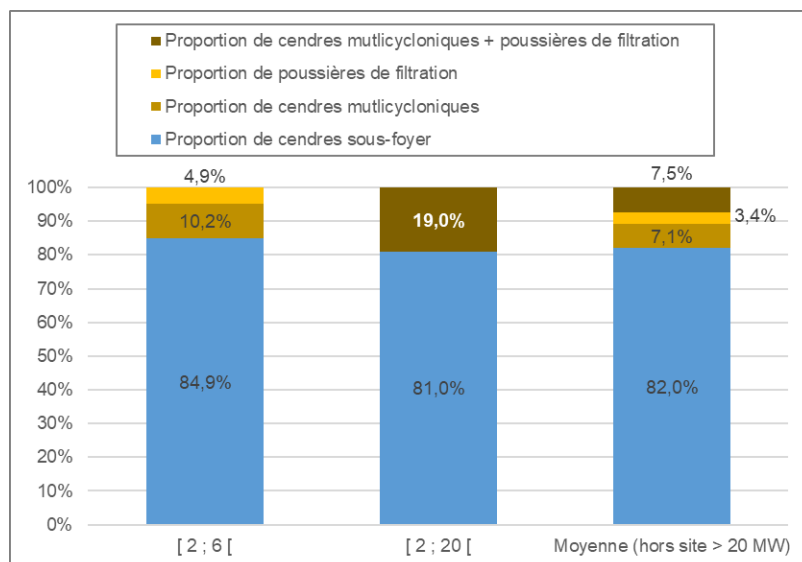


Figure 21 : Répartition entre cendres sous-foyer et poussières de filtration pour les Sites S

Points à retenir

Le **taux global de cendres** varie selon les sites entre 0,79 et 3,14 % de la matière sèche du combustible. Il fluctue en fonction du taux de matière minérale du combustible, même si la relation statistique n'a pu être établie.

Les **taux de cendres par type** s'élèvent en moyenne à :

- Taux de **cendres sous-foyer ou mixtes** :
 - Site NS (cendres mixtes ou CM) : **1,82 %**,
 - Site S (cendres sous foyer ou CF) : **1,78 %**.
- Taux de **cendres multicycloniques** (Site S) : **0,20 à 0,30 %**.
- Taux de **poussières de filtration** (Sites S et Sites NS) : **0,10 à 0,16 %**.

Les répartitions massiques **entre les types de cendres** sont en moyenne les suivantes :

- Pour les **Sites NS** :
 - Cendres mixtes : **92 %**,
 - Poussières de filtration : **8 %**.
- Pour les **Sites S** :
 - Cendres sous-foyer : **82 %**,
 - Cendres multicycloniques : **10 %**,
 - Poussières de filtration : **8 %**.

Ces données seront utilisées ultérieurement pour estimer les **flux reconstitués d'un mélange de cendres sous foyer et multicycloniques (CFMC)** et pour l'établissement du bilan national.

3.1.2.4. Eléments traces métalliques (ETM) dans les combustibles

Trois textes réglementaires ou normes encadrent la qualité des combustibles, notamment en termes d'éléments traces métalliques. Il s'agit respectivement :

- L'arrêté du 3 août 2018 relatif aux prescriptions applicables installations relevant du régime de l'enregistrement au titre de la rubrique 2910 de la nomenclature des installations classées qui fixe des critères de qualité pour les déchets de bois répondant au b(v) de la définition de biomasse;
- De l'arrêté du 29 juillet 2014 fixant les critères de sortie de statut déchets pour les broyats d'emballage en bois pour un usage comme combustible dans une installation de combustion ;
- De la norme NF EN ISO 17225-4 (plaquettes pour les chaufferies de moins de 500 kW) et 17225-9 (plaquettes et broyat de bois à usage industriel), qui a pour objectif de fournir des principes de classification des biocombustibles dans la perspective des échanges commerciaux entre vendeurs et acheteurs. Des spécifications sont communiquées, au même titre que des valeurs seuils pour les éléments traces métalliques.

Textes	Plomb	Cadmiu m	Mercure	Arsenic	Zinc	Cuivre	Chrome
Arrêtés (2) du 3/08/2018	50	5	0,2	4	200	30	30
Arrêté du 29/07/2014	50	5	0,2	4	200	30	30
Norme NF EN ISO 17225	10	2	0,1	1	100	10	10

Tableau 7 : Les teneurs seuils en ETM en fonction des textes

Les figures ci-dessous présentent les concentrations en éléments traces métalliques (micropolluants et oligo-éléments) contenus dans les combustibles bois. Dans la suite du document, les seuils de l'arrêtés du 3 août 2018 et du 29 juillet 2014 sont rappelés sur les graphiques (droite rouge).

Parmi les éléments traces métalliques, on a distingué 2 catégories : les micropolluants métalliques et les oligoéléments, dont la présence est nécessaire à l'activité biologique, l'excès étant cependant potentiellement nocif pour le développement des organismes vivants.

3.1.2.4.1. Micropolluants métalliques

Le plomb (Pb)

La majorité des échantillons de combustible bois présente des concentrations inférieures au seuil de quantification (2 mg/kg MS), à l'exception d'un échantillon qui présente une teneur en plomb anormalement élevée (site 20 : 100 mg/kg MS) et quelques traces sur 2 autres installations (Sites 5 et 18).

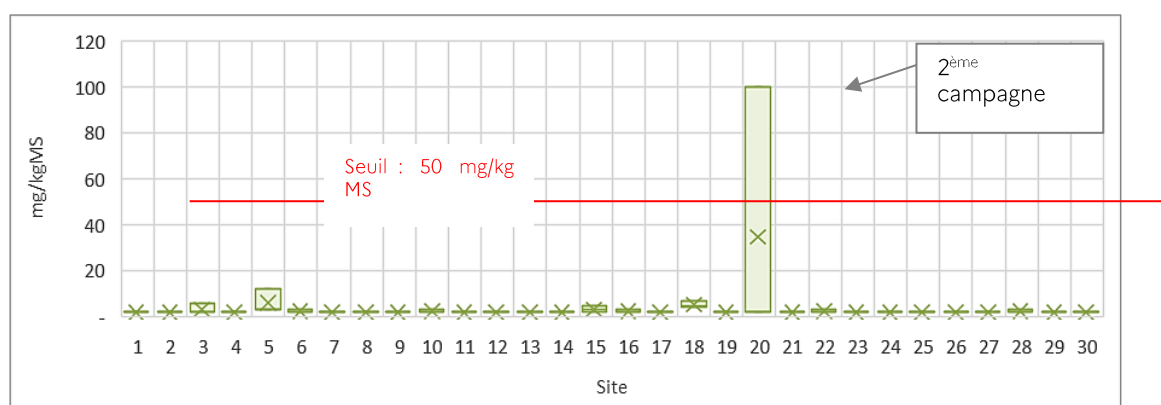


Figure 22 : Plomb (mg/kg MS)

Le Cadmium (Cd)

Les teneurs en cadmium des combustibles bois échantillonnés au cours de l'étude sont faibles et inférieures à 1 mg/kg MS.

Les teneurs les plus importantes sont identifiées sur les échantillons des Sites 4, 11, 16, 28.

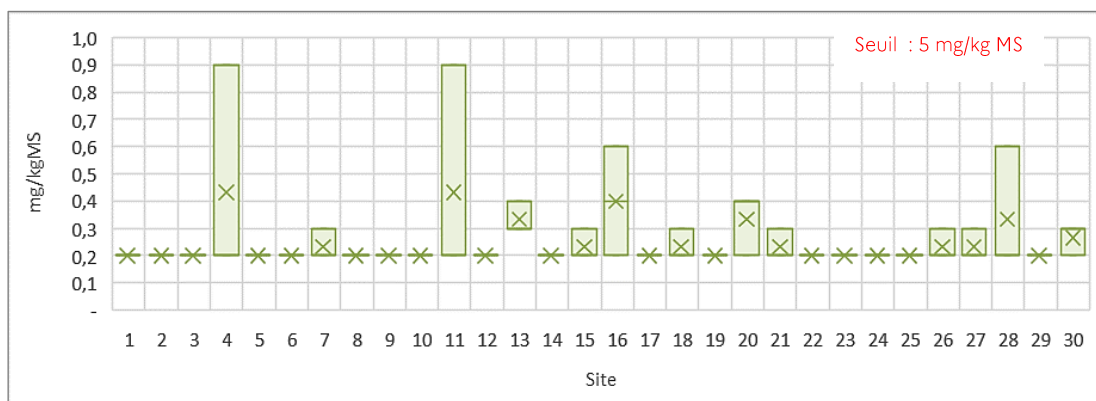


Figure 23 : Cadmium (mg/kg MS)

Des traces de cadmium ont été détectées dans un échantillon sur trois. Les teneurs demeurent très faibles (au minimum, 5,6 fois inférieures au seuil des arrêtés), cet élément est souvent naturellement présent dans le combustible bois.

Le Mercure (Hg)

L'intégralité des échantillons de combustibles bois présente des concentrations en mercure inférieures à la limite de quantification (0,05 mg/kg MS).

3.1.2.4.2. Oligo-éléments

L'Arsenic (As)

La limite de quantification (LQ) est de 0,8 mg/kg MS.

Cinq échantillons seulement présentent une valeur supérieure à la LQ, dont un échantillon à 11 mg/kg MS. Trois installations seulement sont concernées : Site n° 15 (1 échantillon), Site n° 18 (3 échantillons) et Site n° 20 (1 échantillon).

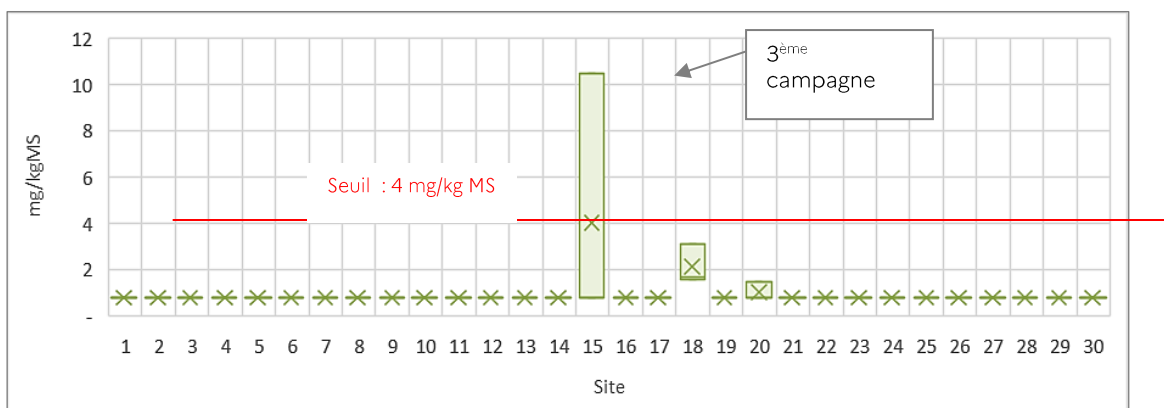


Figure 24 : Arsenic (mg/kg MS)

Le Zinc (Zn)

Les teneurs en zinc des combustibles bois sont, en majorité, inférieures à 50 mg/kgMS, à l'exception d'un échantillon prélevé sur le site 20 (330 mg/kg MS).

A noter que le seuil de la procédure SSD pour les bois d'emballage à ne pas dépasser pour le zinc est fixé à 200 mg/kg MS (comme dans l'arrêté du 3 août 2018 relatif aux prescriptions générales applicables installation relevant du régime de l'enregistrement).

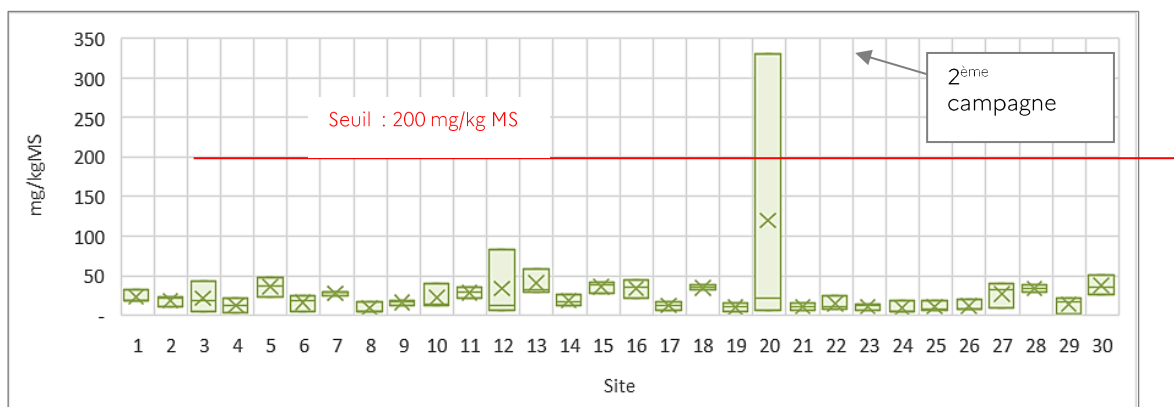


Figure 25 : Zinc (mg/kg MS)

Le Cuivre (Cu)

Les teneurs en cuivre des combustibles bois sont comprises entre 1 et 18 mg/kg MS.

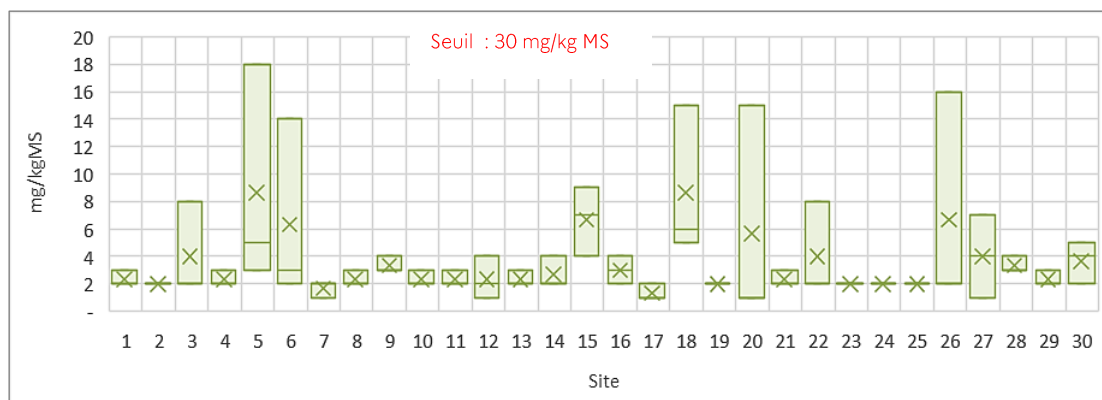


Figure 26 : Cuivre (mg/kg MS)

Le Chrome (Cr)

Les teneurs en chrome des combustibles bois sont en majorité inférieures à 10 mg/kg MS, à l'exception de six échantillons, dont un (site 20) présentant une concentration élevée de 69 mg/kg MS.

Pour information, la teneur maximale en chrome admise par l'arrêté du 3 août 2018 et la procédure SSD est de 30 mg/kg MS. Un des échantillons du site 20 dépasse cette teneur.

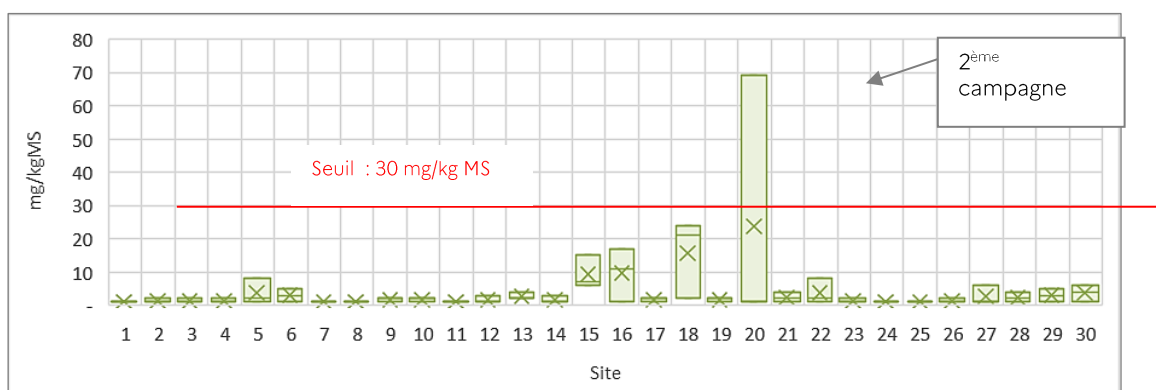


Figure 27 : Chrome (mg/kg MS)

Points à retenir

Les combustibles respectent très largement les seuils de l'arrêté du 3 août 2018 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations relevant du régime de l'enregistrement (rubrique 2910) et les seuils de la procédure SSD pour les bois d'emballage (excepté une analyse effectuée à l'occasion de la deuxième campagne sur le site n°20 (**présence de plomb, zinc et chrome**) et une analyse de la troisième campagne sur le site n°15 (**présence d'arsenic**)). Pour rappel, ces seuils s'appliquent aux déchets de bois pour s'assurer qu'ils ne contiennent pas de métaux lourds provenant d'un traitement par des conservateurs ou du placement d'un revêtement

- Le bois semble être **dépourvu de mercure** (en dessous de la limite de quantification).
- Le **plomb** semble **quasi absent** des combustibles utilisés en chaufferie (excepté pour le Site n°20 où les teneurs apparaissent très élevées).
- Le **cadmium** est **détecté dans 1 analyse sur 3**, mais à des teneurs au maximum **5,6 fois inférieures au seuil** de l'arrêté du 3 août 2018 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations relevant du régime de l'enregistrement (rubrique 2910) et au seuil de la procédure SSD pour les bois d'emballage.
- Bien que les seuils ne soient pas dépassés, une **présence de cuivre et de chrome** est **décelée** dans les échantillons des Sites n° 3, 5, 15, 16, 18, 20, 22, 26 et 27.
- La **présence d'éléments traces métalliques** peut provenir des sols, qui peuvent conduire à un transfert vers les végétaux, en particulier vers l'écorce des arbres (exemple du cadmium ci-dessous).

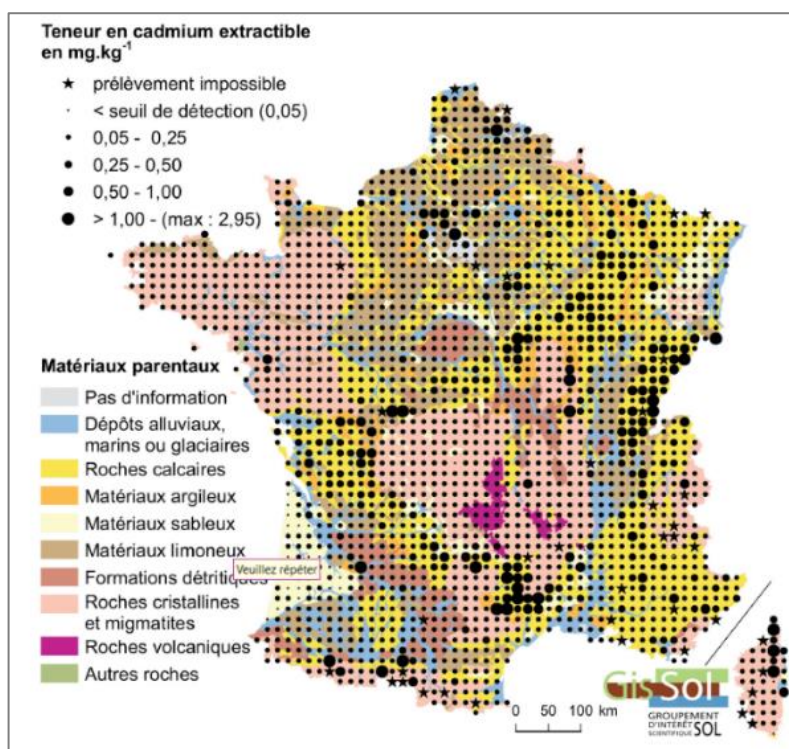


Figure 28 : Teneur en cadmium des sols³

Source : Groupement d'intérêt scientifique GISOL (INRA) – [www.gisol](http://www.gisol.fr)

³ Par exemple, les sols calcaires ont des teneurs en général plus fortes en cadmium. C'est le cas dans le Jura où les sols argileux, souvent peu épais, résultent de l'altération lente d'une épaisseur considérable de calcaire, à l'origine d'une forte concentration de cadmium en surface. Dans les sols des Causses et du sud du Massif central, les teneurs sont également très fortes.

3.1.2.4.3. Composés traces organiques

Deux textes réglementaires encadrent la qualité des combustibles, notamment en composés traces organiques. Il s'agit respectivement :

- De l'arrêté du 3 août 2018 relatif aux prescriptions applicables aux installations relevant du régime de l'enregistrement au titre de la rubrique 2910 de la nomenclature des installations classées ;
- De l'arrêté du 29 juillet 2014 fixant les critères de sortie de statut déchets pour les broyats d'emballage en bois ont vu d'un usage comme combustible dans une installation de combustion.

Textes	Polychlor o-phénol	Polychlor obiphény les
	PCP	PCB
Arrêté du 3/08/2018	3	2
Arrêté du 29/07/2014	3	2

Tableau 8 : Les teneurs seuils en composés traces organiques en fonction des textes (en mg/kg MS)

Les graphiques ci-dessous présentent les concentrations en composés traces organiques, les seuils des arrêtés du 3 août 2018 et du 29 juillet 2014 étant rappelés (droite rouge).

3.1.2.4.4. HAP

Dans l'ensemble, les combustibles bois contiennent très peu d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (somme des 16 hydrocarbures) et les teneurs sont globalement inférieures à 2 mg/kg MS.

Dans certains échantillons, aucune trace de HAP n'a même été détectée (aucune valeur sur le graphique).

On dénombre 16 échantillons de combustibles bois dans lesquelles des traces de HAP ont été détectées :

- Aucun échantillon de bois ne contient une teneur en benzo(b)fluoranthène supérieure à la limite de quantification (0,1 mg/kgMS) ;
- Le benzo(a)pyrène a été quantifié (supérieure à la LQ) uniquement dans deux échantillons (sites n° 9 et n° 21) ;
- Le fluoranthène a été quantifié dans plusieurs combustibles bois.

Trois échantillons (Sites n° 11, n° 15 et n° 18) présentent des teneurs plus élevées. Pour le site n° 11, la présence de HAP a été détectée uniquement dans l'échantillon de la 3^e campagne (aucune détection dans les 2 autres).

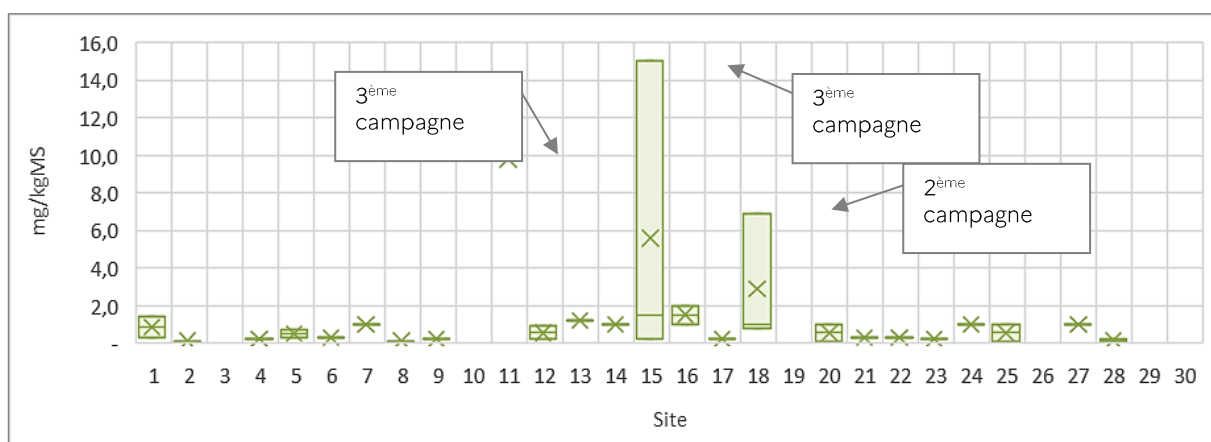


Figure 29 : Somme des 16 HAP (mg/kg MS)

3.1.2.4.5. PCB

Pour l'ensemble des échantillons analysés, aucun combustible bois prélevé ne contient une teneur en PCB supérieure aux limites de quantification (0,02 mg/kgMS).

3.1.2.4.6. PCP

La grande majorité des échantillons présente des teneurs inférieures à la limite de quantification, c'est-à-dire à 0,1 mg/kg MS ou à 0,2 mg/kg MS selon les cas.

Cinq échantillons de bois présentent cependant des traces de PCP. Deux d'entre eux font apparaître une teneur supérieure à 2 mg/kg MS (Sites 5, 15).

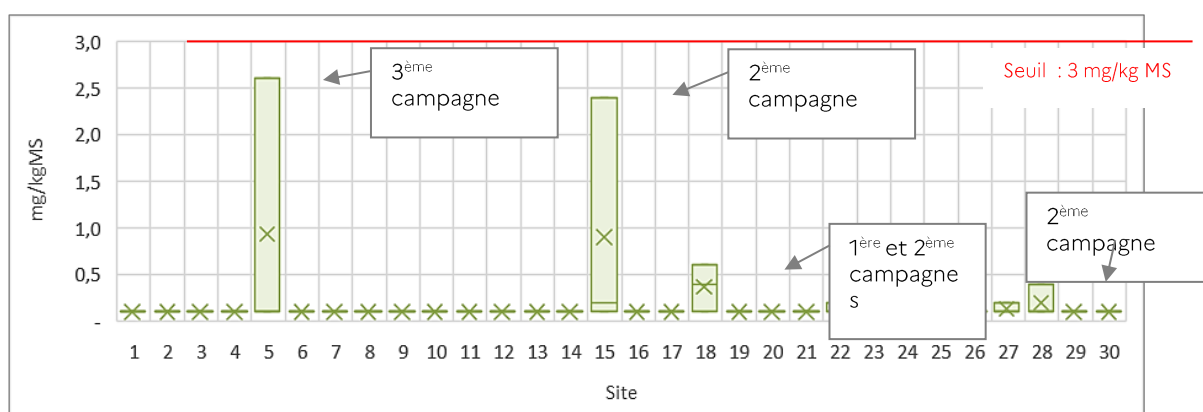


Figure 30 : PCP (mg/kg MS)

Points à retenir

- Très peu de combustibles bois contiennent des polluants organiques.
- Les combustibles bois contiennent très peu d'hydrocarbures aromatiques polycycliques, seuls les échantillons des sites n°15 (3ème campagne), n°11 (3ème campagne) et n°18 (2ème campagne) en contiennent.
- Le bois ne contient pas de PCB (en dessous des seuils de quantification).
- En ce qui concerne les PCP, la plupart des combustibles n'en contiennent pas (en dessous du seuil de quantification). Une présence a été décelée dans un à deux échantillons de 4 sites (n°5, n°15, n°18 et n°28). A noter cependant que les concentrations mesurées sont inférieures au seuil de l'arrêté du 3 août 2018 relatif aux prescriptions applicables aux installations relevant du régime de l'enregistrement (rubrique 2910 des ICPE) et à la procédure de SSD pour les bois d'emballages.

3.1.2.5. Autres éléments

Quatre textes réglementaires ou normes encadrent la qualité des combustibles pour les autres éléments. Il s'agit respectivement :

- De l'arrêté du 3 août 2018 relatif aux prescriptions applicables installations relevant du régime de l'enregistrement au titre de la rubrique 2910 de la nomenclature des installations classées ;
- De l'arrêté du 29 juillet 2014 fixant les critères de sortie de statut déchets pour les broyats d'emballage en bois ont vu d'un usage comme combustible dans une installation de combustion ;
- De la norme NF EN ISO 17225-4 (plaquettes pour les chaufferies de moins de 500 kW) et 17225-9 (plaquettes et broyat de bois à usage industriel), qui a pour objectif de fournir des principes de classification des biocombustibles dans la perspective des échanges commerciaux entre vendeurs et acheteurs. Des spécifications sont communiquées, au même titre que des valeurs seuils pour les éléments traces métalliques.

Textes	Chlore	Azote	Soufre
--------	--------	-------	--------

Arrêté du 3/08/2018	0,09	-	-
Arrêté du 29/07/2014	0,09	1,5	-
Norme NF EN ISO 17225	0,05	1,0	0,1

Tableau 9 : Les teneurs seuils en éléments mineurs en fonction des textes (en % sur masse /)

Les figures ci-dessous présentent les concentrations en éléments mineurs, les seuils des arrêtés du 3 août 2018 et du 29 juillet 2014 étant rappelés (droite rouge).

3.1.2.5.1. Chlore

Dans l'ensemble, les **teneurs en chlore** des combustibles bois sont comprises entre 50 et 260 mg/kgMS et un échantillon (Site 18) atteint la valeur de 640 mg/kgMS (ce qui équivaut à 0,064 %MS). Cette valeur est cependant inférieure au seuil des arrêtés.

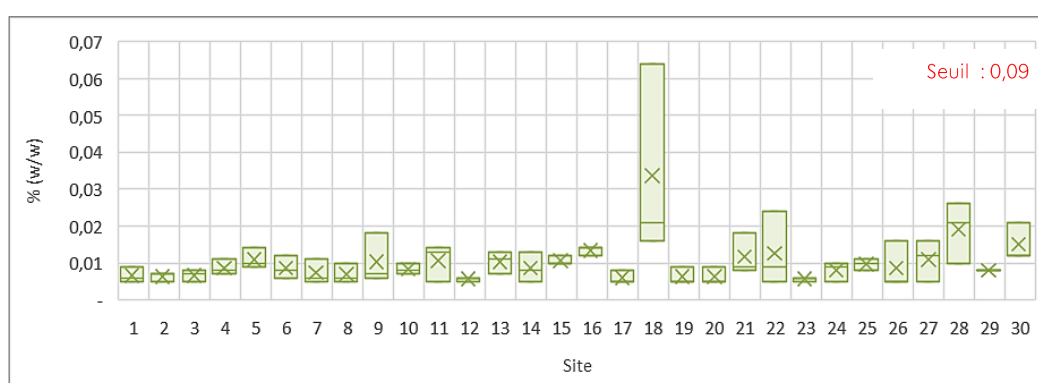


Figure 31 : Chlore (% sec/sec)⁴

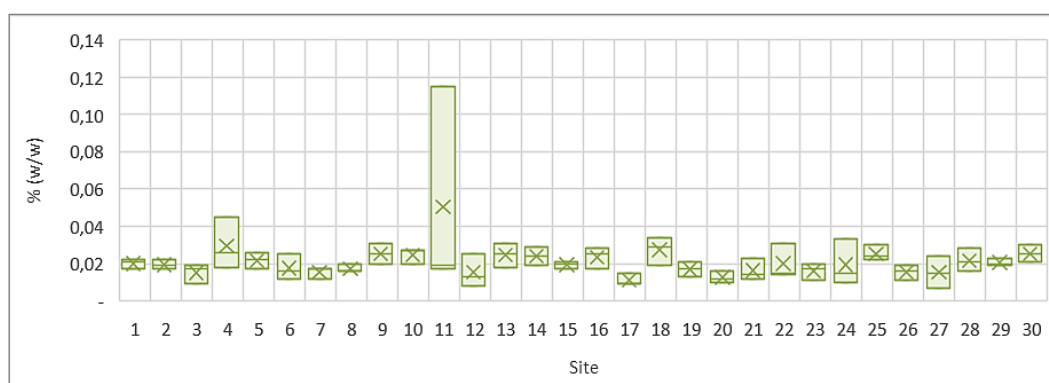
3.1.2.5.2. Azote

La teneur en azote est faible. La moyenne s'élève à 0,28 % de la masse sèche du combustible, et la valeur maximale, à 0,58 %.

La valeur maximale est très inférieure au seuil de l'arrêté du 29 juillet 2014 (1 %).

3.1.2.5.3. Soufre

Les **teneurs en soufre** des combustibles bois sont faibles, en général, inférieures à 500 mg/kg MS (0,05 %), sauf un échantillon dont la teneur est de 1 200 mg/kg MS (site 11).



⁴ Pourcentage de la matière sèche ou % sec/sec : 1% sec/sec (% sur masse sèche) = 10 000 mg/kg MS

3.1.2.5.4. Pesticides

De faibles teneurs en pesticides (< 1mg/kg MS) ont été détectées dans des combustibles bois de 10 sites, principalement les sites n° 5, n° 15, n° 18 et n° 28.

3.2. Métadonnées de fonctionnement des chaufferies

Les métadonnées de fonctionnement des chaufferies sont :

- Le taux de charge,
- Le taux d'oxygène,
- La température de la chambre de combustion,
- La durée des prélèvements,
- Les types d'approvisionnements.

Sur les Sites S, les cendres sous-foyer et les cendres multicycloniques ont été produites sur plusieurs semaines. Il aurait fallu en conséquence recueillir les métadonnées sur la période de production et procéder à un traitement spécifique des informations recueillies. Dans certains cas, l'enregistrement des données n'est en outre pas systématique, en particulier dans les chaufferies de petite puissance. Si cette récupération s'avérait pertinente, elle n'était matériellement pas envisageable.

Ces métadonnées ont en revanche été recueillies sur les Sites NS. Il s'agit de paramètres de fonctionnement des chaudières bois durant les prélèvements des cendres multicycloniques (MCNS). Dans certains cas, la récupération des informations n'a pas été possible (absence de disponibilité d'un technicien sur site pour relever les paramètres dans l'automate de la chaudière) ; certaines informations sont manquantes, par exemple sur les 3 campagnes du Site 28.

Les figures ci-dessous présentent la valeur des paramètres relevés au cours de chaque campagne de prélèvement. L'information figurant sur le graphique correspond à la moyenne de ces paramètres ; il s'agit, sauf exception, d'une moyenne de relevés ponctuels. Dans certains cas, une extraction des paramètres durant l'essai a été transmise par l'exploitant dans un fichier informatique.

3.2.1. Taux de charge

Dans l'ensemble, le taux de charge moyen est relativement identique au cours des trois campagnes de prélèvement ; il est compris en moyenne entre 70 et 80 %.

Cette moyenne masque cependant les disparités. Au cours de la 2^e campagne de prélèvement, certains relevés appellent néanmoins des remarques. On a en effet constaté, sur les Sites n° 29 (3,2 MW) et n° 30 (3 MW), un fonctionnement réduit, correspondant entre 25 et 30 % de la puissance nominale de la chaudière ; ces puissances de fonctionnement correspondent au quasi minimum technique du générateur.

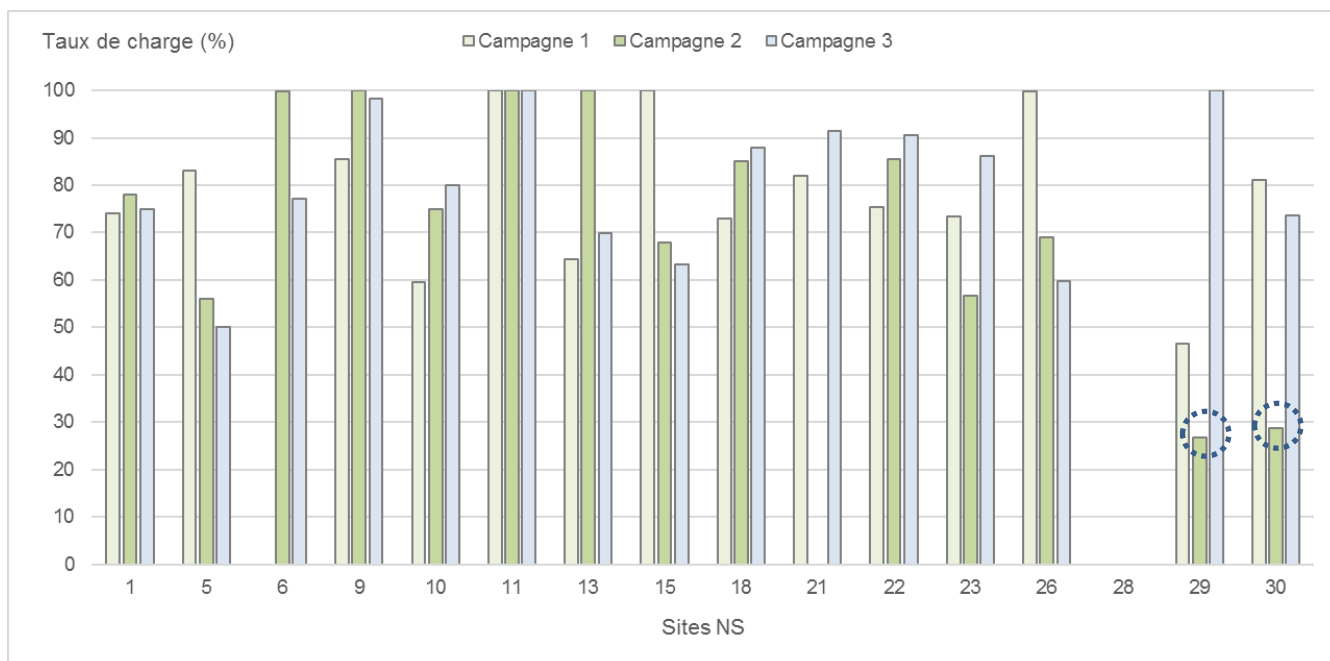


Figure 33 : Taux de charge pendant la période de prélèvement (Sites NS)

3.2.2. Taux d'oxygène

Pour maîtriser la combustion, le taux moyen d'oxygène dans les fumées de bois se situe en général entre 5,5 et 8,5 %. Lorsque le taux d'oxygène est inférieur à 5,5 %, un déficit pourrait conduire à une combustion incomplète ; toutefois, la teneur en monoxyde de carbone (CO) aurait permis de confirmer le défaut d'oxygène. À l'opposé, un taux d'oxygène élevé entraîne un excès d'air, qui peut avoir pour conséquence de refroidir le foyer (ou une partie) et de provoquer également une combustion incomplète. Mais traduit surtout un mauvais mélange de la combustion et une mauvaise utilisation de l'apport d'air.

Sauf exception (Site 13 et Site 29), on observe relativement peu de variations sur chaque site. Mais le fait dominant réside dans un taux d'O₂ dans les fumées dans certains cas :

- relativement faible (Sites 5, 11, 21, 22 et 26) ;
- élevé (Sites 13 et 29, et dans une moindre mesure, 15 et 18).

Un taux d'oxygène bas peut conduire à une combustion incomplète de la biomasse, les volumes d'air primaire et d'air secondaire étant insuffisants. Les polluants organiques persistants (POP) peuvent ainsi être générés et d'autres produits imbrûlés indésirables (COV), non oxydés. La teneur en oxygène et une température supérieure à 900 °C constituent les 2 paramètres cruciaux pour détruire ces molécules organiques (TRITZ, 2014).

À l'opposé, un taux d'oxygène élevé peut entraîner un abaissement de la température de combustion, notamment lorsque le taux de charge de la chaudière est bas. Ces conditions peuvent favoriser, par exemple la production de POP en l'absence d'une élévation suffisante de la température pour oxyder ces molécules organiques.

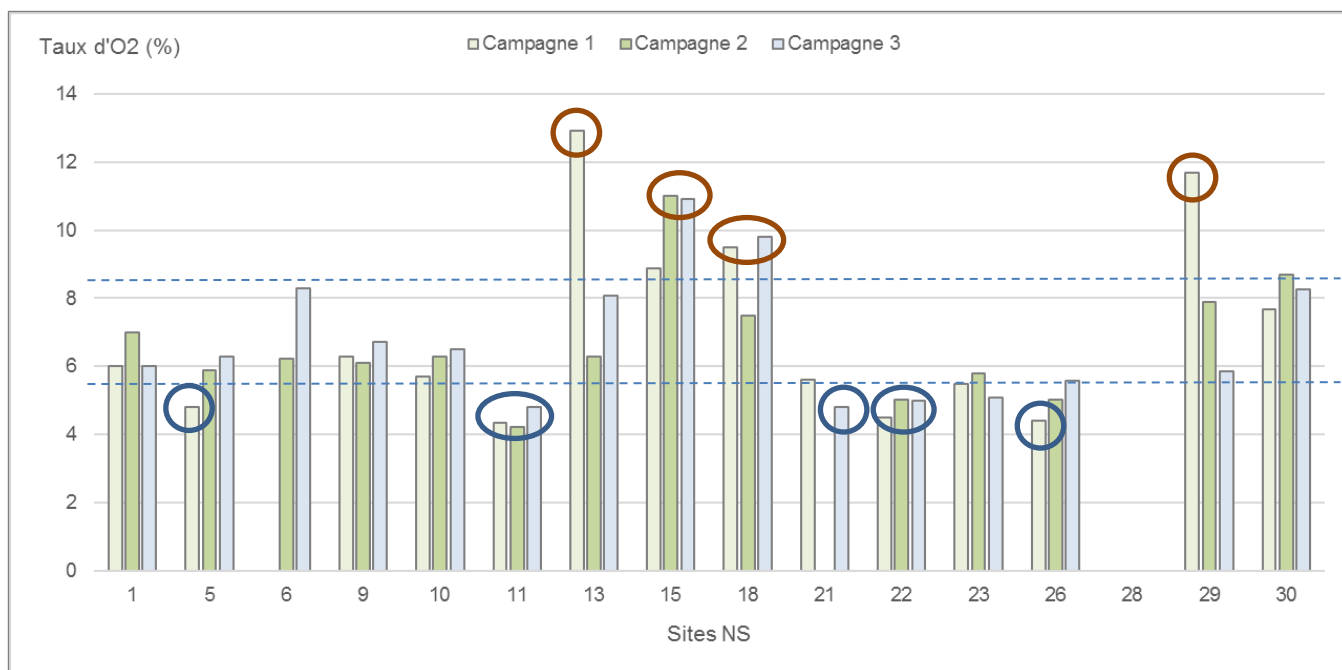


Figure 34 : Taux d'oxygène pendant la période de prélèvement (Sites NS)

3.2.3. Température de chambre de combustion

La sonde de température est en général localisée à proximité immédiate du réfractaire ; à cet endroit, la température plus faible n'est pas totalement représentative de la température de la flamme. Rappelons néanmoins que l'objectif est de disposer d'une température homogène dans l'ensemble de la chambre de combustion : la température recherchée se situe entre 850 et 950 °C. Toutefois les sondes ne sont pas positionnées de la même manière entre les constructeurs et donc les températures ne sont pas équivalentes.

On constate de très basses températures dans 3 cas :

- Site 6 – 3^e campagne : 430 °C,
- Site 18 – 1^{ère} campagne : 430 °C,
- Site 29 – 1^{ère} campagne : 550 °C.

Cette différence de température peut s'expliquer par l'arrêt technique plus long des chaudières lors de la 1^{ère} campagne, durant laquelle le dispositif de collecte des cendres multicycloniques a été mis en place (ce qui a nécessité un arrêt thermostatique de la chaudière de l'ordre de 45 à 60 minutes).

Egalement différence de température sur d'autres sites en première campagne et NS : 10/13/22

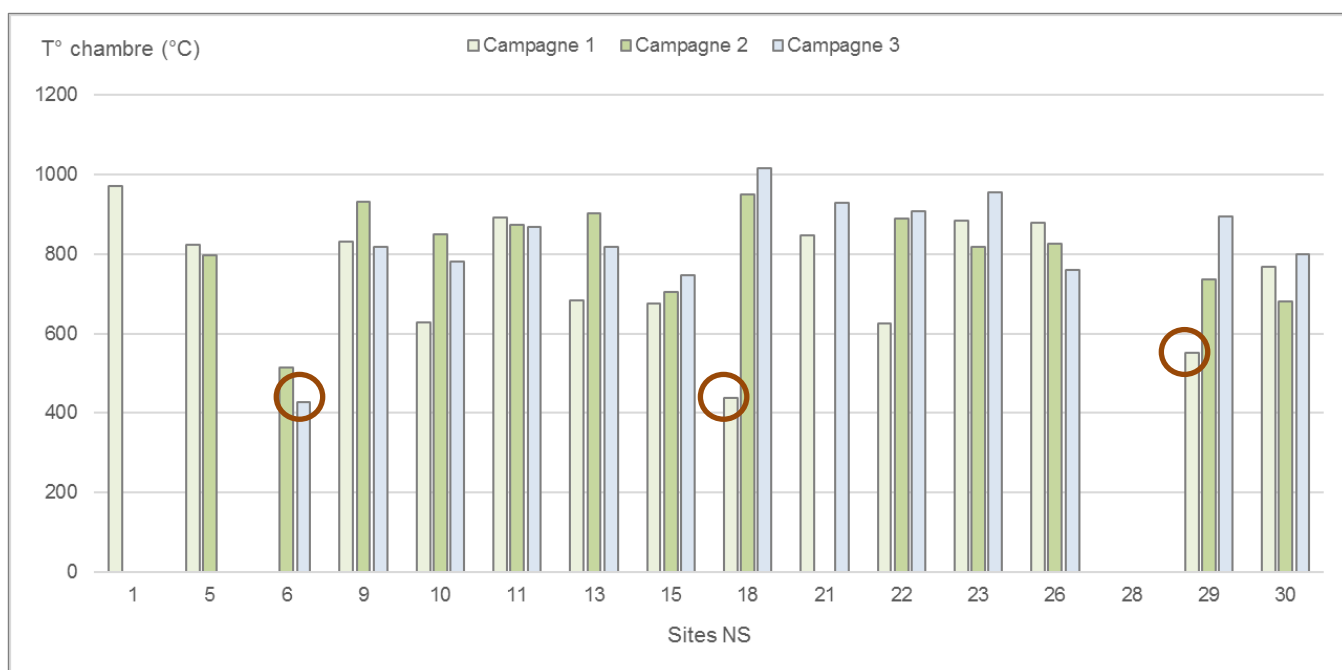


Figure 35 : Température de chambre (°C) pendant la période de prélèvement

3.2.4. Durée des prélèvements

Sur les sites S, les cendres sous-foyer (CF) et multicycloniques (MCS) ont été prélevées directement dans les big bags et les bennes à cendres.

Sur les sites NS, la mise en place de bacs de prélèvement a été nécessaire pour recueillir à chaque campagne les cendres multicycloniques (MCNS), sauf sur 3 sites. Sur ces dernières (Sites 4, 5 et 18), les prélèvements n'ont en effet nécessité aucun aménagement ; les prélèvements ont été réalisés par la mise en marche forcée de la vis de convoyage de cendres vers le site de stockage : aucune durée de prélèvement n'est donc associée à ces trois sites.

Pour les autres, la collecte des cendres multicycloniques a dépendu de la vitesse de production (laquelle était estimée initialement entre 30 et 180 minutes) ; l'objectif est de récupérer la quantité minimale (2 kg) nécessaire pour réaliser les analyses par le laboratoire. Le temps de prélèvement :

- A été conforme aux attentes (Sites 1, 11 et 13),
- A demandé de 1 à 2 journées (Sites 9, 10, 15, 22, 23, 29, 30),
- A demandé en général plus de 2 jours (Sites 21 et 26).

À noter que le Site 26 fonctionne à pleine charge lors de la 1^{re} campagne de prélèvements, et seulement à 70 et 60 % lors des 2^{ème} et 3^{ème} campagnes (ce qui explique les écarts de durée).

L'augmentation de la durée de prélèvement témoigne d'une faible production de cendres multicycloniques, certains constructeurs cherchant en effet à en abaisser la collecte afin d'améliorer notamment la performance en aval du filtre à manches.

n° site	Temps de prélèvement		
	Campagne 1	Campagne 2	Campagne 3
1	<2h	<2h	<2h
4			
5			
6			
9	<24h	<24h	<24h

n° site	Temps de prélèvement		
	Campagne 1	Campagne 2	Campagne 3
10	<24h	<24h	<24h
11	<4h	<4h	<4h
13	<2h	<2h	<2h
15	<24h	<24h	<24h
18			
21	<48h	7j	10j
22	<24h	NC	NC
23	<8h	NC	NC
26	<8h	5j	7j
28	NC	NC	NC
29	<8h	<48h	<48h
30	<8h	<24h	<8h

NC : non connu

Tableau 10 : Durée de prélèvement des cendres multicycloniques sur les Sites NS par campagne

Points à retenir

- Globalement, les sites ont fonctionné dans des conditions normales durant les prélèvements de cendres multicycloniques non séparées, cependant on relève parfois des taux d'O₂ et des températures témoignant d'un impact sur la combustion.
- Le **taux de charge moyen** des installations est globalement **satisfaisant**.
- Le **taux d'O₂** apparaît relativement **faible sur certains sites** (Sites n° 5, n° 11, n° 21, n° 22 et n° 26) et relativement **élevé sur d'autres** (Sites n° 13 et n° 29, et dans une moindre mesure, n° 15 et n° 18). Les excès peuvent entraîner l'apparition de zones « froides » dans le foyer ; comme un apport insuffisant d'oxygène, une zone froide peut être à l'origine d'une oxydation thermique incomplète, notamment des molécules organiques produites lors de la combustion du bois (ou contenues dans le combustible). **A noter que ces mesures mériteraient d'être corrélées à des mesures de CO.**
- L'**allongement de la durée de prélèvement** des cendres multicycloniques (MCNS) témoigne d'une **plus faible proportion de cendres multicycloniques** qu'attendu initialement. Il illustre sans doute les démarches de certains constructeurs dans l'optimisation de la combustion et des rejets.

3.2.5. Les approvisionnements en bois

Pour caractériser les approvisionnements, les exploitants de chauffage ont été interrogés. Les informations communiquées sont qualitatives et ne correspondent pas à une analyse précise des flux de combustible bois par nature. Six catégories de combustible bois ont été établies :

- PF : plaquettes forestières,
- PB : plaquettes bocagères,
- PCS : produits connexes de scieries,
- SSD : bois d'emballage résultant d'une procédure de sortie du statut de déchets,
- Écorces : écorces.

Sur la plupart des sites, les exploitants procèdent à des mélanges de combustible bois. La figure ci-après présente une synthèse par type de site (NS ou S). Hormis 2 installations (Sites 16 et 27), tous les Sites S sont principalement alimentés à partir de plaquettes forestières et/ou de produits connexes de scieries.

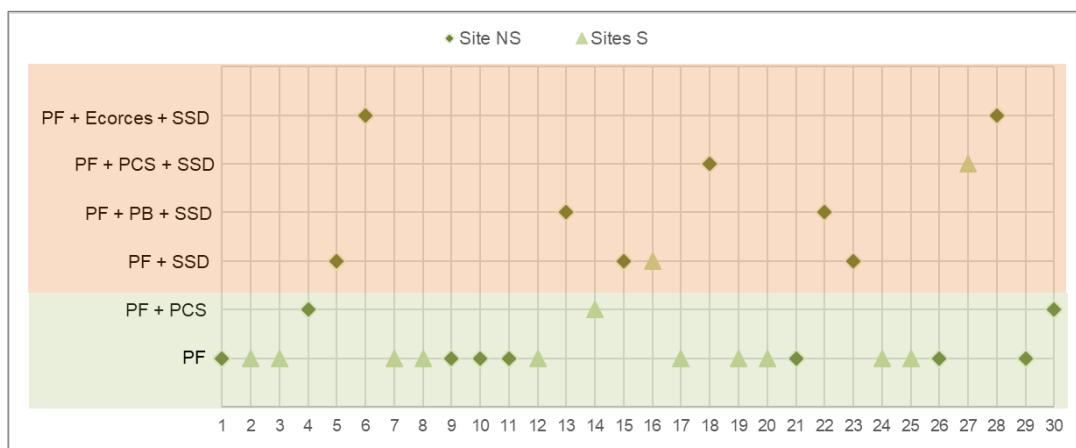


Figure 36 : Les approvisionnements en bois par installation

Seulement 7 sites NS recourent exclusivement à des plaquettes forestières et/ou des produits connexes de scieries. L'approvisionnement des autres Sites NS s'appuie sur des mix combustibles (ressources d'origine et de nature diversifiées). Ils recourent pour l'essentiel à des mélanges d'écorces, de plaquettes bocagères et de bois d'emballage bénéficiant d'un statut de sortie des déchets.

Le type des combustibles peut avoir pour conséquence de modifier la composition et le volume des cendres sous-foyer et des cendres multicycloniques.

3.3. Caractéristiques des cendres

3.3.1. Similarité dans les caractéristiques des cendres

Dans l'analyse statistique, divers travaux ont été conduits dans la perspective d'**identifier les similarités** dans les caractéristiques des cendres. Ces méthodes d'analyse consistent à rassembler les échantillons en fonction de leur degré de similarité selon des critères de ressemblance défini au préalable (matrice de données).

Plusieurs analyses exploratoires en composantes principales (ACP) ont été réalisées sur l'ensemble ou sur une partie du jeu de données afin de faire émerger les relations potentielles (corrélation) entre les **caractéristiques physico-chimiques**, les **éléments neutralisants** et **fertilisants** et l'**innocuité des cendres**. La **première composante** (axe 1 ou des abscisses) de l'ACP reflète l'innocuité des cendres, avec des concentrations plus élevées en substances polluantes dans sa partie positive. La **deuxième composante** (axe 2 ou des ordonnées) décrit la valeur agronomique des cendres ; elle est essentiellement expliquée dans sa partie positive par une valeur neutralisante et fertilisante plus élevée (cf. annexe 8.6).

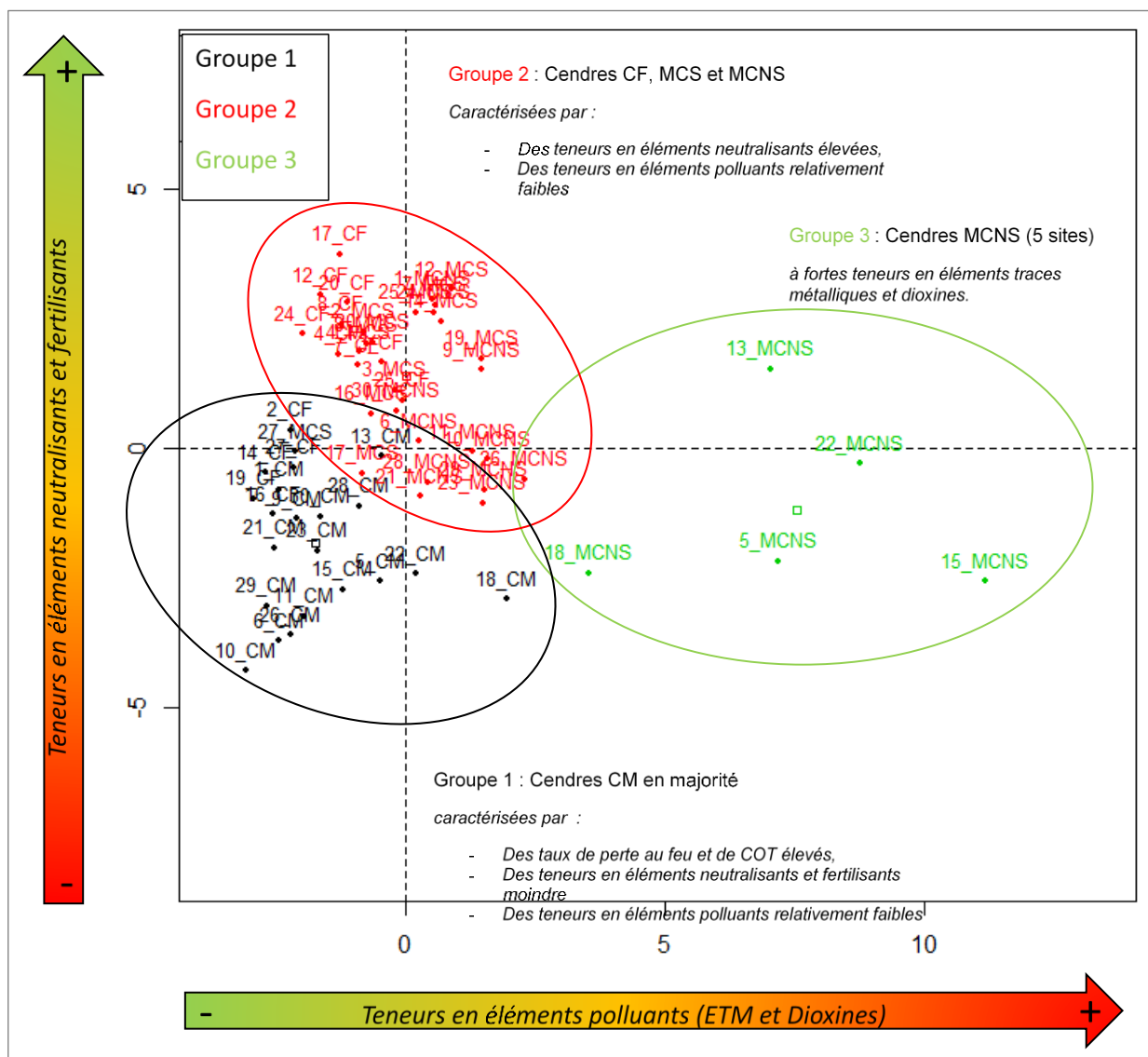


Figure 37 : Les 3 Groupes d'installations et d'analyses

Il ressort de ces investigations 3 groupes de cendres réunies par des similarités physico-chimiques :

- Le **Groupe 1** est composé d'analyses de **cendres mixtes de type CM** (regroupement de cendres sous foyer/cendres multicycloniques). Ces cendres comprennent plutôt une **faible présence de polluants**, une présence un peu plus élevée de carbone organique, et une **plus faible richesse en éléments neutralisants et fertilisants**. Ceci peut s'expliquer par le mode d'extraction des cendres mixtes (par voie humide), qui provoque subitement l'arrêt de la combustion (le carbone organique résiduel ne se consume plus), puis le lessivage des molécules solubles (carbonate de chaux, potasse soluble...). Rappelons que la voie humide a notamment pour intérêt l'extinction des escarbilles et de faciliter la logistique pour la valorisation agricole.
- Le **Groupe 2** est composé d'analyses de **cendres sous foyer seules de type CF** et de **cendres multicycloniques (MCNS et MCS)**. Ces cendres se caractérisent plutôt par une **plus forte richesse en éléments neutralisants** (CaO) et **en éléments nutritifs** (P₂O₅ et K₂O), ainsi que de faibles teneurs en éléments traces métalliques. Elles sont extraites par voie sèche ; pour les cendres multicycloniques non séparées (MCNS), elles ont été prélevées avant leur humidification (elles sont donc sèches). Elles contiennent la fraction soluble des éléments minéraux, ce qui permet de conserver plus de matière sèche et de proposer des concentrations en substances fertilisantes et neutralisantes jusqu'à 2 fois supérieures aux cendres mixtes du groupe 1. Le mode d'extraction de ces cendres conduit à une réduction progressive du carbone organique résiduel, qui continue à se consumer (y compris après leur extraction du foyer).
- Le **Groupe 3** (cf. tableau suivant) est composé exclusivement d'analyses de cendres multicycloniques d'un nombre réduit de sites : Sites NS n° 5, n° 13, n° 15, n° 18 et n° 22. Ces

cendres se distinguent par une présence plus élevée d'éléments traces métalliques. Ces sites se caractérisent également, pour 3 d'entre eux, par la présence de dioxines/furanes (site n° 5, n° 15 et n° 22) et par une forte présence de zinc en particulier (sites n° 15, n° 22, n° 13, n° 5, n° 18 et dans une moindre mesure, n° 5), de cadmium (sites n° 13, n° 15 et n° 22) et de mercure (sites n° 5, n° 15 et n° 18), alors que ce dernier métal est quasi absent des cendres.

Ces approches constituent une aide à la compréhension des résultats ; elles permettent désormais de **mieux cibler les analyses à entreprendre** et présentées dans les pages suivantes.

Les caractéristiques par types de cendres et par site sont en effet abordées plus en détail ci-après. À cette occasion, une interprétation des résultats au travers d'une recherche approfondie des causes expliquant d'éventuelles divergences ou variations de composition est proposée.

Cette présentation comprend trois parties :

- Les paramètres physico-chimiques,
- La valeur agronomique,
- Les éléments traces (micropolluants métalliques et organiques).

Pour chaque élément (valeur agronomique et polluants), une fiche a été réalisée contenant :

- Son origine,
- Sa mobilité,
- Son utilité,
- Les seuils réglementaire et normatifs,
- La composition des cendres par installation et par type de cendres,
- La situation par rapport au seuil de la réglementation et les enseignements principaux.

Une synthèse des caractéristiques physico-chimiques des 5 cendres multicycloniques de type MCNS (Groupe 3), des combustibles bois associés et des paramètres de combustion est renvoyée en annexe(cf. annexe 7).

Une analyse comparative des résultats par installation et par type de cendres est présentée. L'ensemble des fiches n'est pas présenté dans le texte suivant. Une partie est en effet renvoyée en annexe (cf. annexe 8) ; elle concerne les éléments contribuant moins à la compréhension des enjeux.

3.3.2. Paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques présentés dans ce paragraphe sont :

- La densité des cendres,
- La matière sèche,
- La matière minérale.

Les résultats d'analyse relatifs au pH et la conductivité des cendres sont présentés en annexe 8.

3.3.2.1. Densité des cendres

Au cours des trois campagnes de prélèvement, des mesures de densité ont été effectuées, avant et après tassement. Les résultats par type de cendres (CF, CM et MC) sont présentés dans les figures et le tableau ci-dessous.

Tassement		Cendres sous-foyer		Cendres multicycloniques
		seules	en mélange	
Avant	Minimum	516	611	273
	Moyenne	1 057	1 084	632
	Maximum	1 760	1 761	1 439
Après	Minimum	608	697	310
	Moyenne	1 234	1 273	706
	Maximum	1 927	2 010	1 582

Tableau 11 : Masse volumique (g/L) moyenne des cendres

La densité des cendres sous-foyer est identique, quel que soit le mode de collecte (mélange ou non avec les cendres multicycloniques) ou le mode d'extraction des cendres (voie humide ou voie sèche).

Les cendres sous-foyer (CF et CM)

En moyenne et toutes cendres sous-foyer confondues (CF et CM), la masse volumique des cendres sous foyer est de 1 072 g/L avant tassement et de 1 255 g/L après tassement.

Des écarts sensibles autour de la moyenne ont cependant été constatés sans que l'on puisse en expliquer la cause.

Le facteur de tassement moyen est de 1,17, mais il peut varier de 1,05 à 1,39.

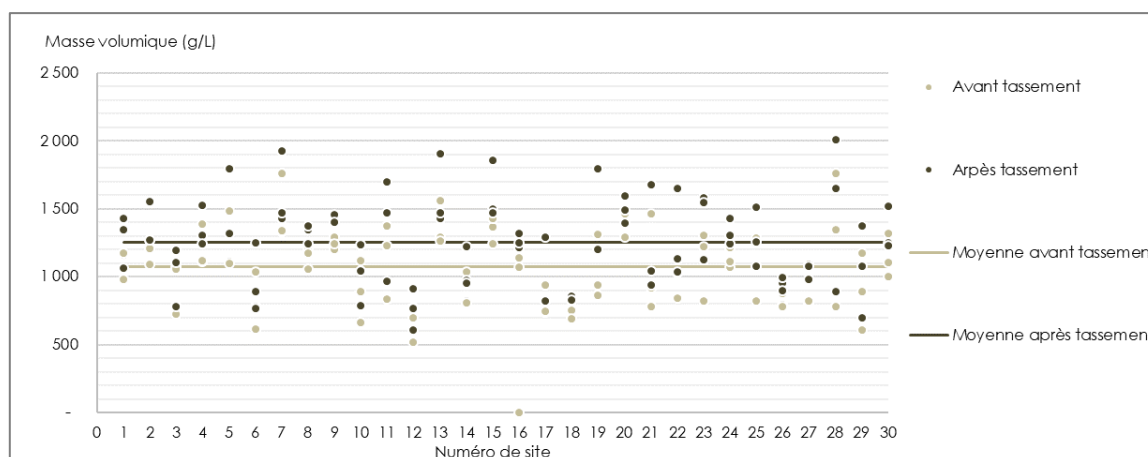


Figure 38 : Masse volumique des cendres sous-foyer (CF et CM) avant et après tassement

Les cendres multicycloniques (MC)

Par ailleurs, les cendres multicycloniques (MC) sont un peu moins dense que les cendres sous-foyer ou mixtes, avec une masse volumique moyenne de 632 g /L avant tassement et de 706 g/L après tassement.

À noter que le site 16 est particulier puisque la densité des cendres multicycloniques se rapproche de celles des cendres sous-foyer ; ce phénomène s'explique par le mode d'extraction des cendres sous-cyclone qui entraîne une part importante des cendres sous-foyer.

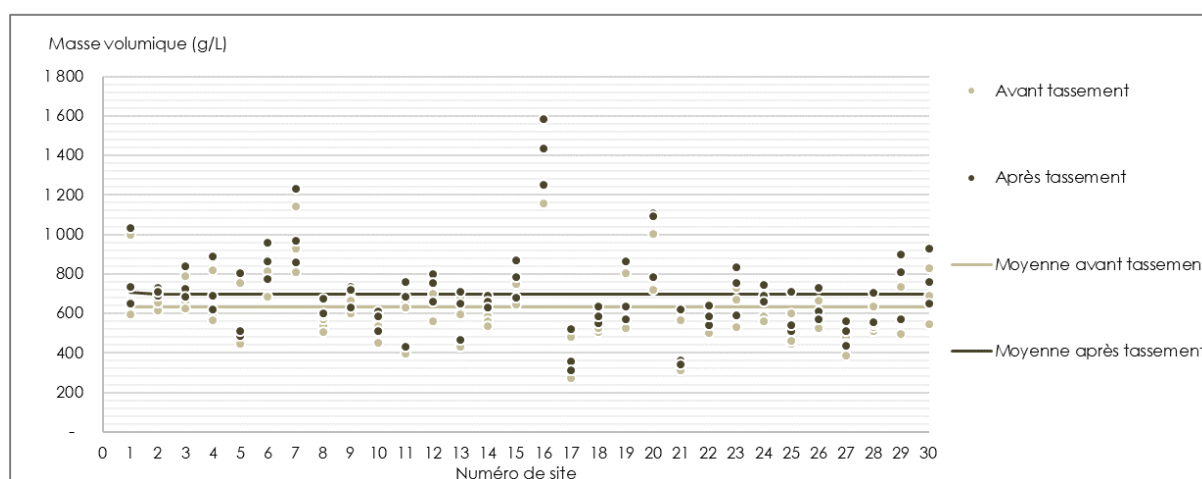
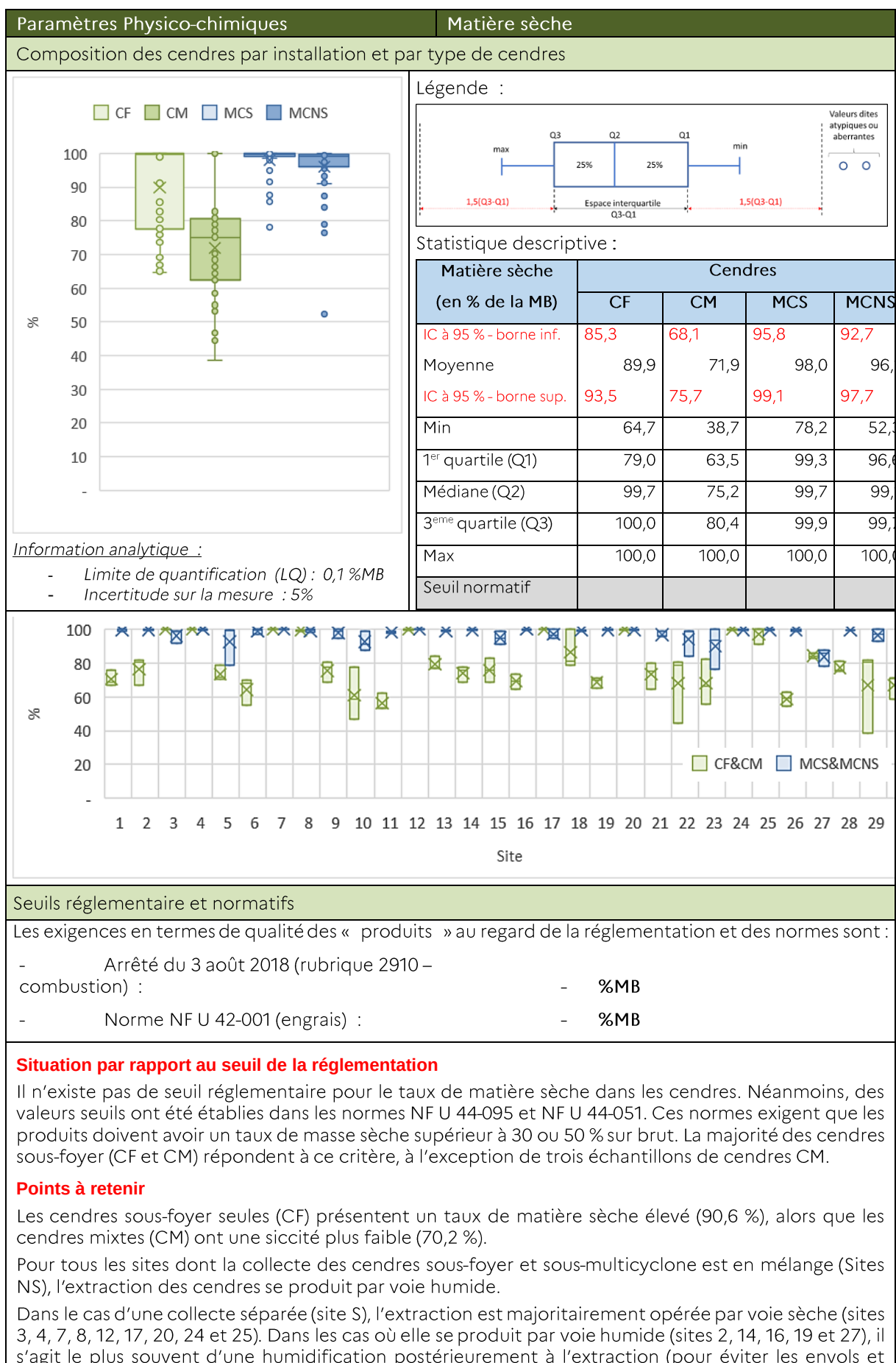


Figure 39 : Masse volumique des cendres multicycloniques (MC)

3.3.2.2. Matière sèche des cendres

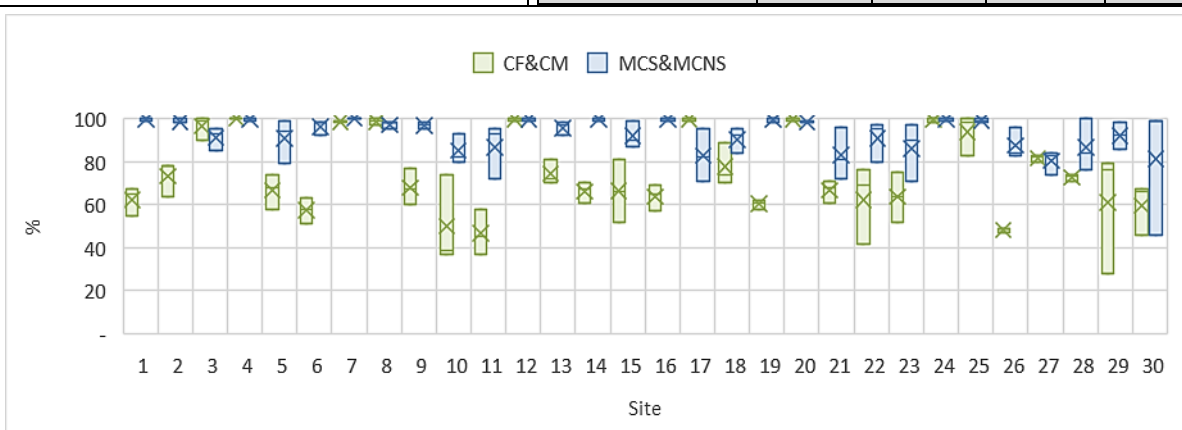
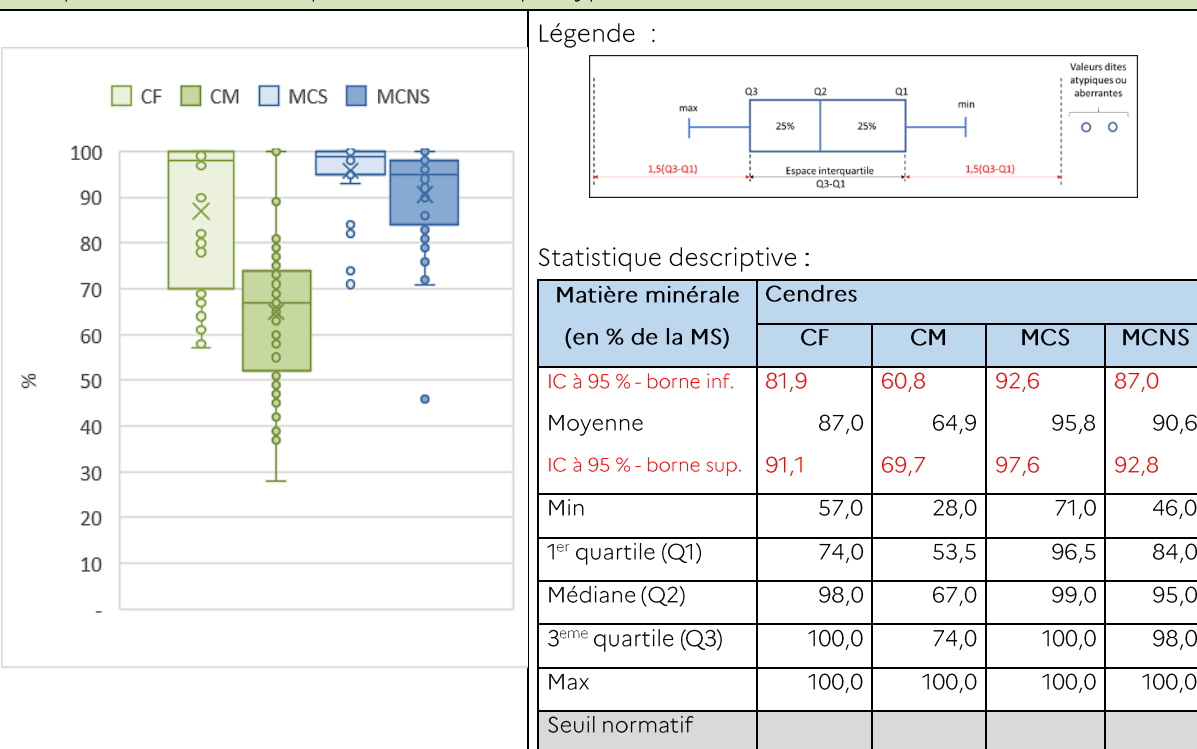


faciliter la manipulation des cendres).

Les cendres MCS sont usuellement sèches. Lorsqu'elles sont toutefois collectées en mélange, la gaine d'évacuation des cendres multicycloniques tombe dans un lit d'eau, ce qui peut provoquer une condensation conduisant à une agrégation des cendres sur les parois pouvant aller jusqu'au colmatage partiel ou total du conduit (constat sur 2 sites).

3.3.2.3. Matière minérale

Composition des cendres par installation et par type de cendres



Situation par rapport au seuil de la réglementation

Aucun seuil réglementaire d'épandage connu à ce jour.

Points à retenir

Le taux de matière minérale correspond à la différence entre le taux de matière sèche et le taux d'imbrûlés dans les cendres.

Le taux d'imbrûlés apparaît plus élevé dans les cendres mixtes (CM) : 27,3 %, contre 7,1 % pour les cendres sous foyer seul (CF). Ce constat est sans doute lié au refroidissement des cendres lorsque celles-ci tombent dans le lit d'eau, ce qui doit interrompre toute combustion (alors qu'elle se poursuit sans doute lorsque l'extraction se produit par voie sèche)

Paramètres Physico-chimiques	Matière minérale
De 99,5 à 99,8 % ⁵ du contenu en matière organique de la biomasse (fraction combustible) ont été dégradés lors de la combustion.	
En ce qui concerne les cendres multicycloniques, la même observation peut être formulée.	

Points à retenir

- Les cendres CF et CM présentent des densités similaires.
- Les sites, dont les cendres CM (collecte en mélange des cendres sous-foyer et sous-multicyclone) procèdent à une **extraction des cendres par voie humide** (16/17), alors que les sites bénéficiant d'une collecte séparée disposent majoritairement d'une extraction par voie sèche (9/13).
- Le **taux de matière minérale est plus élevé dans les cendres CF** que dans les cendres CM. L'hypothèse d'un refroidissement des cendres dans l'eau stoppant soudainement la combustion peut être avancée.

3.3.3. Valeur agronomique

D'un point de vue agronomique, les cendres des chaufferies biomasse sont reconnues pour leur valeur neutralisante (tels les amendements basiques) et dans une moindre mesure pour leur valeur nutritive.

Cet intérêt agronomique peut être évalué à partir de leur concentration dans les substances suivantes :

- Pour la valeur neutralisante (amendement basique) :
 - la chaux (exprimée en kg de CaO), laquelle se présente sous la forme de carbonate ($\text{Ca}^{2+}[\text{OH}]_2$), et la magnésie (exprimée en kg de MgO). Une fiche est dédiée à chacun de ces 2 éléments neutralisants ;
 - le pH, la moyenne des analyses se situant entre 12,4 pour les cendres mixtes (CM) et 12,9 pour les cendres sous foyer (CF). **Les cendres multicycloniques (MCS et MCNS) présentent un pH supérieur à celui des cendres sèches sous foyer (CF).**
- Pour la valeur nutritive (engrais) :
 - les éléments fertilisants majeurs, tels la potasse (K_2O), et dans une moindre mesure, le phosphore (P_2O_5). Une fiche technique est élaborée pour chacun de ces 2 éléments fertilisants. A noter que la potasse concourt également à la valeur neutralisante des cendres ;
 - le soufre, respectivement présent dans les cendres sous-foyer (CF) et les cendres mixtes (CM) à hauteur de 2,5 et 3,1 g/kg MS. **Ces 2 types de cendres sous foyer sont très carencés par rapport aux cendres multicycloniques, dont la moyenne fluctue entre 13,9 et 18,0 g/kg MS (respectivement MCS et MCNS)**

À noter que les cendres sont carencées en azote. En effet, l'azote contenu dans le combustible bois se transforme en azote atmosphérique (N_2) et en oxydes d'azote (NO_x) lors de la combustion. La matière organique est oxydée : elle constitue le contenu énergétique du combustible bois. L'objectif de l'exploitant est d'en retrouver le moins possible dans les cendres.

Pour apporter des éléments de comparaison, les fiches suivantes rappellent quelques éléments d'information sur les attentes en matière de composition des amendements basiques (NFU 44-203) et/ou des engrais (NFU 42-001).

Les informations transmises ci-après ne suffisent pas à évaluer l'efficacité des amendements, et en particulier, dans la perspective de relever le pH d'un sol. En effet, la forme chimique des éléments apportés est essentielle pour en faire l'évaluation.

Dans le même esprit, la part biodisponible des éléments nutritifs au bénéfice de la plante n'a pas été analysée dans le cadre de la présente campagne de caractérisation des cendres. Il s'agit donc d'une première approche, qui nécessitera un approfondissement ultérieur.

Néanmoins, les professionnels de la FEDENE ont engagé des travaux complémentaires visant à évaluer plus précisément l'intérêt agronomique des cendres sous foyer, aux côtés du Bureau de Normalisation Fertilisation agréé par l'AFNOR, pour conduire les réflexions relatives à l'actualisation de la norme NFU 44-

⁵ Taux de dégradation de la matière organique = $1 - [(\text{Carbone Organique TotalCendres}) \times \text{TauxCendres}] / [\text{Matière OrganiqueCombustible}]$

203. Parallèlement, ce groupe de travail devra également déterminer la définition et les spécifications des cendres (composition minimale en CaO, en MgO, en K₂O et en P₂O₅).

Les normes relatives aux amendements organiques (NFU 44-051) ne sont pas présentées dans les fiches techniques suivantes. Bien que les cendres ne soient pas assimilables à un compost (quasi-absence de carbone organique), leur épandage en mélange à un produit plus humide compte tenu de leur relative volatilité mérite d'être examiné avec attention. Un mélange avec un compost de déchets verts par exemple pourrait apparaître pertinent.

En préambule, l'origine, la mobilité dans le sol et l'utilité des divers paramètres agronomiques sont synthétisés dans le tableau ci-après.

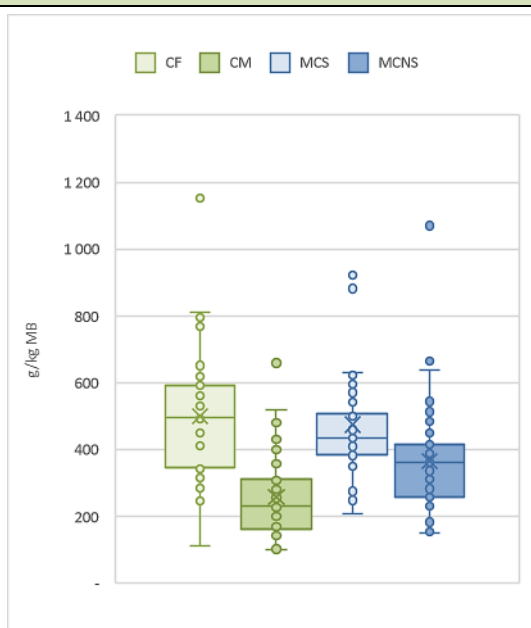
Paramètres	Origine	Mobilité dans le sol	Utilité pour le sol et les plantes	Références / Sources
<i>Eléments neutralisants</i>				
CaO - Chaux	Calcination du calcaire à 825°C	Réaction immédiate avec l'eau du milieu biologique (formation d'hydroxyde calcique $[(Ca^{2+}(OH^-)_2])$ Calcium principalement présent dans les cendres sous la forme d'hydroxyde classique	Amendement pour les sols acides Maintien ou redressement du pH d'un sol Permet de créer des réserves en éléments nutritifs (notamment en favorisant la formation d'un complexe organo-minéral) Élément nutritif pour la plante (constitution des parois cellulaires, activation de certaines enzymes...)	ATC, 2001 UNIFA
MgO - Magnésie	Calcination entre 800 et 1000°C	Mobilité en fonction du pH Élément à l'état particulaire Forme dissoute immédiatement disponible pour la plante	Très fort pouvoir neutralisant Élément nutritif essentiel à la croissance des plantes (rôle dans la production d'énergie de la plante, activation d'enzyme du métabolisme...)	UNIFA
<i>Eléments fertilisants</i>				
P ₂ O ₅ - Phosphate	Constituant naturel de la croûte terrestre (0,12%)	Forte interaction avec la phase solide du sol Faible mobilité dans le sol	Élément nutritif – intervient dans divers processus métaboliques des plantes (chaîne de production d'énergie)	UNIFA
K ₂ O - Potasse	Présent dans la croûte terrestre (3,2%) Humus du sol	Éléments assez mobile dans le sol Forme dissoute immédiatement biodisponible (forme immobilisée par le complexe argile comique du sol) – Forme faiblement présente dans les cendres de biomasse	Élément nutritif essentiel au métabolisme et à la croissance de la plante Élément basique participant à la valeur neutralisante des cendres	UNIFA

Tableau 12. Origine, mobilité et utilité des éléments neutralisants et fertilisants présents dans les cendres

3.3.3.1. Eléments neutralisants

3.3.3.1.1. Chaux

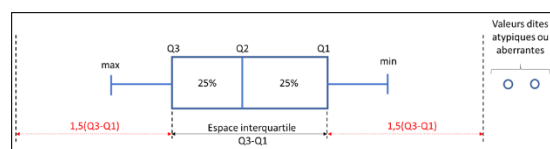
Valeur agronomique – éléments neutralisants	CaO
Seuils réglementaire et normatifs	
Les exigences en termes de qualité des « produits » au regard de la réglementation et des normes sont :	
- Arrêté du 3 août 2018 (rubrique 2910 – combustion) :	Aucune
- Norme NFU 42-001 (engrais) :	Aucune
- Norme NFU 44-203 (amendements minéraux basiques/engrais) :	35 % sur brut
teneur minimum pour les craie phosphatée et amendement calcique phosphaté	
Composition des cendres par installation et par type de cendres	



Information analytique (pour le Ca) :

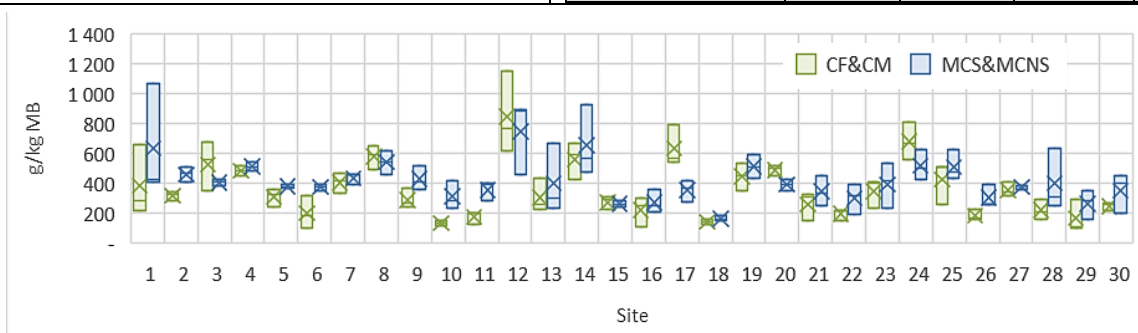
- Limite de quantification (LQ) : 50 mg/kgMS
- Incertitude sur la mesure : - %

Légende :



Statistique descriptive :

Chaux (CaO) (en g/kg de la MB)	Cendres			
	CF	CM	MCS	MCNS
IC à 95 % - borne inf.	442,24	226,36	433,02	329,48
Moyenne	498,90	256,59	474,62	364,01
IC à 95 % - borne sup.	564,15	294,56	533,48	417,17
Min	112,47	100,87	208,39	149,35
1 ^{er} quartile (Q1)	345,47	164,66	386,54	258,00
Médiane (Q2)	497,00	230,32	434,53	361,20
3 ^{ème} quartile (Q3)	591,35	306,50	505,72	412,13
Max	1150,80	658,43	921,70	1069,21
Seuil normatif				



Situation par rapport au seuil de la réglementation

Il n'existe pas de seuil réglementaire d'épandage concernant les teneurs en chaux dans les cendres.

Points à retenir

La teneur en chaux est exprimée par rapport à la matière brute. Les cendres sous-foyer seules (CF) sont (en kg/MB) 2 fois plus riches en chaux que les cendres sous-foyer mixtes (CM). L'extraction par voie humide (5 seulement sur 13 pour les Sites S et 16 sur 17 pour les Sites NS) est probablement à l'origine de la plus forte richesse des cendres CF. Cette différence (50 % sur brut et 30% sur sec) provient sans doute de la qualité des combustibles et de leur richesse en Ca^{2+} , d'un lessivage partiel de la chaux, et enfin, de la présence d'eau dans les cendres mixtes (CM). A

noter que les cendres multicycloniques (MCS et MCNS) présentent une teneur en chaux très proche des cendres sous-foyer (CF et MC) si on la ramène à la MS (cf. annexe 8).

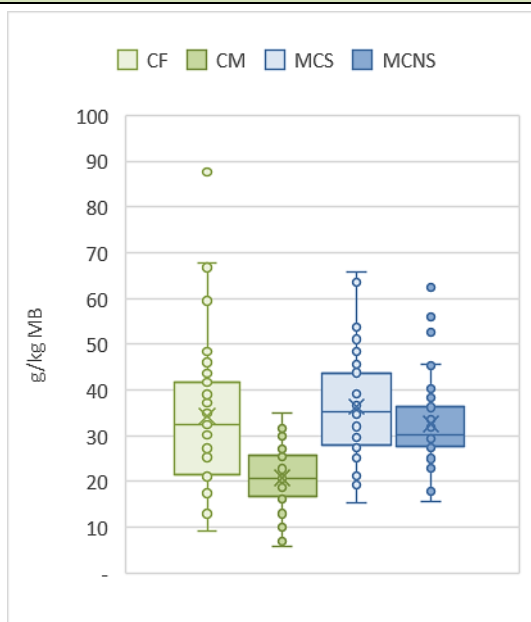
3.3.3.1.2. Magnésium

Seuils réglementaire et normatifs

Les exigences en termes de qualité des « produits » au regard de la réglementation et des normes sont :

- Arrêté du 3 août 2018 (rubrique 2910 – combustion) : **Aucune**
- Norme NFU 42-001 (engrais) : **Aucune**
- Norme NFU 44 203 (amendements minéraux basiques/engrais) : **Aucune**

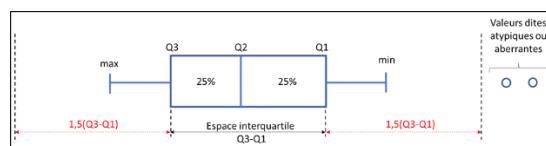
Composition des cendres par installation et par type de cendres



Information analytique (pour le Mg):

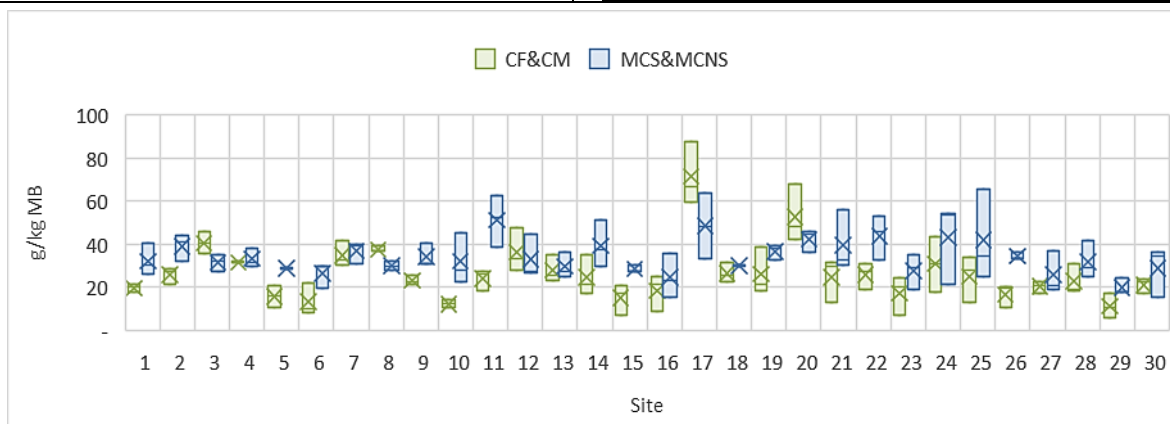
- Limite de quantification (LQ) : 5 mg/kgMS
- Incertitude sur la mesure : - %

Légende :



Statistique descriptive :

Magnésie (MgO) (en g/kg de la MB)	Cendres			
	CF	CM	MCS	MCNS
IC à 95 % - borne inf.	29,73	18,65	33,03	30,24
Moyenne	34,28	20,80	36,37	32,54
IC à 95 % - borne sup.	40,01	22,73	40,26	35,48
Min	9,15	5,71	15,24	15,52
1 ^{er} quartile (Q1)	21,67	17,19	28,80	27,94
Médiane (Q2)	32,50	20,81	35,15	30,27
3 ^{ème} quartile (Q3)	41,02	25,61	42,35	36,30
Max	87,71	35,02	65,76	62,41
Seuil				



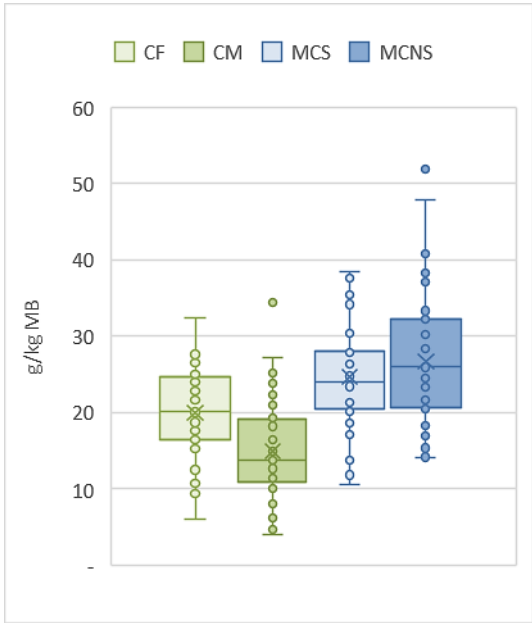
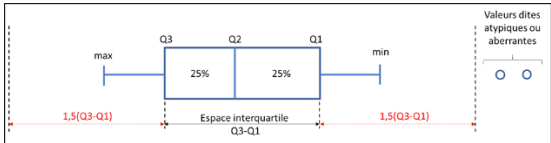
Situation par rapport au seuil de la réglementation

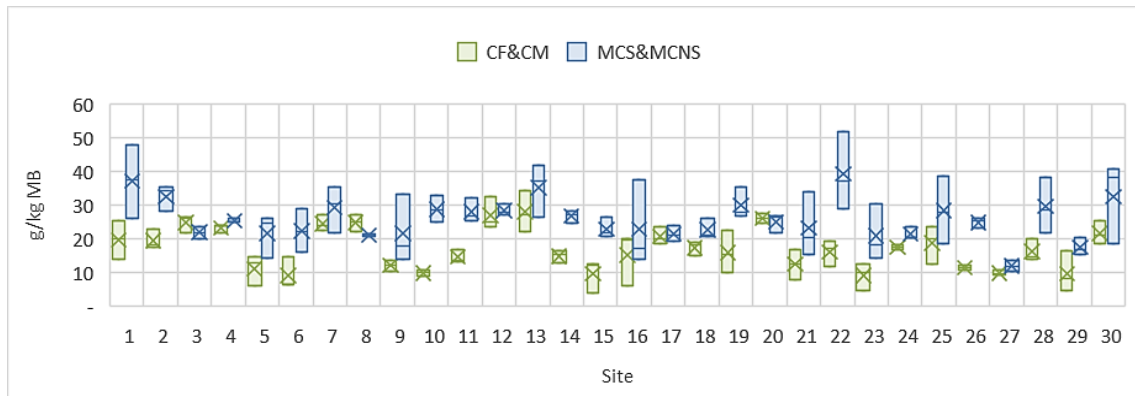
Il n'existe pas de seuil réglementaire d'épandage dans l'arrêté du 3 août 2018 concernant les teneurs en magnésium dans les cendres.

Valeur agronomique – éléments neutralisants	MgO
Points à retenir Comme pour la chaux, les teneurs en magnésie sont exprimées par rapport à la matière brute. La plus faible teneur en magnésie des cendres mixtes (CM) résulte de leur mode d'extraction (par voie humide). À l'image de la chaux, une partie de la magnésie doit également être perdue par lessivage. Exprimée en matière sèche (cf. annexe 8), la concentration en magnésie des cendres sous-foyer et des cendres multicycloniques est très proche.	

3.3.3.2. Eléments fertilisants

3.3.3.2.1. Phosphore

Valeur agronomique – éléments fertilisants		P ₂ O ₅		
Seuil réglementaire				
Les exigences en termes de qualité des « produits » au regard de la réglementation et des normes sont :				
- Arrêté du 3 août 2018 (rubrique 2910 – combustion) :	Aucune			
- Norme NFU 42-001 (engrais) :	> 2 % MB (éq. à > 20 g/kgMB)			
- Norme NFU 44 203 (amendements minéraux basiques/engrais) :	> 3 % MB (éq. à < 30 g/kgMB)			
teneur minimum pour les craie phosphatée et amendement calcique phosphaté				
Composition des cendres par installation et par type de cendres				
		Légende : 		
Statistique descriptive :				
Phosphore (P ₂ O ₅) (en g/kg de la MB)	Cendres			
	CF	CM	MCS	MCNS
IC à 95 % - borne inf.	17,93	13,26	22,46	24,44
Moyenne	19,98	14,91	24,72	26,71
C à 95 % - borne sup.	21,74	16,93	26,79	29,30
Min	5,99	4,02	10,56	14,03
1 ^{er} quartile (Q1)	16,59	11,01	20,67	20,80
Médiane (Q2)	20,18	13,75	24,00	25,98
3 ^{ème} quartile (Q3)	24,36	18,89	28,07	31,24
Max	32,42	34,47	38,43	51,97
Seuil				
Information analytique (pour le P) :				
- Limite de quantification (LQ) : 1 mg/kgMS				
- Incertitude sur la mesure : 13 %				



Situation par rapport au seuil de la réglementation

Il n'existe pas de seuil réglementaire d'épandage pour la teneur en P₂O₅. La richesse nutritive des cendres est exprimée par rapport à la matière brute (MB). A l'exception de 2 échantillons, les cendres sous-foyer présentent des teneurs en P₂O₅ inférieures à 3 % de la MB. Cependant, plus de la moitié des cendres CF présente une teneur en P₂O₅ supérieure à 2 % de la MB ; elles pourraient être valorisées sous forme d'engrais (norme NFU 42-001) sous réserve que les autres seuils soient respectés (teneur en K₂O...), mais la proportion d'analyse dépassant le seuil des 3 % sur brut est faible (norme NFU 44 203).

Points à retenir

Ramenée à la matière sèche, la concentration en P₂O₅ des cendres sous-foyer, quel que soit leur mode de collecte, est comparable. Les cendres sous-multicyclone sont plus riches en phosphate que les cendres sous-foyer (cf annexe 8). Les cendres multicycloniques collectées en commun (MCNS) sont légèrement plus riches que les cendres multicycloniques extraites séparément (MCS).

3.3.3.2. Potassium

Seuils réglementaire et normatifs

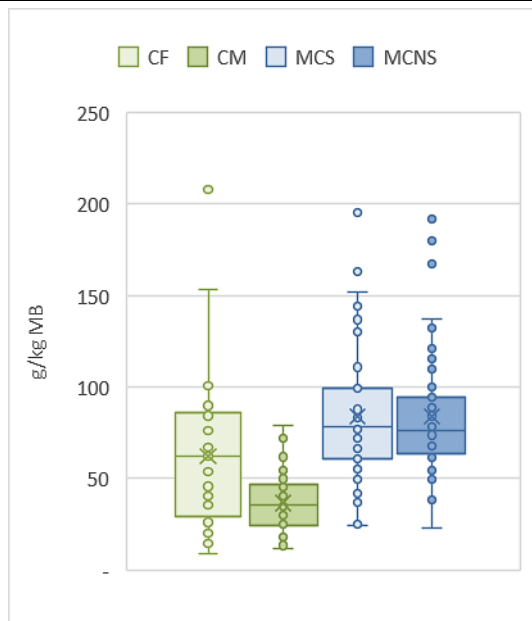
Les exigences en termes de qualité des « produits » au regard de la réglementation et des normes sont :

- Arrêté du 3 août 2018 (rubrique 2910 – combustion) : **Aucune**
- Norme NFU 42-001 (engrais) : **> 5 % MB (éq. à > 50 g/kg MB)**
- Norme NFU 44 203 (amendements minéraux basiques/engrais) : **Aucune**

Composition des cendres par installation et par type de cendres

Valeur agronomique – éléments fertilisants

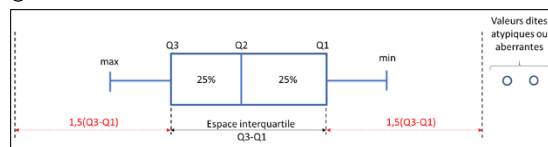
K₂O



Information analytique (pour le K):

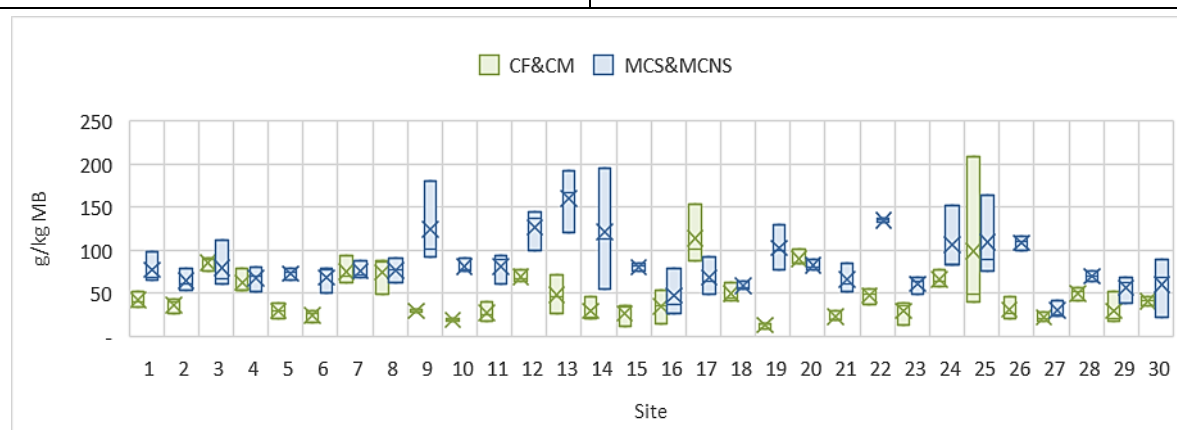
- Limite de quantification (LQ) : 20 mg/kgMS
- Incertitude sur la mesure : - %

Légende :



si Statistique descriptive :

Potasse (K ₂ O)	Cendres			
en g/kg de la MB)	CF	CM	MCS	MCNS
C à 95 % - borne inf.	52,45	32,89	73,59	76,43
oyenne	62,41	36,53	83,98	84,1
C à 95 % - borne sup.	78,31	41,11	96,07	94,93
min	9,30	12,02	24,30	23,1
er quartile (Q1)	32,33	25,56	61,40	63,8
édiane (Q2)	62,40	35,60	78,60	76,3
ème quartile (Q3)	85,38	46,53	95,75	93,3
max	207,94	79,20	195,21	192,0
euil				



Situation par rapport au seuil de la réglementation

Il n'existe pas de seuil réglementaire d'épandage pour la teneur en K₂O dans les cendres. Néanmoins, des valeurs seuils ont été établies dans la norme NFU 42-001. Plus de la moitié des cendres CF ont une teneur en K₂O supérieure à 5 % de la MB ; elles pourraient être valorisées sous forme d'engrais (norme NFU 42-001) à condition que les autres seuils soient respectés. En ce qui concerne les cendres CM, seuls quelques échantillons de cendres atteignent ce seuil. Ce constat est lié au mode d'extraction des cendres sous-foyer mixtes (voie humide).

Points à retenir

Les cendres sous-foyer seules (CF) sont plus riches en potasse que les cendres sous-foyer et sous-multicyclone (CM). La partie soluble de la potasse a sans doute migré vers la phase aqueuse des cendres, laquelle s'est égouttée dans la benne à cendres. Les cendres multicycloniques sont plus riches en potasse que les cendres sous-foyer. Comme pour le phosphore, les cendres multicycloniques collectées en commun (MCNS) avec les cendres sous-foyer sont légèrement plus riches que les cendres multicycloniques extraites séparément (MCS).

3.3.3.2.3. Autres éléments fertilisants

Les éléments fertilisants, listés ci-dessous, sont présentés en annexe 8 de ce document :

- Matière et carbone organique. Les teneurs en matière organique et en carbone organique sont faibles compte tenu du procédé d'obtention des cendres. La teneur moyenne en matière organique des cendres sous-foyer mixte est supérieure (12,4 % MS) à celle constatée pour les cendres sous foyer seules (3,5 %MS), cette différence provenant sans doute du mode d'extraction des cendres. Les cendres ne peuvent pas être considérées comme un amendement organique compte tenu de ces teneurs ;
- Azote et ses formes : azote total, azote ammoniacal, azote nitrique, azote organique, azote organique uréique. Les teneurs en azote dans les cendres sont faibles en raison du procédé de combustion. Les teneurs moyennes en azote total s'établissent entre 0,19 mg/kg MS pour les cendres sous-foyer mixte et 0,34 mg/kgMS pour les cendres sous foyer seules. Les cendres ne peuvent donc pas être assimilées à un engrais azoté ;
- Rapport C/N, ratio principalement employé pour caractériser les amendements organiques, est très élevé ;
- Sodium (Na_2O). Dans le cas d'épandages massifs et répétés d'effluents sodiques (effluents agro-industriels type laiterie ou sucrerie), le suivi de la teneur en sodium est indispensable pour éviter les risques de déstabilisation structurale. Les cendres contribuent relativement peu à l'augmentation de la salinité des sols (0,019 % dans les cendres CF et 0,028 % dans les cendres CM).

Points à retenir

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

- La **valeur neutralisante** des cendres se caractérise par les teneurs élevées en chaux, en magnésie et en potasse :
 - Chaux : 240 à 500 kg CaO /tonne MB,
 - Magnésie : 20 à 40 kg MgO /tonne MB,
 - Potasse : 30 à 75 kg K_2O /tonne MB.
- La **valeur fertilisante** des cendres est évaluée par leurs teneurs en potasse et en phosphate :
 - Potasse : 30 à 75 kg K_2O /tonne MB,
 - Phosphore : 13 à 22 kg P_2O_5 /tonne MB.

Des **écarts de composition** ont été identifiés :

- Les écarts observés résultent probablement de la **composition initiale des combustibles bois**.
- On constate des **écarts de composition entre les catégories de cendres** (CF et CM). On peut émettre l'hypothèse de l'incidence du **mode d'extraction par voie humide** (pour les secondes) et à la richesse en eau associée (les résultats étant exprimés par rapport à la matière brute).

Les **cendres multicycloniques** présentent une **richesse quasi équivalente aux cendres sous-foyer, voire supérieure dans certains cas**.

3.3.4. Eléments traces métalliques (ETM)

Les cendres sont assimilées à des MAFOR (matières fertilisantes d'origine résiduaire), au même titre que les déjections animales, les déchets et effluents agro-industriels, les résidus ou effluents urbains transformés (composts de déchets verts, composts de boues, digestats...) ou non.

Le retour au sol de ces matières fertilisantes permet de limiter les usages des engrais et amendements commerciaux, lesquels proviennent pour l'essentiel de l'exploitation de carrières en France ou à l'étranger.

Ces minerais fossiles, tout comme les MAFOR, sont avant tout utilisés pour leur valeur neutralisante et/ou nutritive.

Mais quelle que soit leur origine, l'utilisation agronomique de ces matières conduit à un apport d'éléments traces métalliques en quantité plus ou moins importante sur les sols agricoles.

Ces éléments traces sont classés en 2 principales catégories :

- Les principaux métaux toxiques : Pb, Cd et Hg
- Les oligo-éléments :

- dont un apport excessif peut nuire au sol ou à la plante, ce qui justifie l'application de seuils réglementaires visant à protéger les écosystèmes. Il s'agit des métaux suivants : Zn, Cr, Cu, Ni, As ;
- les autres oligoéléments : Se et Mo.

Les fiches techniques ci-après présentées synthétisent la composition des cendres et des écarts observés. En préambule, les caractéristiques des principaux éléments traces métalliques, en termes d'origine, de mobilité, de toxicité et d'utilité, sont synthétisées dans le tableau suivant.

Tableau 13. Origine, mobilité, toxicité et utilité des éléments traces métalliques et des composés traces organiques présents dans les cendres

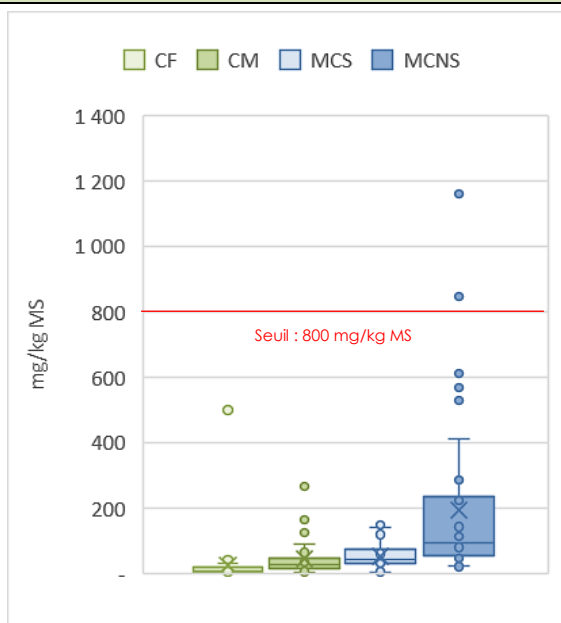
Paramètres	Origine	Mobilité dans les sols et la plante	Besoins/toxicité pour l'homme et l'animal	Utilité pour le sol et les plantes	Références
ETM – micropolluants métalliques					
Plomb	- Naturelle : présent dans l'écorce terrestre et les sols - Anthropique : industrie et automobile	- Sol : Faible solubilité et mobilité - Plantes : Difficilement biodisponible sauf pour les végétaux métallophytes	- Plante : Variable selon l'espèce. Troubles physiologiques et biochimiques induisant un retard de croissance - Homme et animaux : ingestion, saturnisme, Une partie du plomb s'accumule dans l'organisme		Baize D. (INRA), 1994 Baize D., Paquereau H. (INRA), 1997 Itard Y. et al. (BRGM), 2003 Fernandez-Cornudet C., 2006. INRS, 2018 Perrono P., 1999 CNESST Et références y contenues.
Cadmium	- Naturelle : Faible concentration dans l'écorce terrestre, Activité volcanique. Présence naturelle dans les sols calcaires à l'état brut ou après dégradation (cf. carte GISSOL, INRA) - Anthropique : Activités industrielles, automobile et épandage d'engrais phosphatés.	- Sol : élément relativement mobile - Plante : taux d'absorption variable selon l'espèce. Accumulation privilégiée dans les feuilles	- Homme : élimination du cadmium très lente		Baize D. (INRA), 1994. Baize D., Paquereau H. (INRA), 1997 Itard Y. et al. (BRGM), 2003 Fernandez-Cornudet C., 2006. Perrono P., 1999 INRS, 2019 Martin-Garin A. et Simon O. (IRSN), 2004. CNESST Et références y contenues.
Mercure	- Naturelle : éruptions volcaniques, érosion des sols et des roches, évaporation des océans - Anthropique : émissions atmosphériques liées aux industries minières, métallurgiques, incinérateurs...2pandage de boues, de fertilisants inorganiques et autres composts et fumier	- Sol : faiblement mobile (lié à la matière organique et aux oxydes métalliques) - Plante : Accumulation via les racines	- Homme : Grande diffusibilité et liposoluble. Traverse facilement les barrières membranaires. - Animaux : Accumulation de mercure dans les organismes		Baize D. (INRA), 1994. Baize D., Paquereau H. (INRA), 1997 Itard Y. et al. (BRGM), 2003 Fernandez-Cornudet C., 2006. Perrono P., 1999 INRS, 2014. Beaugelin-Seiller K. et Simon O. (IRSN), 2004. CNESST Et références y contenues.

Paramètres	Origine	Mobilité dans les sols et la plante	Besoins/toxicité pour l'homme et l'animal	Utilité pour le sol et les plantes	Références
ETM – Oligoéléments métalliques					
Zinc	- Naturelle : écorce terrestre, sols - Anthropique : industrie, épandage agricole (effluents d'élevage, boues urbaines), activité urbaine, trafic routier	Relativement mobile. Solubilité variable selon le pH	- Plante : Chlorose en fer, jusqu'à une nécrose des tissus. - Homme et animaux : Transport actif au niveau du plasma	Nécessaire à la formation d'hormones de croissance (auxine)	Baize D. (INRA), 1994. Baize D., Paquereau H. (INRA), 1997 Itard Y. et al. (BRGM), 2003 Fernandez-Cornudet C., 2006. Perrono P., 1999 CNESST, INERIS, 2005 INRS, 2012. KALI AG. Saur E. (INRA), 1990. UNIFA, 2005. Et références y contenues.
Chrome	- Naturelle : A l'état de traces dans le sol et la croûte terrestre. - Anthropique : Fabrication de produits (chimiques, cuir et textile, électro-peinture), combustion du charbon.	Plante : Bioaccumulation dans divers végétaux	Homme et animaux : transport par la circulation sanguine et élimination par les urines et selles.	Régulation du sucre	Baize D., Paquereau H. (INRA), 1997 Perrono P., 1999 CNESST, IRSN, INRS, 2013 ECGC, 1994 Et références y contenues.
Cuivre	- Naturelle : croûte terrestre (20 mg/kg de roche en France) - Anthropique : automobile, effluents d'élevages, fongicides cupriques	- Sol : Mobilité variable selon de nombreux facteurs (pH, potentiel redox, capacité d'échange cationique...) - Plante : Faible mobilisation par les plantes.	Homme et animaux : irritation des voies respiratoires en cas d'inhalation ; troubles digestifs en cas d'ingestion	Activateur d'enzymes ; rôle dans le métabolisme des protéines et la synthèse de la chlorophylle	Baize D. (INRA), 1994. Baize D., Paquereau H. (INRA), 1997 Perrono P., 1999 CNESST, INRS, 2013. KALI AG. Saur E. (INRA), 1990. UNIFA, 2005. Et références y contenues.

3.3.4.1. Micropolluants métalliques

3.3.4.1.1. Plomb

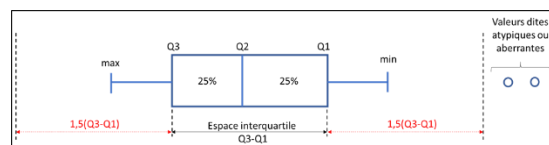
ETM – Métaux toxiques	Plomb
Seuils réglementaire et normatifs	
Les exigences en termes de qualité des « produits » au regard de la réglementation et des normes sont :	
- Arrêté du 3 août 2018 (rubrique 2910 – combustion) :	800 mg/kg MS
- Norme NFU 42-001 (engrais) :	150 mg/kg MS
- Norme NFU 44-203 (amendements minéraux basiques/engrais) :	150 mg/kg MS
Composition des cendres par installation et par type de cendres	



Information analytique :

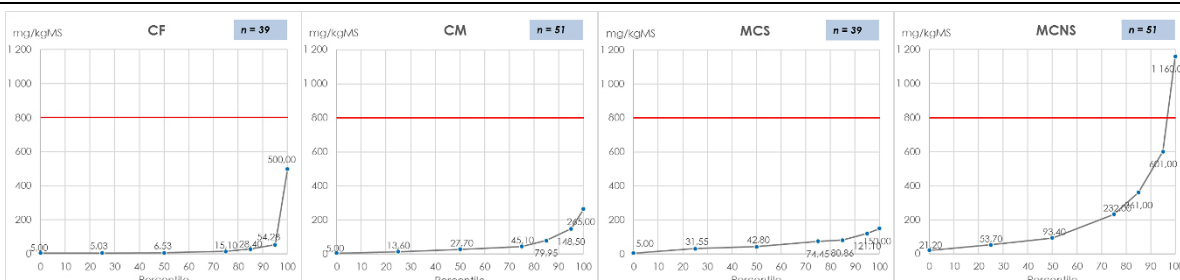
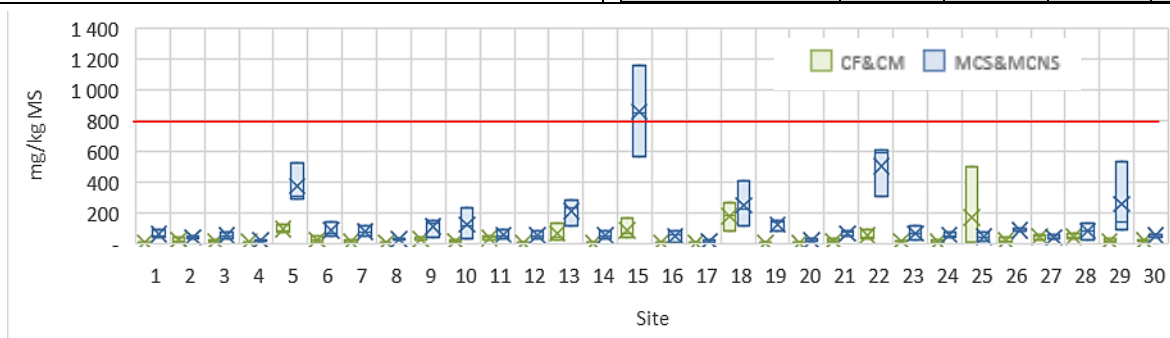
- Limite de quantification (LQ) : 5 mg/kgMS
- Incertitude sur la mesure : 15 %

Légende :



Statistique descriptive :

Plomb (Pb) (en mg /kg MS)	Cendres			
	CF	CM	MCS	MCNS
IC à 95 % - borne inf.	11,68	34,72	43,43	144,49
Moyenne	25,63	44,94	52,10	193,76
IC à 95 % - borne sup.	75,79	64,27	63,03	274,05
Min	5,00	5,00	5,00	21,20
1 ^{er} quartile (Q1)	5,03	13,60	31,55	53,70
Médiane (Q2)	6,53	27,70	42,80	93,40
3 ^{eme} quartile (Q3)	15,10	45,10	74,45	232,00
Max	500,00	265,00	150,00	1 160,00
Seuil	800	800	800	800

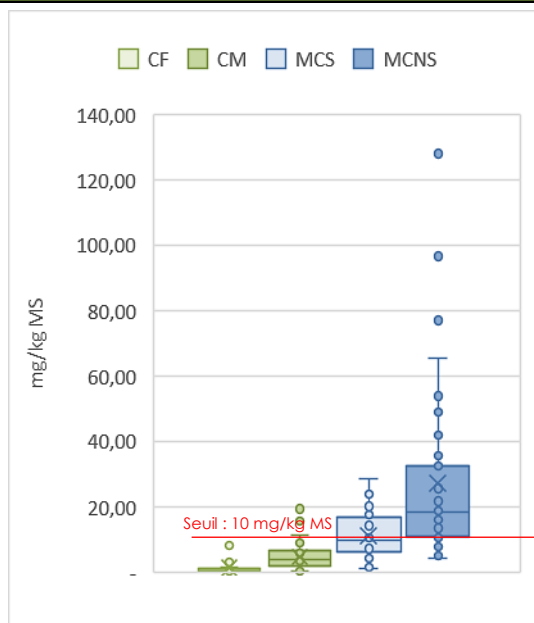


ETM – Métaux toxiques	Plomb
Situation par rapport au seuil de la réglementation Toutes les cendres sous-foyer et les cendres mixtes (CF, CM) respectent le seuil de la réglementation (arrêtés du 3 août 2018). Les cendres multicycloniques (MCS, MCNS) respectent également le seuil réglementaire (arrêté du 3 août 2018) à l'exception de 2 échantillons du Site n° 15 (ce dernier figure parmi les rares sites où une (faible) présence de plomb a été détecté dans le combustible). Les cendres sous foyer et les cendres mixtes (CF, CM) respectent également les seuils des normes NFU 42-001 et NFU 44-203 (excepté 3 échantillons sur 90). Points à retenir Le plomb est présent en très faible quantité dans les cendres sous foyer et les cendres multicycloniques. Les cendres sous foyer seules (CF) présentent une teneur en plomb légèrement plus faible que les cendres mixtes (CM). Les cendres sous foyer seules et mixtes (CF et CM) présentent une teneur en plomb plus faible que les cendres multicycloniques (MCS et MCNS). Les cendres multicycloniques séparées (MCS) présentent une teneur en plomb nettement plus faible que les cendres multicycloniques non séparées (MCNS). A ce stade, il est difficile d'expliquer ces écarts importants entre les cendres MCS et MCNS ; 2 hypothèses peuvent néanmoins être avancées : - 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 majorité des sites NS ont dû être aménagés et ont connu des arrêts thermostatiques, pour le prélèvement des MCNS) ; - 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 beaucoup plus poussées pour être confirmées.	

3.3.4.1.2. Cadmium

ETM – Métaux toxiques	Cadmium
Seuils réglementaire et normatifs	
Les exigences en termes de qualité des « produits » au regard de la réglementation et des normes sont :	
- Arrêté du 3 août 2018 (rubrique 2910 – combustion) :	10 mg/kg MS
- Norme NFU 42-001 (engrais) :	90 mg/kg P ₂ O ₅
- Norme NFU 44 203 (amendements minéraux basiques/engrais) :	90 mg/kg P ₂ O ₅
Composition des cendres par installation et par type de cendres	

ETM – Métaux toxiques

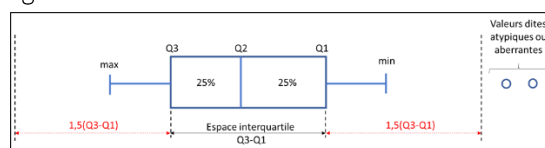


Information analytique :

- Limite de quantification (LQ) : 0,4 mg/kgMS
- Incertitude sur la mesure : 40 %.

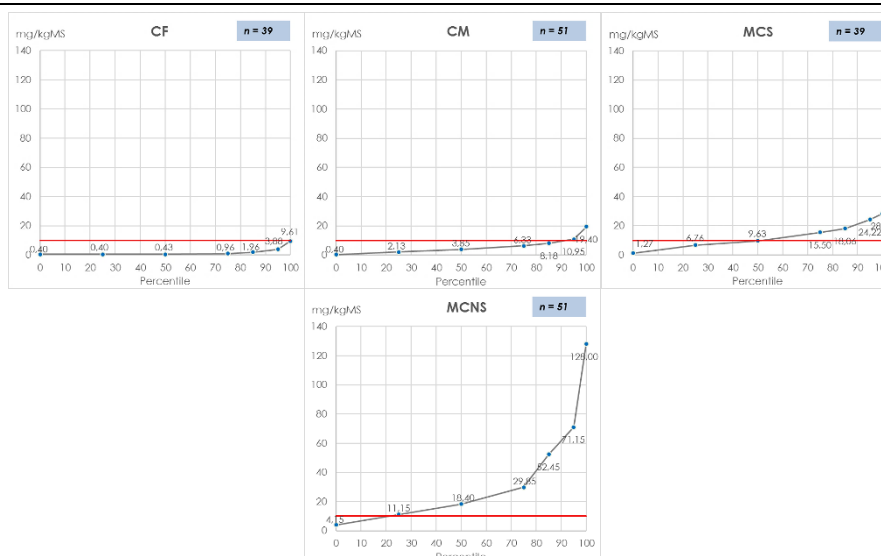
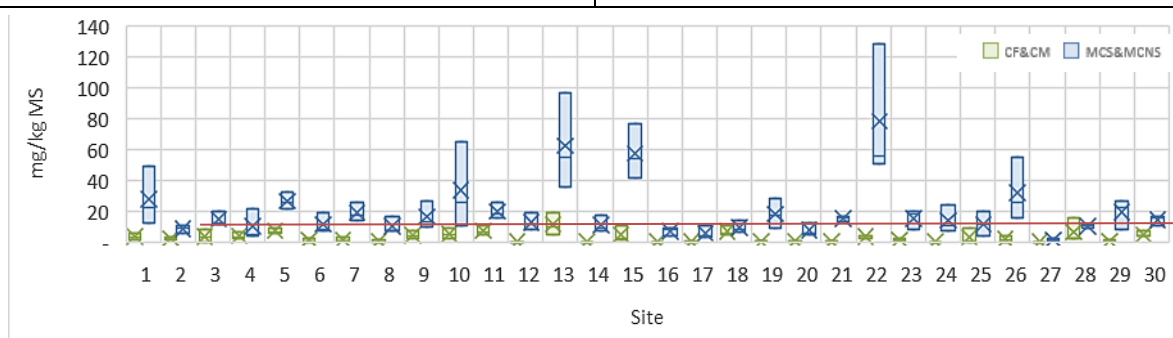
Cadmium

Légende :



Statistique descriptive :

Cadmium (Cd) (en mg /kg MS)	Cendres			
	CF	CM	MCS	MCNS
IC à 95 % - borne inf.	0,81	3,84	9,16	21,20
Moyenne	1,27	4,74	11,21	21,20
IC à 95 % - borne sup.	2,09	6,07	13,56	35,40
Min	0,40	0,40	1,27	
1 ^{er} quartile (Q1)	0,40	2,13	6,76	11,21
Médiane (Q2)	0,43	3,85	9,63	11,21
3 ^{ème} quartile (Q3)	0,96	6,33	15,50	21,20
Max	9,61	19,40	28,40	126,00
Seuil	10	10	10	



Situation par rapport au seuil de la réglementation

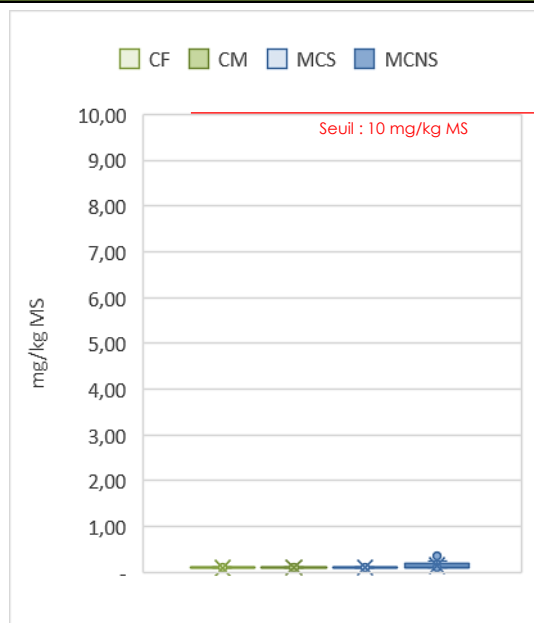
Les cendres sous foyer (CF) respectent le seuil réglementaire (arrêté du 3 août 2018).

Les cendres mixtes (CM) respectent également le seuil réglementaire à l'exception de 6 échantillons, ce qui signifie que 88,2 % des analyses de cendres sous foyer mixtes respectent le seuil réglementaire.

ETM – Métaux toxiques	Cadmium
Points à retenir 93% des analyses de cendres sous foyer et mixtes (CF et CM) respectent le seuil réglementaire de l'épandage. Les cendres sous foyer (CF) présentent une teneur en cadmium plus faible que les cendres mixtes (CM). Les cendres sous foyer et mixtes (CF et CM) présentent une teneur moyenne en cadmium plus faible que les cendres multicycloniques (MCS et MCNS). Les cendres multicycloniques séparées (MCS) présentent une teneur en cadmium nettement plus faible que les cendres multicycloniques non séparées (MCNS). A ce stade, il est difficile d'expliquer ces écarts importants entre les cendres MCS et MCNS ; 2 hypothèses peuvent néanmoins être avancées : - 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 majorité des sites NS ont dû être aménagés et ont connu des arrêts thermostatiques, pour le prélèvement des MCNS) ; - 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. Pour les Sites S, toutes les cendres sous foyer (CF) respectent le seuil de la réglementation ; le rapport entre la teneur moyenne observée dans les MCS et le seuil réglementaire (10 mg/kg MS) est de 1,1 (et 2,8 pour le rapport entre la teneur maximale/seuil réglementaire). Pour les Sites NS, 87,5 % des échantillons de cendres mixtes (CM) respectent le seuil de la réglementation ; le rapport entre la teneur moyenne observée dans les MCNS et le seuil réglementaire est de 2,8 ; Le rapport entre la teneur maximale observée dans les MCNS (parmi les cendres CM inférieures aux seuils réglementaires – 85^{ème} percentile) et le seuil réglementaire est de 5.4.	

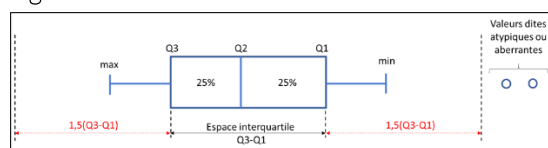
3.3.4.1.3. Mercure

ETM – Métaux toxiques	Mercure
Seuils réglementaire et normatifs	
Les exigences en termes de qualité des « produits » au regard de la réglementation et des normes sont :	
- Arrêté du 3 août 2018 (rubrique 2910 – combustion) :	10 mg/kg MS
- Norme NFU 42-001 (engrais) :	2 mg/kg MS
- Norme NFU 44 203 (amendements minéraux basiques/engrais) :	2 mg/kg MS
Composition des cendres par installation et par type de cendres	

Information analytique :

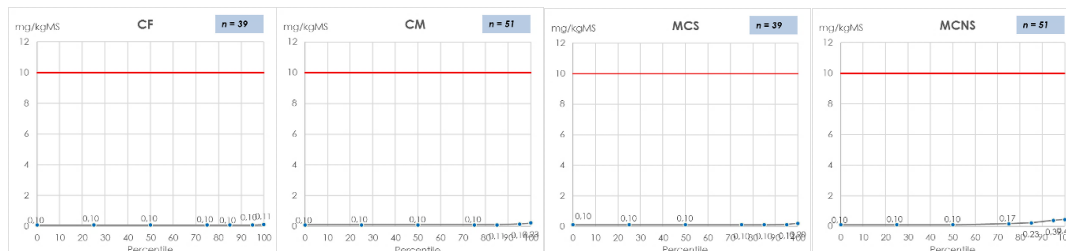
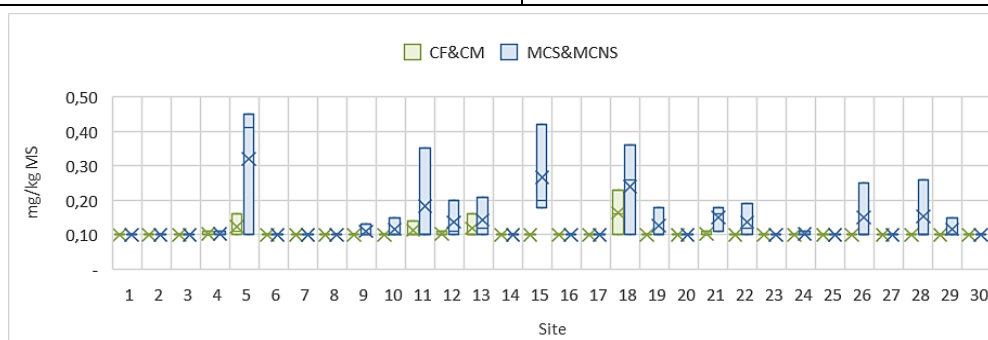
- Limite de quantification (LQ) : 0,1 mg/kgMS
- Incertitude sur la mesure : 25 %

Légende :



Statistique descriptive :

Mercure (Hg) (en mg /kg MS)	Cendres			
	CF	CM	MCS	MCNS
à 95 % - borne inf.	0,10	0,10	0,10	0,13
oyenne	0,10	0,11	0,11	0,1
à 95 % - borne sup.	0,10	0,12	0,11	0,18
in	0,10	0,10	0,10	0,1
r quantile (Q1)	0,10	0,10	0,10	0,1
édiane (Q2)	0,10	0,10	0,10	0,1
me quantile (Q3)	0,10	0,10	0,10	0,1
ax	0,11	0,23	0,20	0,4
euil	10	10	10	1

**Situation par rapport au seuil de la réglementation**

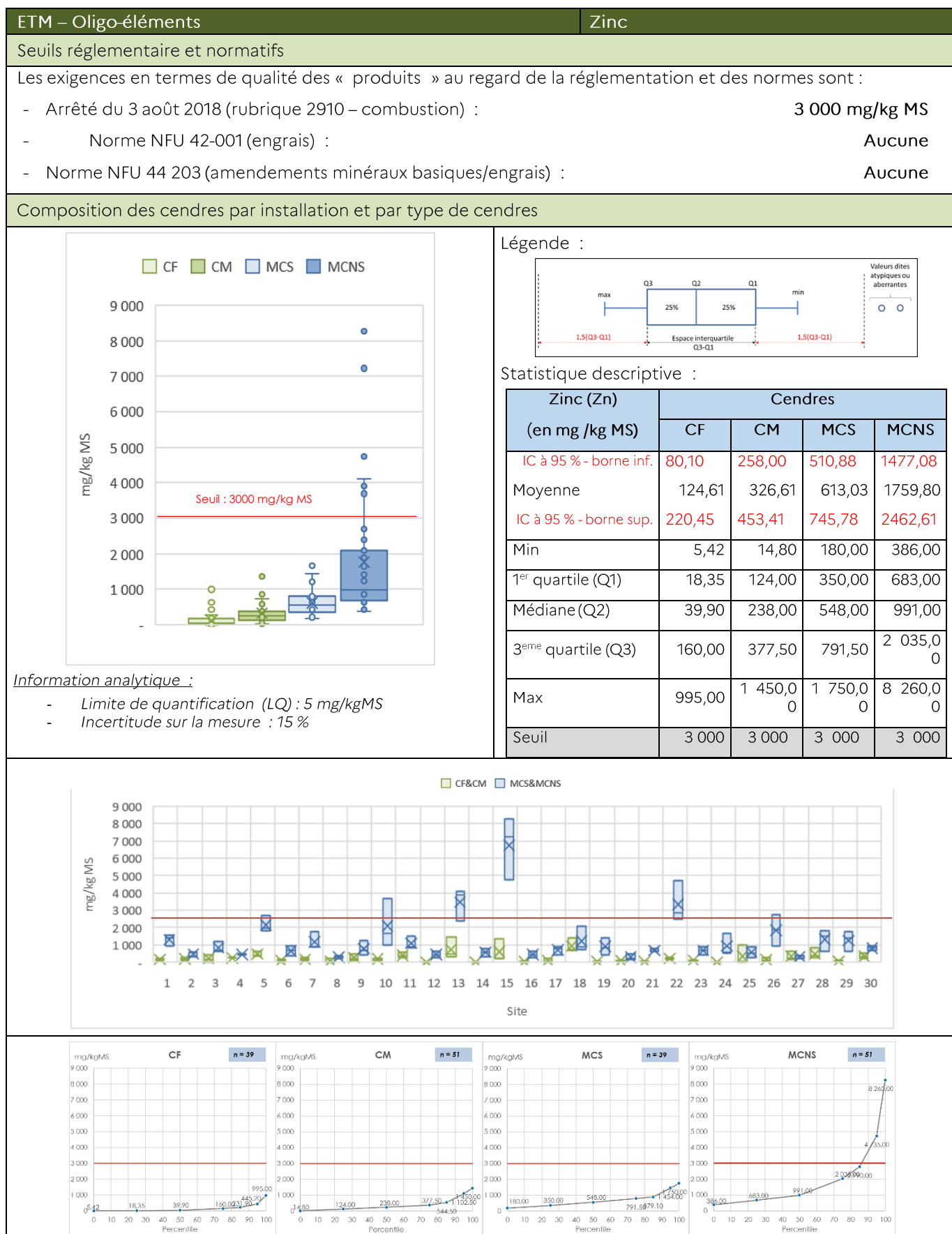
Au regard du seuil réglementaire en mercure, toutes les valeurs sont nettement inférieures au seuil de 10 mg/kg MS. De même, l'ensemble des échantillons respectent les seuils normatifs en mercure.

Points à retenir

Les teneurs en mercure sont très faibles (inférieures à 0,45 mg/kg MS), quel que soit le type de cendres.

3.3.4.2. Oligo-éléments

3.3.4.2.1. Zinc

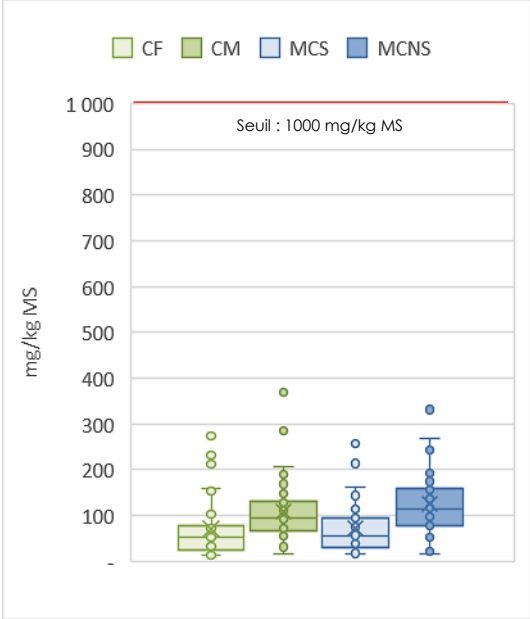


ETM – Oligo-éléments	Zinc
Situation par rapport au seuil de la réglementation Toutes les cendres sous foyer et les cendres mixtes (CF et CM) respectent le seuil réglementaire de l'épandage (arrêté du 3 août 2018). Les cendres multicycloniques séparées (MCS) respectent également le seuil réglementaire de l'épandage. Les cendres multicycloniques non séparées (MCNS) respectent majoritairement le seuil d'épandage réglementaire à l'exception de 7 échantillons (sur les sites 10, 13, 15 et 22), ce qui représentent moins de 14% des analyses de cendres MCNS. Points à retenir Le zinc est présent en très faible quantité dans les cendres sous foyer et les cendres mixtes. Les cendres sous foyer (CF) présentent une teneur en zinc légèrement plus faible que les cendres mixtes (CM). Les cendres sous foyer seules et les cendres mixtes (CF et CM) présentent une teneur en zinc plus faible que les cendres multicycloniques (MCS et MCNS) Les cendres multicycloniques séparées (MCS) présentent une teneur en zinc nettement plus faible que les cendres multicycloniques non séparées (MCNS). A ce stade, il est difficile d'expliquer ces écarts importants entre les cendres MCS et MCNS ; l'hypothèse suivante peut néanmoins être avancées : - Le protocole de prélèvement des cendres multicycloniques non séparées (MCNS) dans le cadre de l'étude, qui pourrait avoir une conséquence sur la formation de cendres plus riches en éléments traces métalliques. (la majorité des sites NS ont dû être aménagés et ont connu des arrêts thermostatiques, pour le prélèvement des MCNS) ; - Cette piste mériterait des analyses complémentaires pour être confirmées.	

3.3.4.2.2. Chrome

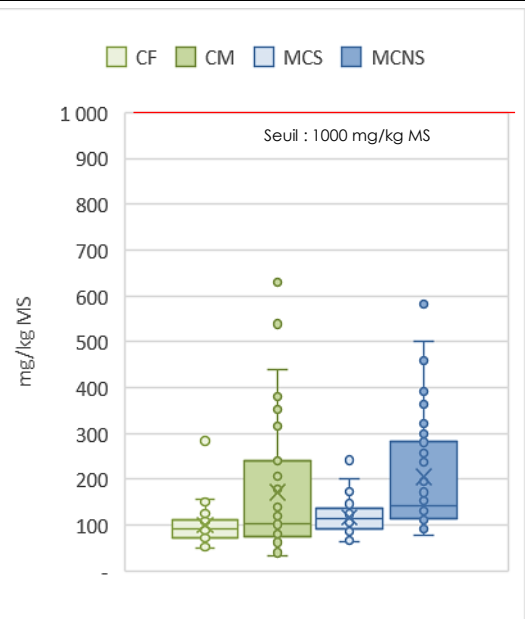
Une fiche plus détaillée figure en annexe 8.

ETM – Oligo-éléments	Chrome
Seuils réglementaire et normatifs	
Les exigences en termes de qualité des « produits » au regard de la réglementation et des normes sont :	
- Arrêté du 3 août 2018 (rubrique 2910 – combustion) :	1 000 mg/kg MS
- Norme NFU 42-001 (engrais) :	120 mg/kg MS
- Norme NFU 44 203 (amendements minéraux basiques/engrais) :	
. Sauf amendements calciques phosphatés	120 mg/kg MS
. Pour amendements calciques phosphatés sidérurgiques	1 200 mg/kg MS
Composition des cendres par installation et par type de cendres	

ETM – Oligo-éléments	Chrome
 Information analytique : - Limite de quantification (LQ) : 5 mg/kgMS - Incertitude sur la mesure : 15 %	Situation par rapport au seuil de la réglementation L'ensemble des cendres (CF, CM et MC) montrent des teneurs en chrome bien en deçà du seuil réglementaire d'épandage (arrêté du 3 août 2018) de 1 000 mg/kg MS et du seuil de la norme concernant les amendements calciques phosphatés sidérurgiques (NFU 44-203) de 1 200 mg/kg MS Points à retenir En moyenne, les cendres sous-foyer seules (CF) sont légèrement moins chargées en chrome que les cendres sous-foyer et sous-multicyclone (CM) et les cendres multicycloniques (MC). A noter que les trois types de cendres présentent des valeurs du 95ème percentile du même ordre de grandeur et comprises entre 200 et 220 mg/kg MS (voir annexe 8).

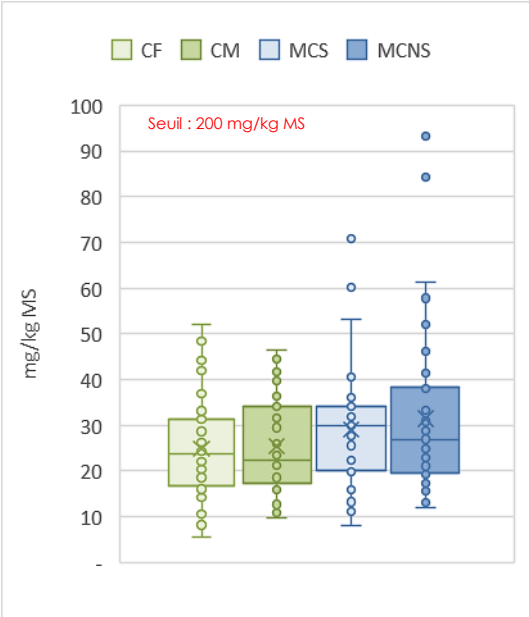
3.3.4.2.3. Cuivre

Une fiche plus détaillée figure en annexe 8.

ETM – Oligo-éléments	Cuivre
Les exigences en termes de qualité des « produits » au regard de la réglementation et des normes sont : - Arrêté du 3 août 2018 (rubrique 2910 – combustion) : 1 000 mg /kg MS - Norme NFU 42-001 (engrais) : Aucune - Norme NFU 44 203 (amendements minéraux basiques/engrais) : Aucune	
Composition des cendres par installation et par type de cendres	
 Information analytique : - Limite de quantification (LQ) : 5 mg/kgMS - Incertitude sur la mesure : 20 %	Situation par rapport au seuil de la réglementation Aucun dépassement du seuil réglementaire en cuivre (seuil à 1 000 mg/kg MS) n'est observé quel que soit le type de cendres. Points à retenir Toutes les cendres, quel que soit leur type, présentent des teneurs inférieures au seuil réglementaire de l'épandage agricole. En ce qui concerne cuivre, les cendres sous-foyer seules (CF) et les cendres mixtes (CM) présentent des caractéristiques relativement proches, bien que la dispersion des valeurs soit plus importante pour les cendres mixtes (CM) et les cendres multicycloniques non séparées (MCNS). Si les cendres multicycloniques de type MCNS sont plus concentrées en cuivre que les cendres MCS, le maximum est néanmoins observé pour une cendre multicycloniques collectée séparément.

3.3.4.2.4. Nickel

Une fiche plus détaillée figure en annexe 8.

ETM – Oligo-éléments	Nickel
Les exigences en termes de qualité des « produits » au regard de la réglementation et des normes sont : - Arrêté du 3 août 2018 (rubrique 2910 – combustion) : 200 mg /kg MS - Norme NFU 42-001 (engrais) : 200 mg /kg MS - Norme NFU 44-203 (amendements minéraux basiques/engrais) : 120 mg /kg MS	
Composition des cendres par installation et par type de cendres	
 Information analytique : - Limite de quantification (LQ) : 1 mg/kgMS - Incertitude sur la mesure : 10 %	Situation par rapport au seuil de la réglementation L'ensemble des échantillons de cendres respecte le seuil réglementaire en nickel et le seuil de la norme NFU 42-001 (norme engrais), qui est de 200 mg/kg MS. Toutes les analyses de cendres respectent également le seuil de la norme NFU 44-203 fixés à 120 mg/kg MS (amendements minéraux basiques/engrais). Points à retenir Toutes les cendres, quel que soit leur type, présentent des teneurs inférieures au seuil réglementaire de l'épandage agricole et des normes d'application obligatoire pour les engrais et amendements minéraux basiques. Les quatre types de cendres (CF, CM, MCS et MCNS) présentent des concentrations en nickel relativement similaires.

Points à retenir

- Les cendres sous foyers (CF) et les cendres mixtes (CM) **présentent des teneurs en éléments traces métalliques faibles**. Ces cendres respectent très largement les seuils réglementaires de l'épandage en terme d'ETM (à l'exception de quelques échantillons de cendres CM pour le cadmium).
- Les cendres sous foyers (CF) présentent des teneurs en éléments traces métalliques **plus faibles** que les cendres mixtes (CM).
- Les cendres multicycloniques contiennent **globalement plus d'ETM** que les cendres sous-foyer et mixtes (CF et CM), en particulier au niveau du plomb, du zinc et du cadmium (notamment de par leur mode de formation)
- Les cendres multicycloniques séparées (MCS) présentent une **teneur en ETM nettement plus faible** que les cendres multicycloniques non séparées (MCNS), en particulier au niveau du plomb, du zinc et du cadmium.
Les teneurs plus élevées peuvent provenir de l'impact du mode de prélèvement des cendres MCNS ou de la qualité des combustibles (néanmoins la corrélation directe entre combustible et cendres n'a pu être vérifiée dans le cadre de l'étude)

3.3.5. Composés traces organiques (CTO)

Lors de la combustion, la dégradation de la matière organique aboutit à la synthèse de molécules organiques plus ou moins complexes. L'importance de la production de ces molécules dépend aussi de la nature du combustible, la présence de PCP, de chlore, de fluor ou de brome pouvant aboutir à la synthèse de dioxines/furanes.

Le niveau de températures atteints dans le foyer entraîne cependant leur dégradation. Les perturbations de la combustion, quelle que soit leur nature, peuvent être à l'origine d'une oxydation incomplète de ces molécules, que l'on retrouve notamment dans les cendres sous foyer et/ou les cendres multicycloniques.

Les composés traces organiques ou polluants organiques persistants présentés ci-dessous ont été analysés dans les quatre types de cendres :

- Les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP):
 - Fluoranthène,
 - benzo(b)fluoranthène,
 - benzo(a)pyrene.
- Les polychlorobiphényles (PCB 028, 052, 101, 118, 138, 153, 180),
- Les dioxines et furanes.

Les fiches techniques présentées ci-après synthétisent la composition des cendres et tentent d'apporter une explication aux écarts constatés.

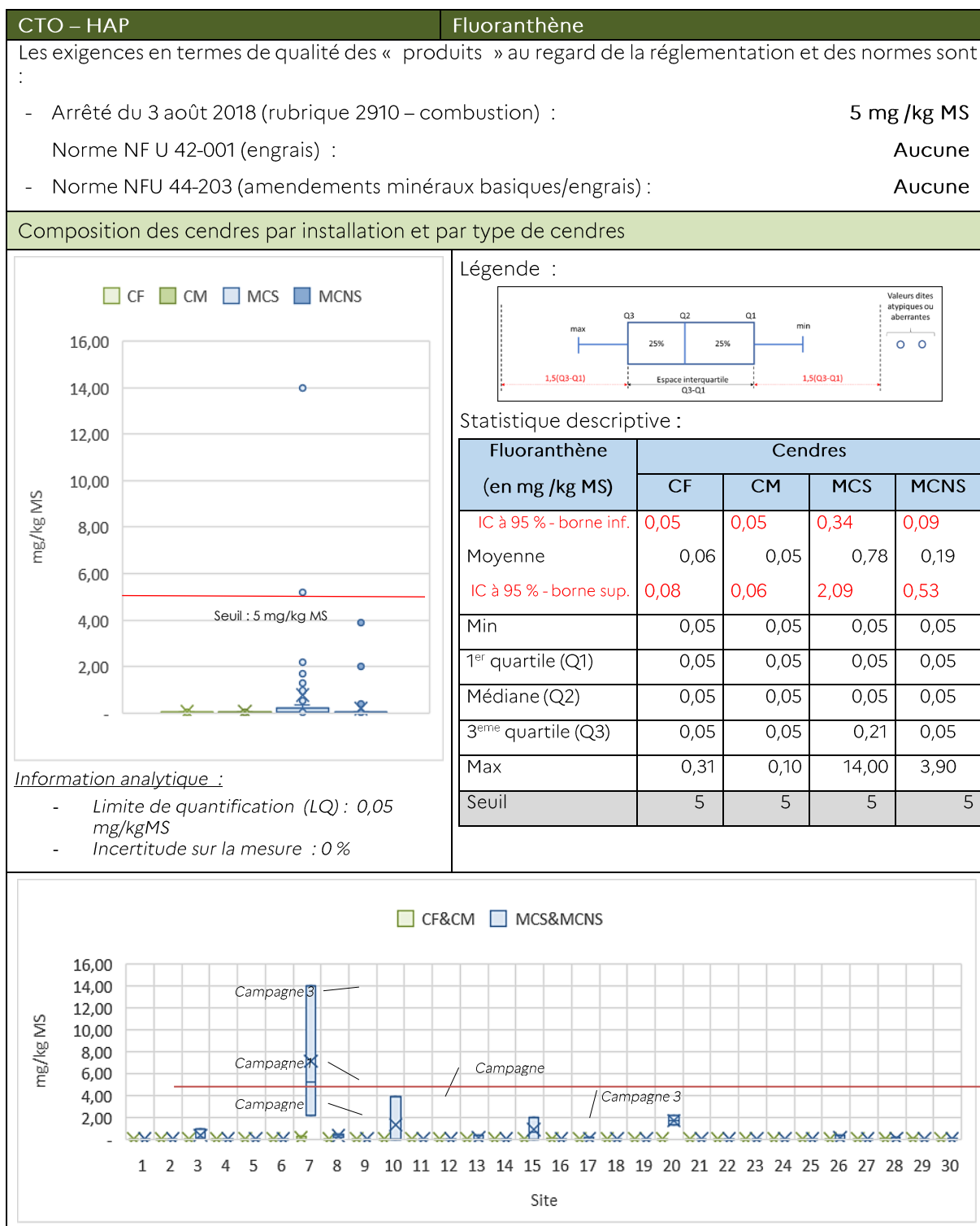
En préambule, les caractéristiques des principaux composés traces organiques, en termes d'origine, de mobilité, de toxicité et d'utilité sont synthétisées dans le tableau suivant.

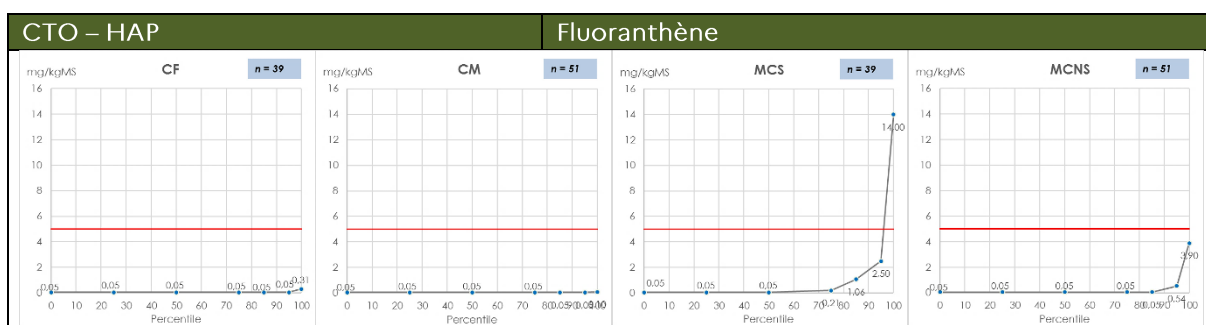
Paramètres	Origine	Mobilité dans les sols et la plante	Besoins/toxicité pour l'homme et l'animal	Utilité pour le sol et les plantes	Références
CTO					
PCB	- Anthropique : fabrication de produits chimiques (lubrifiants), transformateurs électriques, fluides caloporteurs...	Sol : Stable, faible capacité à se dégrader	Homme et animaux : Toxique / cancérigène de groupe 1, ingestion via l'alimentation.		CITEPA, 2017a
HAP	- Naturelle : Feux de forêts et éruptions volcaniques - Anthropique : émissions des cheminées, incinérateurs d'ordures ménagères, gaz d'échappement, unités de production de goudrons, etc...				INERIS, 2005a INERIS, 2005b INRS 2007
Dioxines	- Naturelle : Feux de forêts et éruptions volcaniques - Anthropique : émissions des cheminées, incinérateurs d'ordures ménagères, chaînes d'agglomération de minerais en sidérurgie ...	Plante : Faible capacité de transfert dans les tissus végétaux via les racines. Exception : les cucurbitacées peuvent absorber les dioxines à partir du sol. La principale contamination est le dépôt atmosphérique.	Homme et animaux : Accumulation dans les graisses animales (élément liposoluble)		CITEPA, 2017b AFSSA, 2005 Alexander et al. (INSERM), 2000 Et références y contenues.

Tableau 14. Origine, mobilité, toxicité et utilité des éléments traces métalliques et des composés traces organiques présents dans les cendres

3.3.5.1. Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

3.3.5.1.1. Fluoranthène





Situation par rapport au seuil de la réglementation

Les cendres sous-foyer (CF et CM) respectent le seuil réglementaire de 5 mg/kg MS fixé dans l'arrêté du 3 août 2018.

Seulement deux échantillons de cendres multicycloniques MCS sont au-dessus de ce seuil ; ils appartiennent au site 7.

Points à retenir

En majorité, les cendres sous-foyer (CF et CM) et multicycloniques (MCS et MCNS) présentent des concentrations en fluoranthène très faibles et sous la limite de quantification, à l'exception de quelques échantillons de cendres multicycloniques de Sites S (Sites 3, 7, 10, 15 et 20) ; sachant que seules 2 valeurs sur 90 sont en dépassement concernant un seul site (n° 15).

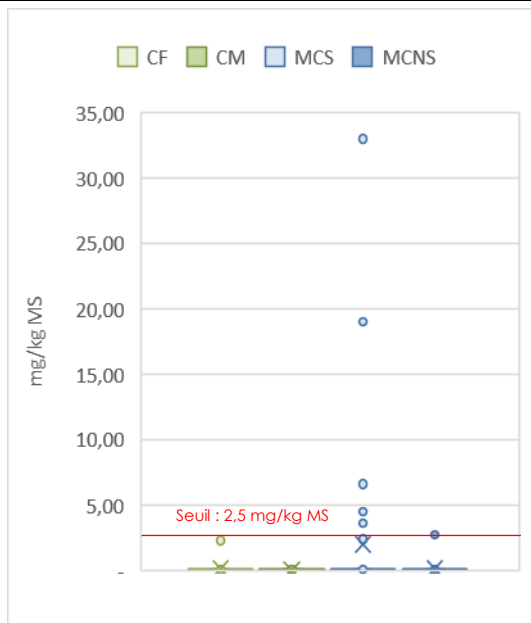
La présence de HAP dans les cendres n'est pas corrélée avec la composition des combustibles (teneur en HAP en dessous de la limite de quantification, excepté pour le site n° 15).

Les teneurs élevées peuvent être liées à :

- Une présence de HAP dans les combustibles, ce qui est le cas du Site 15 (néanmoins aucune corrélation HAP/combustibles pour les autres sites). Une combustion complète devrait en toute rigueur permettre de dégrader ces molécules organiques ;
- Une difficulté rencontrée au cours de la combustion. Les hypothèses suivantes peuvent être formulées, notamment à la lumière des métadonnées relevés sur les sites et d'observations relatives à la conception de la chaufferie :
 - Sur le Site n° 7, le schéma hydraulique relevé n'apparaît pas optimisé, conduisant à un fonctionnement de la chaudière biomasse de façon très intermittente et à allure réduite sur une grande partie de l'année. La chaudière doit sans doute fonctionner en-dessous de son minimum technique, ce qui peut être à l'origine d'une combustion incomplète (sur-ventilation du foyer, zones froides, température de combustion insuffisamment élevée...) ;
 - Le Site n° 15 a fonctionné au contraire avec un excès d'air élevé durant la 3e campagne de prélèvements (taux d'oxygène supérieur à 11 % dans les fumées) ayant pu générer des zones froides dans le foyer et une combustion incomplète.

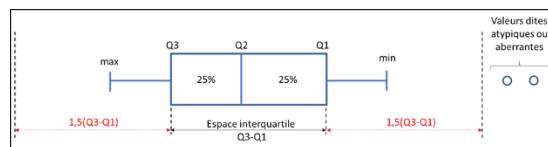
3.3.5.1.2. Benzo(b)Fluoranthène

CTO – HAP	Benzo(b)Fluoranthène
Les exigences en termes de qualité des « produits » au regard de la réglementation et des normes sont :	
- Arrêté du 3 août 2018 (rubrique 2910 – combustion) :	2,5 mg/kg MS
- Norme NF U 42-001 (engrais) :	Aucune
- Norme NFU 44-203 (amendements minéraux basiques/engrais) :	Aucune
Composition des cendres par installation et par type de cendres	

Information analytique :

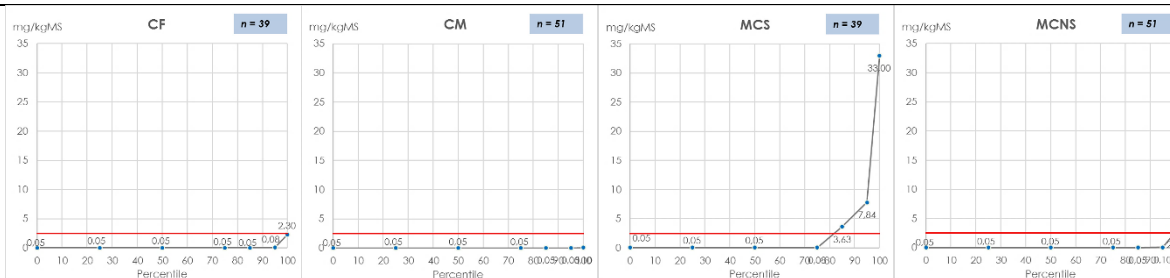
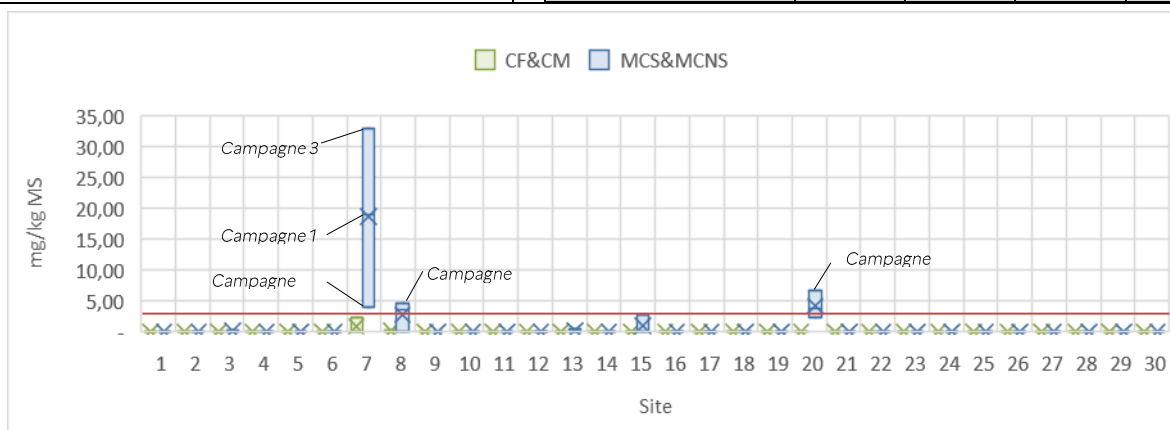
- Limite de quantification (LQ) : 0,05 mg/kgMS
- Incertitude sur la mesure : 0 %

Légende :



Statistique descriptive :

Benzo(b)fluoranthène (en mg /kg MS)	Cendres			
	CF	CM	MCS	MCNS
IC à 95 % - borne inf.	0,05	0,05	0,75	0,05
Moyenne	0,11	0,05	2,02	0,11
IC à 95 % - borne sup.	0,36	0,05	5,12	0,31
Min	0,05	0,05	0,05	0,05
1 ^{er} quartile (Q1)	0,05	0,05	0,05	0,05
Médiane (Q2)	0,05	0,05	0,05	0,05
3 ^{ème} quartile (Q3)	0,05	0,05	0,08	0,05
Max	2,30	0,10	33,00	2,70
Seuil	2,5	2,5	2,5	2,5

**Situation par rapport au seuil de la réglementation**

Les cendres sous-foyer respectent le seuil réglementaire de 2,5 mg/kg MS fixé dans l'arrêté du 3 août 2018.

On dénombre 7 échantillons de cendres multicycloniques, en particulier les MCS, au-dessus de ce seuil (Sites 7, 8 et 20).

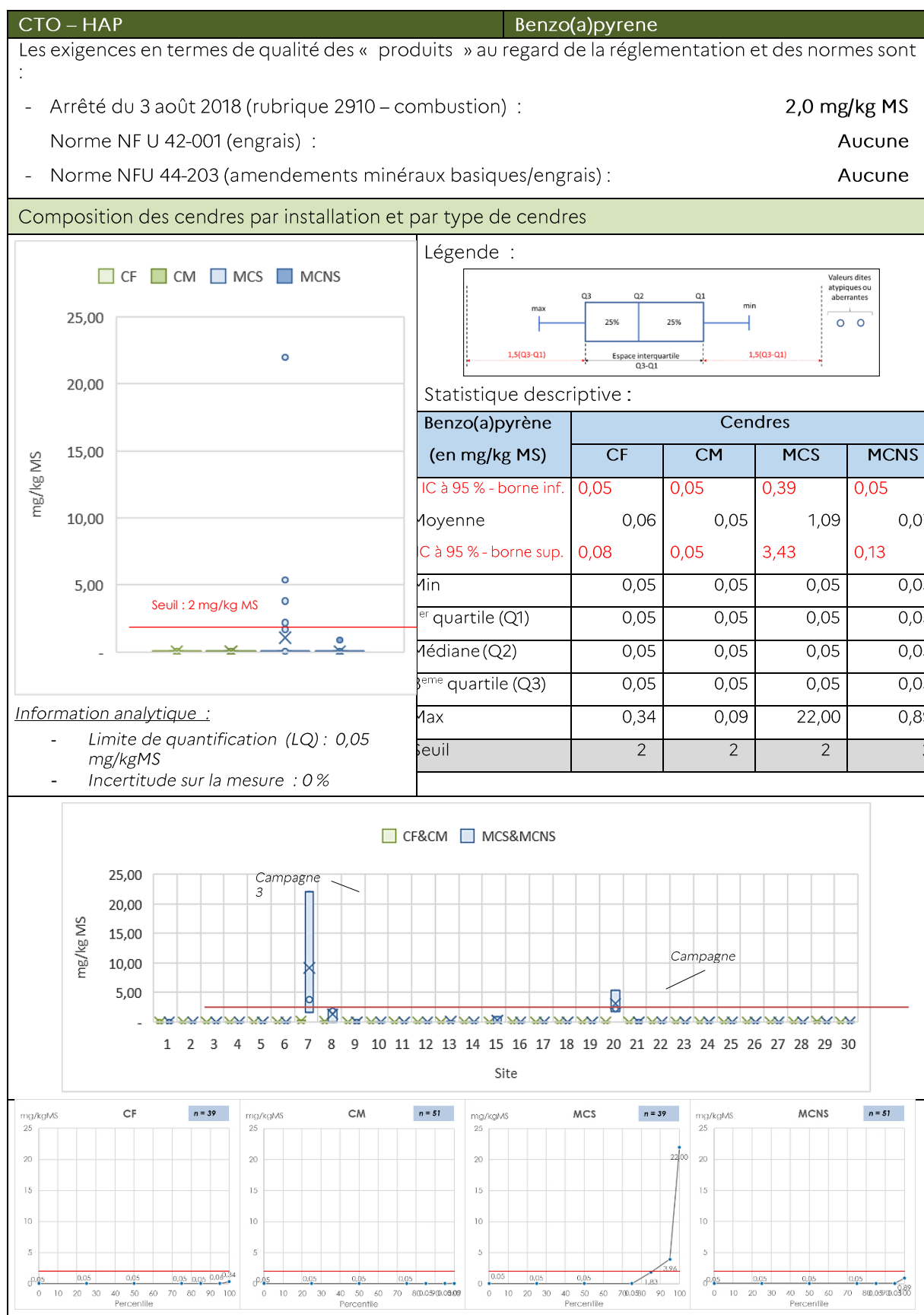
Points à retenir

Les cendres sous-foyer et mixtes (CF et CM) et les cendres multicycloniques (MCNS, et hormis le site n° 15) présentent des concentrations en benzo(a)fluoranthène très faibles et sous la limite de quantification. Quelques échantillons de cendres MCS des sites n° 7, n° 8 et n° 20 présentent des concentrations supérieures.

Comme pour le fluoranthène, les teneurs plus élevées sont sans doute liées à un problème de combustion

CTO – HAP	Benzo(b)Fluoranthène
principalement sur un site, n° 7 (cf. fiche fluoranthène).	

3.3.5.1.3. Benzo(a)pyrene



Situation par rapport au seuil de la réglementation

Les cendres sous-foyer (CF) et les cendres mixtes (CM) respectent le seuil réglementaire de 2 mg/kg MS. Comme pour les autres HAP, 5 échantillons de cendres multicycloniques MCS sont au-dessus de ce seuil (sites n° 7, n° 8 et n° 20).

Points à retenir

En majorité, les cendres sous-foyer et mixtes (CF et CM) et multicycloniques (MCS et MCNS) présentent des concentrations en benzo(a)pyrène très faibles et sous la limite de quantification, à l'exception de quelques échantillons de cendres MCS (sites n°7, n° 20 et dans une moindre mesure le n° 8)) issue d'installations pouvant être confrontées à un problème de combustion plus ou moins ponctuel (cf. fiche fluoranthène).

3.3.5.2. Polychlorobiphényles (PCB)

Quel que soit le type de cendres, les teneurs en PCB sont quasi-nulles et sous la limite de quantification (0.01mg/kg MS). Ce composé trace organique ne pose donc pas de problème dans le cadre d'une valorisation agricole des cendres de chaufferies biomasse.

Au regard du seuil réglementaire en PCB (somme des 7) dans les cendres, fixé à 0,8 mg/kg MS, toutes les valeurs obtenues sont bien inférieures à ce seuil (voir annexe 8).

3.3.5.3. Dioxines et furanes (PCDD/F)

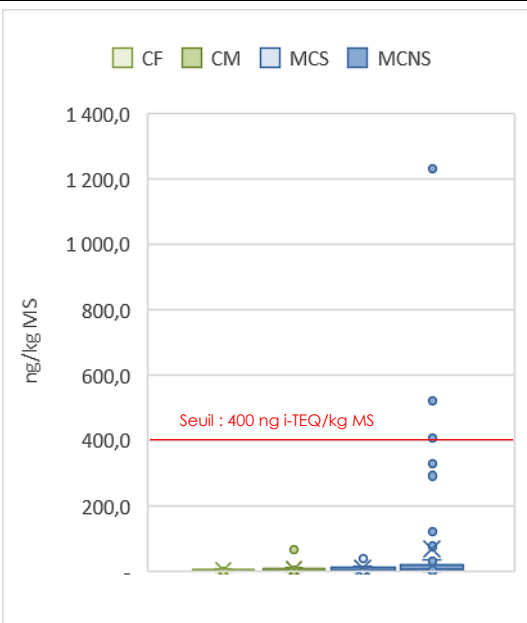
Les exigences en termes de qualité des « produits » au regard de la réglementation et des normes sont :

- Arrêté du 3 août 2018 (rubrique 2910 – combustion) :
- Norme NF U 42-001 (engrais) :
- Norme NFU 44-203 (amendements minéraux basiques/engrais)

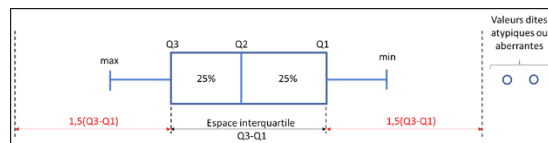
Aucune

Aucune

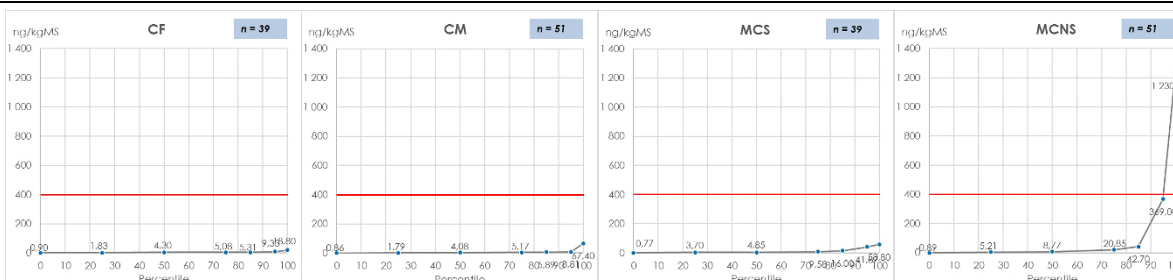
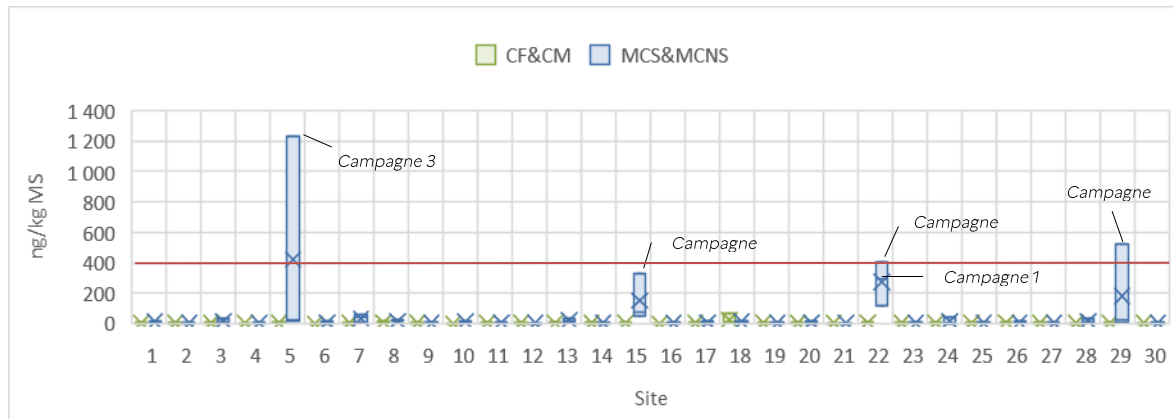
Aucune

Composition des cendres par installation et par type de cendres**Information analytique :**

- Limite de quantification (LQ) : /
- Incertitude sur la mesure : /

Légende :**Statistique descriptive :**

Dioxines/Furanes (en ng I-TEQ/kg MS)	Cendres			
	CF	CM	MCS	MCNS
IC à 95 % - borne inf.	3,56	3,68	6,93	31,25
Moyenne	4,30	5,10	10,10	67,95
IC à 95 % - borne sup.	5,71	10,31	15,65	160,44
Min	0,90	0,86	0,77	0,89
1 ^{er} quartile (Q1)	1,83	1,79	3,70	5,21
Médiane (Q2)	4,30	4,08	4,85	8,77
3 ^{ème} quartile (Q3)	5,08	5,17	9,58	20,85
Max	18,80	67,40	58,80	1 230,00
Seuil	/	/	/	/



Situation par rapport au seuil de la réglementation

Il n'existe pas de seuil réglementaire dans l'arrêté du 3 août 2018 concernant les teneurs en dioxines et en furanes dans les cendres sous foyer (des réflexions sont néanmoins en cours pour la mise en place d'un seuil réglementaire)

En ce qui concerne la combustion de déchets de bois répondant à la définition au b(v) de la biomasse à l'article 2 de l'arrêté du 3 août 2018 relatif aux prescriptions générales applicables installation relevant du régime de l'enregistrement, les cendres volantes doivent respecter le seuil de 400 ng i-TEQ/kg MS ; 3 échantillons de cendres MCNS sur 90 tout type de cendres confondues, ne respectent pas ce seuil, avec notamment pour le site n°5 une teneur en dioxines très élevée, de l'ordre de 1230 ng i-TEQ/kg MS.

Points à retenir

Les installations de combustion biomasse présentent des concentrations en dioxines dans les cendres globalement faibles voire inférieure à la limite de quantification, à l'exception des sites n°5, 15, 22 et 29 où des teneurs nettement plus élevées en dioxines ont été observées au niveau des cendres multicycloniques non séparées (MCNS).

Les valeurs les plus élevées sont observées dans les cendres multicycloniques non séparées (MCNS), les teneurs au niveau des cendres multicycloniques séparées (MCS) restent globalement faibles.

Concernant les cendres sous foyer et mixtes (CF et CM) près de 97% des échantillons présentent une teneur inférieure à 10 ng i-TEQ/kg MS (seul 1 échantillon présente une teneur supérieure à 20 ng i-TEQ/kg MS : site 18 « NS » campagne 1 à 67 ng i-TEQ/kg MS).

Corrélation potentielle pour expliquer la présence de dioxines :

- Le protocole de prélèvement des cendres multicycloniques non séparées (MCNS) (arrêt thermostatique de la chaudière pour installer le bac de prélèvement, puis relance de la chaudière pour la production de cendres multicycloniques, risque si température de foyer trop faible de ne pas garantir une combustion satisfaisante et ainsi la destruction thermique des dioxines).
- La qualité du combustible (dans le cadre de l'étude la corrélation directe entre combustible et cendres n'a pu être vérifiée). La présence de chlore et PCP par exemple peuvent expliquer la présence de dioxines (sans lien direct avec la campagne).

Points à retenir

- 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'O₂ dans les fumées excessives ou trop basses, température de foyer trop basse...).
- Les cendres sous foyer (CF), mixtes (CM) 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.

3.4.Relation entre la composition des cendres, le combustible, les caractéristiques des chaufferies et les paramètres de fonctionnement de l'installation

3.4.1. Influence de la nature des combustibles

Les analyses effectuées démontrent la bonne qualité globale des combustibles bois.

Bien que 90 échantillons de combustible bois aient été analysés, il n'a pas été possible d'établir une relation statistique solide entre la composition des combustibles bois et la qualité des cendres. Il semble important de rappeler que la composition des cendres est nécessairement liée à la composition des combustibles.

Les potentielles relations entre les teneurs en éléments polluants et la nature du combustible bois utilisé ont néanmoins été examinées en se concentrant sur les éléments traces métalliques, et en particulier le cadmium, puisque ce métal constitue le principal facteur limitant du retour au sol des cendres sous foyer et des cendres multicycloniques.

Une tendance globale a pu néanmoins être observée (figure ci-dessous), à savoir une présence de métaux un peu plus importante dans les cendres (on reste néanmoins sur des résultats très proches), lorsque les combustibles sont composés d'un mélange de plusieurs ressources. Les approvisionnements comprenant une proportion élevée d'écorces (plaquettes bocagères, écorces brutes...) et des bois emballage (SSD) augmente la probabilité d'une présence plus élevée d'éléments traces métalliques dans les cendres.

Il est néanmoins important de rappeler que la présence de métaux dans la biomasse (notamment le cadmium) résulte notamment d'un transfert du sol vers le végétal, en particulier vers l'écorce des arbres. Les travaux de l'INRA, notamment au travers du Groupement d'intérêt scientifique sol, ont abouti à l'élaboration d'une série de cartes sur les teneurs en éléments traces métalliques des sols en France. Pour le cadmium par exemple, les sols calcaires ou résultant d'une dégradation d'une couche épaisse de calcaire (sols argileux) contiennent une proportion « assimilable » plus importante.

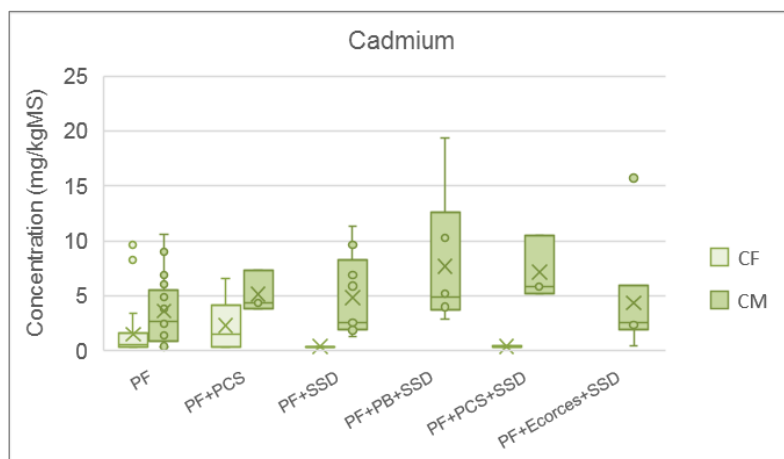


Figure 40 : Concentration en cadmium (en mg/kg MS) dans les cendres sous-foyer (CF et CM) selon la nature du combustible bois utilisé

3.4.2. Incidence de la technologie sur les caractéristiques des cendres

Dans cette approche, on peut mettre en évidence la relation entre les conditions de combustion et les caractéristiques des cendres sous foyer. Hormis un site (Site 27), la technologie des chaudières entrant dans le panel des installations expertisées est constituée de chaudière à grille.

Le mode d'extraction des cendres sous foyer suscite-t-il une composition différente des cendres sous foyer ?

Il est apparu que les taux de cendres étaient identiques, quel que soit le mode d'extraction et/ou de regroupement des cendres sous foyer.

En revanche, une corrélation émerge clairement entre la valeur agronomique des cendres sous foyer et le mode d'extraction. La présence d'un lit d'eau, qui permet de refroidir les cendres, en influence en effet la qualité :

- Les cendres mixtes (CM) comprennent une plus forte proportion d'imbrûlés. L'extraction par voie humide entraîne un refroidissement brusque des cendres, ce qui stoppe instantanément la combustion. À l'opposé, l'extraction par voie sèche permet de conserver à haute température les cendres sous foyer durant quelques minutes, ce qui permet à la matière organique résiduelle de se consumer lentement (des éléments complémentaires apparaissent néanmoins nécessaires pour confirmer cette hypothèse). Les cendres extraites par voie sèche sont ainsi plus « charbonneuses ». À noter cependant que dans les 2 cas, la combustion est optimisée dans le foyer afin de récupérer la chaleur, les imbrûlés résiduels hors foyer et surtout leur combustion doit être limitée afin de limiter le risque de reprise de feu.
- La présence d'eau dilue les éléments minéraux. Or, l'intérêt agronomique d'une matière fertilisante se mesure par sa concentration en éléments nutritifs et neutralisants dans la matière brute. L'extraction par voie humide est à cet égard pénalisante au regard des NFU 42-001 et NFU 44-203 ;
- Certains éléments nutritifs ou neutralisants, et en particulier la chaux (CaO) et la potasse (K₂O), sont pour partie solubles. L'extraction par voie humide semble avoir pour conséquence d'appauvrir de 20 à 30 % selon les cas la valeur agronomique des cendres, mais cette observation mériterait d'être confirmée par des analyses physico-chimiques des eaux de lixiviation des cendres sous foyer.

Des travaux complémentaires pourraient être lancés pour quantifier le niveau de l'appauvrissement des cendres en chaux et en potasse et qualifier les rejets aqueux vers les stations d'épuration urbaines.

La puissance de l'installation a-t-elle une incidence sur la qualité des cendres sous foyer ?

Il serait en revanche très arbitraire d'établir une corrélation entre la puissance des installations et la qualité des cendres. En effet, les chaufferies de plus faible puissance acceptent en effet des combustibles plus homogènes, principalement constitués de plaquettes forestières et/ou de produits connexes de scieries. Les approvisionnements comprenant une proportion plus élevée d'écorces (plaquettes bocajères, écorces brutes...) et des bois d'emballage (SSD) augmentent la probabilité d'une présence plus élevée d'éléments traces métalliques dans les cendres sous foyer.

Les technologies de traitement des fumées ont-elles une influence sur la qualité des cendres ?

Lors des essais, on a pu constater que les durées de prélèvement des cendres multicycloniques dans les installations où celles-ci sont collectées en mélange avec les cendres sous foyer ont sensiblement dépassé les prévisions initiales (durée de prélèvement souvent supérieure à 48 heures, au lieu de 2 à 4 heures).

Ce constat est sans doute lié à des taux de charges différents voire l'évolution de la technologie, les quantités de cendres multicycloniques étant progressivement réduites dans une perspective d'amélioration de l'efficacité du filtre à manches. En effet, les particules les plus grossières et carbonées s'agrégent au « gâteau » filtrant, qui devient de ce fait plus efficace.

Cette tendance mériterait d'être confirmée par des enquêtes auprès de constructeurs à l'échelle nationale et européenne (actualisation de l'état de l'art réalisé à l'initiative de l'ADEME en 2014).

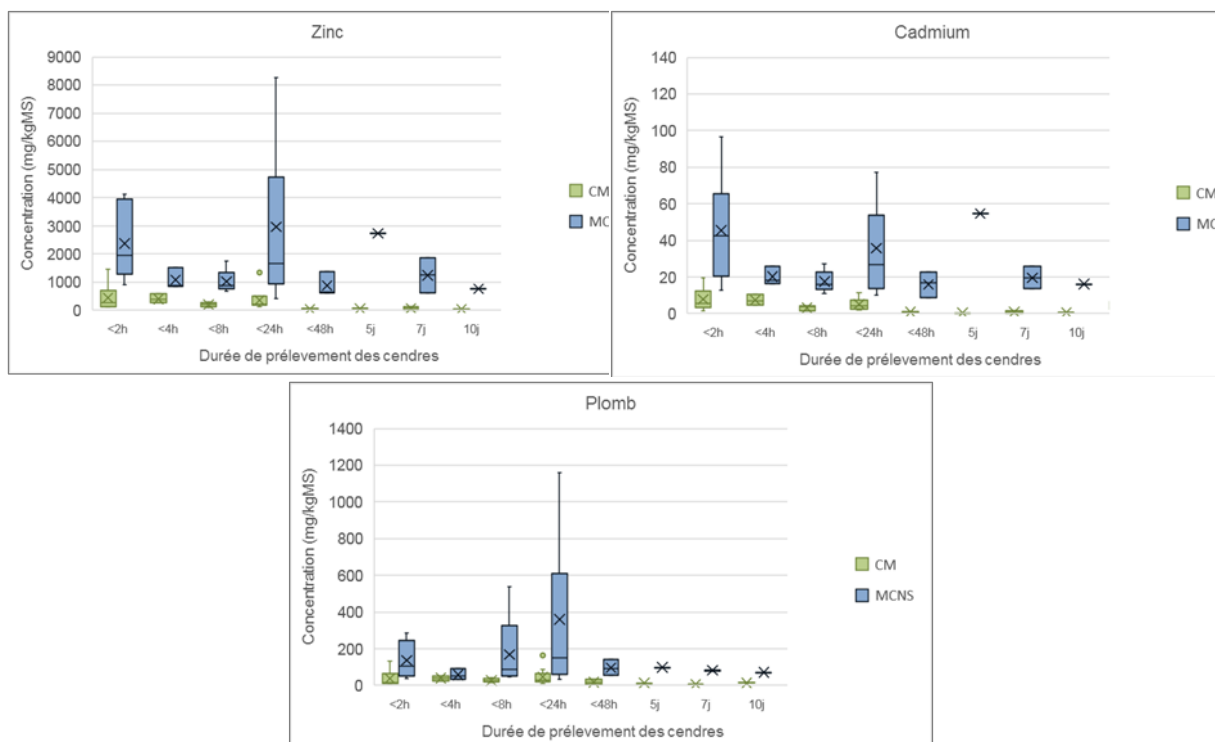


Figure 41 : Concentration en cadmium, plomb et zinc (en mg/kg MS) dans les cendres sous-foyer mixtes (CM) et les cendres multicycloniques (MCNS) selon la durée de prélèvement

Pour le zinc et le cadmium, les graphiques ci-dessus semblent montrer une diminution de la concentration des éléments traces métalliques dans les cendres sous foyer mixte avec l'augmentation de la durée de prélèvement. Avec une longue durée de prélèvement, on collecte a priori des cendres dans de meilleures conditions de combustion et de fonctionnement des chaudières.

3.4.3. Incidence des paramètres de combustion sur les caractéristiques des cendres

Les cendres sous-foyer (CF) les cendres mixtes (CM) présentent des concentrations en HAP très faibles, et le plus souvent, sous la limite de quantification. La présence de HAP, et d'une façon générale de polluants organiques persistants, reste rare sur les installations expertisées.

Cependant, les traces sont décelées dans certains échantillons d'installations, et en particulier dans les cendres multicycloniques.

Il s'agit d'envols de particules imbrûlées captées dans le multicyclone.

La présence de ces particules imbrûlées traduit une combustion incomplète : forte intermittence, fréquence élevée de fonctionnement à allure réduite, zones froides dans le foyer, taux d'oxygène élevé dans les fumées (excès d'air). Le constat sur une des installations est lié à un problème de conception de l'installation (schéma hydraulique à adapter).

3.5. Conformité des cendres

L'objectif est de vérifier que les cendres (CF, CM, MCS) respectent les seuils réglementaires en matière d'épandage.

De plus, pour les sites en collecte séparée, l'exercice a été réalisé de reconstituer des cendres mixtes (CFMC) en tenant compte des taux de cendres sous-foyer et multicycloniques.

3.5.1. Conformité au regard des seuils réglementaires de l'arrête du 3 août 2018

Avant d'être épandues en agriculture, les cendres de chaufferies biomasse doivent, entre autres, respecter les seuils réglementaires de l'épandage fixés par les arrêtés du 3 août 2018 pour les éléments traces métalliques (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Hg) et les composés traces organiques (PCB, HAP).

Le tableau ci-après indique les seuils réglementaires pour chaque élément polluant (mg/kg MS) et les teneurs moyennes, du 95^{ème} percentile et maximales rapportées en % des seuils (base 100) pour chaque type de cendres.

Aide à la lecture :

Cette représentation des données en base 100 permet de repérer plus facilement les dépassements de seuils, qui correspondent aux valeurs supérieures à 100%.

Par exemple, une teneur en cadmium de 5 mg/kg MS équivaut à 50 % du seuil réglementaire qui serait fixé à 10 mg/kg MS.

Les cendres sous foyer (CF) et les cendres mixtes (CM)

En matière de conformité à l'épandage des cendres sous foyer, on constate que

- 100 % des analyses de cendres collectées séparément (CF) sont conformes aux seuils de la réglementation ;
- 88 % des analyses de cendres mixtes (CM) sont également conformes aux seuils de la réglementation. Les cendres produites par les sites non conformes ne peuvent être épandues en agriculture ; elles doivent être évacuées en centre de stockage de déchets non dangereux.

Plus de 50 % des analyses de cendres multicycloniques collectées séparément (MCS) sont conformes au seuil d'épandage en agriculture. Rappelons que la moyenne des analyses s'élève, pour le cadmium, à 11 mg/kg MS et que le 90^{ème} percentile est à 20 mg/kg MS (seuils réglementaires à 10 mg/kg MS)

Les cendres sous foyer reconstituées (CFMC)

La reconstitution des cendres sous foyer reconstitué (CF + MCS) tient compte de la composition des cendres sous foyer et des cendres multicycloniques collectées séparément, d'une part, et de la répartition massique entre ces 2 types de cendres (cf. page 32 – Points à retenir : taux de cendres des Sites S), d'autre part.

Si on excepte le site 7 (pour les HAP), la **totalité des cendres sous foyer reconstituées sont conforme aux seuils réglementaires** en matière d'épandage agricole.

	Seuil réglementaire d'épandage (mg/kgMS)	Teneurs en éléments polluants exprimées en % des seuils d'épandage (en base 100)									
		Cendres sous-foyer (CF)					Cendres multi-cyclones séparées (MCS)				
		Moyenne	95 ^e percentile	Max	Conformité		Moyenne	95 ^e percentile	Max	Conformité	
	Valeurs de la base 100				Nb de Valeurs	Nb de sites				Nb de Valeurs	Nb de sites
Cadmium (Cd)	10	13	39	96	100%	100%	112	242	284	51%	15%
Chrome (Cr)	1 000	7	22	28	100%	100%	7	22	26	100%	100%
Cuivre (Cu)	1 000	10	15	28	100%	100%	12	18	24	100%	100%
Nickel (Ni)	200	12	24	26	100%	100%	15	30	35	100%	100%
Plomb (Pb)	800	3	7	63	100%	100%	7	15	19	100%	100%
Zinc (Zn)	3 000	4	15	33	100%	100%	20	48	58	100%	100%
Mercure (Hg)	10	1	1	1	100%	100%	1	1	2	100%	100%
Benzo(a)pyrène	2	3,0	3,0	17	100%	100%	54	198	1 100	87%	77%
Benzo(b)fluoranthène	2,5	4,5	3,2	92	100%	100%	81	31	1 320	82%	77%
Fluoranthène	5	1,1	1,0	6,2	100%	100%	15,5	50	280	95%	92%
PCB	0,8	1,3	1,3	1,3	100%	100%	1,3	1,3	1,3	100%	100%

Tableau 15 : Conformité des cendres sous-foyer (CF) et multicycloniques (MCS) des sites disposant d'une collecte séparée des cendres au regard des seuils réglementaires d'épandage (exprimés en base 100).

	Seuil réglementaire d'épandage (mg/kgMS)	Teneurs en éléments polluants exprimées en % des seuils d'épandage (en base 100)									
		Cendres mixtes (CM)					Cendres mixtes reconstituées (CFMC)				
		Moyenne	95 ^e percentile	Max	Conformité		Moyenne	95 ^e percentile	Max	Conformité	
	Valeurs de la base 100				Nb de Valeurs	Nb de sites				Nb de Valeurs	Nb de sites
Cadmium (Cd)	10	47	110	194	88%	69%	24	62	90	100%	100%
Chrome (Cr)	1 000	11	20	37	100%	100%	7	22	27	100%	100%
Cuivre (Cu)	1 000	17	49	63	100%	100%	10	15	26	100%	100%
Nickel (Ni)	200	13	22	23	100%	100%	13	24	27	100%	100%
Plomb (Pb)	800	6	19	33	100%	100%	4	7	56	100%	100%
Zinc (Zn)	3 000	11	37	48	100%	100%	6	15	30	100%	100%
Mercure (Hg)	10	1	2	2	100%	100%	1	1	1	100%	100%
Benzo(a)pyrène	2	2,5	2,5	4,5	100%	100%	8,6	24	136	97%	92%
Benzo(b)fluoranthène	2,5	2,0	2,0	4,0	100%	100%	12,9	36	227	97%	92%
Fluoranthène	5	1,0	1,0	2,0	100%	100%	2,7	6,4	36,3	100%	100%
PCB	0,8	1,3	1,3	2,1	100%	100%	1,3	1,3	1,3	100%	100%

Tableau 16 : Conformité des cendres mixtes (CM) et cendres mixtes reconstituées (CFMC) au regard des seuils réglementaires d'épandage (exprimés en base 100).

Points à retenir

- Plus de 93 % des cendres sous-foyer (CF) et mixtes (CM) analysées sont conformes aux seuils réglementaires en matière d'épandage agricole.
- 100% des cendres sous foyer (CF) sont conformes aux seuils réglementaires d'épandage agricole.
- 88% des cendres mixtes (CM) sont conformes aux seuils réglementaires d'épandage agricole. Le seul paramètre présentant des non-conformités est le cadmium.
- 51% des cendres multicycloniques collectées séparément (MCS) sont conformes aux seuils réglementaires d'épandage agricole. Le principal paramètre présentant des non-conformités est le cadmium, et dans une moindre mesure les HAP.
- Il n'existe pas de seuil réglementaire dans l'arrêté du 3 août 2018 concernant les teneurs en dioxines et en furanes dans les cendres, il s'agit néanmoins d'un paramètre important à suivre et à prendre en compte.

3.5.2. Conformité au regard de la norme engrais NFU 42-001

La norme engrais fournit des teneurs minimales à respecter en éléments fertilisants (cf. chapitre introductif), mais également des teneurs maximales à ne pas dépasser en composés polluants. Ces seuils sont plus contraignants que ceux de l'arrêté du 3 août 2018 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations de combustion.

La conformité des cendres est comparée pour chaque type de cendres au regard des exigences de la Norme NFU 42-001 engrais. Le résultat est présenté dans les tableaux synthétiques suivants.

Les cendres sous foyer (CF et CM)

La norme NFU 42 001 comprend deux familles de critères :

- Ceux permettant d'estimer la valeur fertilisante d'un engrais avec des teneurs minimales à respecter pour le phosphore et la potasse :
 - $[P_2O_5] > 2\%$ de la matière brute (20 kg/tonne MB),
 - $[K_2O] > 5\%$ de la matière brute (50 kg/tonne MB),
 - $[P_2O_5] + [K_2O] > 7\%$ de la matière brute (70 kg/tonne MB).
- Ceux permettant d'évaluer son innocuité, pour lesquelles les seuils sont indiqués dans le tableau ci-dessous. À noter que les teneurs en cadmium sont exprimées en mg/kg P_2O_5 .

Les cendres sous foyer (CF)

En ce qui concerne les cendres sous foyer collecté séparément (CF), une proportion importante des analyses dépasse la valeur fertilisante minimale exigée pour le phosphore et la potasse. Près de 44 % des analyses de cendres sous-foyer seules (CF) respectent simultanément les deux teneurs en P_2O_5 et K_2O . En matière d'éléments traces métalliques, le taux des seuils à ne pas dépasser est également élevé lorsque chaque élément est considéré indépendamment : 67 % de conformité. Mais lorsque tous ces critères sont simultanément pris en considération, le nombre d'échantillons conformes est réduit (à 13), ce qui représente seulement 33 % du nombre total d'analyse.

Les cendres mixtes (CM)

En ce qui concerne les cendres mixtes (CM), leur humidité les empêche d'atteindre une concentration suffisante en P_2O_5 et K_2O (la valeur fertilisante étant appréciée **par rapport à la matière brute du produit**) ; néanmoins, quelques analyses respectent les seuils.

Lorsque l'on tient compte cependant des éléments traces métalliques, aucun échantillon ne réunit l'ensemble des conditions de la norme.

Les cendres sous foyer reconstituées (CFMC)

Le regroupement des cendres sous foyer (CF) et des cendres multicycloniques (MCS) a pour conséquence d'enrichir en potasse et en phosphate le produit. Le nombre d'analyses conformes passe à 49 % pour la valeur nutritive.

À l'inverse, le nombre d'analyses conformes au regard des teneurs en éléments traces métalliques et en composés traces organiques descend à 51 %.

Cependant, le regroupement des cendres ne modifie pas le niveau de conformité, toujours à 33 % du nombre total des analyses.

Points à retenir

- **33% des cendres sous foyer (CF)** et des cendres sous foyer reconstituées (CFMC) sont conformes à la norme NFU 42-001.
- En revanche, **aucun échantillon de cendres mixtes (CM)** ne réunit les conditions de la conformité à la norme NFU 42-001.

	Seuil de la norme NFU 42-001	Teneurs en éléments fertilisants (g/kg MB)							
		Cendres sous-foyer (CF)				Cendres mixtes (CM)			
		Moyenne	95 ^e percentil e	Max	Conformité	Moyenne	95 ^e percentil e	Max	Conformité
					Nb de valeurs au-dessus du seuil				Nb de valeurs au-dessus du seuil
K ₂ O	> 5 %MB (eq. > 50 g/kgMB)	62	107	206	56%	37	60	79	22%
P ₂ O ₅	> 2 %MB (eq. > 20 g/kgMB)	20	27	32	56%	15	25	34	20%

	Seuil de la norme NFU 42-001	Teneurs en éléments polluants exprimées en % des seuils de la norme (en base 100)									
		Cendres sous-foyer (CF)					Cendres mixtes (CM)				
	Valeurs de la base 100	Moyenne	95 ^e percentil e	Max	Conformité		Moyenne	95 ^e percentil e	Max	Conformité	
					Nb de Valeurs	Nb de sites				Nb de Valeurs	Nb de sites
Arsenic (As)	< 60 mg/kg MS	9	14	158	97%	92%	14	47	113	98%	94%
Cadmium (Cd)	<90 mg/kgP ₂ O ₅	71	183	778	85%	69%	254	659	861	20%	6%
Chrome (Cr)	< 120 mg/kg MS	49	179	229	85%	77%	91	168	308	69%	35%
Nickel (Ni)	< 120 mg/kg MS	21	40	43	100%	100%	21	37	39	100%	100%
Plomb (Pb)	< 150 mg/kg MS	17	36	333	97%	92%	30	99	177	94%	88%
Mercure (Hg)	< 2 mg/kg MS	5	5	6	100%	100%	5	8	12	100%	100%

Tableau 17 : Conformité des cendres sous-foyer (CF) et des cendres mixtes (CM) au regard des seuils de la norme NFU 42-001 (résultats exprimés en g/kg MB pour les fertilisants et en base 100 pour les ETM)

	Seuil de la norme NFU 42-001	Teneurs en éléments fertilisants (g/kgMB)			
		Cendres mixtes reconstituées (CFMC)			
		Moyenne	95 ^e percentile	Max	Conformité
					Nb de valeurs au-dessus du seuil
K ₂ O	> 5 %MB (eq. > 50 g/kgMB)	65	104	193	64%
P ₂ O ₅	> 2 %MB (eq. > 20 g/kgMB)	20	27	32	56%

	Seuil de la norme NFU 42-001	Teneurs en éléments polluants exprimées en % des seuils de la norme (en base 100)				
		Cendres mixtes reconstituées (CFMC)				
	Valeurs de la base 100	Moyenne	95 ^e percentile	Max	Conformité	
					Nb de Valeurs	Nb de sites
Arsenic (As)	< 60 mg/kg MS	9	15	141	97%	92%
Cadmium (Cd)	<90 mg/kg P ₂ O ₅	123	278	699	62%	31%
Chrome (Cr)	< 120 mg/kg MS	59	180	224	85 %	77%
Nickel (Ni)	< 120 mg/kg MS	21	39	44	100%	100%
Plomb (Pb)	< 150 mg/kg MS	19	36	298	97%	92%
Mercure (Hg)	< 2 mg/kg MS	5	5	6	100%	100%

Tableau 18 : Conformité des cendres sous-foyer reconstituées (CFMC) au regard des seuils de la norme NFU 42-001 (résultats exprimés en base 100)

3.5.3. Evolution des normes « amendements minéraux basiques et engrais »

En ce qui concerne les amendements minéraux basiques, deux normes sont d'application obligatoire :

- La norme NFU 44-001 portant sur les amendements minéraux basiques,
- La norme NFU 44-203 portant sur les amendements minéraux basiques et engrais.

Contrairement à la norme engrais NF U42-001 (engrais), ces 2 normes n'incluent actuellement pas les cendres de biomasse dans la liste des produits autorisés.

La norme NF U44-203 est en cours de révision dans le but d'intégrer les cendres de biomasse, qui ont à la fois un intérêt neutralisant et fertilisant. Cette révision est conduite par le Bureau de Normalisation de la Fertilisation (BN FERTI).

Pour mener à bien ces travaux, le BN FERTI doit caractériser au mieux les cendres biomasse, afin de présenter à l'ANSES un dossier argumenté et robuste. Le BN FERTI manque actuellement d'analyses exhaustives pour les qualifier. Les résultats d'analyses anonymisés obtenus à travers l'étude permettront une avancée importante de ces travaux.

Selon le BN FERTI, 3 catégories de cendres sont envisagées ou 2 s'il y a matière à regrouper les 2 premières :

- 3a : Cendres de bois non traitées sous foyer,
- 3b : Cendres de bois non traitées sous foyer avec récupération de fines multi-cyclone,
- 4 : Cendres issues de sous-produits végétaux d'industrie agro-alimentaire.

La norme distingue deux types d'amendements minéraux basiques – engrais :

- Les matières fertilisantes ayant des caractéristiques mixtes par constitution (classe I) ;
- Les matières fertilisantes ayant des caractéristiques mixtes par mélange (classe II). Ces matières doivent respecter simultanément les exigences concernant les amendements basiques et les engrais.

Les cendres de biomasse relèveraient donc de la classe I.

Dénomination	Teneurs minimales	Valeur neutralisante
Craie phosphatée	35 % CaO total 3 % de P ₂ O ₅ total	35
Amendement calcique phosphaté sidérurgique	35 % (CaO+ MgO) total 3 % de P ₂ O ₅ total	35

Tableau 19 : Principales caractéristiques des matières fertilisantes mixtes par constitution (classe I) (source AFNOR)

Les teneurs en CaO, MgO, P₂O₅ et K₂O des cendres de biomasse sont rappelées ci-après. L'intérêt fertilisant porte principalement sur la potasse.

Types de cendres	%CaO sur brut	%MgO sur brut	%CaO + %MgO sur brut	%K ₂ O sur brut	%P ₂ O ₅ sur brut
Cendres sous foyer (CF)	49,9	3,4	53,3	6,2	2,0
Cendres mixtes (CM)	25,7	2,1	27,8	3,6	1,4

Tableau 20 : Teneur en CaO, MgO, K₂O et P₂O₅ des cendres sous foyer seuls et cendres mixtes

Les seuils maximaux en éléments traces pour les matières de classe I sont rappelées dans le tableau suivant.

Pour le chrome, les seuils ayant été adaptés en fonction de la qualité des produits normalisés, certains amendements calciques présentent en effet des teneurs très élevées. En d'autres termes, la norme s'adapte aux produits (dans une limite cependant raisonnable).

ETM	As	Cd	Cr total		Pb	Hg	Ni
Unité	mg/kg MS	mg/kg P ₂ O ₅	mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS
Valeur limite	60	90	120	1 200	150	2	120

Tableau 21 : Teneur en maximales en éléments traces

Les teneurs en ETM des cendres de biomasse sont rappelées ci-après. Les valeurs limites en métaux par catégories de produit, comme c'est le cas pour la norme NF U44 001, ne concernent que les mélanges (classe 2 de la norme).

Le rapport Cd/P₂O₅ a peu de signification pour les cendres de biomasse car l'intérêt fertilisant porte sur la potasse. Néanmoins, c'est ce ratio qui constituerait le facteur limitant si les seuils devaient rester au niveau actuellement affiché dans la norme.

Type de cendres	As	Cd		Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
	mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg P ₂ O ₅	mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS
CF	5,3	1,3	64	71	100	0,1	25	26	125
CM	6,3	3,6	191	112	165	0,1	26	36	234

Tableau 22 : Teneurs moyennes en éléments-traces des cendres de biomasse « épandables »

Type de cendres	As	Cd		Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
	mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg P ₂ O ₅	mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS
CF	95	9,6	701	275	284	0,1	52	500	995
CM	39	9,6	775	370	631	0,1	47	187	723

Tableau 23 : Teneurs maximales en éléments-traces des cendres de biomasse « épandables »

La norme ne fixe pas de flux maximaux, mais il est probable que le retour au sol des cendres doit respecter les flux maximaux fixés dans la norme NF U44-001 (cf. paragraphe suivant).

La potasse est revendiquée dans les catégories 2 de la norme : les teneurs en potasse minimales sont 3 % ou 6 % selon les catégories de produit.

3.6. Approches comparatives comparaison avec d'autres produits fertilisants

Dans le cadre de la mission, une approche comparative a été engagée avec les MAFOR régulièrement utilisés en agriculture, de l'autre.

Cette comparaison porte principalement sur les teneurs en éléments traces.

Ce paragraphe vise à situer les cendres de biomasse par rapport aux autres produits fertilisants couramment utilisés en agriculture, notamment au regard de la concentration en éléments traces métalliques et en composés traces organiques.

Les épandages sur terres agricoles des matières fertilisantes d'origine résiduaire (MAFOR) issus de l'agriculture, de l'agro-industrie et des collectivités sont multiples. Parmi ces MAFOR, on peut citer :

- Les boues d'épuration,
- Les composts de déchets verts,
- Les composts de biodéchets,
- Les ordures ménagères composées,
- Les lisiers et fumiers (porcins, bovins, ...),
- Les digestats...

A savoir que près de 94% des quantités de MAFOR épandues sont essentiellement agricoles (effluents d'élevage). Mais elles comprennent également les déchets et effluents urbains, tels que les boues d'épuration, les déchets verts, les biodéchets des ménages...

Les cendres des chaufferies biomasse appartiennent à cette catégorie, bien que ces produits ne comportent pas de matières organiques. Néanmoins, elles présentent des caractéristiques comparables en raison de leur richesse en éléments utiles à la plante et au sol.

Approche quantitative

Les **effluents d'élevages récupérables** à l'échelle nationale sont estimés à environ **115 millions de tonnes/an** (Houot & Al, 2014). Parallèlement, les **MAFOR urbaines et industrielles** (boues et effluents urbains et industriels, déchets organiques des collectivités et des industries) représentent actuellement **3,3 millions de tonnes de matière sèche/an** épandues en agriculture, en partie à l'issue d'un prétraitement biologique (compostage, méthanisation).

Les cendres des chaufferies bois appartiennent à la catégorie des MAFOR minérales (au même titre que les écumes sucreries par exemple) ; elles sont caractérisées par une bonne valeur neutralisante (et par une valeur fertilisante intéressante).

À l'échelle nationale, près de 70 % de l'azote utilisé en agriculture provient des MAFOR, 52 % pour le phosphore et 74 % pour la potasse (Programme ESCo, INRA/IRSTEA/CNRS).

Approche qualitative

Les cendres sous foyer de type CF et de type CM présentent une composition relativement comparable aux autres MAFOR.

On pourra noter que :

- Les cendres se caractérisent par une teneur en cadmium plus élevée que les autres MAFOR, en particulier pour les cendres mixtes (3,5 fois plus de Cd que dans les boues de stations d'épuration et 7 fois plus que dans le compost de biodéchets). Les cendres sous foyer ont néanmoins une valeur équivalente en Cd au boues de STEP.
- les cendres ont des valeurs par rapport au composts de biodéchets, moins riches en cuivre, et relativement équivalentes en zinc ou en plomb.
- les cendres ont des valeurs par rapport au lisiers de porc, moins riches en cuivre et zinc, et relativement équivalentes en plomb.
- Les boues d'épuration et les composts de biodéchets contiennent plus de composés organiques traces que les cendres.
-

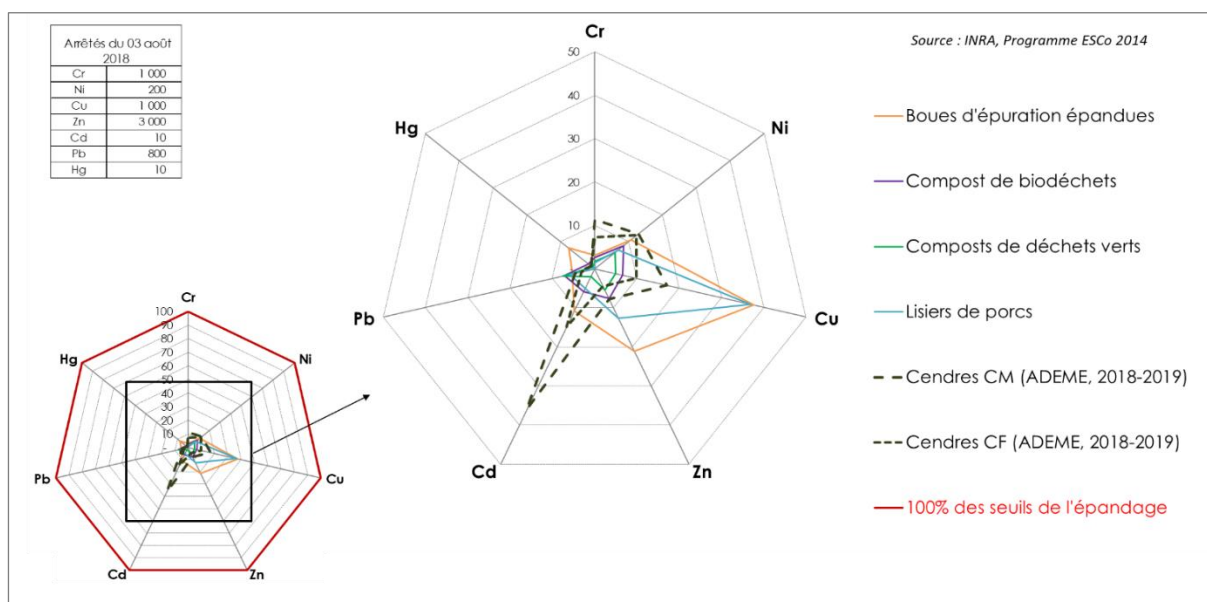


Figure 42 : Comparaison de la composition en ETM des cendres avec d'autres MAFOR (boues, composts de déchets verts et lisiers de porcs) - Valeurs en base 100, calculées à partir des teneurs en mg/kg MS.

Chaque MAFOR présente des caractéristiques physico-chimiques et un pouvoir nutritif ou neutralisant différents. La valorisation agronomique de ces produits dépend de ces caractéristiques et des besoins du sol et de la plante. Chaque produit présente une valeur agronomique, et par voie de conséquence, un intérêt spécifique.

Il en va des quantités utilisées à chaque épandage, d'un côté, et de la fréquence des épandages, de l'autre.

Les cendres ont une valeur neutralisante grâce à la chaux, à la magnésie et à la potasse qu'elles contiennent. Elles constituent à cet égard un amendement basique permettant de redresser le pH d'un sol⁶.

La quantité de potasse qu'elles contiennent, et dans une moindre mesure de phosphore, est également intéressante, et dans l'ensemble supérieure à celles d'autres MAFOR.

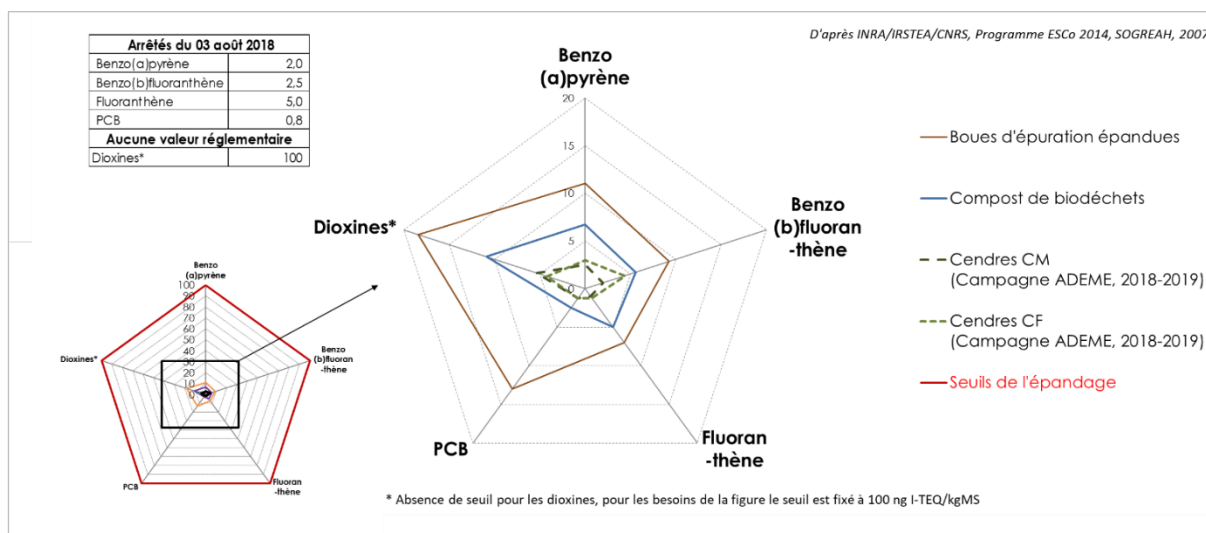


Figure 43 : Comparaison de la composition CTO des cendres avec d'autres MAFOR (boves, composts) - Valeurs en base 100 calculées à partir des teneurs en mg/kg MS, excepté pour les dioxines (ng I-TEQ/kgMS).

3.7. Flux de substances fertilisantes et polluantes : les conditions de l'épandage

Les épandages compensent les besoins des sols et l'exportation par la plante des substances neutralisantes et fertilisantes contenus dans les cendres. L'agriculteur doit tenir compte de ces apports dans le bilan des fumures et veiller à ne pas enrichir de façon inconsidérée les sols en éléments traces métalliques.

3.7.1. Rappel des contraintes agronomiques et réglementaires

En milieu agricole, les apports sont définis en fonction des besoins des sols et de la culture :

- Les amendements basiques nourrissent les sols (CaO et MgO) ;
- Les éléments minéraux nourrissent la plante (P₂O₅ et K₂O).

Ils sont également fonction du comportement des substances apportées (solubilité, disponibilité).

Le facteur limitant pour les cendres est le plus souvent la chaux, et plus rarement, la potasse.

Toutefois, la dose à épandre devra respecter les préconisations de la DREAL en matière d'apports en base (CaO).

Afin de pouvoir être épandues, les cendres de chaufferies biomasse doivent respecter des seuils réglementaires en matière de retour au sol (cf. chapitre sur le plan d'épandage).

⁶ L'acidification des sols cultivés est un phénomène naturel, qui s'accélère en sol filtrant et sous climat pluvieux, du fait de la minéralisation des matières organiques, la nitrification de l'azote ammoniacal (urée et engrais ammoniacal, lisiers...), la perte de cations par lessivage ou par les récoltes (calcium, magnésium) et remplacés par des protons (H⁺) responsables de l'acidification.

Les flux de substances fertilisantes et polluantes apportés aux sols par les cendres ont été calculés pour les différents types de cendres :

- Cendres sous foyer seules (CF),
- Cendres mixtes (CM).

3.7.2. Calcul de la dose à épandre

Dans le cadre d'un plan d'épandage la dose à épandre est estimée en tenant compte des besoins de la plante et des sols et des caractéristiques physico-chimiques des cendres.

La dose d'apport est déterminée en fonction :

- du type de culture et d'un objectif réaliste de rendement ;
 - des besoins des cultures en éléments fertilisants disponibles majeurs et secondaires, en oligo-éléments, tous apports confondus ;
 - des teneurs en éléments ou substances indésirables des déchets ou effluents à épandre ;
 - de l'état hydrique du sol ;
 - de la fréquence des apports sur une même année ou à l'échelle d'une succession de cultures sur plusieurs années ;
 - des apports « autres » (engrais minéraux, compost...),
- des teneurs en éléments fertilisants dans le sol et dans les cendres et dans les autres apports.

La dose maximale autorisée par l'arrêté du 3 août 2018 ne doit pas dépasser **30 t de matière sèche par hectare sur 10 ans**.

3.7.2.1. Justification des doses d'apport

Dans un plan de fertilisation, il faut dans un premier temps établir le besoin du sol et des cultures.

Dans un second temps le plan de fumure pourra être dressé à partir de la composition des cendres.

Besoins des sols

Afin de compenser l'acidification des sols, et maintenir une valeur optimale du pH (acidité du sol) pour l'activité biologique, des apports en chaux (CaO) sont nécessaires.

Selon la nature des sols, les besoins varient entre 150 et 350 kg CaO/ha/an. Cette approche permet de compenser l'exportation par la plante et l'assimilation par le sol du calcium apporté.

En kg/ha/an		CaO
Besoin	maximal	150
	minimal	325 (exemple : sols de limon profond) 350 (en système betteravier et luzerne)

Tableau 24 : Besoins en éléments neutralisants des sols

Sur 3 années, on retient l'hypothèse que l'agriculteur doit apporter entre 450 kg à 1 050 kg de CaO selon les besoins et le pH des terres agricoles pour maintenir le pH du sol et compenser les exportations (450 kg CaO) ou pour le redresser (1 050 kg CaO). L'application d'une dose élevée de cendres (de 2 à 4 t/ha) contribue à redresser le pH du sol (effet immédiat) et à réduire la biodisponibilité des éléments traces métalliques ; mais cet effet sera durable si l'apport est répété (chaulage d'entretien), ce qui permet ainsi de lutter contre la ré-acidification des sols. Un épandage régulier de cendres peut donc contribuer durablement à réduire la mobilité des ETM cationiques (cadmium, plomb, cuivre, zinc, nickel), d'autant plus que le pH initial du sol est bas.

Besoins et exportation par les cultures

Les besoins en éléments fertilisants des cultures peuvent fortement varier selon les plantes cultivées. Quelques exemples de besoins de cultures principales sont présentés ci-dessous. Ces besoins varient en fonction du rendement moyen de la culture, un bilan prévisionnel pouvant être transmis par la Chambre d'agriculture chaque année.

Rotation culturale type	Rendement moyen	Besoins et exportation en kg/ha/an	
		P ₂ O ₅	K ₂ O
Blé	75 qx/hectare	83	130
Orge	60 qx/hectare	60	114
Colza	40 qx/hectare	50	40
Maïs ensilage	15 t MS/hectare	63	179

Tableau 25 : Besoins et exportations en éléments fertilisants des principales cultures en terres labourées

En fonction de la succession culturale type (sur 3 ou 4 ans), les besoins en éléments fertilisants vont varier ; ils sont calculés au cas par cas en fonction du rendement attendu et des besoins de la culture. À noter que, contrairement à l'azote, le phosphore et la potasse sont des particules qui se fixeront au complexe organo-minéral du sol s'ils ne sont pas utilisés l'année de l'apport.

À titre d'exemple, les besoins d'une succession culturale composés de Maïs/Maïs/Blé sont presque deux fois plus importants qu'une succession culturale composée de Colza/Blé/Orge. Ces exemples ont été retenus pour prendre volontairement des cas extrêmes, notamment dans la perspective d'évaluer les incidences environnementales de l'épandage des cendres, en particulier en terme d'apports d'ETM.

Succession culturale	Besoins et exportation en kg/ha sur 3 ans	
	P ₂ O ₅	K ₂ O
Colza – blé – orge	193	284
Maïs – maïs – blé	271	556

Tableau 26: Apports nécessaires en éléments fertilisants dans le cas de succession culturale type (kg/ha)

3.7.2.2. Facteur limitant pour déterminer la dose de cendres à épandre

Sur la base de ces informations et des teneurs en éléments fertilisants et neutralisants contenus dans les cendres, le facteur limitant dans le cas de l'épandage de cendres CF ou CM a été estimé.

Types de cendres	Teneurs dans les cendres (kg/t MB)			
	CaO	P ₂ O ₅	K ₂ O	Matière sèche
CF	498	20	62	906
CM	242	14	35	702

Tableau 27 : Teneurs moyennes en CaO, P₂O₅, K₂O d'une tonne de cendres CF et CM

Dans le cas d'un épandage de cendres CF, la dose à épandre est ainsi comprise entre :

- 1,0 et 5,0 t MB/ha pour couvrir les besoins en chaux des sols,
- 5 et 9 t MB/ha pour couvrir les besoins en K₂O des cultures,
- 10 et 13 t MB/ha pour couvrir les besoins en P₂O₅ des cultures.

Dans le cas présent, que ce soit pour les cendres CF ou CM, le facteur limitant pour l'épandage des cendres en agriculture est donc la chaux.

Sauf exception (volonté de redresser le pH ponctuellement d'un sol), l'apport de cendres se situera par exemple entre 1,0 et 2,0 t MB/hectare pour une succession culturale colza/blé/orge d'un sol moyen. Cette

dose pourra s'élever entre 2,0 et 4,0 t MB/hectare pour une même succession culturale si le sol est composé d'un limon profond.

Type de sol	Besoins		Apports de cendres sous foyer (CF)			
	Colza – blé - orge	Maïs – maïs - blé	1,0 t/hectare		2,0 t/hectare	
	Sol moyen	Limon profond	Sol moyen		Limon profond	
	kg	kg	kg	% des besoins	kg	% des besoins
CaO	450	1 050	498	111	996	95
P ₂ O ₅	193	271	20	10	40	15
K ₂ O	284	556	62	22	124	22
Type de sol	Besoins		Apports de cendres mixtes (CM)			
	Colza – blé - orge	Maïs – maïs - blé	2,0 t/hectare		4,0 t/hectare	
	Sol moyen	Limon profond	Sol moyen		Limon profond	
	kg	kg	kg	% des besoins	kg	% des besoins
CaO	450	1 050	484	108	968	92
P ₂ O ₅	193	271	40	21	80	30
K ₂ O	284	556	124	44	248	45

Tableau 28 : Besoins du sol et des cultures sur 3 ans en kg/ha selon les apports de cendres (CF ou CM)

3.7.3. Flux cumulés en substances polluantes

Sur la base des apports de cendres, les flux en substances polluantes sont calculés selon l'équation suivante :

$$\text{Flux ETM} = \text{ETM moy} \times \text{apport théorique}$$

Avec :

Flux ETM (en kg/ha) correspond au flux d'éléments-traces métalliques cumulés sur 10 ans,

ETM moy (en kg/kgMS) correspond à la moyenne pondérée en ETM des cendres,

Apport théorique (en kgMS/ha) correspond à la dose d'apport par hectare sur 10 ans.

Les incidences environnementales sur les sols de l'épandage de sols sur une période de 10 ans

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 ²)	g/m ²	% du seuil	g/m ²	% du seuil
Cadmium	0,015	0,0008	5.3%	0,0041	27.1%
Mercure	0,015	0,0001	0.4%	0,0001	0.6%
Zinc	4,5	0,0711	1.6%	0,2811	6.2%
Chrome	1,5	0,0385	2,6%	0,0935	6,2%
Cuivre	1,5	0,0524	3,5%	0,1512	10,1%
Plomb	1,5	0,0131	0,9%	0,0399	2,7%
Nickel	0,3	0,0131	4,4%	0,0217	7,2%
Zn+Cr+Cu+Ni	6	0,1498	2,5%	0,4939	8,2%
7 principaux PCB	0,0012	5,32E-06	0,4%	8,48E-06	0,7%
Fluoranthène	0,0075	3,19E-05	0,4%	4,24E-05	0,6%
Benzo(b)fluoranthène	0,004	5,86E-05	1,5%	4,24E-05	1,1%
Benzo(a)pyrène	0,003	3,19E-05	1,1%	4,24E-05	1,4%
Dioxines	-	2,24E-09	-	4,50E-09	-

Tableau 29 : Flux cumulés en substances polluantes dans les sols après un apport triennal de cendres CF ou 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'un apport en matière sèche dans des proportions très inférieures à la réglementation (flux maximal de 30 t MS sur 10 années).

En matière de flux d'éléments traces métalliques et composés traces organiques (cumul sur 10 années), 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.

Cas d'école : Estimation de la quantité de cendres maximale admissible

Dans l'exercice suivant, on a calculé la quantité maximale de cendres qu'il est possible d'épandre au regard de la réglementation. Le facteur limitant est déterminé par l'élément présentant la concentration la plus forte dans les cendres sous foyer : dans le cas d'espèce, il s'agit du cadmium.

Pour atteindre le flux cumulé maximal autorisé sur 10 ans pour le cadmium, il faudrait épandre 33 t MB de cendres de type CF et 17,5 t MB de cendres de type CM, soit respectivement 16,5 et 4,4 fois plus que ce qu'autorise un plan de fumure équilibré.

Types de cendres		Cendres CF		Cendres CM	
Apport triennal par ha pendant 10 ans		30 tMS soit 33 tMB		12,3 tMS soit 17,5 tMB	
Substances	Flux cumulé maximal autorisé sur 10 ans (g/m²)	g/m²	% du seuil	g/m²	% du seuil
Cadmium	0,015	0,015	100%	0,015	100%
Mercure	0,015	0,0009	6%	0,0004	2%
Zinc	4,5	1,32	30%	1,03	23%
Chrome	1,5	0,72	48%	0,34	23%
Cuivre	1,5	0,97	64%	0,56	37%
Plomb	1,5	0,24	15%	0,15	10%
Nickel	0,3	0,24	82%	0,08	27%
Zn+Cr+Cu+Ni	6	2,78	45%	1,82	30%
7 principaux PCB	0,0012	0,0001	9%	0,00003	2%
Fluoranthène	0,0075	0,0007	9%	0,0002	2%
Benzo(b)fluoranthène	0,004	0,0012	27%	0,0002	4%
Benzo(a)pyrène	0,003	0,0006	21%	0,0002	5%

Tableau 30 : Flux cumulés en substances polluantes dans les sols après un apport triennal à la dose maximale de cendres autorisée (12 tMB/ha/3ans)

Points à retenir

- Le facteur limitant étant souvent la chaux, les quantités apportées à l'hectare sont faibles : de 2 à 4 t/hectare tous les 3 ans. Les apports par ha sont modestes, notamment en comparaison avec d'autres MAFOR, dont les caractéristiques imposent des doses d'épandage plus conséquentes.
- Les flux d'éléments traces métalliques et composées traces organiques appliqués au sol sur une période de 10 ans sont très inférieures aux limites imposées par la réglementation : 27% du flux maximal pour le cadmium, 10% pour le cuivre, 7% pour le nickel, 6% pour le chrome et le zinc, et environ 1% pour les composés traces organiques

3.8. Bilan national et enjeux du retour au sol

3.8.1. Production de cendres à l'échelle nationale

L'estimation de la production de cendres à l'échelle nationale s'appuie sur les travaux réalisés par le CIBE, qui tient à jour un bilan national des chaufferies par gamme de puissance.

Sur la base des enseignements de l'étude (caractéristiques par gamme de puissance et types de cendres), une extrapolation de la production a été conduite en étroite collaboration avec l'ADEME.

3.8.1.1. Une production globale de 245 000 t MB/an

Les hypothèses

Cette estimation a été conduite en étroite relation avec le CIBE, qui dispose d'une estimation, par catégorie de puissance des chaufferies, du nombre des installations existantes et des consommations de combustible bois.

Catégorie de puissance	Nombre de sites	Puissance installée	Consommations	
		MW	t/an	MWh PCI/an
] 0,05 ; 1]	5 450	1 040	752 000	2 350 000
] 1 ; 2]	400	570	577 000	1 750 000
] 2 ; 4]	350	870	1 020 000	3 000 000
] 4 ; 6]	100	580	787 000	2 320 000
] 6 ; 20 [	190	1 900	2 973 000	8 250 000
] 20 & + [	60	3 700	7 024 000	19 350 000
Total	6 550	8 660	13 133 000	37 020 000

Tableau 31 : Nombre de chaufferies et consommation de biomasse par catégorie de puissance - Source : CIBE

Parallèlement, on a retenu, sur la base des investigations lancées durant la campagne, les taux de cendres suivant pour chaque famille de puissance en distinguant les chaufferies séparant (Site S) et celles ne séparant pas (Site NS) les cendres multicycloniques.

Catégorie s	Site S			Site NS		Total
	Cendres sous foyer	Cendres multicycloniques	Poussières de filtration	Cendres mixtes	Poussières de filtration	
] 0,05 ; 1]	1,24%	0,14%	-	1,38%	-	1,38%
] 1 ; 2]	1,23%	0,15%	0,12%	1,38%	0,12%	1,50%
] 2 ; 4]	1,59%	0,19%	0,16%	1,78%	0,16%	1,94%
] 4 ; 6]	1,59%	0,19%	0,16%	1,78%	0,16%	1,94%
] 6 ; 20 [	1,69%	0,21%	0,17%	1,90%	0,17%	2,07%
] 20 & + [	2,05%	0,25%	0,20%	2,30%	0,20%	2,49%

Tableau 32 : Taux de cendres (% sec/sec) par type de chaufferies et par catégorie de puissance

Le taux de cendres évolue en fonction de la taille de l'installation. Cette évolution dépend de la présence d'un électrofiltre ou d'un filtre à manches, du type de combustibles utilisés et de la performance des systèmes de traitement.

Évaluation des flux

En France, la production de cendres des chaufferies biomasse s'élève chaque année à **près de 245 000 t MB/an** (chiffre arrondi). La production de cendres sous foyer est ultra majoritaire (94 %).

Cette production peut être comparée avec les autres MAFOR, et en particulier les **boues d'épuration** ou les **composts de déchets verts**, dont une grande partie est valorisée en agriculture dans l'Hexagone : respectivement **1,2 million tonnes MS/an** et **2,2 millions tonnes MB/an**. Les flux de cendres sont donc mineurs par rapport aux autres MAFOR.

Les cendres multicycloniques sont en général évacuées en mélange aux poussières de filtration dans des Centres de Stockage de Déchets Dangereux (soit environ 1 500 t MB/an).

Catégories	Cendres sous-foyer (CF + CM) TMB/an	dont Cendres sous cyclone TMB/an	Cendres multicycloniques (MCS) TMB/an	Poussières de filtration TMB/an	Total TMB/an
] 0,05 ; 1]	8 300	300	400	-	8 700
] 1 ; 2]	7 300	600	100	530	7 930
] 2 ; 4]	16 200	1 600	100	1 050	17 350
] 4 ; 6]	12 500	1 000	100	840	13 440
] 6 ; 20[	50 200	4 000	200	3 160	53 560
] 20 & +[	133 800	12 000	600	8 310	142 710
Total	228 300	19 500	1 500	13 890	243 690
	93,7 %	8,0 %	0,6 %	5,7 %	100 %

Tableau 33 : Production annuelle de cendres à l'échelle nationale par catégorie de puissance

3.8.1.2. Une répartition entre cendres sous foyer seul (CF) et cendres mixtes (CM)

La répartition des cendres sous foyer en fonction de leur mode de récupération en chaufferies a fait l'objet d'hypothèses. En première approche, on a considéré que 80 % des installations de moins de 1 MW étaient équipées d'un système de collecte séparée des cendres sous foyer (mais 50% de la production de cendres) et que 5 % seulement des chaufferies de plus de 1 MW séparaient les cendres.

Il en résulte une répartition de la production suivante (poussières de filtration incluses) :

- 5,5 % de la masse de cendres sont produits par des sites (S) séparant les cendres sous-foyer et les cendres multicycloniques, ce qui représente moins de 15 000 t/an ;
- 94,5 % de la masse de cendres sont produits par des sites (NS) ne séparant pas les cendres sous foyer des cendres multicycloniques, soit de l'ordre de 230 000 t/an.

Catégories	Cendres sous-foyer (CF) TMB/an	dont Cendres sous cyclone TMB/an	Cendres multicycloniques (MCS) TMB/an	Poussières de filtration TMB/an	Total TMB/an
] 0,05 ; 1]	3 400		400	-	3 800
] 1 ; 2]	300		100	30	430
] 2 ; 4]	600		100	50	750
] 4 ; 6]	400		100	40	540
] 6 ; 20[	1 800		200	160	2 160
] 20 & +[	4 600		600	410	5 610
Total	11 100		1 500	690	13 290

Tableau 34 : Production annuelle de cendres sur les Sites de type S à l'échelle nationale par catégorie de puissance

Catégories	Cendres sous-foyer (CM) TMB/an	dont Cendres sous cyclone TMB/an	Cendres multicycloniques TMB/an	Poussières de filtration TMB/an	Total TMB/an
] 0,05 ; 1]	4 900	300		-	4 900
] 1 ; 2]	7 000	600		500	7 500
] 2 ; 4]	15 600	1 600		1 000	16 600
] 4 ; 6]	12 100	1 000		800	12 900
] 6 ; 20[	48 400	4 000		3 000	51 400
] 20 & +[	129 200	12 000		7 900	137 100
Total	217 200	19 500		13 200	230 400

Tableau 35 : Production annuelle de cendres sur les Sites de type NS à l'échelle nationale et par catégorie de puissance

3.8.2. Enjeux environnementaux

3.8.2.1. Les éléments traces métalliques

Les flux d'éléments traces métalliques

On cherche ci-après à évaluer l'impact d'un épandage

A l'échelle nationale, les éléments traces contenus dans les cendres des chaufferies biomasse sont estimés à environ 112 t/an, dont :

- 110,3 t/an, soit 98,7 % des flux, sont contenues dans les cendres sous foyer (CF) et les cendres mixtes (CM),
- Un peu plus de 1,4 t/an se retrouve dans les cendres multicycloniques (MCS), dont l'essentiel rejoint les centres de stockage de déchets dangereux (ou, lorsqu'elles sont mélangées aux poussières de filtration, les décharges de déchets dangereux).

Cette estimation s'appuie sur les résultats de la campagne de caractérisation des cendres de 2018/2019.

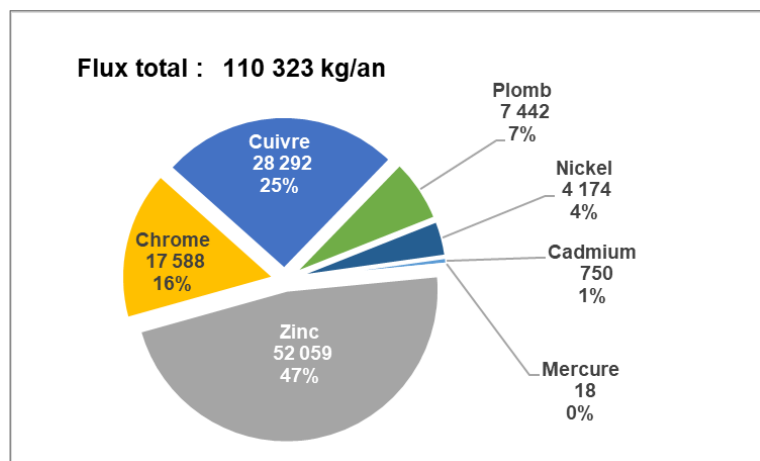


Figure 44 : Évaluation du flux annuel d'éléments traces métalliques contenus dans les cendres des chaufferies biomasse à l'échelle nationale (CF+ CM)

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

Pour évaluer les enjeux environnementaux, la part des cendres mixtes respectant les seuils de l'épandage imposés par l'arrêté du 3 août 2018 a été estimée, au même titre que les quantités d'éléments traces métalliques qu'elles contiennent.

Durant la campagne de caractérisation 2018/2019, 88 % des échantillons des cendres mixtes (CM) sont conformes à un épandage agricole ; par extrapolation, on a retenu l'hypothèse que 88 % des tonnages étaient également conformes, ce qui représente environ 191 000 t MB/an.

Les cendres conformes à un épandage agricole présentent les caractéristiques moyennes suivantes.

Substances	Moyenne de tous les échantillons	Moyenne des échantillons conformes
	(51 analyses)	(45 analyses)
Cadmium (Cd)	4,7	3,6
Chrome (Cr)	108,9	111,6
Cuivre (Cu)	172,4	164,9
Nickel (Ni)	25,4	25,5
Plomb (Pb)	44,9	35,5
Zinc (Zn)	326,6	233,8
Mercurure (Hg)	0,1	0,1

Tableau 36 : Composition moyenne en ETM des cendres mixtes (CM) et des cendres mixtes conformes à un épandage agricole

Alors que le tonnage de matière brute « épandable » est réduit de 12 % (12 % d'échantillons de cendres mixtes (CM) qui ne respectent pas les seuils pour l'épandage), la quantité d'éléments traces métalliques est en moyenne réduite de près de 27 % (passage de 106,6 t à 78,2 t). Pour le cadmium, cette réduction s'élève à près de 35 %, pour le zinc, à plus de 38 % et pour le plomb, à près de 32 %.

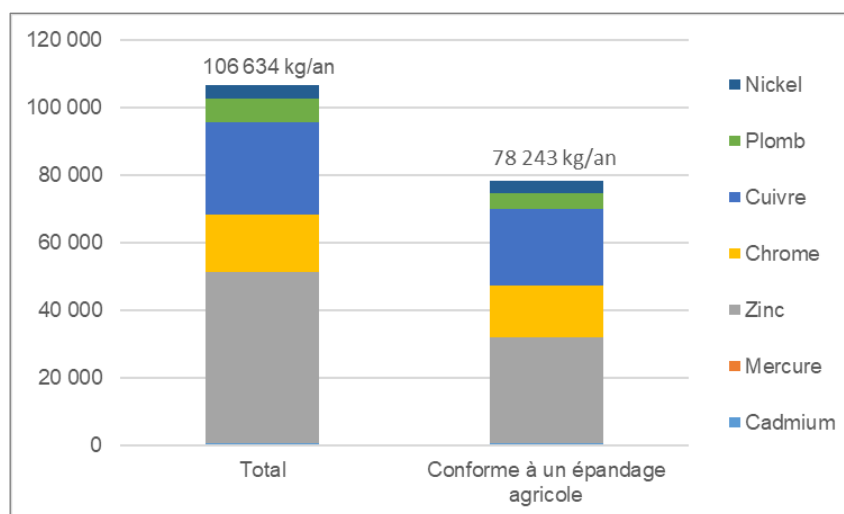


Figure 45 : Flux en ETM des cendres mixtes (CM) conformes à l'épandage

À titre d'exemple et alors que les cendres mixtes contiennent 734 kg de cadmium (217 200 t MB/an) ; 482 kg seulement sont compris dans les cendres respectant les seuils d'épandage de la réglementation en agriculture (191 100 t MB/an).

Incidences sur les sols

Les enjeux environnementaux se présentent sous différents angles. Tout d'abord, ils doivent tenir compte des incidences sur le sol.

Catégories	Cadmium	Mercure	Zinc	Chrome	Cuivre	Plomb	Nickel	Total
	kg/an	kg/an	kg/an	kg/an	kg/an	kg/an	kg/an	kg/an
] 0,05 ; 1]	16	1	1 145	577	837	191	159	2 926
] 1 ; 2]	16	0	1 065	522	773	168	120	2 665
] 2 ; 4]	36	1	2 335	1 143	1 694	369	263	5 842
] 4 ; 6]	28	1	1 817	889	1 318	287	204	4 543
] 6 ; 20[	110	3	7 198	3 523	5 221	1 137	811	18 002
] 20 ; +[	292	8	19 177	9 383	13 909	3 029	2 156	47 955
Total	497	14	32 736	16 037	23 751	5 182	3 714	81 932

Tableau 37 : Quantité totale d'éléments traces métalliques issues des cendres conformes à l'épandage (CF + CM) à l'échelle nationale (kg/an)

Catégorie s	Total des 7 principaux PCB	Fluoranthène	Benzo(b) fluoranthène	Benzo(a) pyrène	Dioxines
	kg/an	kg/an	kg/an	kg/an	g/an
] 0,05 ; 1]	0,06	0,35	0,51	0,35	0,03
] 1 ; 2]	0,05	0,24	0,25	0,24	0,02
] 2 ; 4]	0,10	0,52	0,55	0,52	0,05
] 4 ; 6]	0,08	0,40	0,42	0,40	0,04
] 6 ; 20[	0,32	1,60	1,68	1,60	0,16
] 20 ; +[	0,84	4,25	4,46	4,25	0,43
Total	1,45	7,35	7,87	7,35	0,74

Tableau 38 : Quantité totale des composés traces organiques issues des cendres conformes à l'épandage (CF + CM) produite à l'échelle nationale

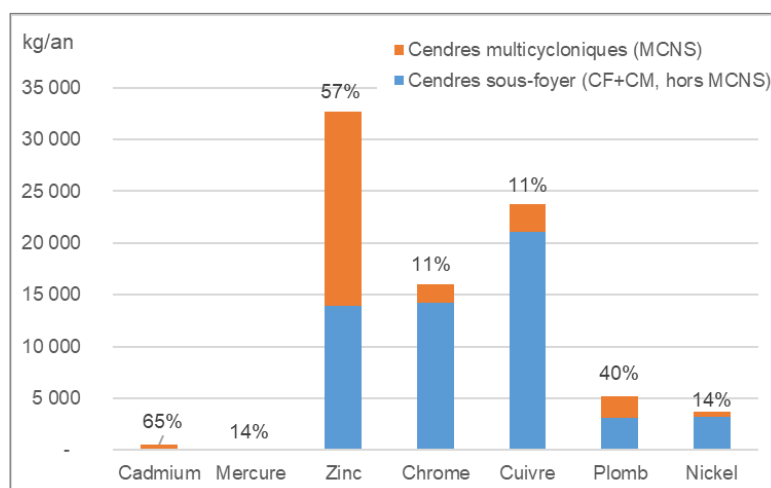


Figure 46 : La répartition des ETM par segment de cendres (CF+CM et MCNS)

Cette approche permet d'estimer le contenu en éléments trace métalliques des cendres sous foyer (CF et CM). Toutefois, il conviendrait de situer les enjeux au regard du stock existant dans les sols, notamment en interrogeant le ministère de l'agriculture (COMIFER) et/ou l'INRA. Une évaluation, qui tient compte des amendements et engrais commerciaux substitués, a néanmoins été entreprise dans le cadre de la présente étude.

Le contenu en éléments traces des amendements et engrais commerciaux substitués

Les cendres des chaufferies biomasse sont utilisées en substitution des engrais et amendements minéraux basiques commerciaux. Or, ces produits, qui résultent d'une exploitation minière de ressources fossiles, contiennent également des éléments traces métalliques. Afin de procéder à un bilan rigoureux, il convient de tenir compte des apports évités en éléments traces métalliques dans l'hypothèse où l'agriculteur recourt à des cendres sous foyer (CF) ou des cendres mixtes (CM).

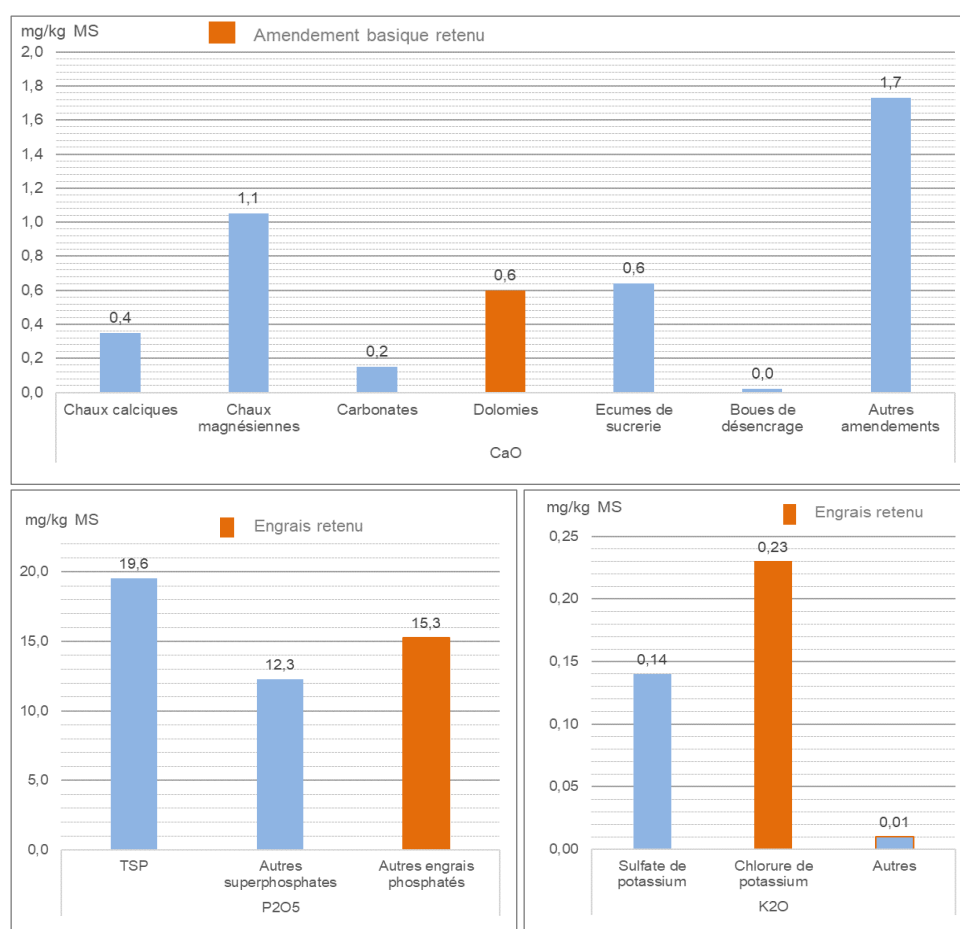


Figure 47 : Concentration en cadmium dans les amendements basiques et engrais du commerce (en mg/kg MS)
TSP : Super phosphate triple

Dans l'approche suivante, on s'est volontairement focalisé sur le cadmium, qui constitue le facteur limitant pour l'épandage en agriculture des cendres mixtes des chaufferies biomasse.

Dans un 1^{er} temps, on a identifié les produits commerciaux les plus utilisés en interrogeant des professionnels agricoles. Trois produits commerciaux les plus couramment utilisés et présentant des caractéristiques agronomiques comparables aux cendres de biomasse ont été retenus : i) la Dolomie (amendements calcique et magnésiens), ii) un super phosphate et iii) un chlorure de potassium.

Dans un 2^{ème} temps, une recherche des teneurs en éléments traces métalliques a été lancée. Il s'avère que les références les plus étoffées figurent dans l'étude confiée par l'ADEME en 2007 à SOGREAH sur les éléments traces métalliques dans les sols agricoles. Cette étude demeure un document de référence ; ses résultats ont été utilisés dans le programme EScO conjoint à l'INRA, au CNRS et à l'IRSTEA en 2014 portant sur la fertilisation à partir des MAFOR et son incidence sur les sols agricoles.

Dans un 3e temps, on définit ci-dessous les quantités de cendres utilisées à l'hectare (4 t MB de cendres mixtes) et des produits équivalents commerciaux.

		Cendres	Equivalent engrais/amendements			
			Dolomie	Chlorure de potassium	Super-phosphate	Total
Dose	kg de MB	4 000				
d'apport	kg de MS	2 877	3 410	241	149	3 800
CaO	kg/ha	1 020	1 020			1 020
MgO	kg/ha	80				pm
K2O	kg/ha	140		140,0		140
P2O5	kg/ha	60			60,0	60
Cd	g/ha	10.3	2.1	0.1	2.3	4.5

D'après ADEME, Étude ETM réalisée par SOGREAH, 2007

Tableau 39 : Les quantités utilisées à l'hectare

Il résulte de cette approche que :

- L'épandage de 4 t de matière brute de cendres mixtes apporte 10,3 g de cadmium par hectare ;
- Pour remplacer l'épandage des cendres, l'agriculteur devra utiliser les **trois types d'engrais/amendements commerciaux** : la dolomie à hauteur de 3,4 t, du chlorure de potassium à hauteur de 241 kg et du super phosphate à hauteur de 149 kg. L'usage de ces produits commerciaux conduira à un **apport de 4,5 g de cadmium** par hectare ;
- L'**apport net supplémentaire** à prendre en considération s'élève donc à **5,8 g par hectare** (5,8 = 10,3 – 4,5).

En d'autres termes, il convient de prendre en considération un apport net supplémentaire en cadmium de **1,45 g/tonne MB de cendres mixtes** (5,8 g/4 t MB) .

Cette approche présente deux limites. La 1^{ère} limite est liée à **l'efficacité des éléments basiques et nutritifs** contenus dans les cendres de biomasse. En effet, des calculs réalisés ci-dessus tiennent compte d'une efficacité à 100 %. Si les éléments tels que la chaux, la magnésie, la potasse ou le phosphore sont peu mobiles, ils ne sont cependant pas entièrement assimilables par la plante ou le sol (au moins l'année de l'apport). Des analyses complémentaires mériteraient à cet égard d'être conduites. La 2^e limite porte sur les autres éléments traces métalliques. L'approche pour le cadmium devra être étendue à l'ensemble des éléments traces métalliques présents dans les cendres de biomasse à comparer avec la teneur des engrais/amendements du marché..

Les apports en ETM des cendres et la comparaison avec les apports à l'échelle nationale

Le poids en éléments traces métalliques des épandages de cendres sous foyer (CF) et de la part valorisable en agriculture des cendres mixtes (CM) ont été évalués dans l'approche suivante. L'apport net en éléments traces métalliques est uniquement pris en considération pour le cadmium ; pour les autres ETM, l'apport brut est retenu.

Comme l'illustrent les graphiques suivants, les **apports sont globalement faibles** et **affectent peu le stock des sols en éléments traces métalliques** et en composés traces organiques. Les travaux de l'INRA (programme EScO) évoquent l'intérêt d'un apport régulier d'amendements calciques, qui est de nature à modifier l'acidité du sol, et par voie de conséquence, à améliorer la capacité d'échange cationique de celui-ci. En outre, Il contribue à réduire la mobilité des ETM cationiques (cadmium, plomb, zinc...). À certains égards, le retour au sol des cendres, bien qu'il contribue à cet enrichissement en éléments traces, peut présenter un avantage environnemental en réduisant la biodisponibilité des sels métalliques pour la plante et le microbiote du sol.

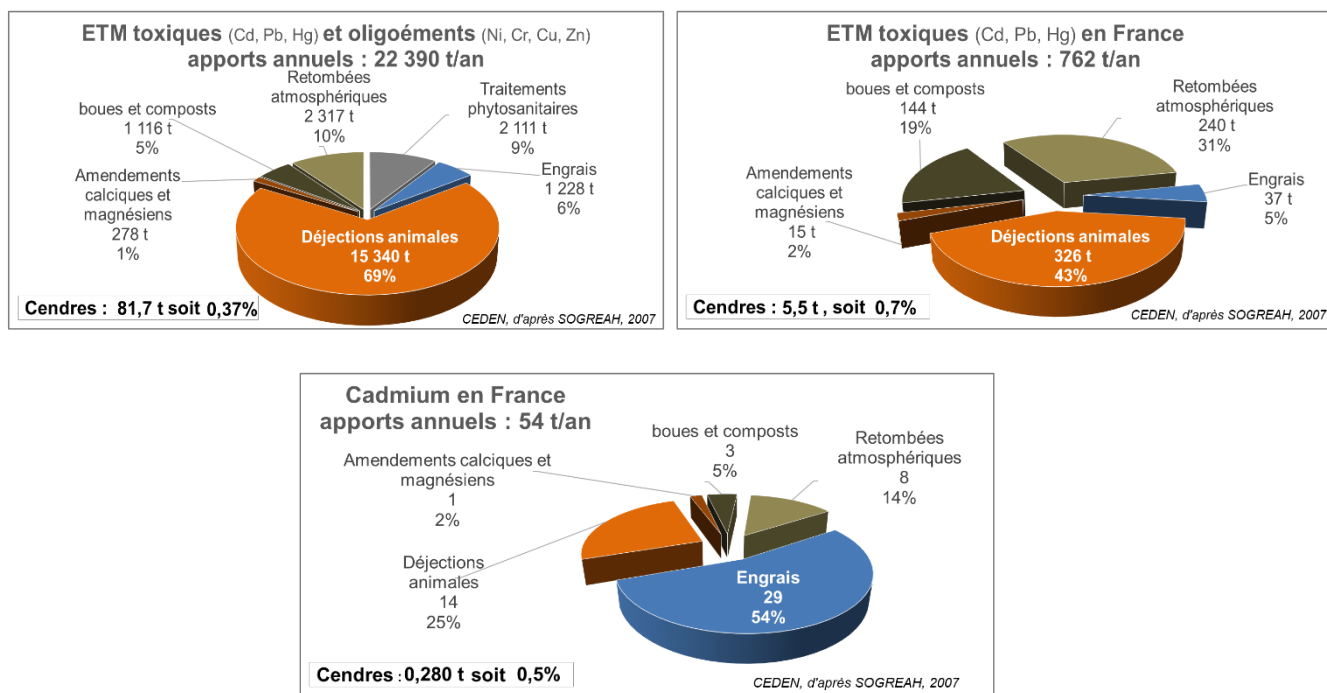


Figure 48 : Les apports en ETM à l'échelle nationale au regard des apports potentiels liés au recyclage agricole des cendres (CF + CM)

Enfin, une remarque mérite d'être formulée : le cadmium issu de la combustion du bois provient 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 ou forestiers). 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 d'un minerai fossile et déstockage des éléments traces du sous-sol, métaux lourds inclus).

3.8.2.2. Les flux d'éléments neutralisants et fertilisants

En tenant un raisonnement identique au chapitre précédent, les quantités d'éléments neutralisants et nutritifs écartés d'un recyclage agricole oscillent entre 10 % (pour le CaO) et 16 % (pour le P₂O₅), ce qui permet, dans cette hypothèse, de valoriser les 191 000 t MB/an de cendres mixtes, auxquelles il convient d'ajouter 11 000 t MB/an de cendres sous foyer.

Les quantités d'éléments fertilisants et neutralisants sont estimées à près de 67 000 tonnes/an contenues dans 202 000 t/an de cendres sous foyer (CF) et de cendres mixtes (CM). L'essentiel est composé de chaux (CaO), et dans une moindre mesure, de potasse (K₂O). Environ 91 % de cette richesse est contenue dans les cendres mixtes.

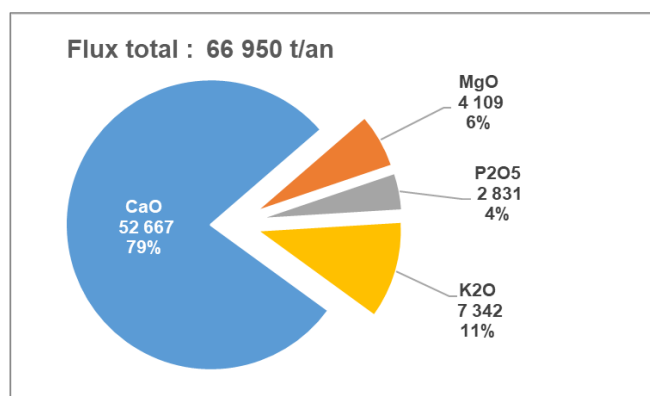


Tableau 40 : Évaluation du flux annuel d'éléments neutralisants et fertilisants contenus dans les cendres des chaufferies biomasse à l'échelle nationale

Du point de vue de l'agriculteur, le recours aux cendres permet de limiter la consommation d'engrais et d'amendements minéraux.

Pour la campagne 2016/2017, l'UNIFA estimait cette consommation à 5 400 000 t. Même si le retour au sol contribue peu à la fertilisation agricole (1 à 2 % des besoins seulement), les cendres permettraient de réduire les achats de l'ordre de 65 000 t/an d'engrais et d'amendements du commerce.

Catégories	CaO	MgO	P2O5	K2O
	Tonnes/an	Tonnes/an	Tonnes/an	Tonnes/an
] 0,05 ; 1]	2 756	200	127	362
] 1 ; 2]	1 669	130	90	233
] 2 ; 4]	3 685	288	199	515
] 4 ; 6]	2 825	221	153	395
] 6 ; 20 [	11 401	893	617	1 594
] 20 ; + [	30 332	2 376	1 644	4 243
Total	52 667	4 109	2 831	7 342

Tableau 41 : Quantité d'éléments fertilisants produite (tonnes/an) à l'échelle nationale

Calculé sur la base de la consommation actuelle de combustible bois, ce chiffre pourrait, dans l'hypothèse d'une mise en œuvre de la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie, s'élever à près de 130 000 t/an si les objectifs fixés par l'État en matière de développement du bois énergie étaient atteints (400 000 t/an de cendres, soit un doublement du nombre d'installations par rapport à la situation actuelle).

Parallèlement, l'épandage d'un peu plus de 200 000 t/an 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.

3.8.2.3. Les conséquences indirectes sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre

Du point de vue des pouvoirs publics, la valorisation agronomique des cendres s'inscrit dans les objectifs législatifs : la **Loi de transition énergétique** pour la croissance verte fixe un **objectif ambitieux en matière de réduction des volumes de déchets à enfouir** et stipule que tout déchet valorisable doit être recyclé. Or, les résultats de la campagne, au même titre que les Centres de recherche les classent parmi les MAFOR, démontrent l'intérêt agronomique des cendres du fait de leur capacité à relever le pH des sols.

En outre, 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 permettrait également de réduire l'intensité énergétique de l'agriculture française. Pour évaluer cette incidence, les hypothèses retenues sont synthétisées dans le tableau suivant.

Éléments	Source	Nom du produit commercial	GES évité (g éq- CO ₂ /kg)
Azote (N)	GEST'IM – ADEME, 2011	Ammonnitrate 33,5%	5,86
Phosphore (P ₂ O ₅)	GEST'IM – ADEME, 2011	Engrais phosphaté moyen	0,57
Potasse (K ₂ O)	GEST'IM – ADEME, 2011	Chlorure de potasse	0,45
Chaux (CaO)	GIEC, 2005	Chaux dolomitique	0,86
Magnésie (MgO)	GIEC, 2005	Chaux dolomitique	0,86

Tableau 42 : Contenu en gaz à effet de serre des engrais et amendements basiques du commerce

Éléments	Source	Nom du produit commercial	TEP/tonne de produit
Azote (N)	GEST'IM – ADEME, 2011	Ammonnitrate 33,5%	1,12
Phosphore (P ₂ O ₅)	GEST'IM – ADEME, 2011	Engrais phosphaté moyen	0,24
Potasse (K ₂ O)	GEST'IM – ADEME, 2011	Chlorure de potasse	0,17
Chaux (CaO)	GIEC, 2005	Chaux dolomitique	0,36
Magnésie (MgO)	GIEC, 2005	Chaux dolomitique	0,36

Tableau 43 : Contenu en énergie des engrais et amendements basiques du commerce

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-CO₂ par an.

Avec le développement du bois énergie prévu dans le cadre de la Programmation pluriannuelle de l'Énergie, les chaufferies biomasse devraient se développer. Sur la base d'un doublement de l'effectif des installations, les retombées environnementales du retour au sol des cendres pourraient se traduire à terme par l'économie indirecte de 46 000 TEP/an et de 110 000 t éq-CO₂/an.

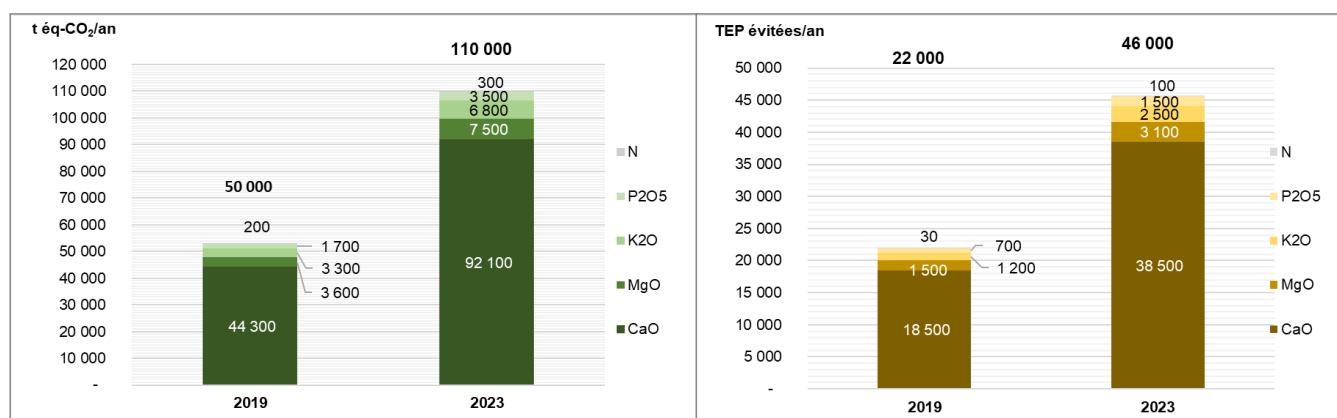


Figure 49 : Impacts environnementaux annuels du recyclage agricole des cendres de chaufferies bois

Points à retenir

- Les flux de cendres sont estimés à 245 000 tonnes MB/an. Un peu plus de 200 000 t/an de cendres pourraient faire l'objet d'un épandage agricole.
- Les enjeux matières sont faibles par rapport aux autres MAFOR produites sur le territoire national.
- Les **épandages de cendres jouent très peu sur le stock d'ETM du sol**. Les apports en ETM liés au retour au sol des cendres sont estimés entre 0,35% et 0,7% des apports actuels, mais des approches complémentaires seraient nécessaires, notamment pour mieux apprécier l'efficacité agronomique des cendres et des apports évités résultant de la substitution des engrais et amendements du commerce.
- Le **cadmium issu de la combustion du bois provient 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 ou forestiers). L'épandage agricole s'inscrit dans le **cycle biogéochimique de la matière**, alors que celui provenant des **engrais et amendements commerciaux contribuent à un enrichissement en éléments traces métalliques des écosystèmes** (exploitation d'un minéral fossile et des éléments traces associés, métaux lourds inclus).

3.8.3. Enjeux financiers du retour au sol des cendres

Les enjeux financiers de la valorisation agronomique des cendres sont abordés selon différents points de vue :

- En premier lieu, celui de l'exploitant de chauffage, qui est soumis au respect des règles en vigueur en matière d'épandage ;
- En second lieu, celui de l'agriculteur, qui peut bénéficier d'un nouvel amendement en remplacement des produits commerciaux.

3.8.3.1. Enjeux pour les exploitants de chauffage

Sous réserve que les cendres respectent les seuils réglementaires, le retour au sol est à ce jour la solution la moins coûteuse pour l'exploitant de chauffage. L'objectif consiste donc à estimer le coût de revient de cette option en évaluant l'impact éventuel des travaux à réaliser pour séparer les cendres multicycloniques (sur des installations neuves ou anciennes). La **situation de référence** correspond à un **épandage de cendres mixtes**.

Rappelons en préambule que les cendres, quelle que soit leur nature, sont assimilées à des déchets non dangereux (codes 10 01 01 et 10 01 03 de la nomenclature des déchets). Toutefois, le caractère pulvérulent des cendres multicycloniques conduirait les exploitants de chauffage à privilégier l'évacuation vers des centres de stockage de déchets dangereux (car les Installations de Stockage des Déchets Non Dangereux ne sont pas habilitées pour traiter des déchets pulvérulents).

Face à la contrainte réglementaire interdisant la gestion en mélange des cendres sous foyer et des cendres multicycloniques, les exploitants disposent de 2 principales options :

- La **réalisation de travaux pour séparer les cendres multicycloniques**, 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 dangereux. Bien que cette voie n'apparaisse pas réaliste, l'approche économique a également été réalisée avec un stockage en décharge de déchets non dangereux ;
- L'**enfouissement en décharge de l'intégralité des sous-produits de la combustion** sans chercher à dissocier les cendres sous foyer et les cendres multicycloniques. Les cendres sous foyer sont plus pondéreuses, et le plus souvent, extraites par voie humide. Le stockage en décharge de déchets non dangereux pose moins de difficultés que les cendres sèches.

Les investissements et le financement

Les coûts unitaires présentés ci-dessous résultent des travaux réalisés par le CIBE en 2017. Ils proviennent de consultations des constructeurs de chaudière biomasse et des exploitants de chauffage.

A l'échelle nationale, le montant des investissements est estimé à **près de 67 millions d'euros** pour aménager les **1 100 chaufferies** de plus de 1 MW concernées.

On a considéré que les chaufferies avaient en moyenne 8 ans et que les travaux seraient amortis sur 12 ans. Pour tenir compte des objectifs de rentabilité des exploitants de chauffage, une rémunération des investissements a été retenue à hauteur de 6,5 %.

Les charges d'exploitation

Les nouvelles charges d'exploitation correspondent à l'enfouissement des déchets. Les coûts unitaires présentés ci-dessous prennent en considération les frais de gestion et charges, notamment de transport des cendres multicycloniques et/ou des cendres sous foyer. Les hypothèses retenues tiennent compte d'une dégressivité de ces charges en fonction de la puissance des installations :

- Centres de stockage de déchets non dangereux : 190 € HT/tonne,
- Centres de stockage de déchets dangereux : de 450 à 530 € HT/tonne.

Le coût de l'épandage a été également estimé sur la base du retour d'expérience de CEDEN ; ce coût prend en considération plusieurs postes :

- L'amortissement de la constitution du plan d'épandage sur une durée de 10 années (1 500 € HT/an) ;
- Les coûts du transport depuis la chaufferie jusque sur le lieu de stockage des cendres (250 € HT/rotation – 6 t/benne évacuée) ;
- Les coûts analytiques (150 € HT/analyse – 1 analyse/200 t et au moins 1/an),
- Le coût de l'épandage (25 € HT/tonne),
- Le coût du suivi (10 € HT/tonne).

Globalement, le coût de l'épandage varie en fonction de la puissance de la chaufferie de 72 à 80 € HT/tonne.

Dans cette approche, l'hypothèse d'une valorisation de 93,3 % des cendres a été retenue (ce qui correspond au pourcentage d'analyses conformes à l'épandage). Le solde est enfoui en centres de stockage de déchets non dangereux.

Le coût global

Le coût global est exprimé en € HT/MWh utile : l'hypothèse de l'approvisionnement énergétique d'un réseau de chaleur a été retenue (rendement de production de 85 % et rendement de distribution de 90 %).

Quatre options ont été examinées :

L'épandage des cendres mixtes (situation de référence) ;

La réalisation de travaux et la conservation de l'épandage agricole des cendres sous-foyer seules avec un enfouissement des cendres multicycloniques :

- en décharge de déchets non dangereux ;
- en décharge de déchets dangereux ;
- L'enfouissement des cendres mixtes en décharge de déchets non dangereux (sans réalisation de travaux).

Un tableau des coûts détaillés figure en annexe (cf. annexe 9).

Il apparaît que la séparation des cendres multicycloniques et des cendres sous foyer aurait une incidence à la hausse du coût de la chaleur pour l'utilisateur :

- Pour les installations entre 1 et 6 MW :
 - L'enfouissement de l'intégralité des cendres apparaît la solution la moins coûteuse, mais il suscite une augmentation de 0,70 à 0,80 €/MWh livré (+80 à +140 % par rapport à la situation de référence d'un épandage de cendres mixtes) ;
 - Le maintien de l'épandage, combiné aux travaux liés à la séparation des cendres multicycloniques et sous-foyer, représente un surcoût de 1,15 à 1,25 euros/MWh livré (+126 à +300 % par rapport à la situation de référence). En effet, l'amortissement des travaux pour de faibles quantités de cendres est particulièrement pénalisant pour les petites installations.
- Pour les installations de plus de 6 MW, le maintien de l'épandage agricole, combiné aux travaux liés à la séparation des cendres multicycloniques et sous-foyer, s'avère plus intéressant, mais il suscite une augmentation de 0,35 à 0,80 €/MWh livré du coût de gestion des cendres (+30 à +85 %).

Si on considère que le coût de revient de la chaleur bois s'élève de 38 à 60 € HT/MWh livré, 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.

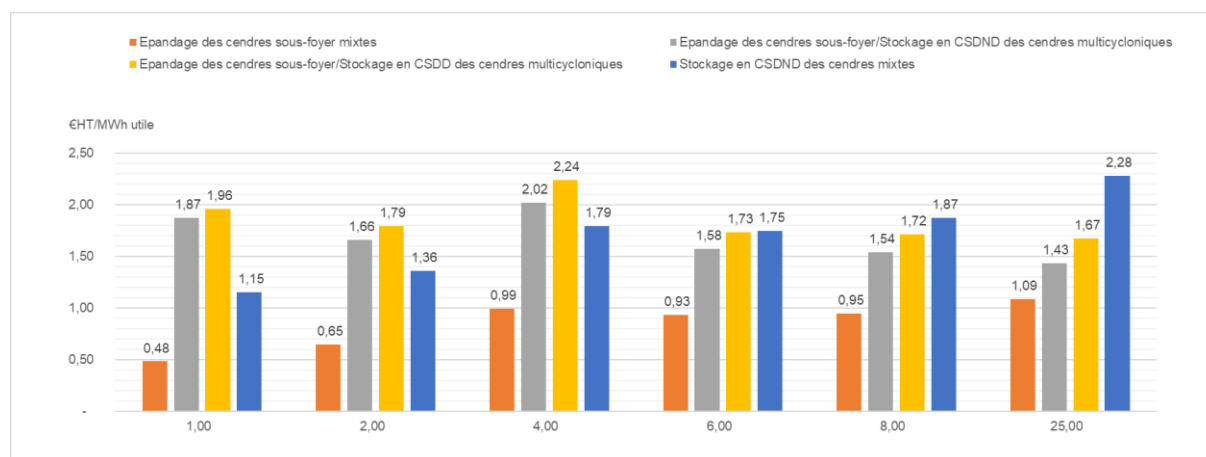


Figure 50 : Évolution du coût global de la séparation des cendres multicycloniques et des cendres sous foyer en fonction de la puissance de l'installation (1 à 25 MW)

3.8.3.2. Enjeux pour la profession agricole

L'exploitant agricole peut jouer un rôle dans la gestion des cendres (stockage, prélèvement, épandage au printemps ou à l'automne) pour un coût complet que l'on peut être estimer entre 15 à 35 €/tonne. Une telle diversification pourrait représenter un chiffre d'affaires à l'échelle nationale de 30 à 40 millions d'euros supplémentaires pour la profession.

Le retour au sol des cendres présente également un avantage indirect pour l'agriculteur. Il permet de procéder à une **économie liée à l'achat de fertilisants et d'amendements du commerce**. Compte tenu de la multiplicité des ressources disponibles sur le territoire (autres MAFOR...), on peut l'évaluer en **première approche de 21 à 44 millions d'euros/an** sur la base des cours actuels des fertilisants et amendements du commerce.

	Composition des cendres	Unité	Valeur économique en €HT		
	kg/tMS	kg de	€HT/kg	€HT en 2019	€HT en 2023
N	0,2	Ammonitrate 33,5%	0,65	18 000	38 000
P2O5	20,6	Engrais phosphaté moyen	0,70	2 074 000	4 314 000
K2O	50,4	Chlorure de potase	0,50	3 625 000	7 541 000
CaO	357,5	Chaux dolomitique	0,22	11 324 000	23 554 000
MgO	29,1	Chaux dolomitique	0,95	3 987 000	8 293 000
Total			146,1	21 000 000	43 700 000
€HT/tonne MB de cendres brutes			104,1	104,0	104,0
€HT/tonne de bois				1,6	1,6

Tableau 44 : Valeur économique du contenu nutritif des cendres de biomasse à l'échelle nationale

Points à retenir

Sous réserve que les cendres respectent les seuils réglementaires, l'épandage agricole des cendres (notamment des cendres mixtes) est la **solution la moins coûteuse pour l'exploitant de chaufferies**.

Les solutions de séparation des cendres multicycloniques et des cendres sous foyer, ou d'enfouissement des cendres mixtes auraient une **incidence à la hausse du coût de la chaleur biomasse** :

- Pour les installations inférieures à 6 MW :
 - L'enfouissement de l'intégralité des cendres apparaît la solution la moins coûteuse, mais il suscite une augmentation de 0,70 à 0,80 €/MWh livré (+80 à +140 %) par rapport à la solution « épandage des cendres mixtes » ;
 - Le maintien de l'épandage (suite à des travaux de séparation) représente un surcoût de 1,15 à 1,25 euros/MWh livré (+126 à +300 %) par rapport à la solution « 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 moins impactant, mais il suscite toutefois une augmentation de 0,35 à 0,80 €/MWh livré du coût de gestion des cendres (+30 à +85 %) par rapport à la solution « épandage des cendres mixtes ».

Le montant des investissements pour aménager (séparation cendres sous foyer et cendres sous multicyclones) le parc existant des chaufferies de plus de 1 MW est estimé à **près de 67 millions d'euros**.

4. Récapitulatif des principaux points à retenir

La campagne de mesure ADEME 2018-2019 réalisée sur 30 chaudières avec des modes de collecte des cendres sous-foyer différents (seules ou en mélange) a permis d'apporter des informations complémentaires sur l'incidence du mode de collecte sur la valeur agronomique et les éléments polluants des cendres.

Point à retenir n°1 – Taux de cendres

Le **taux global de cendres** varie selon les sites entre 0,79 et 3,14 % de la matière sèche du combustible. Il dépend du taux de matière minérale du combustible et de la technologie de combustion et de traitement des fumées.

Les **taux de cendres par type** s'élèvent en moyenne à :

- Taux de **cendres sous-foyer ou mixtes** :
 - Site **NS** (cendres mixtes ou CM) : **1,82 %**,
 - Site **S** (cendres sous foyer ou CF) : **1,78 %**.
- Taux de **cendres multicycloniques** (Site S) : **0,20 à 0,30 %**.
- Taux de **poussières de filtration** (Sites S et Sites NS) : **0,10 à 0,16 %**.

Les répartitions massiques **entre les types de cendres** sont en moyenne les suivantes :

- Pour les Sites **NS** :
 - Cendres mixtes : **92 %**,
 - Poussières de filtration : **8 %**.
- Pour les Sites **S** :
 - Cendres sous-foyer : **82 %**,
 - Cendres multicycloniques : **10 %**,

Point n°2 – Les combustibles bois

Les combustibles respectent très largement les seuils de l'arrêté du 3 août 2018 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations relevant du régime de l'enregistrement (rubrique 2910) (seuils de qualité pour les déchets de bois relevant du b(v) de la définition de biomasse) et les seuils de la procédure SSD pour les bois d'emballage.

Concernant les éléments traces métalliques :

- Le mercure semble absent des combustibles utilisés en chaufferie (teneurs en dessous de la limite de quantification).
- Le plomb et l'arsenic semblent quasi absents des combustibles utilisés en chaufferie (excepté un échantillon présentant une teneur en plomb très élevée, et un échantillon présentant une teneur en arsenic particulièrement élevée)
- Le cadmium est détecté dans 1 analyse sur 3, mais à des teneurs très faibles et au minimum au maximum 5,6 fois inférieures au seuil de l'arrêté du 3 août 2018 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations relevant du régime de l'enregistrement (rubrique 2910) et 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 3 août 2018 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations relevant du régime de l'enregistrement (rubrique 2910) et aux seuils de la procédure SSD pour les bois d'emballage (excepté un échantillon présentant une teneur en zinc particulièrement élevé).

Concernant les composés traces organiques :

- Très peu de combustibles bois contiennent des polluants organiques
- Les combustibles bois contiennent très peu d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (à l'exception d'un nombre réduit d'échantillons).
- Les combustibles bois ne semblent pas contenir de PCB (teneurs en dessous des seuils de quantification).
- Les combustibles bois contiennent très peu de PCP, la plupart des combustibles ne semble pas en contenir (en dessous du seuil de quantification). Une présence a été décelée sur quelques échantillons tout en restant inférieur au seuil de l'arrêté du 3 août 2018 relatif aux prescriptions applicables aux installations relevant du régime de l'enregistrement (rubrique 2910) et à la procédure de SSD pour les bois d'emballages.

Point n°3 – Le fonctionnement des chaufferies durant les prélèvements

Globalement, les sites ont fonctionné dans des conditions normales durant les prélèvements de cendres multicycloniques non séparées, cependant on relève parfois des taux d'O₂ et des températures témoignant d'un impact sur la combustion.

Le taux de charge moyen des installations est satisfaisant.

Le taux d'O₂ apparaît soit relativement faible soit relativement élevé sur un nombre réduit de sites.

L'allongement de la durée de prélèvement des cendres multicycloniques (MCNS) témoigne d'une plus faible proportion de cendres multicycloniques qu'attendu initialement. Il illustre sans doute les démarches de certains constructeurs dans l'optimisation de la combustion et des rejets.

Point n°4 – Paramètres physico-chimiques des cendres

Les cendres sous-foyer CF et les cendres mixtes CM (sous foyer et multicycloniques) présentent des densités similaires.

Les sites, dont les cendres CM (collecte en mélange des cendres sous-foyer et sous-multicyclone) procèdent à une extraction des cendres par voie humide (16/17), alors que les sites bénéficiant d'une collecte de séparée dispose majoritairement d'une l'extraction par voie sèche (9/13).

Le taux de matière minérale est plus élevé dans les cendres CF que dans les cendres CM. L'hypothèse d'un refroidissement des cendres dans l'eau stoppant soudainement la combustion peut être avancée (mais reste néanmoins à confirmer)

Point n°5 – Valeurs agronomiques des cendres

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

- La **valeur neutralisante** des cendres se caractérise par les teneurs élevées en chaux, en magnésie et en potasse :
 - Chaux : 240 à 500 kg CaO/tonne MB,
 - Magnésie : 20 à 40 kg MgO/tonne MB,
 - Potasse : 30 à 75 kg K₂O/tonne MB.
- La **valeur fertilisante** des cendres est évaluée par rapport aux teneurs en potasse et en phosphate des cendres :
 - Potasse : 30 à 75 kg K₂O/tonne MB,
 - Phosphore : 13 à 22 kg P₂O₅/tonne MB.

Des **écarts de composition** ont été identifiés :

- Les écarts observés résultent probablement de la **composition initiale des combustibles bois**.
- On constate des **écarts de composition entre les catégories de cendres** (cendres sous foyer et cendres mixtes). On peut émettre l'hypothèse de l'incidence du **mode d'extraction par voie humide** (pour les secondes) et à la richesse en eau associée (les résultats étant exprimés par rapport à la matière brute).

Les cendres multicycloniques présentent une richesse quasi équivalente aux cendres sous-foyer, voire supérieure dans certains cas.

Point n°6 - Eléments traces métalliques (ETM) des cendres

Les cendres sous foyers (CF) et les cendres mixtes (CM) présentent des teneurs en éléments traces métalliques **faibles**. Ces cendres respectent très largement les seuils réglementaires de l'épandage en terme d'ETM (à l'exception de quelques échantillons de cendres CM pour le cadmium).

Les cendres sous foyers (CF) présentent des teneurs en éléments traces métalliques **plus faibles que les cendres mixtes (CM)**.

Les cendres multicycloniques contiennent globalement **plus d'ETM que les cendres sous-foyer et mixtes** (CF et CM), en particulier au niveau du plomb, du zinc et du cadmium (notamment de par leur mode de formation).

Les cendres multicycloniques séparées (MCS) présentent une **teneur en ETM nettement plus faible que les cendres multicycloniques non séparées (MCNS)**, en particulier au niveau du plomb, du zinc et du cadmium.

Les teneurs plus élevées peuvent provenir de l'impact du mode de prélèvement des cendres MCNS ou de la qualité des combustibles (néanmoins la corrélation directe entre combustible et cendres n'a pu être vérifiée dans le cadre de l'étude)

Point n°7 – Composés traces organiques (CTO) des cendres

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'O₂ 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.

Point n°8 – Respect des seuils d'épandage agricole

Plus de 93 % des cendres sous-foyer (CF) et mixtes (CM) analysées sont conformes aux seuils réglementaires en matière d'épandage agricole.

100% des cendres sous foyer (CF) sont conformes aux seuils réglementaires d'épandage agricole.

88% des cendres mixtes (CM) sont conformes aux seuils réglementaires d'épandage agricole. Le seul paramètre présentant des non-conformités est le cadmium.

51% des cendres multicycloniques collectées séparément (MCS) sont conformes aux seuils réglementaires d'épandage agricole. Le principal paramètre présentant des non-conformités est le cadmium, et dans une moindre mesure les HAP.

Il n'existe pas de seuil réglementaire dans l'arrêté du 3 août 2018 concernant les teneurs en

Point n°9 – Respect des flux de polluants pour l'épandage agricole

Le facteur limitant étant souvent la chaux, les quantités apportées à l'hectare sont faibles : de 1 à 4 t/hectare tous les 3 ans. Les apports par ha sont modestes, notamment en comparaison avec d'autres MAFOR, dont les caractéristiques imposent des doses d'épandage plus conséquentes.

Les flux d'éléments traces métalliques appliqués au sol sur une période de 10 ans sont modestes et très inférieures aux limites imposées par la réglementation : 27% du flux maximal pour le cadmium.

Les épandages compensent les besoins des sols et l'exportation par la plante des substances neutralisantes et fertilisantes contenus dans les cendres. L'agriculteur doit tenir compte de ces

Point n°10 – Flux de cendres et impacts nationaux

Les flux de cendres sont estimés à 245 000 tonnes MB/an. Un peu plus de 200 000 t/an pourrait faire l'objet d'un épandage agricole.

Les enjeux matières sont faibles par rapport aux autres MAFOR produites sur le territoire national.

Les épandages de cendres jouent très peu sur le stock d'ETM du sol. Les apports en ETM liés au retour au sol des cendres sont estimés entre 0,35% et 0,7% des apports actuels, mais des approches complémentaires seraient nécessaires, notamment pour mieux apprécier l'efficacité agronomique des cendres et des apports en évités résultant de la substitution des engrais et amendements du commerce.

Point n°11 – Enjeux économique du retour au sol des cendres

Sous réserve que les cendres respectent les seuils réglementaires, l'épandage agricole des cendres (notamment des cendres mixtes) est la **solution la moins coûteuse pour l'exploitant des chaufferies.**

Les solutions de séparation des cendres multicycloniques et des cendres sous foyer, ou d'enfouissement des cendres mixtes auraient une **incidence à la hausse du coût de la chaleur biomasse :**

- Pour les installations inférieures à 6 MW :
 - L'enfouissement de l'intégralité des cendres apparaît la solution la moins coûteuse, mais il suscite une augmentation de 0,70 à 0,80 €/MWh livré (+80 à +140 % 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 euros/MWh livré (+100 à +300 % 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 plus intéressant, mais il suscite une augmentation de 0,35 à 0,80 €/MWh livré du coût de gestion des cendres (+30 à +85 %).

Le montant des investissements pour aménager (séparation cendres sous foyer et cendres sous multicyclones) le parc existant des chaufferies de plus de 1 MW est estimé à **près de 67 millions d'euros.**

5. Références bibliographiques

1. AFSSA, 2005. Dioxines, furanes et PCB de type dioxine : Evaluation de l'exposition de la population française. 57 p. <https://www.anses.fr/fr/system/files/RCCP-Ra-DioxinesPCB.pdf>
2. ALEXANDER S., et al. 2000. Dioxines dans l'environnement : quels risques pour la santé ? INSERM, 406 p.
3. 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. URL: <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000037284611&categorieLien=id>
4. ATC, 2011. RFTEC n°11 - Fiche résumée toxico ecotoxico-chimique ; 2 p. ; URL : http://www.atctoxicologie.fr/images/Dossier/FRTEC/oxyde_de_calcium_frtec11.pdf
5. BAIZE D. (INRA), 1994. Teneurs totales en métaux lourds dans les sols français, premiers résultats du programme ASPITET. Courrier de l'Environnement de l'INRA n°22, 10p.
6. BAIZE D., PAQUEREAU H. (INRA), 1997. Teneurs totales en éléments traces dans les sols agricoles de Seine-et-Marne. Étude et Gestion des Sols, 4, 2, pages 77 – 94 (16 p.).
7. BEAUGELIN-SEILLER K. et SIMON O. (IRSN), 2004. Fiche radionucléide, Mercure 203 et environnement - <https://www.irsn.fr/FR/Larecherche/publications-documentation/fiches-radionucleides/Pages/Fiches-radionucleides.aspx#.XWzEH0dS9EY>
8. CEDEN, 2019. Dossier cendres de biomasse : Le retour au sol des cendres de biomasse, un accord gagnant-gagnant. Bioénergie International n°58, p.8-21.
9. CITEPA, 2017a. Polluants organiques persistants, Polychlorobiphényles - PCB. Format SECTEN. <https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/polluants/polluants-organiques-persistants/polychlorobiphenyls>
10. CITEPA, 2017b. Polluants organiques persistants, Dioxines et furanes - PCDD-F. Format SECTEN. <https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/polluants/polluants-organiques-persistants/dioxines-et-furanes>
11. CNESST, Fiche Chrome. https://www.csst.qc.ca/prevention/reptox/Pages/fiche-complete.aspx?no_produit=3566
12. CNESST, Fiche Plomb URL : https://www.csst.qc.ca/prevention/reptox/Pages/fiche-complete.aspx?no_produit=4648
13. CNESST, Fiche Zinc - https://www.csst.qc.ca/prevention/reptox/pages/fiche-complete.aspx?no_produit=8771&nom=Zinc
14. CNESST. Fiche Cadmium - http://www.csst.qc.ca/prevention/reptox/pages/fiche-complete.aspx?no_produit=4440
15. CNESST. Fiche Cuivre. https://www.csst.qc.ca/prevention/reptox/Pages/fiche-complete.aspx?no_produit=3558
16. CNESST. Fiche Mercure. https://www.csst.qc.ca/prevention/reptox/pages/fiche-complete.aspx?no_produit=4309
17. ECGC, 1994. Loi Canadienne sur la protection de l'environnement. Liste des substances d'intérêt prioritaire, Rapport d'évaluation. Le Chrome et ses composés. Gouvernement du Canada, Environnement Canada, 72p. https://www.canada.ca/content/dam/hc-sc/migration/hc-sc/ewh-semt/alt_formats/hecs-sesc/pdf/pubs/contaminants/psl1-lsp1/chromium_chrome/chromium_chrome-fra.pdf

18. FERNANDEZ-CORNUDET C., 2006. Devenir du Zn, Pb Cd issus de retombées atmosphériques dans les sols. Thèse de doctorat, INRA, 233p. URL : <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00002321/document>
19. <https://www.ptable.com/?lang=fr>
20. INERIS, 2005. Zinc et ses dérivés. Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, 69p.
21. INERIS, 2005a. Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques – Fluoranthène. 39 p. <https://substances.ineris.fr/fr/substance/getDocument/2789>
22. INERIS, 2005b. Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques – Benzo(b)Fluoranthène. 36 p. <https://substances.ineris.fr/fr/substance/getDocument/2721>
23. INRS 2007. Fiche toxicologique – Benzo[a]pyrène. https://www.cancer-environnement.fr/Portals/0/Documents%20PDF/Rapport/INRS/2007_Fiche%20benzo%20a%20pyrene.pdf
24. INRS, 2012. Fiche toxicologique n° 75 - Zinc et composés minéraux. http://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_75
25. INRS, 2013. Fiche toxicologique n° 294, Cuivre et composés - http://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_294
26. INRS, 2014. Fiche toxicologique n° 55 - Mercure et composés minéraux - http://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_55
27. INRS, 2018. Fiche toxicologique n° 59 - Plomb et composés minéraux, 26 p. URL : http://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_59
28. INRS, 2019 - Fiche toxicologique n° 60 - Cadmium et composés minéraux, http://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_60
29. IRSN, INRS, 2013 - Fiche radionucléide, Chrome 51 et environnement https://www.irsn.fr/FR/professionnels_sante/documentation/Documents/IRSN-fiche_chrome51.pdf
30. ITARD Y. et al. (BRGM), 2003 – Éléments traces métalliques dans les sols : méthodes d'évaluation spatialisée et transferts vers les plantes Zone de La Châtre (Indre), Rapport final, BRGM/RP-52313-FR, 137 p. URL : <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-52313-FR.pdf>
31. KALI AG. Les symptômes de carence en éléments nutritifs. 17p.
32. MARTIN-GARIN A. et SIMON O. (IRSN), 2004. Fiche radionucléide, Cadmium 109 et environnement - <https://www.irsn.fr/FR/Larecherche/publications-documentation/fiches-radionucleides/Pages/Fiches-radionucleides.aspx#.XWzEH0dS9EY>
33. NFU 42-001 : Engrais – Dénominations et spécifications.
34. NFU 44-051 : Amendements organiques - Dénominations, spécifications et marquage.
35. NFU 44-095 : Amendements organiques - Composts contenant des matières d'intérêt agronomique, issues du traitement des eaux.
36. NFU 44-001 : Amendements minéraux basiques.
37. NFU 44-203 : Amendements minéraux basiques et engrais.
38. PERRONO P., 1999. Les micropolluants métalliques et les sols amendés par des boues résiduares urbaines. Mémoire DUESS, DEP, Université Picardie, Amiens. URL : <https://www.u-picardie.fr/beau-champ/duess/perrono/perrono.htm>
39. R Development Core Team (2005). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL: <http://www.R-project.org>.
40. RFTEC n°11 ; Fiche résumée toxico ecotoxico-chimique ; 2 pages ; URL : http://www.atctoxicologie.fr/images/Dossier/RFTEC/oxyde_de_calcium_frtec11.pdf

41. SAUR E. (INRA), 1990. Mise au point bibliographique, au sujet de la nutrition oligo-minérale des plantes supérieures. Carences et toxicités chez les conifères. Annales des sciences forestières, INRA/EDP Sciences, 1990,47 (4), pp.367-389. hal-00882714.
42. TRITZ A., 2014. Oxydation et pyrolyse du dibenzofurane à très faibles concentrations - Application à la réduction des émissions de dioxines. Thèse de doctorat. Université de Lorraine-Laboratoire Réaction et Génie des Procédés. 158 p.
43. UNIFA, 2005. Éléments fertilisants secondaires et oligo-éléments. Parlons fertilisation, 6 p.

6. INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Tableau 1 : Présentation des chaufferies expertisées	16
Tableau 2 : Nombre de sites, puissance bois cumulée (MW) et consommation annuelle bois (mwhpci/an) par catégorie de puissance de chaufferies bois à l'échelle nationale et de la Campagne ADEME-Cendres 2018-2019.	17
Tableau 3 : Planning des campagnes de mesures 2018-2019	21
Tableau 4 : Résumé des analyses réalisées sur le combustible et les cendres.....	23
Tableau 5 : Tonnages de bois réceptionnés et flux de cendres évacuées par site.....	29
Tableau 6 : Taux de cendres (en % de la matière sèche des cendres/matière sèche du combustible).....	33
Tableau 7 : Les teneurs seuils en ETM en fonction des textes.....	38
Tableau 8 : Les teneurs seuils en composés traces organiques en fonction des textes (en mg/kg MS)	42
Tableau 9 : Les teneurs seuils en éléments mineurs en fonction des textes (en % sur masse /)	44
Tableau 10 : Durée de prélèvement des cendres multicycloniques sur les Sites NS par campagne.....	49
Tableau 11 : Masse volumique (g/L) moyenne des cendres.....	52
Tableau 12. Origine, mobilité et utilité des éléments neutralisants et fertilisants présents dans les cendres	58
Tableau 13. Origine, mobilité, toxicité et utilité des éléments traces métalliques et des composés traces organiques présents dans les cendres	66
Tableau 14. Origine, mobilité, toxicité et utilité des éléments traces métalliques et des composés traces organiques présents dans les cendres	78
Tableau 15 : Conformité des cendres sous-foyer (CF) et multicycloniques (MCS) des sites disposant d'une collecte séparée des cendres au regard des seuils réglementaires d'épandage (exprimés en base 100).	89
Tableau 16 : Conformité des cendres mixtes (CM) et cendres mixtes reconstituées (CFMC) au regard des seuils réglementaires d'épandage (exprimés en base 100).....	90
Tableau 17 : Conformité des cendres sous-foyer (CF) et des cendres mixtes (CM) au regard des seuils de la norme NFU 42-001 (résultats exprimés en g/kg MB pour les fertilisants et en base 100 pour les ETM).....	93
Tableau 18 : Conformité des cendres sous-foyer reconstituées (CFMC) au regard des seuils de la norme NFU 42-001 (résultats exprimés en base 100).....	94
Tableau 19 : Principales caractéristiques des matières fertilisantes mixtes par constitution (classe I)(source AFNOR)	95
Tableau 20 : Teneur en cao, mgo, K ₂ O et P ₂ O ₅ des cendres sous foyer seuls et cendres mixtes.....	95
Tableau 21 : Teneur en maximales en éléments traces.....	96
Tableau 22 : Teneurs moyennes en éléments-traces des cendres de biomasse « épandables »	96
Tableau 23 : Teneurs maximales en éléments-traces des cendres de biomasse « épandables ».....	96
Tableau 24 : Besoins en éléments neutralisants des sols.....	99
Tableau 25: Besoins et exportations en éléments fertilisants des principales cultures en terres labourées.....	100
Tableau 26: Apports nécessaires en éléments fertilisants dans le cas de succession culturale type (kg/ha).....	100
Tableau 27 : Teneurs moyennes en cao, P ₂ O ₅ , K ₂ O d'une tonne de cendres CF et CM	100
Tableau 28 : Besoins du sol et des cultures sur 3 ans en kg/ha selon les apports de cendres (CF ou CM)	101
Tableau 29 : Flux cumulés en substances polluantes dans les sols après un apport triennal de cendres CF ou CM sur une période de 10 ans.....	102

Tableau 30 : Flux cumulés en substances polluantes dans les sols après un apport triennal à la dose maximale de cendres autorisée (12 tmb/ha/3ans).....	103
Tableau 31 : Nombre de chaufferies et consommation de biomasse par catégorie de puissance.....	104
Tableau 32 : Taux de cendres (% sec/sec) par type de chaufferies et par catégorie de puissance.....	104
Tableau 33 : Production annuelle de cendres à l'échelle nationale par catégorie de puissance.....	105
Tableau 34 : Production annuelle de cendres sur les Sites de type S à l'échelle nationale par catégorie de puissance.....	105
Tableau 35 : Production annuelle de cendres sur les Sites de type NS à l'échelle nationale et par catégorie de puissance.....	106
Tableau 36 : Composition moyenne en ETM des cendres mixtes (CM) et des cendres mixtes conformes à un épandage agricole.....	107
Tableau 37 : Quantité totale d'éléments traces métalliques issues des cendres conformes à l'épandage (CF + CM) à l'échelle nationale (kg/an).....	108
Tableau 38 : Quantité totale des composés traces organiques issues des cendres conformes à l'épandage (CF + CM) produite à l'échelle nationale	108
Tableau 39 : Les quantités utilisées à l'hectare.....	110
Tableau 40 : Évaluation du flux annuel d'éléments neutralisants et fertilisants contenus dans les cendres des chaufferies biomasse à l'échelle nationale.....	111
Tableau 41 : Quantité d'éléments fertilisants produite (tonnes/an) à l'échelle nationale	112
Tableau 42 : Contenu en gaz à effet de serre des engrais et amendements basiques du commerce.....	112
Tableau 43 : Contenu en énergie des engrais et amendements basiques du commerce.....	113
Tableau 44 : Valeur économique du contenu nutritif des cendres de biomasse à l'échelle nationale	116
Tableau 45 : Exemple de tests paramètres et non-paramétriques selon le type d'analyse souhaitée	187

FIGURES

Figure 1 : Cadre réglementaire de la valorisation agronomique des cendres de bois.....	9
Figure 2 : Résumé du processus de valorisation agronomique des cendres d'une chaufferie biomasse ...	11
Figure 3 : Les différents types de cendres.....	14
Figure 4 : Localisation des sites retenus	16
Figure 5 : Nombre de chaufferies selon le mode de séparation des cendres et par gamme de puissance bois.....	18
Figure 6 : Comparaison de la puissance bois des installations en fonction du type de récolte des cendres séparée/non séparée.....	18
Figure 7 : Nombre de sites équipés par constructeurs de chaudière.....	19
Figure 8 : Résumé du plan d'échantillonnage.....	20
Figure 9 : Illustration d'une boîte à moustache et détection des valeurs atypiques	25
Figure 10 : Exemple de résultats de Bootstrap.....	26
Figure 11 : Relation entre les consommations de bois et les puissances bois et les quantités de cendres sous-foyer produites.....	28
Figure 12 : Humidité (%MB).....	30
Figure 13 : PCI anhydre (matières minérales incluses) en fonction de l'essence du bois (source : ADEME, 2001).....	30
Figure 14 : PCI anhydre hors matières minérales (hors cendres)	31
Figure 15 : PCI sur brut en fonction de la puissance des installations	31
Figure 16 : Taux de matières minérales (%MS).....	32
Figure 17 : Taux global de cendres en fonction de la puissance bois	34

Figure 18 : Taux global de cendres en fonction de la puissance bois pour les Sites NS	35
Figure 19 : Répartition entre cendres sous-foyer et poussières de filtration pour les Sites NS	35
Figure 20 : Taux global de cendres en fonction de la puissance bois pour les Sites S	36
Figure 21 : Répartition entre cendres sous-foyer et poussières de filtration pour les Sites S.....	37
Figure 22 : Plomb (mg/kg MS)	38
Figure 23 : Cadmium (mg/kg MS).....	39
Figure 24 : Arsenic (mg/kg MS)	39
Figure 25 : Zinc (mg/kg MS).....	40
Figure 26 : Cuivre (mg/kg MS).....	40
Figure 27 : Chrome (mg/kg MS).....	40
Figure 28 : Teneur en cadmium des sols	41
Figure 29 : Somme des 16 HAP (mg/kg MS)	42
Figure 30 : PCP (mg/kg MS).....	43
Figure 31 : Chlore (% sec/sec)	44
Figure 32 : Soufre (% sec/sec) ⁵	45
Figure 33 : Taux de charge pendant la période de prélèvement (Sites NS)	46
Figure 34 : Taux d'oxygène pendant la période de prélèvement (Sites NS).....	47
Figure 35 : Température de chambre (°C) pendant la période de prélèvement	48
Figure 36 : Les approvisionnements en bois par installation.....	50
Figure 37 : Les 3 Groupes d'installations et d'analyses.....	51
Figure 38 : Masse volumique des cendres sous-foyer (CF et CM) avant et après tassement.....	53
Figure 39 : Masse volumique des cendres multicycloniques (MC)	53
Figure 40 : Concentration en cadmium (en mg/kg MS) dans les cendres sous-foyer (CF et CM) selon la nature du combustible bois utilisé	86
Figure 41 : Concentration en cadmium, plomb et zinc (en mg/kg MS) dans les cendres sous-foyer mixtes (CM) et les cendres multicycloniques (MCNS) selon la durée de prélèvement	87
Figure 42 : Comparaison de la composition en ETM des cendres avec d'autres MAFOR (boues, composts de déchets verts et lisiers de porcs) - Valeurs en base 100, calculées à partir des teneurs en mg/kg MS.	97
Figure 43 : Comparaison de la composition CTO des cendres avec d'autres MAFOR (boues, composts) - Valeurs en base 100 calculées à partir des teneurs en mg/kg MS, excepté pour les dioxines (ng i-TEQ/kgMS).....	98
Figure 44 : Évaluation du flux annuel d'éléments traces métalliques contenus dans les cendres des chaufferies biomasse à l'échelle nationale (CF+ CM).....	106
Figure 45 : Flux en ETM des cendres mixtes (CM) conformes à l'épandage.....	107
Figure 46 : La répartition des ETM par segment de cendres (CF+CM et MCNS).....	109
Figure 47 : Concentration en cadmium dans les amendements basiques et engrais du commerce (en mg/kg MS) TSP: Super phosphate triple.....	109
Figure 48 : Les apports en ETM à l'échelle nationale au regard des apports potentiels liés au recyclage agricole des cendres (CF + CM)	111
Figure 49 : Impacts environnementaux annuels du recyclage agricole des cendres de chaufferies bois	113
Figure 50 : Évolution du coût global de la séparation des cendres multicycloniques et des cendres sous foyer en fonction de la puissance de l'installation (1 à 25 MW)	115
Figure 51 : Illustration d'une boîte à moustache et détection des valeurs atypiques	185
Figure 52 : Exemple de résultats de Bootstrap.....	186
Figure 53 : Estimation des flux en substances fertilisantes et polluantes dans les cendres	187

Figure 54 : Exemple de classification ascendante hiérarchique (Bourgeois, 2011, thèse de doctorat).....	188
Figure 55 : Exemple d'ACP (Bourgeois, 2011, thèse de doctorat).	189
Figure 56 : Analyse exploratoire en Composante Principale (ACP) permettant l'étude des interactions entre les caractéristiques physico-chimiques des différents types de cendres collectés (CF, CM, MCS, MCNS) sur les 30 sites retenus. Projection des variables (en haut) et des types de cendres (en bas) dans le premier plan de l'ACP. L'analyse est basée sur les caractéristiques physico-chimiques, agronomiques, et les éléments polluants.....	196
Figure 57 : Analyse exploratoire en Composante Principale (ACP) permettant l'étude des interactions entre les caractéristiques physico-chimiques des cendres multicycloniques non séparées (MCNS) sur les 16 sites collectant les cendres en mélange.	198

7. SIGLES ET ACRONYMES

As	Arsenic
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AMM	Autorisation de mise sur le marché (accordée par l'ANSES)
ANSES	Agence nationale de sécurité sanitaire, de l'alimentation, de l'environnement et du travail
BN Ferti	Bureau de normalisation fertilisation, Commission de normalisation sectoriel rassemblant l'expertise technique et la connaissance des marchés en charge de l'élaboration des normes sur les Matières Fertilisantes et Supports de Culture (MFSC), par délégation d'AFNOR et agréée par le ministre chargé de l'industrie
Cd	Cadmium
CaO	Oxyde de calcium
CF	Cendres sous-foyer
Cl	Chlore
Cr	Chrome
Cu	Cuivre
CM	Cendres sous-foyer et sous-multicyclones
HAP	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
Hg	Mercure
ICPE	Installation Classée pour la Protection de l'Environnement
MAFOR	Matières fertilisantes d'origine résiduaire, tels les déjections animales, les effluents agro-industriels, les composts urbains ...
MB	Matière brute
MC	Cendres multicycloniques collectées séparément
MCNS	Cendres multicycloniques non séparées
MCS	Cendres multicycloniques séparées
MgO	Oxyde de magnésium
MM	Matières minérales
Mn	Manganèse
MS	Matière sèche
Na ₂ O	Oxyde de sodium
Ni	Nickel
P ₂ O ₅	Phosphore– Pentoxyde de phosphore
Pb	Plomb
PCB	Polychlorobiphényles
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieur
PCP	Pentachlorophénol
PCS	Pouvoir Calorifique Supérieur
POP	Polluants organiques persistants (HAP, PCP...)
S	Soufre
Se	Sélénium
Zn	Zinc
MTES	Ministère de la transition écologique et solidaire
ETM	Eléments traces organiques
CTO	Composés traces organiques
NFU	Norme française unifiée
POP	Polluants organiques persistants (dioxines PCDD/F), HAP, PCB...
COV	Composés organiques volatils
SSD	Sortie du statut de déchets : Procédure mise en place pour les emballages en bois pouvant être utilisés dans les installations relevant de la rubrique 2910A des ICPE

8. ANNEXES

Annexe 1 – Fiches techniques par chaufferie (confidentielles)

Dans la perspective de suivre les conditions de réalisation de la campagne de prélèvements, des fiches techniques détaillées pour chaque site ont été élaborées. Ces fiches comprennent les caractéristiques techniques des installations sélectionnées.

Elle comprend à titre d'illustration :

- Le Classement ICPE de l'installation.
- Un descriptif des installations en fonctionnement :
 - Chaufferie biomasse (nombre, puissance, modèles et marques) ;
 - Unité de cogénération au gaz naturel (afin de déterminer les conditions de fonctionnement de la chaufferie biomasse) ;
 - Chaufferie d'appoint/secours.
- Une description des modalités de fonctionnement de la chaudière bois :
 - Base/demi base ;
 - Identification des arrêts techniques programmés,
- Les conditions d'approvisionnement combustible bois :
 - Sur l'exercice précédent, dans la perspective d'établir un taux de cendres ;
 - Durant la saison de chauffage 2018/2019, dans la perspective d'établir précisément la nature et la qualité des combustibles livrés, et par voie de conséquence, les éventuels influents sur la qualité des cendres.
- Les conditions de gestion des cendres :
 - Quantités produites sur l'exercice précédent, dans le but d'établir les taux de cendres, avec si possible, une caractérisation physicochimique de celles-ci ;
 - Bilan quantitatif précis de l'évacuation des cendres sous foyer et des cendres multicycloniques durant la saison de chauffage 2018/2019 afin d'établir un bilan complet (taux de cendres, flux évacués, destination si possible).
- Une description des modalités de prélèvement (date d'intervention, organisation, aménagements à entreprendre, durée prévisionnelle de présence sur site, nature de soutien attendu des agents...) ;
- Un relevé des principaux paramètres de combustion durant les essais (teneur en oxygène dans les fumées, taux de charge de la chaudière...).

Voir fichiers électroniques joints :

Nom	Type	Date	Taille
Fiches techniques (1 dossier par site avec la fiche technique, des photos, les éventuels fichiers transmis par les exploitants et les bordereaux d'analyses)	.doc .xls .pdf	19/11/2018	175 Mo

Annexe 2 - Protocoles de prélèvement

Les prélèvements ont été réalisés sur 30 chaufferies réparties sur le territoire français pendant la saison de chauffe 2018-2019.

Plusieurs protocoles de prélèvement des cendres ont été établis afin de s'adapter à chaque technologie. Ces protocoles sont présentés en annexe de ce rapport.

Parallèlement aux prélèvements de cendres, un prélèvement du combustible bois a systématiquement été réalisé.

▪ Prélèvements sur les sites ne nécessitant aucun aménagement

Les sites disposant d'une séparation des cendres multicycloniques et sous-foyer n'ont besoin d'aucune adaptation pour faire l'objet d'un suivi (Sites S).

Les cendres sous-foyer sont collectées indépendamment des cendres multicycloniques et stockées dans une benne (exemple ci-contre), dans un bac ou dans un big-bag.

Photo 1 : Benne à cendres



Protocole d'échantillonnage

Ces cendres sont échantillonnées en réalisant 50 prélèvements élémentaires donnant lieu à un mélange, puis à une série de quartages successifs visant à réduire l'échantillon aux 2 kg nécessaires pour l'analyse en laboratoire.

Cette même procédure est appliquée aux cendres multicycloniques.

Le prélèvement est réalisé à l'aide d'une canne spécialement conçue par CEDEN, fabriquée à Rouen par un serrurier et utilisée par les 3 équipes en charge des prélèvements (CEDEN, BIOMASSE Conseil et FIBOIS Drôme Ardèche). Cette canne contient un volume de l'ordre de 200 ml, ce qui permet d'obtenir un prélèvement élémentaire à chaque introduction dans le big-bag, le bac ou dans la benne à cendres sous-foyer ou à cendres multicycloniques.

Photo 2 : Matériel d'échantillonnage : canne de prélèvement



Photo 3 : Exemple d'échantillon de cendres sous-foyer (à gauche) et de cendres multicycloniques (à droite)



- **Prélèvements sur les sites nécessitant un aménagement**

Les sites collectant en commun (Sites NS) les cendres sous-foyer et les cendres multicycloniques ont nécessité un aménagement.

En général, les cendres sous-foyer et sous-multicyclone (Site NS) sont collectées dans une benne, ouverte ou fermée.

- **Aménagement réalisé**

L'aménagement réalisé a pour vocation de séparer les cendres multicycloniques lors de la présence du Prestataire. À cet effet, un bac en acier est installé dans la gaine sous le multicyclone qui achemine les cendres multicycloniques jusqu'au convoyeur d'évacuation des cendres sous foyer. À cet endroit, les 2 cendres sont regroupées pour être en général évacuées vers une benne fermée ou à ciel ouvert.

Photo 4 : Bac en acier avec déflecteurs



La réalisation de cet aménagement est présentée sous forme de photographies chronologiques ci-dessous.

Photo 5 : Repérage des percements



Photo 6 : Gaine après percements à l'aide d'un matériel fourni par le Prestataire (forêt et perceuse) permettant l'introduction d'une tige filetée boulonnée à chaque extrémité pour garantir l'étanchéité de la gaine après la remise en fonctionnement de la chaudière



Photo 7 : Bac de réception des cendres multicycloniques reposant sur les tiges filetées avant remise en service de la chaudière biomasse



Photo 8 : Bac après la période production (environ 2 heures) après l'arrêt de la chaudière biomasse



•

Photo 9 : Percements fermés à l'issue de l'essai à l'aide d'un boulon et d'une rondelle pour garantir la totale étanchéité après remise en service de l'installation



▪ Durée de constitution de l'échantillon

Lors des campagnes de prélèvements, il a été constaté que le temps nécessaire à la récupération d'un volume satisfaisant de cendres multicycloniques était très variable. Il apparaît que les flux collectés dépendent du taux de charge de l'installation lors du passage sur site, mais sans doute également de la nature du combustible et des conditions de combustion. On a en effet pu observer, à toute charge équivalente, des durées de fonctionnement très différentes pour récupérer la quantité de cendres attendue (d'une heure à plus de 4 heures).

▪ Protocole d'échantillonnage et envoi au laboratoire

Les échantillons constitués de 50 prélèvements élémentaires sont récupérés. L'échantillon élaboré doit peser au moins 2 kg, quantité minimale pour la réalisation de toutes les caractérisations physicochimiques

Un quartage est réalisé lorsque la quantité est supérieure au volume du contenant (seau de 13 l).

Les contenants sont référencés, puis enfermés par précaution dans un sac plastique étanche pour 2 raisons :

- pour éviter tout incident/accident lors de la manutention des échantillons pendant le transport (précaution sanitaire, en raison du pH élevé des cendres),
- pour préserver les quantités nécessaires à l'analyse de laboratoire (les volumes récupérés étant parfois particulièrement réduits).

Photo 10 : Format d'envoi des échantillons recueillis



Annexe 3 – Liste des paramètres analysés dans les cendres et les combustibles

Les échantillons de cendres et de combustible, une fois prélevés et conditionnés, ont été envoyés au laboratoire EUROFINS pour procéder à leur analyse.

- **Liste des paramètres analysés sur les cendres**
- Les paramètres physico-chimiques :
 - Humidité et matière sèche ;
 - Matières minérales ;
 - pH ;
 - Conductivité.
- Les micropolluants
 - Eléments Traces Métalliques (ETM) :
 - Métaux toxiques : Pb, Cd, Hg ;
 - Oligo-éléments : Zn, Cr, Cu, Ni, As ;
 - Autres ETM : Se, Mo.
 - Composés Traces Organiques (CTO) :
 - HAP : fluoranthène, benzo(b)fluoranthène, benzo(a)pyrène ;
 - PCB : somme des 7 PCB (028, 052, 101, 118, 138, 153, 180) ;
 - Dioxines (PCDD/F).
- La valeur agronomique
 - Eléments neutralisants :
 - Calcium (Ca), CaO ;
 - Magnésium (Mg), MgO ;
 - Eléments fertilisants :
 - Phosphore (P), P₂O₅ ;
 - Potassium (K), K₂O.
 - Autres éléments majeurs :
 - Soufre (S) ;
 - Sodium (Na) et Na₂O.
 - Élément organique :
 - Matière organique ;
 - Carbone organique total.
 - Azote et ses formes :
 - Azote Kjeldahl ;
 - Azote ammoniacal et azote nitrique ;
 - Azote organique ;
 - Azote organique non uréique ;
 - Rapport C/N ;
 - Rapport C/N organique non uréique ;
 - Rapport Matière organique/Azote organique.
- **Liste des paramètres analysés sur les combustibles bois**

- Les paramètres physico-chimiques :
 - Granulométrie ;
 - Humidité et matière sèche ;
 - Pouvoir calorifique : PCS et PCI ;
 - Matières minérales ;
- Les micropolluants
 - Eléments Traces Métalliques (ETM) :
 - Métaux toxiques : Pb, Cd, Hg ;
 - Oligo-éléments : Zn, Cr, Cu, Ni, As.
 - Composés Traces Organiques (CTO) :
 - HAP : fluoranthène, benzo(b)fluoranthène, benzo(a)pyrène et 13 autres ;
 - PCB : somme des 7 PCB (028, 052, 101, 118, 138, 153, 180) ;
 - PCP Pentachlorophénol (mg/kgMS) ;
 - Pesticides.
 - Autres éléments :
 - Chlore ;
 - Halogènes.
- La valeur agronomique
 - Eléments neutralisants :
 - Calcium (Ca), CaO ;
 - Magnésium (Mg), MgO ;
 - Autres éléments majeurs :
 - Sodium (Na) et Na₂O.
 - Élément organique : Matière organique.
 - Eléments fertilisants : Azote total Kjeldahl.
 - Autres éléments : Soufre.

▪ Méthodes de mesures utilisées pour les combustibles

Paramètres	Technique	Unités	Norme	Limite de quantification	Incertitude
Humidité totale d'un biocombustible	Gravimétrie [Séchage dans une étuve ventilée jusqu'à poids constant à 105°C]	% P.B.	NF EN ISO 18134-2		
Teneur en cendres à 550°C pour biocombustibles	Gravimétrie [Calcination à une température donnée d'une prise d'essai et mesure de la perte de masse]	% MS	NF EN ISO 18122	0,2	
Azote (N)	Combustion [Combustion à haute température et mesure de la teneur en azote par analyse instrumentale]	% MS	NF EN ISO 16948	0,07	
Hydrogène (H)	Combustion [Combustion à haute température et mesure de la teneur en hydrogène par analyse instrumentale] -	% MS	NF EN ISO 16948	0,6	
PCs Pouvoir calorifique supérieur (vol. constant)	Combustion [Combustion à une température donnée dans un calorimètre et mesure de la quantité de chaleur dégagée]	kJ/kg M.S.	NF EN ISO 18125	2000	
PCi Pouvoir calorifique inférieur (vol. constant)	Calcul	kJ/kg M.S.	NF EN ISO 18125		
Humidité		% (w/w)	NF EN ISO 18134-2	0,1	
Arsenic	ICP/MS	mg/kg MS	EN ISO 17294-2: 2017-01	0,8	16%
Plomb (Pb)		mg/kg MS	EN ISO 17294-2: 2017-01	2	20%
Cadmium (Cd)		mg/kg MS	EN ISO 17294-2: 2017-01	0,2	19%
Cuivre (Cu)		mg/kg MS	EN ISO 17294-2: 2017-01	1	14%
Chrome (Cr)		mg/kg MS	EN ISO 17294-2: 2017-01	1	15%
Zinc (Zn)		mg/kg MS	EN ISO 17294-2: 2017-01	1	22%
Mercure (Hg)	SAA / vapeurs froides (CV-AAS)	mg/kg MS	EN ISO 12846: 2012-08	0,05	23%
Pentachlorophénol (PCP)	GC/MS	mg/kg MS	AltholzV, App. 4: 2002-08	0,1	29%
HAP (16 paramètres)		mg/kg MS	NF EN 15527	0,1	
PCB (7 paramètres)		mg/kg MS	NF EN 15308	0,02	
Chlore	Calcul	% (w/w)	EN ISO 16994: 2016-12	0,005	23%
Chlore sur sec		% (w/w)	EN ISO 16994: 2016-12	0,005	
Soufre		% (w/w)	EN ISO 16994: 2016-12	0,005	11%
Soufre sur sec		% (w/w)	EN ISO 16994: 2016-12	0,005	
Screening pesticides dans les matériaux	GC/MS/MS	mg/kg MS	Internal Method [DE Food]		

- Méthodes de mesures utilisées pour les cendres

Paramètres	Technique	Unités	Norme	Limite de quantification	Incertitude	Seuil réglementaire (Arrêté du 3 août 2018)
Humidité totale	Séchage dans une étuve ventilée jusqu'à poids constant à 105°C	%	DD CEN/TS 15414-1 - DD CEN/TS 15414-2			
Matières minérales	Calcul	%	Calcul			
Perte au feu à 550°C	Gravimétrie [Calcination d'une prise d'essai / mesure de la perte de masse]	%	NF EN 15169	0,1		
Matière sèche	Calcul	% P.B.	NF ISO 11465	0,1	5%	
Carbone Organique Total	Combustion sèche	mg/kg M.S.	NF ISO 10694	1000	25%	
PCB congénères réglementaires (7 composés)	GC/MS/MS [Extraction Hexane / Acétone]	mg/kg M.S.	NF EN 16167 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)	0,01	30%	0,8
Arsenic (As)	ICP/AES [Minéralisation à l'eau régale]	mg/kg M.S.	NF EN ISO 11885 - NF EN 13346 Méthode B	1	45%	
Cadmium (Cd)		mg/kg M.S.	NF EN ISO 11885 - NF EN 13346 Méthode B	0,4	40%	10
Chrome (Cr)		mg/kg M.S.	NF EN ISO 11885 - NF EN 13346 Méthode B	5	15%	1000
Cuivre (Cu)		mg/kg M.S.	NF EN ISO 11885 - NF EN 13346 Méthode B	5	20%	1000
Nickel (Ni)		mg/kg M.S.	NF EN ISO 11885 - NF EN 13346 Méthode B	1	10%	200
Plomb (Pb)		mg/kg M.S.	NF EN ISO 11885 - NF EN 13346 Méthode B	5	15%	800
Zinc (Zn)		mg/kg M.S.	NF EN ISO 11885 - NF EN 13346 Méthode B	5	15%	3000
Mercure (Hg)	SFA / vapeurs froides (CV-AAS) [Minéralisation à l'eau régale] -	mg/kg M.S.	NF EN 13346 Méthode B (Sol) - NF ISO 16772 (Sol) - Méthode interne (Hors Sols)	0,1	25%	10
Calcium (Ca)	ICP/AES [Minéralisation à l'eau régale]	mg/kg M.S.	NF EN ISO 11885 - NF EN 13346 Méthode B	50		

Paramètres	Technique	Unités	Norme	Limite de quantification	Incertitude	Seuil réglementaire (Arrêté du 3 août 2018)
Magnésium (Mg)		mg/kg M.S.	NF EN ISO 11885 - NF EN 13346 Méthode B	5		
Molybdène (Mo)		mg/kg M.S.	NF EN ISO 11885 - NF EN 13346 Méthode B	1		
Phosphore (P)		mg/kg M.S.	NF EN ISO 11885 - NF EN 13346 Méthode B	1	13%	
Potassium (K)		mg/kg M.S.	NF EN ISO 11885 - NF EN 13346 Méthode B	20		
Sodium (Na)		mg/kg M.S.	NF EN ISO 11885	20		
Sélénium (Se)		mg/kg M.S.	NF EN ISO 11885 - NF EN 13346 Méthode B	1	45%	
Soufre (S)		mg/kg M.S.	NF EN ISO 11885	20		
pH H2O sol	Potentiométrie	°C	NF ISO 10390		15%	
Benzo(a)pyrène	GC/MS [Extraction Hexane / Acétone]	mg/kg M.S.	NF ISO 18287 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)	0,05	0%	2
Benzo(b)fluoranthène		mg/kg M.S.	NF ISO 18287 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)	0,05	0%	2,5
Fluoranthène		mg/kg M.S.	NF ISO 18287 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)	0,05	0%	5
Conductivité	Potentiométrie [Méthode à la sonde]	µS/cm	Adaptée de NF EN 27888			
Ammonium extrait au KCL (NH4)	Titrimétrie [Distillation]	mg NH4/kg M.S.	Méthode interne selon NFT 90-015-1	20		
Dioxines (17 PCDD/F) ~ Environnement - Mat. secs	GC/HRMS	ng/kg M.S.	interne	9		
Matière sèche		%	interne			
Azote Total (N)	Méthode Kjeldahl		méthode interne MA7-77			
Azote Ammoniacal (N-NH4)	Extr.eau 1/5 / frais		NF EN 13652			
Azote Nitrique (N-NO3)	Extr.eau 1/5 / frais		NF EN 13652			
Azote Uréique (N)	Colorimétrie PDAB		Méthode interne MA7-15			
Azote Organique (N)	Calcul					

Annexe 4 – Méthodes d'analyse des données appliquées

- Statistique descriptive des données
- Analyse descriptive

L'analyse descriptive vise à utiliser différents indicateurs (descripteurs) pour décrire le jeu de données et interpréter la distribution observée (médiane, quartile, moyenne, écart-type...).

A l'issue des retours d'analyse de cendres, ces dernières ont été traitées selon 3 approches différentes :

- Une analyse par **nuage de points** concernant les contaminants soumis à un seuil (seuil 2910A) ;
- Une analyse par **boîte à moustache** pour chacun éléments étudiés ;
- Une analyse par **intervalle de confiance** pour chacun des contaminants étudiés.

Analyses par nuage de points

L'analyse par nuage de points permet de visualiser directement la répartition des résultats d'analyses des échantillons comparables pour un même contaminant.

Boîte à moustache

Une analyse par boîte à moustache a été réalisée pour chaque contaminant ou élément afin de connaître la dispersion des résultats d'analyses par typologie de cendres (CF, CM, MC).

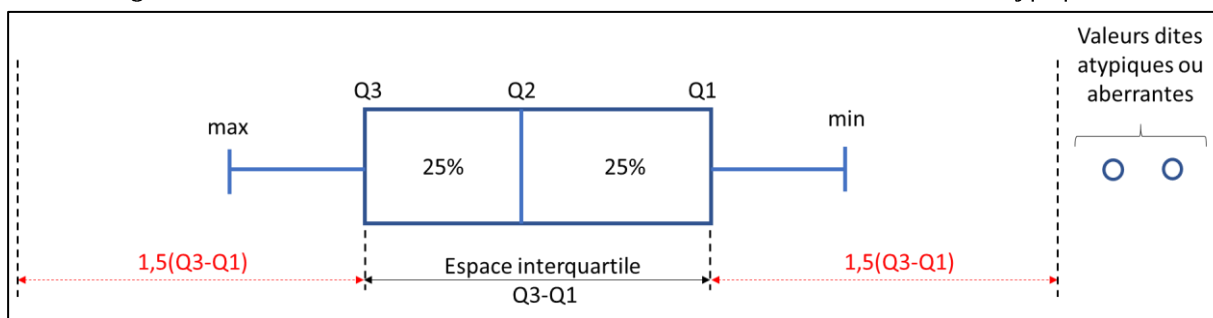
Les boîtes à moustache fournissent :

- Le 1^{er} quartile (Q1) ;
- La médiane (Q2) ;
- Le 3^{ème} quartile (Q3) ;
- Les valeurs minimales et maximales (hors valeurs atypiques).

Certaines valeurs sont considérées comme « atypiques » lorsque :

$X > Q3(Q3 - Q1)$ ou $X < Q1 - 1,5(Q3 - Q1)$, c'est-à-dire 1,5 fois l'espace interquartile.

Figure 51 : Illustration d'une boîte à moustache et détection des valeurs atypiques



Intervalle de confiance

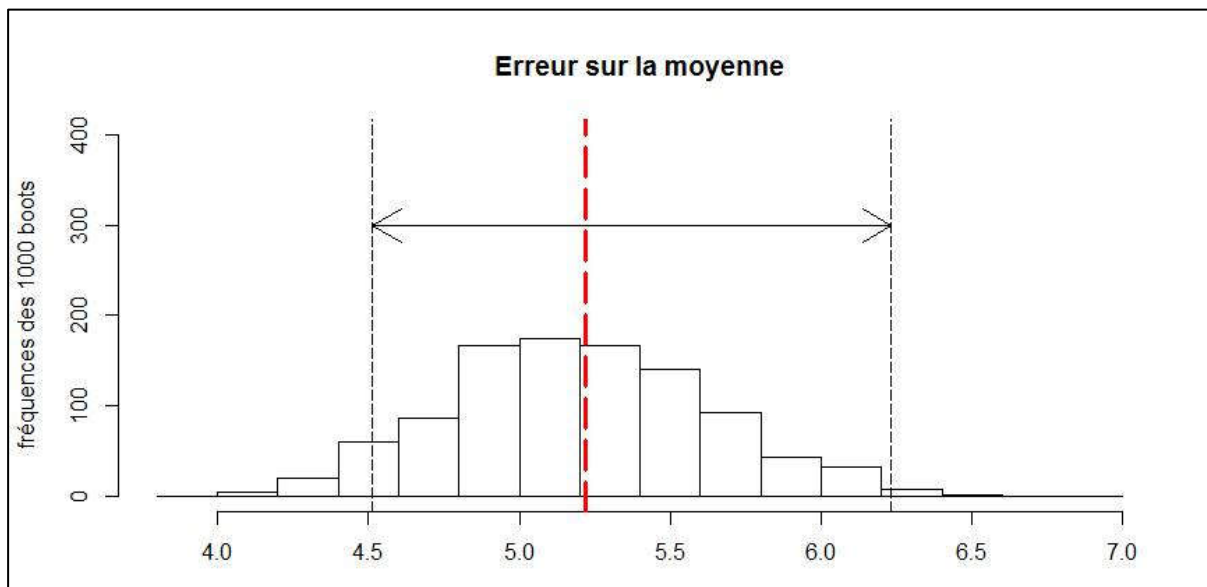
Un intervalle de confiance encadre une valeur réelle que l'on cherche à estimer à l'aide de mesures prises par un procédé aléatoire.

Lorsqu'un intervalle de confiance à 95 % est fourni pour une grandeur, cela signifie que cet intervalle a 95 % de chances de contenir la valeur qu'aurait donnée un échantillonnage exhaustif (population mère).

Le « bootstrap » est une technique d'inférence statistique permettant, par une simulation de rééchantillonnage (en général 1 000 répétitions), de définir les intervalles de confiance pour une estimation (exemple : moyenne).

Cette méthode permet de s'affranchir des hypothèses de normalité des données.

Figure 52 : Exemple de résultats de Bootstrap



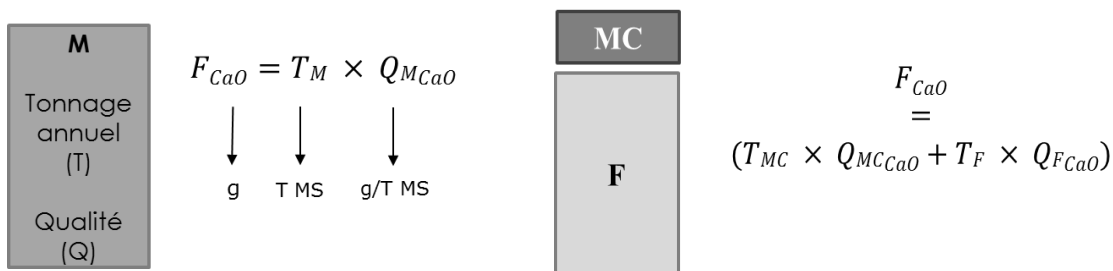
▪ Estimation des flux

Les flux en substances fertilisantes et polluantes dans les cendres (CF, CM, MC) sont estimés à partir des tonnages de cendres et des teneurs en éléments fertilisants ou polluants par unité de masse sèche, tels que :

$$\text{Flux} = \text{Quantité} \times \text{Qualité}$$

Ces flux sont calculés, dans le cas de :

- la collecte en mélange :
 - sur les cendres sous-foyer et sous-multicyclone (CM) ;
 - sur les cendres multicyclone (MCNS).



- la collecte séparée :
 - sur les cendres sous-foyer (CF) ;
 - sur les cendres multicyclone (MCS) ;
 - sur les cendres CM reconstituées (CMR), c'est-à-dire en pondérant les résultats d'analyses des deux types de cendres (CF et MCS) par les quantités produites au cours de la période de

Figure 53 : Estimation des flux en substances fertilisantes et polluantes dans les cendres

- Tests statistiques réalisés
- Vérification des conditions initiales

Avant de réaliser les analyses statistiques, la normalité de la distribution pour chaque variable est vérifiée avec un test de Shapiro et l'égalité de variance (c'est-à-dire l'homoscédasticité des variances) avec un F-test. Ces deux conditions (normalité et égalité de variance) doivent être remplies pour appliquer un test paramétrique. Si ces conditions ne sont pas validées, les données sont, dans un premier temps, transformées (en log10 par exemple) et si toutefois la normalité de la distribution n'est toujours pas atteinte, des tests non-paramétriques sont effectués.

Tableau 45 : Exemple de tests paramètres et non-paramétriques selon le type d'analyse souhaitée

	Test paramétrique	Test non-paramétrique
Validation des hypothèses (normalité et égalité de variance)	Oui	Non
Comparaison de moyennes	Test T de Student	Test U Mann-Whitney
Analyse de la variance	ANOVA	Kruskal-Wallis
Post-hoc test	Test de TukeyHSD	Test de Nemenyi

- Comparaison de deux moyennes observées

Des comparaisons de deux moyennes (tests paramétriques ou non-paramétriques) sont réalisées sur les paramètres physico-chimiques des cendres afin de mettre en évidence une différence potentielle entre les types de cendres produites. Une valeur de p-value inférieure à 0,05 sera considérée comme statistiquement significative.

- Analyse de la variance (ANOVA ou Kruskal-Wallis)

Des analyses de variance pourront également être réalisées afin de comparer les moyennes d'échantillons, c'est-à-dire, cendres sous-foyer séparées, non séparées et sous multi-cyclone simultanément. Des tests post-hoc seront ensuite réalisés afin de révéler les différences significatives entre toutes les paires de comparaisons. Ces analyses pourront, dans ce cas, se substituer à l'analyse de comparaison de moyennes 2 à 2.

Cette méthode est utilisée lorsque l'on dispose d'une ou plusieurs variables explicatives catégorielles. Si nous ne comparons que deux moyennes, l'ANOVA nous donnera les mêmes résultats qu'un test-T.

- Classification ascendante hiérarchique

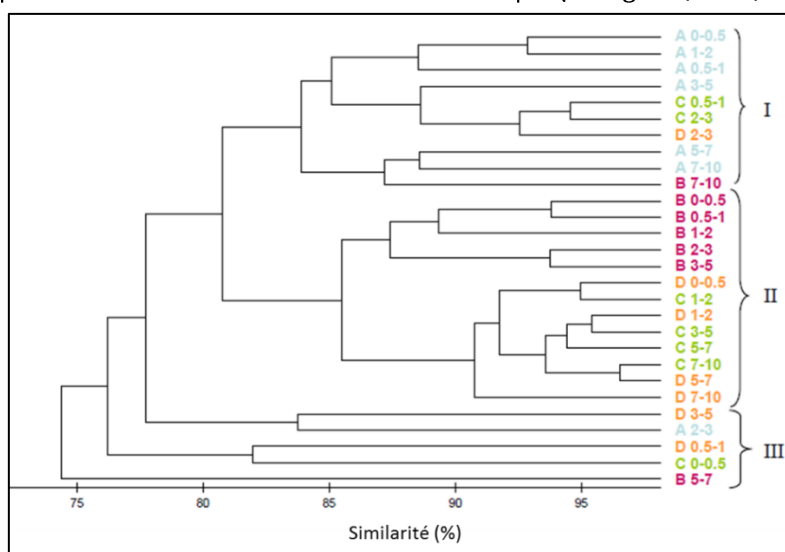
Des classifications ascendantes hiérarchiques (CAH) ont été appliquées au jeu de données afin de révéler la tendance de similarité des caractéristiques physico-chimiques des cendres (CF, CM, MCS, MCNS) et des combustibles bois entre les différents échantillons et installations.

Cette méthode consiste à classer/classifier les échantillons ou variables en fonction de leur degré de similarité.

Il existe différents **types de classification** selon ce que l'on souhaite obtenir :

- **Descriptive** : lorsque deux objets sont associés dans un même groupe, cela signifie qu'ils sont très proche.
- **Synoptique** : permet d'avoir une vision d'ensemble, de dégager les grandes tendances, sans chercher à regarder les détails entre les objets.

Figure 54 : Exemple de classification ascendante hiérarchique (Bourgeois, 2011, thèse de doctorat).



Le principe

La réalisation d'une classification ascendante hiérarchique nécessite au préalable de choisir différents critères :

- un **indice de similarité** afin de déterminer les ressemblances entre individus et de calculer une matrice de distance entre les individus 2 à 2. Le choix de l'indice de similarité dépend des données étudiées et des objectifs.
- un **critère d'agrégation** afin de déterminer les ressemblances entre groupes d'individus ;
- une **partition finale**, permettant de « découper l'arbre » et de constituer des groupes.

Dans le cadre de cette étude, il a été entrepris de réaliser une **approche synoptique** en appliquant :

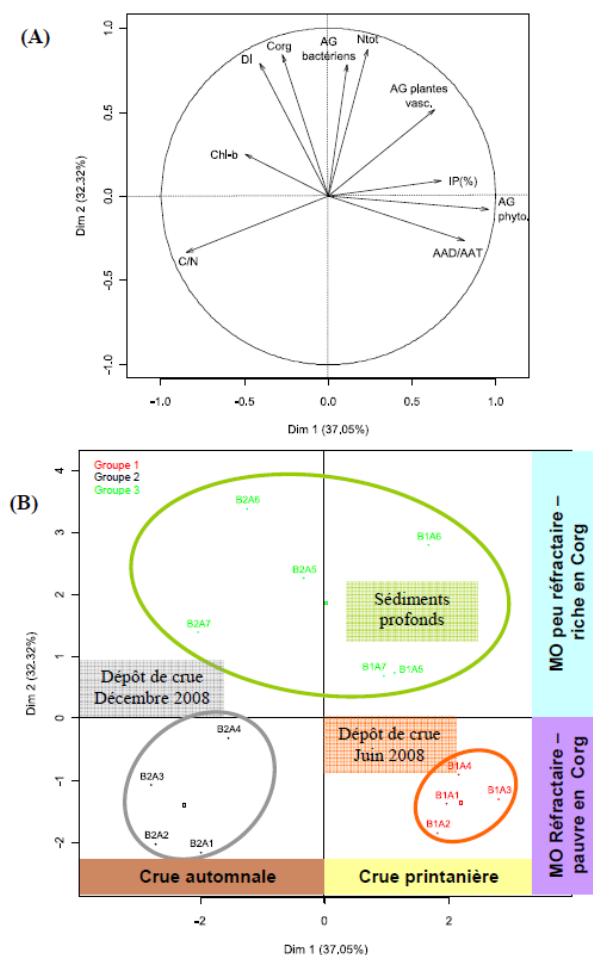
- Indice de similarité : **distance euclidienne**.
- Critère d'agrégation : **méthode de Ward** (appropriée pour les classifications synoptiques).
- Partition finale.

■ Analyse multivariée

Une analyse multivariée, en composantes principales (ACP), a été réalisée afin de rechercher les relations potentielles entre les paramètres physico-chimiques, ainsi que d'identifier les variables contraignant le regroupement des échantillons et d'extraire une information synthétique.

L'ACP est une méthode dite factorielle qui consiste à réduire le nombre de dimensions (chaque variable correspond à une dimension) pour l'exploration statistique de données quantitatives complexes. Classiquement les données (variables et échantillons) sont projetées dans un espace de dimensions réduites (c.-à-d. dans le premier plan (2 dimensions) de l'ACP).

Figure 55 : Exemple d'ACP (Bourgeois, 2011, thèse de doctorat).

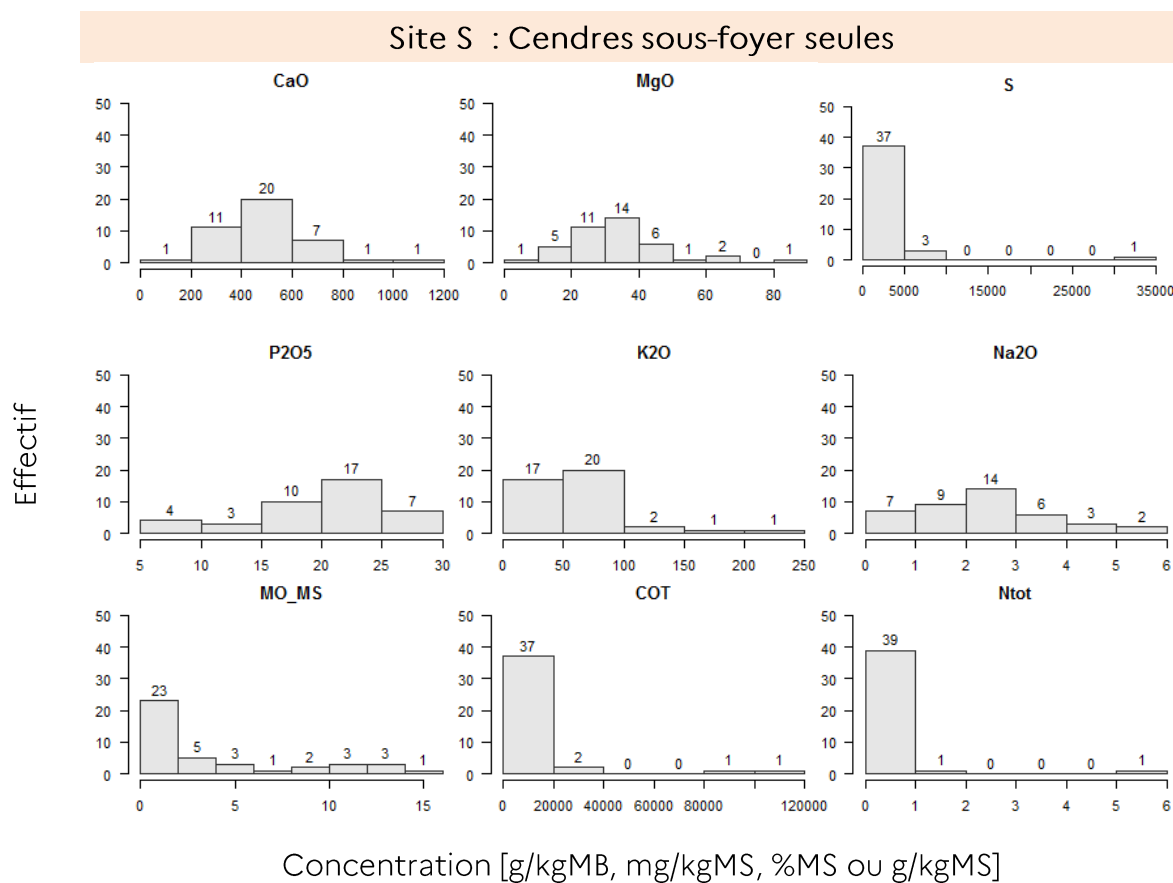


Annexe 5 – Distribution des données de cendres

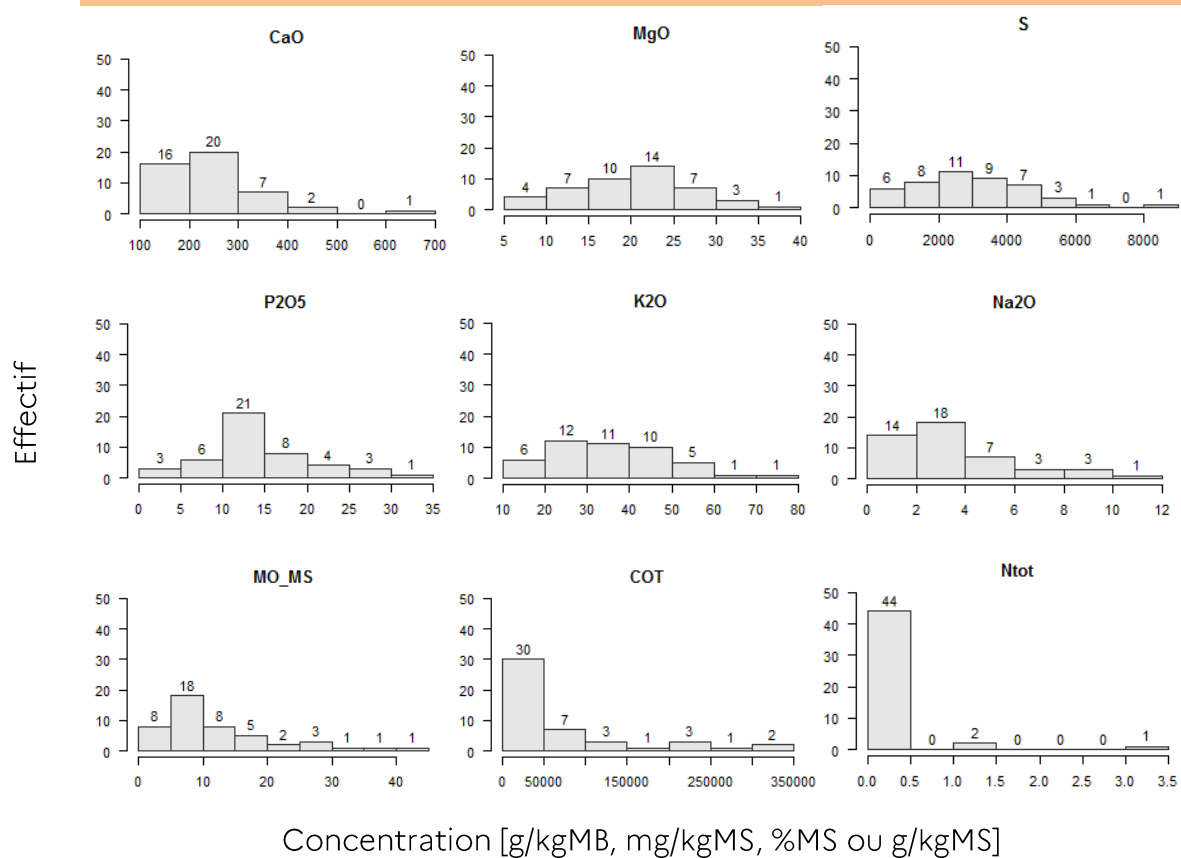
Des histogrammes représentant la distribution (dispersion) des valeurs par classe pour les principaux paramètres analysés dans les cendres sont présentés ci-après.

Ces histogrammes sont réalisés par type de cendres (CF, CM et MC).

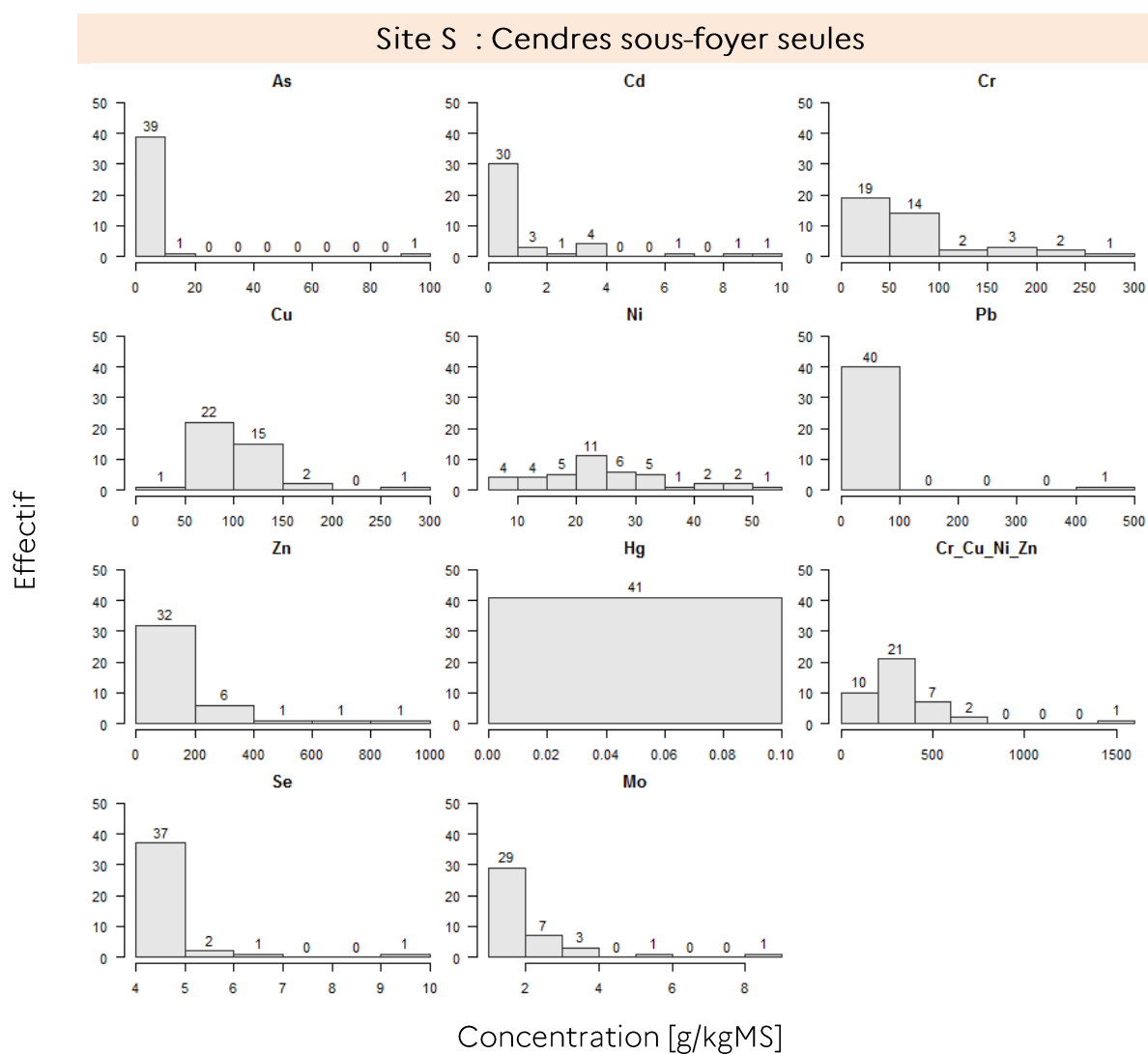
■ Valeur agronomique des cendres



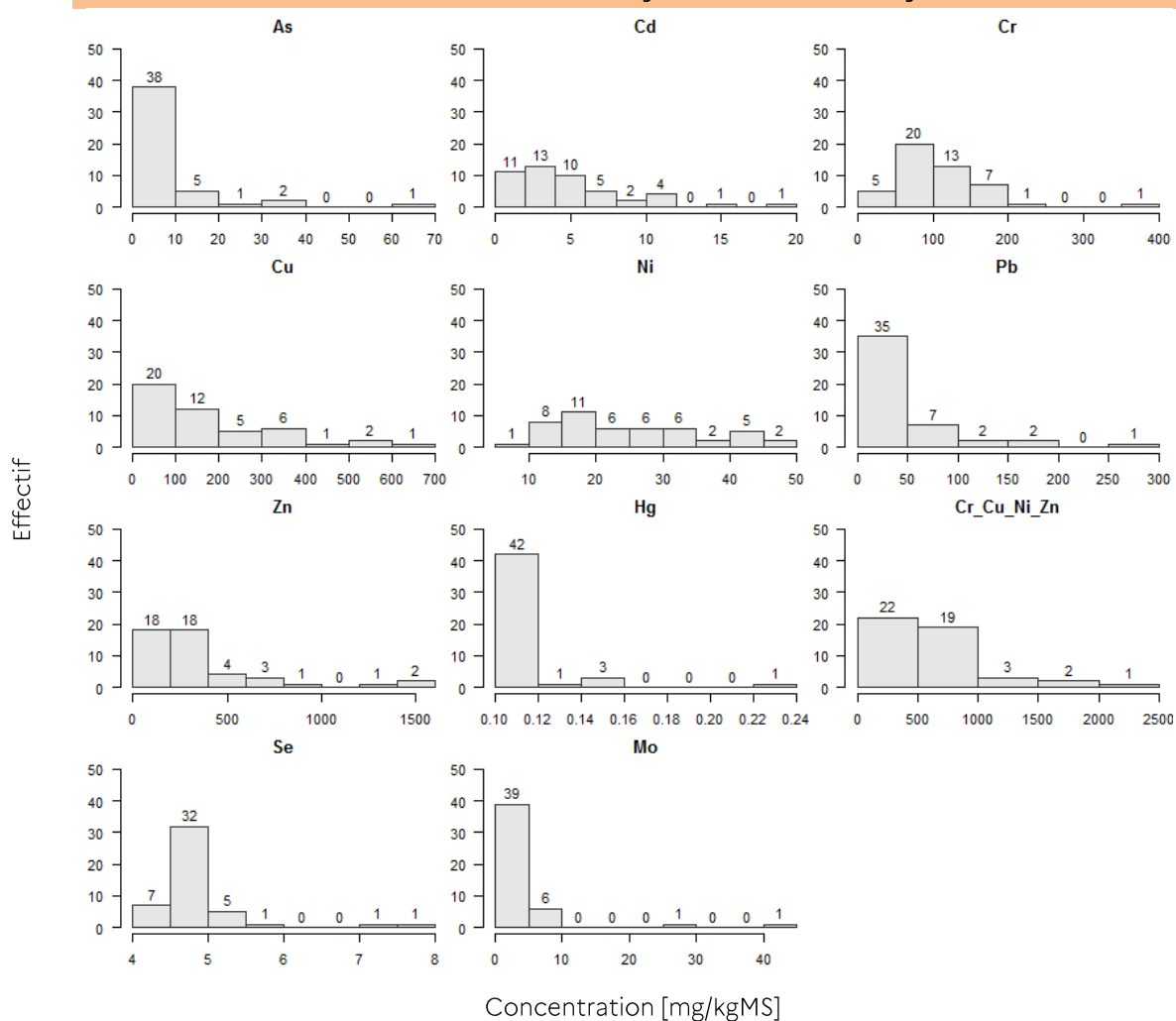
Site NS : Cendres sous-foyer et sous-multicyclones



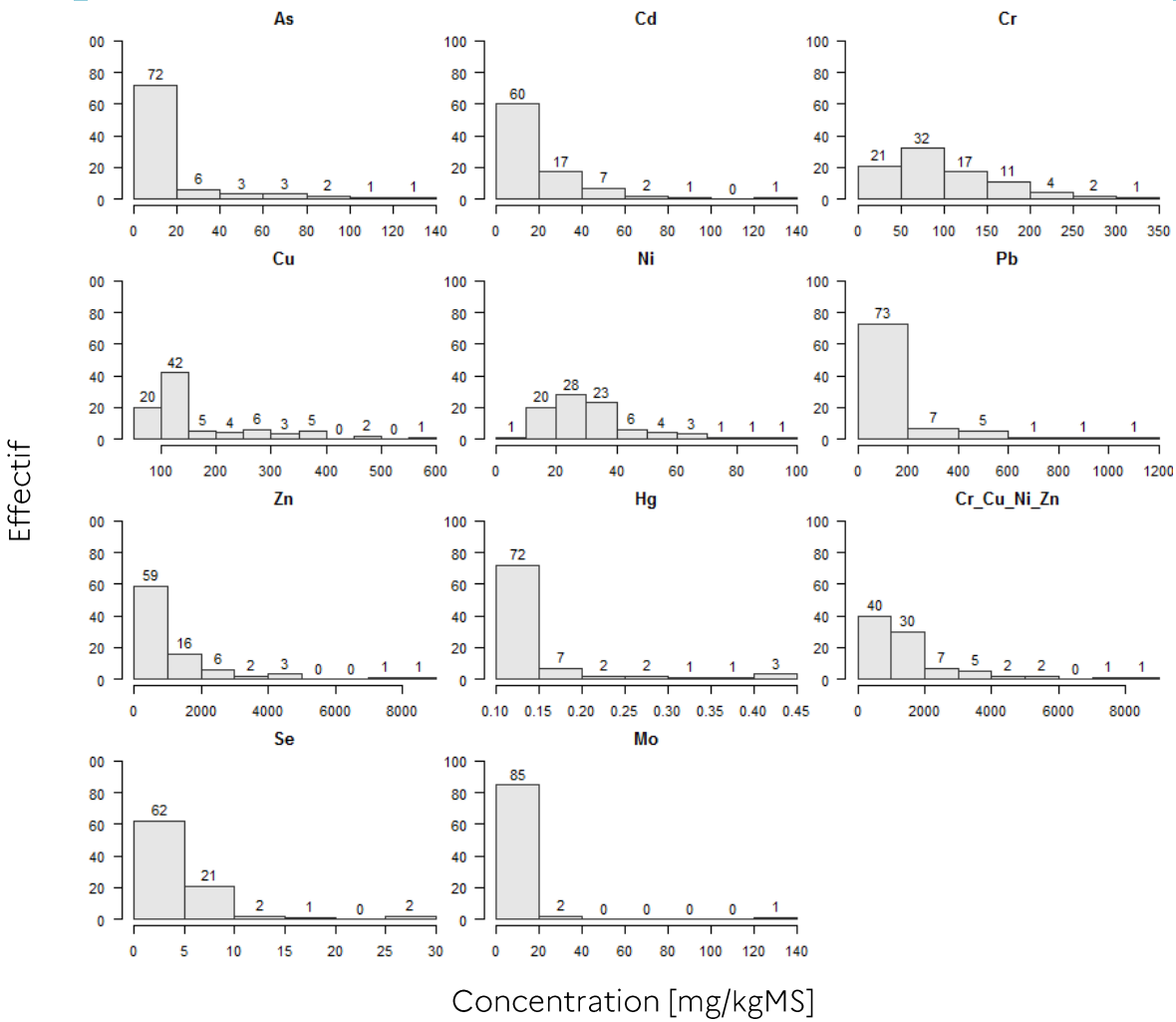
- Elements traces métalliques



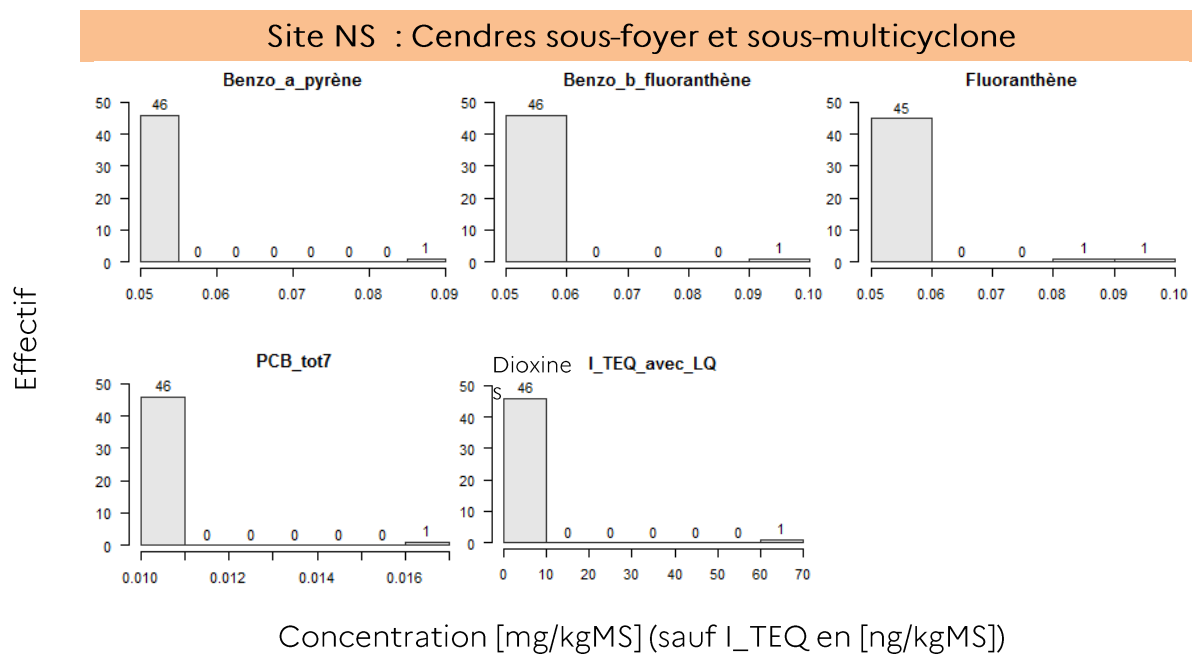
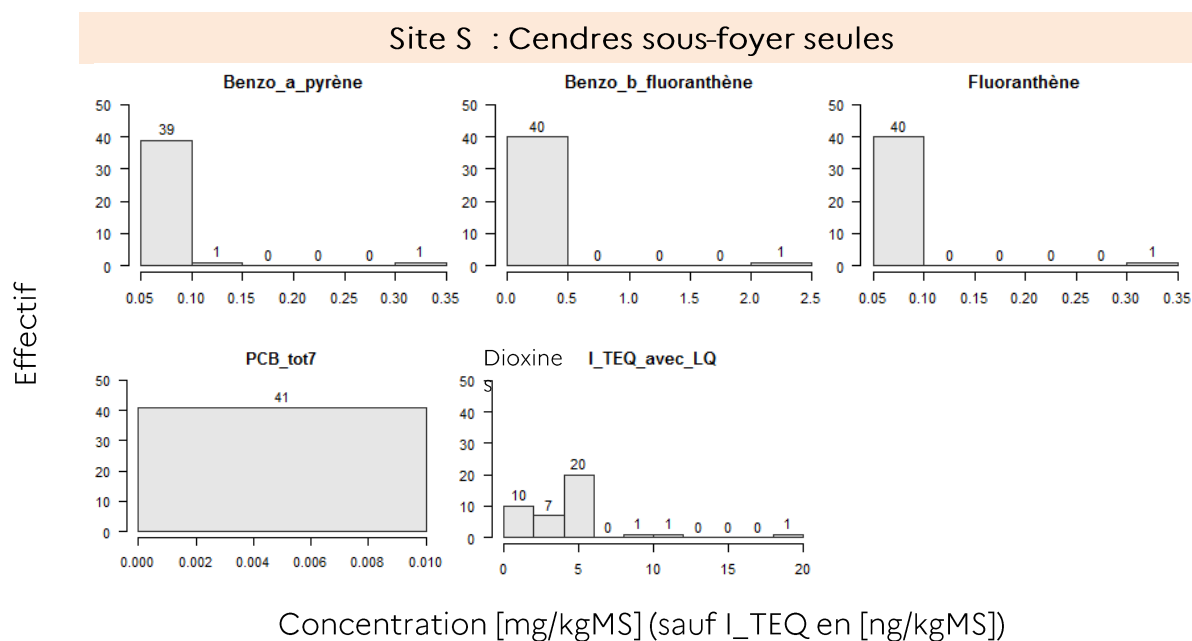
Site NS : Cendres sous-foyer et sous-multicyclone



Cendres multicycloniques



- Composés traces organiques



Annexe 6 – Analyses statistiques complémentaires

Dans l'analyse statistique, divers travaux ont été conduits dans la perspective d'**identifier les similarités** dans les caractéristiques des cendres. Ces méthodes d'analyse consistent à rassembler les échantillons en fonction de leur degré de similarité selon des critères de ressemblance défini au préalable (matrice de données).

Analyses multivariées

Une **analyse exploratoire en composantes principales (ACP)** a été réalisée sur l'ensemble du jeu de données afin de rechercher les relations potentielles (corrélation) entre les caractéristiques physico-chimiques, les éléments neutralisants et fertilisants et l'innocuité des cendres.

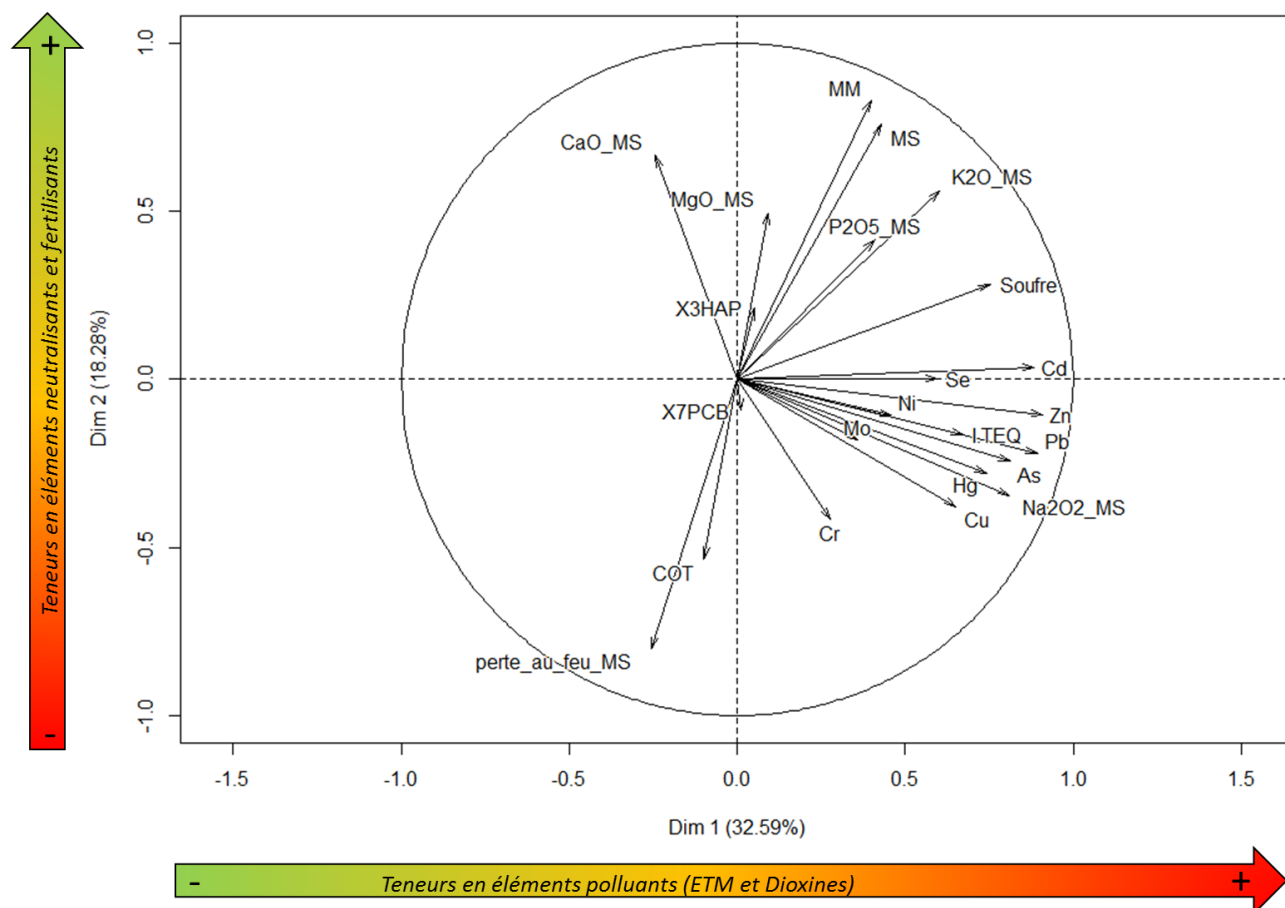
L'analyse a été effectuée sur l'ensemble des cendres prélevées sur les 30 sites dans le cadre de cette étude ADEME Cendres, c'est-à-dire CF, CM, MCNS et MCS. Afin de simplifier la lecture, les données des 3 campagnes de prélèvement ont été moyennées par site.

La **première composante** (axe 1 ou des abscisses) de l'ACP, comptant pour 32,6% de la variance totale, **reflète l'innocuité** des cendres, avec des concentrations plus élevées en éléments polluants dans sa partie positive.

La **deuxième composante** (axe 2 ou des ordonnées) explique 18,3% de la variance totale et **décrit la valeur agronomique** des cendres ; elle est essentiellement expliquée dans sa partie positive par une valeur neutralisante et fertilisante plus élevée.

Les cendres étudiées se répartissent sur le premier plan de l'analyse factorielle en fonction de l'importance de la contribution des éléments polluants (axe 1) et des propriétés physico-chimiques et agronomique des cendres (axe 2).

Figure 56 : Analyse exploratoire en Composante Principale (ACP) permettant l'étude des interactions entre les caractéristiques physico-chimiques des différents types de cendres collectés (CF, CM, MCS, MCNS) sur les 30 sites retenus. Projection des variables (en haut) et des types de cendres (en bas) dans le premier plan de l'ACP. L'analyse est basée sur les caractéristiques physico-chimiques, agronomiques, et les éléments polluants.



Recherche d'une classification des sites

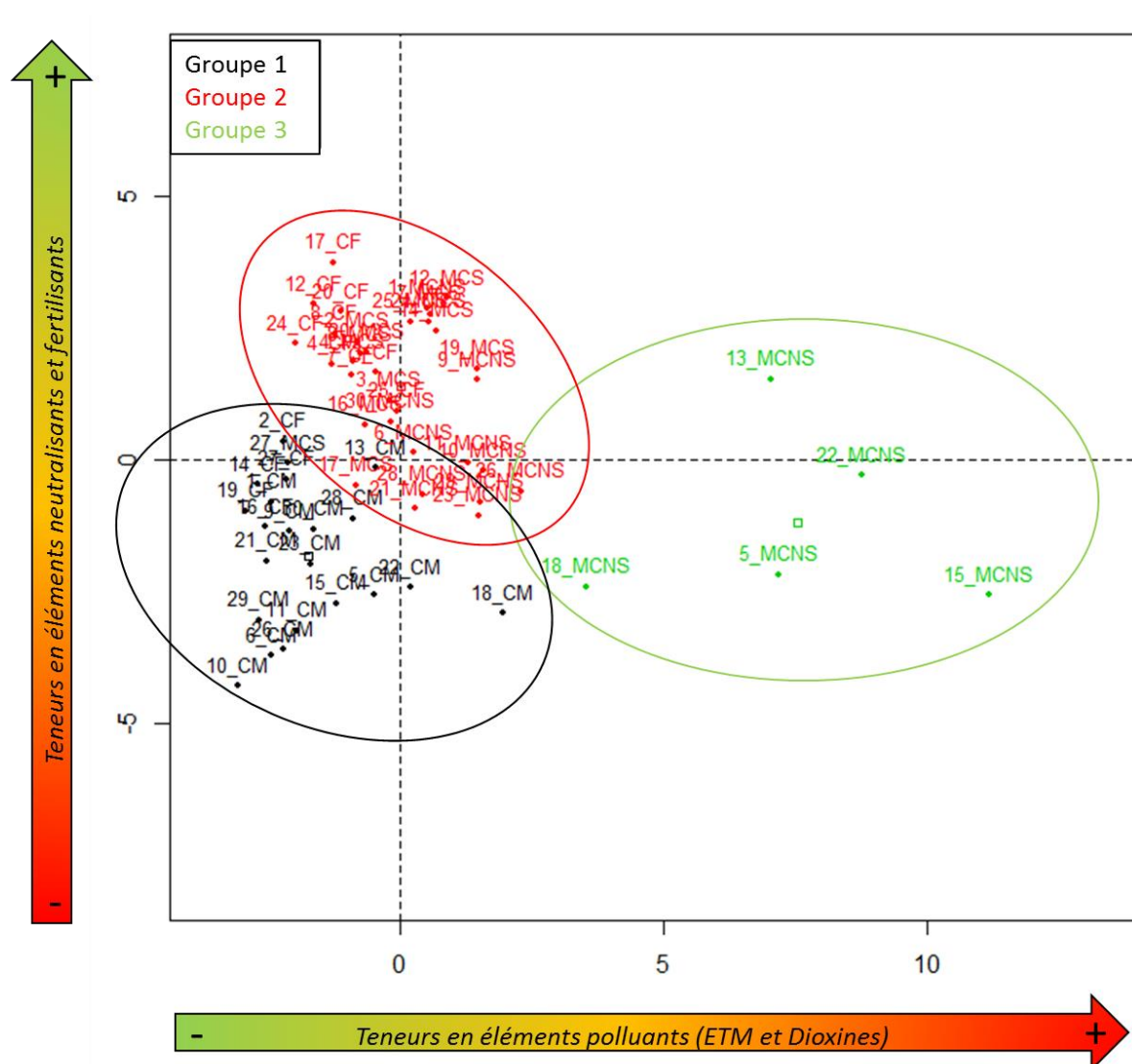
En complément de l'analyse en composante principale (ACP), une **analyse de classification ascendante hiérarchique (CAH)** a été réalisée à partir des données de la première analyse. Cette analyse a permis de rassembler les sites par famille cohérente.

▪ Détail de la méthode

Les échantillons sont agrégés entre eux selon leur plus fort degré de similarité, c'est-à-dire la plus grande ressemblance. La métrique utilisée pour réaliser la CAH est la distance euclidienne et la méthode d'aggrégation est la méthode de Ward. Les critères de ressemblance utilisés pour l'analyse sont les caractéristiques physico-chimiques, agronomique et les éléments polluants contenus dans les cendres, utilisés dans l'ACP.

Cette analyse permet de distinguer **3 groupes** de cendres présentant des caractéristiques communes :

- Le **groupe 1** est composé majoritairement par des cendres sous-foyer + sous-multicyclone (CM) qui sont caractérisées par des taux de perte au feu et de COT élevés.
- Le **groupe 2** regroupe à la fois des cendres sous-foyer (CF), et des cendres multicycloniques (MCS et MCNS) avec des teneurs en éléments neutralisants plus ou moins élevées.
- Le **groupe 3** est composé des cendres multicycloniques issues de la collecte non séparée des sites 5, 13, 15, 18 et 22. Il se discrimine nettement des autres types de cendres prélevés. Ces cendres sont caractérisées par de fortes teneurs en éléments traces métalliques, et dioxines.

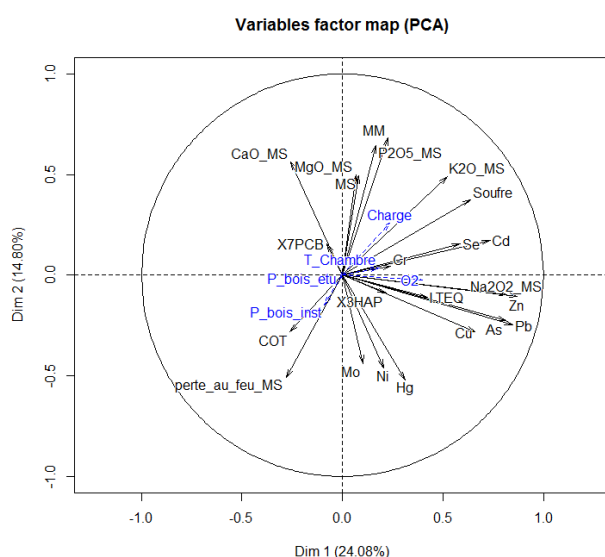


Analyse en composante principale réalisée à partir des analyses de cendres MCNS

Une **analyse exploratoire en composantes principales** (ACP) a également été réalisée sur un jeu de données restreint, c'est-à-dire les cendres MCNS, afin de rechercher les relations potentielles (corrélations) entre les caractéristiques physico-chimiques, les éléments neutralisants et fertilisants et l'innocuité des cendres, auxquelles ont été ajoutées les paramètres de fonctionnement.

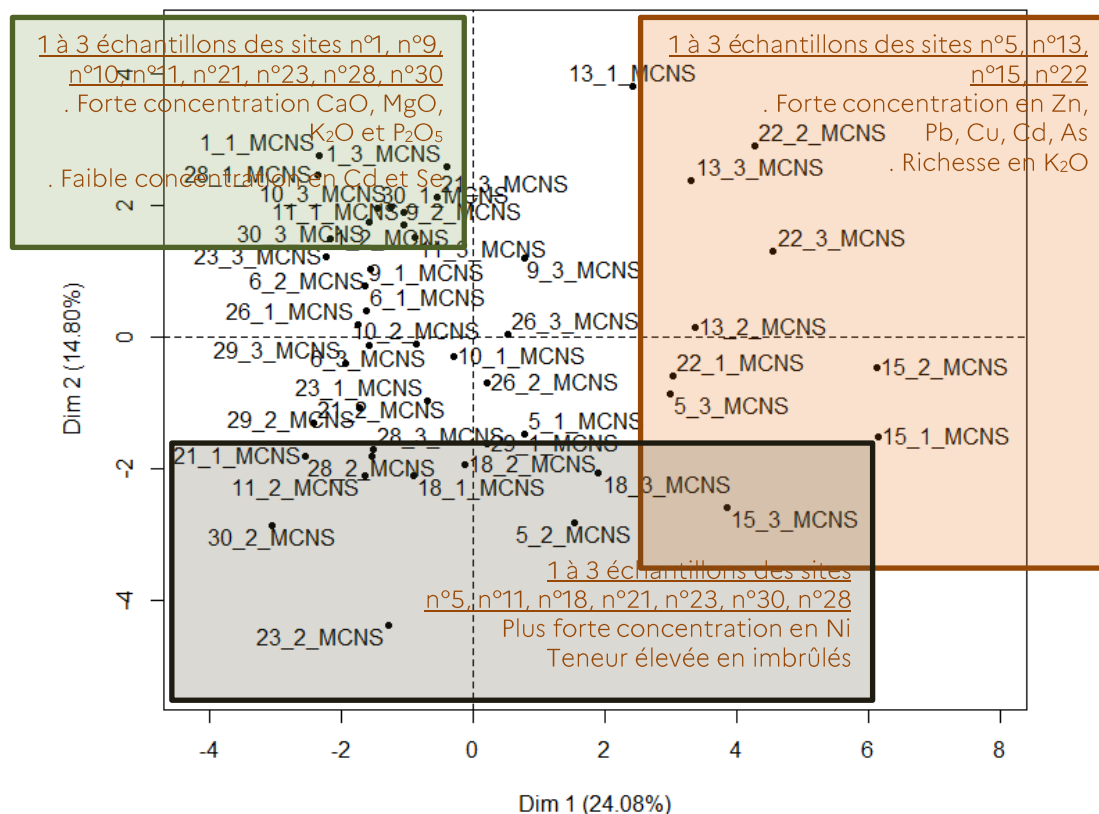
Figure 57 : Analyse exploratoire en Composante Principale (ACP) permettant l'étude des interactions entre les caractéristiques physico-chimiques des cendres multicycloniques non séparées (MCNS) sur les 16 sites collectant les cendres en mélange.

Projection des variables (en haut) et des types de cendres (en bas) dans le premier plan de l'ACP. L'analyse est basée sur les caractéristiques physico-chimiques, agronomiques, et les éléments polluants. Les paramètres de fonctionnement des chaudières (taux de charge, T° chambre, O2) ont été ajoutées en tant que paramètres supplémentaires (en bleu).



Comme précédemment, la **première composante** (axe 1 ou des abscisses) marque principalement le **caractère polluant des MCNS** (Cd, Zn, Pb, As, Cu, Se), mais qui semble relativement corrélé avec la présence de potasse (K_2O).

La **2^e composante** (axe 2 ou des ordonnées) représente la valeur agronomique dans sa partie positive. Sa partie négative met en lumière la relation entre les teneurs élevées en COT/perte au feu et la présence de mercure, de nickel et de molybdène.



Annexe 7 – Synthèse des caractéristiques physico-chimiques des 5 cendres multicycloniques de type MCNS (Groupe 3), des combustibles bois associés et des paramètres de combustion

Site	Campagne	Cendres MCNS (seuil de répartition en agriculture - arrêté du 3/08/2018)										Combustible (seuil de la SSD des bois d'emballage)										Conditions de la combustion		
		COT	AS	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg	Dioxines (OMS, 2005) ng TEQ/kgS	Approvisionnement	As	Pb	Cd	Cu	Cr	Zn	Hg	PCP	Chlore % (ww)	Taux de charge %	Température °C	Taux O2 %
LQ		1 000	1	0,4	5	5	1	5	5	0,10	variable	-	0,8	2,0	0,2	1,0	1,0	1,0	0,05	0,1	0,005			
Seu		-	-	10	1 000	1 000	200	800	3 000	10	-	-	4,0	50,0	5,0	30,0	30,0	200,0	0,20	3,0	0,030			
5	1	14 300	30	21,7	114	307	61	291	1 800	0,41	24	PF+SSD	0,8	3,0	0,2	3,0	1,0	23,0	0,05	0,1	0,014	83	822	4,8
5	2	62 100	21	32,6	170	380	84	305	1 980	0,45	15	PF+SSD	0,8	12,0	0,2	5,0	8,0	37,0	0,05	0,1	0,009	56	797	5,9
5	3	21 200	31	26,1	192	460	52	529	2 700	0,10	1 010	PF+SSD	0,8	3,0	0,2	18,0	2,0	48,0	0,05	2,6	0,009	50		6,3
13	1	14 300	10	35,7	106	244	26	117	2 390	0,10	9	PF+PB+SSD	0,8	2,0	0,3	3,0	2,0	59,0	0,05	0,1	0,010	64	663	12,9
13	2	62 100	20	55,2	99	259	48	287	3 900	0,21	34	PF+PB+SSD	0,8	2,0	0,4	2,0	4,0	33,0	0,05	0,1	0,011	100	902	6,3
13	3	21 200	54	96,7	60	135	16	234	4 110	0,12	21	PF+PB+SSD	0,8	2,0	0,3	2,0	2,0	30,0	0,05	0,1	0,006	70	818	8,1
15	1	18 500	131	77,0	139	299	43	847	8 260	0,20	366	PF+SSD	0,8	2,0	0,2	7,0	7,0	27,0	0,05	0,1	0,011	100	678	8,9
15	2	17 600	99	53,9	123	363	26	1 180	7 220	0,18	54	PF+SSD	0,8	5,0	0,3	4,0	6,0	39,0	0,05	2,4	0,009	68	705	11,0
15	3	10 800	109	42,0	142	321	38	569	4 740	0,42	83	PF+SSD	10,5	3,0	0,2	9,0	15,0	42,0	0,05	0,2	0,010	63	746	10,9
18	1	61 600	26	6,3	86	366	46	121	720	0,10	9	PF+PC+SSD	1,6	4,0	0,2	5,0	2,0	32,0	0,05	0,4	0,015	73	439	9,5
18	2	37 500	54	8,5	85	282	39	223	896	0,26	22	PF+PC+SSD	1,7	5,0	0,3	15,0	24,0	38,0	0,05	0,1	0,055	85	960	7,5
18	3	33 100	87	14,3	104	500	38	412	2 090	0,36	13	PF+PC+SSD	3,1	7,0	0,2	6,0	21,0	35,0	0,05	0,6	0,020	88	1 017	9,8
22	1	26 600	42	51,0	209	366	34	612	2 850	0,19	314	PF+PB+SSD	0,8	2,0	0,2	2,0	1,0	11,0	0,05	0,1	0,009	75	623	4,5
22	2	30 000	67	128,0	243	391	31	310	2 470	0,10	131	PF+PB+SSD	0,8	2,0	0,2	2,0	2,0	8,0	0,05	0,1	0,005	86	889	5,0
22	3	54 600	72	56,0	177	338	22	590	4 730	0,12	438	PF+PB+SSD	0,8	3,0	0,2	8,0	8,0	25,0	0,05	0,2	0,022	90	909	5,0

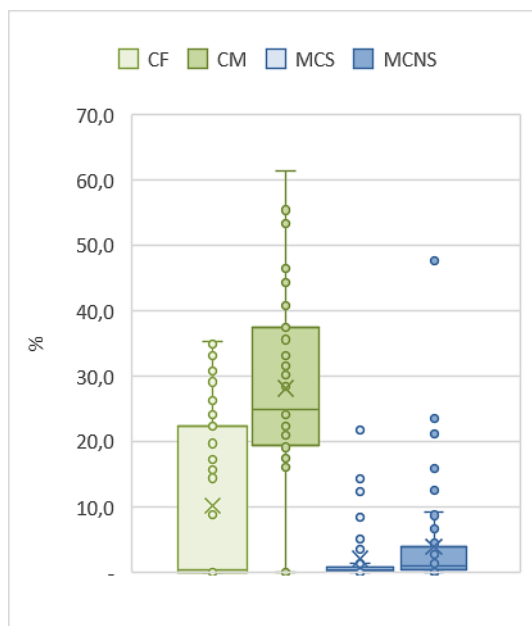
Annexe 8 – Caractéristiques des cendres

Tous les résultats analytiques n'ont pas été présentés dans le texte principal de l'étude.

Les paramètres suivants sont en conséquence présentés ci-après :

- Paramètres physico-chimiques :
 - Humidité ;
 - Conductivité ;
 - pH.
- Valeur agronomique :
 - Éléments majeurs (Ca, Mg, P, K, Na, S) ;
 - Éléments fertilisants :
 - Na₂O ;
 - Formes azotées (azote ammoniacal, azote nitrique, azote organique) ;
 - Carbone organique ;
 - Rapport C/N.
- Éléments traces métalliques :
 - Oligo-éléments (chrome, cuivre, nickel, arsenic) ;
 - Autres ETM (sélénium, molybdène).
- Composés traces organiques : PCB.

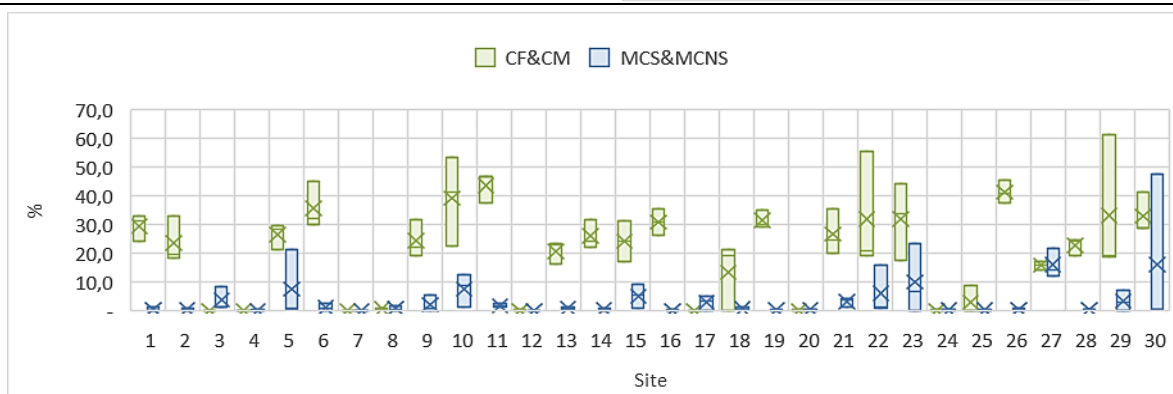
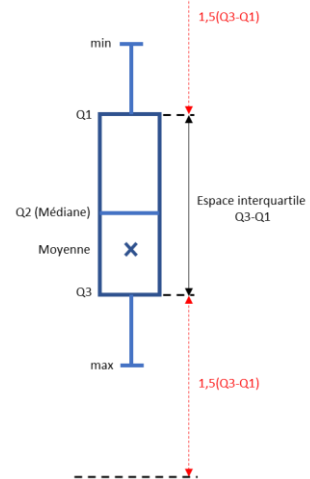
Composition des cendres par installation et par type de cendres



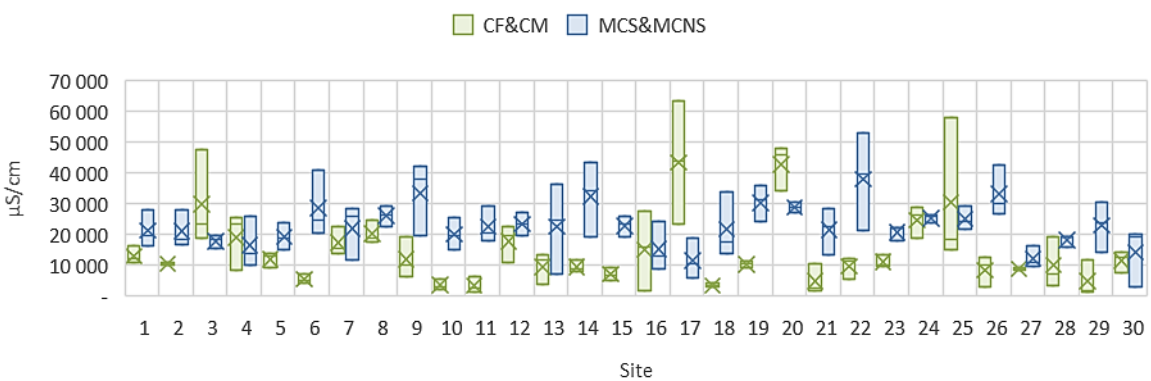
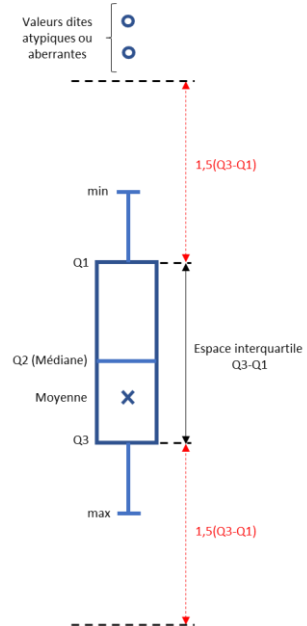
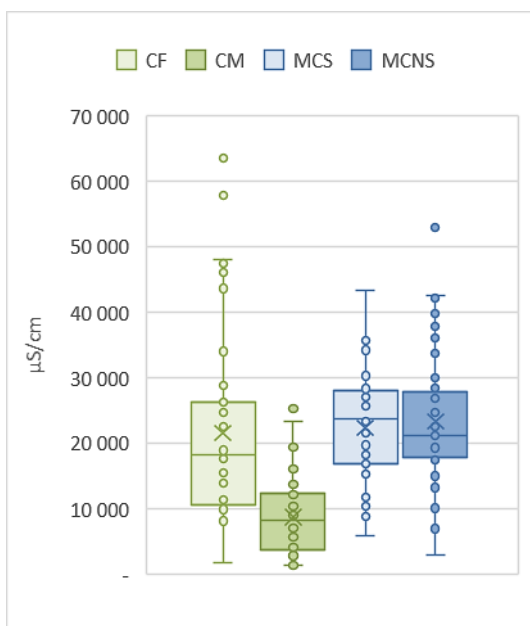
Légende :

Valeurs dites
atypiques ou
aberrantes

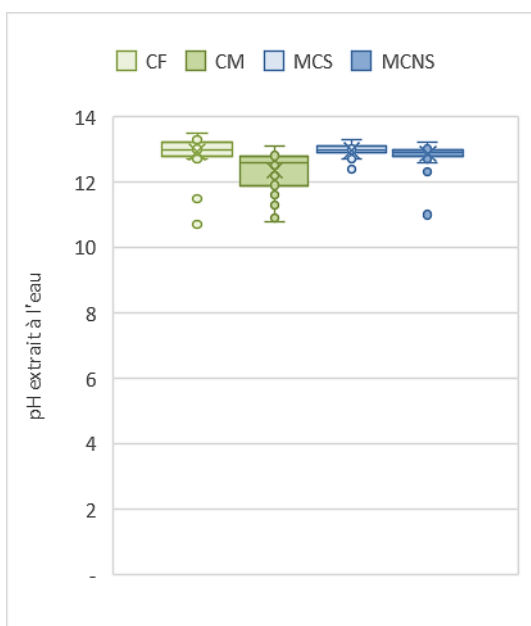
Légende :



Composition des cendres par installation et par type de cendres



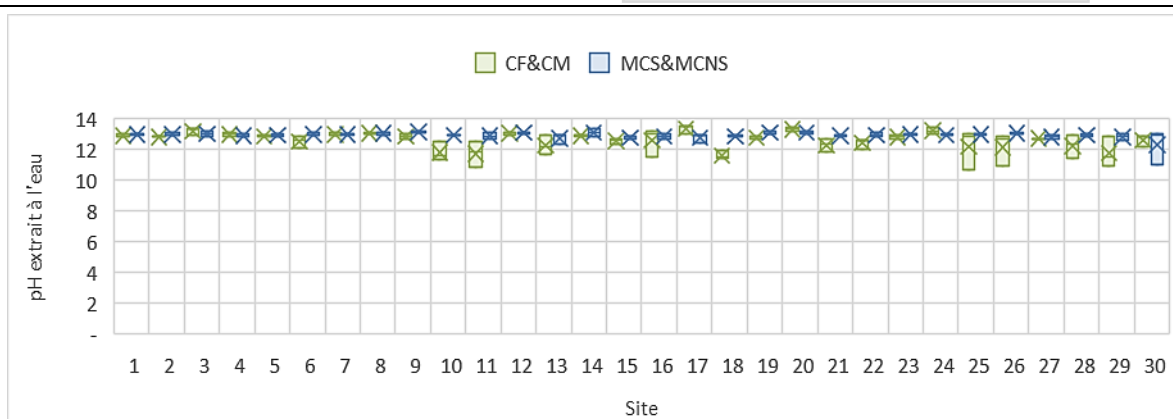
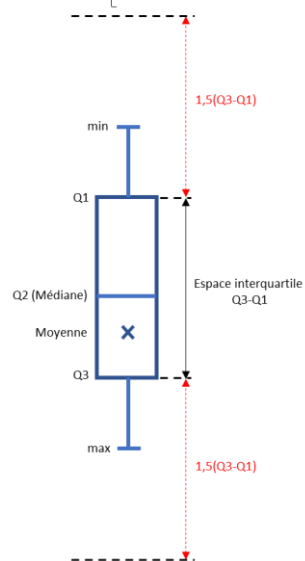
Composition des cendres par installation et par type de cendres



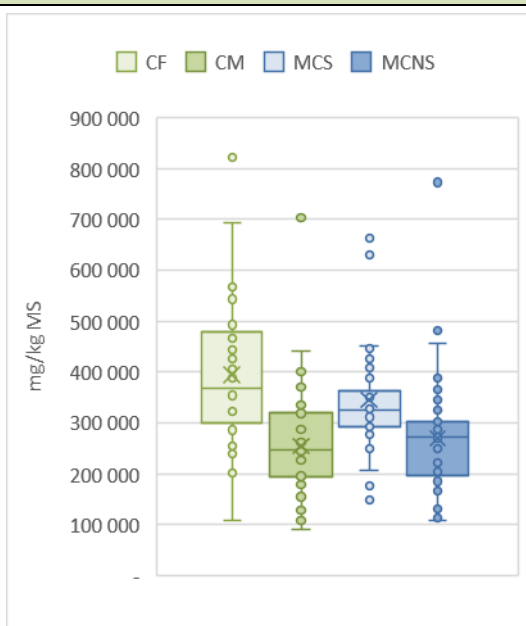
Légende :

Valeurs dites
atypiques ou
aberrantes

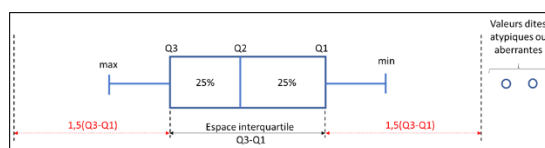
Légende :



Composition des cendres par installation et par type de cendres

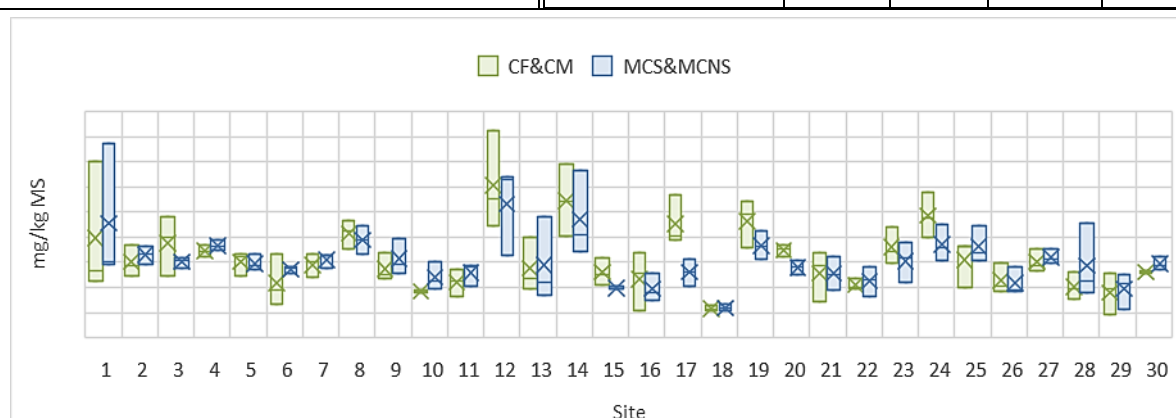


Légende :

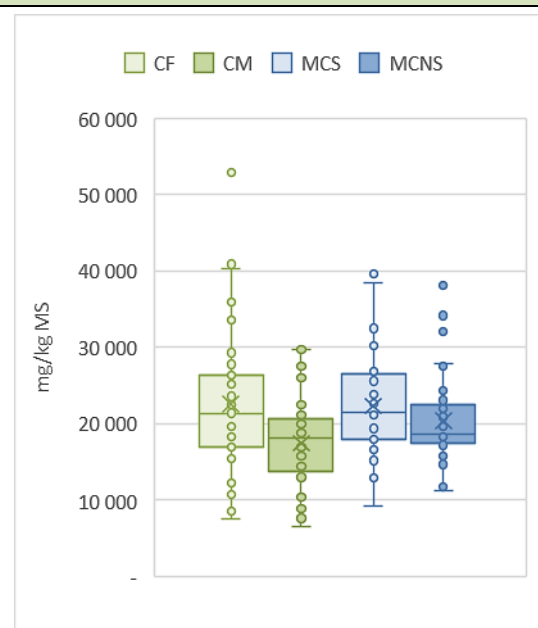


Statistique descriptive :

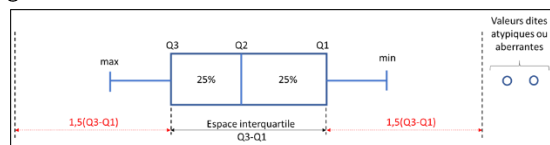
Calcium (Ca) mg/kg MS	Cendres			
	CF	CM	MCS	MCNS
Moyenne	394 846	254 050	345 385	269 882
Min	109 000	90 500	149 000	107 000
1 ^{er} quartile (Q1)	311 000	194 250	295 500	200 000
Médiane (Q2)	367 000	247 500	326 000	271 000
3 ^{ème} quartile (Q3)	472 500	313 500	362 500	302 500
Max	822 000	703 000	663 000	773 000



Composition des cendres par installation et par type de cendres

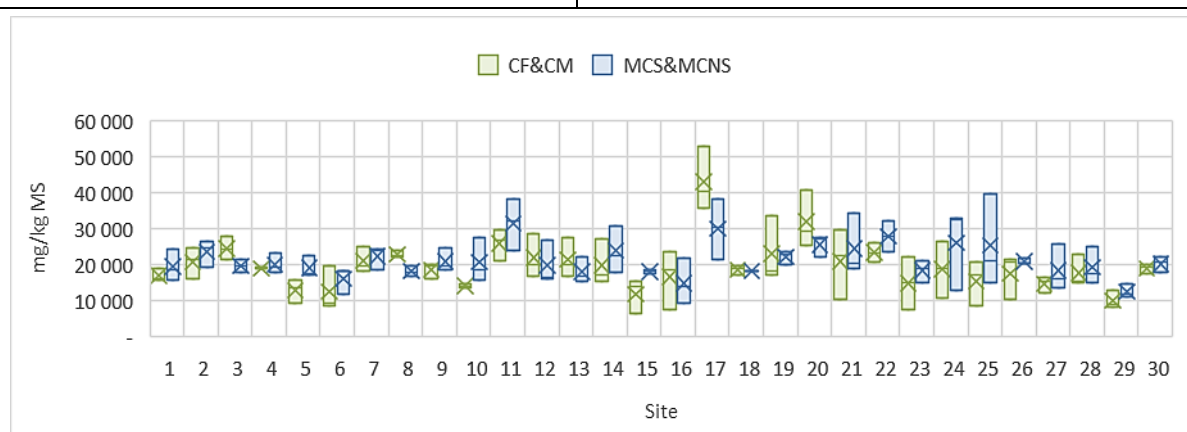


Légende :

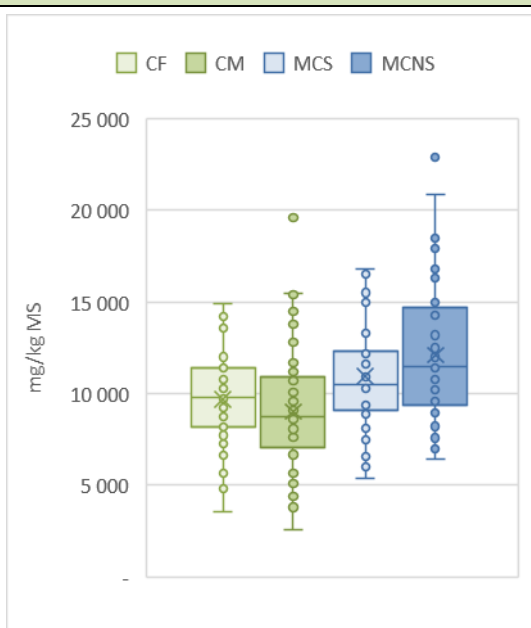


Statistique descriptive :

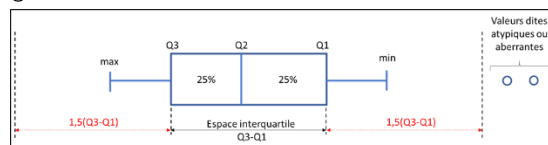
Magnésium (Mg) mg/kg MS	Cendres			
	CF	CM	MCS	MCNS
Moyenne	22633	17430	22320	20373
Min	7490	6570	9190	11200
1 ^{er} quartile (Q1)	17000	13975	18000	17550
Médiane (Q2)	21400	18200	21500	18700
3 ^{ème} quartile (Q3)	25950	20475	26100	22400
Max	52900	29800	39700	38100



Composition des cendres par installation et par type de cendres

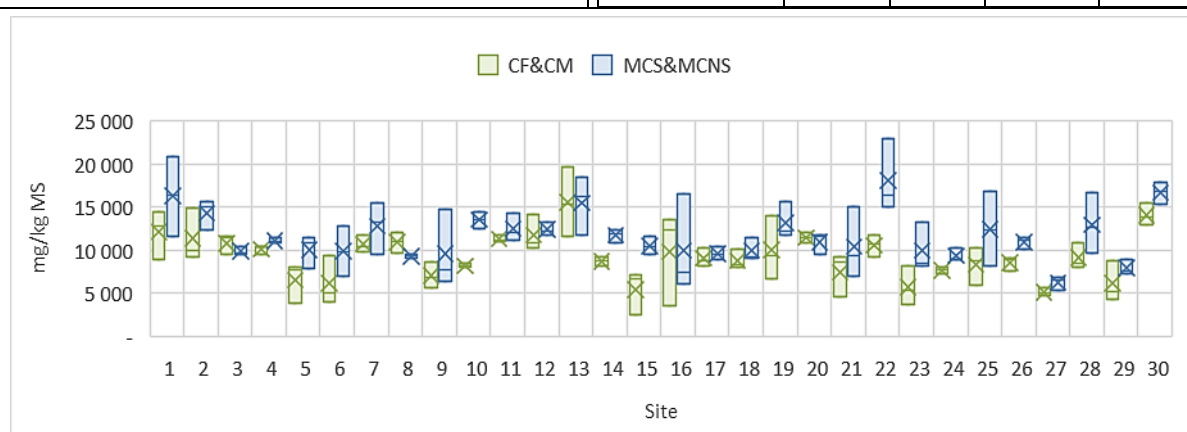


Légende :

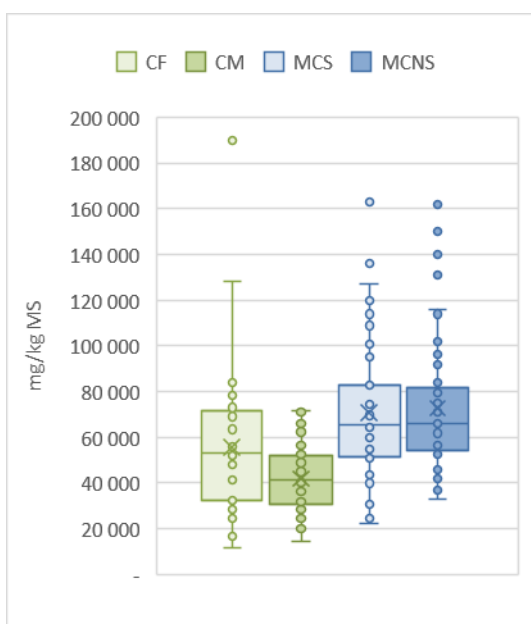


Statistique descriptive :

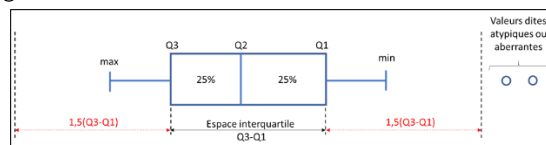
Phosphore (P) mg/kg MS	Cendres			
	CF	CM	MCS	MCNS
Moyenne	9686	9021	10948	12124
Min	3550	2560	5380	6470
1 ^{er} quartile (Q1)	8170	7213	9245	9465
Médiane (Q2)	9780	8735	10500	11500
3 ^{ème} quartile (Q3)	11400	10850	12300	14600
Max	14900	19600	16800	22900



Composition des cendres par installation et par type de cendres

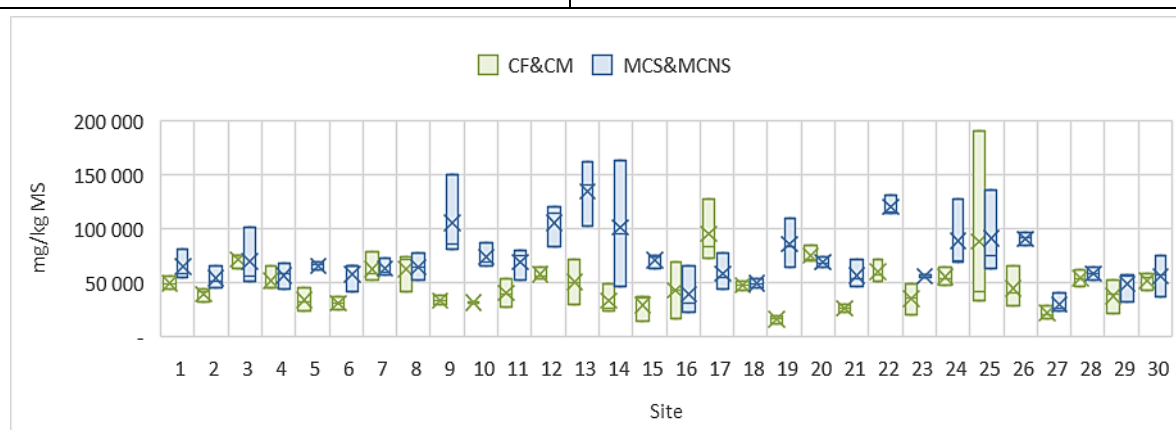


Légende :

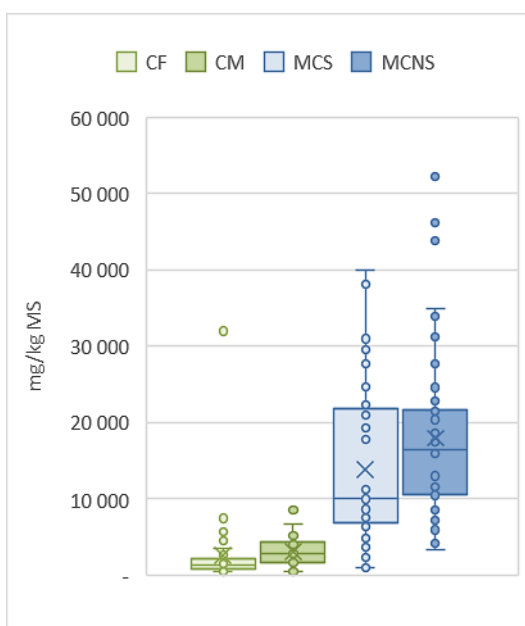


Statistique descriptive :

Phosphore (P) mg/kg MS	Cendres			
	CF	CM	MCS	MCNS
Moyenne	55 554	41 916	70 887	72 686
Min	11 900	14 600	22 500	32 800
1 ^{er} quartile (Q1)	33 150	31 000	51 650	55 400
Médiane (Q2)	53 100	41 300	65 700	66 000
3 ^{ème} quartile (Q3)	71 400	51 575	80 150	81 350
Max	190 000	71 400	163 000	162 000



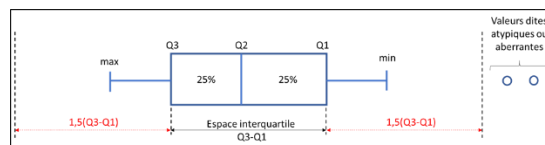
Composition des cendres par installation et par type de cendres



Information analytique :

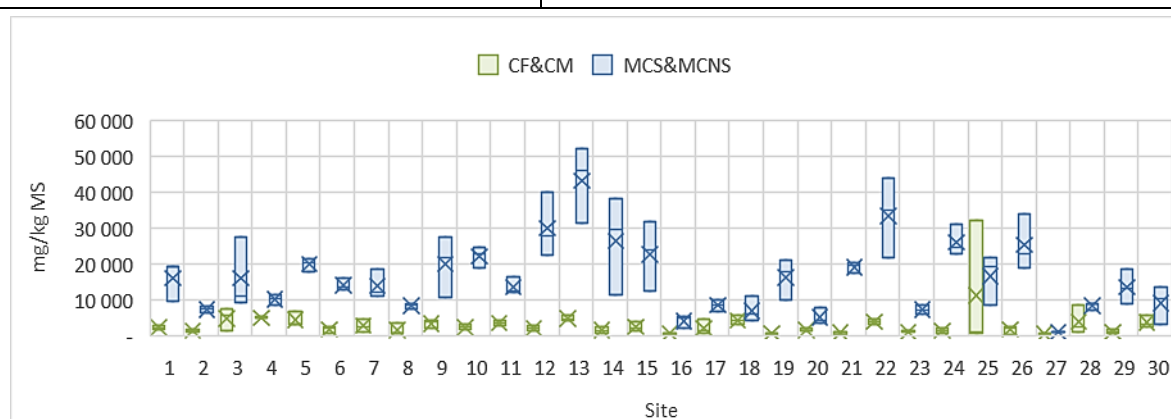
- Limite de quantification (LQ) : 20 mg/kgMS
- Incertitude sur la mesure : - %

Légende :

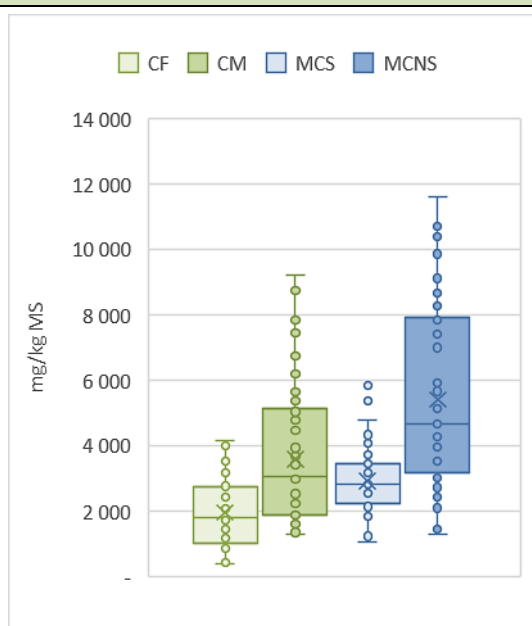


Statistique descriptive :

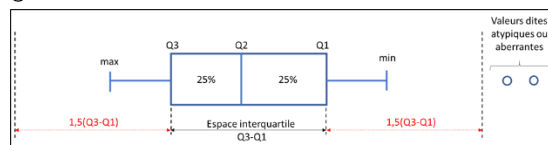
Soufre (S) mg/kg MS	Cendres			
	CF	CM	MCS	MCNS
IC à 95 % - Borne inf.	1 798	2 500	11 032	15 889
Moyenne	2 551	3 055	13 874	17 984
IC à 95 % - Borne sup.	5 048	3 521	17 079	22 120
Min	403	425	1 010	3 410
1 ^{er} quartile (Q1)	790	1 655	7 200	10 500
Médiane (Q2)	1 370	2 865	10 000	16 400
3 ^{ème} quartile (Q3)	2 180	4 283	21 400	21 700
Max	32 000	8 530	40 000	52 300



Composition des cendres par installation et par type de cendres

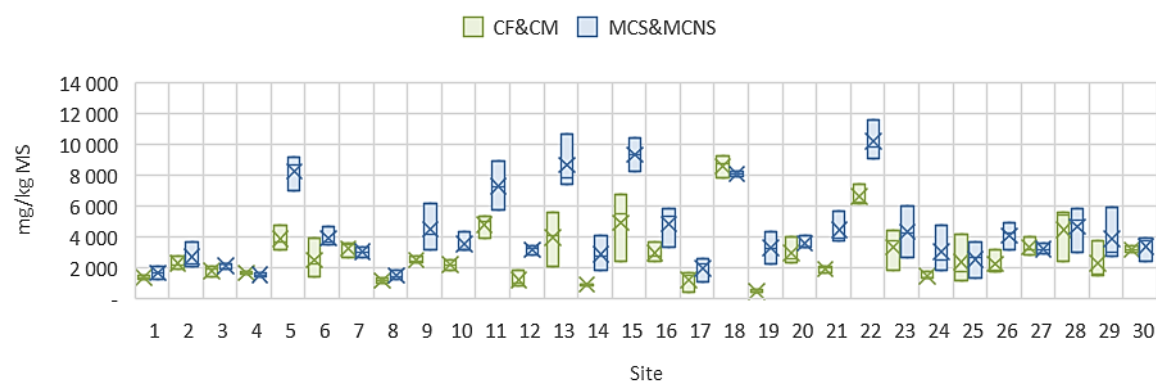


Légende :



Statistique descriptive :

Sodium (Na) mg/kg MS	Cendres			
	CF	CM	MCS	MCNS
Moyenne	1 957	3 584	2 922	5 404
Min	393	1 270	1 060	1 290
1 ^{er} quartile (Q1)	1 084	1 880	2 250	3 165
Médiane (Q2)	1 780	3 060	2 830	4 650
3 ^{ème} quartile (Q3)	2 715	4 973	3 420	7 880
Max	4 150	9 220	5 840	11 600



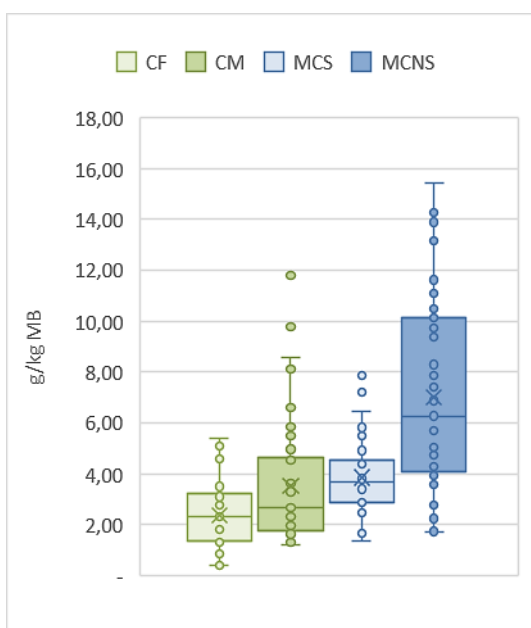
Valeur agronomique – éléments fertilisants	Na ₂ O
Origine	
C'est un métal mou, réactif et ayant un point de fusion faible, avec une densité relative de 0.97 à 20°C (68°F). Du point de vue commercial, le sodium est le plus important de tous les métaux alcalins. Le sodium est le sixième élément le plus abondant dans la croûte terrestre, qui contient 2.83% de sodium sous toutes ses formes. Le sodium est, après le chlore, le deuxième élément le plus abondant dissous dans l'eau de mer. Les sels de sodium les plus importants trouvés dans la nature sont le chlorure de sodium (sel de roche), le carbonate de sodium (soude), le borate de sodium (borax), le nitrate de sodium et le sulfate de sodium. Les sels de sodium sont trouvés dans l'eau de mer, les lacs salés, les lacs alcalins et dans l'eau de source minérale. Le sodium réagit rapidement avec l'eau, la neige et la glace, pour produire de l'hydroxyde de sodium et de l'hydrogène. Quand il est exposé à l'air, le sodium métallique perd son aspect argenté et acquiert une couleur grise opaque due à la formation d'un enduit d'oxyde de sodium.	
Mobilité	
Ce produit chimique n'est pas mobile dans sa forme solide, bien qu'il absorbe l'humidité très facilement. Une fois sous forme liquide, l'hydroxyde de sodium pénètre rapidement dans le sol sous forme de lixiviation, souillant probablement des sources d'eau. Le contact du sodium avec de l'eau, y compris la transpiration cause la formation des vapeurs d'hydroxyde de sodium, qui sont fortement irritantes pour la peau, les yeux, le nez et la gorge. Ceci peut causer l'éternuement et la toux. Les expositions très graves peuvent occasionner une respiration difficile, une toux ou une bronchite. Le contact avec la peau peut donner des démangeaisons, des picotements, des brûlures et des dommages permanents. Le contact avec les yeux peut avoir comme conséquence des dommages permanents voire la perte de vue.	
Utilité	
L'Oxyde de sodium Na₂O, précisément, joue un rôle important dans les arts du feu (glaçures, couvertes, verre, agent contre la floculation pour les barbotines). C'est avant tout un fondant majeur très puissant, mais aussi un agent brillant qui magnifie les couleurs. Il a en revanche une tendance potentiellement pénalisante à se dilater lors de la cuisson et semble fragiliser l'émail, rendant celui-ci sensible aux agressions mécaniques, thermiques et autres. Son comportement et son action sont extrêmement proches de celles de l'oxyde de potassium ou de lithium.	
Seuil réglementaire	
Aucun seuil n'est connu à ce jour.	
Références	

<http://online-dotapea-archive.e-monsite.com/medias/files/sodium.html>

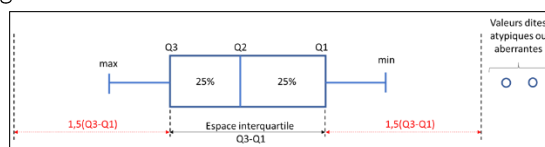
<http://boowiki.info/art/des-oxydes-inorganiques-et-des-anhydrides/l-oxyde-de-sodium.html>

<https://www.lenntech.fr/periodique/elements/na.htm>

Composition des cendres par installation et par type de cendres

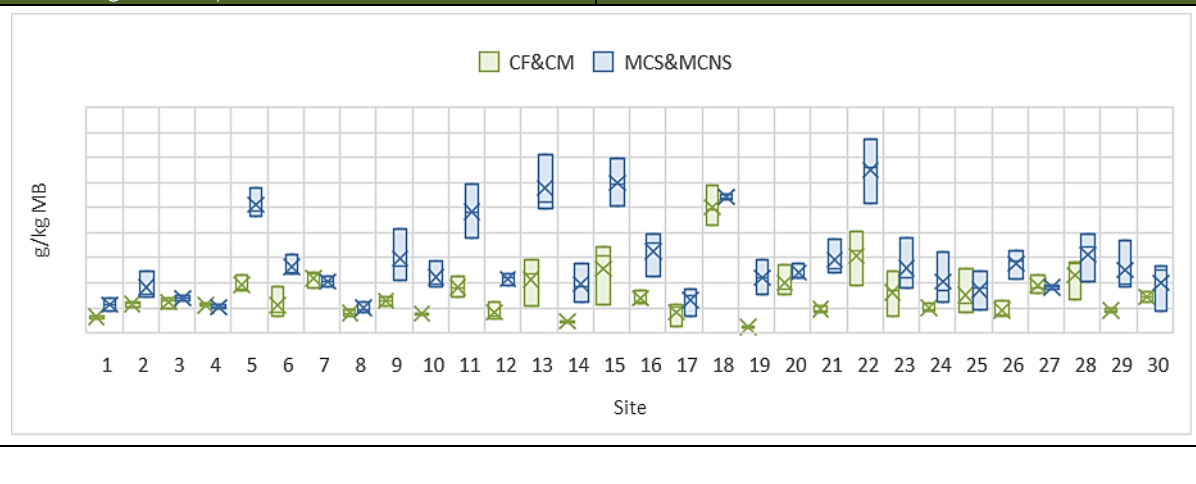


Légende :

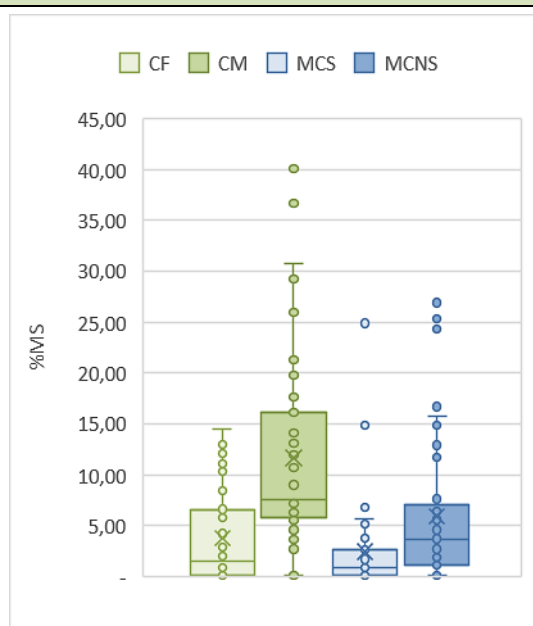


Statistique descriptive :

Na ₂ O mg/kg MS	Cendres			
	CF	CM	MCS	MCNS
IC à 95 % - Borne inf.	1,99	2,94	3,49	5,99
Moyenne	2,38	3,51	3,86	7,00
IC à 95 % - Borne sup.	2,80	4,34	4,37	8,03
Min	0,38	1,18	1,36	1,71
1 ^{er} quartile (Q1)	1,45	1,77	2,89	4,13
Médiane (Q2)	2,32	2,65	3,65	6,27
3 ^{ème} quartile (Q3)	3,17	4,58	4,53	10,03
Max	5,41	11,80	7,86	15,45



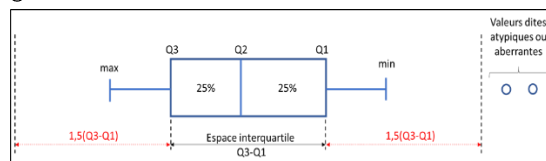
Composition des cendres par installation et par type de cendres



Information analytique :

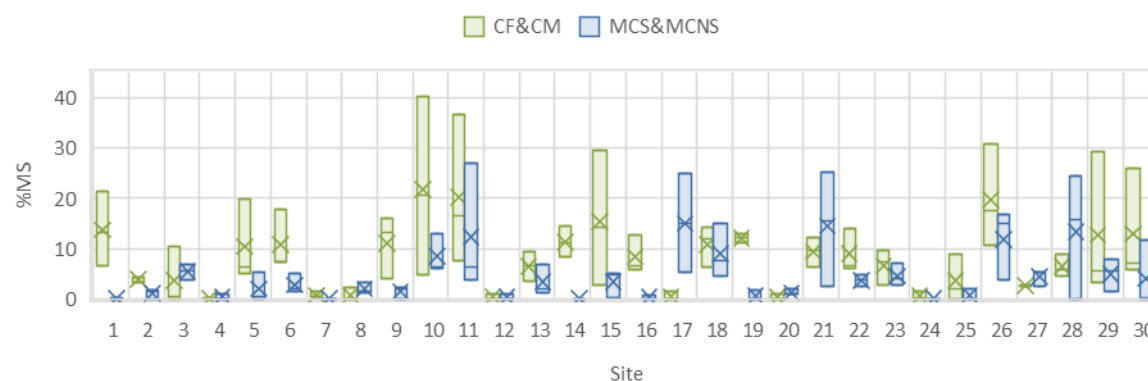
- Limite de quantification (LQ) : 0,1 %
- Incertitude sur la mesure : - %

Légende :



Statistique descriptive :

Perte au feu à 550°C % sur sec	Cendres			
	CF	CM	MCS	MCSN
IC à 95 % - Borne inf.	1,97	5,78	1,33	4,02
Moyenne	3,79	11,63	2,44	5,90
IC à 95 % - Borne sup.	4,05	8,23	5,00	7,52
Min	0,10	0,10	0,10	0,10
1 ^{er} quartile (Q1)	0,10	5,80	0,10	1,20
Médiane (Q2)	1,50	7,60	0,90	3,70
3 ^{ème} quartile (Q3)	6,20	15,15	2,35	6,90
Max	14,50	40,10	24,90	26,90

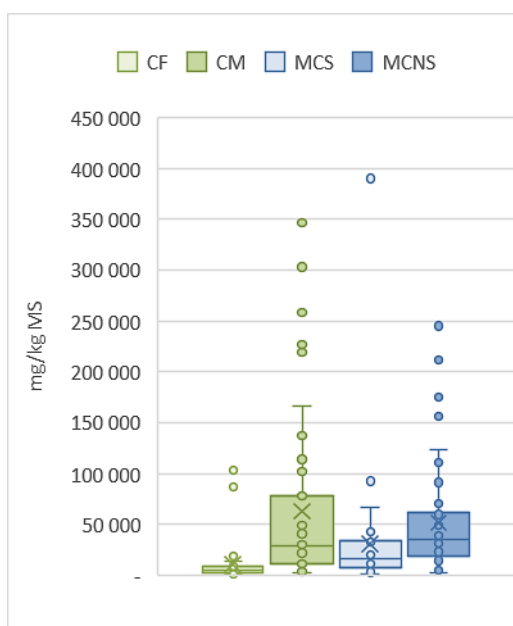


Seuils réglementaire et normatifs

Les exigences en termes de qualité des « produits » au regard de la réglementation et des normes sont :

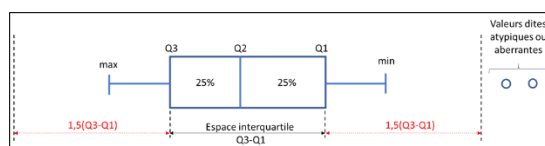
- Arrêté du 3 août 2018 (rubrique 2910 – combustion) : - %MB
- Norme NF U 44-095 (compost de boues) : ≥ 20 %MB
- Norme NF U 44-051 (amendement organique) : ≥ 20 %MB
- Norme NF U 42-001 (engrais) : - %MB

Composition des cendres par installation et par type de cendres

Information analytique :

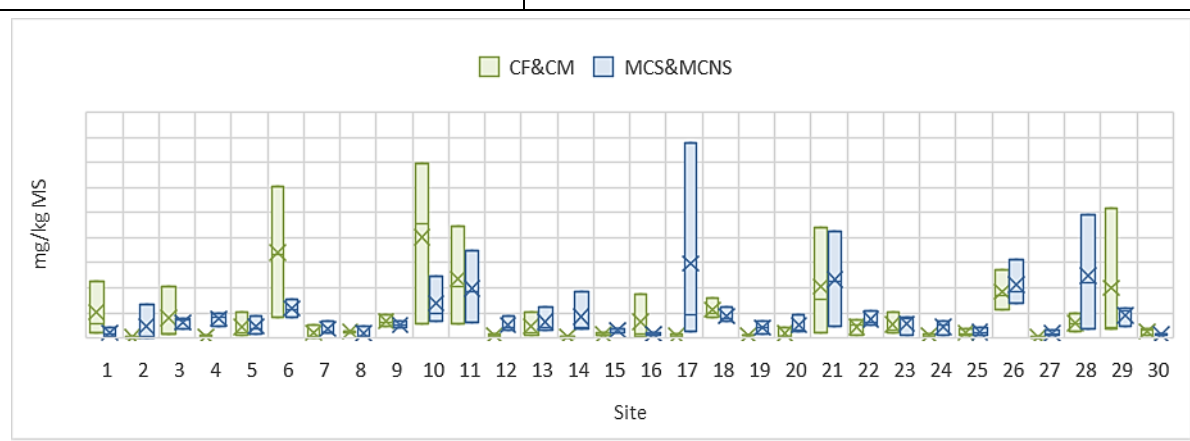
- Limite de quantification (LQ) : 1 000 mg/kgMS
- Incertitude sur la mesure : 25 %

Légende :

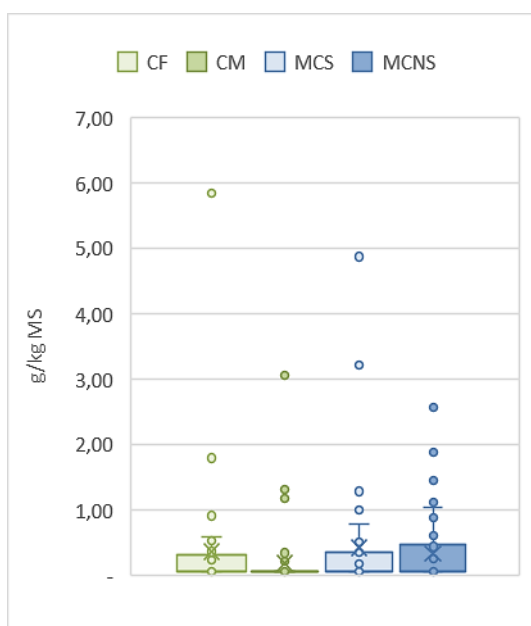


Statistique descriptive :

Carbone Organique Total (COT) mg/kg MS	Cendres			
	CF	CM	MCS	MCNS
IC à 95 % - Borne inf.	6 016	46 148	3 9886	40 430
Moyenne	10 769	62 975	30 675	51 779
IC à 95 % - Borne sup.	20 357	93 353	71 771	71 071
Min	1 000	2 220	1 330	2 580
1 ^{er} quartile (Q1)	2 595	10 850	8 050	19 400
Médiane (Q2)	4 780	28 300	15 600	34 700
3 ^{ème} quartile (Q3)	8 340	66 750	33 350	60 600
Max	103 000	347 000	390 000	245 000



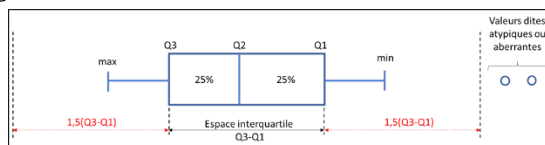
Composition des cendres par installation et par type de cendres



Information analytique :

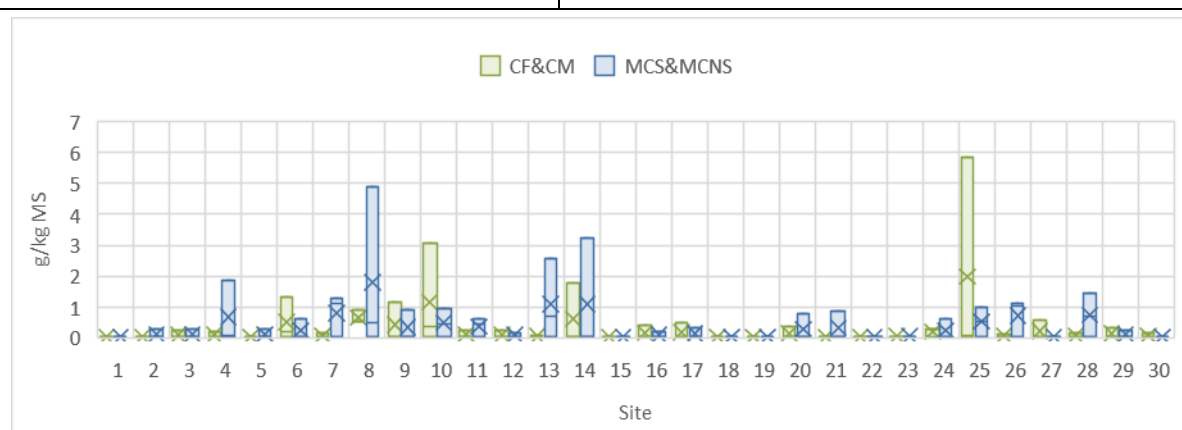
- Limite de quantification (LQ) : - g/kgMS
- Incertitude sur la mesure : - %

Légende :



Statistique descriptive :

Azote Total (N) % sur sec	Cendres			
	CF	CM	MCS	MCNS
IC à 95 % - Borne inf.	0,17	0,10	0,23	0,22
Moyenne	0,36	0,19	0,42	0,33
IC à 95 % - Borne sup.	0,95	0,40	0,96	0,52
Min	0,05	0,05	0,05	0,05
1 ^{er} quartile (Q1)	0,05	0,05	0,05	0,05
Médiane (Q2)	0,05	0,05	0,05	0,05
3 ^{ème} quartile (Q3)	0,30	0,06	0,33	0,46
Max	5,84	3,06	4,87	2,57

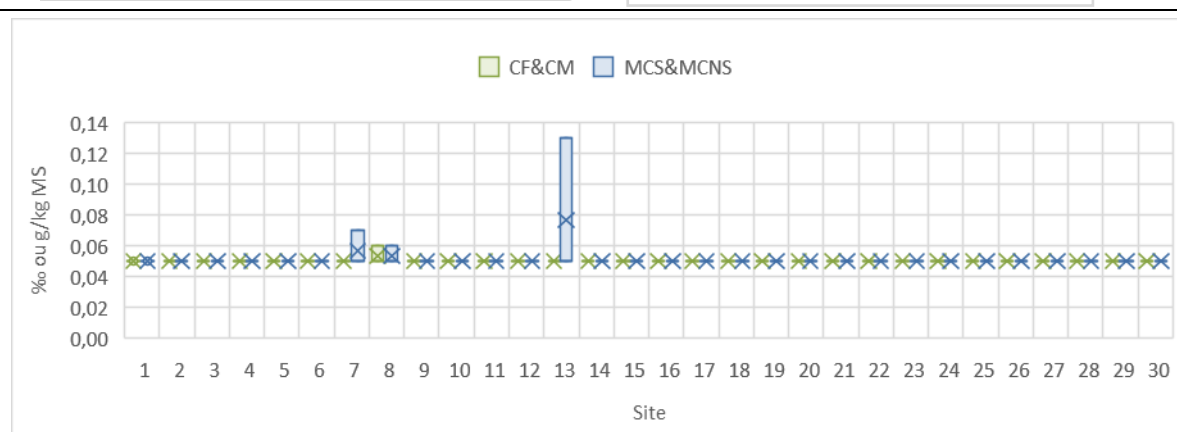
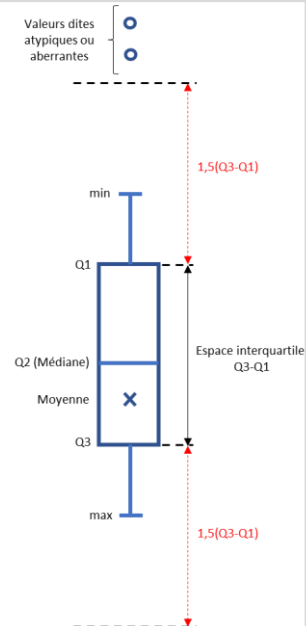
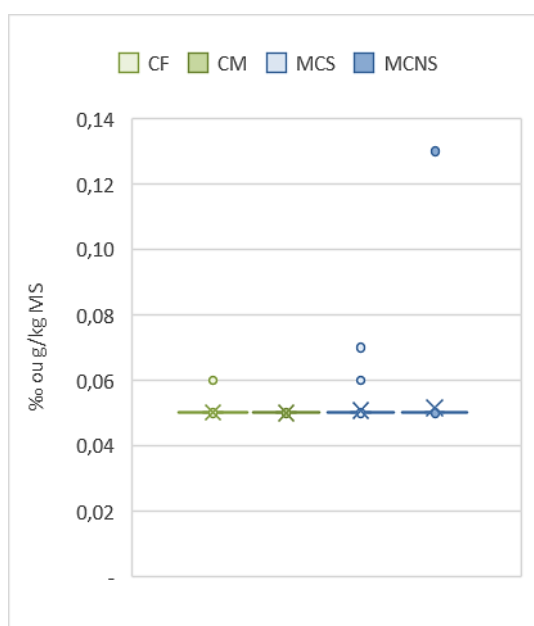


Seuils réglementaire et normatifs

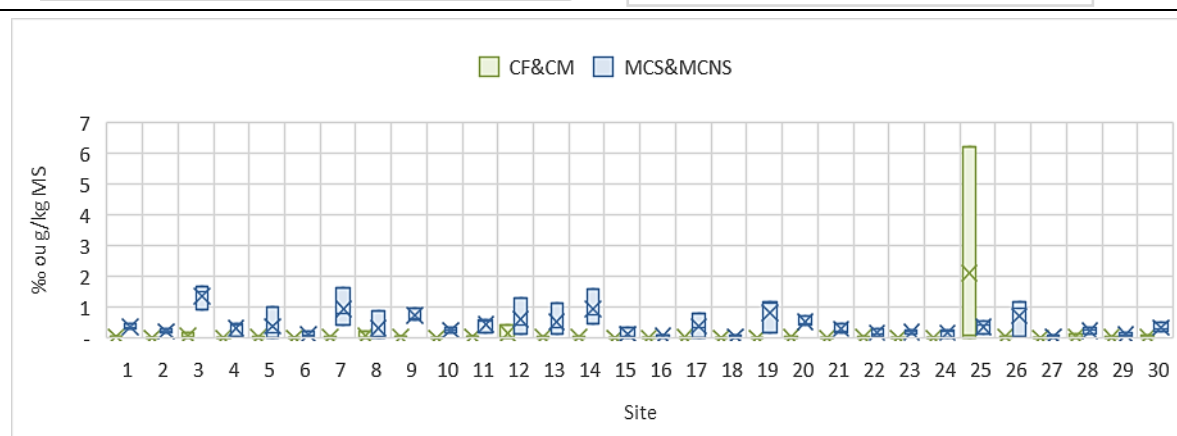
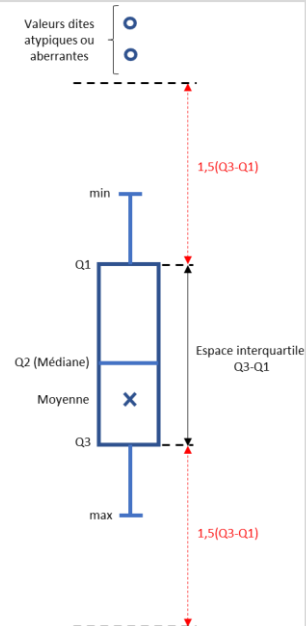
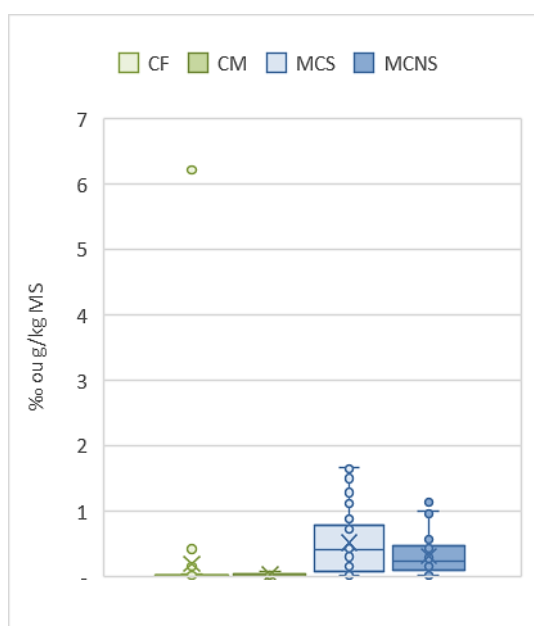
Les exigences en termes de qualité des « produits » au regard de la réglementation et des normes sont :

- | | | |
|--|---------|--------------------------|
| - Arrêté du 3 août 2018 (rubrique 2910 – combustion) : | - %MB | |
| - Norme NF U 44-095 (compost de boues) : | < 3 %MB | (équival. à < 30 g/kgMB) |
| - Norme NF U 44-051 (amendement organique) : | < 3 %MB | (équival. à < 30 g/kgMB) |
| - Norme NF U 42-001 (engrais) : | %MB | |

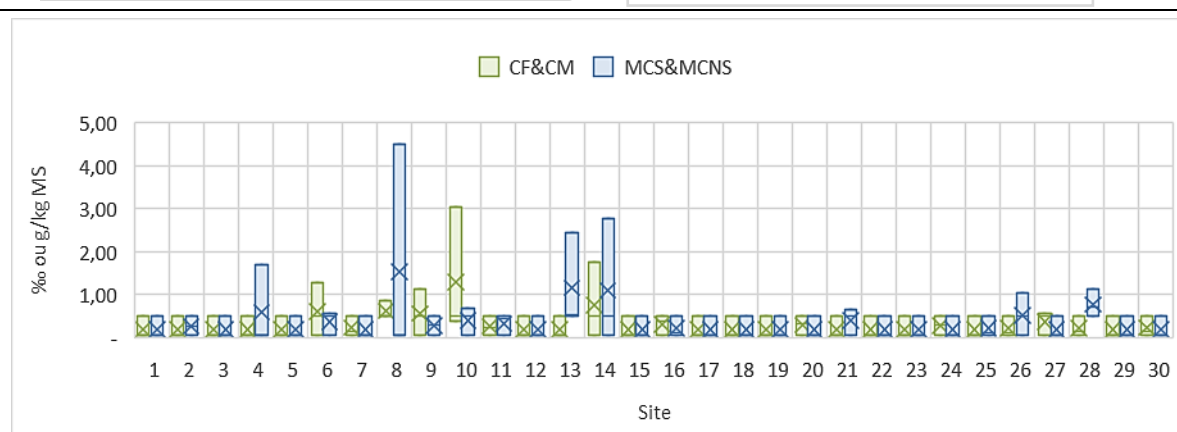
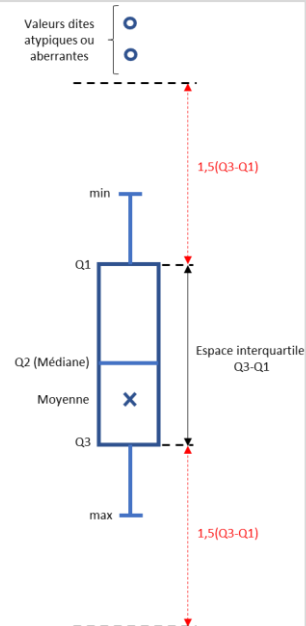
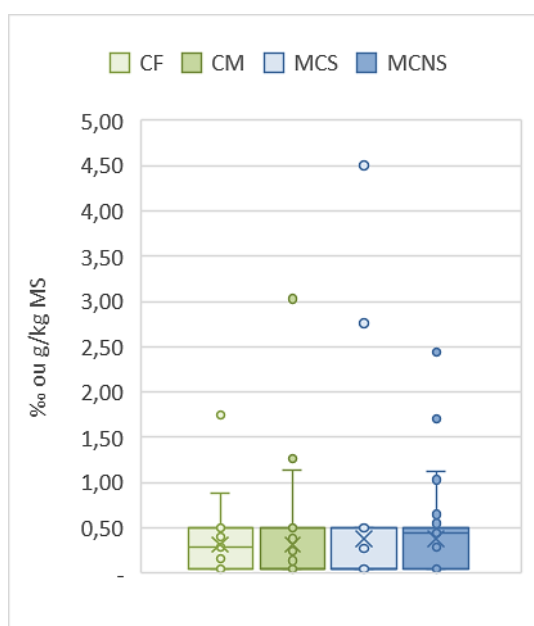
Composition des cendres par installation et par type de cendres



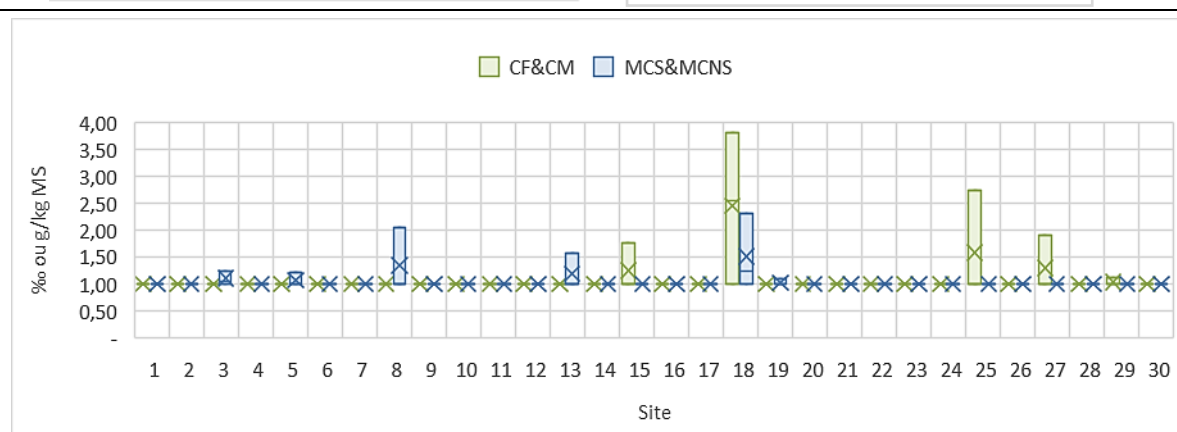
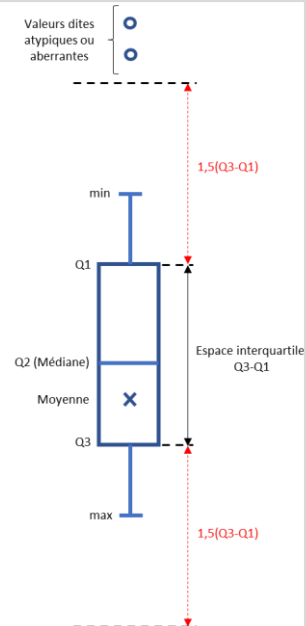
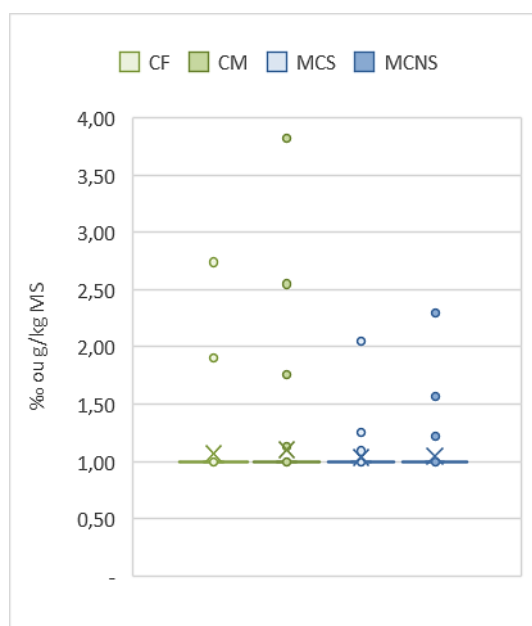
Composition des cendres par installation et par type de cendres



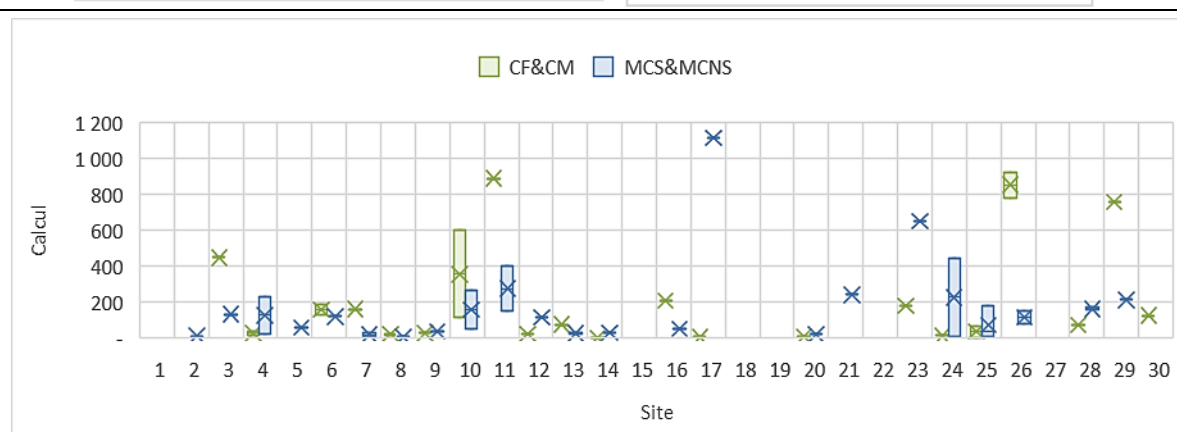
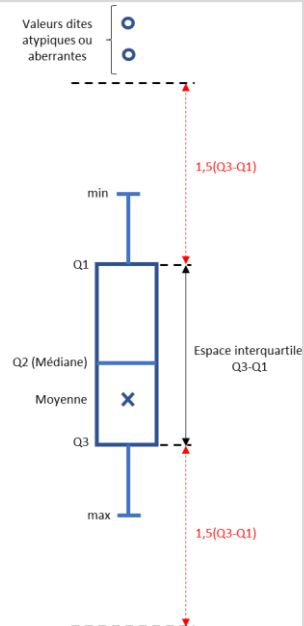
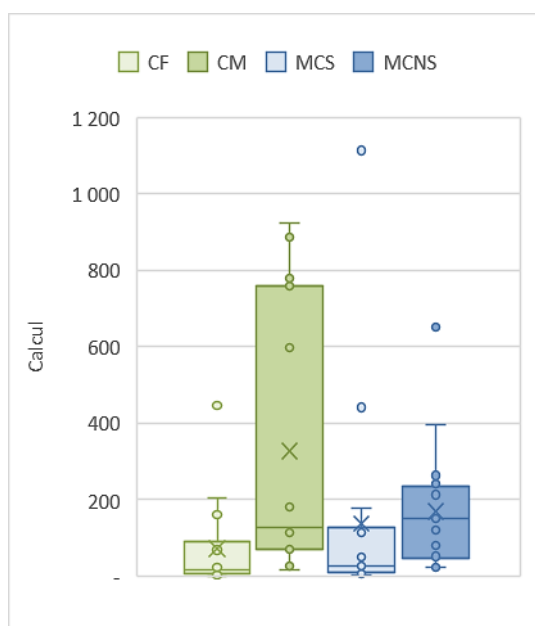
Composition des cendres par installation et par type de cendres



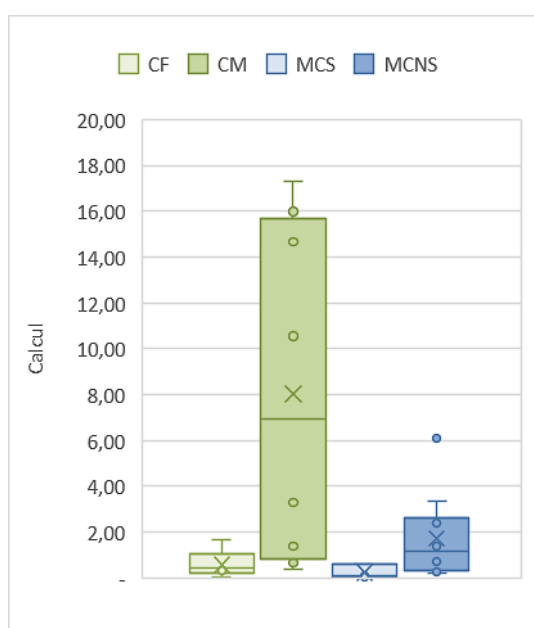
Composition des cendres par installation et par type de cendres



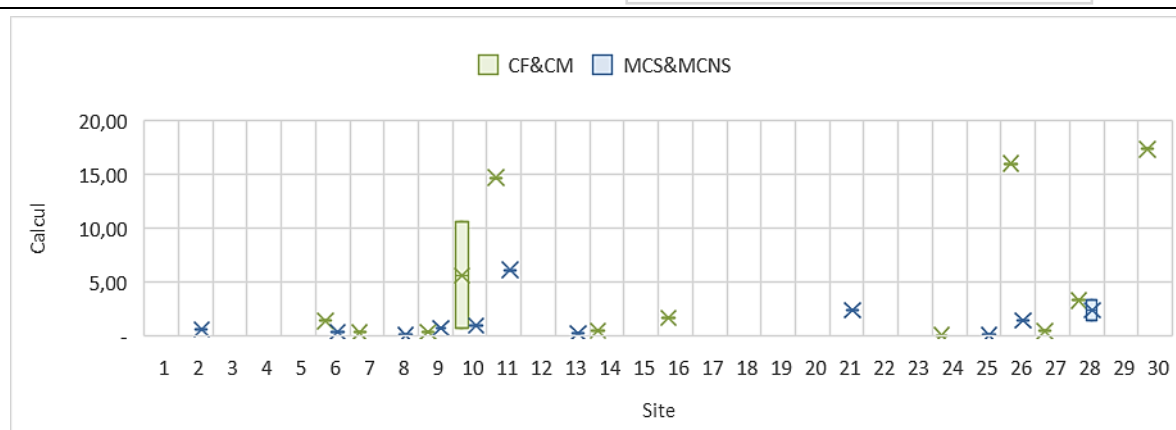
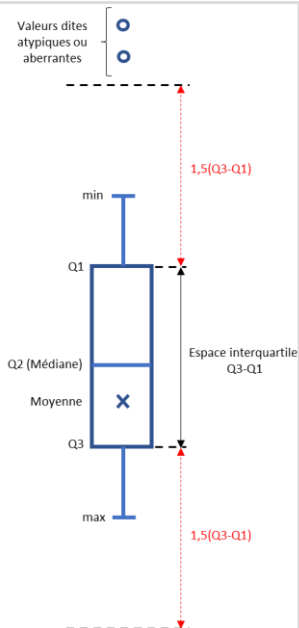
Composition des cendres par installation et par type de cendres



Composition des cendres par installation et par type de cendres



Légende :

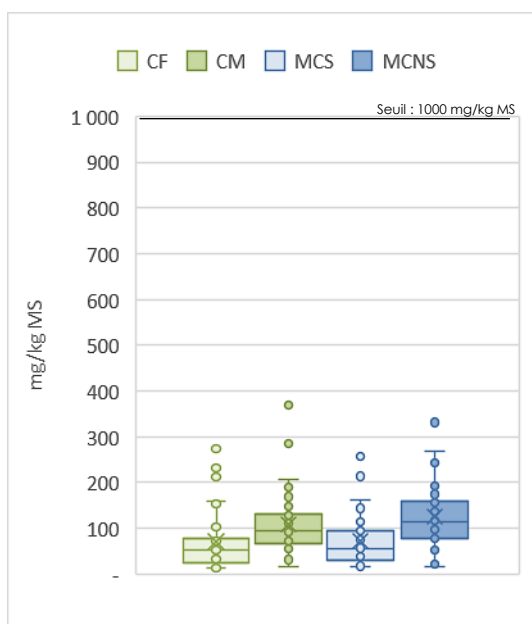


ETM – Oligo-éléments	Chrome
Origine	
Dans les fonds géochimiques Le chrome est le septième élément le plus abondant sur terre. Il se rencontre généralement uniquement à l'état de traces (< 1 000 µg/g) dans le sol et les roches de surface (la croûte terrestre). Dans les milieux naturels lithosphériques et atmosphériques Le chrome pénètre dans l'air, l'eau et le sol sous les formes chrome (III) et chrome (VI) lors des processus naturels et du fait de l'activité humaine. Les principales activités humaines qui augmentent les concentrations en chrome (III) sont la fabrication de l'acier, du cuir et des textiles. Les principales activités humaines qui augmentent les concentrations en chrome (VI) sont les fabriques de produits chimiques, de cuir et de textile, l'électro-peinture et autre application du chrome (VI) dans l'industrie. Ces applications augmentent principalement les concentrations en chrome de l'eau. Lors de la combustion du charbon, le chrome peut aussi se retrouver dans l'air et lors de l'évacuation des eaux, le chrome peut se retrouver dans le sol.	
Mobilité	
Dans le sol et la plante Il peut être bio-accumulé par divers organismes (dont végétaux alimentaires quand il est présent dans l'eau d'irrigation). Dans ces cas, il peut devenir l'un des contaminants alimentaires pouvant affecter la santé. Chez l'Homme et les animaux L'absorption dépend des propriétés physico-chimiques de chaque composé. Le chrome absorbé est distribué amplement dans l'organisme, y compris les fœtus, par la circulation du sang. Le chrome absorbé est éliminé de l'organisme dans les urines en grande partie, alors que le chrome non absorbé est en majeure partie excrété dans les selles.	
Utilité	
Utilisation agronomique Le chrome n'a pas, comme les autres oligo-éléments, été trouvé dans une protéine avec une activité biologique. Par conséquent, son mécanisme d'action dans la régulation du sucre reste inexpliqué. En fait, les composés organiques du chrome (III) sont plutôt stables, plus que ceux des métaux de transition de la même période (Mn, Fe, Co, Ni, Cu...) et sont donc peu susceptibles de participer à des réactions biologiques, par définition réversibles. Utilisation au quotidien Le chrome est principalement utilisé dans la manufacture de l'acier inoxydable, qui est un alliage acier-chrome. C'est la présence du chrome dans l'alliage qui le rend résistant à l'oxydation. L'acier inoxydable est utilisé dans une grande variété de produits d'usage domestique (casseroles, ustensiles, appareils électroménagers) et industriel (machinerie, contenants, tuyaux). Le chrome peut aussi être utilisé dans le placage de métaux, dans des pigments, dans le tannage du cuir ou dans des catalyseurs. Il est également employé pour renforcer la résistance des alliages rencontrés dans les grilles des chaudières biomasse.	
Seuils réglementaire et normatifs	

Les exigences en termes d'innocuité (concentrations maximales) des cendres au regard de la réglementation et des normes sont :

- Arrêté du 3 août 2018 (rubrique 2910 – combustion) : 1 000 mg/kgMS
- Norme NF U 44-095 (compost de boues) : 120 mg/kgMS
- Norme NF U 44-051 (amendement organique) : 120 mg/kgMS
- Norme NF U 42-001 (engrais) : 120 mg/kgMS

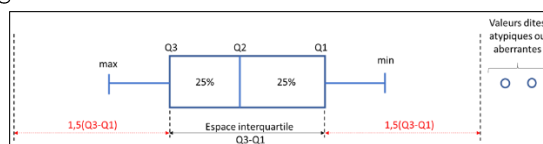
Composition des cendres par installation et par type de cendres



Information analytique :

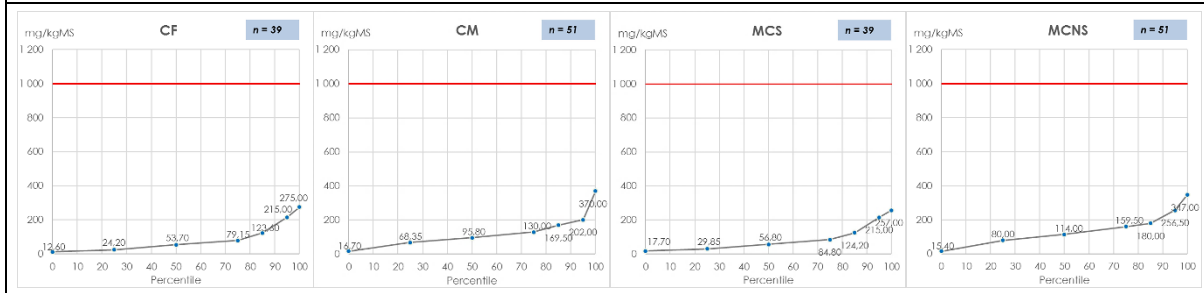
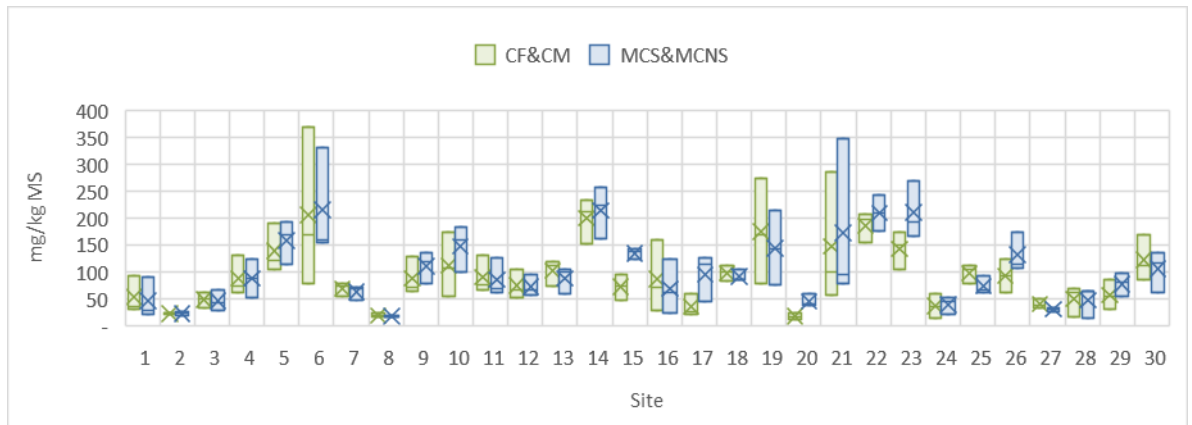
- Limite de quantification (LQ) : 5 mg/kgMS
- Incertitude sur la mesure : 15 %

Légende :



Statistique descriptive :

Chrome (Cr) mg/kg MS	Cendres			
	CF	CM	MCS	MCNS
IC à 95 % - borne inf.	54,24	93,82	55,58	108,22
Moyenne	71,20	108,93	72,14	125,06
IC à 95 % - borne sup.	93,30	130,24	94,64	149,14
Min	12,60	16,70	17,70	15,40
1 ^{er} quartile (Q1)	24,20	68,35	29,85	80,00
Médiane (Q2)	53,70	95,80	56,80	114,00
3 ^{ème} quartile (Q3)	79,15	130,00	84,80	159,50
Max	275,00	370,00	257,00	347,00
Seuil	1 000	1 000	1 000	1 000



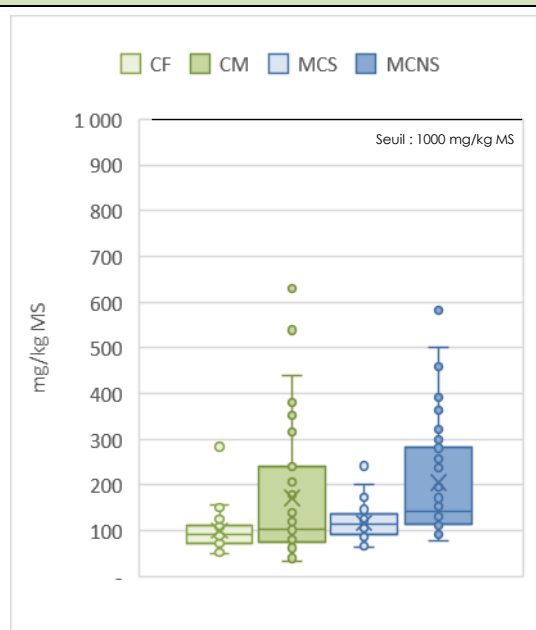
ETM – Oligo-éléments	Cuivre
Origine	
• Dans les fonds géochimiques La concentration moyenne en cuivre de la croûte terrestre est d'environ 70 mg/kg (Hodgson, 1963), celle des roches du territoire national français 20 mg/kg (Aubert et Pinta, 1971). On trouve le cuivre surtout sous forme de sulfures simples ou complexes (Sauchelli, 1969; Krauskopf, 1972). • Dans les milieux naturels lithosphériques et atmosphériques Les retombées atmosphériques ont été estimées par Perreno (Les micropolluants métalliques et les sols amendés par des boues résiduaire urbaines, 1999) à : - Automobile : rejet de 60 g/ha/an (apport d'origine lointaine).	
Mobilité	
• Dans le sol et la plante Le comportement du cuivre dans le sol dépend de nombreux facteurs : le pH du sol, son potentiel redox, sa capacité d'échange cationique, le type et la distribution de matières organiques, la présence d'oxydes, la vitesse de décomposition de la matière organique, les proportions d'argiles, de limons et de sables, le climat, le type de végétation présente... (Adriano, 1986 ; Dameron et Howe, 1998). Le cuivre forme des liaisons avec les composants du sol plus fortes que les autres cations divalents et la distribution du cuivre dans la solution de sol est moins affectée par le pH que celle des autres métaux (Adriano, 1986 ; ATSDR, 1990 ; Kabata-Pendias et Pendias, 1992 ; Baker et Senft, 1995). Le cuivre est prélevé en faible quantité par la plante, la teneur en cet élément de la majorité des végétaux étant comprise entre 2 et 20 mg/kg de poids sec. Dans les tissus racinaires, le cuivre est presque complètement sous forme complexée mais il est probable qu'il pénètre à l'état élémentaire dans les cellules de la racine (Kabata-Pendias et Pendias, 1984). Le prélèvement du cuivre par la plante est un processus actif, affecté par des inhibiteurs métaboliques (Dokiya et al. 1964). • Chez l'Homme et les animaux Le cuivre présente une large distribution dans l'organisme via le sang associé à des protéines dont la céruloplasmine (80-90 %), l'albumine et divers acides aminés (Owen, 1965). Les plus fortes concentrations tissulaires en cuivre sont mesurées au niveau du foie, des muscles et de la moelle osseuse. Par ingestion, le devenir du cuivre chez l'animal est identique à celui décrit chez l'homme.	
Utilité	
• Utilisation agronomique C'est un activateur d'enzymes qui joue également un rôle dans le métabolisme des protéines et la synthèse de la chlorophylle. Les prélèvements des plantes ne dépassent pas 60 g par hectare. Les plantes gardent plus longtemps un aspect vert et juvénile. • Utilisation au quotidien Le cuivre est présent dans de nombreux alliages, notamment dans les radiateurs et les échangeurs de chaleur. Sa bonne conductivité électrique (la meilleure parmi les métaux non précieux) et thermique en fait un matériau de choix en télécommunications, dans le bâtiment, les transports ou encore le domaine de l'énergie. Les circuits intégrés et les circuits imprimés possèdent de plus en plus de cuivre. On utilise aussi le cuivre dans les tubes à vide et les guides d'onde. En architecture, le cuivre peut servir comme matériau de couverture étanche, sur les toits par exemple. Dans les alliages avec le nickel, le cuivre est employé en construction navale pour sa bonne tenue à la corrosion. Les composés cuivrés, minoritaires dans l'utilisation du cuivre, servent notamment dans les fongicides. Parmi les alliages de cuivre, notons le laiton (cuivre et zinc, pour les douilles d'obus et les matériaux à mémoire de forme notamment) et le bronze (cuivre et étain, matériaux de frottement).	

Seuil réglementaire et normatifs

Les exigences en termes d'innocuité (concentrations maximales) des cendres au regard de la réglementation et des normes sont :

- Arrêté du 3 août 2018 (rubrique 2910 – combustion) : mg/kg
1 000 MS
- Norme NF U 44-095 (compost de boues) : mg/kg
300 MS
- Norme NF U 44-051 (amendement organique) : mg/kg
300 MS
- Norme NF U 42-001 (engrais) : mg/kg
300 MS

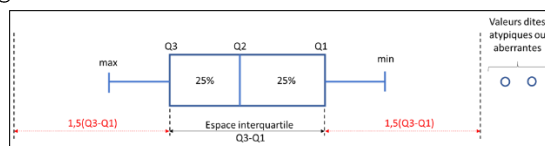
Composition des cendres par installation et par type de cendres



Information analytique :

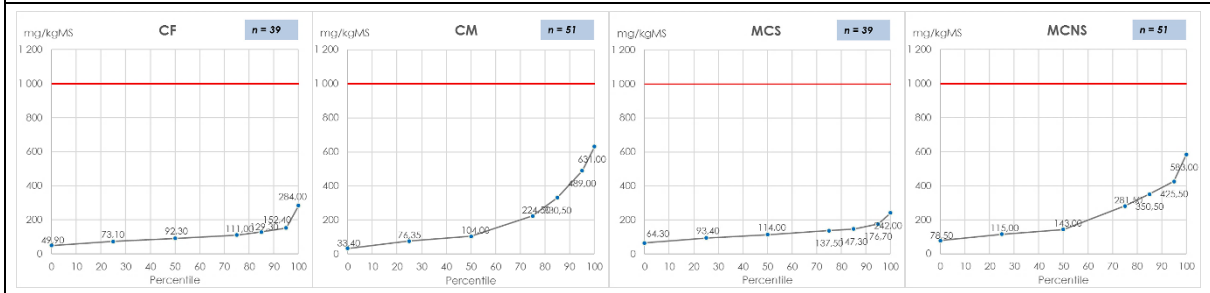
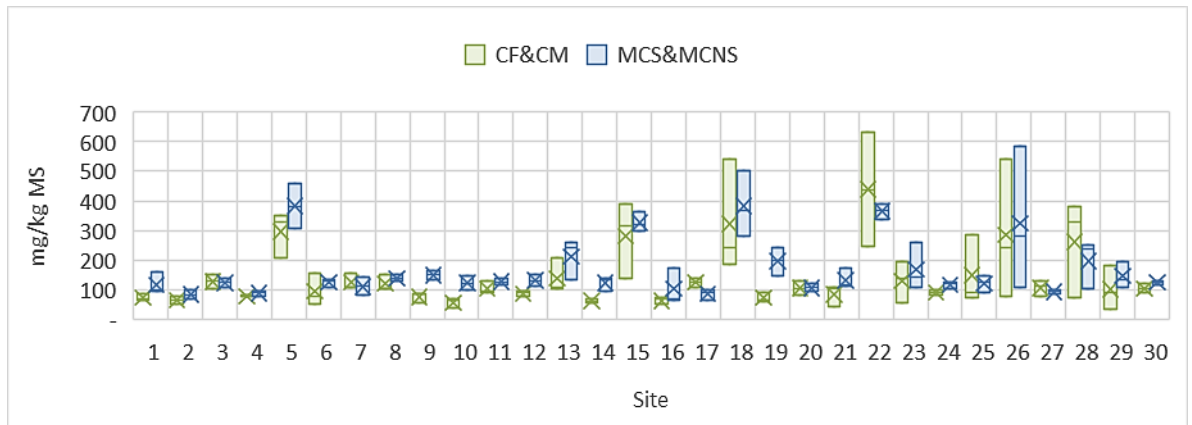
- Limite de quantification (LQ) : 5 mg/kgMS
- Incertitude sur la mesure : 20 %

Légende :



Statistique descriptive :

Cuivre (Cu) mg/kg MS	Cendres			
	CF	CM	MCS	MCNS
IC à 95 % - borne inf.	90,11	137,81	107,44	175,64
Moyenne	99,99	172,43	117,97	205,55
IC à 95 % - borne sup.	118,51	221,19	129,99	243,89
Min	49,90	33,40	64,30	78,50
1 ^{er} quartile (Q1)	73,10	76,35	93,40	115,00
Médiane (Q2)	92,30	104,00	114,00	143,00
3 ^{ème} quartile (Q3)	111,00	224,50	137,50	281,50
Max	284,00	631,00	242,00	583,00
Seuil	1 000	1 000	1 000	1 000

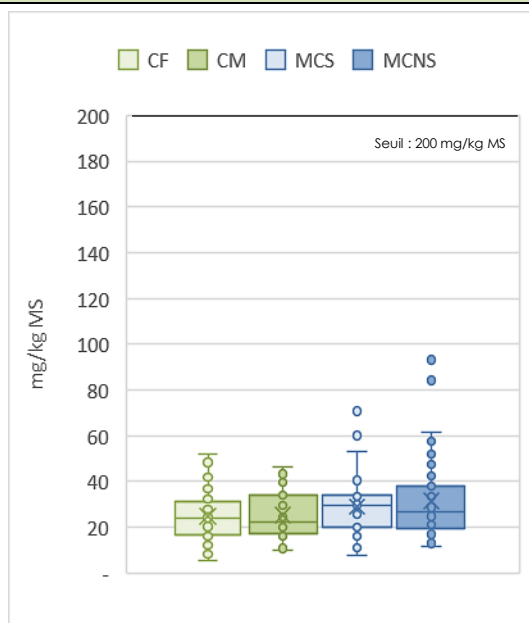


ETM – Oligo-éléments	Nickel
Origine	
• Dans les fonds géochimiques Le nickel existe naturellement, avec des concentrations allant de 1 à 1 000 µg.g⁻¹ dans les sols et de 8 × 10⁻³ à 130 µg.g⁻¹ sec dans les végétaux terrestres. • Dans les milieux naturels lithosphériques et atmosphériques Ainsi, le nickel incorporé dans certains réseaux minéraux peut se révéler inerte. Dans les sols, les principales formes du nickel, et en particulier NiOH⁺, sont adsorbées à la surface d'oxydes amorphes de fer, d'aluminium ou de manganèse (Kabata-Pendias and Pendias, 1992 ; McGrath, 1995 ; ATSDR, 1997) et dans une moindre mesure à la surface de minéraux argileux. Les retombées atmosphériques ont été estimées par Perrenno (Les micropolluants métalliques et les sols amendés par des boues résiduelles urbaines, 1999) à : - Automobile : rejet de 35 g/ha/an.	
Mobilité	
• Dans le sol et la plante La mobilité du nickel augmente aux pH faibles, alors que l'adsorption sur certains composés adsorbants du sol peut devenir irréversible en milieu alcalin. Si le pH est le paramètre influençant le plus la mobilisation du nickel dans les sols, il faut également tenir compte de la concentration en sulfates (qui réduisent l'adsorption du nickel par complexation) et de la surface spécifique des oxydes de fer présents dans le sol (Swanson, 1982 ; Hertel et al. 1991 ; McGrath, 1995 ; ATSDR, 1997). La présence de cations tels que Ca²⁺ ou Mg²⁺ entraîne également une diminution de l'adsorption du nickel sur les composés du sol, résultat de phénomènes de compétition. • Chez l'Homme et les animaux Environ 20 à 35 % du nickel inhalé (sous forme de composés peu solubles) sont absorbés dans le sang à partir des voies respiratoires (ATSDR, 1997). Les composés solubles du nickel (chlorure, sulfate) sont plus facilement absorbés par le tractus respiratoire. Par voie orale, quarante fois plus de nickel sont absorbés par le tractus gastro-intestinal, lorsque le sulfate de nickel est administré dans l'eau de boisson.	
Utilité	
De très nombreux alliages contiennent du nickel, à commencer par certains aciers. Quant aux alliages de nickel proprement dits, on en distingue trois catégories : les alliages fer-nickel (écrans cathodiques, physique des lasers, cryogénie, etc.), les alliages cuivre-nickel (résistance à la corrosion en milieu marin) et les superalliages (turboréacteurs, chaudières, moteurs d'avion). Les résistances chauffantes des grille-pains contiennent aussi du nickel. En bijouterie, le nickel est ajouté à l'or pour obtenir des teintes particulières (or jaune, or rosé, or blanc). Les pièces de monnaie constituent également un débouché pour le nickel.	
Seuils réglementaire et normatifs	

Les exigences en termes d'innocuité (concentrations maximales) des cendres au regard de la réglementation et des normes sont :

- Arrêté du 3 août 2018 (rubrique 2910 – combustion) : mg/kg
200 MS
- Norme NF U 44-095 (compost de boues) : mg/kg
60 MS
- Norme NF U 44-051 (amendement organique) : mg/kg
60 MS
- Norme NF U 42-001 (engrais) : mg/kg
120 MS

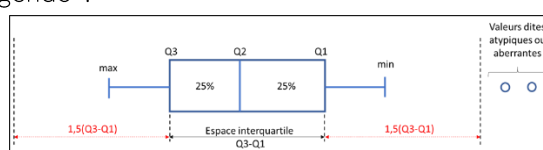
Composition des cendres par installation et par type de cendres



Information analytique :

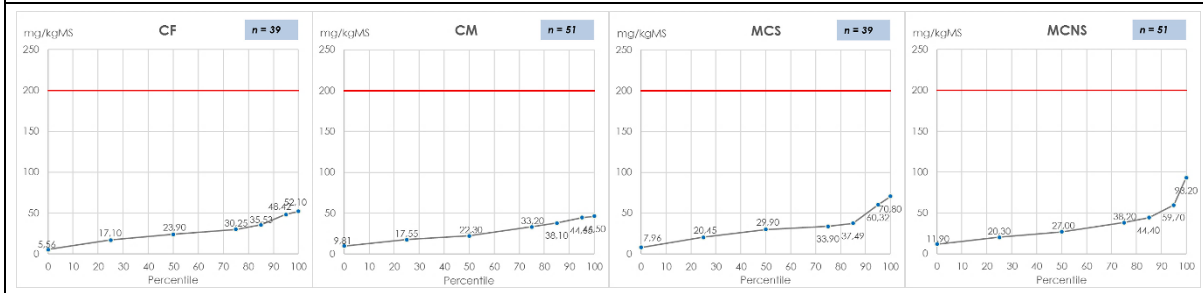
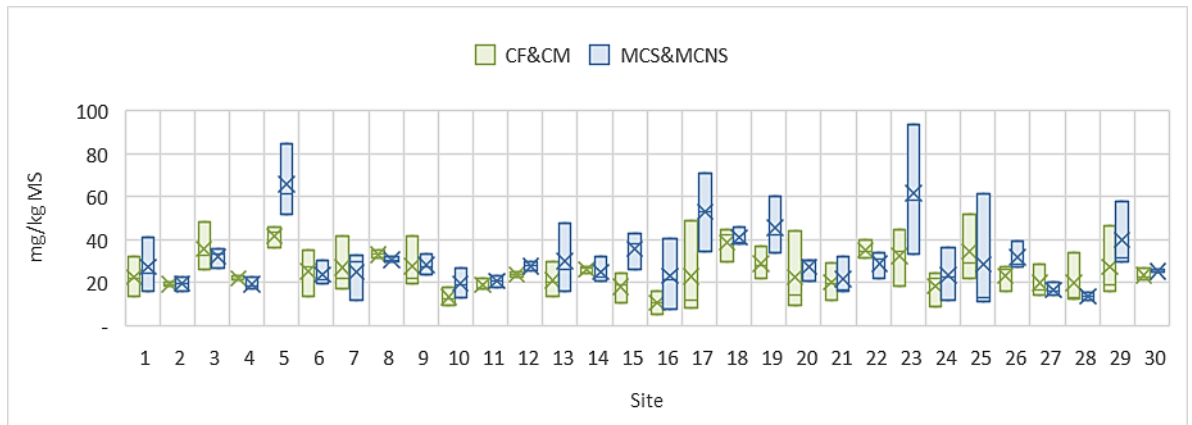
- Limite de quantification (LQ) : 1 mg/kgMS
- Incertitude sur la mesure : 10 %

Légende :



Statistique descriptive :

Nickel (Ni) mg/kg MS	Cendres			
	CF	CM	MCS	MCNS
IC à 95 % - borne inf.	21,61	22,91	25,23	27,53
Moyenne	24,92	25,43	29,12	31,48
IC à 95 % - borne sup.	28,64	28,47	33,70	36,78
Min	5,56	9,81	7,96	11,90
1 ^{er} quartile (Q1)	17,10	17,55	20,45	20,30
Médiane (Q2)	23,90	22,30	29,90	27,00
3 ^{ème} quartile (Q3)	30,25	33,20	33,90	38,20
Max	52,10	46,50	70,80	93,20
Seuil	200	200	200	200

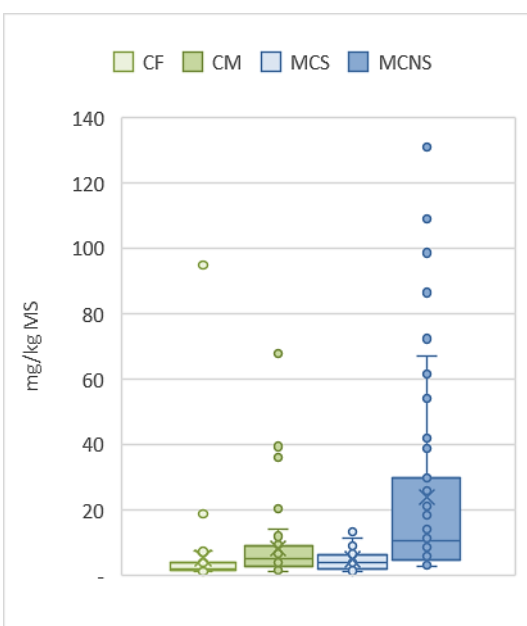


ETM – Oligo-éléments	Arsenic
Origine	
Dans les fonds géochimiques L'arsenic est un élément ubiquiste que l'on trouve dans l'atmosphère, dans les milieux aquatiques, les sols, les sédiments et les organismes vivants. Dans les sols la concentration en arsenic est généralement comprise entre 0,1 et 40 mg. kg⁻¹ d'après Bowen (1979) et entre 1 et 50 mg. kg⁻¹ d'après Backer et Chesnin (1975), ce qui correspond à une moyenne de 6 mg.kg⁻¹ dans les sols. C'est le 51^e élément en terme d'abondance dans la couche terrestre. Dans les milieux naturels lithosphériques et atmosphériques Le principal apport naturel d'arsenic dans l'environnement est le volcanisme et a été estimé entre 2 800 et 8 000 t.an⁻¹ (Loebenstein, 1994). L'altération des roches constitue un autre apport. Les activités humaines (fonderies, combustion du charbon et différentes activités industrielles) constituent la majorité des apports d'arsenic à l'environnement. Loebenstein (1994) a estimé que les émissions globales d'arsenic étaient comprises entre 24 000 t.an⁻¹ et 124 000 t.an⁻¹ tandis que Chilvers et Peterson (1987) ont estimé le flux des émissions atmosphériques à 73 540 t.an⁻¹.	
Mobilité	
Dans le sol et la plante La mobilité de l'arsenic dans l'environnement est donc dépendante de sa forme, de sa spéciation et de son interaction avec les phases minérales (sulfures, oxyhydroxydes métalliques, argiles et carbonates de calcium). Les phénomènes de précipitation/dissolution, d'adsorption/désorption et la volatilisation sont donc de première importance pour expliquer la mobilité de l'As dans l'environnement et son transfert dans les eaux interstitielles. Ainsi, à pH neutre, en conditions oxygénées, l'arsenic est majoritairement présent sous forme d'AsV, et immobilisé par les oxydes métalliques (Smedley & Kinniburgh, 2002). L'AsIII, plus mobile, persiste dans la solution du sol et risque donc de migrer plus rapidement vers les nappes phréatiques. Chez l'Homme et les animaux Les arsénates (As III) et les arsénites (As V) sont bien absorbés par voie orale et moyennement par inhalation. Chez l'homme, l'absorption de l'arsenic est estimée à 95 % par voie orale (Zheng et al., 2002) : ce taux d'absorption est plus faible si la solubilité du composé arsénié est plus faible et il dépend également du substrat (aliment, sol, eau de boisson) avec lequel il est ingéré. Par voie respiratoire, le taux d'absorption est compris entre 30 et 34 % (ATSDR, 2007). La voie cutanée, peu étudiée, est une voie mineure d'absorption : les quelques études disponibles rapportent des taux de pénétration percutanée inférieurs à 1 % (ATSDR, 2007).	
Utilité	
L'arsenic est utilisé pour l'arsenicage, c'est-à-dire le fait de plonger un objet dans une solution d'arséniate de soude pour le débarrasser des parasites. L'arsenic sert ainsi à des fins commerciales, principalement dans les alliages et les conservateurs du bois. L'arséniate de plomb est un insecticide. Allié au gallium ou à l'indium, il est utilisé dans l'industrie des semi-conducteurs pour les diodes, les transistors ou encore l'optoélectronique. On l'utilise également ces derniers temps dans les tambours des imprimantes laser.	
Seuils réglementaire et normatifs	

Les exigences en termes d'innocuité (concentrations maximales) des cendres au regard de la réglementation et des normes sont :

- | | |
|--|----------------|
| - Arrêté du 3 août 2018 (rubrique 2910 – combustion) : | mg/kg
MS |
| - Norme NF U 44-095 (compost de boues) : | 18 mg/kg
MS |
| - Norme NF U 44-051 (amendement organique) : | 18 mg/kg
MS |
| - Norme NF U 42-001 (engrais) : | 60 mg/kg
MS |

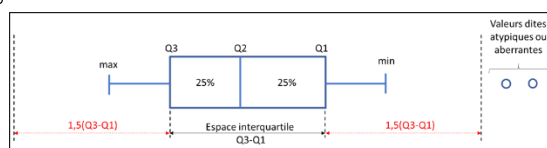
Composition des cendres par installation et par type de cendres



Information analytique :

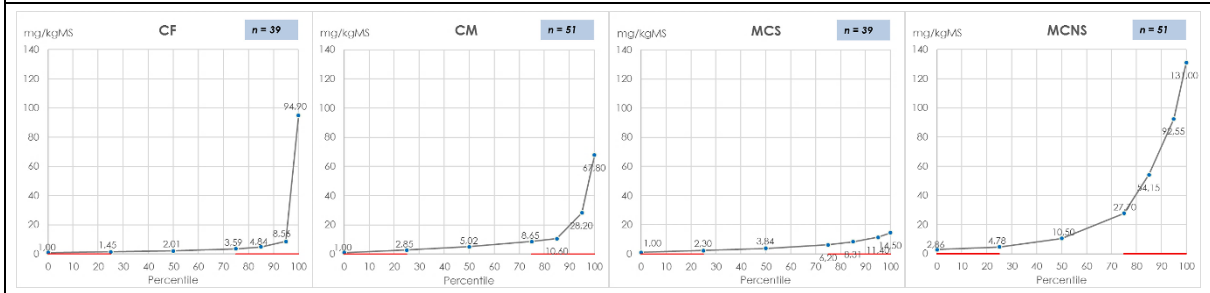
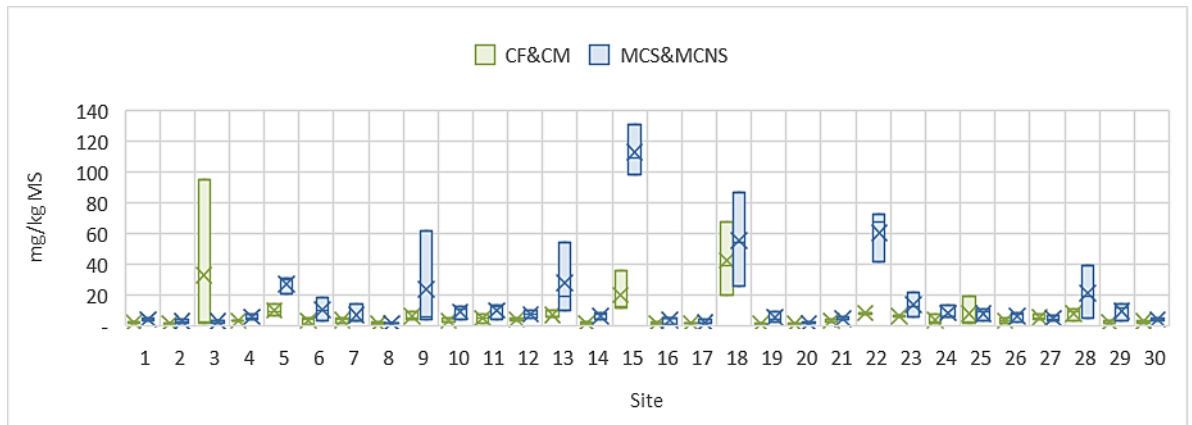
- Limite de quantification (LQ) : 1 mg/kgMS
- Incertitude sur la mesure : 45 %

Légende :



Statistique descriptive :

Arsenic (As) mg/kg MS	Cendres			
	CF	CM	MCS	MCNS
IC à 95 % - Borne inf.	2,60	5,80	3,96	16,76
Moyenne	5,32	8,12	4,84	23,97
IC à 95 % - Borne sup.	14,84	13,21	6,00	32,76
Min	1,00	1,00	1,00	2,86
1 ^{er} quartile (Q1)	1,45	2,85	2,30	4,78
Médiane (Q2)	2,01	5,02	3,84	10,50
3 ^{ème} quartile (Q3)	3,59	8,65	6,20	27,70
Max	94,90	67,80	14,50	131,00



Origine

- **Dans les fonds géochimiques**

L'abondance naturelle du sélénium stable est en moyenne de 0,05 mg/kg dans l'écorce terrestre (Coughtrey et al. 1983), avec des valeurs minimales de 0,004 mg/kg et des extrêmes allant jusqu'à 675 mg/kg (schistes noirs, roches phosphatées et certaines roches volcaniques).

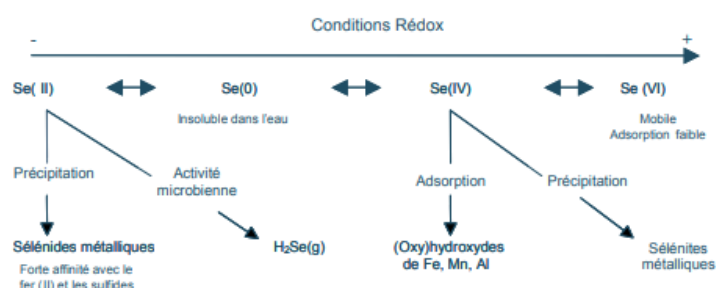
- **Dans les milieux naturels lithosphériques et atmosphériques**

Dans les eaux de surface, la concentration moyenne du sélénium est de 0,2 µg/kg, dans une gamme allant de 0,1 à 100 µg/kg.

Les teneurs en sélénium des végétaux sont liées aux quantités présentes dans le sol et/ou apportées par les éventuels amendements riches en sélénium. La concentration dans la végétation est estimée à 0,1 mg/kg et peut aller de 0,01 à 15 000 mg/kg selon l'implantation et l'adaptation des végétaux à des sols plus ou moins sélénifères ou déficients en sélénium (Coughtrey et al. 1983).

Mobilité

- **Dans le sol et la plante**



L'incorporation racinaire et la redistribution du sélénium dans le végétal sont très rapides ; elles dépendent des espèces et des conditions physiologiques, cependant, dans la plupart des cultures, 85 % du séléniate ou 70 % du sélénite se retrouvent dans les tissus aériens. La distribution du radio-sélénium apporté artificiellement aux plantes différerait en revanche de celle du sélénium natif (Coughtrey et al. 1983 ; Terry et al 2000).

- **Chez l'Homme et les animaux**

Chez l'homme et chez l'animal, le sélénium est, après absorption, fixé sur les érythrocytes, l'albumine et les globulines plasmatiques. L'albumine semble être le récepteur immédiat et sert de transporteur vers les sites de fixation tissulaires, en particulier, le foie et les reins (Bonnard et al. 2002).

Utilité

- **Utilisation agronomique**

Il n'a apparemment pas d'utilité pour les plantes mais on se préoccupe de sa concentration dans les plantes vu son importance en excès comme en carence sur la physiologie animale ou humaine.

- **Utilisation au quotidien**

Le sélénium est obtenu à partir du raffinage du plomb, du cuivre et du nickel. Comme l'arsenic il est employé dans les tambours des photocopieurs et imprimantes laser. Le sélénium permet également d'améliorer les qualités du cuivre et de l'acier. Pour protéger l'acier, le bronzage consiste ainsi à appliquer de l'acide sélénieux à la surface, notamment pour les pièces d'armes à feu.

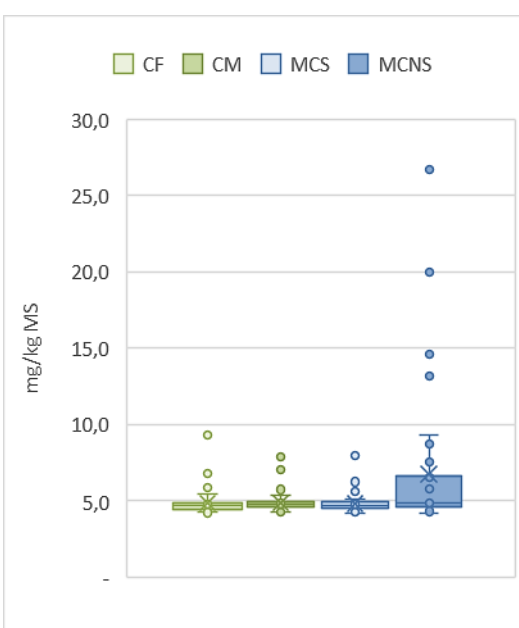
En tant que semi-conducteur photosensible, il est par ailleurs utilisé dans les piles photoélectriques, les caméras, la xérographie et, comme semi-conducteur, dans les batteries solaires et les redresseurs. On l'utilise aussi pour faire des boîtes quantiques. C'est enfin un colorant pour le verre et les matières plastiques sous forme de sulfoséléniure de cadmium (rouge de cadmium).

Seuils réglementaire et normatifs

Les exigences en termes d'innocuité (concentrations maximales) des cendres au regard de la réglementation et des normes sont :

- Arrêté du 3 août 2018 (rubrique 2910 – combustion) : mg/kg
MS
- Norme NF U 44-095 (compost de boues) : mg/kg
MS
- Norme NF U 44-051 (amendement organique) : mg/kg
MS
- Norme NF U 42-001 (engrais) : mg/kg
MS

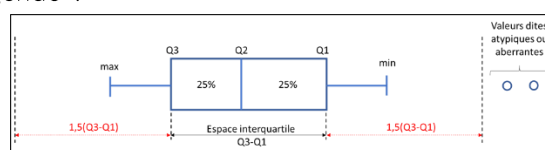
Composition des cendres par installation et par type de cendres



Information analytique :

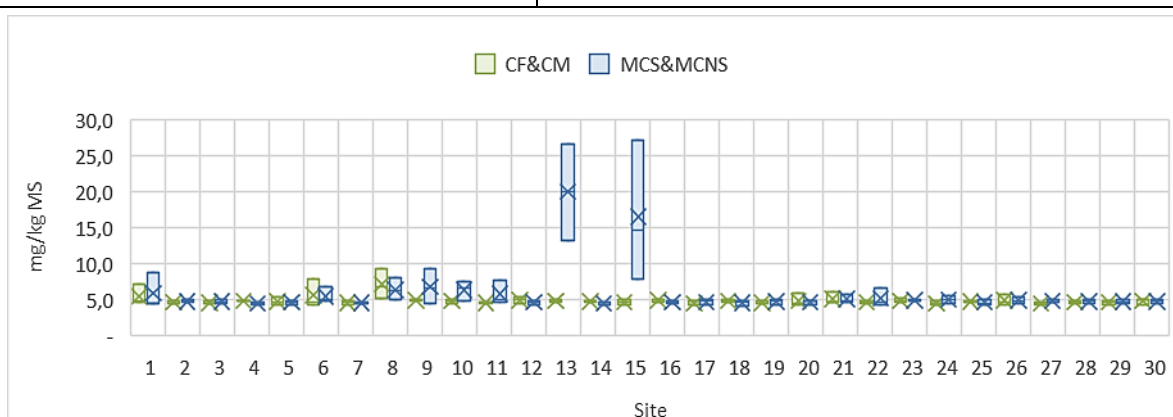
- Limite de quantification (LQ) : 1 mg/kg MS
- Incertitude sur la mesure : 45 %

Légende :



Statistique descriptive :

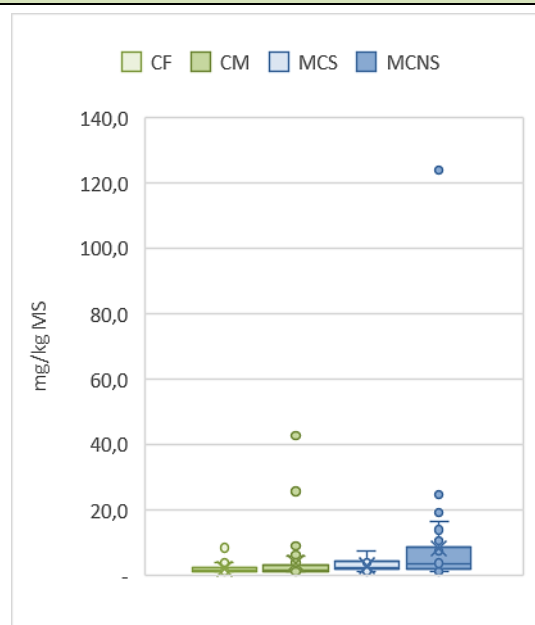
Sélénium (Se) mg/kg MS	Cendres			
	CF	CM	MCS	MCNS
IC à 95 % - Borne inf.	4,67	4,75	4,69	5,67
Moyenne	4,86	4,88	4,83	6,76
IC à 95 % - Borne sup.	5,32	5,16	5,17	8,64
Min	4,24	4,25	4,22	4,20
1 ^{er} quartile (Q1)	4,45	4,61	4,52	4,62
Médiane (Q2)	4,69	4,75	4,73	4,88
3 ^{ème} quartile (Q3)	4,90	4,95	4,94	6,59
Max	9,30	7,87	7,97	27,20



ETM – Autres ETM	Molybdène
Origine	
Dans les fonds géochimiques Le molybdène est un métal rare (0,001% de l'écorce terrestre). Ses principaux minerais sont la molybdénite (MoS_2), la wulfénite (PbMoO_4), la molybdite ($\text{MoO}_3, \text{H}_2\text{O}$), la powellite $\text{Ca}(\text{MoO}_4)$ et quelques autres sans intérêt économique. Dans les milieux naturels lithosphériques et atmosphériques En dehors des gisements, les concentrations en molybdène dans l'environnement sont généralement faibles. Les teneurs dans les sols sont d'environ 2 mg.kg^{-1} sec, dans l'eau entre 0,01 et 0,001 mg.L^{-1} selon qu'il s'agit d'eau de mer ou de rivière (Coughtrey et Thorne, 1983). Dans l'air, les teneurs sont de l'ordre 0,02 $\mu\text{g.m}^{-3}$ en ville et 0,002 $\mu\text{g.m}^{-3}$ à la campagne (Friberg et al. 1979). Les concentrations en molybdène dans les végétaux dépendent étroitement de l'espèce et des caractéristiques du sol. Généralement, des concentrations plus élevées sont trouvées dans les légumes feuilles et les légumineuses, alors que les racines présentent des concentrations plus faibles.	
Mobilité	
Dans le sol et la plante De manière générale, le molybdène dans les sols est souvent associé, soit avec les argiles, soit avec les minéraux ferreux (Coughtrey et Thorne, 1983). Les facteurs de transfert sol-plante pour le molybdène stable sont de l'ordre de 0,5 en général, 0,05 pour les fruits et 2,5 pour les légumineuses. La biodisponibilité du molybdène dans le sol dépend du pH. Le molybdène est ainsi moins disponible à bas pH ou à des taux élevés de sulfates. Le molybdène peut être classé comme un élément partiellement mobile dans les végétaux. On peut estimer qu'environ 40 % du molybdène absorbé du sol est transloqué et distribué en parties égales dans les parties aériennes. Chez l'Homme et les animaux Chez l'homme, l'apport journalier en molybdène est estimé entre 100 et 500 μg (Friberg et al. 1979). Chez les animaux et l'homme, les composés solubles du molybdène sont facilement absorbés par ingestion, aux alentours de 50 %. Les concentrations les plus élevées sont retrouvées dans les reins, le foie et les os. L'excrétion se fait principalement par voie urinaire, elle est rapide.	
Utilité	
Utilisation agronomique Le molybdène est un élément essentiel. Son métabolisme est lié à celui du cuivre et du soufre. Le molybdène est considéré comme un élément essentiel pour les bactéries, les champignons, les algues vertes et bleu-vertes et les angiospermes. Il entre dans la constitution de plusieurs enzymes, dont certaines sont impliquées dans la fixation de l'azote et la réduction des nitrates. Utilisation au quotidien Le molybdène est principalement utilisé pour durcir les aciers et les rendre plus résistants à haute température. C'est aussi un catalyseur utilisé dans l'industrie pétrolière afin de retirer du pétrole les composés contenant du soufre. Le molybdène 99 est le précurseur du technétium 99m, utilisé en médecine nucléaire. Le disulfure de molybdène est un lubrifiant très efficace à haute température. On retrouve aussi cet élément dans les alliages dentaires.	
Seuil réglementaire	

Aucun seuil n'est connu à ce jour.

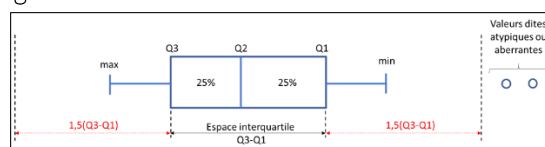
Composition des cendres par installation et par type de cendres



Information analytique :

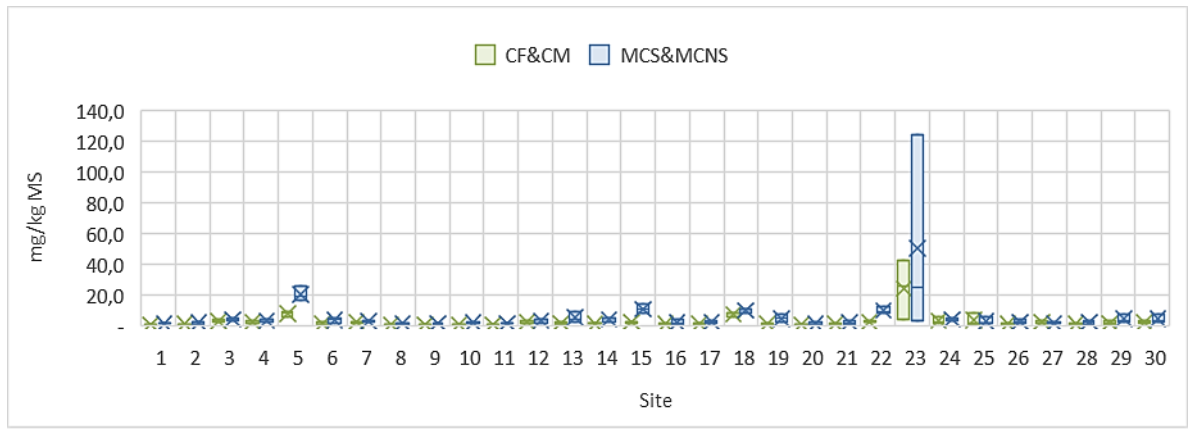
- Limite de quantification (LQ) : 1 mg/kgMS
- Incertitude sur la mesure : - %

Légende :



Statistique descriptive :

Molybdène (Mo) mg/kg MS	Cendres			
	CF	CM	MCS	MCNS
IC à 95 % - Borne inf.	1,64	2,48	2,56	5,16
Moyenne	1,99	3,67	2,98	8,12
IC à 95 % - Borne sup.	2,64	7,65	3,49	17,85
Min	1,00	1,00	1,00	1,12
1 ^{er} quartile (Q1)	1,04	1,00	1,76	2,00
Médiane (Q2)	1,46	1,66	2,46	3,39
3 ^{ème} quartile (Q3)	2,20	3,00	4,11	8,30
Max	8,39	42,70	7,22	124,00

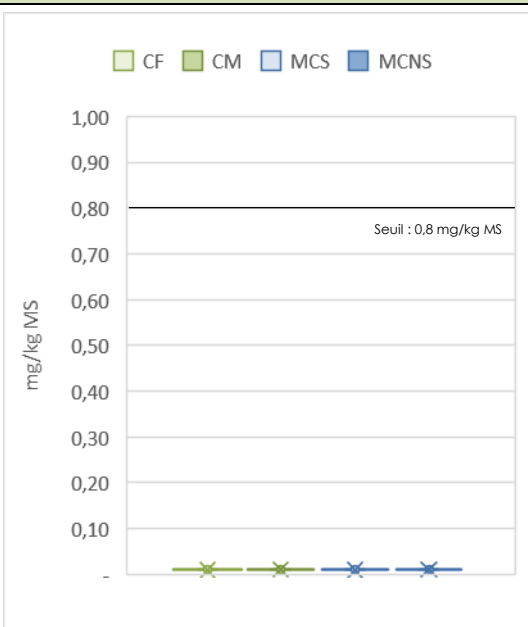


CTO – PCB	Somme des 7 PCB (028, 052, 101, 118, 138, 153, 180)
Origine	
Les PCB ont été produits aux États-Unis dès 1929 par Monsanto puis par Bayer en Allemagne. Après la seconde guerre mondiale, cette production s'est développée dans différents pays, avec Prodelec en France. Les polychlorobiphényles (PCB) sont des hydrocarbures halogénés, des composés aromatiques organochlorés de haut poids moléculaire, dérivés du biphényle. Leur formule chimique est de type $C_{12}H_{(10-n)}Cl_n$, où le nombre n'est compris entre 1 et 10. Chaque noyau phényle peut compter jusqu'à cinq atomes de chlore. En théorie, en fonction de la position de ces atomes, il est possible de former 209 PCB différents. Mais en pratique, à cause de contraintes spatiales, chimiques, seuls 150 composés peuvent vraiment être fabriqués. La fabrication des PCB se fait par chloration du biphényle.	
Mobilité	
• <i>Dans le sol et la plante</i> Du fait de leur stabilité et de leur faible capacité à se dégrader, les PCB sont classés parmi les polluants organiques persistants ou POP. Avec le temps et des rejets accidentels, ils se sont accumulés dans l'environnement, en particulier dans les sédiments marins ou d'eau douce. Des fuites de condensateurs ou de transformateurs, des rejets industriels dans des rivières, contribuent à libérer des PCB dans la nature. Même 30 ans après leur interdiction, les PCB sont toujours présents dans l'eau, l'air, les sols ; cette présence de PCB dans l'environnement ne peut être que d'origine humaine. • <i>Chez l'Homme et les animaux</i> Les PCB seraient toxiques pour l'Homme qui peut en ingérer par le biais de son alimentation, dans des produits d'origine animale : poissons, lait, œufs, viande... Le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) a classé les PCBs comme cancérogènes certains pour l'Homme, dans le Groupe 1.	
Utilité	
Les PCB ont été fabriqués industriellement à partir de 1930 et ont été massivement utilisés jusque dans les années 1970 comme lubrifiants, pour la fabrication des transformateurs électriques, condensateurs et sectionneurs de puissance, comme fluides caloporteurs ou comme isolateurs dans des environnements à très haute tension. En effet, les polychlorobiphényles se caractérisent par une bonne stabilité chimique, une relative ininflammabilité (jusqu'à 1000 °C) et possèdent d'excellentes propriétés diélectriques (ils ne conduisent pas le courant électrique). Avant l'arrêt de leur production dans les années 1980, on les a aussi employés dans les moteurs de pompe, les fours à micro-ondes ou comme additifs dans certains adhésifs, dans des peintures et dans des papiers autocopiants.	
Seuils réglementaire et normatifs	

Les exigences en termes d'innocuité (concentrations maximales) des cendres au regard de la réglementation et des normes sont :

- Arrêté du 3 août 2018 (rubrique 2910 – combustion) : mg/kg
0,8 MS
- Norme NF U 44-095 (compost de boues) : mg/kg
0,8 MS
- Norme NF U 44-051 (amendement organique) : mg/kg
0,8 MS
- Norme NF U 42-001 (engrais) : mg/kg
- MS

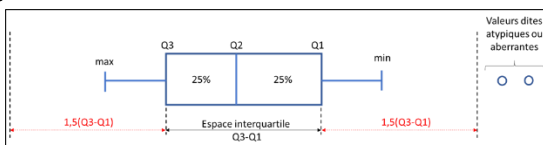
Composition des cendres par installation et par type de cendres



Information analytique :

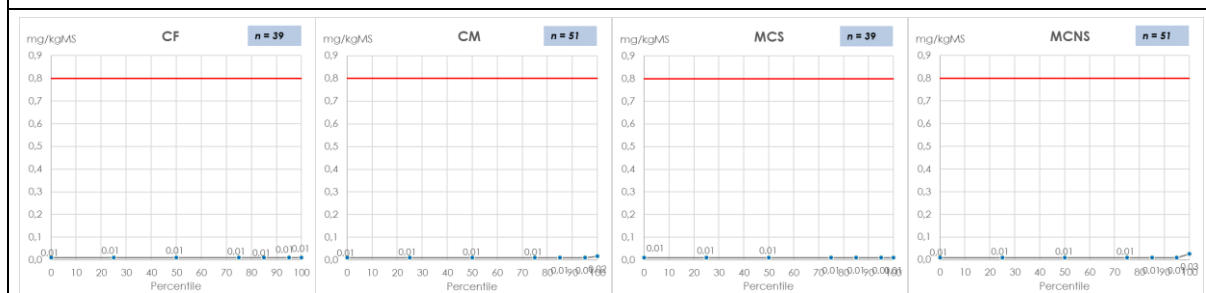
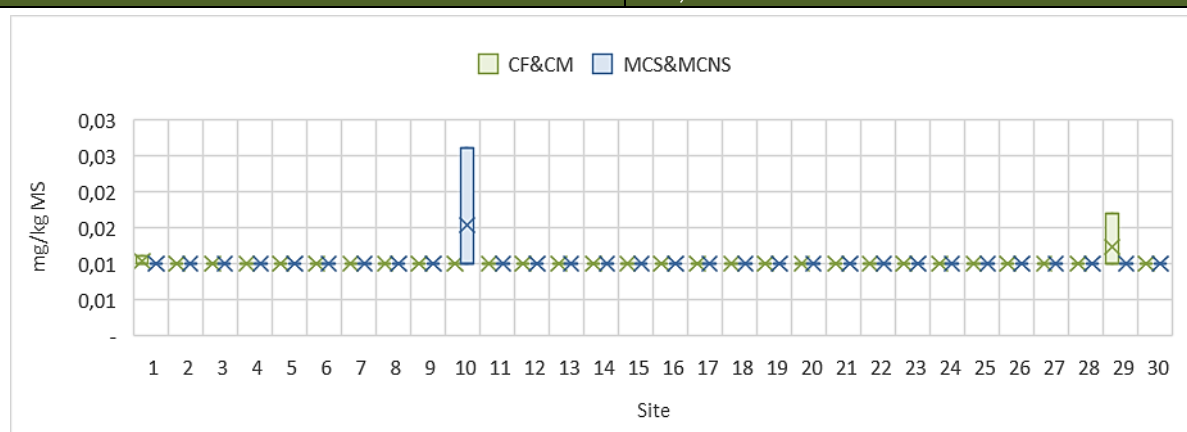
- Limite de quantification (LQ) : 0,01 mg/kgMS
- Incertitude sur la mesure : /

Légende :



Statistique descriptive :

Somme PCB (7) mg/kg MS	Cendres			
	CF	CM	MCS	MCNS
Moyenne	0,01	0,01	0,01	0,01
Min	0,01	0,01	0,01	0,01
1 ^{er} quartile (Q1)	0,01	0,01	0,01	0,01
Médiane (Q2)	0,01	0,01	0,01	0,01
3 ^{ème} quartile (Q3)	0,01	0,01	0,01	0,01
Max	0,01	0,02	0,01	0,03



Annexe 9 – Données complémentaires : Bilan national et enjeux financiers et environnementaux

Bilan comparatif entre l'épandage agricole (situation actuelle et avec aménagement) et le stockage en décharge des cendres sous foyer et multicycloniques

BILAN COMPARATIF ENTRE LA SOLUTION EPANDAGE OU MISE EN DECHARGE DES CENDRES ET SUIES DE CHAUDIERES BIOMASSE DE MOYENNE PUISSANCE											
						[1 ; 2]	[2 ; 4]	[4 ; 6]	[6 ; 20]	[20 et +]	
Puissance utile chaudière					kW	1 425	2 182	3 000	5 800	10 000	61 667
Rendement global chaudière					%	85	85	85	85	85	85
Puissance entrante chaudière					kW	1676	2567	3529	6824	11765	72549
PCI combustible					kWh/t	3 033	3 033	2 942	2 947	2 775	2 755
Taux global de cendres					% sec/sec	1,38%	1,50%	1,94%	1,94%	2,07%	2,49%
	taux de cendres sous-foyer				% sec/sec	1,38%	1,38%	1,78%	1,78%	1,90%	2,30%
	dont taux de cendres multicycloniques				% sec/sec	0,08%	0,15%	0,25%	0,19%	0,22%	0,30%
	taux de poussières de filtration				% sec/sec	0,00%	0,12%	0,16%	0,16%	0,17%	0,20%
Humidité du bois					% sur brut	68,60%	68,60%	66,55%	66,66%	62,76%	62,30%
Consommation biomasse				base tx cendres env 2,2%	kg bois brut/h	553	846	1200	2315	4239	26333
					kg bois sec/h	379	581	798	1543	2660	16406
Production cendres sous foyer				(Pour la répartition des flux de cendres, se reporter au synoptique joint)	kg MS/h	5,23	8,01	14,23	27,51	50,59	376,55
Production cendres sous cyclone					kg MS/h	0,31	0,87	2,00	2,99	5,86	49,41
Production cendres sous filtre					kg MS/h	0,00	0,70	1,24	2,39	4,40	32,75
Estimation consommation annuelle biomasse					t/an	1 442	2 248	3 922	7 872	15 646	117 059
Equivalence heures de marche à allure nominale					h PP/an	2 610	2 656	3 269	3 400	3 691	4 445
Consommation annuelle de bois par installation					MWh PCI/an	4 375	6 818	11 538	23 200	43 421	322 500
Consommation annuelle de bois de toutes les installations					MWh PCI/an	1 750 000	1 500 000	1 500 000	2 320 000	8 250 000	19 350 000
Production annuelles de cendres sous foyer					t MS/an	13,65	21,28	46,54	93,55	186,70	1673,86
Production annuelles de cendres sous multicyclone					t MS/an	0,82	2,31	6,54	10,17	21,64	219,63
Production annuelle de cendres sous filtre					t MS/an	0,00	1,85	4,05	8,14	16,24	145,59
Total production annuelle de cendres					t MS/an	14,48	25,45	57,12	111,86	224,58	2039,08
						1,46%	1,65%	2,19%	2,13%	2,29%	2,80%
Nombre d'installations					unités	400	220	130	100	190	60
					MW	570	480	390	580	1900	3 700
Production annuelles de cendres sous foyer					t MS/an	5 462	4 683	6 050	9 355	35 473	100 432
Production annuelles de cendres sous multicyclone					t MS/an	328	509	850	1 017	4 112	13 178
Production annuelle de cendres sous filtre					t MS/an	-	407	526	814	3 085	8 735
Total production annuelle de cendres					t MS/an	5 790	5 599	7 426	11 186	42 671	122 345
Production annuelles de cendres sous foyer					t MB/an	7 780	6 670	8 618	13 326	50 532	143 065
Production annuelles de cendres sous multicyclone					t MB/an	343	531	887	1 061	4 292	13 756
Production annuelle de cendres sous filtre					t MB/an	-	415	536	829	3 145	8 904
Total production annuelle de cendres					t MB/an	8 123	7 617	10 041	15 217	57 969	165 725

Epanchage des cendres sous-foyer et des cendres multicycloniques									
Simulation 1 : ACTUEL les cendres foyères et les suies du cyclone ne sont pas séparées et donc en épanchage à hauteur de 93,3 le reste mis en décharge C2. Les fines du filtre sont mises en décharge C1									
Cout moyen transport compris de la mise en décharge C2	€/t	190	190	190	190	190	190	190	190
Cout moyen transport compris de l'épanchage	€/t	80	76	76	72	72	72	71	71
Cout moyen transport compris de la mise en décharge (C1)	€/t	533	472	472	448	448	448	448	448
Production annuelles de cendres sous foyer	% valo a	100%	100%	85%	85%	90%	90%	95%	95%
Production annuelles de cendres sous multicyclone	% valo a	100%	100%	85%	85%	90%	90%	95%	95%
Production annuelle de cendres sous filtre	% valo a	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Tonnage annuel valorisé en agriculture	t/an	8 123	7 202	8 079	12 229	49 342	148 979		
Montant annuel de la valorisation agricole	€/an	647 153	544 933	613 332	874 918	3 529 977	10 602 363		
Production annuelles de cendres sous foyer	% CSDND	0%	0%	15%	15%	10%	10%	5%	5%
Production annuelles de cendres sous multicyclone	% CSDND	0%	0%	15%	15%	10%	10%	5%	5%
Production annuelle de cendres sous filtre	% CSDND	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Tonnage annuel enfoui en CSDND	t/an	-	-	1 426	2 158	5 482	7 841		
Montant annuel du stockage en Centres de déchets non dangereux	€/an	-	-	270 885	410 048	1 041 655	1 489 793		
Production annuelles de cendres sous foyer	% CSDD	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Production annuelles de cendres sous multicyclone	% CSDD	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Production annuelle de cendres sous filtre	% CSDD	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Tonnage annuel enfoui en CSDD	t/an	-	415	536	829	3 145	8 904		
Montant annuel du stockage en Centres de déchets dangereux	€/an	-	196 052	253 287	371 402	1 408 318	3 987 225		
Cout total	€/an	647 153	740 985	1 137 503	1 656 368	5 979 950	16 079 381		
	€/MWh	0,37	0,49	0,76	0,71	0,72	0,83		
Epanchage des cendres sous-foyer et stockage en décharges de déchets non dangereux des cendres multicycloniques									
Simulation 2 : les cendres foyères et les suies du cyclone sont séparées. Les cendres foyères sont valorisées en épanchage. Les suies du multicyclone et les fines du filtre sont mises en décharge C1									
Cout moyen transport compris de la mise en décharge C2	€/t	190	190	190	190	190	190	190	190
Cout moyen transport compris de l'épanchage	€/t	80	76	76	72	72	72	71	71
Cout moyen transport compris de la mise en décharge (C1)	€/t	533	472	472	448	448	448	448	448
Production annuelles de cendres sous foyer	% valo a	100%	100%	85%	85%	90%	90%	95%	95%
Production annuelles de cendres sous multicyclone	% valo a	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Production annuelle de cendres sous filtre	% valo a	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Tonnage annuel valorisé en agriculture	t/an	7 780	6 670	7 325	11 327	45 478	135 912		
Montant annuel de la valorisation agricole	€/an	748 610	619 119	681 442	1 011 644	4 061 697	12 094 999		
Production annuelles de cendres sous foyer	% CSDND	0%	0%	15%	15%	10%	10%	5%	5%
Production annuelles de cendres sous multicyclone	% CSDND	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Production annuelle de cendres sous filtre	% CSDND	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Tonnage annuel enfoui en CSDND	t/an	343	531	2 180	3 060	9 346	20 909		
Montant annuel du stockage en Centres de déchets non dangereux	€/an	65 130	100 968	414 140	581 468	1 775 650	3 972 664		
Production annuelles de cendres sous foyer	% CSDD	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Production annuelles de cendres sous multicyclone	% CSDD	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Production annuelle de cendres sous filtre	% CSDD	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Tonnage annuel enfoui en CSDD	t/an	-	415	536	829	3 145	8 904		
Montant annuel du stockage en Centres de déchets dangereux	€/an	-	196 052	253 287	371 402	1 408 318	3 987 225		
Cout total	€/an	813 740	916 139	1 348 869	1 964 515	7 245 664	20 054 888		
	€/MWh	0,46	0,61	0,90	0,85	0,88	1,04		
Epanchage des cendres sous-foyer et stockage en décharges de déchets dangereux des cendres multicycloniques									
Simulation 3 : les cendres foyères et les suies du cyclone ne sont pas séparées et donc mises en décharge C2. Les fines du filtre sont mises en décharge C1									
Cout moyen transport compris de la mise en décharge C2	€/t	190	190	190	190	190	190	190	190
Cout moyen transport compris de l'épanchage	€/t	80	76	76	72	72	72	71	71
Cout moyen transport compris de la mise en décharge (C1)	€/t	533	472	472	448	448	448	448	448
Production annuelles de cendres sous foyer	% valo a	100%	100%	85%	85%	90%	90%	95%	95%
Production annuelles de cendres sous multicyclone	% valo a	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Production annuelle de cendres sous filtre	% valo a	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Tonnage annuel valorisé en agriculture	t/an	7 780	6 670	7 325	11 327	45 478	135 912		
Montant annuel de la valorisation agricole	€/an	748 610	619 119	681 442	1 011 644	4 061 697	12 094 999		
Production annuelles de cendres sous foyer	% CSDND	0%	0%	15%	15%	10%	10%	5%	5%
Production annuelles de cendres sous multicyclone	% CSDND	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Production annuelle de cendres sous filtre	% CSDND	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Tonnage annuel enfoui en CSDND	t/an	-	-	1 293	1 999	5 053	7 153		
Montant annuel du stockage en Centres de déchets non dangereux	€/an	-	-	245 604	379 797	960 100	1 359 116		
Production annuelles de cendres sous foyer	% CSDD	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Production annuelles de cendres sous multicyclone	% CSDD	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Production annuelle de cendres sous filtre	% CSDD	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Tonnage annuel enfoui en CSDD	t/an	343	947	1 423	1 891	7 437	22 660		
Montant annuel du stockage en Centres de déchets dangereux	€/an	182 822	446 996	672 163	846 686	3 330 344	10 146 639		
Cout total	€/an	931 432	1 066 115	1 599 209	2 238 127	8 352 141	23 600 755		
	€/MWh	0,53	0,71	1,07	0,96	1,01	1,22		
Stockage en décharges de déchets non dangereux des cendres sous-foyer et des cendres multicycloniques									
Simulation 4 : toutes les cendres vont en décharge C1									
Cout moyen transport compris de la mise en décharge C2	€/t	190	190	190	190	190	190	190	190
Cout moyen transport compris de l'épanchage	€/t	80	76	76	72	72	72	71	71
Cout moyen transport compris de la mise en décharge (C1)	€/t	533	472	472	448	448	448	448	448
Production annuelles de cendres sous foyer	% valo a	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Production annuelles de cendres sous multicyclone	% valo a	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Production annuelle de cendres sous filtre	% valo a	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Tonnage annuel valorisé en agriculture	t/an	-	-	-	-	-	-	-	-
Montant annuel de la valorisation agricole	€/an	-	-	-	-	-	-	-	-
Production annuelles de cendres sous foyer	% CSDND	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Production annuelles de cendres sous multicyclone	% CSDND	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Production annuelle de cendres sous filtre	% CSDND	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Tonnage annuel enfoui en CSDND	t/an	8 123	7 202	9 505	14 388	54 824	156 820		
Montant annuel du stockage en Centres de déchets non dangereux	€/an	1 543 418	1 368 334	1 805 897	2 733 652	10 416 550	29 795 868		
Production annuelles de cendres sous foyer	% CSDD	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Production annuelles de cendres sous multicyclone	% CSDD	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Production annuelle de cendres sous filtre	% CSDD	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Tonnage annuel enfoui en CSDD	t/an	-	415	536	829	3 145	8 904		
Montant annuel du stockage en Centres de déchets dangereux	€/an	-	196 052	253 287	371 402	1 408 318	3 987 225		
Cout total	€/an	1 543 418	1 564 386	2 059 184	3 105 054	11 824 867	33 783 092		
	€/MWh	0,88	1,04	1,37	1,34	1,43	1,75		

Estimation investissement par gamme de puissance pour la séparation cendres multicyclones et sous foyer :

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 €

Estimation coûts MWh utile :

Hypothèses :	kW	1 000	2 000	4 000	6 000	8 000	25 000
* ancienneté de l'installation	8 ans						
* donc période sur laquelle amortir les modifications :	12 ans						
* situation actuelle : 85% cendres foyer et MC en épandage							
Amortissement annuel	€	4 241	4 504	7 448	8 338	13 054	19 580
Epandage des cendres sous-foyer et des cendres multicycloniques sans travaux							
Coût d'exploitation	€/an	647 153	740 985	1 137 503	1 656 368	5 979 950	16 079 381
Amortissement d'exploitation	€/an						
Total	€/an	647 153	740 985	1 137 503	1 656 368	5 979 950	16 079 381
Surcoût au MWh PCI	€/MWh	0,37	0,49	0,76	0,71	0,72	0,83
surcoût au MWh utile	€/MWh	0,48	0,65	0,99	0,93	0,95	1,09
Epandage des cendres sous-foyer et stockage en décharges de déchets non dangereux des cendres multicycloniques							
Coût d'exploitation	€/an	813 740	916 139	1 348 869	1 964 515	7 245 664	20 054 888
	%	32%	48%	58%	70%	74%	94%
Amortissement d'exploitation	€/an	1 696 343	990 964	968 301	833 831	2 480 167	1 174 816
	%	68%	52%	42%	30%	26%	6%
Total	€/an	2 510 084	1 907 103	2 317 170	2 798 346	9 725 831	21 229 704
Surcoût au MWh PCI	€/MWh	1,43	1,27	1,54	1,21	1,18	1,10
surcoût au MWh utile	€/MWh	1,87	1,66	2,02	1,58	1,54	1,43
Epandage des cendres sous-foyer et stockage en décharges de déchets dangereux des cendres multicycloniques							
Coût d'exploitation	€/an	931 432	1 066 115	1 599 209	2 238 127	8 352 141	23 600 755
	%	35%	52%	62%	73%	77%	95%
Amortissement d'exploitation	€/an	1 696 343	990 964	968 301	833 831	2 480 167	1 174 816
	%	65%	48%	38%	27%	23%	5%
Total	€/an	2 627 775	2 057 079	2 567 510	3 071 959	10 832 308	24 775 571
Surcoût au MWh PCI	€/MWh	1,50	1,37	1,71	1,32	1,31	1,28
surcoût au MWh utile	€/MWh	1,96	1,79	2,24	1,73	1,72	1,67
Stockage en décharges de déchets non dangereux des cendres sous-foyer et des cendres multicycloniques							
Coût d'exploitation	€/an	931 432	1 066 115	1 599 209	2 238 127	8 352 141	23 600 755
Amortissement d'exploitation	€/an						
Total	€/an	931 432	1 066 115	1 599 209	2 238 127	8 352 141	23 600 755
Surcoût au MWh PCI	€/MWh	0,53	0,71	1,07	0,96	1,01	1,22
surcoût au MWh utile	€/MWh	0,70	0,93	1,39	1,26	1,32	1,59
Stockage en décharges de déchets non dangereux des cendres sous-foyer et des cendres multicycloniques							
Coût d'exploitation	€/an	1 543 418	1 564 386	2 059 184	3 105 054	11 824 867	33 783 092
Amortissement d'exploitation	€/an						
Total	€/an	1 543 418	1 564 386	2 059 184	3 105 054	11 824 867	33 783 092
Surcoût au MWh PCI	€/MWh	0,88	1,04	1,37	1,34	1,43	1,75
surcoût au MWh utile	€/MWh	1,15	1,36	1,79	1,75	1,87	2,28

Les facteurs d'émission en GES des fertilisants et amendements

Facteur d'émission en GES des éléments fertilisants et amendants										
Elément	Type de fertilisant/amendement	Source	g éq-CO2/kg	unité	chiffre reten					
P2O5	Trisuperphosphate	GES'TIM - ADEME, 2011	0,57	kg P2O5						
P2O5	Part dans engrais ternaire	GES'TIM - ADEME, 2011	0,94	kg P2O5						
P2O5	Part dans engrais binaire (P/K et N/K)	GES'TIM - ADEME, 2011	0,57	kg P2O5						
P2O5	engrais phosphaté moyen	GES'TIM - ADEME, 2011	0,57	kg P2O5	0,57					
K2O	Chlorure de potasse	GES'TIM - ADEME, 2011	0,45	kg K2O	0,45					
K2O	Part dans engrais ternaire	GES'TIM - ADEME, 2011	0,51	kg K2O						
K2O	Part dans engrais binaire	GES'TIM - ADEME, 2011	0,45	kg K2O						
K2O	engrais potassique moyen	GES'TIM - ADEME, 2011	0,45	kg K2O	0,45					
N	engrais azoté moyen	GES'TIM - ADEME, 2011	5,34	kg N						
N	Ammonitrate 33,5%	GES'TIM - ADEME, 2011	5,86	kg N	5,86					
N	Ammoniac anhydre	GES'TIM - ADEME, 2011	2,97	kg N						
N	Ammonitrate calcaire 30% (CAN)	GES'TIM - ADEME, 2011	6,09	kg N						
N	Solution azotée	GES'TIM - ADEME, 2011	5,01	kg N						
N	Urée	GES'TIM - ADEME, 2011	3,69	kg N						
MgO		GIEC, 2005	0,86	kg de CaO	0,86					
CaO	chaux vive (CaO)	GIEC, 2005	0,75	kg de CaO						
CaO	chaux dolomitique	GIEC, 2005	0,86	kg de CaO	0,86					
CaO	chaux hydraulique	GIEC, 2005	0,59	kg de CaO						
Contenu énergétique										
Elément	Type de fertilisant/amendement	Source	unité	GJ	MJ	en kWh/kg	KWt/t	tep/t de fert.	chiffre retenu	
P2O5	Trisuperphosphate	IFS, n°309-2003	kg P2O5			2,33	2 330	0,10		
P2O5	Trisuperphosphate		kg P2O5					0,20		
K2O	Chlorure de potasse		kg K2O			3,49	3 490	0,30		
K2O	Chlorure de potasse	IFS, n°309-2003	kg K2O					0,06		
N	engrais azoté moyen		t N			16,27	16 270	1,40		
N	Ammonitrate 33,5%	IFS, n°309-2003						0,73		
N	Ammonitrate 27%	IFS, n°309-2003						0,75		
N	Ammoniac anhydre	GCL, 2010	T NH3	34,5						
N	Ammoniac anhydre	GCL, 2010	kg N	0,0276		7,67		0,66		
N	Solution azotée	IFS, n°309-2003						0,87		
N	Urée	IFS, n°309-2003						0,89		
MgO						2,33	2 330	0,20		
CaO	chaux vive (CaO)					1,85	1 850	0,16		
P2O5	Trisuperphosphate	GES'TIM - ADEME, 2011	kg P2O5		10,00	2,78	2 777,78	0,24	0,24	
P2O5	Part dans engrais ternaire	GES'TIM - ADEME, 2011	kg P2O5			-	-	-		
P2O5	Part dans engrais binaire (P/K et N/K)	GES'TIM - ADEME, 2011	kg P2O5			-	-	-		
P2O5	engrais phosphaté moyen	GES'TIM - ADEME, 2011	kg P2O5			-	-	-		
K2O	Chlorure de potasse	GES'TIM - ADEME, 2011	kg K2O		7,00	1,94	1 944,44	0,17	0,17	
K2O	Part dans engrais ternaire	GES'TIM - ADEME, 2011	kg K2O			-	-	-		
K2O	Part dans engrais binaire	GES'TIM - ADEME, 2011	kg K2O			-	-	-		
K2O	engrais potassique moyen	GES'TIM - ADEME, 2011	kg K2O			-	-	-		
N	engrais azoté moyen	GES'TIM - ADEME, 2011	kg N			-	-	-		
N	Ammonitrate 33,5%	GES'TIM - ADEME, 2011	kg N	47,00		13,06	13 055,56	1,12	1,12	
N	Ammoniac anhydre	GES'TIM - ADEME, 2011	kg N	51,00		14,17	14 166,67	1,22		
N	Ammonitrate calcaire 30% (CAN)	GES'TIM - ADEME, 2011	kg N			-	-	-		
N	Solution azotée	GES'TIM - ADEME, 2011	kg N	59,00		16,39	16 388,89	1,41		
N	Urée	GES'TIM - ADEME, 2011	kg N	63,00		17,50	17 500,00	1,50		
MgO		GIEC, 2005	kg de CaO			-	-	-	0,36	
CaO	chaux vive (CaO)	GIEC, 2006	kg de CaO			3,64	3 640,78	0,31		
CaO	chaux dolomitique	GIEC, 2006	kg de CaO			4,17	4 174,76	0,36	0,36	
CaO	chaux hydraulique	GIEC, 2006	kg de CaO			2,86	2 864,08	0,25		

GES évités et TEP économisées résultant de la valorisation agronomique des cendres

	kg/tMS			kg de	GES évités par an	t éq-CO2 en 2019	t éq-CO2 en 2023
	CF	CM	5%CF / 95% CM		g éq-CO2/kg élément		
N	0,34	0,19	0,2	N	5,86	200	300
P2O5	22,26	20,49	20,6	P2O5	0,57	1 700	3 500
K2O	66,37	49,52	50,4	K2O	0,45	3 300	6 800
CaO	547,87	347,48	357,5	CaO	0,86	44 300	92 100
MgO	37,10	28,73	29,1	MgO	0,86	3 600	7 500
Total					8,60	50 000	110 000

	TEP évités par an		
	TEP/t de fertilisants	TEP en 2019	TEP en 2023
N	1,12	30	100
P2O5	0,24	700	1 500
K2O	0,17	1 200	2 500
CaO	0,36	18 500	38 500
MgO	0,36	1 500	3 100
Total		22 000	46 000

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.

