

NOTE D'ETUDE

14/06/2013

N° DRC-12-126318-06147A-V2

**Note sur l'assimilation d'un produit (bois faiblement adjuvanté) à un combustible de référence et sur la surveillance des installations classées dans la rubrique 2910B**

**INERIS**

maîtriser le risque |  
pour un développement durable |



**Note sur l'assimilation d'un produit (bois faiblement adjuvanté) à un combustible de référence et sur la surveillance des installations classées dans la rubrique 2910B**

**MEDDE**

Liste des personnes ayant participé à l'étude :

CARRILHO Heidi – COLLET Serge

## PRÉAMBULE

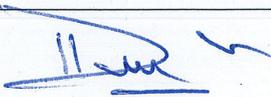
Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

	<b>Rédaction</b>	<b>Vérification</b>	<b>Approbation</b>
<b>NOM</b>	Serge COLLET	Jean POULLEAU	Nicolas ALSAC
<b>Qualité</b>	Ingénieur à l'Unité « Sources et Emissions » Direction des Risques Chroniques	Responsable de l'Unité « Sources et Emissions » Direction des Risques Chroniques	Responsable du Pôle « Caractérisation de l'Environnement » Direction des Risques Chroniques
<b>Visa</b>			

# TABLE DES MATIÈRES

1. <b>OBJECTIFS</b> .....	7
2. <b>PRESENTATION</b> .....	7
3. <b>ETAT DES LIEUX</b> .....	9
3.1 Réalisation de tests comparatifs .....	9
3.2 Mise en place d'une traçabilité administrative des produits.....	9
3.3 Mise en place d'un dispositif de filtration performant.....	10
3.4 Mise en place de valeurs seuils pour le combustible .....	10
3.5 Mise en place de valeurs seuils pour les cendres volantes.....	10
4. <b>RECHERCHE DE VALEURS SEUILS POUR LE COMBUSTIBLE</b> .....	11
4.1 Infos générales.....	11
4.2 Métaux et chlore présents dans le bois naturel (construction et exploitation d'une base de données) .....	11
4.3 Métaux dans les déchets de bois.....	13
4.4 Comparaison des valeurs seuils retenues avec les valeurs limites étrangères .....	14
4.5 Influence de la teneur en chlore du combustible sur les émissions de dioxines .....	14
4.6 Composés organiques chlorés présents dans les déchets de bois .....	15
4.7 Influence de la présence de composés organo-halogénés sur les émissions de polluants (notamment de dioxines et furanes) .....	17
5. <b>RECHERCHE DE VALEURS SEUILS DANS LES CENDRES</b> .....	19
5.1 Teneurs en métaux dans les cendres .....	19
5.2 Teneurs en dioxines dans les cendres.....	21
6. <b>EFFICACITE DES DISPOSITIFS DE FILTRATION DES FUMÉES PERFORMANTS</b> <b>25</b>	
6.1 Vis-à-vis des métaux lourds.....	25
6.2 Vis-à-vis des dioxines et furanes .....	27
7. <b>COMMENTAIRES GÉNÉRAUX</b> .....	29
8. <b>RECOMMANDATIONS CONCERNANT LES COMPOSÉS À SUIVRE DANS LE COMBUSTIBLE</b> .....	31
9. <b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	33
10. <b>LISTE DES ANNEXES</b> .....	39



## 1. OBJECTIFS

Cette note a pour objectifs :

- D'apporter des éléments techniques permettant de faciliter la distinction entre bois naturel et déchets de bois, et donc de faciliter la comparaison de données notamment lors d'un examen de dossier de demande d'assimilation d'un déchet à un combustible commercial (cf. circulaire du 11 août 1997) ;
- D'étudier les mesures pouvant être prises pour contrôler et minimiser autant que possible les émissions de polluants des installations classées dans la rubrique 2910B alimentées avec de la biomasse (bois dans le cas de la présente étude) faiblement adjuvantée.

## 2. PRÉSENTATION

Parmi les paramètres susceptibles d'occasionner des émissions de polluants relativement importantes par rapport à un fonctionnement dit normal d'une chaudière à bois et les moyens à mettre en œuvre pour y remédier, citons :

- Le fonctionnement à allure réduite (cela dépend bien évidemment de son dimensionnement et de la demande d'énergie). Ce paramètre joue sur la qualité de la combustion et donc en particulier sur la formation des dioxines et furanes, de HAP, de COV. Dans ce cas précis, le surplus de polluants émis (sous forme particulaire) pourra être toutefois en grande partie capté par un dispositif de traitement des fumées performant,
- Les dysfonctionnements de l'installation (qui peuvent engendrer une détérioration de la qualité de la combustion). Là encore, le surplus de polluants émis (sous forme particulaire) pourra être en grande partie capté par un dispositif de traitement des fumées performant,
- Les dysfonctionnements du dispositif de traitement des fumées, le pire des cas a priori, les polluants n'étant plus qu'en partie captés. La détection d'un dysfonctionnement du dispositif de filtration des fumées (arrêt intempestif, perçage d'un filtre, etc.) pourrait déclencher la réalisation d'un prélèvement de combustible afin de s'assurer de l'absence d'introduction de bois traités durant cet épisode, en particulier si la traçabilité administrative des produits entrants est insuffisante. Il pourrait y avoir alors autant de déterminations que de lots de déchets livrés pendant la période et le non dépassement des valeurs seuils pourrait être vérifié,
- L'introduction d'un produit contaminé en tant que combustible. Actuellement pour caractériser le gisement (état initial), des tests sont réalisés en chaudière par comparaison avec un combustible commercial de référence. En l'absence d'une traçabilité administrative des produits entrants, la mise en place de valeurs seuils sur le combustible peut permettre de limiter l'apport de substances nocives dans la chaudière. Un contrôle des cendres volantes, plus représentatif temporellement qu'un contrôle du combustible, pourrait également permettre d'éviter l'occurrence de ces phénomènes.

Afin de s'assurer de l'absence d'importants rejets polluants, comme évoqué précédemment, différents modes d'actions<sup>1</sup> parfois complémentaires, directs ou indirects, sont possibles tels que :

1. La réalisation de tests comparatifs (caractérisation du gisement initial),
2. La mise en place d'une traçabilité administrative des produits,
3. La mise en place d'un dispositif d'épuration performant. Il est pour cela nécessaire de bien connaître l'efficacité des dispositifs d'épuration des fumées vis-à-vis des polluants les plus nocifs,
4. La mise en place de valeurs seuils pour le combustible,
5. La mise en place de valeurs seuils pour les cendres volantes.

---

<sup>1</sup> D'autres préconisations portant sur la formation du personnel, la conduite de la chaudière, etc. peuvent bien entendu être également faites mais ne font pas l'objet du présent document.

### 3. ETAT DES LIEUX

Les polluants visés par cet état des lieux sont les métaux lourds, les composés organo-halogénés et le chlore. D'autres composés peuvent être également présents dans les déchets de bois, tel que l'azote<sup>2</sup>, qui peuvent générer des polluants.

#### 3.1 Réalisation de tests comparatifs

La réalisation de tests pour comparer les émissions d'un produit à valoriser à celles d'un combustible commercial de référence permet de s'assurer que le produit à valoriser émet des quantités de polluants comparables à la référence, d'ajuster ou d'introduire éventuellement de nouvelles valeurs limites si les émissions de ce produit sont légèrement différentes de la référence ou d'interdire son classement en tant que combustible.

Il est recommandé de réaliser les tests sur l'installation devant accueillir ce nouveau produit, afin que les résultats soient représentatifs. Si l'approvisionnement portait sur plusieurs installations ou si l'installation devant accueillir le produit n'est pas disponible, il conviendrait de bien choisir l'installation devant accueillir ces tests. Si celle-ci est dotée d'un dispositif de filtration performant, celui-ci gommara profondément les écarts observables à l'émission, notamment en ce qui concerne les polluants les plus nocifs : métaux lourds et dioxines étant captés par filtration (cf. paragraphe 6). Seule une analyse fine des différents compartiments (combustible, cendres sous foyers, cendres volantes, émissions) pourra permettre de conclure sur l'équivalence du produit à valoriser et de la référence. Or cette analyse peut-être complexe à mener compte tenu notamment de la durée des essais, en général d'une journée, qui engendre des difficultés pour séparer les cendres provenant du produit à tester et de sa référence et de la difficulté à boucler des bilans matières sur ce type d'installation.

Conduit sur une installation non équipée d'un dispositif de filtration performant, les différences entre les deux produits seront alors bien mises en valeur, notamment à l'émission. Il convient donc de faire attention, pour conclure, avec équité, à une assimilation ou non d'un produit donné à un combustible commercial, au dispositif d'épuration qui équipe la chaudière de test. Il conviendrait donc de revoir le mode opératoire en vigueur. En 1997, année de rédaction de la note qui fait référence sur ce sujet, les installations concernées n'étaient pas équipées de dispositifs de filtration des fumées performants.

#### 3.2 Mise en place d'une traçabilité administrative des produits

Elle doit permettre d'assurer un suivi du combustible (ou de chaque combustible constituant un mélange) sortant du site de production jusqu'au site de valorisation énergétique, dans l'objectif de connaître sa provenance, ses caractéristiques et les traitements éventuels qu'il a subi. Le FCBA (2008) a proposé une approche pour un tel suivi. S'il est possible de disposer d'une bonne connaissance de la nature et des quantités d'adjuvants utilisés (traitements, revêtements, etc.), il est aisé de définir les polluants susceptibles d'être générés lors de la combustion et de fixer, le cas échéant, les modalités d'une surveillance des émissions appropriée.

---

<sup>2</sup> L'analyse de l'azote dans les combustibles est déjà demandée par le CEN/TC 335 pour les bois traités chimiquement. Le CEN/TS 14961 propose plusieurs classes de teneurs en azote (< 0,5 / < 1,0 / < 3,0 / > 3,0%). Les déchets de bois chargés en azote tels que les bois encollés génèrent, lors de la combustion, de plus grandes quantités d'oxydes d'azote que le bois naturel. Rappelons que les panneaux de particules, dont la teneur en azote peut-être relativement élevée, sont classés sous la rubrique 2910 B (circulaire du 12 mai 2005).

### **3.3 Mise en place d'un dispositif de filtration performant**

Comme évoqué précédemment, le dispositif d'épuration des fumées est, sauf défaillance de ce dernier, l'ultime rempart permettant d'éviter les rejets atmosphériques en polluants. L'existence ou la mise en place d'un dispositif de filtration des fumées performant apparaît comme incontournable pour s'assurer à tout instant du respect des valeurs limites à l'émission les plus basses. Le coût d'un tel dispositif est devenu économiquement acceptable à partir d'une puissance de 2 MW (surcoût d'investissement pour la mise en place d'un électrofiltre de 19 % pour une chaudière de 3 MW, seuil garantie 30 mg/m<sup>3</sup> - Plouchart, 2008). Concernant les installations classées dans la rubrique 2910B, qui sont susceptibles de brûler des produits qui nécessitent une bonne qualité de combustion qui ne peut être atteinte que sur une installation de puissance suffisante, de tels dispositifs de filtration pourraient être imposés. L'efficacité de ces dispositifs est étudiée dans le paragraphe 6 vis-à-vis des métaux lourds et des dioxines et furanes.

### **3.4 Mise en place de valeurs seuils pour le combustible**

Afin de s'assurer que le produit à valoriser ne soit pas à l'origine d'importantes émissions de polluants, des valeurs seuils pourraient être fixées. De telles valeurs existent déjà dans d'autres pays européens tels que l'Allemagne, la Belgique ou le Royaume Uni (recommandations dans ce dernier pays). Ces valeurs concerneront les substances nocives apportées au bois lors de traitements, à savoir essentiellement certains métaux lourds et substances chlorées qui lors de la combustion pourront participer au processus de formation des dioxines et furanes.

L'un des principaux inconvénients de cette approche est la représentativité de l'échantillon prélevé. Celui-ci peut-être représentatif d'une journée ou d'un lot de combustible. Bien entendu, cet échantillonnage peut-être répété dans le temps, à une fréquence à définir. Il pourra être réalisé par l'exploitant lui-même ou par un tiers, de façon périodique ou inopinée.

La mise en place de telles valeurs seuils a pour objectif de caractériser le gisement (état initial) ainsi que de réaliser un suivi au cours du temps de l'évolution des teneurs en polluants présents dans le combustible (surveillance). Le fait de définir les polluants à mesurer devrait par ailleurs permettre d'éviter la mesure de polluants inappropriés ou l'oubli de certaines substances intéressantes lors de l'établissement d'un dossier d'assimilation, notamment pour conclure quant à la présence ou non de composés organo-halogénés précurseurs de dioxines. L'élaboration de valeurs seuils pour le combustible est étudiée au paragraphe 4.

### **3.5 Mise en place de valeurs seuils pour les cendres volantes**

Un certain nombre de polluants, en particulier les dioxines, se concentre dans les cendres volantes, notamment sur les cendres les plus fines, captées par les systèmes d'épuration performants. Un contrôle des teneurs en polluants nocifs dans les cendres volantes recueillies sous filtres à manches ou électrofiltres peut donc permettre de s'assurer d'une absence d'entrée de combustible souillé.

Du fait de la forte concentration des cendres (6 g environ de cendres volantes seront piégés sur filtre lors de la combustion de 10 kg de bois), un échantillon de cendres volantes récupérées sous un filtre correspondant à plusieurs jours de fonctionnement de l'installation sera temporellement plus représentatif qu'un échantillon de combustible. Les cendres étant conservées assez longtemps sur le site avant évacuation, divers échantillons peuvent-être également prélevés. Comme pour le combustible, l'échantillonnage pourra être réalisé par l'exploitant ou par un tiers de façon périodique ou inopinée. L'élaboration de valeurs seuils pour les cendres volantes est étudiée au paragraphe 5.

## 4. RECHERCHE DE VALEURS SEUILS POUR LE COMBUSTIBLE

Ce travail porte sur les métaux lourds, les composés organo-halogénés et le chlore, ces derniers composés jouant un rôle dans la formation des dioxines et furanes.

### 4.1 Infos générales

Afin de définir des valeurs seuils permettant de distinguer la biomasse naturelle de la biomasse contaminée, en métaux lourds et en chlore, il est nécessaire de connaître les teneurs présentes dans les bois naturels, mais également dans les déchets de bois, les valeurs seuils correspondant à des teneurs maximales en polluants présentes dans la biomasse naturelle. En effet, l'objectif recherché étant de valoriser les déchets de bois n'ayant pas ou peu subis de traitement impliquant du chlore, des métaux lourds, des composés organo-halogénés, ces déchets sont supposés avoir des teneurs en ces polluants proches de celles du bois naturel.

Le terme «naturel» fait référence ici, à la présence de polluants dans les tissus du végétal, sans ajout, à posteriori, d'un traitement ou autre par l'homme et sans contamination particulière (provenant de sols pollués ou d'une pollution par voie aérienne). La présence d'éléments métalliques et de chlore dans la biomasse naturelle dépend essentiellement de trois paramètres :

- Le facteur de transfert racinaire qui est une caractéristique propre permettant d'extraire en plus ou moins grande quantité les éléments présents dans les sols. Chaque cultivar au sein de chaque essence dispose de caractéristiques propres ;
- La teneur en éléments métalliques et en chlore dans les sols. Les teneurs en métaux peuvent varier en fonction du fond géochimique ;
- La pollution atmosphérique qui par dépôt peut contaminer les plantes.

Parmi ces trois paramètres, les deux premiers jouent un rôle prépondérant. Au sein d'une même plante, les différents organes et tissus (feuilles, écorces, bois par exemple) accumulent de façon différente ces éléments. Les feuilles, qui accumulent en grande quantité ces éléments, nécessitent d'être éliminées avant combustion. Elles n'ont donc pas été prises en compte dans le cadre de cette étude.

Pour les raisons évoquées ci-dessus et compte tenu du nombre de données disponibles, les informations relatives à la biomasse naturelle ont été scindées en deux sous-parties : le Bois composé du duramen et d'aubier, et l'Ecorce composée du liber et du suber, afin de mieux cerner si la présence d'écorce dans le produit à valoriser doit-être prise en compte pour fixer une valeur seuil.

La présence de chlore, de composés organo-halogénés et de métaux lourds dans les déchets de bois va dépendre :

- des traitements chimiques effectués, principale voie de contamination,
- de contacts avec des pièces d'usure, à l'origine en général d'une faible contamination,
- d'un contact avec des matériaux ou des sols contaminés.

### 4.2 Métaux et chlore présents dans le bois naturel (construction et exploitation d'une base de données)

Au moyen d'une étude bibliographique, 3000 données de la littérature internationale (teneurs en métaux lourds de divers bois naturels, écorces et déchets de bois) ont été rassemblées pour construire une base de données (non incluse dans le présent document). Celle-ci comprend différentes informations (voir tableau 1), utiles à son analyse.

Tableau 1 : informations recueillies dans la base de données

Publication : numéro de référence bibliographique du document
Produit : type de bois ou déchet (avec possibilité d'avoir son nom scientifique dans le cas d'un bois naturel)
Zone : lieu de l'étude ou de prise de l'échantillon
Nombre d'essais : nombre d'échantillons ou d'essais effectués
Type de valeur : s'il s'agit d'une moyenne, médiane, etc.
Unité : en ppm ou mg/kg de matière sèche ou brute
Teneurs en polluants : métaux lourds et chlore

Dans l'objectif d'établir des valeurs seuils en métaux lourds et en chlore, les données relatives à la biomasse naturelle ont été regroupées, en distinguant le bois de l'écorce ainsi que les différentes essences afin d'étudier l'influence de ces paramètres.

Pour cela, les règles suivantes ont été suivies :

- Toutes les données ont été exprimées en mg/kg de Matière Sèche (lorsque les données obtenues n'ont pu être exprimées dans cette unité, les valeurs correspondantes n'ont pas été prises en compte),
- Lorsque, pour une référence bibliographique donnée, plusieurs teneurs en métaux lourds étaient communiquées, les valeurs minimale, maximale et médiane ou moyenne (par défaut) ont été prises en compte. Le fait de retenir la médiane (ou la moyenne) permet de prendre en considération le plus grand nombre d'échantillons analysés. Lorsque la valeur médiane (ou moyenne) n'était pas donnée, un point intermédiaire correspondant à la moyenne des valeurs minimale et maximale a été ajouté. Pour que ce dernier n'ait pas une influence trop importante sur le positionnement du seuil, il n'a pas été retenu pour la détermination du seuil lorsque l'étendue entre la valeur minimale et maximale correspondante était supérieure à deux fois la moyenne de la série de données (5 valeurs au total ont ainsi été éliminées),
- Lorsque les résultats se situaient sous la limite de détection/quantification, la valeur de cette limite a été prise en compte.

A partir de ces données, un graphe a été établi pour chaque élément métallique. Une valeur seuil correspondant à une concentration maximale naturelle a été positionnée, correspondant selon les métaux, entre 90 et 100 % des échantillons recensés. Quelques valeurs relativement élevées pouvant correspondre à des biomasses contaminées ou à des seuils de quantification analytique ont été éliminées.

Les valeurs seuils obtenues pour le bois et l'écorce sont présentées dans le tableau 2. Pour chaque élément, les graphes et l'analyse complète des résultats sont présentés en annexe 1.

Tableau 2 : Valeurs seuils pour le bois naturel (en mg/kg MS)

Eléments	Bois	Ecorce	Valeurs seuils proposées
Hg	0,1	0,06	0,1
As	0,7	1	0,7
B	100	100	100
Ba	50	400	50
Cd	2,2	1	2,2
Co	1,2		1,2
Cr	17		17
Cu	20	20	20
Mn	240	800	240
Ni	6		6
Pb	8	10	8
Ti	60	50	60
Sb	0,5	0,35	0,5
Se	0,4	0,4	0,4
V	3		3
Zn	100	200	100
Cl	100		100

Certains paramètres tels que l'essence et la présence d'écorce peut jouer un rôle important sur la teneur en métaux lourds du combustible et donc sur les émissions de ces polluants lors de la combustion. L'essence de bois (résineux ou feuillus) intervient notamment sur les teneurs en Hg, Mn et Zn. Les valeurs seuils proposées prennent en compte l'ensemble des essences. La présence d'écorce dans le combustible peut accroître la teneur en métaux lourds du combustible, notamment en Ba, Mn et Zn car la concentration de ces éléments dans les écorces est bien supérieure à celle du bois.

Les valeurs seuils proposées (dernière colonne du tableau) sont relatives au bois, les installations classées en rubrique 2910B accueillant a priori relativement peu d'écorce. Si des écorces devaient entrer en proportion significative sur les installations, les valeurs seuils en Ba, Mn et Zn proposées mériteraient d'être rehaussées.

### 4.3 Métaux dans les déchets de bois

Les valeurs seuils proposées ont été comparées aux résultats d'analyses d'échantillons de déchets de bois de la littérature internationale et à la valeur médiane de ces résultats dans des graphes établis pour chaque élément métallique en annexe 2. Des commentaires sont associés à chacun de ces graphes.

#### 4.4 Comparaison des valeurs seuils retenues avec les valeurs limites étrangères

Les valeurs seuils proposées sont comparées aux valeurs limites ou aux recommandations établies dans d'autres pays de l'Union Européenne dans le tableau 3. Rappelons que les valeurs limites étrangères portent sur un nombre restreint de polluants qui vise plus particulièrement à éliminer les bois traités. Nos investigations, plus exploratoires, prennent en compte un plus grand nombre de polluants.

Tableau 3 : Comparaison des valeurs seuils proposées avec les valeurs étrangères et les valeurs seuils proposées par le CTBA en 2003 (en mg/kg de MS)

Concentration en mg/kg MS	Valeurs seuils proposées	Valeurs limites allemandes	Valeurs limites belges	Recommandation UK	Proposition CTBA
Hg	0,1	0,4			(As + Cd + Cr + Mn + Pb + Sn + Zn) Total < 1000
As	0,7	2	2		
B	100				
Ba	50				
Cd	2,2			< 1	
Co	1,2				
Cr	17	30	30		
Cu	20	20	20		
Mn	240				
Ni	6				
Pb	8	30	90	< 100	
Ti	60				
Sb	0,5				
Se	0,4				
V	3				
Zn	100			< 200	
Cl	100	600	600	< 1000	0,60%
F		100			
PCP		3			
PCB		5			
Total organo-chlorés					10

Les valeurs seuils proposées, qui correspondent à une concentration maximale dans le bois naturel, sont, pour l'ensemble des métaux lourds, équivalentes (cas du Cu) ou inférieures aux valeurs limites étrangères. La connaissance de ces écarts et des teneurs en métaux présentes dans les déchets (annexe 2) pourrait être mise à profit pour revoir certaines valeurs à la hausse, en particulier dans le cas du chlore (cf. paragraphe 4.5).

#### 4.5 Influence de la teneur en chlore du combustible sur les émissions de dioxines

Une étude menée (Axenne 2006) sur des chaudières à bois équipées de dispositifs de filtration performants (filtres à manches ou électrofiltres) de puissance comprise entre 0,6 et 11 MW met en évidence des émissions de dioxines et furanes légèrement supérieures lors de la combustion de biomasses particulières (céréales et pailles) connues pour contenir de plus grandes quantités de chlore que le bois naturel. Les valeurs mesurées demeurent toutefois toutes inférieures à 0,1 ng I.TEQ/m<sub>0</sub><sup>33</sup>.

<sup>3</sup> m<sub>0</sub><sup>3</sup> : normal mètre cube

Par ailleurs, des essais menés par Launhardt et al. avec des céréales, pailles et herbes sèches, conduisent à la même conclusion. Cet auteur constate notamment que les teneurs en dioxines commencent à augmenter lorsque la teneur en chlore du combustible dépasse les 1500 mg/kg de MS. Les émissions de dioxines et furanes lors de la combustion de paille et d'herbes sèches contenant entre 1500 et 3000 mg de chlore par kg de MS, brûlés dans une chaudière dont les émissions de poussières sont comprises entre 150 et 280 mg/m<sup>3</sup>, évoluent entre 0,25 et 1,8 ng I.TEQ/m<sup>3</sup>.

Comme l'indique le graphe en annexe 1, la teneur en chlore dans le bois naturel est inférieure à 100 mg/kg et celle de l'écorce inférieure à 200 mg/kg. Ces valeurs sont similaires à celles du CEN/TS 14961 qui mentionne des teneurs en chlore de l'ordre de 100 et 200 mg/kg de MS respectivement pour le bois et l'écorce. Le CEN/TS 14961 propose, par ailleurs, plusieurs classes de teneurs en chlore : < 0,03 % (bois naturel), < 0,07%, < 0,1 % et > 0,1 %, pour les bois plus ou moins adjuvantés.

#### Commentaires :

Le taux de chlore de la biomasse est un paramètre important, mais pas déterminant, sur les émissions de dioxines et furanes. La forme dans laquelle il se trouve organique ou minérale et la présence de précurseurs organiques jouent un rôle plus important. Comme l'indiquent les essais menés sur des biomasses plus riches en chlore que le bois naturel, il semble que le taux de chlore doit être élevé, supérieur à 1500 mg/kg pour être à l'origine d'une augmentation franche des émissions de dioxines. Compte tenu de ces résultats, la valeur seuil proposée pour cet élément pourrait donc être rehaussée.

Par ailleurs, notons que le chlore joue également un rôle sur les émissions de métaux : une augmentation de la teneur en chlore des déchets favorisant une plus forte volatilisation de certains métaux lors de la combustion (Poole et al).

#### **4.6 Composés organiques chlorés présents dans les déchets de bois**

Parmi les composés organiques chlorés, le PCP (et ses dérivés) a largement été utilisé par le passé pour préserver les pièces de bois exposées aux intempéries (bois d'extérieur, bois de construction, portes et fenêtres, palettes, etc.). Les préparations commerciales contenant du PCP étaient également contaminées à des degrés divers par les dioxines et furanes, produits de réactions secondaires à la fabrication du PCP (Hansen et al., Swedish Environmental Protection Agency). Une étude menée par Fries et al. met en évidence la présence de ces polluants dans les bois traités au PCP, parfois en assez forte teneur (quelques dizaines de µg I.TEQ/kg). **Ces bois participent donc par ce biais à une contamination de l'environnement s'ils ne sont pas éliminés dans des conditions appropriées**, d'autant plus que la durée de demi-vie des dioxines dans le bois a été estimée à 150 ans en se basant sur les propriétés physico-chimiques de ces molécules (Bremmer et al.).

Les principaux agents de préservation du bois pouvant être présents en quantité dans les déchets de bois sont le PCP, le DDT, le lindane, ou les PCB, ces derniers composés ayant été utilisés comme agent de fixation des produits de préservation ou comme plastifiants dans certains joints utilisés dans les bâtiments. Notons que le DDT peut se dégrader en sous-produits (DDD et DDE) ce qui rend la recherche de ces substances dans les déchets de bois particulièrement délicate. L'utilisation de ces composés est fortement restreinte ou interdite depuis maintenant plusieurs décennies ce qui conduit à en limiter les teneurs dans les déchets de bois. Celles-ci décroissent au fil du temps. Le PCP a très largement été utilisé en tant qu'insecticide et fongicide notamment pour le traitement des bois d'extérieur et de construction. Des teneurs de plusieurs centaines de mg/kg ont été mis en évidence dans des déchets de bois par Fries et al. ainsi que par l'agence de protection de l'environnement suédoise (Swedish Environmental Protection Agency). Sa durée de demi-vie a été estimée à 15 ans par Bremmer et al.

Lors d'une étude menée par Abb et al. en Allemagne en 2010, sur 22 échantillons de déchets de bois de catégorie AI<sup>4</sup> et AII, aucun échantillon ne dépassait la valeur limite en PCB et un seul échantillon était contaminé avec du lindane (1,5 mg/kg) et du DDX<sup>5</sup> (15 mg/kg). Les 18 autres échantillons n'étaient pas contaminés. Enfin sur 15 échantillons de catégorie AIII et AIV analysés lors de la même étude, seul un échantillon dépassait la valeur limite en PCB (6 mg/kg). Huit échantillons étaient contaminés par du DDX (valeur maximum atteinte : 158 mg/kg, valeur médiane 4,3 mg/kg). 50 % des échantillons de catégorie AIII et AIV étaient donc contaminés. En regard des résultats obtenus, l'auteur indique qu'un tri visuel est quasiment suffisant pour séparer les déchets contaminés des autres. Vis-à-vis de ces polluants, ce constat confirme nos observations (Ineris 2011). Abb et al. comparent les résultats obtenus à ceux d'autres études :

- En 2003, Schulze et al. déterminaient la teneur en PCB de 39 échantillons de bois sélectionnés statistiquement. Seuls deux échantillons dépassaient la valeur limite allemande relative au recyclage des déchets de bois (5 mg/kg), toutes les autres valeurs étant sous le seuil de quantification analytique,
- En 2002, sur un total de 12 échantillons de déchets de bois analysés par Gras et al., seul un échantillon dépassait la valeur limite.

Une autre étude menée au Japon par Kurata et al. met en évidence des teneurs très faibles de produits de préservation (DDT, chlordane, dieldrin, chlorpyrifos) dans des déchets de bois de démolition : < 0,1 mg/kg et dans des déchets de bois provenant de l'industrie du papier, de la fabrication de panneaux, etc. : < 0,01 mg/kg. Sur 39 échantillons de différentes provenances (industries et déchets de bois de démolition) analysés en 2001-2002, les teneurs en PCP, TétraCP et TriCP sont plus élevées allant de < 0,005 à 9,4 mg/kg pour le PCP, de < 0,005 à 3,7 mg/kg pour le TétraCP, et de < 0,005 à 14 mg/kg pour les TriCP, les teneurs moyennes étant de 1,2 mg/kg pour le PCP, 0,4 mg/kg pour le TétraCP, et de 1,3 mg/kg pour les TriCP.

D'autres produits fongicides tels que par exemple le tebuconazole et le propiconazole sont aujourd'hui utilisés pour le traitement du bois. Ceux-ci contiennent également du chlore mais en moindre quantité que les composés utilisés par le passé. On peut raisonnablement penser qu'ils ne sont donc pas à l'origine d'importantes émissions de dioxines et furanes (cf. paragraphe sur la teneur en chlore du combustible).

De nombreux autres composés organiques chlorés ont été utilisés, ou sont encore utilisés pour le traitement du bois, rendant difficile l'élaboration d'une liste exhaustive. Ces composés ont toutefois été ou sont employés en faible quantité pour le traitement du bois. Ils ne devraient donc pas être, a priori, à l'origine d'importantes émissions de dioxines et furanes.

#### Commentaires :

En préalable, il est nécessaire de préciser que les nombreux déchets de bois traités au PCP contiennent également des teneurs non négligeables de dioxines et furanes (produits de réaction secondaire à la fabrication du PCP). Ces déchets sont donc susceptibles de contaminer différents milieux s'ils ne sont pas éliminés correctement.

De nombreux composés organiques chlorés ont été utilisés par le passé pour traiter le bois. Compte tenu de la durée de vie de ces composés et qu'ils ne sont pour la plupart plus utilisés depuis longtemps, leurs teneurs dans les déchets de bois diminuent régulièrement au fil du temps.

---

<sup>4</sup> Ordonnance allemande portant sur le management des déchets de bois (AltholzV, 2002) ; AI : bois naturels pouvant être traités mécaniquement, AII : déchets de bois traités sans substances organiques halogénés, AIII : déchets de bois revêtus avec une substance organo-halogéné mais n'ayant pas reçu de produits de préservation, AIV : déchets de bois traités avec des produits de préservation

<sup>5</sup> DDX : somme de trois substances DDT et ses deux produits de dégradation (DDD et DDE)

Ces composés ne sont donc plus présents dans bon nombre de cas qu'à l'état de traces ce qui ne conduit pas par combustion à des teneurs en dioxines élevées.

Seuls quelques déchets de bois, en général visuellement reconnaissables, sont susceptibles de contenir des teneurs notables de composés organiques chlorés, notamment de PCP et autres chlorophénols, de DDT et ses produits de dégradation ainsi que des PCB.

Le PCP et autres chlorophénols, composés largement utilisés, sont encore susceptibles d'être présents notamment dans des déchets de bois de démolition, dans les bois d'extérieur, etc.

Le DDT et ses dérivés ont été mis en évidence en Allemagne uniquement sur des déchets de bois connus pour contenir des produits organiques halogénés, qui ne peuvent être valorisés en chaudière.

Les PCB sont a priori peu mis en évidence dans les déchets de bois y compris les déchets connus pour contenir des produits organiques halogénés : 1 échantillon sur 40 dépassait la valeur limite allemande en 2010 (Abb et al.).

L'ordonnance relative au management des déchets de bois en Allemagne fixe des valeurs limites pour deux de ces composés : le PCP et les PCB.

Compte tenu de sa forte utilisation par le passé, le PCP reste un bon indicateur du degré de contamination des déchets de bois par les composés organiques halogénés.

En ce qui concerne les PCB, outre une utilisation directe pour le traitement du bois, ces composés peuvent également provenir d'une contamination des déchets durant leur cycle de vie par passage sur un site contaminé par exemple. La mise en place d'une valeur seuil pour ces derniers composés n'est donc pas sans intérêt, malgré le faible niveau de contamination observé en Allemagne.

Notons par ailleurs que la structure chimique de ces précurseurs (PCP et PCB) est proche de celle des dioxines et furanes, ce qui favorise la formation de ces composés.

#### **4.7 Influence de la présence de composés organo-halogénés sur les émissions de polluants (notamment de dioxines et furanes)**

Un certain nombre de produits organiques chlorés ont été ou sont encore utilisés pour encoller, revêtir ou protéger le bois contre diverses attaques. Ces composés, qui se dégradent très bien thermiquement (efficacité > 99,99% - Lee et al.), peuvent être à l'origine d'émissions de dioxines et furanes par reformation de ces molécules en sortie chaudière (synthèse dite «de novo»). Schatowitz et al. a par exemple mis en évidence des teneurs allant de 2,7 à 14,42 ng I.TEQ/m<sup>3</sup> lors de la combustion de bois traités en petites chaudières (sans système de traitement performant) tandis que les émissions de bois non traités étaient comprises entre 0,019 et 0,214 ng I.TEQ/m<sup>3</sup>. Une autre étude menée par Kolenda et al. sur 7 chaudières (sans système de traitement performant) de puissance comprise entre 0,05 et plus de 5 MW a également permis de mettre en évidence des teneurs similaires allant de 0,004 à 9,82 ng I.TEQ/m<sup>3</sup>, les teneurs les plus élevées étant obtenues avec les déchets de bois les plus chargés en matières organiques chlorés (chlorure d'ammonium et PVC présents sur des panneaux à base de bois). Lors de cette reformation, les caractéristiques de la combustion jouent un rôle essentiel, la teneur en dioxines et furanes dans les cendres volantes augmente de façon significative avec la formation d'imbrûlés (Wunderli et al.). Le carbone présent sur les particules adsorbe alors les molécules de dioxines et furanes présentes dans l'effluent gazeux. Pour minimiser les émissions de dioxines, il convient donc d'équiper les installations de systèmes de filtration poussée tel qu'électrofiltre ou filtre à manches capables d'arrêter ces fines cendres volantes (de granulométrie inférieure à 2,5 µm).

Pour les traitements de préservation du bois sans composés organiques chlorés, 13 essais ont été réalisés par Salthammer et al. sur deux installations de faibles puissances (35 et 50 kW) dans des conditions de combustion optimisées. Les teneurs en dioxines mesurées étaient comprises entre 0,02 et 1,45 ng I.TEQ/m<sub>o</sub><sup>3</sup>, cinq échantillons dépassaient la valeur limite de 0,1 ng I.TEQ/m<sub>o</sub><sup>3</sup> à 11 % d'O<sub>2</sub>. Ces résultats mettent en évidence que ces traitements peuvent également favoriser la formation des dioxines et furanes, les teneurs précédentes étant supérieures à celles du bois naturel. Toutefois, elles restent très significativement plus faibles que celles obtenues avec des bois traités avec des composés organiques chlorés.

Les bois imprégnés de créosote ne sont pas à l'origine d'émissions de ces polluants (0,028 et 0,088 ng I.TEQ/m<sub>o</sub><sup>3</sup> Salthammer et al. - 0,075 ng I.TEQ/m<sub>o</sub><sup>3</sup> Ineris 2012) mais sont toutefois susceptibles d'être à l'origine d'émissions d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), constituants de la créosote, notamment lorsque la qualité de la combustion n'est pas optimale (0,10 mg/m<sub>o</sub><sup>3</sup> à 11 % d'O<sub>2</sub> - Ineris 2012).

#### Commentaires :

L'introduction de déchets de bois dans une chaudière peut conduire à d'importantes émissions de dioxines et furanes. Celles-ci proviendront essentiellement de l'introduction de bois imprégnés avec des composés chlorés.

Les bois imprégnés de créosotes ont peu de chance d'arriver en grande quantité dans les chaudières car ces bois sont aisément reconnaissables, le gisement est par ailleurs bien identifié (traverses, poteaux téléphoniques essentiellement) et les filières d'élimination mises en place.

## 5. RECHERCHE DE VALEURS SEUILS DANS LES CENDRES

### 5.1 Teneurs en métaux dans les cendres

Après combustion, les métaux lourds vont être associés à la matière particulaire et plus particulièrement aux particules fines. Les cendres volantes et les poussières vont donc contenir une proportion importante de métaux lourds. Chaque élément métallique a toutefois un comportement propre.

De nombreuses études ont été réalisées par Obernberger sur le comportement des métaux lourds lors de la combustion de bois naturel et de déchets de bois [2,8,30,31,35,51]. Ces travaux (cf. tableaux 4 et 5) sont très souvent utilisés comme référence afin de cerner la distribution des métaux lourds dans les cendres.

Tableau 4 : Pourcentage des différentes fractions de cendres produites par une chaudière équipée d'un système d'épuration par cyclone et filtre en fonction du type de combustible (valeurs exprimées en % massiques)

Fraction cendres \ Type biomasse	Ecorce	Bois	Paille
Cendres sous foyer	75,0 - 85,0	70,0 - 90,0	80,0 - 90,0
Cendres cyclone	15,0 - 25,0	10,0 - 30,0	3,0 - 6,0
Cendres filtre	2,0 - 5,0	4,0 - 8,0	5,0 - 10,0
Poussières émises	0,1 - 2,0	0,2 - 3,0	0,2 - 1,0

Les cendres volantes sont constituées des cendres recueillies sous cyclone, sous filtre et des poussières émises. La proportion moyenne de cendres volantes produites est de 26%. Sur une installation dotée d'un filtre performant, la quantité de poussières émises est négligeable par rapport à la quantité globale de cendres produites.

Tableau 5 : Mesures de la distribution en métaux lourds dans les différentes fractions de cendres produites par une chaudière équipée d'un système d'épuration par cyclone et filtre, lors de la combustion d'un mélange de bois et d'écorces

	cendres mg/kg MS	foyer %	cyclone %	filtre %	poussières %
<b>Hg</b>	0,4	0,8	7,6	70,7	20,9
<b>As</b>	5,8	51,6	32,2	12,5	3,7
<b>Cd</b>	18,2	6,4	47	36	10,7
<b>Co</b>	14,2	68,2	26,1	4,4	1,3
<b>Cr</b>	257,6	72,6	19,7	5,9	1,8
<b>Cu</b>	237,6	61,9	21,7	12,6	3,7
<b>Mn</b>	19000	64,7	30	4,1	1,2
<b>Ni</b>	46,2	58,7	31,5	7,6	2,3
<b>Pb</b>	65,9	11,7	34,2	41,7	12,4
<b>V</b>	45,1	71,5	22,8	4,4	1,3
<b>Zn</b>	2094,5	23,2	45,2	24,4	7,2
<b>Mo</b>	3,2	59,9	28,2	9,2	2,7
<b>Cl</b>	3800	7,2	63,5	22,6	6,7
<b>total</b>		64,5	28,5	5,4	1,6

Ces résultats mettent en évidence deux types de comportement des métaux lourds :

- Ceux qui sont retenus en majorité dans les cendres sous foyer : c'est le cas par exemple de l'As, du Cr et du Cu,
- Ceux qui se retrouvent dans les cendres volantes : c'est le cas du Cd, du Pb et du Zn. Plus de 70 % de ces métaux sont présents dans les cendres volantes. Même si ces métaux sont susceptibles d'être en grande partie captés par un système d'épuration performant, il convient d'en limiter l'introduction dans la chaudière, via des valeurs seuils adéquates.

Une installation peut faire l'objet de différents contrôles :

- A l'émission, ce contrôle est obligatoire pour les installations classées sous la rubrique 2910B. Il reste cependant très ponctuel, coûteux et difficile à mettre en place car il nécessite l'installation de matériels de prélèvement relativement lourds. Il n'est donc pas approprié pour réaliser un vrai contrôle inopiné par exemple,
- Sur le combustible, moins coûteux, sa représentativité reste toutefois encore limitée. Il présente l'intérêt, via la mise en place de valeurs seuils, de favoriser un meilleur tri des entrants. Il peut être mis en œuvre de manière inopinée,
- Et pourquoi pas les cendres volantes piégées par le dispositif de filtration ?

Le contrôle des cendres volantes présente l'intérêt de pouvoir être réalisée de manière complètement inopinée. Il est par ailleurs relativement peu coûteux et présente l'avantage d'être plus représentatif qu'un contrôle du combustible du fait de la concentration des cendres volantes (6 g environ de cendres sont récupérées sous filtre lors de la combustion de 10 kg de bois). De plus, **les bacs de récupération de ces cendres rassemblent les produits de combustion correspondant à plusieurs jours voire plusieurs semaines de fonctionnement, ce qui peut permettre d'avoir une vision sur une plage de temps conséquente.**

Connaissant ces informations, il est intéressant d'établir des valeurs seuils pour les cendres volantes afin de contrôler les installations. Une utilisation de déchets contaminés par les métaux lourds, comme combustible, pourrait être observée dans les analyses des cendres.

La variabilité des données sur les concentrations en métaux lourds dans les cendres volantes, liée au combustible utilisé et aux performances de la chaudière, et le manque actuel de données rendent l'établissement direct de valeurs seuils en métaux lourds difficile et délicat. Compte tenu de cette situation et des informations connues sur le comportement des métaux lourds dans les cendres, il a été jugé préférable, en première approche, de se concentrer sur trois métaux lourds représentatifs : **le Cd, le Pb et le Zn. Ces éléments témoignent de la présence de déchets contaminés** et se concentrent préférentiellement dans les cendres volantes.

Afin de proposer des valeurs seuils en Cd, Pb et Zn pour les cendres volantes (cendres cyclone et filtre), un calcul théorique a été effectué. Pour cela, les hypothèses suivantes ont été retenues :

- le taux de Cd, Pb et Zn a été pris égal soit à la valeur seuil proposée, soit à la valeur moyenne du bois naturel,
- le taux de cendres du bois a été pris égal à 1 %,
- le taux de cendres volantes a été pris égal à 26 % (cf. tableau 4),
- le Cd, le Pb et le Zn se retrouvent en totalité dans les cendres volantes.

En considérant que 100 % des métaux sont piégés dans les cendres volantes (cf. tableau 5), ce calcul surestime les teneurs de ces métaux dans les cendres volantes. Il permet d'obtenir de premières valeurs seuils pour les cendres volantes en se basant, soit sur les valeurs seuils proposées pour le combustible, soit sur les valeurs moyennes déterminées dans ce dernier.

*Tableau 6 : Proposition de valeurs seuils en Cd, Pb et Zn pour les cendres volantes (valeurs exprimées en mg/kg MS) en fonction des valeurs seuils proposées pour le combustible et des valeurs moyennes déterminées dans le combustible*

<b>Éléments métalliques</b>	<b>Valeurs seuils</b>	<b>Valeurs moyennes</b>
Cd	846	131
Pb	3077	863
Zn	38462	10065

L'Annexe 3 présente, pour les trois éléments ci-dessus, les valeurs seuils calculées pour les cendres volantes en regard des teneurs réelles obtenues dans diverses publications. Les valeurs seuils calculés permettent d'éliminer certains déchets de bois fortement contaminés.

Les installations brûlent, en général, des déchets de bois associés à de la biomasse naturelle, ce qui dilue les teneurs en métaux lourds dans les cendres. Les valeurs seuils calculées ne peuvent pas prendre en considération cette dilution. La valeur moyenne en Cd, Pb et Zn dans les cendres volantes calculée théoriquement à partir de la teneur moyenne de ces éléments dans le combustible est donc très probablement plus représentative. Trois catégories de valeurs peuvent ainsi être définies :

- Catégorie 1 : teneurs mesurées < valeurs moyennes : combustible naturel.
- Catégorie 2 : valeurs seuils > teneurs mesurées > valeurs moyennes : combustible naturel, avec présence possible de faibles quantités de déchets de bois plus ou moins contaminés.
- Catégorie 3 : teneurs mesurées > valeur seuil : présence de déchets de bois contaminés.

**Il serait ainsi possible d'effectuer des contrôles en utilisant les cendres volantes comme indicateurs d'une utilisation de déchets de bois.** Cependant, ces données doivent être prises avec précaution, puisqu'il s'agit de données théoriques. Il est donc recommandé d'effectuer un travail complémentaire pour affiner ces valeurs avec des teneurs réelles en métaux dans les cendres volantes.

## **5.2 Teneurs en dioxines dans les cendres**

L'OFEFP indique les teneurs en dioxines dans les cendres suivantes :

- Cendres sous foyer (combustion de bois naturel) : environ 4 ng I.TEQ/kg,
- Cendres sous foyer (combustion de bois usagés) : environ 10 ng I.TEQ/kg,
- Cendres volantes sous cyclone (combustion de bois usagés) : 800 ng I.TEQ/kg,
- Cendres volantes sous filtre (combustion de bois usagés) : environ 4000 ng I.TEQ/kg.

Luthe et al. rapportent des teneurs en dioxines et furanes dans les cendres volantes sous électrofiltre allant de 1300 à 8040 ng I.TEQ/kg pour des installations alimentées avec des bois chargés en sels (teneur en chlore allant de 0,15 à 0,70 %).

Pour la combustion de bois naturel sur trois installations (de puissance comprise entre 110 et 850 kW) équipées de filtres performants (filtres céramiques et filtres à manches), des teneurs en dioxines comprises entre 0,26 et 1,12 ng I.TEQ/kg pour les cendres sous foyer et entre 117 et 372 ng I.TEQ/kg pour les cendres volantes sont rapportés par Oehme et al. Lors de cette dernière étude, des teneurs de 22 ng I.TEQ/kg pour les cendres sous foyer et de 722 à 7620 ng I.TEQ/kg pour les cendres volantes sont rapportées pour la combustion de bois traités au PCP.

Une étude menée en Suisse par Wunderli et al. sur une vingtaine d'installations met en évidence :

- lors de la combustion de bois naturel, des teneurs en dioxines comprises entre 0,6 et 8,6 ng I.TEQ/kg pour les cendres sous foyer et entre 1,5 et 4 ng I.TEQ/kg pour les cendres volantes,
- lors de la combustion de déchets de bois (peints, encollés, déchets issus de construction, démolition à l'exclusion de déchets contenant du PVC et de bois imprégnés), des teneurs en dioxines comprises entre 4,2 et 11 ng I.TEQ/kg pour les cendres sous foyer et entre 730 et 21000 ng I.TEQ/kg pour les cendres volantes,
- lors de la combustion de résidus de bois (transformés mécaniquement), des teneurs en dioxines comprises entre 18 et 6300 ng I.TEQ/kg dans les cendres volantes, ce qui souligne la contamination d'un certain nombre de ces résidus.

Une campagne d'essais menée en Allemagne sur une installation industrielle alimentée en bois contaminés met en évidence des teneurs en dioxines comprises entre 30 et 3300 ng I.TEQ/kg pour les cendres sous foyer et entre 30 et 23300 ng I.TEQ/kg pour les cendres volantes (Bröker et al.).

Des teneurs en dioxines de 310 ng I.TEQ/kg dans les cendres sous foyer et de 6700 ng I.TEQ/kg dans les cendres volantes ont été mesurées au Japon par Yamamura et al. lors de combustion de déchets de bois de démolition.

Dyke et al. mettent également en évidence des teneurs assez élevées dans les cendres sous foyer 584 - 1090 ng I.TEQ/kg et dans les cendres volantes 891 - 1070 ng I.TEQ/kg d'une installation industrielle alimentée avec du bois traité.

Pohlandt et al. ont analysé les teneurs en dioxines de cendres provenant d'installations de combustion de bois. Les résultats suivants ont été obtenus : 0,31 et 0,66 ng I.TEQ/kg pour les cendres sous foyer et 121 et 215 ng I.TEQ/kg pour les cendres volantes. Lors de cette dernière étude, des essais de combustion de bois imprégnés avec des produits inorganiques (sels de bore, de chrome et de cuivre) ont également été réalisés sur une petite installation. Les teneurs en dioxines s'élevaient à 21,2 ng I.TEQ/kg pour les cendres sous foyer et de 52,1 ng I.TEQ/kg pour les cendres volantes lors de la combustion d'un bois faiblement contaminé et de 38,8 ng I.TEQ/kg pour les cendres sous foyer et de 89,6 ng I.TEQ/kg pour les cendres volantes lors de la combustion d'un bois fortement contaminé, mettant en évidence l'absence de contamination forte des cendres volantes par ce type de traitement.

Lors de mesures effectuées en France en 2008 sur 9 installations alimentés avec du bois naturel ou assimilé, le LECES met en évidence des teneurs en dioxines dans les cendres volantes comprises entre 0,7 et 116,5 ng I.TEQ/kg à l'exception d'une installation (6924 ng I.TEQ/kg).

#### Commentaires :

**Les dioxines et furanes semblent se concentrer plus particulièrement dans les cendres volantes des installations ce qui confirme l'intérêt de disposer de systèmes de traitement des fumées efficaces.** Les cendres sous foyer semblent nettement moins chargées que les cendres volantes à l'exception des études menées par Bröker et al et Dyke et al.

Les teneurs en dioxines et furanes dans les cendres volantes sont comprises entre 0 et 400 ng I.TEQ/kg pour le bois naturel et supérieure à 700 ng I.TEQ/kg lors de la combustion de déchets de bois contenant des composés chlorés. Les traitements inorganiques du bois ne contenant pas de chlore ne sont pas à l'origine d'une augmentation franche des teneurs en dioxines dans les cendres volantes.

**L'élaboration d'un seuil permettant de distinguer le bois naturel des bois contaminés avec des composés chlorés est donc envisageable. Ce seuil pourrait être compris entre 400 et 700 ng I.TEQ/kg.**

La teneur en dioxines mesurée dans les cendres volantes (6924 ng I.TEQ/kg) d'une chaudière à bois en 2008 en France par le LECES laisse présager la présence d'une contamination du bois brûlé. Les teneurs en dioxines mesurées à l'émission de cette installation, 2,9 ng I.TEQ/m<sup>3</sup> tendent à confirmer cette hypothèse. Le seuil évoqué ci-dessus paraît suffisamment bien discriminant dans cet exemple.

**La mise en place d'une valeur seuil dans les cendres volantes est d'autant plus pertinente qu'il est difficile de doser correctement tous les composés chlorés susceptibles d'avoir été utilisés pour traiter le bois** (une vingtaine de substances au moins) dans le combustible, et qu'elle permettrait de réaliser aisément des contrôles inopinés afin de vérifier que l'installation ne brûle ou n'a pas récemment brûlé de déchets.



## 6. EFFICACITE DES DISPOSITIFS DE FILTRATION DES FUMÉES PERFORMANTS

### 6.1 Vis-à-vis des métaux lourds

Les objectifs sont de mieux connaître :

- les teneurs en polluants en sortie des dispositifs d'épuration des filtres performants (teneurs en poussières inférieures à 30 mg/m<sup>3</sup>) et très performants (teneurs en poussières inférieures à 10 mg/m<sup>3</sup>) afin d'aider les pouvoirs publics à fixer des valeurs limites adaptées,
- l'efficacité de la mise en place d'un système d'épuration de type filtre sur des installations classées dans la rubrique 2910B.

En 1996, l'US Environmental Protection Agency a publié un rapport (48) sur l'utilisation de déchets de bois dans les chaudières biomasses (plus de 120 installations consommant de la biomasse essentiellement naturelle ont fait l'objet d'essais). L'objectif de cette étude était d'apporter des informations pour définir les déchets pouvant être brûlés en chaudière, d'identifier les problèmes environnementaux associés et de donner des solutions pour y remédier. Dans ce rapport, une étude sur l'efficacité des systèmes d'épuration des fumées a été menée. Les résultats sont présentés dans les tableaux 7 et 8.

Tableau 7 : Emissions de métaux lourds en fonction de la teneur en poussières

Teneurs en métaux (µg/m <sup>3</sup> à 12% de CO <sub>2</sub> , sur gaz sec)	Concentrations en poussières (mg/m <sup>3</sup> à 12% de CO <sub>2</sub> , sur gaz sec)		
	< 11,5 Filtres très performants	23 - 11,5 Filtres performants	> 114 Multicyclones
<b>Hg</b>	0,29	0,27	29,62
<b>As</b>	0,19	0,75	8,75
<b>Cd</b>	0,46	0,37	3,55
<b>Cr</b>	1,4	9,92	27,27
<b>Cu</b>	3,19	1,03	96,87
<b>Mn</b>	43,79	104,98	2133
<b>Ni</b>	3,13	4,02	18,91
<b>Pb</b>	3,38	23,24	102
<b>Se</b>	2,1	2,12	5,7
<b>Zn</b>	63,57	26,4	1211,8
<b>Be</b>	0,18	0,21	1,1

Tableau 8 : Estimation de l'efficacité de réduction des émissions de métaux lourds

	Efficacité (%)	
	Cas 1	Cas 2
<b>Poussières</b>	90 %	80 à 90 %
<b>Hg</b>	99	99
<b>As</b>	97	91
<b>Cd</b>	87	89
<b>Cr</b>	94	64
<b>Cu</b>	97	99
<b>Mn</b>	98	95
<b>Ni</b>	83	79
<b>Pb</b>	96	77
<b>Se</b>	63	63
<b>Zn</b>	95	98
<b>Be</b>	84	81

**Cas 1** : comparaison entre les émissions à la sortie des multicyclones et les émissions à la sortie des filtres très performants

**Cas 2** : comparaison entre les émissions à la sortie des multicyclones et les émissions à la sortie des filtres performants

Dans l'ensemble, les résultats mettent en évidence la très grande efficacité de ces dispositifs d'épuration sur la réduction des émissions de métaux lourds. Les efficacités entre les deux systèmes d'épuration performants et très performants sont assez similaires. Elles sont légèrement dégradées pour le Cr et le Pb dans le cas des systèmes performants.

Afin de confirmer ces résultats, d'autres données recueillies dans la littérature ont été étudiées, de la même façon que l'EPA, en regroupant les données par type de dispositifs de filtration des fumées en prenant en compte la combustion de biomasse naturelle ou assimilé et de déchets de bois plus ou moins contaminés (quelques valeurs seulement). Une valeur moyenne des émissions en métaux a ainsi été déterminée (tableau 9) en sortie de chaque dispositif de filtration des fumées (cyclone et filtre performant). L'efficacité d'épuration des filtres performants par rapport aux cyclones, a été calculée (tableau 10) selon la méthode EPA.

Tableau 9 : Valeurs moyennes d'émission en sortie cyclone (ou multicyclones) et filtres

	Moyenne des émissions en sortie filtre	Moyenne des émissions en sortie cyclone
<b>Concentrations en poussières (mg/m<sup>3</sup> à 6% d'O<sub>2</sub>, sur gaz sec)</b>	20,17 (14)	241 (13)
<b>Teneurs en métaux (µg/m<sup>3</sup> à 6% d'O<sub>2</sub>, sur gaz sec)</b>		
Hg	0,79 (6)	29 (8)
As	9,2 (9)	19 (11)
Cd	1,15 (9)	8,66 (10)
Cr	27 (10)	37 (13)
Cu	12,7 (7)	79,8 (14)
Mn	64 (9)	489 (14)
Ni	11 (10)	65 (11)
Pb	45,6 (11)	347,6 (14)
Zn	236 (7)	1260 (13)

(entre parenthèses) : nombres de valeurs prises en compte

Tableau 10 : Estimation de la réduction des émissions de métaux lourds entre un système d'épuration de type cyclone et de type filtre performant

	Efficacité %
<b>Poussières</b>	91,6
<b>Hg</b>	97,3
<b>As</b>	51,6
<b>Cd</b>	86,7
<b>Cr</b>	27,4
<b>Cu</b>	84,1
<b>Mn</b>	86,9
<b>Ni</b>	82,9
<b>Pb</b>	86,9
<b>Zn</b>	81,3

Certaines valeurs en métaux peuvent être relativement élevées, notamment en sortie cyclone, du fait de la prise en compte des émissions provenant de chaudières alimentées avec des bois contaminés. En sortie filtre, les teneurs en métaux sont bien plus faibles. Elles respectent les valeurs limites fixées dans l'arrêté relatif aux chaudières de puissance supérieure à 20 MW.

Les résultats d'efficacité calculées confirment les données communiquées par l'EPA sauf pour l'As et le Cr, en raison d'une teneur à l'émission en sortie filtre plus grande que dans le rapport de l'EPA. Les teneurs en sortie filtre restent toutefois faibles pour ces deux éléments.

Ces résultats confirment la grande efficacité des dispositifs de filtration performants (teneur en poussières inférieure à 30 mg/m<sup>3</sup>) pour abattre les émissions de métaux lourds. Malgré le faible nombre de valeurs, il est constaté que l'efficacité est d'autant plus forte que la teneur en métaux à l'entrée du dispositif est élevée.

Dans le paragraphe précédent, il a été noté l'importance de suivre les éléments Cd, Pb et Zn, en raison de leur accumulation dans les cendres volantes. Le calcul d'efficacité montre le rôle important des systèmes d'épuration dans la réduction des émissions de ces métaux lourds (efficacité d'épuration d'au moins 80 %).

**L'emploi d'un dispositif d'épuration performant (teneur en poussières inférieure à 30 mg/m<sup>3</sup>) apparaît aujourd'hui comme incontournable sur une installation classée dans la rubrique 2910B. L'emploi d'un tel dispositif devrait permettre de respecter les valeurs limites associées aux métaux lourds fixés dans l'arrêté relatif aux chaudières de puissance supérieure à 20 MW.**

## 6.2 Vis-à-vis des dioxines et furanes

Equipé d'un système de filtration performant, les teneurs en dioxines et furanes à l'émission d'une installation qui brûlent des déchets de bois contaminés au PCP (4100 ppm) ne sont pas très différentes de celles obtenus avec du bois non traité (contenant quand même 6,7 ppm de PCP), 1,19 (3 essais effectués avec du bois traité) vs 0,274 ng I.TEQ/m<sup>3</sup> (3 essais effectués avec du bois non traité - Lee et al.), ce qui confirme la bonne efficacité du filtre vis-à-vis de ces polluants. Luthe et al. (1998) mentionne que l'efficacité d'épuration des filtres est similaire pour les particules et les dioxines et furanes, respectivement de 95 et 97 % sur un électrofiltre/laveur d'une installation alimentée avec des bois chargés en sels (0,24 à 0,42 % de chlore - teneur en particules et en dioxines en sortie respectivement de 40 mg/m<sup>3</sup> à 12 % de CO<sub>2</sub> et 0,075 ng I.TEQ/m<sup>3</sup> à 11 % d'O<sub>2</sub>). Des essais menés par l'EPA sur du bois stocké dans l'eau de mer, donc chargé en sels (chlore inorganique) mettent en évidence une efficacité de réduction des émissions de dioxines et furanes du filtre à manches de 90 %.

Pour des teneurs en entrée de dispositifs d'épuration des fumées (filtre à manches et électrofiltre) légèrement supérieures à  $0,1 \text{ ng I.TEQ/m}_0^3$  (correspondant à des installations alimentées avec du bois naturel), des efficacités moindres sont relevés (59 à 67 % - Axenne 2006).

Commentaires :

L'utilisation de dispositifs d'épuration performants conduit donc à réduire très significativement les émissions de dioxines et furanes sans toutefois être assuré de respecter le seuil de  $0,1 \text{ ng I.TEQ/m}_0^3$ ; bon nombre de valeurs étant proches de ce seuil. Ce seuil ne peut être garanti que par l'injection d'adsorbant dans l'effluent gazeux afin de piéger la fraction gazeuse de ces polluants. Le surcoût en investissement est alors de l'ordre de 13 % pour une installation de puissance 3 MW et 5 % pour une installation de puissance 15 MW (Plouchart).

## 7. COMMENTAIRES GÉNÉRAUX

Plusieurs actions sont possibles pour limiter les émissions de métaux lourds et de dioxines et furanes provenant de la combustion du bois contaminés :

- **Favoriser une traçabilité administrative des produits** par le fournisseur de l'installation de combustion,
- **Favoriser le tri** : il convient dans un premier temps d'éliminer tous les matériaux susceptibles de polluer le bois tels que les plastiques, les mousses, les textiles, et dans un deuxième temps de réaliser un tri visuel afin d'éliminer les bois susceptibles d'être adjuvantés (bois peints, vernis, etc.) ;
- **Brûler ces produits avec des conditions de combustion optimisée** : la puissance de l'installation est ici un atout déterminant, les caractéristiques des installations favorisant la qualité de la combustion. **L'introduction de ces produits sur des installations de tailles suffisantes** ne peut être que préconisée (le seuil réglementaire de 2 MW paraît un bon compromis). Il convient également de veiller à ne pas faire fonctionner les installations à trop faibles allures pour ne pas dégrader la qualité de la combustion ;
- **D'utiliser un système d'épuration performant** (teneurs en poussières inférieures à 30 mg/m<sup>3</sup>) qui permet de récupérer les métaux lourds et les dioxines et furanes présents dans les effluents gazeux. Plus la qualité de la combustion est dégradée et plus les molécules de dioxines sont présentes sous forme particulaire adsorbés par le carbone imbrûlé présent sur les particules, plus l'épuration de ces composés sera efficace, limitant les émissions de ces polluants. L'utilisation d'un tel dispositif devrait dans un bon nombre de cas, y compris lorsque des déchets de bois contaminés sont introduits dans l'installation, permettre de respecter le seuil de 0,1 ng I.TEQ/m<sup>3</sup> sans toutefois le garantir dans tous les cas de figure. Pour garantir le respect de ce seuil, une injection d'adsorbant serait alors nécessaire, le surcoût lié à cette dernière mesure reste assez limité. L'utilisation d'un tel dispositif devrait par ailleurs permettre de respecter les valeurs limites en métaux lourds (sur la base des valeurs de l'arrêté relatif aux installations de puissance supérieures à 20 MW) ;
- **La caractérisation du combustible, régulière et/ou en cas de dysfonctionnement du dispositif d'épuration des fumées et la caractérisation inopinée des cendres volantes devrait freiner les vellétés d'introduire des produits non conformes dans les chaudières.** A terme, ces caractérisations ne peuvent que favoriser un meilleur tri des déchets.



## 8. RECOMMANDATIONS CONCERNANT LES COMPOSES A SUIVRE DANS LE COMBUSTIBLE

Parmi les contaminants qu'il serait intéressant de suivre dans le combustible, citons :

- Le chlore : une valeur trop basse (100 mg/kg) éliminerait l'ensemble des déchets (cf. graphe en annexe 2). Une valeur proche des 600 mg/kg (valeurs allemandes ou belges) semble raisonnable, cet élément n'ayant pas d'influence directe sur les teneurs en dioxines à ce niveau de concentration,
- Les précurseurs à la formation des dioxines et furanes :
  - Le PCP, composé aisément dosable, longtemps utilisé à de fortes teneurs serait intéressant à suivre, pour mieux cerner la provenance d'une éventuelle pollution. La présence à hauteur de quelques ppm de ce composé pouvant être à l'origine d'émissions notables de dioxines et furanes,
  - Les PCB, peu de déchets de bois sont a priori actuellement contaminés par ces composés du fait d'un traitement. Les déchets de bois pourraient toutefois être contaminés par passage sur des sites contaminés avec ces composés,
- Les métaux lourds : Hg, As, Cd, Cr, Cu, Pb, Zn a minima. Cette liste reflète relativement bien les différents contaminants provenant de divers traitements du bois. Elle permet de limiter le nombre de métaux à analyser et donc les coûts analytiques. D'autres métaux pourraient être intéressants à suivre (B, Ba, Ni par exemple) mais ils sont soit beaucoup moins nocifs que les précédents, soit se concentrent essentiellement dans les cendres sous foyer et donc participent moins à la pollution de l'air. Ils seront, par ailleurs, présents dans une très grande majorité des cas de façon concomitante avec un ou plusieurs métaux listés ci-dessus. Ces bois contenant ces autres métaux devraient donc être éliminés du fait d'un dépassement des valeurs seuils associées aux métaux listés ci-dessus.



## 9. BIBLIOGRAPHIE

### Relative aux dioxines et furanes

- Abb M., Breuer J. V., Zeitz C., Lorenz W., Analysis of pesticides and PCBs in waste wood and house dust, Chemosphere, Vol. 81, pp 488-493, 2010
- Axenne, Etude bibliographique sur la combustion de produits issus de cultures annuelles, Etude réalisée pour le compte de l'ADEME, 2006
- Bremmer H. J., Troost L. M., Kuipers G., De Koning J, Sein A. A., Emissions of dioxins in the Netherlands, National institute of public health and environmental protection (RIVM)
- Bröker G. et al., Identification of relevant industrial sources of dioxins and furans in Europe, Materialien, No. 43, Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen
- CEN/TS 14778 : Method for sampling (Part 1 and 2)
- CEN/TS 14779 : Methods for preparing sampling plans
- CEN/TS 14780 : Method for sample preparation
- CEN/TS 14961 : Fuel specifications and classes
- Dyke P. H., Foan C., Wenborn M., Coleman P. J., A review of dioxin releases to land and water in the UK, The science of the total environment, 207, pp 119-131, 1997
- EPA, Wood products in the waste stream – Characterization and combustion emissions, Rapport technique Vol.1, Octobre 1996
- FCBA, Référentiels combustibles bois énergie définition et exigences, étude réalisée pour le compte de l'ADEME, 2008
- Fries G. F., Feil V. J., Zaylskie R. G., Bialek K. M., Rice C. P., Treated wood in livestock facilities : relationship among residues of pentachlorophenol, dioxins and furans in wood and beef, Environmental pollution, Vol. 116, pp 301-311, 2002
- Hansen C. L., Hansen E., Survey of dioxin emissions from PCP-treated wood, Danish Environmental Protection Agency, Project n°940, 2004
- Ineris, 2011, Facteurs d'émission de polluants de feux simulés de déchets et de produits issus de la biomasse – Rapport d'étude DRC-11-118389-04583A disponible en ligne sur [www.ineris.fr](http://www.ineris.fr),
- Ineris, 2012, Valorisation énergétique de combustibles non commerciaux : essais de combustion de traverses de chemin de fer et comparaison à un combustible de référence - Rapport d'essais DRC-12-126318-06169A
- Kolenda J., Gass H., Wilken M., Jager J., B. Zescmar-Lahi B., Determination and reduction of PCDD/F emissions from wood burning facilities, Organohalogen Compounds, 11, pp. 401–404, 1993
- Kurata Y., Watanabe Y., Ono Y., Kawamura K., Concentrations of organic wood preservatives in wood chips produced from wood wastes, Journal of material cycles and waste management, Vol. 7, pp 38-47, 2005
- Launhardt T., Thoma H., Investigation on organic pollutants from a domestic heating system using various solid biofuels, Chemosphere, Vol. 40, pp 1149-1157, 2000
- Leces, Evaluation de performances énergétiques et environnementales de chaufferies biomasse, Etude réalisée pour le compte de l'ADEME, 2008
- Lee S. Y., Valenti J. C., Products of incomplete combustion from direct burning of pentachlorophenol-treated wood wastes, EPA/600/SR-98/013, 1998
- Luthe C., Karidio I., Uloh V., Towards controlling dioxins emissions from power boilers fuelled with salt-laden wood waste, Chemosphere, Vol. 35, pp 557-574, 1997
- Luthe C., Karidio I., Uloh V., Dioxins formation in salt-laden powers boilers : a mass balance, Chemosphere, Vol. 36, pp 231-249, 1998

- OFEFP, Incinération de déchets, de bois usagé et des résidus de bois, dans des chauffages au bois et en plein air, 1996
- Plouchart L., Etude émissions chaudières biomasse, POYRY Energy SAS, Etude réalisée pour le compte de la DRIIE Ile de France, 2008
- Pohlandt K., Marutzky R., Concentration and distribution of polychlorinated dibenzo-p-dioxin (PCDD) polychlorinated dibenzofuran (PCDF) in wood ash, Chemosphere, Vol. 28, pp 1311-1314, 1994
- Poole D., Argent B., Sharifi V., Swithenbank J., Prediction of the distribution of alkali and trace elements between the condensed and gaseous phases in a municipal solid waste incinerator, Fuel, Vol. 87, pp 1318-1333, 2008
- Salthammer T., Klipp H., Peek R. D., Marutzky R., Formation of polychlorinated dibenzo-p-dioxin (PCDD) polychlorinated dibenzofurans (PCDF) during the combustion of impregnated wood
- Schatowitz B., Brandt G., Gafner F., Schlumpf E., Bühler R., Hasler P., Nussbaumer T., Dioxin emissions from woodcombustion, Chemosphere, 29, pp. 2005–2013, 1994
- Schulze A., Salthammer T., Marutzky R., Appearance of polychlorinated biphenyls (PCB) in waste wood, Holz als roh und Werkstoff, Vol. 61, pp 23-28, 2003
- Swedish Environmental Protection Agency, The role of pentachlorophenol treated wood for emissions of dioxins into the environment, report 5935, 2009
- Wunderli S., Zennegg M., Dolezal I., Gujer E., Moser U., Wolfensberger M., Hasler P., Noger D., Studer C., Karlaganis G., Determination of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzo-furans in solid residues from wood combustion by HRGC/HRMS, Chemosphere, Vol. 40, pp 641-649, 2000
- Yamamura K., Ikeguchi T., Uehara H., Study on the emission of dioxins from various industrial wastes incinerators, Organohalogen Compounds, Vol. 41, pp 287-292, 1999

#### Relative aux métaux lourds

1. Simone C. van Lith, Peter Arendt Jensen, Flemming J. Frandsen, and Peter Glarborg , Release of inorganic elements during wood combustion, CHEC Research Center, Department of Chemical Engineering, Denmark, 2004.
2. Flemming J. Frandsen, Simone C. van Lith, Rob Korbee, Patrik Yrjas, Patrik Yrjas, Rainer Backman, Ingwald Obernberger, Thomas Brunner, Markus Jöller, Quantification of the release of inorganic elements from biofuels. Fuel Processing Technology 88 (2007) 1118-1128
3. J. Krook, A. Martensson, M. Eklund, Metal contamination in recovered waste wood used as energy source in Sweden, Department of Mechanical Engineering, Linköpings University of Technology, Sweden. Resources, Conservation and Recycling 41 (2004) 1-14
4. Michael I. Holzman and Richard S. Atkins, Emissions from Combustion of Treated Wood Fuel and Tires in Industrial Boilers, Environmental Risk Limited, Bloomfield, Connecticut. For Presentation at the 88th Annual Meeting & Exhibition « Air & Waste Management », San Antonio, Texas, June 18-23, 1995
5. Olli Sippula, Jouni Hokkinen, Harri Puustinen, Pasi Yli-Pirilä, Jorma Jokiniemi, Fine Particulate Emissions from Biomass and Heavy Fuel Oil Combustion without Effective Filtration (BIOPOR), VTT Technical Research Centre of Finland, University of Kuopio, 2007
6. Liu Yu, Ta WeiYuan, Bao TingYi, Yang ZenYue, Song HuiMing, Liu Na, Wang WeiPing, Zhang HongYi, Zhang Wei & An ZhiSheng, Trace elements in tree rings and their environmental effects : A case study in Xi'an City. YU Liu et al. Sci. China Ser D-Earth Sci, April 2009, vol.52, no4, 504-510

7. S. Anderson, A. H. Chappelka, K. M. Flynn and J. W. Odom, Lead accumulation in *Quercus nigra* and *Q. velutina* near smelting facilities in Alabama, USA. *Water, Air, and Soil Pollution* 118 :1-11, 2000
8. T. Brunner, M. Joeller, I. Obernberger, F. Frandsen, Aerosol and Fly ash formation in fixed bed bioass combustion systems using woody biofuels. 12th European Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, 17-21 June 2002, Amsterdam
9. Stanislav V. Vassilev, David Baxter, Lars K. Andersen, Christina G. Vassileva, An overview of chemical composition of biomass. *Fuel* 89(2010) 913-933
10. Liao Cuiping, Wu Chuangzhi, Yanyongje, Huang Haitao, Chemical elemental characteristics of biomass fuels in China. *Biomass and Bioenergy* 27(2004) 119-130
11. Thèse en cours
12. Catherine Chalot-Valdieu, Bérangère Le Blond Du Plouy, Julien Herbert, Philippe Outrequin, Cynthia Coudray, Gérard Deroubaix, Technologies de valorisation énergétique des déchets de bois issus de la démolition, de l'emballage et de l'industrie, Rapport intermédiaire ADEME, convention n°99 01 025, Juillet 2000
13. Biocombustibles solides, Référentiel de Certification NF 444, 2010
14. Les cendres de chaufferies bois, Rapport final, Biomasse Normandie, Biocombustible S.A et ADEME, novembre 2005
15. Etude pour la mise en place d'une filière locale en bois énergie sur le Pays Corbières Minervois, *Bois Energie* 66, 2008
16. The potential use of waste wood in the North East as an efficient biomass fuel source, A report on behalf of Northwoods : The North East's Woodland Imitative, August 2008
17. Etude de valorisation des cendres de chaufferies bois, ADEME, marche n°00 01 026, Novembre 2001
18. Proposition de classification des installations classées pour la protection de l'environnement : cas de la biomasse bois, Rapport CTBA sur broyat de palettes
19. Etude pour la qualification des déchets de bois traités et souillés en combustible, Pour une sortie de statut de déchet, Etape pour un référentiel « bois traités et souillés » Rapport final, ADEME et FCBA, Juin2009/Aout 2010
20. AMIOT Jeffrey, Utilisation des espaces dégradés en vue de production de biomasse. Etat des connaissances et perspectives, Mémoire de Maîtrise de Biologie des Populations et des Ecosystèmes
21. Incinération de déchets, de bois usagés et de résidus de bois dans des chauffages au bois et en plein air, Informations concernant l'Ordonnance sur la protection de l'air et l'ordonnance sur le traitement des déchets No 1. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, 1996
22. Evaluation des performances énergétiques et environnementales de chaufferies biomasse, Rapport confidentiel, ADEME, 28 août 2008
23. Combustion de broyats de palette en chaufferie collective, Rapport intermédiaire, CTBA, INERIS et ADEME, 1997
24. Yooko Tsuchiya, Hisashi Shimogaki, Hisashi Abe, Akira Kagawa, Inorganic elements in typical Japanese trees for woody biomass fuel. *The Japan wood Research Society* (2010) 56 :53-63
25. Anne Juul Perderson, Simone C. van Lith, Flemming J. Frandsen, Steinunn D. Steinsen, Lilian B. Holgersen, Release to the gas phase of metals, S and Cl during combustion of dedicated waste fractions. *Fuel Processing Technology* 91(2010) 1062-1077
26. Aittola Jussi-Pekka and Wihersaari Margareta, The emission of PCDD/PCDF's, related compounds and heavy metals from combustion of MSW with wood chips in a gasifier, Technical Research Centre of Finland, Combustion and Thermal Technology Laboratory

27. Johan Werkelin, Ash-forming elements and their chemical forms in woody biomass fuels, M.Sc (Chem. Eng.) 2002, Faculty of Technology, Process Chemistry Centre, Laboratory of inorganic Chemistry
28. BIOBIB, Base de données autrichien « <http://www.vt.tuwien.ac.at/biobib/> »
29. PHYLLIS, Base de données hollandaise « <http://www.ecn.nl/phyllis/> »
30. Ongwald Obernberger, Thomas Brunner, Georg Bärnthaler, Chemical properties of solid biofuels – Significance and impact, Institute for Resource Efficient and Sustainable Systems, Graz University of Technology, Inffeldgasse, Austria. Biomass and Bioenergy 30(2006) 973-982
31. Ingwald Obernberger, Friedrich Biedermann, Walter Widmann and Rudolf Riedl, Concentrations of Inorganic elements in biomass fuels and recovery in the different ash fractions, Institute of Chemical Engineering, University of Technology Graz, Austria. Biomass and Bioenergy Vol.12 No.3, pp.211-224, 1997
32. Malle Mandre, Henn Pärn, Jaan Kloseiko, Morten Ingerslev, Inge Stupak, Margus Kort, Keddy Paasrand, Use of biofuel ashes for fertilisation of *Betula pendula* seedlings on nutrient-poor peat soil. Biomass and Bioenergy 34(2010) 1384-1392
33. Satyanarayan Naik, Vaibhav V. Goud, Prasant K. Rout, Kathlene Jacobson, Ajay K. Dalai, Characterization of Canadian biomass for alternative renewable biofuel, Catalysis and Chemical Engineering Laboratories, Department of Chemical Engineering, University of Saskatchewan, Canada. Renewable Energy 35(2010) 1624-1631
34. Olli Dahl, Hannu Nurmesniemi, Risto Pöykiö, Gary Watkins, Heavy metal concentrations in bottom ash and fly ash fractions from a large-sized (246MW) fluidized bed boiler with respect to their Finnish forest fertilizer limit values. Fuel Processing Technology 91(2010) 1634-1639
35. M. Narodoslowsky, I. Obernberger, From waste to raw material – The route from biomass to wood ash for cadmium and other heavy metals, Institute for Chemical Engineering, Graz University of Technology, Austria. Journal of Hazardous Materials 50(1996) 157-168
36. Clemens Reimann, Rolf Tore Ottesen, Malin Andersson, Arnold Arnoldussen, Friedrich Koller, Peter Engmaier, Element levels in birch and spruce wood ashes – green energy ?. Science of the total environment 393(2008) 191-197
37. G. Skodras, P. Grammelis, P. Samaras, P. Vourliotis, E. Kakaras, G.P. Sakellariopoulos, Emissions monitoring during coal waste wood co-combustion in an industrial steam boiler. Fuel 81(2002) 547-554
38. K.E. Saarela, L. Harju, J. Rajander, J.O Lill, S.J. Heselius, A. Lindroos, K. Mattsson, Elemental analyses of pine bark and wood in a environmental study. Science of the Total Environment 343(2005) 231-241
39. G. Skodras, P. Grammelis, E. Kakaras, G.P. Sakellariopoulos, Evaluation of the environmental impact of waste wood co-utilisation for energy production. Energy (2004)
40. P. Vainikka, D. Lindberg, A. Moilanen, H.Ollila, M. Tiainen, J. Silvennoinen, M. Hupa, Trace elements found in the fuel and in-furane fine particles collected from 80MW BFB combusting solid recovered fuel. Fuel Processing Technology (2011)
41. T. Kuba, A. Tschöll, C. Partl, K. Meyer, H. Insam, Wood ash admixture to organic wastes improves compost and its performance. Agriculture, Ecosystems and Environment 12(2008) 43-49
42. Henrik K. Hansen, Anne J. Pedersen, Lisbeth M. Ottosen, Aren Villumsen, Speciation and mobility of cadmium in straw and wood combustion fly ash, Department of Geology and Geotechnical Engineering, The Technical University of Denmark. Chemosphere 45(2001) 123-128

43. Morten Ingerslev, Simon Skov, Lisbeth Sevel, Lars Bo Pedersen, Element budgets of forest biomass combustion and ash fertilisation – A Danish case-study, Forest and Landscape Denmark, University of Copenhagen. Biomass and Bioenergy 35(2011) 2697-2704
44. Ayhan Demirbas, Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues, Selcuk University, Department of Chemical Engineering, Turkey. Progress in Energy and Combustion Science 31(2005) 171-192
45. C. Telmo, J. Lousada, N. Moreira, Proximate analysis, backwards stepwise regression between gross calorific value, ultimate and chemical analysis of wood. Bioresource Technology 101(2010) 3808-3815
46. C. Rothpfeffer, E. Karlton, Inorganic elements in tree compartments of Picea abies – Concentrations versus stem diameter in wood and bark and concentrations in needles and branches, Department of Forest Soils, Swedish University of Agricultural Sciences. Biomass and Bioenergy 31(2007) 717-725
47. BioBank, base de données autrichienne « <http://www.ieabcc.nl/database/biobank.html> »
48. Wood products in the waste stream – Characterization and combustion emissions, Rapport technique Vol.1, EPA, Octobre 1996



## 10. LISTE DES ANNEXES

<b>Annexes</b>	<b>Désignation</b>	<b>Nombre de pages</b>
Annexe 1	Teneurs naturelles en métaux lourds dans le Bois et l'Ecorce	20
Annexe 2	Teneurs en métaux lourds dans les déchets de bois - comparaison aux valeurs seuils proposées	13
Annexe 3	Comparaison des valeurs seuils proposés en métaux et des teneurs mesurées dans les cendres volantes	4



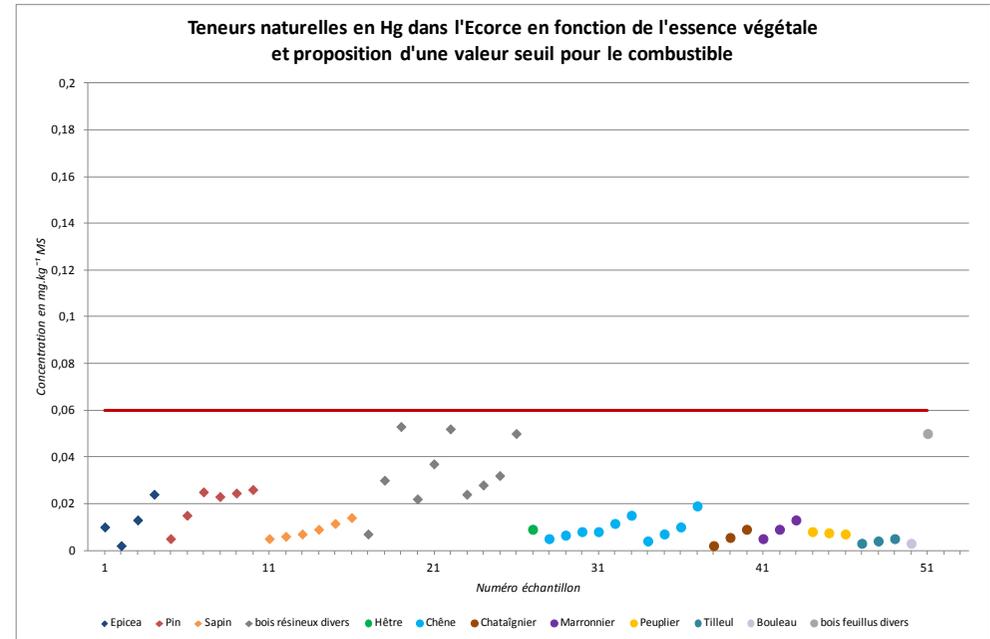
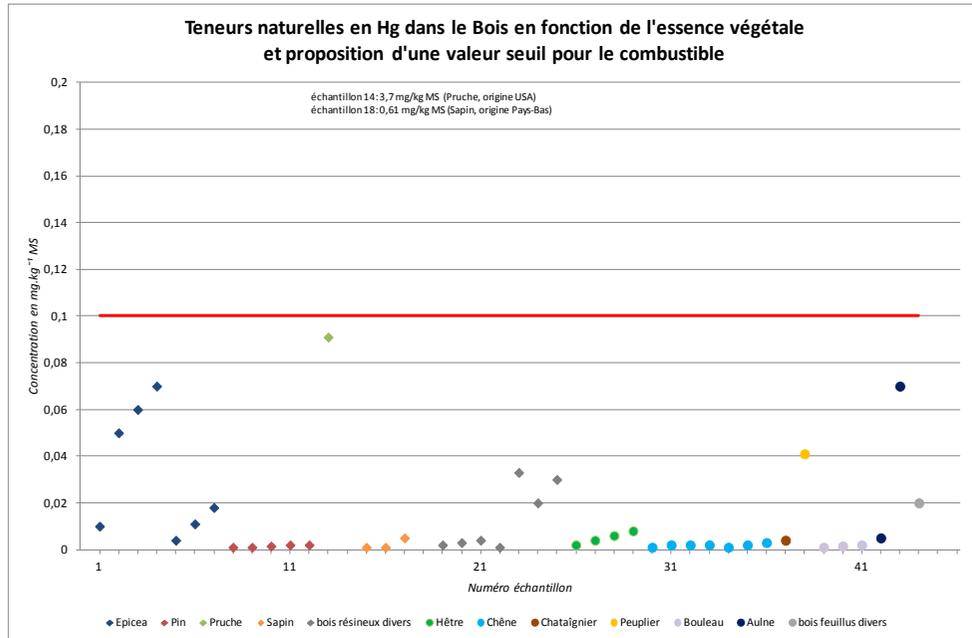
# **ANNEXE 1**

---

Teneurs naturelles en métaux lourds dans le Bois et l'Écorce



## Proposition d'une valeur seuil pour l'élément Hg



De manière générale, l'élément Mercure (Hg) est présent naturellement dans la biomasse végétale. Sa teneur dans le végétal reste néanmoins très faible. Elle peut être toxique pour la plante en cas de forte concentration. Dans le cadre de la présente étude, nous nous sommes intéressés à la présence de ce métal dans le combustible, et plus précisément dans le Bois et l'Ecorce.

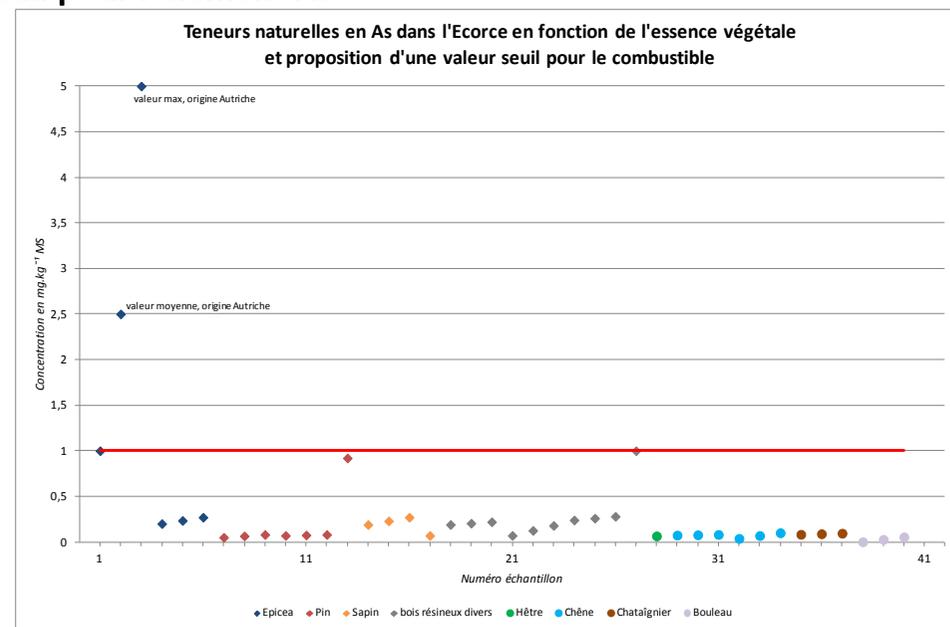
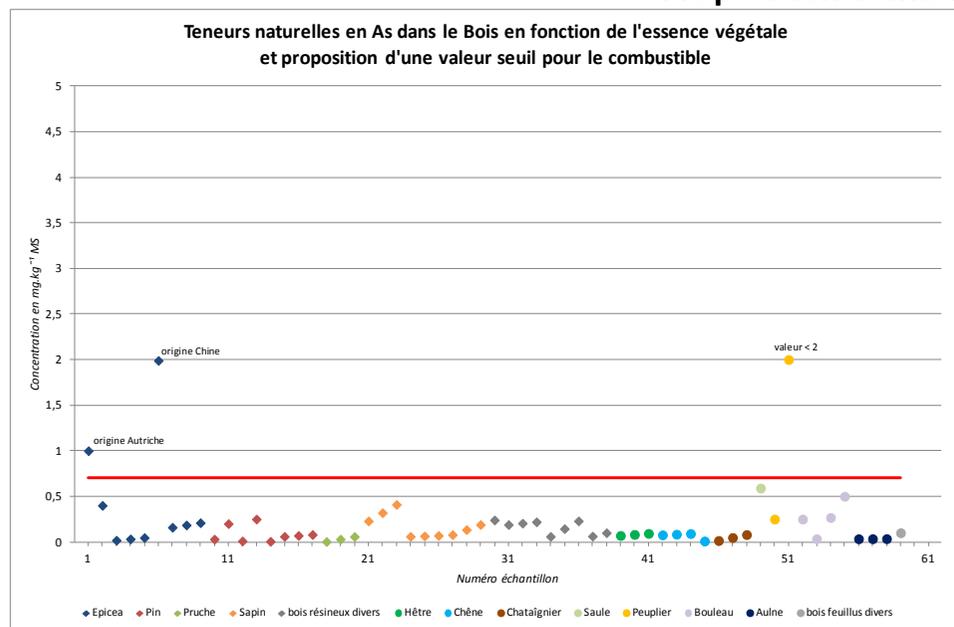
Concernant le Bois (*graphe de gauche*), nous avons pu rassembler dans notre base de données 44 échantillons dits « naturels » (élimination de 3 points intermédiaires, cf. paragraphe 4.2). Nous observons des teneurs allant de 0,001 à 3,7 mg/kg MS, pour une moyenne de 0,11 mg/kg MS. Nous constatons donc une concentration en Hg très faible dans le Bois, avec 76% des échantillons ayant une concentration inférieure à 0,04 mg/kg MS. Les Bois résineux ont des teneurs en Hg légèrement plus élevées que les Bois feuillus, avec une moyenne de 0,26 contre 0,011 mg/kg MS.

Considérant ces données, nous proposons une valeur seuil pour le Bois à 0,1 mg/kg MS correspondant à plus de 95% des données recensées. Cette valeur seuil permet d'éliminer deux points extrêmes. Ces deux points sont issus d'une publication japonaise(24) qui traite des éléments inorganiques présents dans les arbres japonais utilisables comme sources d'énergie renouvelable. Ces échantillons sont issus de sites différents et ont été recueillis à des années différentes. Le manque d'informations ne nous permet pas de dire si la forte concentration en Hg est liée à l'espèce végétale, ou s'il s'agit d'une contamination de l'échantillon par son environnement (pollution du sol ou de l'atmosphère).

Concernant l'Ecorce (*graphe de droite*), nous avons rassemblé 51 échantillons « naturels ». Nous observons des teneurs allant de 0,002 à 0,053 mg/kg MS, pour une moyenne de 0,0155 mg/kg MS. Les Ecorces résineux ont des teneurs en Hg légèrement plus élevées que les Ecorces feuillus, avec une moyenne de 0,021 mg/kg MS contre 0,00936 mg/kg MS. Considérant ces résultats, nous proposons une valeur seuil pour l'Ecorce à 0,06 mg/kg MS correspondant à 100% des données recensées.

La biomasse végétale utilisée comme combustible dans les chaudières n'est pas toujours bien définie. Il peut contenir du Bois issu d'espèces résineuses et/ou d'espèces feuillues, mais il peut aussi contenir une proportion plus ou moins importante d'écorces. Tous ces éléments sont importants pour établir une valeur seuil. Dans le cas du Hg, la présence d'écorces n'influence que peu les teneurs en Hg dans le combustible puisque le seuil fixé pour le Bois est plus grand que celui de l'Ecorce. Nous pouvons donc proposer une **valeur seuil pour le combustible de 0,1 mg/kg MS**.

## Proposition d'une valeur seuil pour l'élément As



L'élément Arsenic (As) est un élément phytotoxique. Cependant nous observons sa présence dans la biomasse végétale. Sa teneur reste néanmoins faible, et son rôle dans le végétal n'a pas encore été démontré. Dans le cadre de la présente étude, nous nous sommes intéressés à sa présence dans le combustible, et plus précisément dans le Bois et l'Ecorce.

Concernant le Bois (*graphe de gauche*), nous avons rassemblé dans notre base de données, 59 échantillons dits « naturels ». Nous observons des teneurs allant de 0,003 à 2 mg/kg MS, pour une moyenne de 0,21 mg/kg MS. Nous constatons donc une concentration en As faible dans le Bois. Nous observons une homogénéité des teneurs en As sur l'ensemble des échantillons de Bois. Les Bois résineux et feuillus ont des teneurs en As très similaires, puisque leur moyenne est proche de 0,2 mg/kg MS.

Considérant ces données, nous pouvons proposer une valeur seuil pour le Bois de 0,7 mg/kg MS correspondant à 95% des données recensées. Cette valeur seuil élimine trois points extrêmes. L'échantillon 1 (1 mg/kg MS) est issu d'une base de données autrichienne(47), qui ne communique aucune information concernant cet échantillon. L'échantillon 6 (1,99 mg/kg MS) est issu d'une publication chinoise(10) qui étudie la composition élémentaire de la biomasse végétale chinoise. Cette publication a pour but l'analyse de différents biocombustibles de différentes régions agricoles de la Chine. Seule une valeur moyenne en As est communiquée.

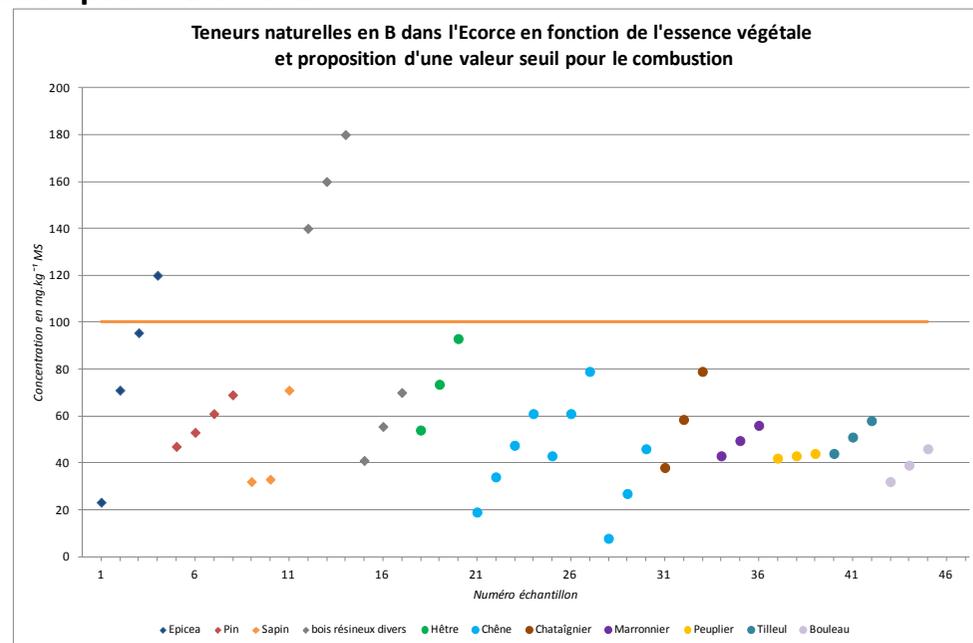
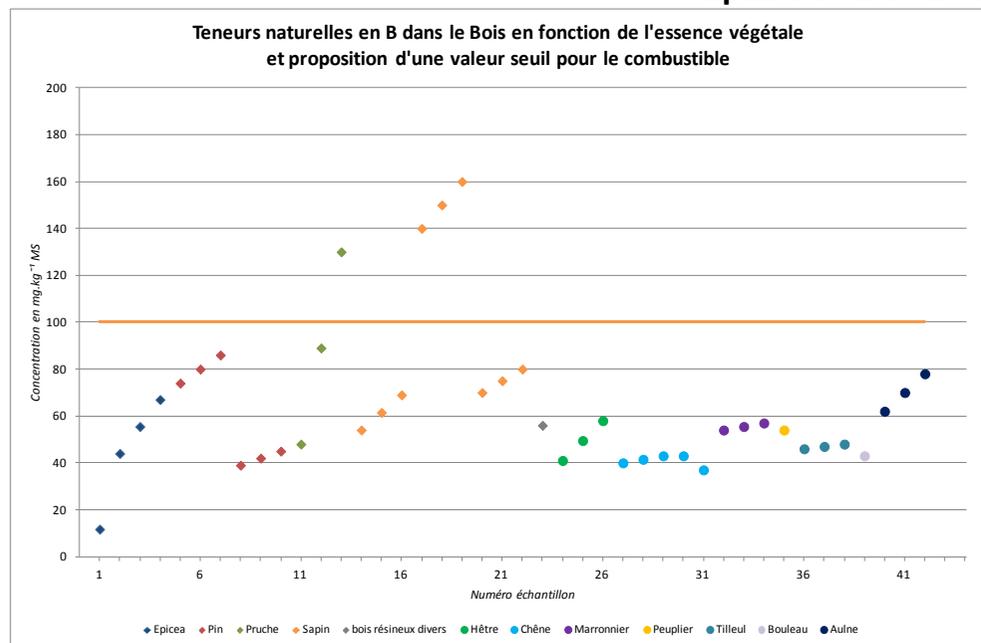
Cette valeur forte en As peut être due à une pollution de l'environnement, mais le manque d'informations sur le nombre d'échantillons analysés et sur les milieux de culture ne nous permet pas de confirmer cette hypothèse. L'échantillon 51 (2 mg/kg MS) correspond à une limite de détection (technique analytique inappropriée).

Concernant l'Ecorce (*graphe de droite*), nous avons rassemblé 40 échantillons « naturels » que les Ecorces feuillus, avec une moyenne de 0,52 mg/kg MS contre 0,066 mg/kg MS. Néanmoins, les concentrations restent faibles avec 88% des échantillons ayant une teneur en As inférieure à 0,3 mg/kg MS.

Considérant ces données, nous proposons une valeur seuil pour l'Ecorce à 1 mg/kg MS correspondant à 95% des données recensées. Cette valeur élimine deux points. Ces deux points sont issus d'une base de données autrichienne(47) correspondant à la teneur maximale et moyenne des échantillons analysés.

La biomasse végétale utilisée dans les chaudières n'est pas toujours composée des mêmes éléments. Elle peut être composée de Bois résineux et/ou feuillus, mais elle peut aussi contenir de l'écorce. Tous ces éléments sont importants pour établir une valeur seuil. Dans le cas de l'As, le seuil établi pour le Bois est similaire au seuil établi pour l'Ecorce. La teneur en As dans le combustible est donc peu influencée par la présence d'écorces. Nous pouvons donc proposer une **valeur seuil pour le combustible de 0,7 mg/kg MS**.

## Proposition d'une valeur seuil pour l'élément B



L'élément Bore (B) est présent naturellement dans la biomasse végétale. Cet élément influence plusieurs processus métaboliques de la plante. Il est donc un oligo-élément essentiel pour le développement végétal. Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à sa présence dans le combustible, et plus précisément dans le Bois et l'Ecorce.

Concernant le Bois (*graphe de gauche*), nous avons rassemblé dans notre base de données, 42 échantillons dits « naturels ». Nous observons des teneurs allant de 11,7 à 160 mg/kg MS, pour une moyenne de 64,1 mg/kg MS. Nous constatons que les teneurs en B sont plus élevées dans le Bois résineux que dans le feuillus, avec une moyenne de 75,07 mg/kg MS versus 50,9 mg/kg MS. Au sein des résineux, ce sont les Sapins qui possèdent les teneurs les plus fortes.

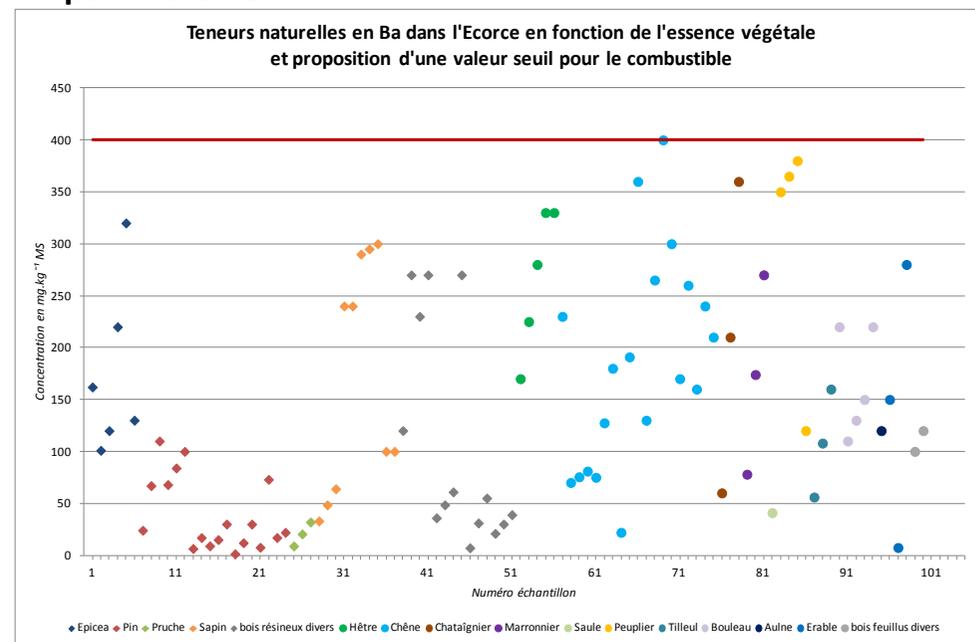
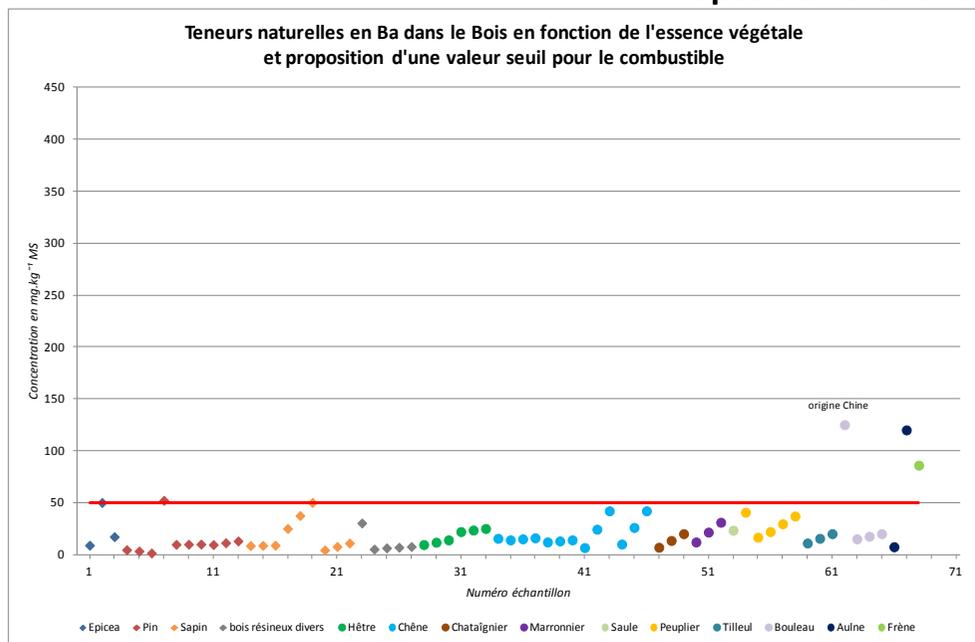
Considérant ces données, nous proposons une valeur seuil pour le Bois à 100 mg/kg MS correspondant à plus de 90% des données recensées. Cette valeur seuil élimine quatre points extrêmes. Il faut noter que la quasi-totalité des points est issue d'une publication japonaise(24) portant sur l'analyse de la composition élémentaire de diverses espèces japonaises, comprenant des échantillons provenant de lieux et d'âge différents. Il est donc préconisé d'utiliser ces résultats avec précaution, en raison du manque d'informations complémentaires qui confirmerait ces données.

Concernant l'Ecorce (*graphe de droite*), nous avons pu rassembler 45 échantillons « naturels ». Nous pouvons observer des teneurs allant de 7,8 à 180 mg/kg MS, pour une moyenne de 59,8 mg/kg MS. Nous constatons que les teneurs en B dans l'Ecorce sont assez variables. L'Ecorce des feuillus possède des teneurs en B plus faibles, avec une moyenne de 48,9 mg/kg MS versus 77,8 mg/kg MS pour les résineux.

En prenant en compte ces résultats, nous pouvons proposer une valeur seuil pour l'Ecorce à 100 mg/kg MS correspondant à 90% des données recensées. Cette valeur élimine quatre points extrêmes. Il faut néanmoins noter que la quasi-totalité des points est issue d'une même publication(24), comme pour le cas du Bois. Il est donc conseiller d'utiliser ces résultats avec précaution, en raison du manque d'informations complémentaires qui confirmerait ces données.

La biomasse végétale utilisée dans les chaudières bois est souvent très diverse, contenant différents types de bois et de l'écorce. Dans le cas du B, la présence d'écorce n'influence pas la concentration en B dans le combustible, puisque le seuil fixé pour l'Ecorce est identique à celui fixé pour le Bois. Nous proposons une **valeur seuil pour le combustible de 100 mg/kg MS**.

## Proposition d'une valeur seuil pour l'élément Ba



Le Baryum (Ba) est un élément connu pour être présent dans la plupart des plantes, sans être un composant essentiel de leurs tissus. Dans le cadre de la présente étude, nous nous sommes intéressés à sa présence dans le combustible, et plus précisément dans le Bois et l'Ecorce.

Concernant le Bois (*graphe de gauche*), nous avons rassemblé dans notre base de données, 68 échantillons dits « naturels ». Nous observons des teneurs allant de 1,4 à 125 mg/kg MS, pour une moyenne de 21,85 mg/kg MS. Nous constatons également que le Bois des feuillus possède des teneurs en Ba légèrement plus élevées que le Bois des résineux, avec une moyenne de 26,0 versus 15,5 mg/kg MS. Néanmoins, l'ensemble des teneurs en Ba est assez homogène.

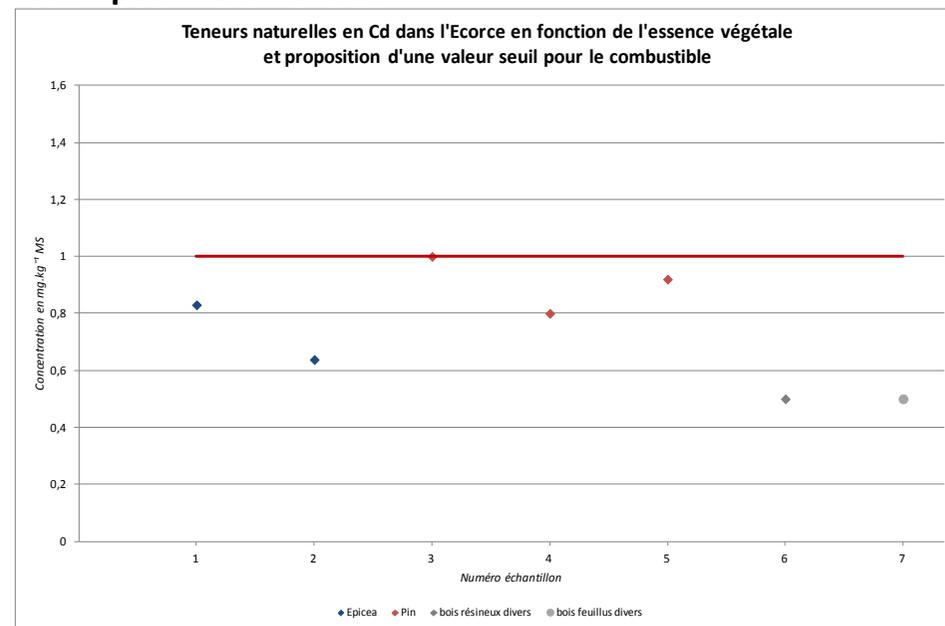
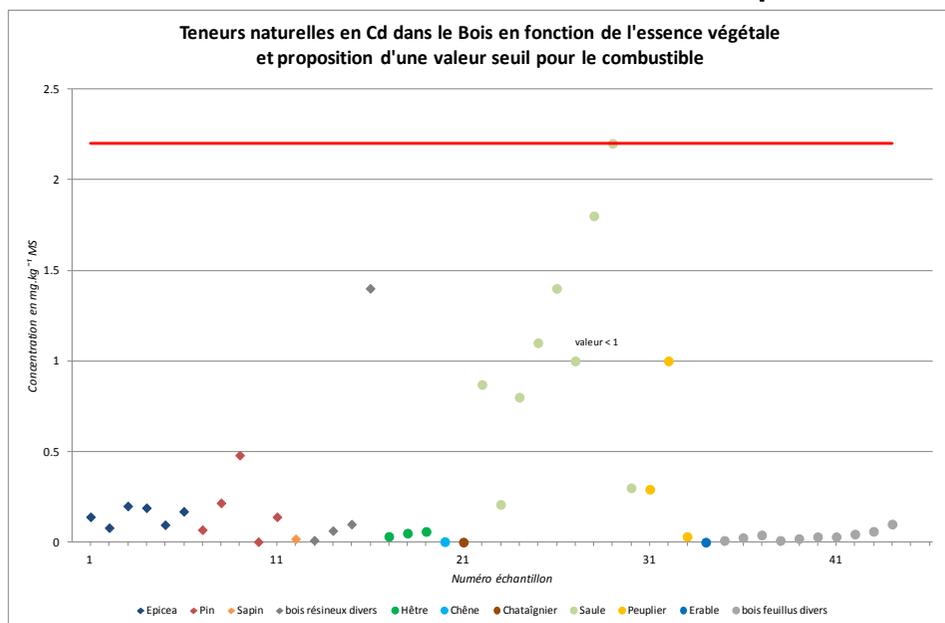
Considérant ces données, nous pouvons proposer une valeur seuil pour le Bois à 50 mg/kg MS correspondant à 95% des données recensées. Cette valeur seuil élimine trois points extrêmes. L'échantillon 62 (125,0 mg/kg MS) est issu d'une publication chinoise(10) qui analyse la composition élémentaire des différentes biomasses végétales chinoises sujettes à une utilisation comme source d'énergie. Cette publication ne mentionne pas d'informations précises sur la provenance des échantillons analysés mais seulement une valeur moyenne des teneurs pour comparer les différentes biomasses. Il est donc possible d'avoir un effet du fond pédogéochimique ou d'une pollution qui influence les teneurs en Ba. Les échantillons 67 et 68 (120 et 86 mg/kg MS) sont issus d'une base de données autrichienne(28).

Concernant l'Ecorce (*graphe de droite*), nous avons rassemblé 100 échantillons « naturels ». Nous observons des teneurs allant de 1,3 à 400 mg/kg MS, pour une moyenne de 142,3 mg/kg MS. Les Ecorces des feuillus ont des teneurs en Ba plus élevées que les Ecorces des résineux, avec une moyenne de 188,2 mg/kg MS contre 98,2 mg/kg MS. Notons que les teneurs en Ba dans les écorces de Pin sont plus faibles, avec une concentration maximale de 110 mg/kg MS. La répartition des teneurs en Ba dans les différents échantillons est peu homogène. La présence d'une large gamme de valeurs traduit des variations importantes des concentrations au sein d'une même espèce. Nous pouvons supposer que l'Ecorce accumule et concentre le Ba absorbé par la plante.

Considérant ces données, nous pouvons proposer une valeur seuil pour l'Ecorce à 400 mg/kg MS correspondant à 100% des données recensées.

Le combustible introduit dans les chaudières à bois ne possède pas une composition toujours identique. Il peut être composé de Bois de nature différente, mais contenir également de l'Ecorce. Nous avons pu constater que le seuil proposé pour le Bois (50 mg/kg MS) est très inférieur au seuil proposé pour l'Ecorce (400 mg/kg MS). Cela montre une influence forte de la présence d'écorces sur les teneurs en Ba dans le combustible (concentrations jusqu'à 8 fois plus élevées). Nous pouvons proposer une **valeur seuil pour le combustible de 50 mg/kg MS**. Cependant, s'il faut prendre en considération la possibilité d'une entrée massive d'écorces dans les chaudières (utilisation des sciures, par exemple), ce seuil pourrait être rehaussé.

## Proposition d'une valeur seuil pour l'élément Cd



L'élément Cadmium (Cd) est présent naturellement dans la biomasse végétale, cependant il n'est pas essentiel dans le développement des organes végétaux et ne participe pas au métabolisme cellulaire. Ses propriétés physico-chimiques, proches de celles du calcium, lui permettent de traverser les barrières biologiques et de s'accumuler dans les tissus. Dans le cadre de la présente étude, nous nous sommes intéressés à sa présence dans le combustible, et plus précisément dans le Bois et l'Ecorce.

Concernant le Bois (*graphe de gauche*), nous avons rassemblé dans notre base de données, 37 échantillons dits « naturels ». Nous observons des teneurs allant de 0,0003 à 2,2 mg/kg MS, pour une moyenne de 0,34 mg/kg MS. Nous constatons une concentration en Cd faible dans le Bois, avec 75% des échantillons ayant une teneur inférieure à 0,3 mg/kg MS. Les Bois feuillus ont des teneurs en Cd légèrement plus élevées que les Bois résineux, avec une moyenne de 0,41 mg/kg MS contre 0,21 mg/kg MS. Nous observons que parmi les feuillus, le Saule et le Peuplier peuvent avoir des teneurs plus élevées en Cd que le reste des essences. Du fait de leur croissance rapide, ces deux essences sont de plus en plus cultivées à des fins énergétiques.

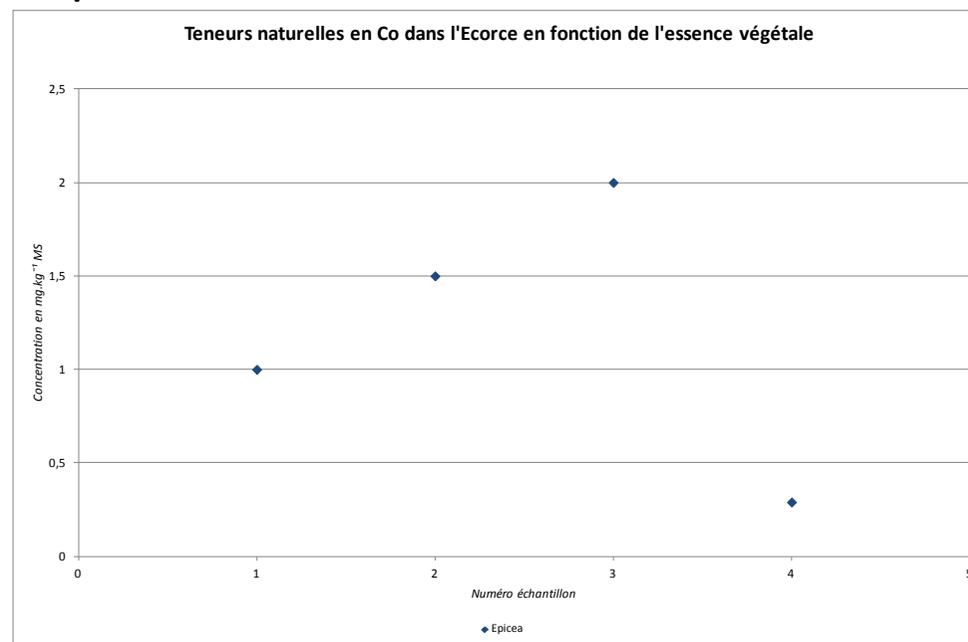
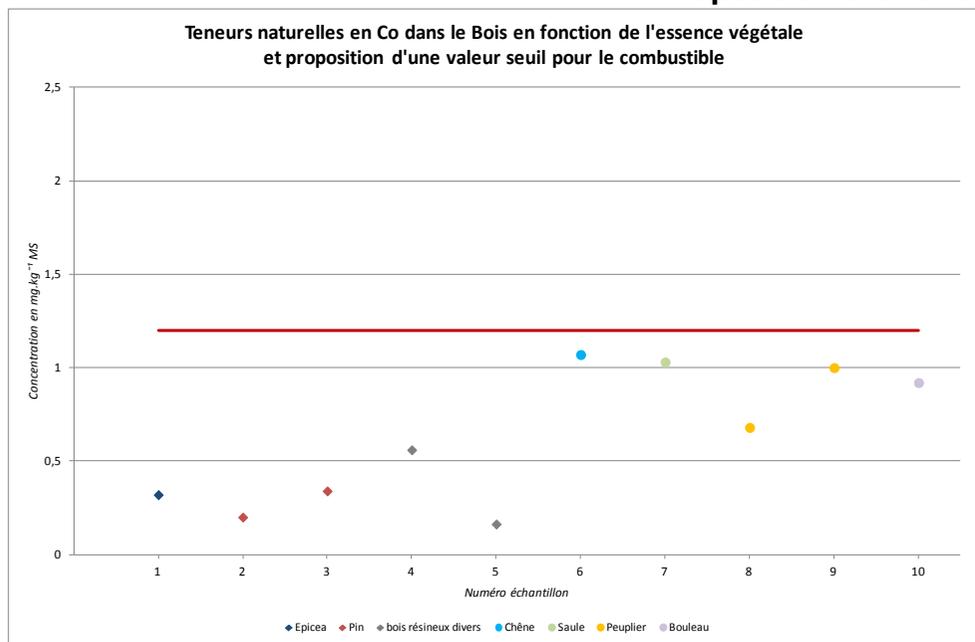
Considérant ces données, nous pouvons proposer une valeur seuil pour le Bois de 0,5 mg/kg MS correspondant à 92% données recensées. Cette valeur seuil permet d'éliminer trois points extrêmes. L'échantillon 16 (1,4 mg/kg MS) est issu d'une publication finlandaise(26) sur les émissions issues de la combustion de bois (déchets municipaux). Cette publication a pour but de comparer les émissions selon la composition du combustible. Une analyse de la composition du bois utilisé est donc communiquée, mais aucune information sur sa nature ou sur son origine n'est fournie. L'échantillon 22 (0,87 mg/kg MS) est issu d'une publication chinoise(10) qui analyse la composition élémentaire de différentes biomasses végétales chinoises, sujettes à une utilisation comme source d'énergie. Cette publication ne transmet pas d'informations précises sur la provenance des échantillons analysés mais seulement une valeur moyenne des teneurs, pour une comparaison entre différentes biomasses. L'échantillon 25 (1 mg/kg MS) correspond à une limite de détection (technique analytique inappropriée).

Concernant l'Ecorce (*graphe de droite*), nous avons rassemblé 7 échantillons « naturels ». Nous observons des teneurs allant de 0,5 à 1 mg/kg MS, pour une moyenne de 0,74 mg/kg MS.

En prenant en compte l'ensemble de ces résultats, nous pouvons proposer une valeur seuil pour l'Ecorce de 1 mg/kg MS.

La nature du combustible utilisé dans les chaudières bois n'est pas toujours bien définie. Il peut contenir du Bois issu d'espèces résineuses et/ou d'espèces feuillues, mais il peut également contenir des écorces. Il faut donc prendre en compte ces éléments dans la mise en place d'une valeur seuil. Dans le cas du Cd, la présence d'écorce n'influence pas la concentration en Cd dans le combustible, puisque le seuil fixé pour l'Ecorce est inférieur à celui fixé pour le Bois. Nous proposons une **valeur seuil pour le combustible de 2,2 mg/kg MS**.

## Proposition d'une valeur seuil pour l'élément Co



De manière générale, l'élément Cobalt (Co) n'est pas indispensable aux végétaux, cependant il se révèle indispensable aux bactéries et champignons de la rhizosphère, permettant la fixation de l'azote dans le sol. Le Co est néanmoins présent naturellement dans la biomasse végétale. Dans le cadre de la présente étude, nous nous sommes intéressés à sa présence dans le combustible, et plus précisément dans le Bois et l'Ecorce.

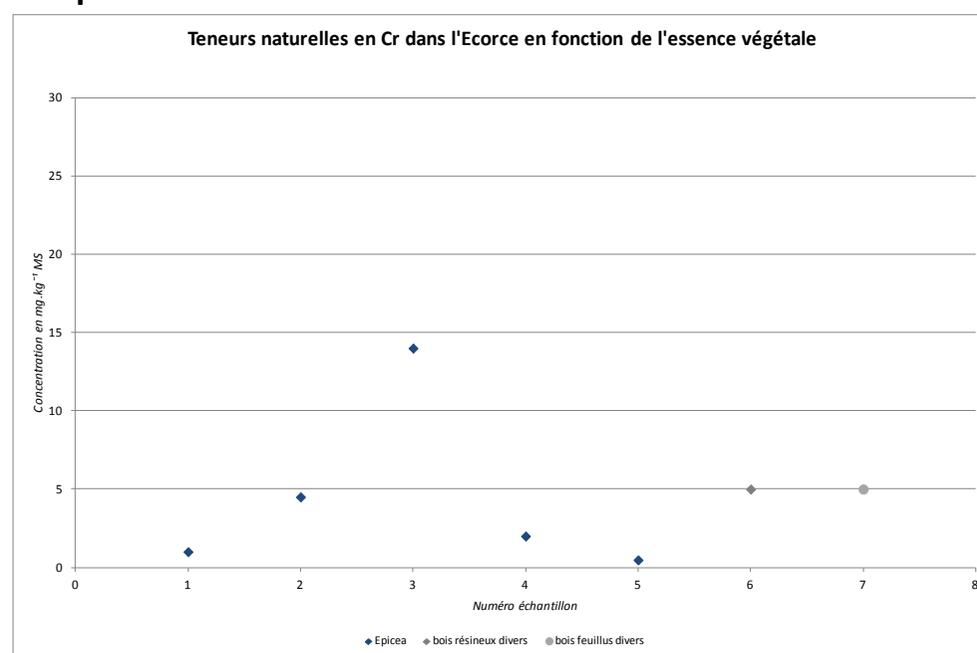
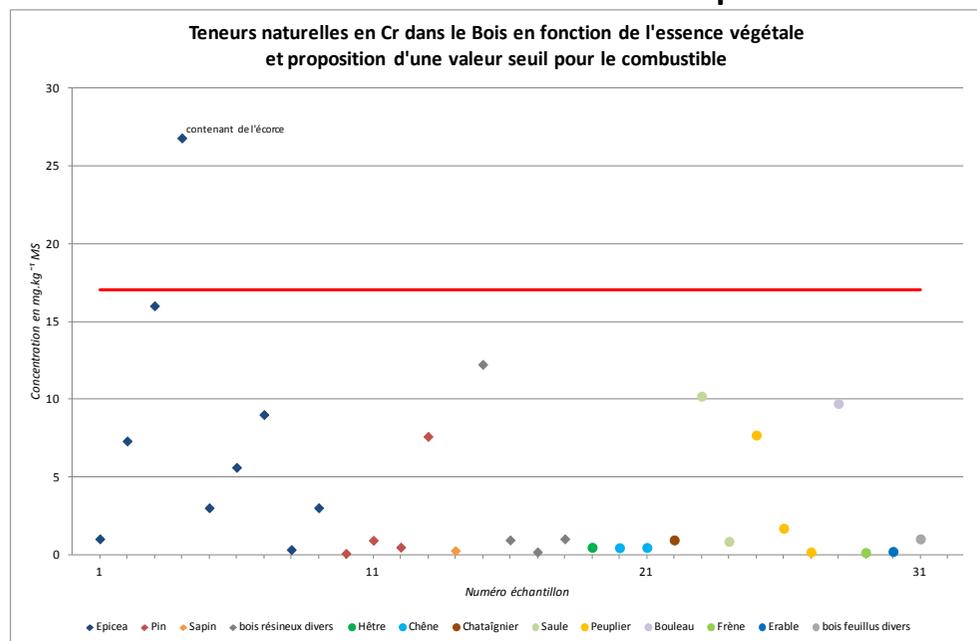
Concernant le Bois (*graphe de gauche*), nous avons rassemblé dans notre base de données, 10 échantillons dits « naturels ». Nous observons des teneurs allant de 0,16 à 1,07 mg/kg MS, pour une moyenne de 0,63 mg/kg MS. Nous constatons que les Bois feuillus ont des teneurs en Co plus élevées que les Bois résineux, avec une moyenne de 0,94 mg/kg MS versus 0,32 mg/kg MS.

En prenant en compte l'ensemble de ces résultats, nous pouvons proposer une valeur seuil pour le Bois à 1,2 mg/kg MS.

Concernant l'Ecorce (*graphe de droite*), nous avons rassemblé 4 échantillons « naturels ». Nous observons des teneurs allant de 0,29 à 2 mg/kg MS, pour une moyenne de 1,20 mg/kg MS. Le nombre limité d'échantillons ne nous permet pas d'analyser ces résultats. De plus, les valeurs recensées ne concernent que des Epicéas.

La biomasse végétale utilisée comme combustible dans les chaudières n'est pas toujours bien identifiée. Elle peut contenir du Bois issu d'espèces résineuses et/ou d'espèces feuillues, mais elle peut aussi contenir de l'écorce. Il faut donc prendre en compte ces éléments dans la mise en place d'une valeur seuil en Co dans le combustible. Dans notre cas, nous avons obtenu uniquement des informations concernant les teneurs en Co dans les écorces d'Epicéa. Nous constatons que dans le cas d'un combustible contenant de l'Epicéa, la présence d'écorces peut influencer les concentrations en Co dans le combustible (concentrations jusqu'à 4 fois plus importantes). Nous proposons une **valeur seuil pour le combustible de 1,2 mg/kg MS**. Cependant, lors d'une entrée massive d'écorces dans les chaudières (par une utilisation des sciures, par exemple), ce seuil mériterait d'être réajusté.

## Proposition d'une valeur seuil pour l'élément Cr



De manière générale, l'élément Chrome (Cr) est présent naturellement dans la biomasse végétale. Son rôle dans le fonctionnement végétal n'est pas démontré. Sa teneur dans le végétal reste néanmoins faible. Il devient toxique pour la plante lorsque sa concentration est forte. Dans le cadre de la présente étude, nous nous sommes intéressés à sa présence dans le combustible, et plus précisément dans le Bois et l'Ecorce.

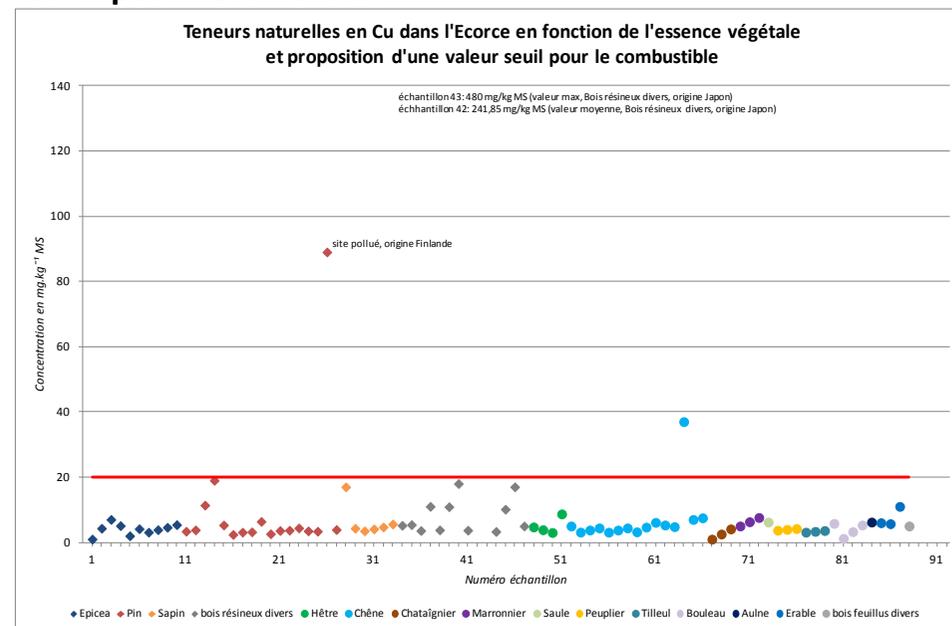
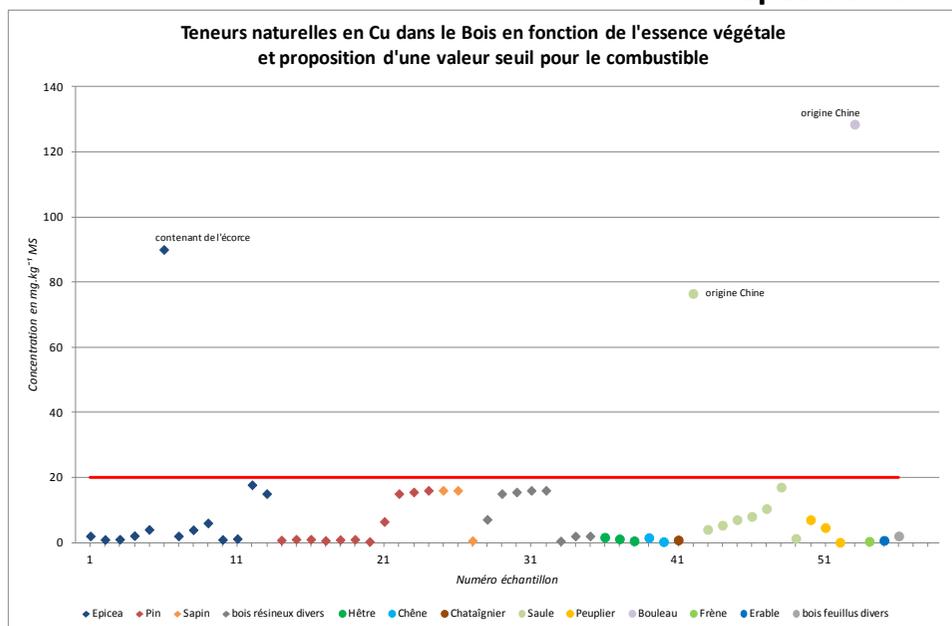
Concernant le Bois (*graphe de gauche*), nous avons rassemblé dans notre base de données, 31 échantillons dits « naturels ». Nous observons des teneurs allant de 0,063 à 26,8 mg/kg MS, pour une moyenne de 4,17 mg/kg MS. Nous constatons une concentration en Cr plus importante dans le Bois des résineux par rapport aux feuillus, avec une moyenne de 5,3 mg/kg MS versus 2,6 mg/kg MS. Nous observons que le Bois d'Epicea possède des teneurs plus élevées et plus variables que le reste des essences végétales.

Considérant ces données, nous pouvons proposer une valeur seuil pour le Bois à 17 mg/kg MS correspondant à 96% des données recensées. Cette valeur seuil élimine un point extrême, issu d'une base de données hollandaise(29). Il n'y a pas d'informations concernant la nature et la provenance précise de cet échantillon. Il contient néanmoins de l'écorce, ce qui pourrait expliquer cette plus forte teneur en Cr.

Concernant l'Ecorce (*graphe de droite*), nous avons rassemblé 7 échantillons « naturels ». Nous observons des teneurs allant de 0,48 à 14 mg/kg MS, pour une moyenne de 4,57 mg/kg MS. Le manque de données sur les feuillus ne nous permet pas de fixer convenable un seuil, néanmoins nous pouvons retenir la teneur maximale observée, de 14 mg/kg MS.

Le combustible introduit dans les chaudières à bois ne possède pas une composition constante. Il peut être composé de Bois de nature différente, mais contenir également de l'Ecorce. Dans le cas du Cr, nous observons des concentrations en Cr similaires pour le Bois et l'Ecorce. Cela montre donc qu'il n'y a pas d'influence significative de la présence d'écorces dans le combustible. Nous proposons ainsi une **valeur seuil pour le combustible de 17 mg/kg MS**.

## Proposition d'une valeur seuil pour l'élément Cu



L'élément Cuivre (Cu) est présent naturellement dans la biomasse végétale. Cet élément joue un rôle essentiel chez le végétal, comme activateur et composant d'enzymes d'oxydation. Sa teneur dans le végétal reste néanmoins faible. Dans le cadre de la présente étude, nous nous sommes intéressés à sa présence dans le combustible, et plus précisément dans le Bois et l'Ecorce.

Concernant le Bois (*graphe de gauche*), nous avons rassemblé dans notre base de données, 56 échantillons dits « naturels ». Nous observons des teneurs allant de 0,0557 à 128,5 mg/kg MS, pour une moyenne de 10,5 mg/kg MS. Nous constatons que les teneurs en Cu dans les Bois résineux et feuillus sont très similaires.

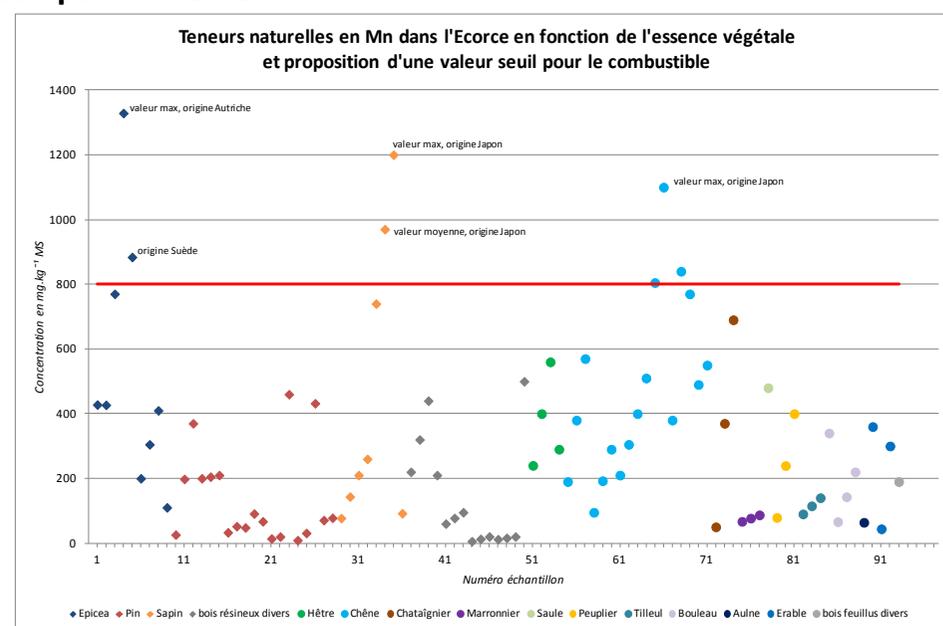
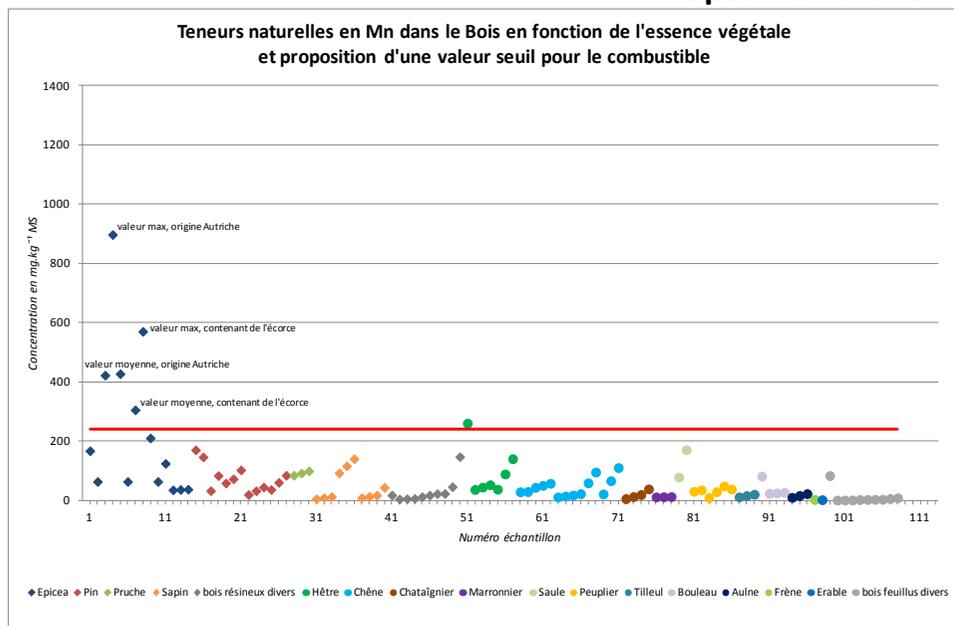
Considérant ces données, nous proposons une valeur seuil pour le Bois de 20 mg/kg MS correspondant à 95% des données recensées. Cette valeur seuil permet d'éliminer trois points extrêmes. L'échantillon 6 (90 mg/kg MS) est issu d'une base de données hollandaise(29). Il manque des informations concernant la nature et la provenance précise de cet échantillon, il est toutefois précisé qu'il contient de l'écorce, ce qui pourrait expliquer cette teneur plus élevée en Cu. Les échantillons 42 et 53 (76,5 et 128,5 mg/kg MS) sont issus d'une publication chinoise(10) qui analyse la composition élémentaire de différentes biomasses végétales chinoises, sujettes à une utilisation en tant que source d'énergie renouvelable. Cette publication ne communique pas d'informations précises sur la provenance des échantillons analysés. Elle ne donne qu'une valeur moyenne des teneurs en Cu, pour une comparaison des différentes biomasses.

Concernant l'Ecorce (*graphe de droite*), nous avons rassemblé 88 échantillons « naturels ». Nous observons des teneurs allant de 0,97 à 480 mg/kg MS, pour une moyenne de 14,75 mg/kg MS. Les Ecorces résineux ont des teneurs en Cu légèrement plus élevées que les Ecorces feuillus, avec une moyenne de 22,8 mg/kg MS versus 5,5 mg/kg MS. Cependant il faut prendre avec précaution ces valeurs moyennes car elles prennent en compte des teneurs extrêmes.

Nous pouvons proposer une valeur seuil pour l'Ecorce de 20 mg/kg MS correspondant à 95% des données recensées. Cette valeur seuil élimine quatre points extrêmes. Les échantillons 42 et 43 (242 et 480 mg/kg MS) sont issus d'une publication japonaise(24) sur l'étude des éléments inorganiques des arbres japonais utilisables comme source d'énergie renouvelable. Les échantillons étudiés dans cette publication ont une origine et un âge différents. Le manque d'informations ne nous permet pas d'expliquer la teneur forte en Cu (possibilité d'avoir une pollution ou un effet du fond pédogéochimique). L'échantillon 26 (89 mg/kg MS) est issu d'une publication finlandaise(38) portant sur l'influence d'un site pollué aux métaux lourds sur la composition du bois et de l'écorce de Pin. Cet échantillon (Pin qui s'est développé sur un site pollué), est donc plus chargé en Cu que les autres biomasses naturelles. L'échantillon 64 (37 mg/kg MS) est issu d'une base de données hollandaise(29), il est donc difficile d'avoir des informations complémentaires concernant cet échantillon.

La biomasse végétale utilisée comme combustible dans les chaudières n'est pas toujours bien identifiée. Elle peut contenir du Bois issus d'espèces résineuses et/ou d'espèces feuillues, mais elle peut aussi contenir une proportion plus ou moins importante d'écorces. Tous ces éléments sont importants pour établir une valeur seuil. Dans le cas du Cu, la présence d'écorces n'influence que peu les teneurs dans le combustible puisque le seuil fixé pour le Bois est identique au seuil pour l'Ecorce. Nous proposons une **valeur seuil pour le combustible de 20 mg/kg MS**.

## Proposition d'une valeur seuil pour l'élément Mn



L'élément Manganèse (Mn) est présent naturellement dans la biomasse végétale. Cet élément participe à l'activation de certains enzymes mais également à la photosynthèse. Dans le cadre de la présente étude, nous nous sommes intéressés à sa présence dans le combustible, et plus précisément dans le Bois et l'Ecorce.

Concernant le Bois (*graphe de gauche*), nous avons rassemblé dans notre base de données, 108 échantillons dits « naturels ». Nous observons des teneurs allant de 0,45 à 897 mg/kg MS, pour une moyenne de 70,1 mg/kg MS. Nous constatons une concentration en Mn dans le Bois assez homogène, à l'exception du Bois d'Epicea où les teneurs sont plus variées. Cela se traduit par des concentrations en Mn dans les Bois résineux plus fortes que dans le Bois feuillus, avec une moyenne de 107,7 versus 37,7 mg/kg MS.

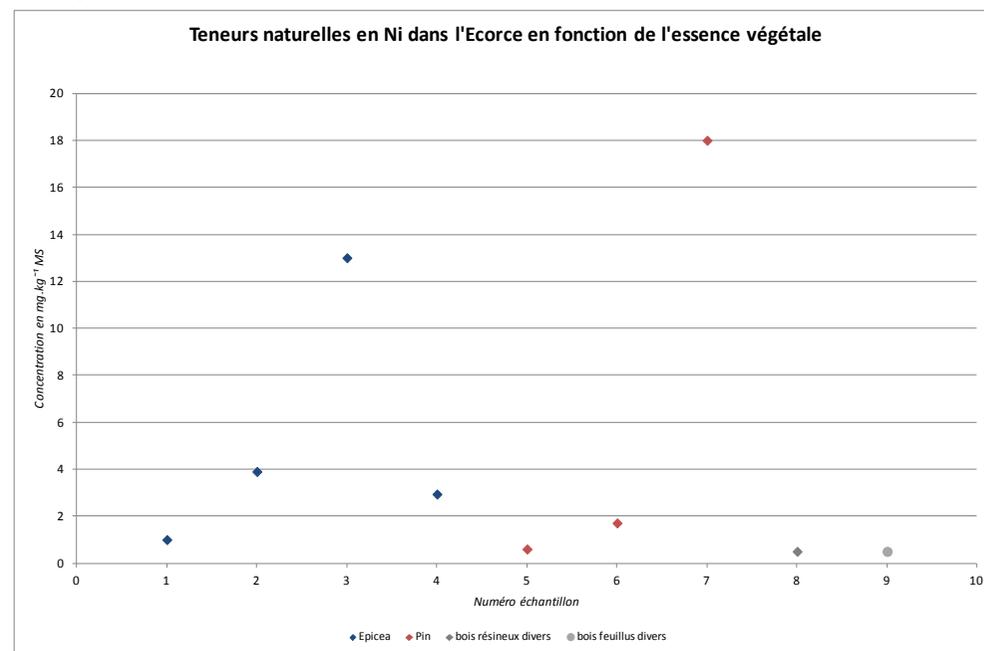
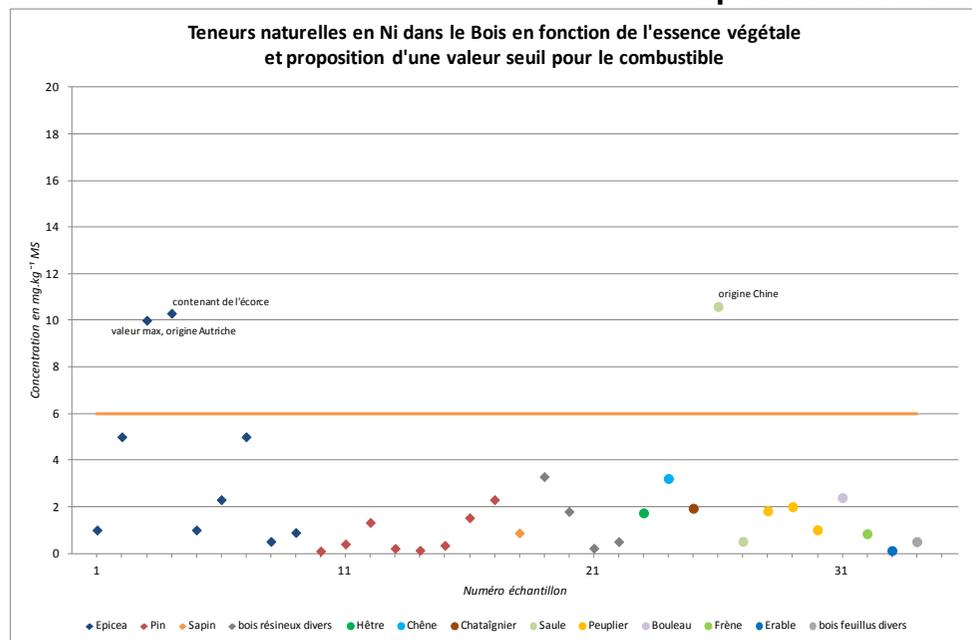
Considérant ces données, nous pouvons proposer une valeur seuil pour le Bois à 240 mg/kg MS correspondant à 95% des données recensées. Cette valeur seuil élimine six points extrêmes. Les échantillons 3, 4, 7 et 8 (422, 897, 305 et 507 mg/kg MS) sont issus d'une base de données autrichienne(47) qui ne fournit pas d'informations sur la nature et la provenance de ces échantillons, seulement que les échantillons 7 et 8 contiennent de l'écorce. L'échantillon 5 (427 mg/kg MS) est issu d'une base de données hollandaise(29) informant seulement que l'échantillon contient de l'écorce. L'échantillon 51 (260 mg/kg MS) est issu d'une publication portugaise(45) portant sur l'étude de la valeur énergétique et de la composition de différentes essences utilisables pour produire de l'énergie.

Concernant l'Ecorce (*graphe de droite*), nous avons rassemblé 93 échantillons « naturels ». Nous observons des teneurs allant de 5,8 à 1329 mg/kg MS, pour une moyenne de 264 mg/kg MS. Nous constatons que les teneurs en Mn dans l'Ecorce sont très variables. L'Ecorce des feuillus possède les teneurs les plus extrêmes, avec une moyenne de 330 versus 264 mg/kg MS pour les résineux. Nous pouvons donc supposer que l'Ecorce a tendance à accumuler le Mn dans ces tissus.

Considérant ces données, nous pouvons proposer une valeur seuil pour l'Ecorce à 800 mg/kg MS correspondant à 92% des données recensées. Cette valeur élimine six points extrêmes. L'échantillon 4 (1329 mg/kg MS) est issu d'une base de données autrichienne(47) ne donnant pas d'informations sur l'origine précise des échantillons. L'échantillon 5 (884 mg/kg MS) est issu d'une publication suédoise(46) sur les éléments inorganiques du Pin. Cette publication travaille sur des échantillons prélevés dans des sites différents et sur des tiges de différentes tailles. Les échantillons 34, 35 et 66 (970, 1200 et 1100 mg/kg MS) sont issus d'une publication japonaise(24) portant sur l'analyse de la composition élémentaire de diverses espèces japonaises, comprenant des échantillons issus de sites et d'années différentes. L'échantillon 68 (840 mg/kg MS) est issu d'une base de données hollandaise(29) qui ne fournit pas d'informations complémentaires.

La biomasse végétale utilisée dans les chaudières bois est souvent très diverse, contenant différents types de bois et de l'écorce. Dans le cas du Mn, la présence d'écorce peut influencer fortement la concentration en Mn dans le combustible, puisque le seuil fixé pour l'Ecorce est 4 fois plus grand que le seuil pour le Bois. Nous proposons une **valeur seuil pour le combustible de 240 mg/kg MS**. Cependant, lors d'une entrée massive d'écorces dans les chaudières (par une utilisation des sciures par exemple), ce seuil devrait être réajusté.

## Proposition d'une valeur seuil pour l'élément Ni



L'élément Nickel (Ni) se trouve naturellement dans la composition de la biomasse végétale. Il joue même un rôle essentiel dans les réactions métaboliques de certaines espèces. Sa teneur reste néanmoins faible. Dans le cadre de la présente étude, nous nous sommes intéressés à sa présence dans le combustible, et plus précisément dans le Bois et l'Ecorce.

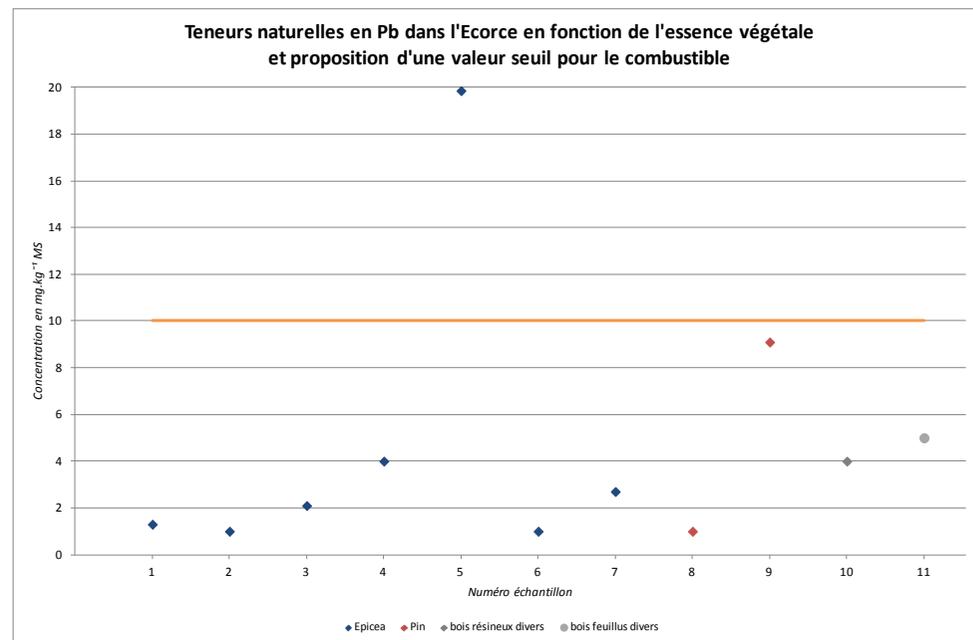
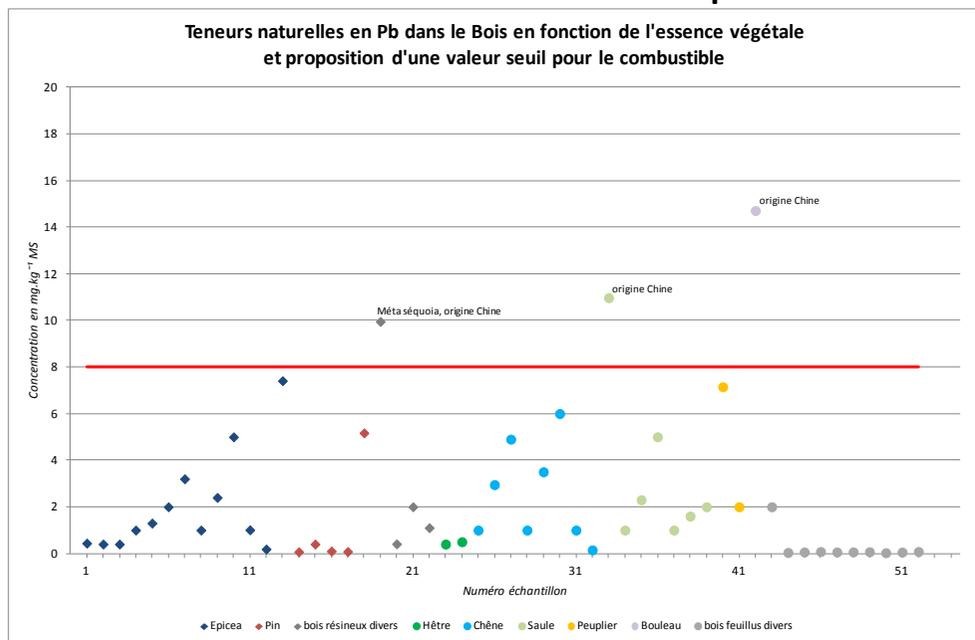
Concernant le Bois (*graphe de gauche*), nous avons rassemblé dans notre base de données 34 échantillons dits « naturels ». Nous observons des teneurs allant de 0,097 à 10,59 mg/kg MS, pour une moyenne de 2,22 mg/kg MS. Nous constatons une certaine homogénéité de la concentration en Ni sur l'ensemble des échantillons de Bois, avec une moyenne similaire entre les résineux et les feuillus autour de 2,2 mg/kg MS.

Considérant ces données, nous pouvons proposer une valeur seuil pour le Bois à 6 mg/kg MS correspondant à 90% des données recensées. Cette valeur seuil élimine trois points extrêmes. L'échantillon 3 (10 mg/kg MS) est issu d'une base de données autrichienne(47) qui ne donne aucune information complémentaire concernant l'échantillon analysé. L'échantillon 4 (10,3 mg/kg MS) est issu d'une base de données hollandaise(29) qui indique seulement que l'échantillon contient de l'écorce. L'échantillon 26 (10,6 mg/kg MS) est issu d'une publication chinoise(10) qui porte sur l'analyse de compositions élémentaires de différentes biomasses végétales chinoises potentiellement utilisables comme source d'énergie. Aucune information précise sur la provenance des échantillons analysés n'est communiquée, seule une valeur moyenne des teneurs, pour une comparaison des différentes biomasses, est fournie.

Concernant l'Ecorce (*graphe de droite*), nous avons rassemblé 9 échantillons « naturels ». Nous observons des teneurs allant de 0,5 à 18 mg/kg MS, pour une moyenne de 4,68 mg/kg MS. Le manque de données concernant les feuillus ne nous permet pas de proposer un seuil, cependant nous observons des teneurs en Ni dans l'Ecorce assez variables. Nous pouvons néanmoins retenir la teneur maximale en Ni, de 18 mg/kg MS.

La composition du combustible utilisée dans les chaudières bois n'est pas toujours identique. Il peut être composé de Bois résineux et/ou feuillus, mais il peut aussi contenir de l'écorce. Tous ces éléments sont importants pour établir une valeur seuil. Dans le cas du Ni, nous ne pouvons affirmer une influence de l'écorce sur les teneurs en Ni dans le combustible. Nous proposons une **valeur seuil pour le combustible de 6 mg/kg MS**.

## Proposition d'une valeur seuil pour l'élément Pb



L'élément Plomb (Pb) est présent naturellement dans la biomasse végétale. Son rôle dans le végétal n'est pas encore démontré. Sa présence reste faible dans la composition normale du végétal. Dans le cadre de la présente étude, nous nous sommes intéressés à sa présence dans le combustible, et plus précisément dans le Bois et l'Ecorce.

Concernant le Bois (*graphe de gauche*), nous avons rassemblé dans notre base de données, 52 échantillons dits « naturels ». Nous observons des teneurs allant de 0,03 à 14,7 mg/kg MS, pour une moyenne de 2,24 mg/kg MS. Nous ne constatons pas de différence notable entre les résineux et les feuillus, avec une moyenne autour de 2 mg/kg MS. Cependant la gamme de concentrations en Pb présents dans le Bois est relativement large, surtout pour l'Epicéa, le Chêne, le Saule et le Peuplier.

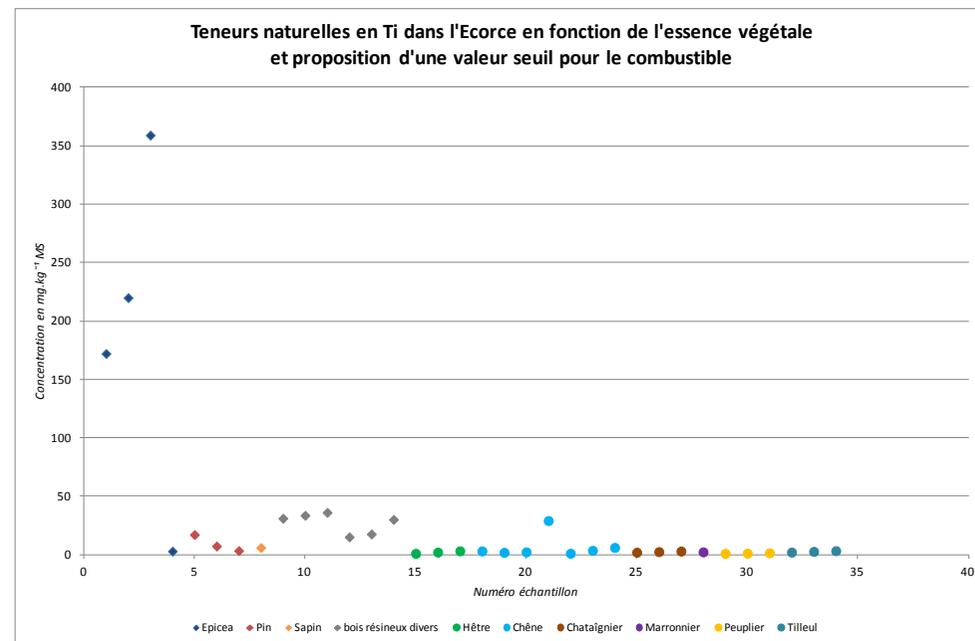
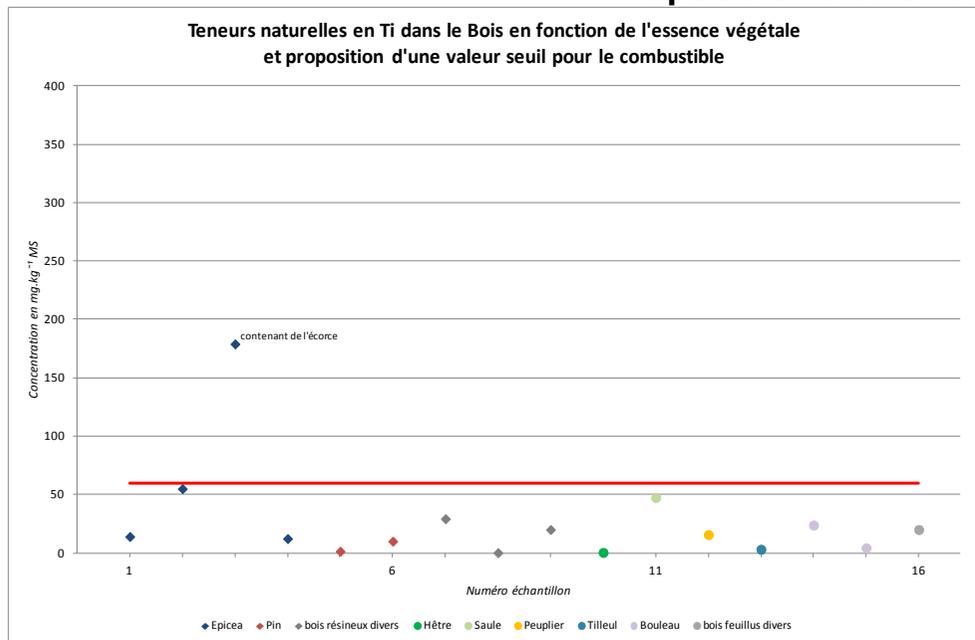
Considérant ces données, nous pouvons proposer une valeur seuil pour le Bois à 8 mg/kg MS correspondant à 94% des données recensées. Cette valeur seuil élimine trois points extrêmes. Ces trois échantillons sont issus d'une publication chinoise(10) qui analyse la composition élémentaire de différentes biomasses végétales chinoises, sujettes à une utilisation comme source d'énergie renouvelable. Cette publication ne donne pas d'informations précises sur la provenance des échantillons analysés et ne donne qu'une valeur moyenne des teneurs en Pb, pour une comparaison des différentes biomasses.

Concernant l'Ecorce (*graphe de droite*), nous avons rassemblé 11 échantillons « naturels ». Nous observons des teneurs allant de 1 à 19,9 mg/kg MS, pour une moyenne de 4,64 mg/kg MS. Le manque de données sur l'Ecorce d'espèces feuillues ne nous permet pas de faire une comparaison convenable entre feuillues et résineux.

Considérant ces données, nous pouvons proposer une valeur seuil pour l'Ecorce à 10 mg/kg MS correspondant à 90% des points. Cette valeur élimine un point extrême. Cet échantillon est issu d'une base de données autrichienne(28) qui n'indique pas la nature et l'origine de l'échantillon analysé.

La biomasse végétale utilisée dans les chaudières bois est souvent très diverse, contenant différents types de bois et d'écorces. Il faut donc prendre en compte ces données. Dans le cas du Pb, la présence d'écorces influence, a priori, peu la concentration en Pb de ce combustible, puisque le seuil fixé pour l'Ecorce est similaire au seuil fixé pour le Bois. Nous proposons une **valeur seuil pour le combustible de 8 mg/kg MS**.

## Proposition d'une valeur limite pour l'élément Ti



L'élément Titane (Ti) est présent naturellement dans la biomasse végétale. Son rôle dans le végétal n'est pas encore bien défini. Dans le cadre de la présente étude, nous nous sommes intéressés à sa présence dans le combustible, et plus précisément dans le Bois et l'Ecorce.

Concernant le Bois (*graphe de gauche*), nous avons rassemblé dans notre base de données, 16 échantillons dits « naturels ». Nous observons des teneurs allant de 0,16 à 179 mg/kg MS, pour une moyenne de 27,2 mg/kg MS. Nous constatons que les teneurs en Pb dans les Bois résineux et feuillus sont assez similaires.

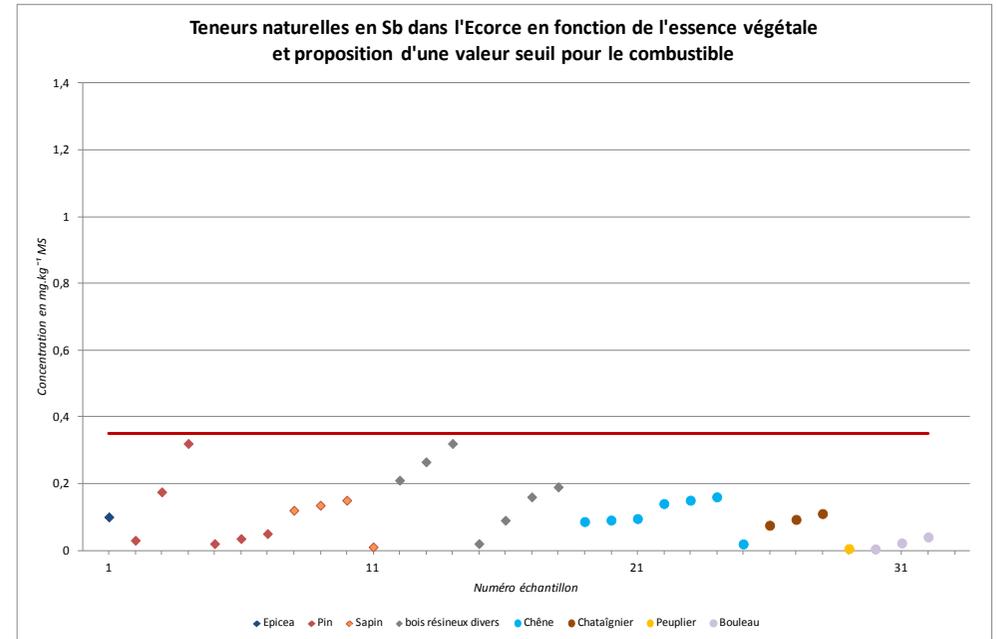
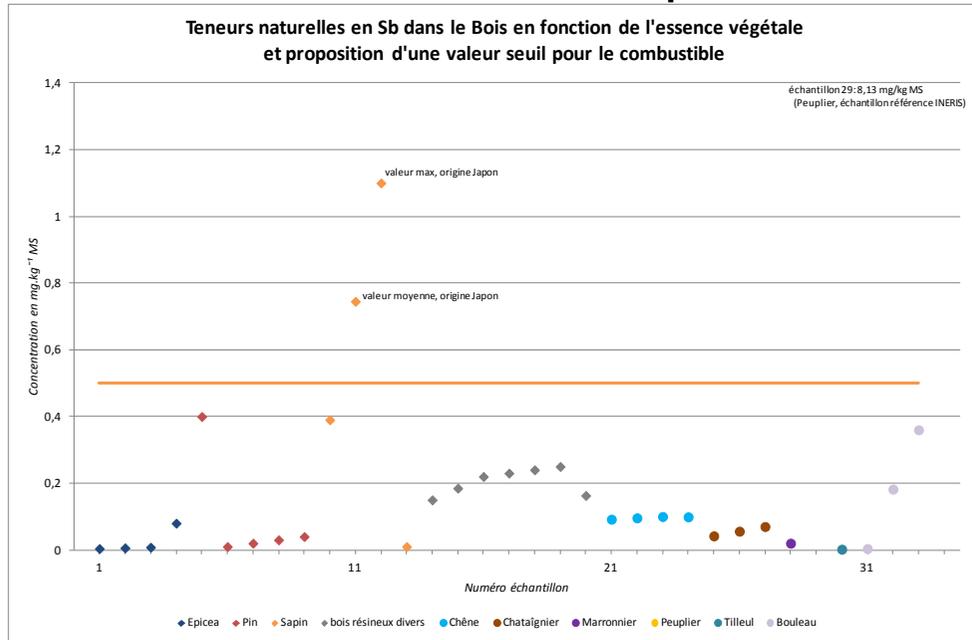
Considérant ces données, nous pouvons proposer une valeur seuil pour le Bois à 60 mg/kg MS correspondant à 95% des valeurs recensées. Cette valeur seuil permet d'éliminer un point extrême. Cet échantillon est issu d'une base de données autrichienne(47) ne donnant comme seule information la présence d'écorces dans l'échantillon analysé.

Concernant l'Ecorce (*graphe de droite*), nous avons rassemblé 34 échantillons « naturels » (un point intermédiaire a été éliminé, cf. paragraphe 4.2). Nous observons des teneurs allant de 0,9 à 359 mg/kg MS, pour une moyenne de 30,1 mg/kg MS. Les Ecorces résineux ont des teneurs en Ti similaires aux Ecorces feuillus, à l'exception du cas de l'Epicea. Les trois premiers échantillons sont issus de la même analyse correspondant aux valeurs extrêmes et à la valeur moyenne. Ces données sont issues d'une base de données autrichienne(47) qui ne communique pas d'informations sur ces échantillons. Pour l'Ecorce d'Epicea, ces données sont donc à prendre avec précaution sachant que nous ne possédons qu'une seule autre valeur à 2,81 mg/kg MS.

Considérant ces résultats, nous proposons une valeur seuil pour l'Ecorce à 50 mg/kg MS correspondant à 90% des valeurs recensées. Cette valeur seuil élimine trois points extrêmes correspondant aux points cités ci-dessus.

La nature du combustible utilisé dans les chaudières à bois n'est pas toujours la même. Il peut être composé de Bois résineux et/ou feuillus, mais il peut aussi contenir une proportion plus ou moins importante d'écorces. Tous ces éléments sont importants pour établir une valeur seuil. Dans le cas du Ti, la présence d'écorces n'influence pas les teneurs dans le combustible puisque le seuil fixé pour le Bois est similaire au seuil fixé pour l'Ecorce. Nous proposons une **valeur seuil pour le combustible de 60 mg/kg MS**.

## Proposition d'une valeur seuil pour l'élément Sb



L'élément Antimoine (Sb) est présent naturellement dans la biomasse végétale, à des concentrations très faibles. A ce jour, son rôle dans le végétal n'a pas encore été démontré. Dans le cadre de la présente étude, nous nous sommes intéressés à sa présence dans le combustible, et plus précisément dans le Bois et l'Ecorce.

Concernant le Bois (*graphe de gauche*), nous avons rassemblé dans notre base de données, 33 échantillons dits « naturels ». Nous observons des teneurs allant de 0,002 à 8,13 mg/kg MS, pour une moyenne de 0,41 mg/kg MS. Nous constatons que les teneurs en Sb dans les Bois résineux et feuillus sont assez similaires dans l'ensemble. Seules les teneurs en Sb du Sapin évoluent de façon plus prononcées que celles des autres essences végétales. Ces données sont toutefois issues d'une même publication.

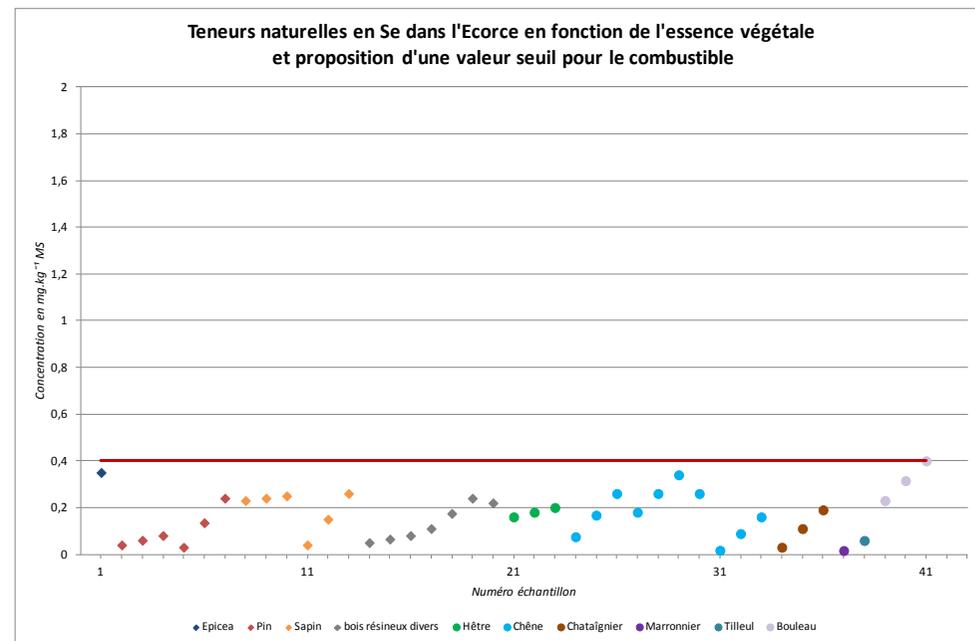
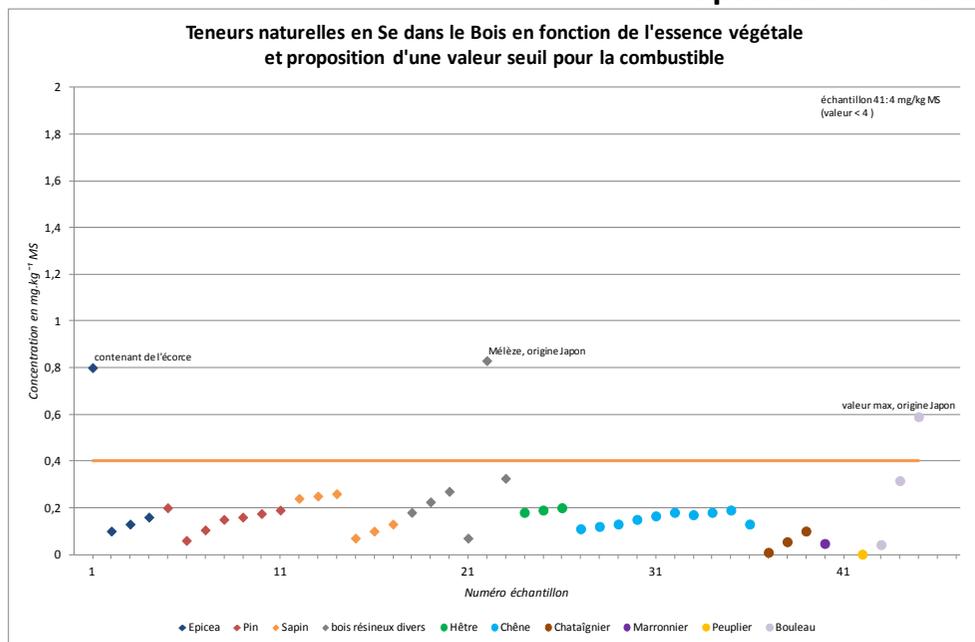
Considérant ces résultats, nous proposons une valeur seuil pour le Bois à 0,5 mg/kg MS correspondant à un seuil de 90%. Cette valeur seuil permet d'éliminer trois points extrêmes. Les échantillons 11 et 12 (0,75 et 1,1 mg/kg MS) sont issus d'une publication japonaise(24) sur la composition élémentaire des arbres japonais utilisables comme source d'énergie renouvelable. Les échantillons étudiés dans cette publication ont été prélevés sur des sites différents et recueillis à des années différentes. Le manque d'informations ne nous permet pas d'expliquer la teneur forte en Sb (possibilité d'avoir une pollution ou un effet du fond pédogéochimique par exemple). L'échantillon 29 (8,13 mg/kg MS) est issu d'une campagne effectuée par l'INERIS. Il s'agit d'un échantillon témoin pour des essais sur chaudière. Il s'agit de la seule donnée sur le Peuplier, ce qui ne nous permet pas de conclure sur les raisons possibles de cette teneur forte en Sb.

Concernant l'Ecorce (*graphe de droite*), nous avons rassemblé 32 échantillons « naturels ». Nous observons des teneurs allant de 0,004 à 0,32 mg/kg MS, pour une moyenne de 0,11 mg/kg MS. Nous constatons que les Ecorces résineux ont des concentrations en Sb légèrement supérieures aux Ecorces feuillus, avec une moyenne de 0,13 mg/kg MS contre 0,078 mg/kg MS.

Considérant ces données, nous proposons une valeur seuil pour l'Ecorce à 0,35 mg/kg MS correspondant à 100% des données recensées.

Le combustible utilisé dans les chaudières n'a pas une composition constante. Il peut contenir différents types de bois (feuillus/résineux), mais également de l'écorce. Tous ces éléments sont importants pour établir une valeur seuil. Dans le cas du Sb, la présence d'écorces n'influence pas les teneurs dans le combustible puisque le seuil fixé pour le Bois est légèrement supérieur au seuil fixé pour l'Ecorce. Nous pouvons donc proposer une **valeur seuil pour le combustible de 0,5 mg/kg MS**.

## Proposition d'une valeur seuil pour l'élément Se



De manière générale, l'élément Sélénium (Se) est présent naturellement dans la biomasse végétale. Son rôle dans le végétal n'est pas encore démontré. Sa teneur reste néanmoins très faible. Il est toxique pour la plante à de fortes concentrations. Dans le cadre de la présente étude, nous nous sommes intéressés à sa présence dans le combustible, et plus précisément dans le Bois et l'Ecorce.

Concernant le Bois (*graphe de gauche*), nous avons rassemblé dans notre base de données, 45 échantillons dits « naturels » (élimination d'un point intermédiaire, cf. paragraphe 4.2). Nous observons des teneurs allant de 0,001 à 4 mg/kg MS, pour une moyenne de 0,276 mg/kg MS. Nous constatons une concentration en Se faible dans le Bois. Les Bois résineux et feuillus ont des teneurs en Se assez proches, avec une moyenne de 0,235 mg/kg MS versus 0,33 mg/kg MS.

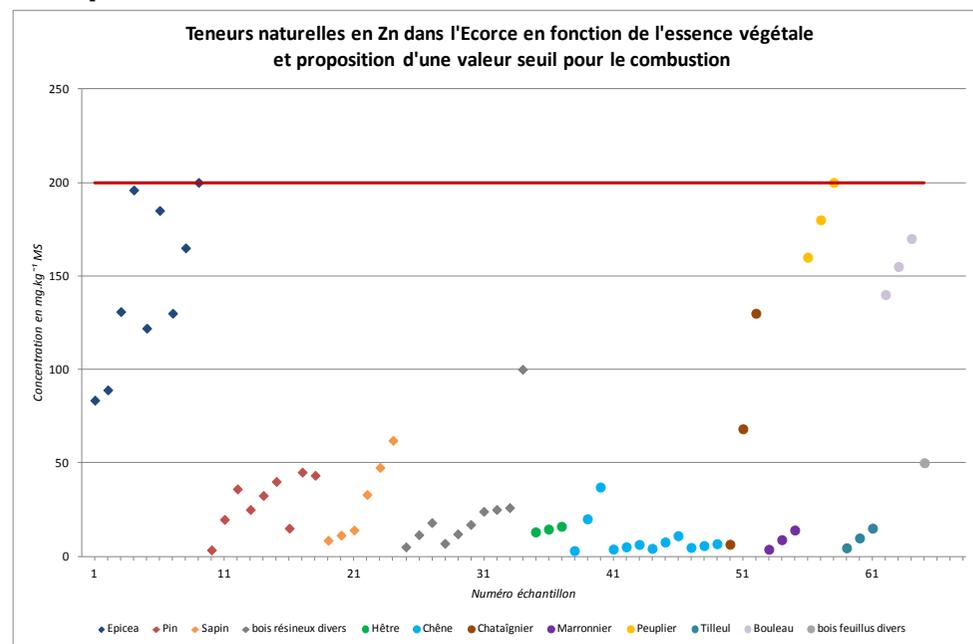
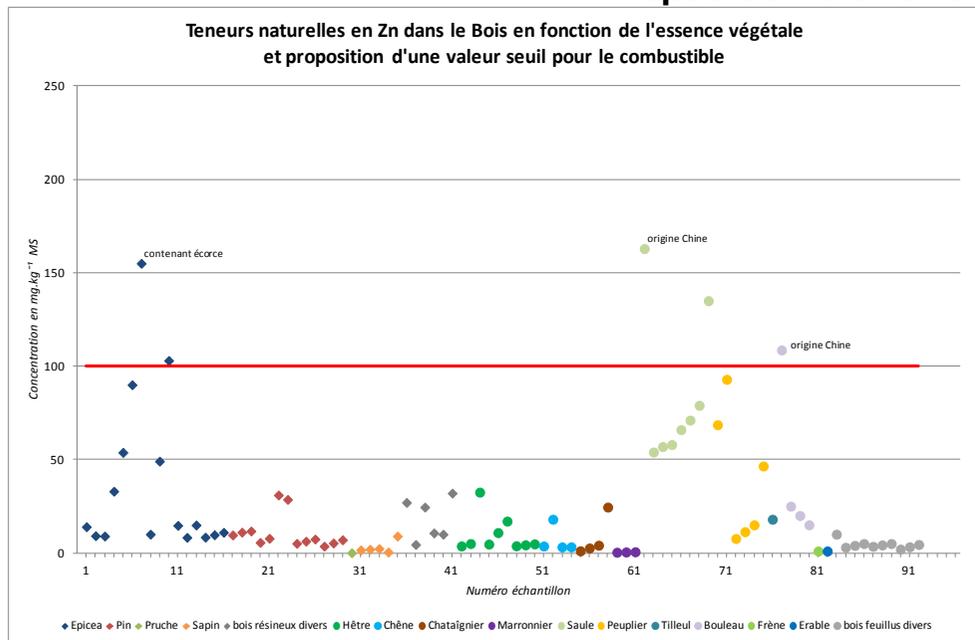
Considérant ces résultats, nous proposons une valeur seuil pour le Bois à 0,4 mg/kg MS correspondant à un seuil de 90%. Cette valeur seuil permet d'éliminer quatre points extrêmes. L'échantillon 1 (0,8 mg/kg MS) est issu d'une base de données hollandaise(29) indiquant seulement la présence d'écorces dans l'échantillon analysé. Les échantillons 22 et 45 (0,83 et 0,59 mg/kg MS) sont issus d'une publication japonaise(24) qui traite des éléments inorganiques présents dans des arbres japonais utilisables comme sources d'énergie renouvelable. Les échantillons étudiés dans cette publication, ont une origine et un âge différent. Le manque d'informations ne nous permet pas de dire si cette concentration en Se est liée à l'espèce végétale, ou s'il s'agit d'une contamination de l'échantillon par son environnement d'origine. L'échantillon 41 (4 mg/kg MS) correspond à une limite de détection (technique analytique inappropriée).

Concernant l'Ecorce (*graphe de droite*), nous avons rassemblé 41 échantillons « naturels ». Nous observons des teneurs allant de 0,016 à 0,4 mg/kg MS, pour une moyenne de 0,164 mg/kg MS. Les teneurs dans l'Ecorce de résineux et de feuillus sont assez similaires.

Considérant ces données, nous proposons une valeur seuil pour l'Ecorce à 0,4 mg/kg MS correspondant à 100% des données recensées.

La biomasse végétale qui entre, en tant que combustible, dans les chaudières à bois n'est pas toujours bien définie et ne possède pas une composition constante. Elle peut être composée de bois de résineux et/ou de feuillus, mais elle peut aussi contenir une certaine proportion d'écorces. Tous ces éléments sont importants pour établir une valeur seuil. Dans le cas du Se, la présence d'écorces n'influence pas les teneurs en Se dans le combustible puisque le seuil fixé pour le Bois est identique au seuil fixé pour l'Ecorce. Nous proposons une **valeur seuil pour le combustible de 0,4 mg/kg MS**.

## Proposition d'une valeur limite pour l'élément Zn



L'élément Zinc (Zn) est présent naturellement dans la biomasse végétale. Cet élément participe à l'activation et à la composition de certains enzymes. Dans le cadre de la présente étude, nous nous sommes intéressés à sa présence dans le combustible, et plus précisément dans le Bois et l'Ecorce.

Concernant le Bois (*graphe de gauche*), nous avons rassemblé dans notre base de données, 102 échantillons dits « naturels ». Nous observons des teneurs allant de 0,07 à 162,9 mg/kg MS, pour une moyenne de 26,2 mg/kg MS. Nous constatons une concentration moyenne en Zn dans le Bois résineux et feuillus assez proche, avec une moyenne de 20,9 mg/kg MS contre 29,8 mg/kg MS. Cependant, nous observons dans le cas de l'Epicéa, du Saule et du Peuplier, des teneurs plus grandes et plus variées, ce qui témoigne de leur propriété d'accumulation du Zn dans les tissus.

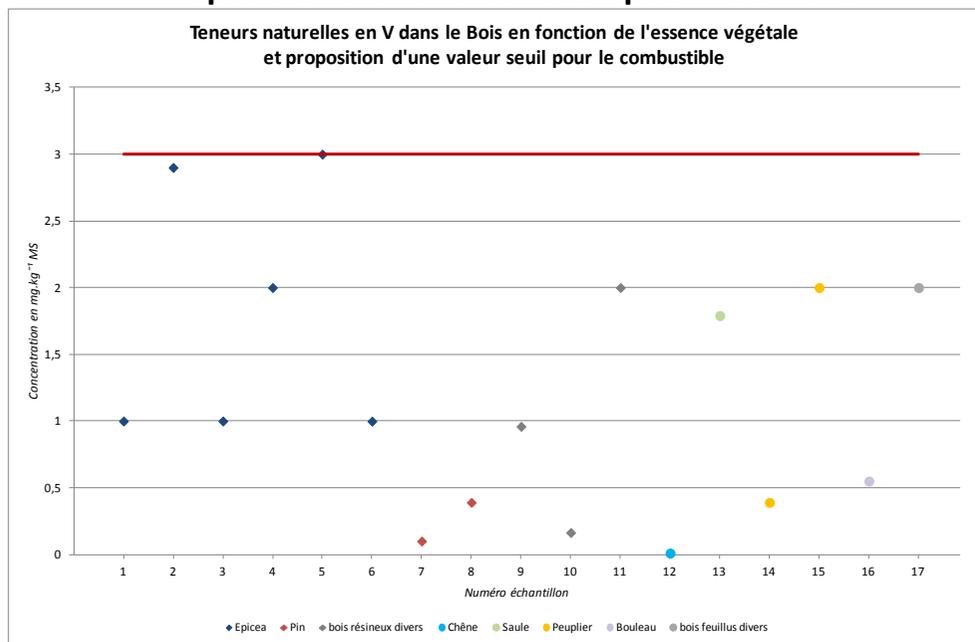
Considérant ces résultats, nous proposons une valeur seuil pour le Bois à 100 mg/kg MS correspondant à 95% des données recensées. Cette valeur seuil élimine cinq points extrêmes. Les échantillons 7 et 10 (155 et 103 mg/kg MS) sont issus de deux bases de données, l'une hollandaise(29) et l'autre autrichienne(47), qui n'indiquent pas la nature et la provenance de ces échantillons mais seulement qu'ils contiennent de l'écorce. Les échantillons 62 et 77 (162,9 et 108 mg/kg MS) sont issus d'une publication chinoise(10) sur l'analyse de la composition élémentaire de différentes biomasses végétales chinoises utilisables comme source d'énergie renouvelable. Cette publication ne donne pas d'informations précises sur la provenance des échantillons analysés. L'échantillon 69 (135 mg/kg MS) est issu d'une publication portugaise(45) sur l'étude de la valeur énergétique et la composition du bois de différentes essences utilisables pour produire de l'énergie.

Concernant l'Ecorce (*graphe de droite*), nous avons rassemblé 65 échantillons « naturels ». Nous observons des teneurs allant de 3 à 20 mg/kg MS, pour une moyenne de 53,2 mg/kg MS. Nous constatons que les teneurs en Zn dans l'Ecorce sont très variables. L'Ecorce d'Epicéa, du Peuplier et du Bouleau possède des teneurs en Zn plus fortes que celles des autres essences végétales (jusqu'à des concentrations 4 fois plus importantes).

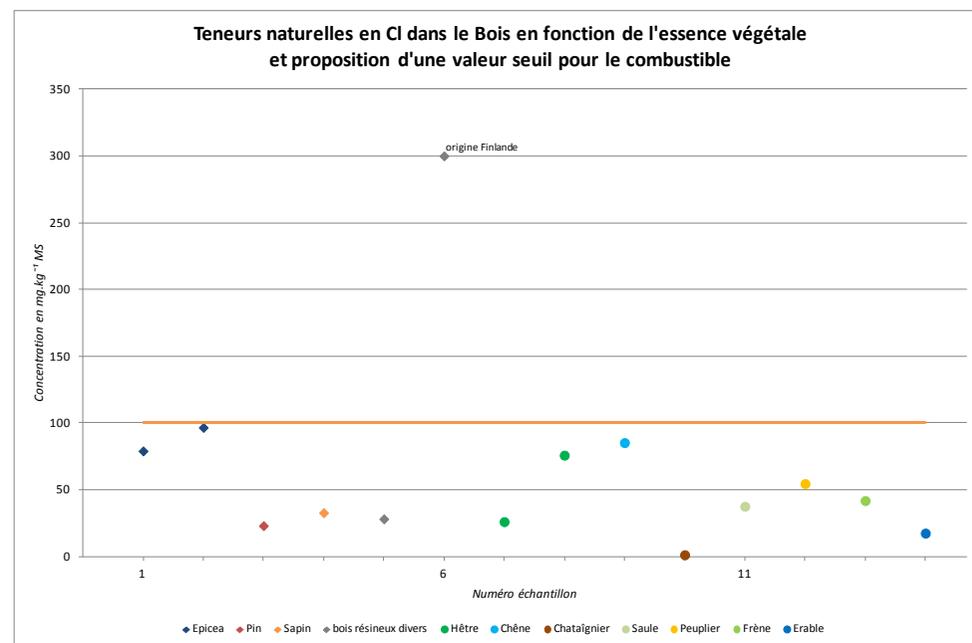
Considérant ces données, nous proposons une valeur seuil pour l'Ecorce à 200 mg/kg MS correspondant à 100% des valeurs recensées.

La biomasse végétale utilisée dans les chaudières bois peut être très diverse, pouvant contenir différents types de bois et d'écorces. Tous ces éléments sont importants pour établir une valeur seuil. Dans le cas du Zn, la présence d'écorce peut influencer fortement la teneur en Zn dans le combustible, puisque le seuil fixé pour l'Ecorce est 2 fois plus grand que le seuil fixé pour le Bois. Cela est également mis en évidence dans le graphe sur le Bois, avec la présence de deux points contenant des teneurs élevées liées à la présence d'écorces. Nous proposons une **valeur seuil pour le combustible de 100 mg/kg MS**. Cependant, lors d'une entrée massive d'écorces dans les chaudières (par une utilisation des sciures par exemple), ce seuil mériterait d'être réajusté.

## Proposition d'une valeur seuil pour l'élément V



## Proposition d'une valeur seuil pour l'élément Cl



De manière générale, l'élément Vanadium (V) est présent en faible concentration dans les végétaux, cependant son rôle dans le fonctionnement du végétal n'est pas encore bien défini. Dans le cadre de la présente étude, nous nous sommes intéressés à sa présence dans le combustible, et plus précisément dans le Bois et l'Ecorce.

Dans le Bois (*voir le graphe au dessus*), nous avons rassemblé dans notre base de données, 17 échantillons dits « naturels ». Nous observons des teneurs allant de 0,01 à 3 mg/kg MS, pour une moyenne de 1,25 mg/kg MS. Nous constatons que les Bois feuillus ont des teneurs en V légèrement plus faibles que les Bois résineux, avec une moyenne de 1,12 mg/kg MS contre 1,32 mg/kg MS. Considérant ces données, nous proposons une valeur seuil pour le Bois à 3 mg/kg MS correspondant à 100% des points.

Concernant l'Ecorce, nous avons rassemblé 4 échantillons « naturels ». Nous observons des teneurs allant de 1 à 5 mg/kg MS, pour une moyenne de 2,5 mg/kg MS. Le nombre limité d'échantillons ne nous permet pas d'analyser ces résultats.

Compte tenu des données dont nous disposons, nous proposons une **valeur seuil pour le combustible de 3 mg/kg MS**. Cependant, lors d'une entrée massive d'écorces dans les chaudières (par une utilisation des sciures par exemple), ce seuil mériterait d'être réajusté.

L'élément Chlore (Cl) est présent naturellement dans la biomasse végétale, puisqu'il joue un rôle essentiel dans les équilibres ioniques et dans la photosynthèse. Dans le cadre de la présente étude, nous nous sommes intéressés à sa présence dans le combustible, et plus précisément dans le Bois et l'Ecorce.

Dans le Bois (*voir le graphe au dessus*), nous avons rassemblé dans notre base de données, 14 échantillons dits « naturels ». Nous observons des teneurs allant de 1,2 à 300 mg/kg MS, pour une moyenne de 64,2 mg/kg MS. Nous constatons que les concentrations en Cl dans les Bois feuillus et résineux sont similaires. Considérant ces données, nous proposons une valeur seuil pour le Bois à 100 mg/kg MS correspondant à 92% des points. Ce seuil élimine un point extrême qui est issu d'une publication finlandaise(26) portant sur les émissions lors de la combustion de bois (déchets municipaux). Aucune information sur la nature, ni sur l'origine de cet échantillon n'est disponible.

Concernant l'Ecorce, nous avons rassemblé 2 échantillons « naturels », dont les teneurs sont de 150 et 165 mg/kg MS. Le nombre limité d'échantillons ne nous permet pas d'analyser ces résultats.

Compte tenu des données disponibles, nous pouvons proposer une **valeur seuil pour le combustible de 100 mg/kg MS**. Cependant, lors d'une entrée massive d'écorces dans les chaudières (par une utilisation des sciures par exemple), ce seuil devrait être réajusté.

**Récapitulatif des données concernant les teneurs naturelles  
en métaux lourds dans le Bois (résineux et feuillus)**

**Bois résineux**

Concentration en mg/kg MS	min	max	moyenne	Valeur seuil proposée	% d'échantillons compris sous le seuil	Nombre d'échantillons
Hg	0,001	3,7	0,26	<b>0,1 (0,4)</b>	90	25 (27)
As	0,003	1,99	0,21	<b>0,5</b>	95	38
B			50,9	<b>100</b>	90	
Ba	1,4	52,1	15,5	<b>50</b>	95	27
Cd	0,003	1,4	0,21	<b>0,5</b>	95	16
Co	0,16	0,56	0,32			5
Cr	0,063	26,8	5,31	<b>17</b>	95	18
Cu	0,30	90	8,90	<b>20</b>	95	35
Mn	4	897	107,7	<b>240</b>	90	50
Ni	0,097	10,3	2,23	<b>6</b>	90	22
Pb	0,069	9,95	2,05	<b>6</b>	90	22
Ti	0,16	179	35,67	<b>60</b>	90	9
Sb	0,004	1,1	0,21	<b>0,5</b>	90	20
Se	0,06	0,83	0,23	<b>0,35 (0,5)</b>	90	23 (24)
Sn	< 0,16					1
V	0,1	3	1,32	<b>3,00</b>	100	11
Zn	0,07	155	20,91	<b>60</b>	90	41
Te	0,16	1				2
Mo	0,12	1,3				2
Ag	0,13					1
TI						0
Cl	23	300	93,23			6

**Bois feuillus**

Concentration en mg/kg MS	min	max	moyenne	Valeur seuil proposée	% d'échantillons compris sous le seuil	Nombre d'échantillons
Hg	0,001	0,07	0,011	<b>0,02 (0,04)</b>	90	19 (20)
As	0,009	2	0,226	<b>0,5 - 0,7</b>	90 - 95	21
B			75,07	<b>100</b>	90	
Ba	6,6	125,0	26,04	<b>50</b>	90	41
Cd	0,0003	2,2	0,41	<b>2,2</b>	100	28
Co	0,68	1,07	0,81			5
Cr	0,119	10,18	2,6	<b>10</b>	95	13
Cu	0,056	128,5	13,25	<b>20</b>	90	21
Mn	0,45	260	37,65	<b>100 - 150</b>	90 - 95	58
Ni	0,117	10,59	2,22	<b>4</b>	90	12
Pb	0,03	14,71	2,39	<b>6,0 - 8,0</b>	90 - 95	30
Ti	0,41	47,45	16,38			7
Sb	0,002	8,13	0,71	<b>0,5</b>	90	13
Se	0,001	4	0,33	<b>0,4</b>	90	22
Sn	0,09	4				2
V	0,01	2	1,12			6
Zn	0,34	162,9	29,75	<b>100</b>	90 - 95	61
Te	0,17	4				2
Mo	0,1	1,54				3
Ag						0
TI	0,13	4				2
Cl	1,2	85,2	42,42			8

## Bois résineux et feuillus

Concentration en mg/kg MS	min	max	moyenne	Valeur seuil proposée	% d'échantillons compris sous le seuil	Nombre d'échantillons
Hg	0,001	3,7	0,11	0,1	95	44 (47)
As	0,003	2	0,21	0,7	95	59
B	11,7	160	64,1	100	90	42
Ba	1,4	125,0	21,85	50	95	68
Cd	0,0003	2,2	0,34	2,2	100	44
Co	0,16	1,07	0,63	1,2	100	10
Cr	0,063	26,8	4,17	17	95	31
Cu	0,056	128,5	10,53	20	95	56
Mn	0,45	897	70,07	240	95	108
Ni	0,097	10,59	2,22	6	90	34
Pb	0,03	14,71	2,24	8	95	52
Ti	0,16	179	27,23	60	95	16
Sb	0,002	8,13	0,41	0,5	90	33
Se	0,001	4	0,28	0,4	90	45
Sn	0,09	4	1,42			3
V	0,01	3	1,25	3	100	17
Zn	0,07	162,9	26,17	100	95	92
Te	0,16	4	1,33			4
Mo	0,1	1,54	0,64			5
Ag	0,13					1
Tl	0,13	4				2
Cl	1,2	300	64,2	100	90	14

## Récapitulatif des données concernant les teneurs naturelles en métaux lourds dans l'écorce (résineux et feuillus)

### Ecorces résineux

Concentration en mg/kg MS	min	max	moyenne	Valeur seuil proposée	Pourcentage d'échantillons compris sous le seuil	Nombre d'échantillons
Hg	0,002	0,053	0,021	<b>0,05</b>	90	26
As	0,05	5	0,52	<b>1</b>	90	27
B			77,8	<b>100</b>	90	
Ba	1,3	320	98,17	<b>300</b>	95	51
Cd	0,5	1	0,781			6
Co	0,29	2	1,198			4
Cr	0,477	14	4,496			6
Cu	1	480	22,78	<b>20</b>	95	47
Mn	5,8	1329	263,6	<b>800</b>	90	50
Ni	0,5	18	5,206			8
Pb	1	19,86	4,606	<b>10</b>	90	10
Ti	2,81	359	67,858			14
Sb	0,01	0,32	0,133	<b>0,35</b>	100	18
Se	0,03	0,35	0,152	<b>0,25 - 0,3</b>	90 - 95	20
Sn	1					1
V	1	5	2,5			4
Zn	3,4	200	58,32	<b>170</b>	90	34
Te						0
Mo	1	5				3
Ag	1					1
Tl						
Cl	150	165				2

## Ecorces feuillus

Concentration en mg/kg MS	min	max	moyenne	Valeur seuil proposée	Pourcentage d'échantillons compris sous le seuil	Nombre d'échantillons
Hg	0,002	0,05	0,0094	<b>0,02</b>	95	25
As	0,001	0,1	0,066	<b>0,1</b>	100	13
B			48,9	<b>100</b>	90	
Ba	7,4	400	188,2	<b>400</b>	100	49
Cd	0,5					1
Co						0
Cr	5					1
Cu	0,97	37	5,55	<b>10</b>	95	41
Mn	44	1100	329,7	<b>700</b>	90	43
Ni	0,5					1
Pb	5					1
Ti	0,9	29	4,23	<b>4 (7)</b>	90	20 (21)
Sb	0,004	0,16	0,078	<b>0,16</b>	100	14
Se	0,016	0,4	0,176	<b>0,4</b>	100	21
Sn						0
V						0
Zn	3	200	47,5	<b>150</b>	90	31
Te						0
Mo						0
Ag						0
TI						0
Cl						0

## Ecorces résineux et feuillus

Concentration en mg/kg MS	min	max	moyenne	Valeur seuil proposée	Pourcentage d'échantillons compris sous le seuil	Nombre d'échantillons
Hg	0,002	0,053	0,0155	0,06	100	51
As	0,001	5	0,373	1	95	40
B	7,8	180	59,8	100	90	45
Ba	1,3	400	142,28	400	100	100
Cd	0,5	1	0,7411	1	100	7
Co	0,29	2	1,198			4
Cr	0,477	14	4,568			7
Cu	0,97	480	14,75	20	95	88
Mn	5,8	1329	264,18	800	95	93
Ni	0,5	18	4,683			9
Pb	1	19,86	4,642	10	90	11
Ti	0,9	359	30,094	50	90	34
Sb	0,004	0,32	0,109	0,35	100	32
Se	0,016	0,4	0,164	0,4	100	41
Sn	1					1
V	1	5	2,5			4
Zn	3	200	53,18	200	100	65
Te						0
Mo	1	5				3
Ag	1					1
TI						0
Cl	150	165				2



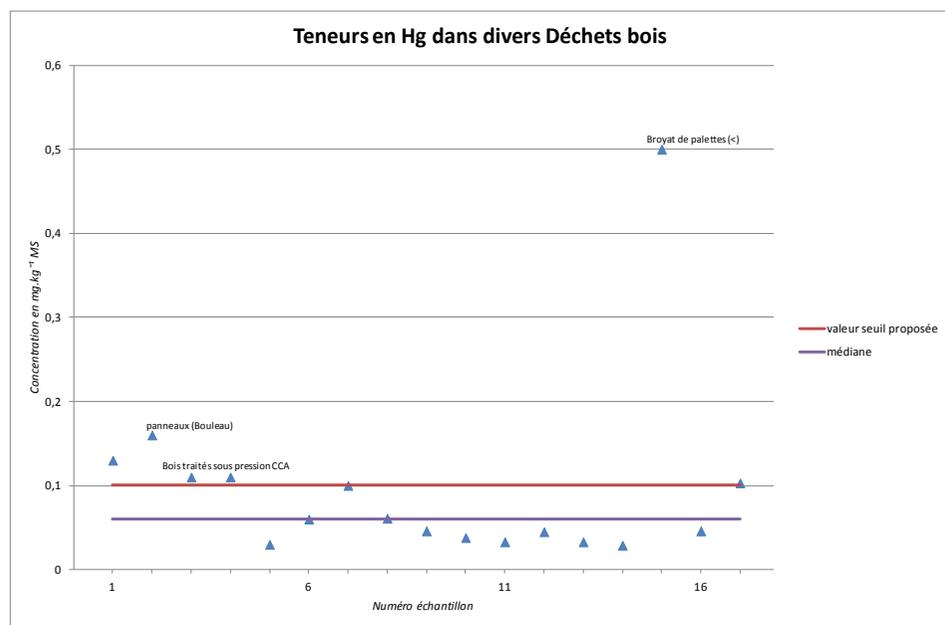
## **ANNEXE 2 :**

---

**Teneurs en métaux lourds dans les déchets de bois -  
comparaison aux valeurs seuils proposées**



## Application de la valeur seuil proposée pour le Hg sur des Déchets de bois



L'élément Mercure (Hg) a pu être apporté dans le bois, par une utilisation de certains fongicides et pesticides, mais également par des peintures qui peuvent contenir dans leur composition cet élément. Malgré une réglementation stricte sur son utilisation, en raison de sa grande nocivité pour l'environnement, nous pouvons trouver dans certains déchets de bois une présence en Hg supérieure à la normale.

Lors de notre étude bibliographique, nous avons rassemblé 17 échantillons considérés actuellement comme des déchets de bois. Les teneurs en mercure de ces échantillons évoluent de 0,029 à 0,5 mg/kg MS, avec une médiane à 0,06 mg/kg MS.

Le graphe ci-dessus permet de visualiser le positionnement de la valeur seuil proposée (0,1 mg/kg MS) par rapport aux teneurs rencontrées dans les différents déchets de bois. Cette valeur seuil se situe au-dessus de la valeur médiane des déchets, et englobe ainsi 71% des échantillons. Ce seuil a permis d'éliminer certains déchets de type panneaux et bois traités au CCA faiblement contaminés en mercure. La teneur élevée dans le cas du broyat de palette est liée à une limite de détection de la technique analytique.

Le mercure n'a jamais été un métal très utilisé pour le traitement du bois, peu de déchets sont susceptibles d'être fortement contaminés par cet élément.

En l'état actuel des connaissances (teneurs en mercure dans le bois naturel et dans les déchets de bois), ce seuil nous paraît adapté.

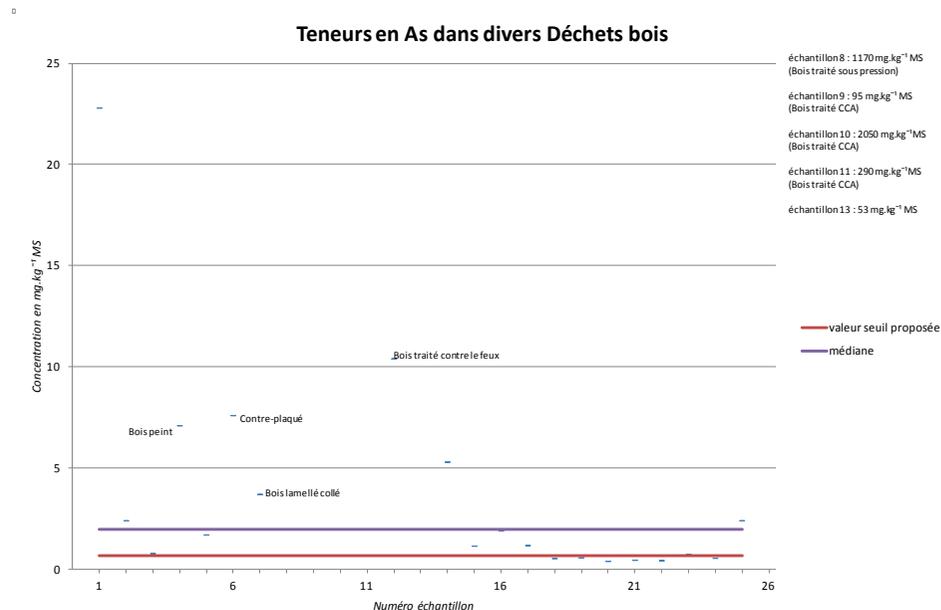
L'élément Arsenic (As) a souvent été apporté dans le bois par traitement sous-pression, tel que le traitement CCA, permettant une meilleure préservation du bois. L'As peut être également présent dans la composition de pigments de peinture.

Lors de notre étude bibliographique, nous avons recensés 25 échantillons considérés actuellement comme des déchets de bois. Les teneurs de ces échantillons évoluent de 0,029 à 2050 mg/kg MS, avec une médiane à 2 mg/kg MS.

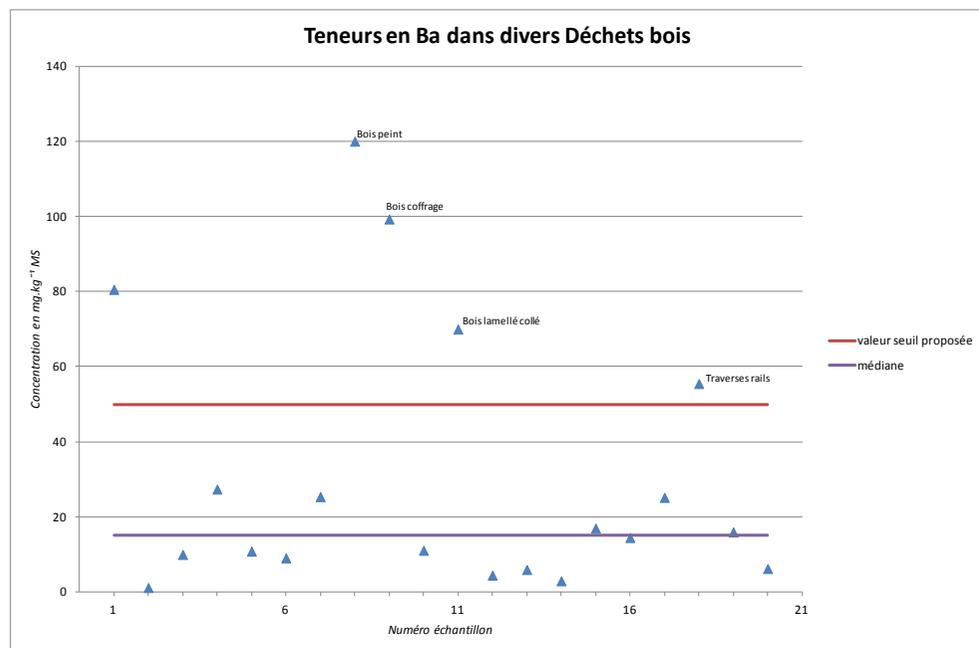
Le graphe ci-dessus permet de visualiser le positionnement de la valeur seuil proposée (0,7 mg/kg MS) par rapport aux teneurs rencontrées dans les différents déchets de bois. Cette valeur seuil se situe au-dessous de la valeur médiane des déchets, et englobe 56% des échantillons. Ce seuil a permis d'éliminer les bois fortement contaminés qui ont subi un traitement CCA, mais également certains bois moins contaminés issus de la construction/démolition tels que certains bois peints, ignifugés contre-plaqué, lamellé-collé. Ces bois sont sujets à une contamination par les métaux lourds.

En l'état actuel des connaissances (teneurs en arsenic dans le bois naturel et dans les déchets de bois), ce seuil nous paraît relativement bien adapté. Il pourrait être légèrement rehaussé à 1 mg/kg MS pour prendre en compte les plus fortes teneurs attendues dans les écorces ou à 2 mg/kg MS pour se caler sur les valeurs limites étrangères (Allemagne et Belgique).

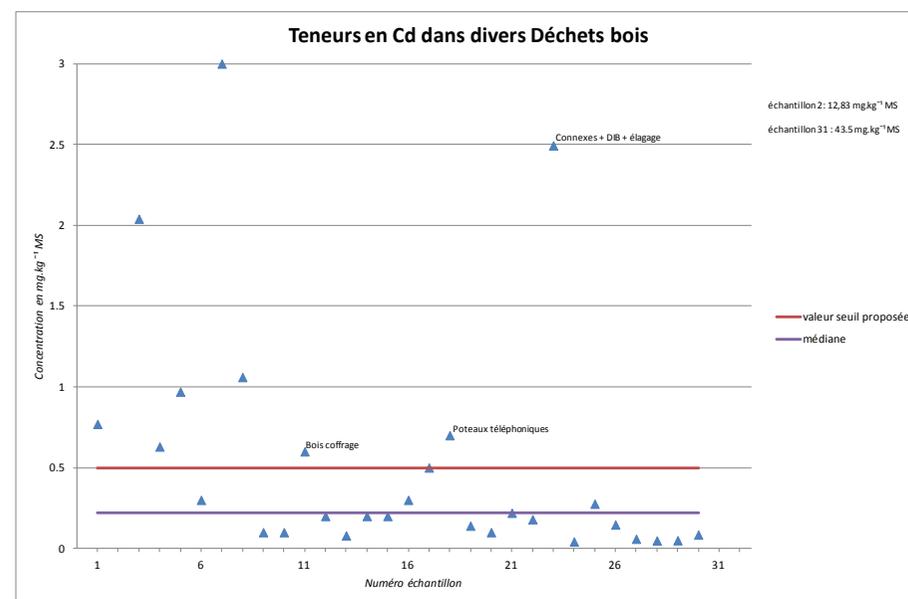
## Application de la valeur seuil proposée pour l'As sur des Déchets de bois



## Application de la valeur seuil proposée pour le Ba sur des Déchets de bois



## Application de la valeur seuil proposée pour le Cd sur des Déchets de bois



L'élément Baryum (Ba) a pu être apporté dans le bois, puisque qu'il est utilisé comme matière de charge pour les peintures, et participe à la composition de certains insecticides, herbicides et germicides. Il est donc possible de rencontrer des déchets de bois ayant des concentrations en Ba supérieures aux teneurs naturelles.

Lors de notre étude bibliographique, nous avons recensé 20 échantillons considérés actuellement comme des déchets de bois. Les teneurs en baryum de ces échantillons sont comprises entre 1,2 et 120 mg/kg MS, avec une médiane de 15,25 mg/kg MS.

Le graphe ci-dessus permet de visualiser le positionnement de la valeur seuil proposée (50 mg/kg MS) par rapport aux teneurs rencontrées dans différents déchets de bois. Cette valeur seuil se situe largement au-dessus de la valeur médiane des déchets. Elle englobe 75% des échantillons. Ce seuil a permis d'éliminer certains déchets susceptibles d'être traités ou contaminés par les métaux lourds, issus de la construction/démolition comme les bois peints, les bois de coffrage, du lamellé-collé et les traverses ferroviaires.

En l'état actuel des connaissances (teneurs en baryum dans le bois naturel et dans les déchets de bois), ce seuil nous paraît adapté. Toutefois compte tenu que peu de déchets sont susceptibles d'être fortement contaminés par cet élément, l'intérêt de fixer une valeur limite pour cet élément peut-être sujet à discussion, d'autant plus que ce seuil devrait être fortement rehaussé si une proportion significative d'écorces entrainé dans la composition du combustible.

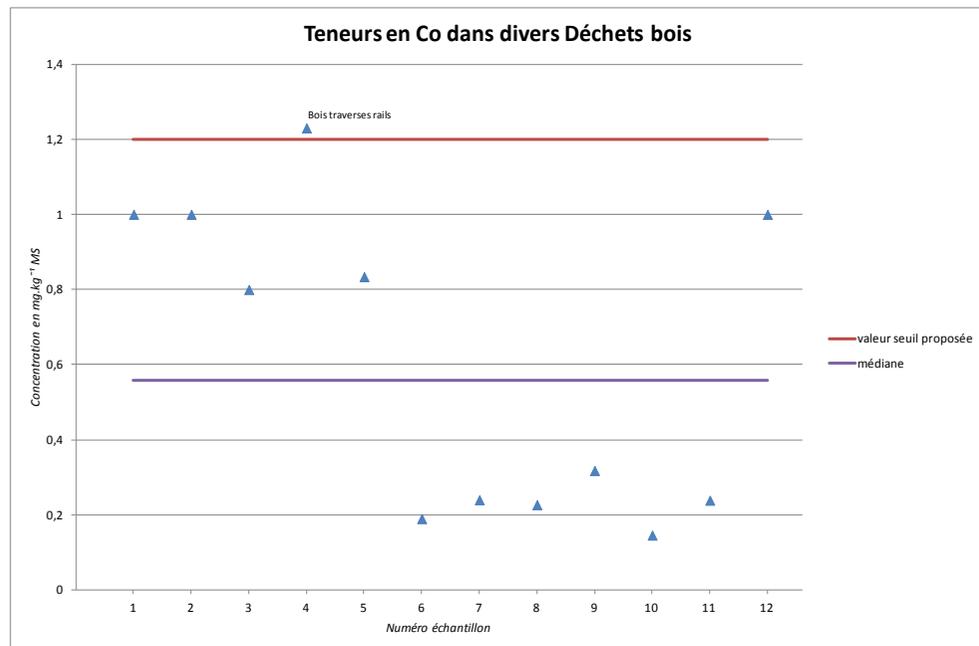
L'élément Cadmium (Cd) a pu être apporté dans le bois par les pesticides et les peintures contenant cet élément. Dans les peintures, le cadmium a été utilisé comme stabilisant ou comme pigment orange.

Lors de notre étude bibliographique, nous avons recensé 31 échantillons considérés actuellement comme des déchets de bois. Des teneurs comprises entre 0,042 à 43,5 mg/kg MS, avec une médiane de 0,22 mg/kg MS ont été observées.

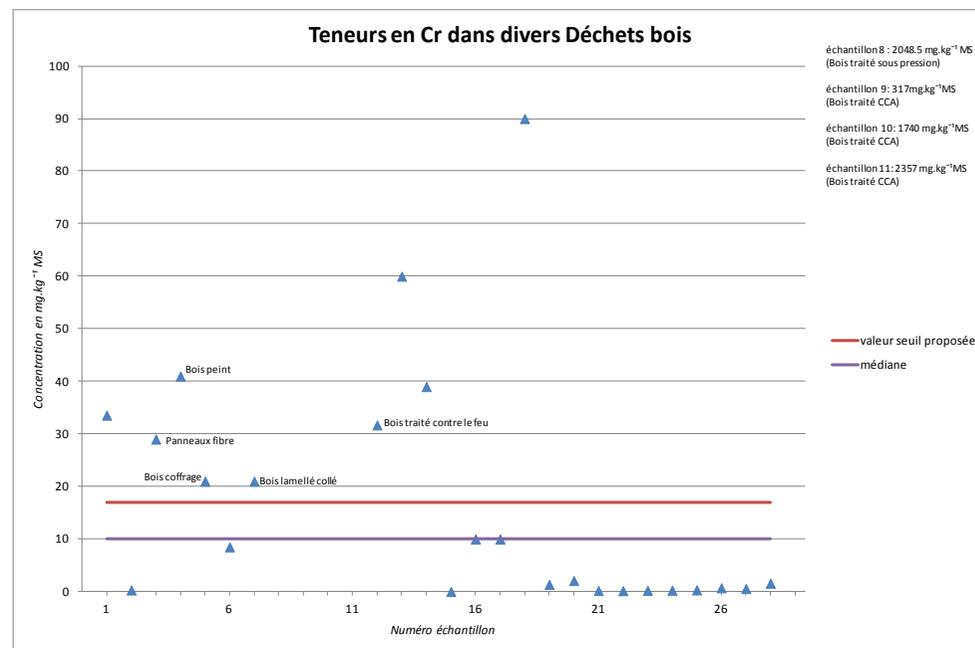
Le graphe ci-dessus permet de visualiser le positionnement de la valeur seuil proposée (0,5 mg/kg MS) par rapport aux teneurs rencontrées dans les différents déchets de bois. Cette valeur seuil se situe au-dessus de la valeur médiane des déchets. Elle englobe 65% des échantillons. Ce seuil permet d'éliminer certains déchets susceptibles d'être traités ou contaminés par des métaux lourds tels que les bois issus de la construction/démolition, les poteaux téléphoniques, des déchets industriels banals contaminés ou des bois qui se sont développés sur des sols contaminés, ainsi que de nombreux déchets de bois dont la nature n'est pas mentionnée dans les publications.

En l'état actuel des connaissances (teneurs en cadmium dans le bois naturel et dans les déchets de bois), ce seuil nous paraît adapté. Il pourrait éventuellement être rehaussé à 1 mg/kg MS pour prendre en compte les plus fortes teneurs en cadmium présentes dans les écorces et coïncider aux recommandations anglaises.

## Application de la valeur seuil proposée pour le Co sur des Déchets de bois



## Application de la valeur seuil proposée pour le Cr sur des Déchets de bois



L'élément Cobalt (Co) a pu être apporté dans le bois, puisque qu'il rentre dans la composition des certains pigments de peintures, de colles, d'agents de séchage et d'agents épaississants de peintures. Il est donc possible de rencontrer des déchets de bois ayant des teneurs en Co supérieures aux concentrations naturelles du bois.

Lors de notre étude bibliographique, nous avons recensé 12 échantillons considérés actuellement comme des déchets de bois. Des teneurs allant de 0,146 à 1,23 mg/kg MS, avec une médiane de 0,56 mg/kg MS ont été observées.

Le graphe ci-dessus permet de visualiser le positionnement de la valeur seuil proposée (1,2 mg/kg MS) par rapport aux teneurs rencontrées dans les différents déchets de bois. Nous constatons que cette valeur seuil se situe bien au-dessus de la valeur médiane des déchets, et rassemble la quasi-totalité des échantillons. Ce seuil a permis cependant d'éliminer certains déchets tels que les traverses ferroviaires.

En l'état actuel des connaissances (teneurs en cobalt dans le bois naturel et dans les déchets de bois), ce seuil nous paraît adapté. Toutefois compte tenu que peu de déchets sont susceptibles d'être fortement contaminés par cet élément, l'intérêt de fixer une valeur limite pour cet élément peut-être sujet à discussion, d'autant plus que ce seuil devrait être légèrement rehaussé si une proportion significative d'écorces entrain dans la composition du combustible.

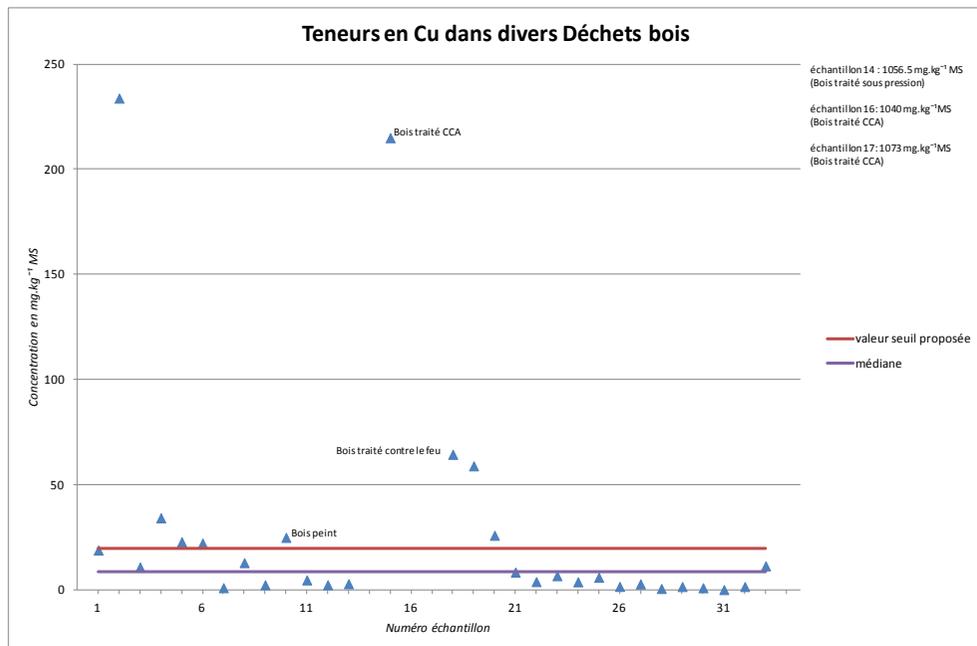
L'élément Chrome (Cr) a pu être apporté dans le bois, le plus souvent par une utilisation des traitements de préservation, tel que le traitement sous pression CCA. Le chrome peut être présent également dans la composition de peintures, notamment dans certains pigments rouges.

Lors de notre étude bibliographique, nous avons recensé 28 échantillons considérés actuellement comme des déchets de bois. Les teneurs de ces échantillons évoluent de 0 à 2357 mg/kg MS, avec une médiane à 10 mg/kg MS.

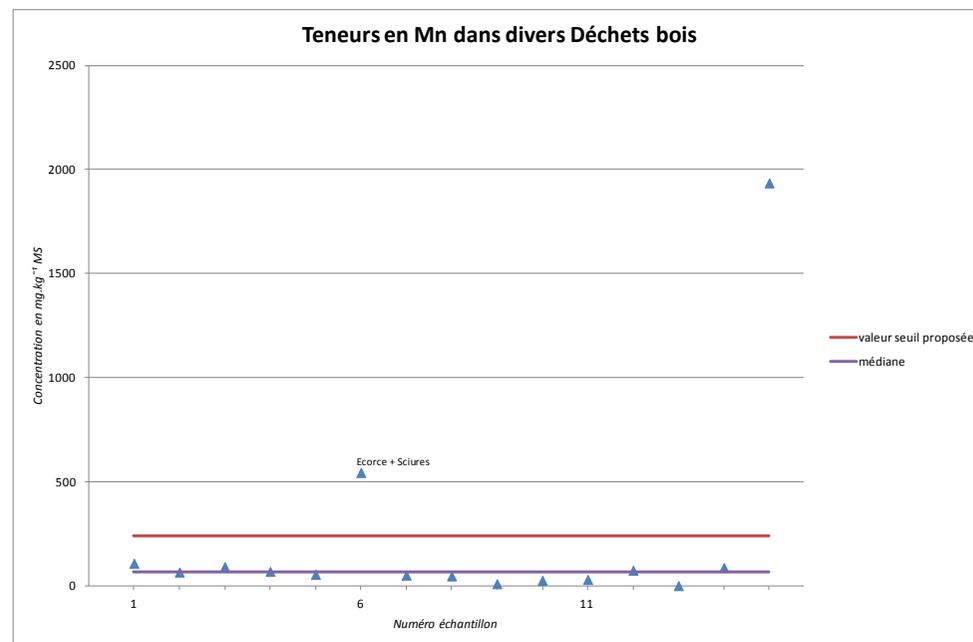
Le graphe ci-dessus permet de visualiser le positionnement de la valeur seuil proposée (17 mg/kg MS) par rapport aux teneurs rencontrées dans les différents déchets de bois. Cette valeur seuil se situe au-dessus de la valeur médiane des déchets. Elle englobe 50% des échantillons. Ce seuil permet d'éliminer certains déchets fortement contaminés tels que des bois traités au CCA, mais également des bois issus de la construction/démolition (panneaux fibres, bois peints, bois de coffrage, lamellé-collé, bois ignifugés).

En l'état actuel des connaissances (teneurs en chrome dans le bois naturel et dans les déchets de bois), ce seuil nous paraît relativement bien adapté. Eventuellement, il pourrait être rehaussé à 30 mg/kg MS pour récupérer des déchets de bois très faiblement contaminés et pour se caler sur les valeurs limites étrangères (Allemagne et Belgique).

## Application de la valeur seuil proposée pour le Cu sur des Déchets de bois



## Application de la valeur seuil proposée pour le Mn sur des Déchets de bois



L'élément Cuivre (Cu) a pu être apporté dans le bois par l'utilisation de certains fongicides et pesticides, mais ce sont les traitements de préservation, comme le traitement sous pression CCA qui sont à l'origine des plus fortes contaminations.

Lors de notre étude bibliographique, nous avons recensé 33 échantillons considérés actuellement comme des déchets de bois. Des teneurs allant de 0,201 à 1073 mg/kg MS, avec une médiane de 8,5 mg/kg MS ont été observées.

Le graphe ci-dessus permet de visualiser le positionnement de la valeur seuil proposée (20 mg/kg MS) par rapport aux teneurs rencontrées dans les différents déchets de bois. Cette valeur seuil se situe au-dessus de la valeur médiane des déchets. Elle englobe 64% des échantillons. Ce seuil a permis d'éliminer certains déchets, en l'occurrence les bois traités sous pression, mais également certains bois peints et ignifugés. De nombreux déchets de bois dont la nature n'est pas mentionnée dans les publications ont également été éliminés.

En l'état actuel des connaissances (teneurs en cuivre dans le bois naturel et dans les déchets de bois), ce seuil nous paraît adapté. Il correspond par ailleurs aux valeurs limites allemande et belge.

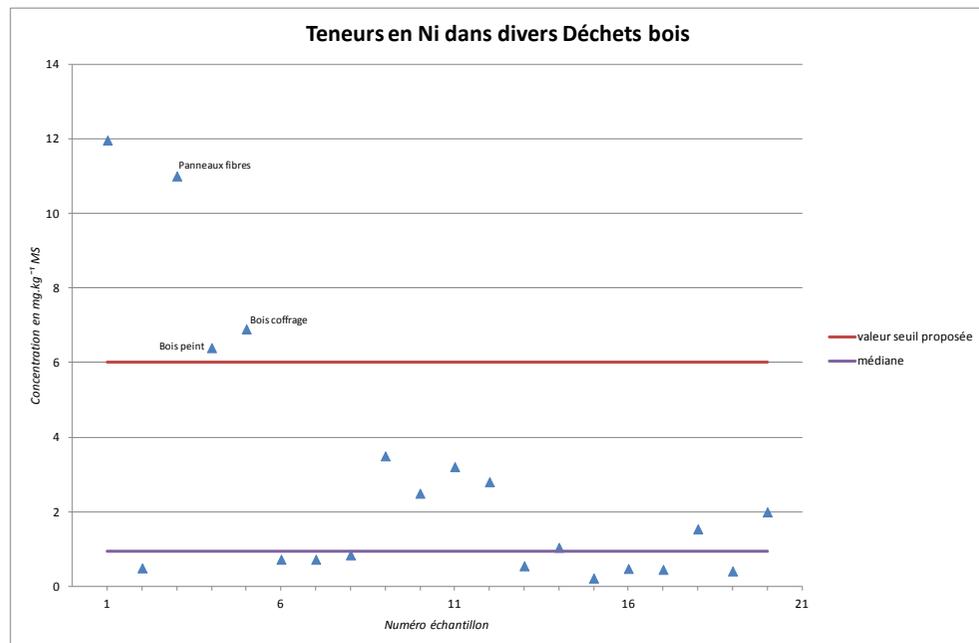
L'élément Manganèse (Mn) a pu être apporté dans le bois lors de traitements de conservation ou par une utilisation de certains pesticides. Le manganèse entre également dans la composition de certains pigments de peintures.

Lors de notre étude bibliographique, nous avons recensé 15 échantillons considérés actuellement comme des déchets de bois. Les teneurs de ces échantillons évoluent de 1,72 à 1935 mg/kg MS, avec une médiane à 67 mg/kg MS.

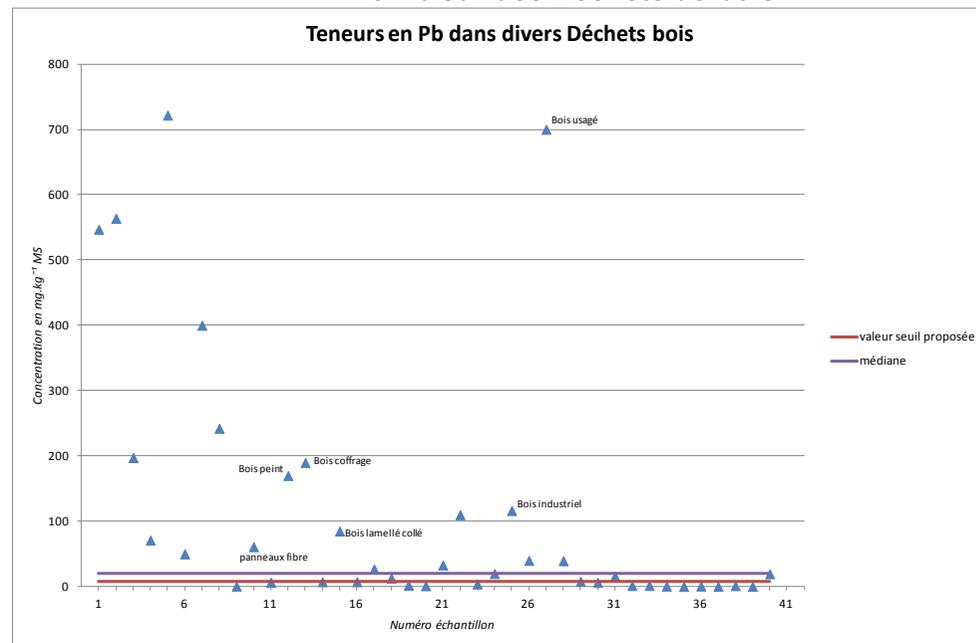
Le graphe ci-dessus permet de visualiser le positionnement de la valeur seuil proposée (240 mg/kg MS) par rapport aux teneurs rencontrées dans les différents déchets de bois. Cette valeur seuil se situe au-dessus de la valeur médiane des déchets. Elle englobe 87% des échantillons. Le cas du déchet « Ecorce + Sciures » est particulier. La présence d'écorces dans le combustible naturel augmente fortement les concentrations en manganèse. Cet échantillon se situe sous le seuil fixé pour l'Ecorce (800 mg/kg MS), il n'est donc probablement pas contaminé.

En l'état actuel des connaissances (teneurs en manganèse dans le bois naturel et dans les déchets de bois), ce seuil nous paraît adapté. Toutefois compte tenu que peu de déchets sont susceptibles d'être fortement contaminés par cet élément, l'intérêt de fixer une valeur limite pour cet élément peut-être sujet à discussion, d'autant plus que ce seuil devrait être fortement rehaussé si une proportion significative d'écorces entrain dans la composition du combustible.

## Application de la valeur seuil proposée pour le Ni sur des Déchets de bois



## Application de la valeur seuil proposée pour le Pb sur des Déchets de bois



L'élément Nickel (Ni) a pu être apporté dans le bois via l'emploi de certains pesticides. Ce métal est, par ailleurs, utilisé dans les traitements anticorrosion.

Lors de notre étude bibliographique, nous avons recensé 20 échantillons considérés actuellement comme des déchets de bois. Des teneurs allant de 0,227 à 11,96 mg/kg MS, avec une médiane de 0,9495 mg/kg MS ont été observées.

Le graphe ci-dessus permet de visualiser le positionnement de la valeur seuil proposée (6 mg/kg MS) par rapport aux teneurs rencontrées dans les différents déchets de bois. Cette valeur seuil se situe au-dessus de la valeur médiane des déchets. Elle englobe 80% des échantillons. Ce seuil a permis d'éliminer certains déchets provenant essentiellement de la construction/démolition tels que des panneaux fibres, des bois peints et des bois de coffrage.

En l'état actuel des connaissances (teneurs en nickel dans le bois naturel et dans les déchets de bois), ce seuil nous paraît adapté.

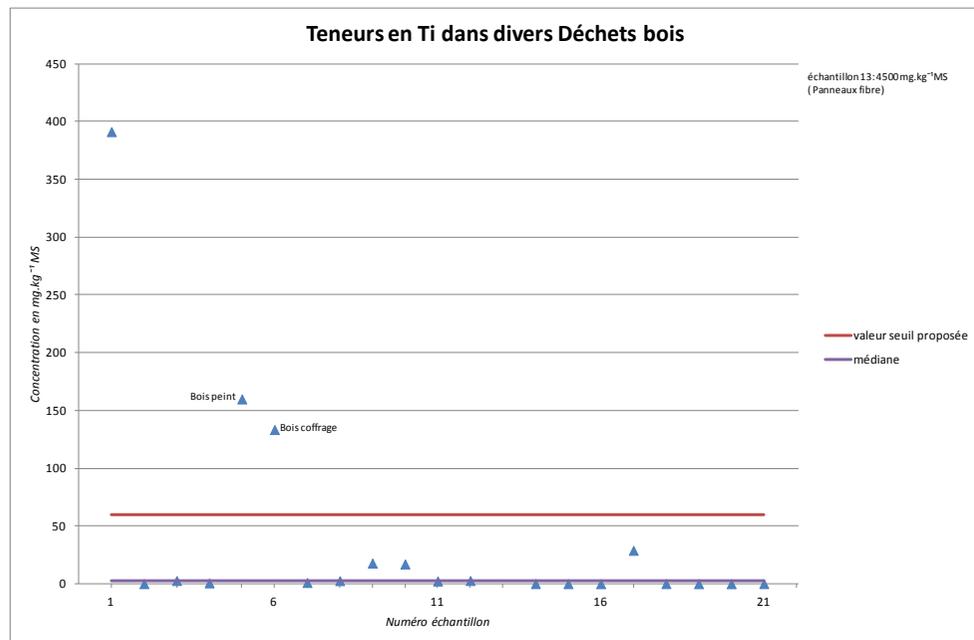
L'élément Plomb (Pb) a pu être apporté dans le bois, par une utilisation de pesticides et de peintures contenant cet élément (longtemps utilisé dans la composition des pigments blancs). Ces peintures ayant été très utilisées par le passé, le plomb est un bon indicateur de la présence dans le combustible de déchets de bois de démolition.

Lors de notre étude bibliographique, nous avons recensé 39 échantillons considérés actuellement comme des déchets de bois. Les teneurs de ces échantillons évoluent de 0,23 à 721 mg/kg MS, avec une médiane à 19,8 mg/kg MS.

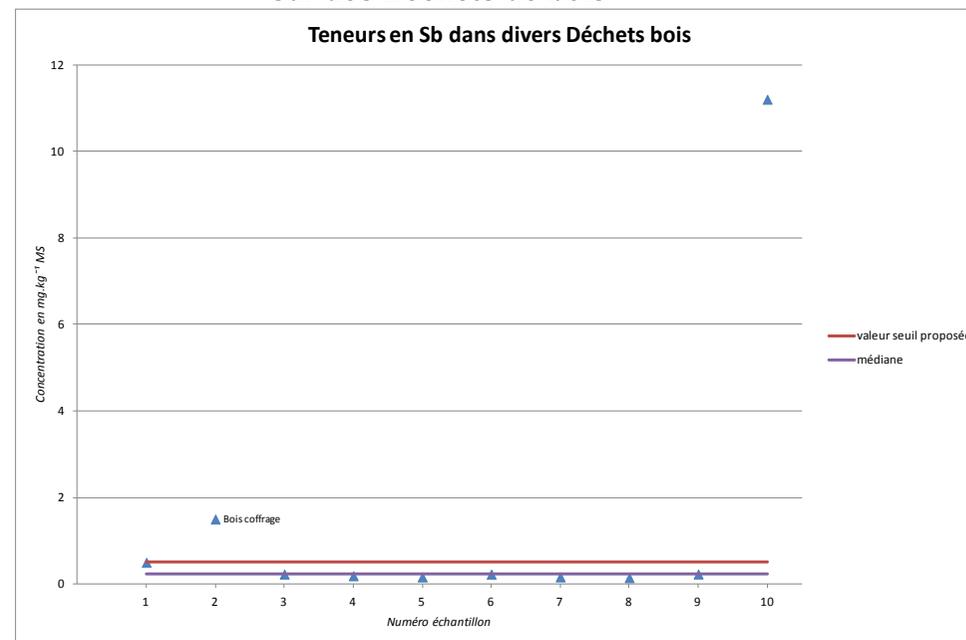
Le graphe ci-dessus permet de visualiser le positionnement de la valeur seuil proposée (8 mg/kg MS) par rapport aux teneurs rencontrées dans les différents déchets de bois. Cette valeur seuil se situe en dessous de la valeur médiane des déchets. Elle englobe seulement 41% des échantillons. Ce seuil permet d'éliminer certains déchets issus de la construction/démolition (bois peints, contre-plaqué, lamellé-collé, bois de coffrage), mais également de nombreux déchets de bois dont la nature n'est pas mentionnée dans les publications.

En l'état actuel des connaissances (teneurs en plomb dans le bois naturel et dans les déchets de bois), ce seuil nous paraît relativement bien adapté. Il pourrait être rehaussé à 20, voire 30 mg/kg MS pour récupérer des déchets de bois très faiblement contaminés ou pour se rapprocher ou se caler sur la valeur limite allemande.

## Application de la valeur seuil proposée pour le Ti sur des Déchets de bois



## Application de la valeur seuil proposée pour le Sb sur des Déchets de bois



L'élément Titane (Ti) a pu être apporté dans le bois par le biais d'une utilisation de certaines peintures, puisque le Ti est utilisé comme pigment blanc.

Lors de notre étude bibliographique, nous avons recensé 21 échantillons considérés actuellement comme des déchets de bois. Les teneurs de ces échantillons évoluent de 0,15 à 4500 mg/kg MS, avec une médiane de 2,5 mg/kg MS.

Le graphe ci-dessus permet de visualiser le positionnement de la valeur seuil proposée (60 mg/kg MS) par rapport aux teneurs rencontrées dans les différents déchets de bois. Cette valeur seuil se situe largement au-dessus de la valeur médiane des déchets. Elle englobe 81% des échantillons. Ce seuil permet d'éliminer certains déchets en l'occurrence des bois issus de la construction/démolition, tels que des panneaux fibres, de bois peints et des bois de coffrage.

En l'état actuel des connaissances (teneurs en titane dans le bois naturel et dans les déchets de bois), ce seuil nous paraît adapté.

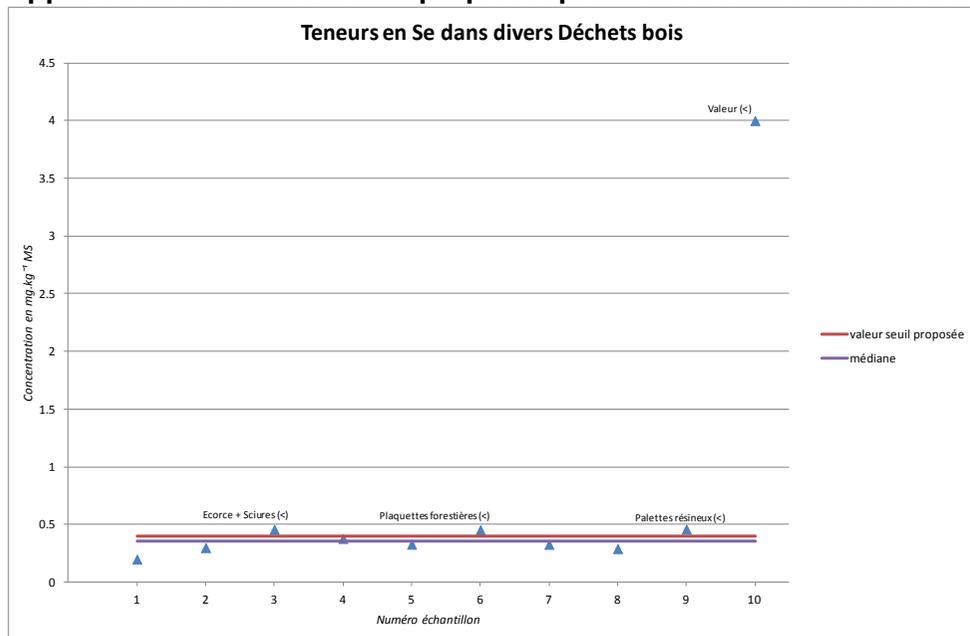
L'élément Antimoine (Sb) a pu être apporté dans le bois lors de l'utilisation de pesticides, de laques et de certaines peintures.

Lors de notre étude bibliographique, nous avons recensé 10 échantillons considérés actuellement comme des déchets de bois. Les teneurs de ces échantillons évoluent de 0,15 à 11,2 mg/kg MS, avec une médiane à 0,23 mg/kg MS.

Le graphe ci-dessus permet de visualiser le positionnement de la valeur seuil proposée (0,5 mg/kg MS) par rapport aux teneurs rencontrées dans les différents déchets de bois. Cette valeur seuil se situe au-dessus de la valeur médiane des déchets. Elle englobe 80% des échantillons. Ce seuil permet d'éliminer des bois issus de la construction/démolition.

En l'état actuel des connaissances (teneurs en antimoine dans le bois naturel et dans les déchets de bois), ce seuil nous paraît adapté. Toutefois, compte tenu que peu de déchets sont susceptibles d'être fortement contaminés par cet élément, l'intérêt de fixer une valeur limite pour cet élément est limité.

## Application de la valeur seuil proposée pour le Se sur des Déchets de bois



L'élément Sélénium (Se) a pu être apporté dans le bois par l'emploi de certaines résines, glues, pesticides et fongicides. Il est donc possible de trouver des déchets de bois ayant des teneurs en Se supérieures aux concentrations naturelles du bois.

Lors de notre étude bibliographique, nous avons recensé 10 échantillons considérés actuellement comme des déchets de bois. Des teneurs allant de 0,2 à 4  $\text{mg/kg}$  MS, avec une médiane à 0,35  $\text{mg/kg}$  MS ont été observées.

Le graphe ci-dessus permet de visualiser le positionnement de la valeur seuil proposée (0,4  $\text{mg/kg}$  MS) par rapport aux teneurs rencontrées dans les différents déchets de bois. Cette valeur seuil se situe au-dessus de la valeur médiane des déchets. Les teneurs en sélénium des échantillons se situant au-dessus de ce seuil correspondent à des limites de détection.

En l'état actuel des connaissances (teneurs en sélénium dans le bois naturel et dans les déchets de bois), ce seuil nous paraît adapté. Toutefois, compte tenu que peu de déchets sont susceptibles d'être fortement contaminés par cet élément, l'intérêt de fixer une valeur seuil pour cet élément est limité.

L'élément Etain (Sn) a pu être apporté dans le bois par une utilisation de traitements avec certains pesticides et peintures marines.

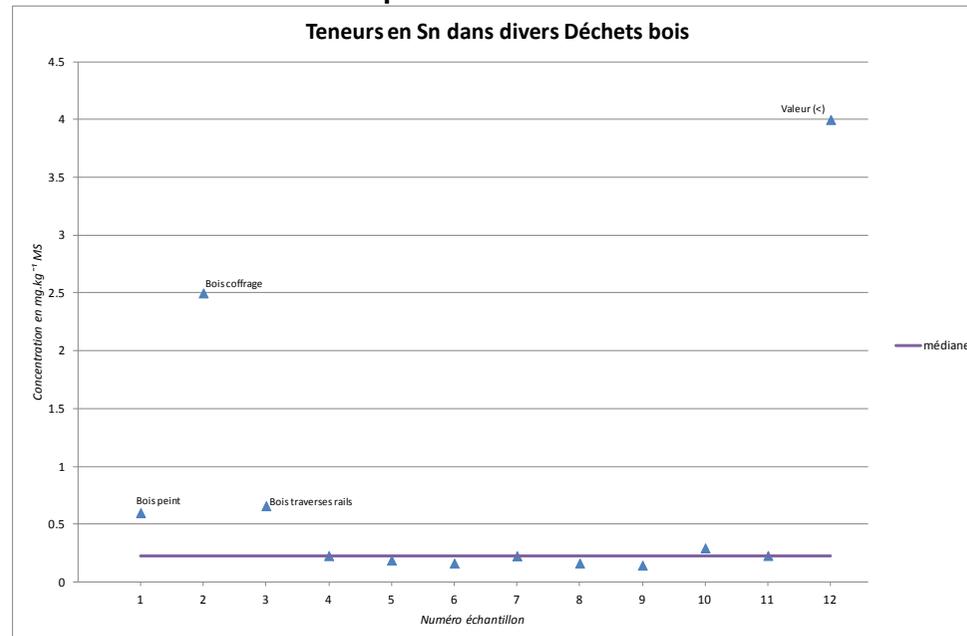
Lors de notre étude bibliographique, nous avons recensé 12 échantillons considérés actuellement comme des déchets de bois. Les teneurs de ces échantillons évoluent de 0,15 à 4  $\text{mg/kg}$  MS, avec une médiane à 0,23  $\text{mg/kg}$  MS.

Le graphe ci-dessus permet de visualiser les échantillons contenant les concentrations les plus importantes en étain : des déchets de bois issus de la construction/démolition (bois de coffrage et bois peints) et des traverses ferroviaires.

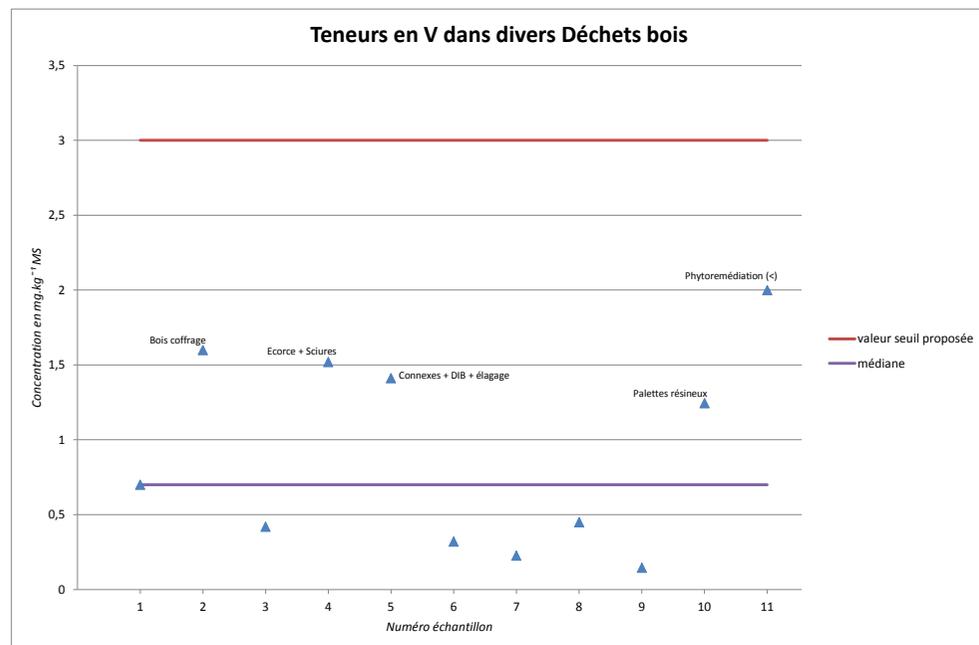
Compte tenu du faible nombre de données disponibles pour le bois naturel, aucun seuil n'a été proposé pour cet élément. A partir des données ci-dessus, une valeur seuil de 0,3  $\text{mg/kg}$  MS pourrait être proposée.

Toutefois compte tenu que peu de déchets sont susceptibles d'être fortement contaminés par cet élément, l'intérêt de fixer une valeur seuil pour cet élément est limité.

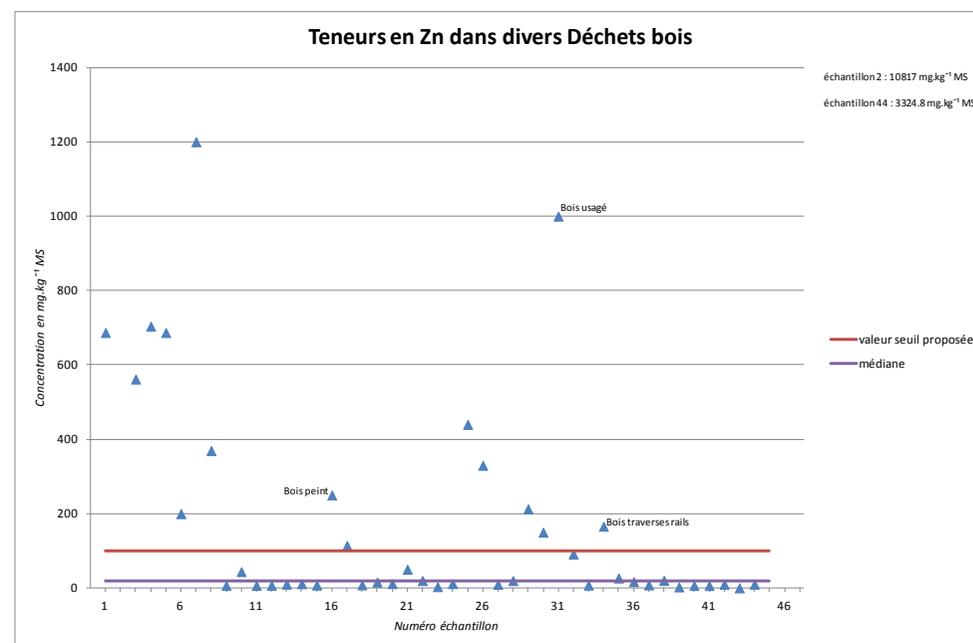
## Teneurs en Sn présent dans les Déchets de bois



## Application de la valeur seuil proposée pour le V sur des Déchets de bois



## Application de la valeur seuil proposée pour le Zn sur des Déchets de bois



L'élément Vanadium (V) a pu être apporté dans le bois via l'emploi de certaines peintures, laques, pesticides et insecticides.

Lors de notre étude bibliographique, nous avons recensé 11 échantillons considérés actuellement comme des déchets de bois. Des teneurs allant de 0,15 à 2 mg/kg MS, avec une médiane à 0,7 mg/kg MS ont été observées.

Le graphe ci-dessus permet de visualiser le positionnement de la valeur seuil proposée (3 mg/kg MS) par rapport aux teneurs rencontrées dans les différents déchets de bois. Cette valeur seuil se situe au-dessus de la valeur médiane des déchets, et rassemble la totalité des échantillons.

En l'état actuel des connaissances (teneurs en vanadium dans le bois naturel et dans les déchets de bois) et compte tenu que peu de déchets sont susceptibles d'être fortement contaminés par cet élément, l'intérêt de fixer une valeur limite pour cet élément est limité.

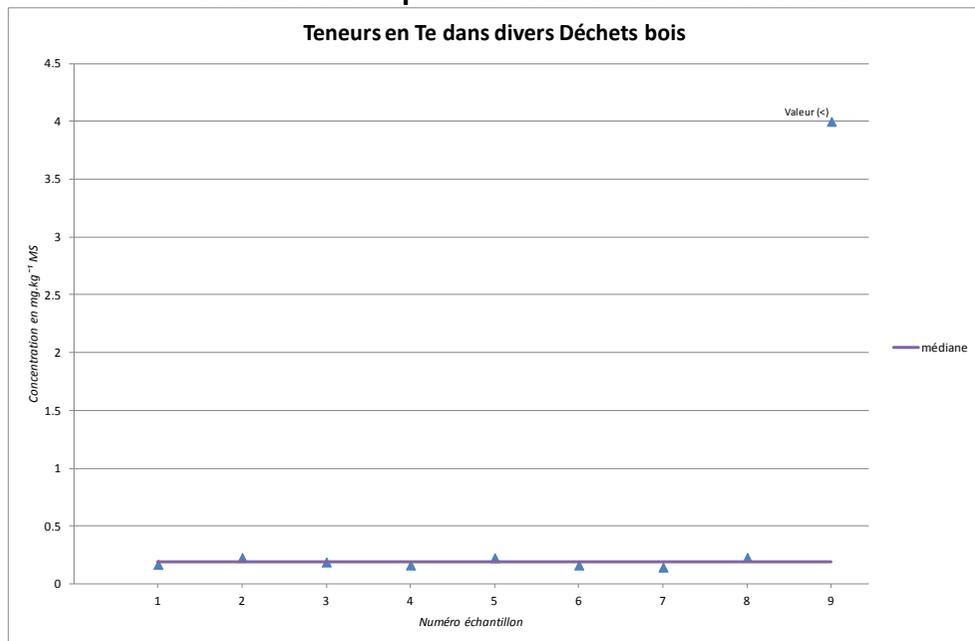
L'élément Zinc (Zn) a pu être apporté dans le bois via une utilisation de pesticides, fongicides, peintures, laques et vernis qui contiennent cet élément.

Lors de notre étude bibliographique, nous avons recensé 44 échantillons considérés actuellement comme des déchets de bois. Les teneurs de ces échantillons évoluent de 0,39 à 10817 mg/kg MS, avec une médiane à 20,7 mg/kg MS.

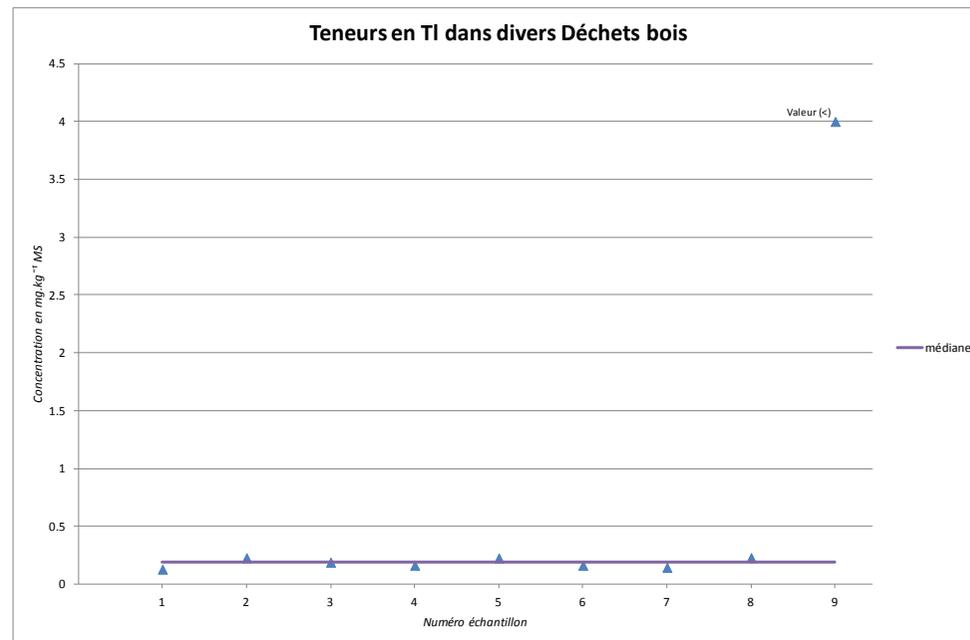
Le graphe ci-dessus permet de visualiser le positionnement de la valeur seuil proposée (100 mg/kg MS) par rapport aux teneurs rencontrées dans les différents déchets de bois. Cette valeur seuil se situe au-dessus de la valeur médiane des déchets. Elle englobe 61% des échantillons. Ce seuil a permis d'éliminer certains déchets, tels que des traverses ferroviaires, des bois peints, mais également de nombreux déchets de bois dont la nature n'est pas mentionnée dans les publications.

En l'état actuel des connaissances (teneurs en zinc dans le bois naturel et dans les déchets de bois), ce seuil nous paraît adapté. Il pourrait éventuellement être rehaussé à 200 mg/kg MS pour prendre en compte les plus fortes teneurs en zinc présentes dans les écorces et coïncider aux recommandations anglaises.

## Teneurs en Te présent dans les Déchets de bois



## Teneurs en TI présent dans les Déchets de bois



L'élément Tellure (Te) a pu être apporté dans le bois par une utilisation de traitements avec certains insecticides et fongicides. Le tellure peut également entrer dans la composition de certains pigments de peintures.

Lors de notre étude bibliographique, nous avons recensé 9 échantillons considérés actuellement comme des déchets de bois. Des teneurs allant de 0,15 à 4 mg/kg MS, avec une médiane à 0,19 mg/kg MS ont été observées.

Le graphe ci-dessus permet de visualiser les teneurs en tellure présentes dans certains déchets. Toutes ces teneurs sont très homogènes à l'exception d'un échantillon dont la teneur correspond à une limite de détection. La quasi-totalité des autres valeurs correspondent également à des limites de détection. Les teneurs en tellure restent donc relativement faibles dans les déchets de bois.

En l'état actuel des connaissances (teneurs en tellure dans les déchets de bois) et compte tenu que peu de déchets sont susceptibles d'être fortement contaminés par cet élément, l'intérêt de fixer une valeur seuil pour cet élément est limité.

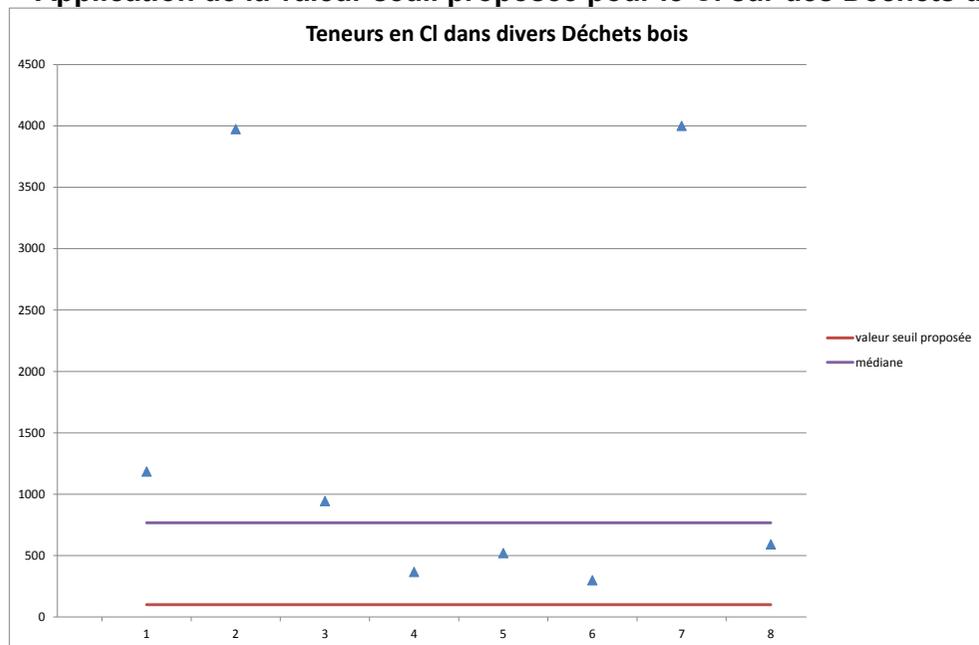
L'élément Thallium (TI) a pu être apporté dans le bois par le biais de certains pesticides, insecticides et peintures.

Lors de notre étude bibliographique, nous avons recensé 9 échantillons considérés actuellement comme des déchets de bois. Les teneurs évoluent de 0,13 à 4 mg/kg MS, avec une médiane à 0,19 mg/kg MS.

Le graphe ci-dessus permet de visualiser les teneurs en thallium présents dans certains déchets. Là encore, toutes ces teneurs sont très homogènes à l'exception d'un échantillon dont la teneur correspond à une limite de détection. La quasi-totalité des autres valeurs correspondent également à des limites de détection. Les teneurs en thallium restent donc relativement faibles dans les déchets de bois.

En l'état actuel des connaissances (teneurs en thallium dans les déchets de bois) et compte tenu que peu de déchets sont susceptibles d'être fortement contaminés par cet élément, l'intérêt de fixer une valeur seuil pour cet élément est limité.

## Application de la valeur seuil proposée pour le Cl sur des Déchets de bois



L'élément Chlore (Cl) a pu être apporté dans le bois par une utilisation d'insecticides et de fongicides. La concentration en chlore dans le combustible joue un rôle dans la formation de polluants organo-chlorés tels que les dioxines et les furanes.

Lors de notre étude bibliographique, nous avons recensé 8 échantillons considérés actuellement comme des déchets de bois. Des teneurs allant de 300 à 4000 mg/kg MS, avec une médiane à 767 mg/kg MS ont été observés.

Le graphe ci-dessus permet de visualiser les teneurs en Cl présents dans certains déchets. Les teneurs en chlore dans ces échantillons sont très supérieures à notre valeur seuil en particulier sur deux échantillons. La nature de ces déchets de bois n'est pas mentionnée dans les publications dont elles sont extraites.

Le seuil proposé 100 mg/kg MS est relativement bas par rapport aux teneurs en chlore présentes dans les déchets de bois. Il conduirait à exclure tous ces déchets. Compte tenu de ces éléments et du faible nombre de données disponibles, du faible impact des faibles teneurs en chlore sur les émissions de dioxines, ce seuil pourrait être rehaussé pour se rapprocher des valeurs limites allemandes (600 mg/kg MS), belges (600 mg/kg MS).

## Récapitulatif des données concernant les teneurs en Métaux Lourds dans les Déchets de bois

Concentration en mg.kg <sup>1</sup> MS	min	max	médiane	valeurs seuils	nombre d'échantillons
<b>Hg</b>	0,029	0,5	0,06	0,1	17
<b>As</b>	0,029	2050	2	0,7	25
<b>Ba</b>	1,2	120	15,25	50	20
<b>Cd</b>	0,042	43,5	0,22	2,2	31
<b>Co</b>	0,146	1,23	0,56	1,2	12
<b>Cr</b>	0	2357	10	17	28
<b>Cu</b>	0,201	1073	8,5	20	33
<b>Mn</b>	1,723	1955,4	67	240	15
<b>Ni</b>	0,227	11,96	0,95	6	20
<b>Pb</b>	0,227	721,6	19,8	8	39
<b>Ti</b>	0,146	4500	2,52	60	21
<b>Sb</b>	0,146	11,2	0,23	0,5	10
<b>Se</b>	0,2	4	0,354	0,4	10
<b>Sn</b>	0,146	4	0,23		12
<b>V</b>	0,146	2	0,7	3	11
<b>Zn</b>	0,386	10817	20,7	100	44
<b>Te</b>	0,146	4	0,19		9
<b>Mo</b>	0,13	1,2			3
<b>Ag</b>	0,09	20,1			2
<b>TI</b>	0,13	4	0,19		9
<b>Cl</b>	300	4000	767,5	100	8



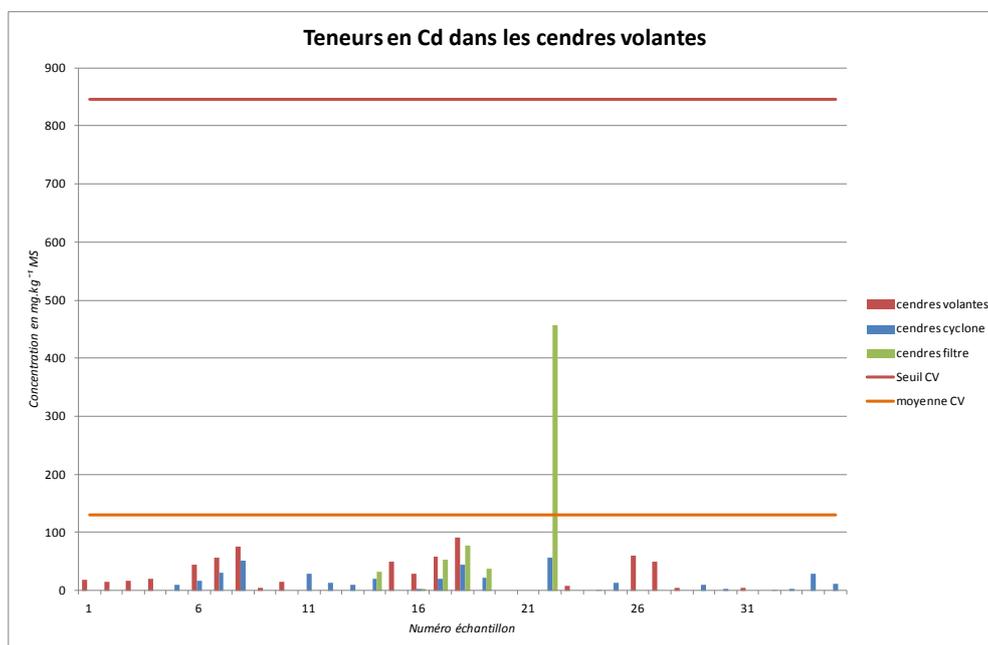
## **ANNEXE 3**

---

**Comparaison des valeurs seuils proposées en métaux et  
des teneurs mesurées dans les cendres volantes**



## Proposition d'une valeur seuil en Cd pour les cendres volantes



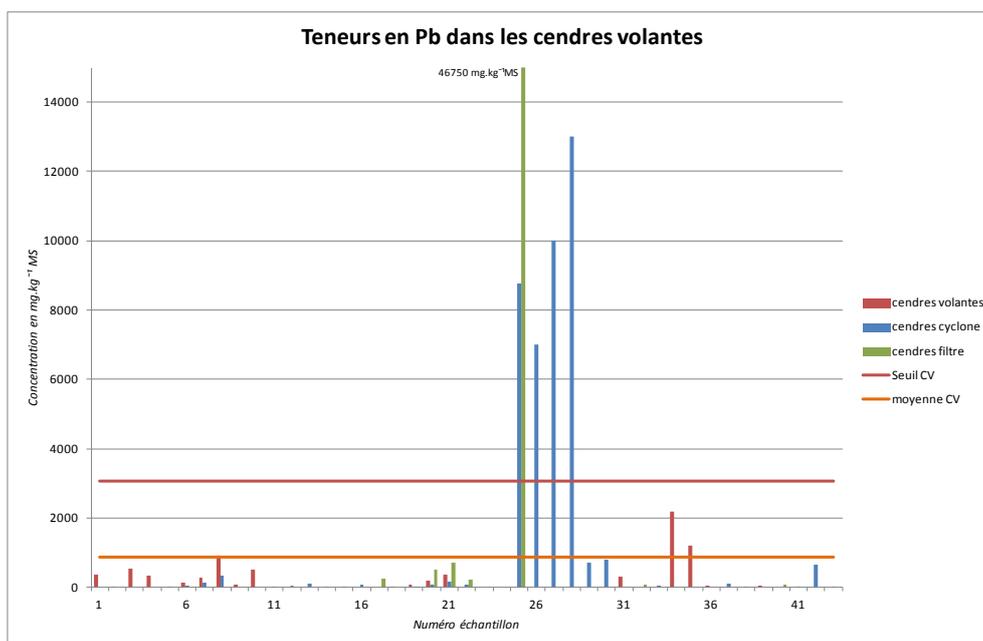
Le graphe, ci-dessus, permet de visualiser les valeurs seuil et moyenne calculées pour l'élément Cadmium (Cd) à partir de la valeur seuil du combustible et de la teneur moyenne dans le bois naturel, par rapport aux teneurs réelles mesurées dans des cendres volantes.

La valeur seuil calculée pour le Cd est de 846 mg/kg MS et la valeur moyenne est de 131 mg/kg MS. Les échantillons 1 à 19 correspondent à de la biomasse naturelle, les échantillons de 22 à 35 à des déchets de bois plus ou moins contaminés par des métaux lourds.

Aucun échantillon de déchet n'est éliminé avec la valeur seuil établie.

En cas de mélange de combustible, contaminés et naturels, la valeur seuil n'est probablement plus adaptée. L'association des valeurs seuil et moyenne crée une zone intermédiaire qui peut permettre d'identifier les sites à surveiller (cas de l'échantillon 22 dans le graphe ci-dessus).

## Proposition d'une valeur seuil en Pb pour les cendres volantes



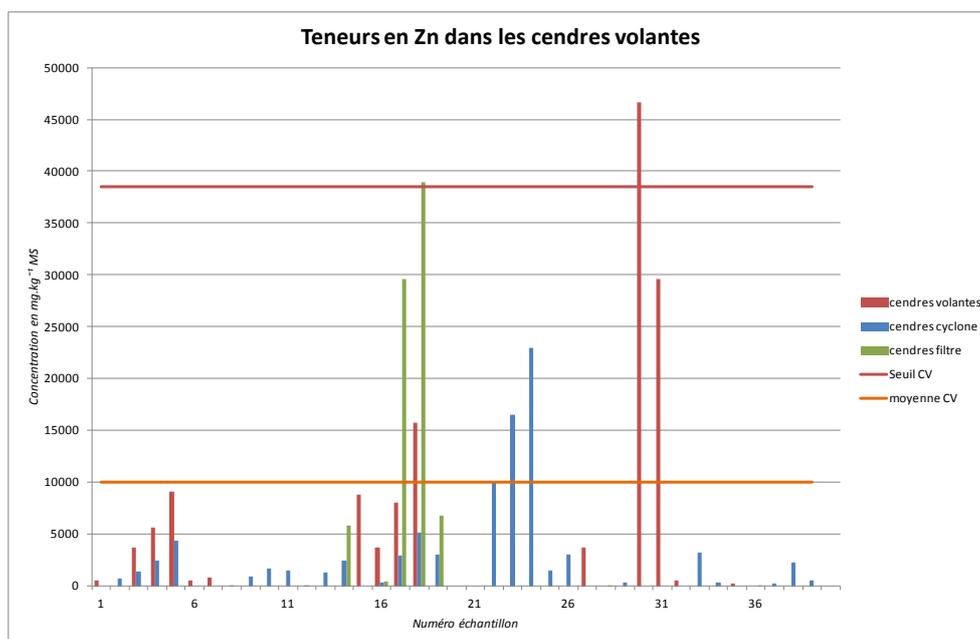
Le graphe, ci-dessus, permet de visualiser les valeurs seuil et moyenne calculées pour l'élément Plomb (Pb) à partir de la valeur seuil du combustible et de la teneur moyenne dans le bois naturel, en relation avec les teneurs réelles mesurées dans les cendres volantes.

La valeur seuil calculée pour le Pb est de 3077 mg/kg MS et la valeur moyenne est de 863 mg/kg MS. Les échantillons 1 à 22 correspondent à de la biomasse naturelle, les échantillons 22 à 35 à des déchets de bois plus ou moins contaminés.

La valeur seuil calculée permet d'éliminer les échantillons 25 à 28 correspondant à des déchets potentiellement contaminé au Pb. L'échantillon 25 est issu d'une base de données autrichienne(28), l'origine de l'échantillon est inconnue. Les échantillons 26 à 28 correspondent à des bois usagés issus d'une publication suisse(21). Il s'agit d'une étude réalisée par le ministère chargé de l'environnement suisse, sur l'utilisation des déchets de bois pour la production d'énergie.

L'utilisation de cette valeur seuil permet d'éliminer les déchets de bois contaminés. En cas de mélange de combustible, contaminés et naturels, la valeur seuil n'est probablement plus adaptée. L'association des valeurs seuil et moyenne crée une zone intermédiaire qui peut permettre d'identifier les sites à surveiller.

## Proposition d'une valeur seuil en Zn pour les cendres volantes



Le graphe, ci-dessus, permet de visualiser les valeurs seuil et moyenne calculées pour l'élément Zinc (Zn) à partir de la valeur seuil du combustible et de la teneur moyenne dans le bois naturel, par rapport aux concentrations réelles mesurées dans des cendres volantes.

La valeur seuil calculée pour le Zn est de 38461 mg/kg MS et la valeur moyenne est de 10065 mg.kg MS. Les échantillons 1 à 19 correspondent à de la biomasse naturelle, les échantillons 22 à 40 à des déchets de bois plus ou moins contaminés.

La valeur seuil établie permet d'éliminer l'échantillon 30 correspondant à un déchet susceptible d'être contaminé au Zn. Cet échantillon est issu d'une publication suédoise(49) qui étudie les stratégies de management des déchets de bois contaminés. Il faut noter aussi que pour le cas du Zn la présence d'écorces dans le combustible peut être à l'origine de plus fortes teneurs en Zn (cas des échantillons 17 et 18).

L'utilisation de cette valeur seuil permet d'éliminer les déchets de bois contaminés par les Métaux Lourds. Cependant lors d'une combustion de biomasses naturelles et de déchets de bois en mélange, la valeur seuil, seule, ne sera probablement pas appropriée. L'association des valeurs seuil et moyenne permet de créer une zone intermédiaire qui peut permettre d'identifier les sites à surveiller.