

**SERVICE PUBLIC DE WALLONIE
DIRECTION GENERALE OPERATIONNELLE DE L'AGRICULTURE,
DES RESSOURCES NATURELLES ET DE L'ENVIRONNEMENT
Département des Sols et des Déchets
Direction de la Protection des Sols**

Convention d'appui scientifique et technique

Projet CENDRES

**Etude relative à l'utilisation des cendres de
combustion de bois en agriculture et en
sylviculture**

M. Abras, J.P. Destain, V. Planchon

**En collaboration avec
B. Godden et P. Luxen (Agra-Ost),
C. Mignon (Valbiom), P. Delfosse (CRP Gabriel Lippmann)**

03/10/2013

La convention intitulée « Etude relative à l'utilisation des cendres de combustion de bois en agriculture et en sylviculture » confiée au Centre wallon de Recherches agronomiques (CRA-W) par la Région wallonne (Direction de la Protection des Sols, Département des Sols et des Déchets, DGO3) a pour objectif de réaliser un inventaire de la production des cendres en Wallonie et de caractériser ces déchets tant au niveau de la valeur agronomique que des risques de contamination. L'objectif est également d'étudier les filières de valorisation potentielles de ces cendres en agriculture et en forêt et de proposer des recommandations concernant leur utilisation sur ou dans les sols.

Ce travail a été accompli par le CRA-W mais a également fait intervenir les partenaires du projet, à savoir l'asbl AGRA-OST, l'asbl VALBIOM et le Centre de Recherche Public (CRP) Gabriel Lippmann ainsi que la DGO3. Les recherches menées ont principalement consisté en l'acquisition de données et d'informations par le biais de contact établis avec les personnes ressources mais également via des articles scientifiques ou de vulgarisation ou encore par l'intermédiaire de rapport de projet de recherches menées dans la passé en Wallonie ou à l'étranger.

La production de cendres en Wallonie est évaluée à 90 000 tonnes de cendres par an dont près de 85% provient de quatre installations de cogénération seulement (Burgo Ardennes, IBV Vielsalm, ERDA et Renogen). Ces cendres proviennent de bois d'origines différentes et se différencient par leur composition chimique. En effet, en fonction de l'origine du bois brûlé, la valeur fertilisante (ensemble des éléments fertilisants, pondérés par leur valeur en ferme et leur disponibilité) et la concentration en éléments traces métalliques (ETM) varient considérablement. Ainsi, les cendres issues d'exploitations forestières et de l'industrie du bois montrent des concentrations en ETM bien inférieures à celles provenant d'écorces ou de déchets de bois non traités.

Au cours du projet, plusieurs filières de valorisation ont été identifiées. L'utilisation de cendres pures est celle qui comporte le plus de risques, environnementaux ou sanitaires, via l'envol de poussières fines. L'utilisation en mélange avec des matières organiques conviendrait mieux aux exploitants agricoles, qui sont équipés pour de tels épandages. Le prétraitement des cendres a majoritairement été étudié dans un contexte forestier où la disponibilité des éléments fertilisants peut être plus lente que dans un contexte agricole. Enfin, l'intérêt des cendres intégrées dans la fabrication d'engrais minéraux est de pouvoir obtenir un produit final complexe (NPK et valeur neutralisante) très stable.

L'analyse économique montre que la valorisation agricole ou forestière raisonnée de cendres de bois peut présenter des avantages financiers pour l'ensemble des acteurs de la filière. La comparaison des cendres avec les différentes sources de matières fertilisantes montrent que les cendres ont tendance à apporter plus d'ETM que les engrais minéraux pour la même action neutralisante. A valeur neutralisante égale, les cendres de plaquettes et de l'industrie du bois présentent les flux en ETM les plus faibles (toutefois plus élevé que les engrais minéraux) et les cendres issues de déchets de bois les plus élevés. Avant d'envisager une valorisation sous forme d'amendement, il est recommandé de procéder à une analyse des teneurs en ETM.

Les cendres ont des propriétés fertilisantes indéniables (teneurs en P et K, valeur neutralisante) tempérées par les contaminations en ETM et CTO ne pouvant être exclues. La mise en place d'une réglementation dédiée à la valorisation des cendres de bois sur les sols agricoles ou forestiers sous forme de textes de loi pourrait largement contribuer à stimuler ce mode de valorisation.

The project entitled "Study for the use of wood ash in agriculture and forestry" entrusted to the Walloon Agricultural Research Centre (CRA-W) by the Walloon Region (DPS, DGO3) aims to make an inventory of the production of ash in Wallonia and to characterize these wastes both in terms of the agronomic value as contamination hazards. The aim is also to study the potential valorization channels of the ashes in agriculture and forestry and make recommendations regarding their use on or in the soil.

This work was done by the CRA-W in collaboration with the project partners AGRA-OST, VALBIOM and the Public Research Centre (CRP) Gabriel Lippmann.

The results of the study show that 90 000 tons of ash are produced each year in Wallonia. The chemical composition of these ashes varies depending on the origin of burned wood both for fertilizer value and trace metals concentration. Several valorization channels were identified during this project, including the use of pure ash or ash mixed with organic matters, the pre-treatment of ash for forest use or ashes incorporated in the manufacture of mineral fertilizers. Rational valorization of wood ash in agriculture or forest may represent financial benefits for the whole sector. The ashes tend to bring more trace metals than mineral fertilizer for equal neutralizing value, which is why it is recommended to conduct analyses before use on soil. The edition of legislations dedicated to the valorization of wood ash on agricultural or forest soils could contribute significantly to stimulate this method of valorization.

CHAPITRE 0. ANALYSES DE LA PRODUCTION DES CENDRES EN WALLONIE	0
--	----------

1. PREAMBULE.....	1
2. DEFINITIONS	2
2.1. LES CENDRES.....	2
2.2. LA COGENERATION.....	2
3. TEXTES DE LOI NATIONAUX ET REGIONAUX.....	3
4. IDENTIFICATION DES DIFFERENTS TYPES D'INSTALLATIONS DE COGENERATION EN WALLONIE	8
4.1. TYPES D'INSTALLATIONS	8
4.2. INVENTAIRE DES INSTALLATIONS EN WALLONIE	8
5. IDENTIFICATION DES DIFFERENTS TYPES DE MATIERES PREMIERES UTILISEES	9
5.1. ESSENCES	9
5.2. ORIGINE DU BOIS COMBUSTIBLE	10
6. DETERMINATION DES DESTINATIONS OU UTILISATIONS ACTUELLES DES CENDRES EN WALLONIE	13
7. ESTIMATION DE LA PRODUCTION DE CENDRES.....	14
8. CONCLUSION	15
9. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	16

CHAPITRE 2. CARACTERISATION DES PRODUITS AU NIVEAU DE LA VALEUR AGRONOMIQUE ET DES RISQUES DE CONTAMINATION	18
--	-----------

1. INTRODUCTION	19
1.1. OBJECTIFS	19
1.2. VALEUR NEUTRALISANTE (VN)	19
2. COMPOSITION GENERALE DES CENDRES.....	19
2.1. INTERET POUR LE SOL.....	20
2.2. CRITERES DEFAVORABLES	20
3. CARACTERISATION DES PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DES CENDRES EN FONCTION DE LEUR ORIGINE	21
3.1. ANALYSES DE CENDRES EN FONCTION DE LEUR ORIGINE	21
4. EVALUATION ET COMPARAISON DE LA VALEUR FERTILISANTE DES CENDRES EN FONCTION DE LA NATURE DES MATIERES PREMIERES.....	24
5. DETERMINATION DES RISQUES DE CONTAMINATION POTENTIELLE EN FONCTION DE L'ORIGINE ET DE LA NATURE DES MATIERES UTILISEES	25
5.1. CONCENTRATIONS EN ETM	25
6. CONCLUSION	26
7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	28

CHAPITRE 3. ETUDE DES SYSTEMES DE VALORISATION EN AGRICULTURE ET EN FORET	29
--	-----------

1. INTRODUCTION	30
1.1 OBJECTIFS.....	30
1.2 ACTIVITE POZZOLANIQUE	30
2. DESCRIPTION DES DIFFERENTES FILIERES DE RECYCLAGE/VALORISATION EXISTANTES	30
2.1 VALORISATION INDUSTRIELLE	30
2.2 VALORISATION AGRICOLE OU FORESTIERE	31
2.2.1. <i>Epandage en l'état</i>	32
2.2.2. <i>Epandage en mélange avec des matières organiques</i>	33
2.2.3. <i>Epandage après prétraitement</i>	34
2.2.4. <i>Introduction dans des engrais minéraux</i>	35
3. COMPARAISON DE LA VALEUR FERTILISANTE DES DIFFERENTS MODES DE VALORISATION	35
3.1 EPANDAGE EN L'ETAT	35
3.2 EPANDAGE EN MELANGE AVEC DES MATIERES ORGANIQUES	35
3.3 EPANDAGE APRES PRETRAITEMENT	36
3.4 INTRODUCTION DANS DES ENGRAIS MINERAUX	37
4 PROPOSITION DE MODALITES D'UTILISATION	37
4.1 37	
4.1 STOCKAGE ET PERIODES D'EPANDAGE	37
4.2 MATERIEL D'EPANDAGE.....	37
4.3 DOSES A EPANDRE	38
4.4 FILIERES DE VALORISATION	38
4.4.1. <i>Epandage en l'état</i>	38
a. <i>Cendres sèches</i>	38
b. <i>Cendres humides</i>	38
c. <i>Essais d'épandage de cendres réalisés par Agra-Ost</i>	39
4.4.2. <i>Epandage en mélange avec des matières organiques</i>	45
4.4.3. <i>Epandage après prétraitement</i>	45
4.4.4. <i>Introduction dans des engrais minéraux</i>	46
5. CONCLUSION	46
6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	47

CHAPITRE 4. ETUDE DE FAISABILITE ET ETUDE DES ASPECTS ECONOMIQUES.....	48
---	-----------

1. OBJECTIF.....	49
2. EVALUATION DE LA VALEUR D'UTILISATION (VALEUR FERTILISANTE) DES CENDRES	49
3. EVALUATION DU COÛT/BÉNÉFICE LIÉ À LA COMMERCIALISATION OU L'UTILISATION DES CENDRES..	49
4. REALISATION D'UN BILAN ENVIRONNEMENTAL DES CENDRES PAR RAPPORT A D'AUTRES SOURCES DE MATIERES FERTILISANTES	50
4.1. QUANTITE D'ETM PAR UNITE DE VALEUR NEUTRALISANTE	50
4.2. FLUX D'ETM	53
5. CONCLUSION	54
6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	58

CHAPITRE 5. ETUDE DES LIMITES DES SYSTEMES ETUDIES	58
---	-----------

1. EVALUATION DES BESOINS DES DIFFERENTS SYSTEMES DE PRODUCTION (AGRICULTURE ET FORET) .	59
2. IDENTIFICATION DES FACTEURS SOCIO-ECONOMIQUES OU REGLEMENTAIRES SUSCEPTIBLES DE FAVORISER LA VALORISATION DES CENDRES EN AGRICULTURE ET EN SYLVICULTURE	61
3. CONCLUSION	62
4. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	63

INTRODUCTION GENERALE

Dans le cadre de l'inscription dans le développement durable de l'utilisation des matières fertilisantes destinées à être épandues sur les sols agricoles et de l'étude des modalités réglementaires aux fins de protéger les sols et de prévenir les processus de contamination diffuse, le SPW, et plus particulièrement la Direction de la Protection des Sols du Département du Sol et des Déchets de la DGARNE, a confié au CRA-W une mission relative à :

- la réalisation d'une analyse de la production des cendres en Wallonie (chapitre 1) ;
- la caractérisation des produits au niveau de la valeur fertilisante et des risques environnementaux (chapitre 2) ;
- la réalisation d'une étude des systèmes de valorisation en agriculture et en forêt (chapitre 3) ;
- la réalisation d'une étude de faisabilité et d'une étude des aspects économiques (chapitre 4) ;
- la réalisation d'une étude des limites des systèmes étudiés (chapitre 5).

Le présent document constitue la synthèse des différents livrables produits dans le cadre du projet CENDRES.

Les résultats présentés sont fonction des données qui ont pu être recueillies. Les résultats sont sujets à un certain nombre d'incertitudes liées aux données qui ont pu être recueillies.

Le projet CENDRES a été réalisé en partenariat avec les asbl Agra-Ost et Valbiom ainsi qu'avec le Centre de Recherches Publiques Gabriel Lippmann.

CHAPITRE 1. ANALYSES DE LA PRODUCTION DES CENDRES EN WALLONIE

1. PREAMBULE

L'objectif général du projet CENDRES est de réaliser un inventaire de la production des cendres en Wallonie et de caractériser ces déchets tant au niveau de la valeur agronomique que des risques de contamination. L'objectif est également d'étudier les filières de valorisation potentielles de ces cendres en agriculture et en forêt et de proposer des recommandations concernant leur utilisation sur ou dans les sols.

Les cendres sont riches en calcium, en phosphore et en potassium et présentent en effet des teneurs en éléments fertilisants. Dans le contexte actuel, où les ressources essentielles pour la production alimentaire sont en grande partie d'origine non renouvelable, il est de plus en plus important de valoriser les ressources à caractère durable. Ainsi, la diminution des réserves mondiales en phosphore est une réalité à laquelle il faudra trouver une solution dans le futur. Selon Cordell (2010), *« ce n'est pas seulement la rareté physique (future) du phosphore qui est importante, ce sont aussi le manque de gestion du P (se traduisant par une faible efficacité de la mine au produit final), une rareté économique (engrais non disponibles pour tous les agriculteurs), une rareté institutionnelle (manque de gouvernance au niveau international) et une rareté géopolitique (réserves contrôlées par un nombre limité de pays, dont certains sont sujets à des tensions politiques) »*. Certains aspects permettent d'expliquer cette diminution des réserves :

- les pertes irrécupérables, dont l'érosion des sols, mais aussi les boues d'épuration, par exemple. Ces dernières sont incinérées dans plusieurs pays, mais leurs cendres, contenant du P, ne sont pas recyclées vers les sites agricoles ;
- le flux du P en retour du milieu urbain vers le milieu rural est en général en diminution, une tendance stimulée par l'urbanisation et un assainissement accru (Liu *et al.*, 2008.) ;
- la concentration du bétail par rapport à la zone environnante de terres arables est importante, mais malheureusement, dans de nombreux endroits dans le monde, il est difficile d'intégrer l'élevage et l'agriculture à des degrés appropriés, de manière à valoriser les engrais de ferme efficacement ;
- la population humaine est un facteur clé, au regard des chiffres globaux ainsi que des modèles de consommation humains. S'il n'y a aucune amélioration dans la « conversion » de l'engrais en produit alimentaire final, le changement en matière d'alimentation dans les pays en développement (vers plus de viande) va augmenter considérablement la demande pour les engrais minéraux, ce qui rendra tous les points précédents encore plus urgents.
- ces matières concernent toutes les matières organiques, qu'elles soient considérées comme des déchets, des sous-produits ou des produits. Ces matières peuvent avoir subi différents processus de transformation tels que la biométhanisation, le compostage et le séchage ou être utilisées sans transformation sur les sols. »

D'une autre côté les cendres comprennent également des teneurs en éléments traces métalliques (ETM) et en composés traces organiques (CTO) non négligeables. Il convient dès lors de prendre en compte le risque environnemental lié à la valorisation des cendres sur les sols agricoles et forestiers.

L'objectif de ce livrable est de réaliser un inventaire de la production des cendres de combustion de bois issues de la cogénération en Wallonie. Cet inventaire permettra, en plus d'estimer le gisement de cendres en Wallonie, d'identifier les différents types d'installations de production et de matières premières utilisées en cogénération ainsi que les destinations ou utilisations actuelles des cendres en Wallonie.

2. DEFINITIONS

2.1. Les cendres

Les cendres sont définies par la FAO (2012) comme le résidu obtenu par la combustion d'un combustible. Il est précisé que selon la qualité de la combustion, les cendres peuvent encore contenir des combustibles. Les cendres totales sont considérées comme la masse de résidus inorganiques obtenus après combustion d'un combustible dans des conditions données. Cette valeur est habituellement exprimée en pourcentage de la masse de matière sèche contenue dans le combustible.

2.2. La cogénération

La CWaPE définit la cogénération comme la production simultanée, dans un seul processus, d'énergie thermique et électrique et/ou mécanique (Décret, art. 2, 2°bis).

D'après Marchal (2004), le principe de cogénération peut se décrire de manière synthétique de la manière suivante : *« un générateur de chaleur (chaudière alimentée à partir de bois déchiqueté, d'écorces, liqueur noire, ...) fournit de l'énergie thermique à un fluide de travail (eau, fluide thermique ou air). Celui-ci est injecté dans une machine qui convertit cette énergie thermique en énergie mécanique et permet la mise en rotation d'un arbre entraînant un alternateur pour produire de l'électricité ».*

L'arrêté ministériel du 1er juin 2004 déterminant les procédures et le Code de comptage applicable en matière de mesures de quantité d'énergie définit les termes suivants :

- puissance installée (P_{inst} , kWél) : puissance maximale de l'installation (...) basée sur les données du constructeur ;
- puissance électrique nette développable (P_{end} , kWél) : puissance électrique générée par l'installation de production avant transformation éventuelle vers le réseau, obtenue en déduisant la puissance moyenne des équipements fonctionnels de l'installation de la puissance maximale réalisable ;
- puissance thermique nette valorisée (P_{qnv} , kWth) : puissance thermique générée par l'installation de production, déduction faite de la puissance moyenne des équipements fonctionnels de l'installation, et valorisée « en bon père de famille ».

3. TEXTES DE LOI NATIONAUX ET REGIONAUX

Les cendres sont considérées comme des déchets, et à ce titre, figurent dans l'AGW du 10 juillet 1997, établissant un catalogue des déchets.

Les rubriques concernées sont détaillées dans le Tableau 1.

L'article 2 du décret relatif aux déchets du 27 juin 1996 modifié par le décret du 10 mai 2012 transposant la Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives définit les différents déchets pouvant être rencontrés, notamment les déchets dangereux cités dans le Tableau 1 :

- l'article 2, 1° définit un déchet comme « Toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire » ;
- l'article 2, 5° définit les déchets dangereux comme « tout déchet qui possède l'une ou plusieurs des caractéristiques énumérées par le Gouvernement conformément aux prescriptions européennes en vigueur et qui de ce fait représente un danger spécifique pour l'homme ou pour l'environnement ».

L'article 1, 2° de ce décret (instaure explicitement une hiérarchie dans les modes de gestion suivants : Prévention – Préparation en vue de la réutilisation – Recyclage – Autre forme de valorisation, notamment énergétique – Elimination.

Les cendres sont des déchets dont on peut difficilement prévenir l'apparition et qu'il faut donc gérer soit par, réutilisation, recyclage, valorisation ou élimination (Lerat, 2012).

Tableau 1. Codes wallons des déchets relatifs aux cendres issues de la production d'énergie renouvelable.
Source - Arrêté du Gouvernement wallon du 10 juillet 1997 établissant un catalogue des déchets tel que modifié par l'Arrêté du Gouvernement wallon du 7 octobre 2010. Les rubriques soulignées concernent les types de déchets qui peuvent être générés par la combustion du bois.

Code wallon des déchets	Intitulé	Déchets dangereux	Déchets organiques biodégradables ou non biodégradables (NB)
<u>10 01 01</u>	<u>Mâchefers, scories et cendres sous chaudière (sauf cendres sous chaudière visée à la rubrique 10 01 04).</u>		<u>NB</u>
10 01 02	Cendres volantes de charbon.		NB
<u>10 01 03</u>	<u>Cendres volantes de tourbe et de bois non traité.</u>		<u>NB</u>
10 01 04	Cendres volantes et cendres sous chaudière d'hydrocarbures.	X	NB
10 01 13	Cendres volantes provenant d'hydrocarbures émulsifiés employés comme combustibles.	X	NB
10 01 14	Mâchefers, scories et cendres sous chaudière provenant de la coïncinération contenant des substances dangereuses.	X	NB
10 01 15	Mâchefers, scories et cendres sous chaudière provenant de la coïncinération autres que ceux visés à la rubrique 10 01 14.		NB
10 01 16	Cendres volantes provenant de la coïncinération contenant des substances dangereuses.	X	NB
10 01 17	Cendres volantes provenant de la coïncinération autres que celles visées à la rubrique 10 01 16.		NB
<u>19 01 13</u>	<u>Cendres volantes contenant des substances dangereuses.</u>	<u>X</u>	<u>NB</u>
<u>19 01 14</u>	<u>Cendres volantes autres que celles visées à la rubrique 19 01 13.</u>		<u>NB</u>
<u>19 01 15</u>	<u>Cendres sous chaudière contenant des substances dangereuses.</u>	<u>X</u>	<u>NB</u>
<u>19 01 16</u>	<u>Cendres sous chaudière autres que celles visées à la rubrique 19 01 15.</u>		<u>NB</u>

Par ailleurs, en Région wallonne, la valorisation de "déchets" organiques – autres que les boues – est régie par l'Arrêté du Gouvernement wallon du 14 juin 2001 favorisant la valorisation de certains déchets. Ainsi, une personne/société qui désire valoriser en Wallonie :

- un déchet organique repris en annexe I de l'AGW du 14 juin 2001 selon un mode d'utilisation non repris dans cette annexe ;
- un déchet organique non dangereux non repris en annexe I de l'AGW du 14 juin 2001 ;

doit être titulaire d'un enregistrement (délivré par la Région wallonne et généralement valable pour une période de 10 ans), d'un certificat d'utilisation (délivré par la Région wallonne et généralement valable pour une période de 3 ans) et d'une dérogation pour la commercialisation des engrais, des amendements de sol et des substrats de culture (délivrée par Service public fédéral, Santé publique, Sécurité de la chaîne alimentaire et Environnement sur base de l'arrêté royal du 7 janvier 1998 relatif à la commercialisation des engrais, des amendements de sols et des substrats de culture).

L'article 13 de l'AGW du 14 juin 2001 sert de base à la procédure d'octroi des certificats d'utilisation et des enregistrements.

Sur base des informations actuellement disponibles, le SPF Santé publique et le Département du Sol et des Déchets ont adopté les positions suivantes :

- les cendres sont susceptibles d'être valorisées en agriculture;
- la valorisation directe des cendres n'est pas envisageable dans l'état actuel des connaissances ;
- chaque dossier est traité au cas par cas (vu les caractéristiques fort variables des cendres);
- seules les cendres issues de la combustion de matières naturelles (à démontrer !) non contaminées sont susceptibles d'être valorisées en agriculture;
- seules les cendres issues de la combustion de bois non traités sont susceptibles d'être valorisées en agriculture ;
- seules les cendres de fond sont susceptibles d'être valorisées en agriculture;
- les cendres sont susceptibles d'être utilisées dans la production d'engrais NPK, ou dans l'enrichissement de composts (conformité avec le Permis d'Environnement et le certificat d'utilisation);
 - ✓ pour autant que les teneurs des cendres en éléments nutritifs P et K soient de minimum de 3% ;
 - ✓ pour autant que la finesse minimale des cendres soit de 75% à 1 mm et 99% à 2mm ;
 - ✓ le taux maximal d'incorporation des cendres dans les engrais NPK est fixé au cas par cas (en fonction de la dose, de la teneur en P et K et des teneurs en métaux lourds) ;
- les cendres sont susceptibles d'être compostées (conformité avec le Permis d'Environnement et le certificat d'utilisation);
 - ✓ pour autant que la teneur en matières organiques des cendres soit d'au moins 30% ;

- ✓ le taux maximal d'incorporation des cendres dans les composts est de 5% dans l'optique de l'introduction dans le processus de production du compost et est fixé au cas par cas dans l'optique d'un enrichissement;
- les cendres ne présentant comme éléments fertilisants que du Ca, dans l'état actuel des connaissances, ne sont pas autorisées à être valorisées directement comme engrais/amendements calcaires;
- les cendres doivent respecter les normes en métaux lourds B2 ;
- Les cendres doivent être reprises, dans le permis d'environnement et dans le certificat d'utilisation, comme déchet autorisé à entrer dans le processus de production;
- Les cendres doivent être analysées avant d'entrer dans le processus de production.

Le Tableau 2 reprend les teneurs maximales en ETM des matières recyclables des classes dites « A », « B1 » et « B2 ». Ces normes ne sont pas édictées dans un Arrêté du Gouvernement wallon. Ce sont des normes « administratives » et elles sont reprises, le cas échéant, dans les Arrêtés ministériels accordant certificat d'utilisation sur base de l'article 13 de l'AGW du 14/06/2001 favorisant la valorisation de certains déchets. La norme dite « B2 », fait référence à l'annexe 1A de l'Arrêté du Gouvernement wallon du 12 janvier 1995, portant réglementation de l'utilisation sur ou dans les sols des boues d'épuration ou de boues issues de centres de traitement de gadoues de fosses septiques. Les valeurs maximales en Cadmium et en Mercure ont été revues à la baisse (Ghysel, 2011).

Les matières de qualité A et les boues de qualité B1 doivent provenir de processus dont la traçabilité en amont est complète (Lepoint, 2013).

Tableau 2. Valeurs limites de concentration en éléments traces métalliques autorisées dans les matières recyclables en classe A et B. Les valeurs entre parenthèses ont été revues à la baisse.

CLASSE	A	B	
SOUS-CLASSE		B1	B2
Eléments traces métalliques	Valeurs limites (mg/kg MS)		
Antimoine (Sb)	2		
Arsenic (As)	10	20	-
Cadmium (Cd)	0,75	1.5	(10) 5
Chrome (Cr)	50	100	500
Cuivre (Cu)	35	100	600
Cobalt (Co)	20	-	-
Mercure (Hg)	0,25	1	(10) 5
Molybdène (Mo)	2,5	-	-
Plomb (Pb)	70	100	500

Nickel (Ni)	25	50	100
Zinc (Zn)	150	400	2000

Les certificats d'utilisation imposent des analyses en micropolluants organiques non prévues dans l'AGW du 12/01/1995. Les valeurs limites de concentration en composés traces organiques autorisées dans les matières recyclables en classes A et B sont reprises dans le **Tableau 3** (Ghysel, 2011).

Tableau 3. Teneurs maximales en composés traces organiques dans les matières recyclables en classes A et B.

Classe	A	B	
Sous-classe		B1	B2
Composés traces organiques	Valeurs limites mg/kg MS		
Hydrocarbures monocycliques aromatiques (MAH = BTEX+STYRENE) - totaux	1	5	10
Hydrocarbures polycycliques aromatiques (PAH) - 6 Borneff - totaux (16)	1 2	3 5	6 10
PCB	0,03	0,15	0,5
Hydrocarbures aliphatiques (C9 → C40)	150	500	1000
Hydrocarbures aliphatiques halogénés	0,03	0,1	
Pesticides	0,3	1	
Chlorobenzènes	0,3	1	
Chlorophénols	0,3	1	
Cyanures - libre - totaux	1 5	3 15	
EOX	0,3	5	
AOX	50	250	
LAS	500	1500	
DEHP (phtalate)	20	50	
NPE	10	25	

4. IDENTIFICATION DES DIFFERENTS TYPES D'INSTALLATIONS DE COGENERATION EN WALLONIE

4.1. Types d'installations

D'après Marenne (2006), trois grands types d'installations de cogénération sont utilisés et se distinguent sur base de la technologie mise en œuvre (turbine à vapeur, turbine à gaz et moteur à explosion), du combustible utilisé ainsi que de leur taille.

Pour les installations alimentées au bois en Wallonie, cependant, seuls les turbines à vapeur et les moteurs sont utilisés. On distingue au sein de ces derniers le moteur à vapeur et le groupe gazo-électrogène (appelé plus simplement gazogène). De plus, parmi les turbines à vapeur, l'asbl COGENSUD (2009) fait la différence entre les turbines à condensation et à contrepression.

La **turbine à vapeur** semble être, actuellement, le système le plus utilisé pour la cogénération alimentée à la biomasse. De la vapeur (haute pression, quelques dizaines de bars) est produite dans une chaudière puis détendue dans la turbine dont l'arbre fournit le travail moteur (production d'électricité). Un condenseur permet, grâce à une source froide, de condenser totalement la vapeur. Une pompe redonne au fluide la pression qu'il avait à l'amont de la turbine. On distingue les turbines à contrepression et les turbines à condensation, les deux types de turbines pouvant également être combinés. Les puissances vont de 100 kWél à 10 MWél pour des rendements électriques de 10 à 25%.

Dans le **moteur à vapeur**, de la vapeur (haute pression) est produite dans une chaudière puis détendue dans le moteur à vapeur, permettant la mise en rotation du rotor d'alternateur et la production d'électricité. La vapeur détendue est dirigée vers un condenseur où elle retourne à l'état liquide en échangeant sa chaleur latente de vaporisation avec l'eau d'un réseau de chauffage. La gamme de puissances s'étend de 120 kWél à 1,5 MWél. La valeur des rendements électriques va de 15 à 20%.

Le **gazogène**, quant à lui, est un appareil qui transforme un combustible solide (le bois) en un combustible gazeux, par décomposition thermique du combustible en présence d'un gaz réactif. Le gaz produit est refroidi et traité dans un laveur avant d'être brûlé dans le moteur du groupe de cogénération. L'électricité produite peut être utilisée localement ou envoyée sur le réseau. La chaleur produite (récupérée sur le laveur, le moteur et les gaz d'échappement) peut alimenter un procédé industriel ou des installations de chauffage. Le rendement électrique est d'environ 25% (Marchal, 2004).

Les moteurs sont bien adaptés aux applications de petites tailles pour chauffer des locaux ou de l'eau sanitaire comme dans le secteur tertiaire (hôtels, hôpitaux, piscine, etc.). *A contrario*, les turbines à vapeur ne se justifient que dans le cas de machines de moyenne ou de forte puissance, notamment dans l'industrie du bois (Marenne, 2006).

4.2. Inventaire des installations en Wallonie

Suite à une question écrite posée par Monsieur Edmund Stoffels (2012), Député wallon, à Monsieur Jean-Marc Nollet, Ministre du Développement durable et de la Fonction publique, celui-

ci répondait que, d’après les informations du facilitateur biomasse-entreprises arrêtées en avril 2012, « la Wallonie compte actuellement dix installations de cogénération alimentées en bois permettant de générer environ 1 500 GWh d’énergie thermique et 800 GWh d’énergie électrique ».

Il est important de préciser que ce total ne prend en compte que les installations certifiées par la CWaPE et que deux installations wallonnes n’y sont pas reprises. Par ailleurs, depuis lors, l’Université de Liège s’est également dotée d’une installation de cogénération certifiée et acceptée par la CWaPE (2012), portant ainsi ce total à treize.

Le Tableau 4 détaille l’ensemble des installations de cogénération alimentées en bois en Wallonie, classées par type d’installation.

Tableau 4. Nombre et puissances des installations de cogénération alimentées en bois classées par type et répertoriées en 2012 en Wallonie. Sources : COGENSUD (2009) et CWaPE (2012).

Type d'unité		Nombre d'unités	Puissance électrique nette développable (Pend, kWél)	Puissance thermique nette valorisée (Pqnv, kWth)
Moteur	- gazogène	4	4518	6087
	- à vapeur	1	178	1525
Turbine à vapeur	- à condensation	7	40320	78081
	- à contrepression et à condensation	1	55000	103381
Total		13	100016	189074

Il est important de préciser que la cogénération n’est pas la seule méthode à utiliser le bois comme combustible. En plus de ces installations de cogénération, il est utile de mentionner que les industries de production de chaleur seule (contrairement aux installations de cogénération, qui produisent simultanément de l’électricité et de la chaleur) représentent une puissance totale installée de 86 MWth en milieu industriel (Hulot, 2012). De plus, Electrabel a converti en 2005 l’unité de la centrale des Awirs fonctionnant au charbon en unité « biomasse » alimentée en pellets (Pieret, 2010) et développant une puissance de 80 MWél (Pend) (CWAPE, 2012).

5. IDENTIFICATION DES DIFFERENTS TYPES DE MATIERES PREMIERES UTILISEES

5.1. Essences

Les essences de bois utilisées en cogénération sont très variées et le plus souvent utilisées en mélange. Les recherches menées à ce sujet montrent que le choix des matières premières vient en premier lieu de la possibilité de valoriser des sous-produits ou des déchets issus de l’activité principale ou de profiter de déchets récupérables (récupération de bois de parcs à conteneurs, de déchets verts ou de déchets d’industries voisines). Ainsi, l’installation Gazebois de la commune de Tournai, en plus de valoriser les déchets de bois issus du patrimoine arboré de sa commune ainsi que de petites communes rurales voisines, brûle également les déchets verts de talus d’autoroute,

de bois venant des entrepreneurs de jardin ainsi que du bois venant de la promotion auprès des agriculteurs du taillis à très courte rotation (TtCR) (Valbiom, 2007). A d'autres échelles, l'installation d'IBV Vielsalm valorise les sous-produits forestiers issus de son activité de scierie (Le Soir, 2009) et celle de l'Université de Liège fonctionne uniquement avec des pellets (ULg, 2011).

L'essence du bois influence pourtant la composition des cendres. Ainsi, tel que précisé par Hébert et Breton en 2008, la variabilité en éléments fertilisants et éléments traces des cendres est influencée par la teneur en eau, le degré de brûlage et le type de bois brûlé. Selon plusieurs auteurs cités par Demeyer (2001), les propriétés des cendres de bois dépendent également de la partie brûlée (écorce, bois, feuilles), du type de déchets (bois, pâte à papier ou résidus de papier), de la combinaison avec d'autres combustibles, du type de sol et du climat ainsi que des conditions de combustion, de collecte et de stockage (Etiegni et Campbell, 1991; Ulery *et al.*, 1993; Someshwar, 1996). Cependant, l'étude de valorisation des cendres de chaufferie bois réalisée par l'ADEME en France en 2001 démontre que l'essence du bois n'influencerait qu'assez peu la composition des cendres, au contraire de la qualité de la combustion : *« L'essence du bois semble avoir une influence moins importante que prévue (par la littérature, NDA), en effet les compositions chimiques des cendres de plaquettes (issues de feuillus et de résineux) sont assez similaires. La différence dans les teneurs en imbrûlés provient plutôt de la qualité de la combustion. La variabilité des cendres, en terme de composition chimique et de valeur agronomique, est effectivement forte mais pour des combustibles d'origine différente (biomasse, déchets de scierie, déchets bois) »*. De plus, cette étude démontre également l'influence du mode d'extraction des cendres (extraction sèche ou humide) sur la composition minéralogique. L'extraction humide conduit à un lavage et à une modification minéralogique des cendres. L'extraction humide des cendres induit une présence importante de Ca(OH)_2 (hydratation de la chaux vive CaO). Du fait de ce lavage, les concentrations en phases solubles sont moins importantes et les phases minéralogiques sont mieux identifiées.

Les propriétés physico-chimiques des cendres varient également en fonction du type de cendres (cendres de fond et cendres volantes). Deux sortes de cendres de bois sont en effet produites durant la combustion (Narodoslawsky and Obernberger, 1996). Les cendres de fond, riches en charbons de bois et en matières organiques non brûlés contiennent de faibles niveaux d'éléments nutritifs disponibles et d'oligo-éléments. Les cendres volantes, généralement gris clair, ont une plus grande teneur en oligo-éléments. Etant donné que la plupart de ces oligo-éléments sont concentrés dans la fraction des cendres volantes, l'utilisation de la cendre de fond réduit le risque de contamination par les métaux lourds (Omil *et al.*, 2007). Les composés les plus volatiles tels que K, Na, S et Cl se retrouvent principalement dans les cendres volantes. Les cendres volantes se distinguent des cendres de fond par une granulométrie plus fine (0,1 mm de diamètre) et des teneurs plus élevées en métaux lourds (Stahl *et al.*, 2010) car ces derniers se fixent essentiellement sur les poussières fines des fumées (particulièrement Zn, Cd et Pb).

5.2. Origine du bois combustible

Il semble donc plus important de s'intéresser à l'origine du combustible. Il apparaît qu'une grande partie du bois combustible utilisé en cogénération en Wallonie provient de la filière bois et ses produits connexes. D'après Crehay et Marchal (2004), cette filière peut se résumer de la manière suivante :

- production biologique (bois sur pied, y compris « bois agricole ») ;
- exploitation forestière ;
- industries de la première transformation du bois (scieries, entreprises de déroulage, etc.) ;
- industries de la seconde transformation (menuiseries, fabriques de panneaux, etc.) ;
- bois de rebut ou bois en fin de vie (issus de la récupération de déchets ; ex. palettes).

Chacune de ces étapes génère l'apparition d'autres produits, parfois appelés « déchets », mais on leur préfère généralement le vocable « produits connexes », « co-produits » ou encore « sous-produits ». Le Tableau 5 reprend, de manière simplifiée, les principales étapes de la filière bois et les sous-produits qui en découlent. Les sous-produits peuvent être utilisés autrement que pour la production d'énergie, comme la sciure qui entre fréquemment dans la fabrication de pellets au sein des entreprises. Celles-ci développent d'ailleurs parfois leur propre unité de cogénération en vue de sécher les produits qui entreront dans la fabrication de pellets. Les entreprises sont ainsi doublement gagnantes, par la valorisation de leurs sous-produits et de la totalité de la chaleur produite par la cogénération.

Tableau 5. Principaux produits connexes de la filière bois (d'après Crehay et Marchal, 2004).

Etape	Produits connexes
Exploitation forestière	Sciures, copeaux, écorces, plaquettes, chutes diverses
Industries de la première transformation	Écorces, sciures, plaquettes, chutes diverses
Industries de la seconde transformation	Copeaux, sciures, chutes diverses
Bois de rebut	Plaquettes

Ceci constitue les étapes « classiques » de la filière bois auxquelles il convient d'ajouter l'entretien des bords de route ou des bordures de voies de chemin de fer ainsi que les haies ou les arbres isolés qui peuvent produire des quantités non négligeables de bois.

Les produits connexes présentent des caractéristiques bien distinctes en fonction de leur origine. Elles se traduisent en termes de granulométrie, de pureté ou encore de taux d'humidité.

De plus, Mivière (2008) et Ponette (2007) détaillent ces différentes formes de combustibles de la façon suivante :

- plaquettes forestières : issues du déchiquetage de sous-produits forestiers et comprenant (plaquettes vertes) ou non (plaquettes grises), des écorces ainsi que des feuilles ou des aiguilles :
 - ✓ rémanents de coupe et houppiers laissés sur site après exploitation ;
 - ✓ des bois de petits diamètres issus de dépressage ou d'éclaircies déficitaires ;
 - ✓ des bois dépréciés (bois secs, brûlés, tordus, etc.).

Les plaquettes grises peuvent également venir du déchiquetage en industrie de bois non écorcé.

Le taux de cendres varie, selon la proportion de feuilles ou d'aiguilles entre 1,5 et 3%.

- combustibles issus des industries du bois ou plaquettes blanches : issues du déchiquetage de sous-produits des industries du bois :
 - ✓ les chutes très grossières (culots de grumes, bouts de tiges) ;
 - ✓ les chutes courtes (copeaux, sciures, ...) ;
 - ✓ les chutes longues (dosses, délignures, noyaux de déroulage, casses de fabrication de cagettes...).

NB : dans le cas du déchiquetage de casses de cagettes, malgré le système de déferrailage, on va avoir la présence de corps étrangers (agrafes métalliques) qui se retrouveront dans les cendres et seront un frein à leur valorisation. Comme en compostage, une élimination magnétique des métaux ferreux peut être envisagée.

Le taux de cendres varie, selon la proportion d'écorce entre 0,8 et 1,5%.

- combustibles issus des déchets de bois (bois de rebut non traités) : issus du déchiquetage de bois en fin de vie comprenant uniquement du bois ou du bois et des corps étrangers. Trois grandes catégories de bois sont distinguées :
 - ✓ les palettes broyées non traitées,
 - ✓ les bois de déchetterie non traités
 - ✓ les bois de démolition non traités ou de DIB (déchet industriel banal).

Ces bois broyés peuvent présenter des pièces métalliques, des clous, voire même d'autres corps qui vont nécessiter des équipements spécifiques au niveau de l'installation bois. En effet, ces matériaux difficiles à éliminer totalement peuvent éventuellement poser des problèmes lors de la combustion et créer des mâchefers.

Le taux de cendres varie, selon la proportion de corps étrangers, entre 0,8 et 3%.

- granulés de bois ou pellets : issus du compactage de sciures de bois préalablement séchées, et à destination des poêles et chaudières à granulés.

Le taux de cendres varie entre 0,4 et 1%.

- écorces : issues du déchiquetage d'écorces récoltées au niveau des industries du bois.

Le taux de cendres varie entre 4 et 10%.

Un autre combustible utilisé par une des installations présentes en Wallonie est la liqueur noire, obtenue lors de la fabrication industrielle de la pâte à papier de type chimique durant laquelle la cellulose est extraite du bois dans un cuiseur par dissolution de la lignine à l'aide d'agents chimiques. En fin de cuisson, la cellulose est récupérée sous la forme d'une pâte, tandis que la lignine mélangée aux agents chimiques constitue la liqueur noire (Marchal, 2004).

Les déchets de bois sont habituellement classés en trois types (SITA, 2009) tels que décrits dans le Tableau 6.

Tableau 6. Types de déchets de bois et caractéristiques.

Type	Déchets de bois	Caractéristiques
A	planches, palettes, etc.	bois entier non traité
B	portes, armoires, panneaux de fibres de bois, etc.	bois en mélange
C	traverses de chemin de fer	bois lourdement traité ou imprégné

Le Tableau 7 détaille les origines des combustibles utilisés par les 13 unités de cogénération installées en Wallonie.

Tableau 7. Classement des installations de cogénération par origine du bois combustible.

Origine ou type de combustible	Unité de cogénération
Exploitation forestière et industrie de la première transformation	IBV, ERDA, Renogen, ETA Le Saupont, Secoboïs, commune de Gedinne
Industrie de la seconde transformation	Radermecker
Pellets	ULg
Bois de rebut	Moulin Schyns, Valorbois
Bois de parc à conteneurs (bois de type B)	Recybois
Sous-produits de papeterie (liqueur noire)	Burgo Ardennes
Entretien d'espaces verts, entrepreneurs de jardin, TtCR ¹ , talus d'autoroute	Gazenbois

6. DETERMINATION DES DESTINATIONS OU UTILISATIONS ACTUELLES DES CENDRES EN WALLONIE

Bien que les cendres soient susceptibles d'être valorisées en agriculture, soit en rentrant dans la composition d'un engrais complexe (NPK, calco-magnésien), soit via l'enrichissement d'un compost, tout en respectant plusieurs conditions (voir point 1.3), les modes de valorisation actuels des cendres se résument principalement à des utilisations dans les cimenteries ou les remblais routiers. La plupart des unités de cogénération éliminent cependant leurs cendres en centre d'enfouissement technique (C.E.T.) (Lerat, 2012 et Hulot, 2012).

¹ Taillis à très courte rotation : culture énergétique (saule, peuplier) parfois utilisée comme combustible en cogénération.

7. ESTIMATION DE LA PRODUCTION DE CENDRES

L'estimation de la quantité de cendres produites dans les installations de cogénération est assez difficile à réaliser en raison de la diversité des combustibles utilisés (essences, humidité, forme, ...).

En effet, d'une part les quantités de bois consommées sont très difficiles à estimer considérant que toutes ces unités ne fonctionnent pas de la même manière (fonctionnement en continu, intermittent, besoins de process, de chauffage, rendements de chaque installation, etc.). D'autre part, certaines sociétés disposent d'une filière d'approvisionnement spécifique (exemple de l'installation Burgo Ardennes alimentée en liqueur noire). De plus, la production de cendres dépend fortement du type de bois traité (présence d'écorces, poussières, feuilles). Finalement, la qualité de la combustion joue également un rôle important dans la quantité de cendres produites (présence d'imbrûlés).

Etant donné les difficultés à estimer les quantités de cendres produites dans certaines installations, l'information a été obtenue dans ces cas directement auprès des sociétés. Le Tableau 8 présente les productions de cendres par installation de cogénération en Wallonie.

A partir de ce tableau, on remarque que près de 95% de la production de cendres provient de quatre installations, à savoir Renogen, ERDA, IBV Vielsalm et Burgo Ardennes.

Tableau 8. Production de cendres par les installations de cogénération en Wallonie.

Installation	Production de cendres (t/an)
Commune de Gedinne	180
Gazenbois	350
Radermecker	300
Seco-bois	150
Renogen	7500
ULg	1000
ETA Le Saupont	200
Recybois	1500
ERDA	9300
Valorbois	900
IBV Vielsalm	35000
Burgo Ardennes	24000
Moulin Schyns	200
Total	80580

Les unités de cogénération ne sont pas les seules productrices de cendres à partir de bois. Comme expliqué au point 4.2, les installations de production de chaleur seules totalisent une puissance installée élevée. Cependant, la puissance moyenne installée par installation est d'environ 500 kWth, soit nettement inférieure aux unités de cogénération. Cette caractéristique impose une meilleure qualité du bois et le taux de cendres des combustibles pour ces installations peut être estimé à maximum 2 à 3 % (Hulot, 2012). La quantité de cendres estimée se situe entre 1500 et

2000 t/an. D'autre part, l'unité « biomasse » de la centrale des Awirs consomme une quantité de pellets évaluée à 400.000 t/an pour une puissance de 80 MWél (Pend), produisant annuellement entre 2000 et 4000 t de cendres (taux de cendres considéré entre 0,4 et 1% pour les granulés de bois).

8. CONCLUSION

Ce livrable dresse un inventaire des installations de cogénération en Wallonie ainsi que des combustibles utilisés et de leur production de cendres. On remarque, malgré la difficulté d'estimer la production de cendres, que les installations de cogénération sont les principales productrices de cendres de combustion de bois et que parmi ces installations, la plus grande partie des cendres viennent de quelques grandes unités (en grande partie dans le secteur industriel).

Les combustibles utilisés sont majoritairement des bois non-traités et issus de l'exploitation forestière ou de l'industrie de première transformation. Les données d'analyses de composition des cendres (prévues dans le livrable 2) devraient permettre d'identifier les possibles utilisations de ces déchets sur les sols forestiers et/ou agricoles.

9. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADEME (2001). *Etude de valorisation des cendres de chaufferies bois*. Programme bois-énergie 1996-2006. 97p.
- Anonyme. *Les cendres issues de la production d'énergie renouvelable*. 3p.
- Crehay, R. et Marchal, D. (2004). *La filière bois-énergie*. VALBIOM – Valorisation de la biomasse asbl. 58p.
- COGENSUD (2009). *Atlas wallon de la cogénération*. URL : <http://www.cogensud.be/cartes/map-cogentour.html>, consulté le 02/09/2012
- Cordell, D. (2010). *The Story of Phosphorus: Sustainability implications of global phosphorus scarcity for food security*. Doctoral thesis. Collaborative PhD between the Institute for Sustainable Futures, University of Technology, Sydney (UTS) and Department of Water and Environmental Studies, Linköping University, Sweden. Linköping University Press, ISBN 978-91-7393-440-4.
- CWape (2012). *Sites de production certifiés et acceptés par la CWape*. URL: <http://www.cwape.be/docs/?doc=407>
- CWape (2010). *L'évolution du marché des certificats verts*. Commission wallonne pour l'énergie. Rapport annuel spécifique 2009. 47 p.
- Demeyer, A., Voundi Nkana, J.C. and Verloo, M.G. (2001). *Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview*. Bioresource Technology 77 (2001) 287-295
- Etiegni, L., Campbell, A.G. (1991). *Physical and chemical characteristics of wood ash*. Bioresource Technology 37, 173-178.
- FAO (2012). *Terminologie unifiée de la bioénergie*. URL : <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/009/j6439f/j6439f08.pdf>, consulté le 29/11/2012
- Hébert, M. et Breton, B. (2008). *Recyclage agricole des cendres de bois au Québec – Etat de la situation, impacts et bonnes pratiques agro-environnementales*. Agrosolutions 19 (2) : 18-33
- IRCO (2009). *Vade-mecum administratif relatif aux installations Bois-Energie-Entreprises en Région wallonne – Cadre réglementaire*. Bureau d'études IRCO sprl – Facilitateur Bois-Energie secteur Entreprises. Version 2009. 65 p.
- Lerat, D. (2012). *Etude préliminaire : Analyse et gestion des cendres issues des chaudières industrielles fonctionnant à la biomasse*. Travail de fin d'étude.
- Le Soir (2009). *Archives Le Soir*. URL: <http://archives.lesoir.be/rien-ne-se-perd-chez-ibv-t-20090311-00M3TA.html>
- Liu, Y., Villalba, G., Ayres, R.U. and Schroder, H. (2008). *Global phosphorus flows and environmental impacts from a consumption perspective*. Journal of Industrial Ecology 12: 229-247.
- Marchal, D. (2004). *La cogénération à partir de bois*.
- Marenne, Y. (2006). *La cogénération en Wallonie – Dossier scientifique réalisé dans le cadre de l'élaboration du rapport analytique 2006-2007 sur l'état de l'environnement wallon*. Institut de conseil et d'études en développement durable (ICEDD asbl). 8p.
- Mivière, J.M. (2008). *Les cendres des chaudières automatiques au bois et leurs possibilités de valorisation*. Les cahiers du Bois énergie : Fascicule 1. Bois énergie 66. 8p.
- Pieret N. (2010). *La production d'électricité à partir de pellets de bois en Belgique ?* Silva Belgica 117. 48-49

- Ponette, Q. (2007). *Etude des ressources « bois-énergie » en Région wallonne*. Rapport final. 79p.
- SITA (2009). *Déchets sélectifs/bois*. URL: http://www.sita.be/bois_fr.html
- Someshwar, A.V. (1996). *Wood ash and combination wood-fired boiler ash characterization*. J. Environ. Qual. 25, 962-972.
- Stahl, E. and Ascheb, N. (2010). *Recycling of wood ash for reintroduction to forest soils*. Conference on Recycling of Biomass Ashes, Innsbruck, March 22-23, 2010
- ULg (2011). *Communiqué de presse*. URL: http://www.ulg.ac.be/cms/c_1383226/le-campus-du-sart-tilman-chauffe-grace-a-la-cogeneration-biomasse
- Ulery, A.L., Graham, R.C., Amrhein, C. (1993). *Wood-ash composition and soil pH following intense burning*. Soil Science 156, 358-364.
- VALBIOM (2007). *Ville de Tournai. Le projet GAZENBOIS*. 4èmes rencontres de la biomasse. 5p.

Communications personnelles

- Ghysel, F. (2011). *Réglementation en vigueur en Wallonie concernant la valorisation et l'utilisation des matières au niveau agricole*
- Hulot J. (2012). *Bureau d'études IRCO sprl - Facilitateur pour la filière Bois-énergie-entreprise pour la Région wallonne*
- Lepoint, P. (2013). *Précisions concernant les normes administratives*

CHAPITRE 2.
CARACTERISATION DES PRODUITS AU NIVEAU DE LA
VALEUR AGRONOMIQUE ET DES RISQUES DE
CONTAMINATION

1. INTRODUCTION

1.1. Objectifs

L'objectif de ce livrable est, dans un premier temps, de déterminer les caractéristiques physico-chimiques et les risques de contamination des cendres en fonction de la nature des matières premières et des modes de production. Dans un second temps, il s'agira d'évaluer la valeur fertilisante des cendres en fonction de la nature des matières premières.

1.2. Valeur neutralisante (VN)

La VN correspond au nombre d'équivalents CaO qui ont, sur le sol, le même impact que 100 kg de l'amendement considéré. La VN s'exprime donc en kg CaO/100 kg de produit.

2. COMPOSITION GENERALE DES CENDRES

Les cendres de bois sont principalement riches en calcium et en potassium, mais contiennent aussi, en quantité notable, du phosphore et du magnésium. A ce titre, elles peuvent être avantageusement utilisées comme fertilisants.

Le brûlage du bois concentre également dans la cendre les oligo-éléments naturellement présents dans les arbres, comme le manganèse, le fer et le zinc qui sont en quantités non négligeables. Toutefois, afin d'éviter le risque d'excès en oligo-éléments (phytotoxicité), suite à des apports répétés, des teneurs limites doivent être établies et il en va de même avec les contaminants « stricts » (ex : Cd, Hg, Pb).

Le Tableau 9 mentionne les teneurs moyennes retrouvées dans les cendres.

Tableau 9. Paramètres agronomiques des cendres de bois (ADEME, 2005)

Eléments	Composition
Matière sèche	99,8%
pH	Entre 10 et 13
Azote total	0,2 kg/T
Matière organique	0,86 kg/T
Chaux : CaO	170 à 330 kg/T
Potasse : K ₂ O	20 à 60 kg/T
Magnésie : MgO	25 à 46 kg/T
Phosphore : P ₂ O ₅	10 à 61 kg/T
Valeur neutralisante (VN)	30-50

D'après plusieurs études réalisées dans les années 1990, des tests de dilution de cendres de bois dans l'eau ou dans un extrait d'acétate d'ammonium ont été effectués. Ainsi, Khanna *et al.* (1994) ont pu regrouper les éléments solubles dans l'eau en plusieurs catégories : K qui se dissout très rapidement (>50% du total), Ca et Mg qui se dissolvent d'autant plus rapidement que la proportion cendres/eau est faible, et P qui reste relativement insoluble. D'après Ohno et Erich (1990), la disponibilité en éléments fertilisants dans un extrait d'acétate d'ammonium est de 48% du Mg

total, 40% du K total et 5,7% du phosphore total à un pH de 3,0, alors qu'à un pH de 4,2 elle est de 81% du Ca total, 57% du Mg total, 34% du K total et 20% du P total (Meiwes, 1995).

D'après Hébert et al. (2008), la majorité du potassium des cendres est sous forme d'hydroxyde, donc soluble dans l'eau, et on lui impute donc par défaut une efficacité potassique de 100 % comparativement aux engrais minéraux. Les études agronomiques relevées par Baziremakenga, en 2003, indiquent que l'efficacité phosphorique se situerait pour sa part entre 25 et 75 %. Dans la pratique, l'utilisation d'un coefficient d'efficacité moyen de 50 % devrait permettre une fertilisation phosphorique appropriée.

2.1. Intérêt pour le sol

Un des principaux intérêts de la cendre est de neutraliser l'acidité du sol. Le lessivage du calcium n'est pas toujours compensé par la minéralisation de la roche mère. Cette perte nette entraîne une acidification du milieu et une saturation de la C.E.C. en ions H⁺. Dans ce type de sol, l'apport de cendres permet de compenser la perte de calcium et de redresser le pH (Mivière, 2008). Les pertes les plus importantes ont lieu sur les sols à textures grossières, acides et filtrantes. Avant d'utiliser des cendres pour redresser le pH d'une parcelle, il faut connaître sa réactivité pour adapter les apports. Il faut réaliser un test de valeur neutralisante (VN), qui est la capacité de l'amendement à neutraliser l'acidité du sol : pour rappel, 1kg de CaO équivaut à 1 unité de VN et 1 kg de MgO à 1,4 unité VN. Comme décrit dans le Tableau 9, la plupart des cendres ont une valeur neutralisante comprise entre 30 et 50.

Un autre atout de la cendre est d'améliorer la stabilité de la structure du sol. La stabilité d'un sol est essentielle pour optimiser sa fertilité. D'après Lickaz (2002), l'épandage de cendres pourrait améliorer la structure du sol. En effet, la présence de cations bivalents tels que le calcium et le magnésium favorise la floculation des sols (complexe argilo-humique). Les sols faiblement pourvus en calcium et/ou avec une texture dominée par des limons fins (sols battants) ont une structure peu résistante aux perturbations (passage d'engins, précipitations). L'apport de cendres permet toujours grâce au transfert de calcium d'améliorer la stabilité de la structure et ainsi d'optimiser la fertilité de la parcelle (ADEME, 2005).

Pour conclure, compte tenu de leur composition, les cendres contiennent plusieurs éléments nécessaires à la croissance des végétaux et notamment du phosphore et de la potasse, qui assurent une bonne croissance à la plante et renforcent la rigidité des tiges. Dans le cas d'un compost, un peu de cendre l'enrichit en sels minéraux mais n'étant pas acide, celui-ci n'a pas particulièrement besoin de cendres pour remonter son pH qui est déjà élevé. L'épandage agricole peut donc être considéré comme une opération de valorisation, il s'agit d'une réutilisation d'éléments fertilisants provenant des végétaux, dans un cycle de production végétale (agricole).

2.2. Critères défavorables

Les cendres peuvent présenter des teneurs parfois élevées en métaux lourds, et parfois en composés organiques. Comme expliqué dans le livrable 1, ces caractéristiques peuvent varier en fonction des propriétés du bois (essence, partie de l'arbre, origine géographique, ...) mais surtout en fonction du type de chaudière, de la qualité de la combustion, du type de cendres (cendres volantes et de grille) et de la forme du bois combustible (Demeyer, 2001).

En fonction des teneurs en éléments fertilisants dans les cendres qui déterminent les doses à épandre, il convient d'être prudent :

- compte tenu du taux important de potasse, les cendres doivent être apportées en quantité modérée. Un éventuel excès provoque un déséquilibre chimique du sol et une mauvaise alimentation des plantes. L'excès de potasse se traduit par une mauvaise assimilation du magnésium et d'autres éléments essentiels ;
- un excès de chaux provoque un blocage d'oligo-éléments indispensables. Pire, il entraîne une destruction de l'humus du sol et une libération de l'azote sous forme gazeuse. Utilisées seules sur les terres agricoles, les cendres risquent de brûler le sol et d'entraîner une forte augmentation du pH du sol, au-delà des limites naturelles.

L'épandage répété de surdoses de cendres par un agriculteur pourrait être préoccupant, mais il s'avère cependant improbable. En effet, un surdosage régulier entraînerait une élévation excessive du pH qui inciterait l'agriculteur à cesser ou à réduire les apports ultérieurs afin d'éviter une baisse de rendement (Hébert *et al.*, 2008).

3. CARACTERISATION DES PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DES CENDRES EN FONCTION DE LEUR ORIGINE

3.1. Analyses de cendres en fonction de leur origine

La conclusion établie dans le Délivrible 1 précise que la composition chimique des cendres varie majoritairement selon la forme du combustible et la qualité de la combustion. Les compositions des cendres sont présentées ci-dessous en fonction de la forme du bois combustible (

Tableau 10).

Les valeurs présentées dans ce tableau proviennent d'une étude française « Bois Energie 66 » (valeurs intitulées « BE66 »), d'une étude réalisée par l'ADEME (valeurs intitulées « ADEME »), de la base de données de l' « IEA Bioenergy Task 32 » (valeurs intitulées « IEA ») ainsi que d'analyses réalisées par le SPF Santé Publique (valeurs intitulées « ERDA » et « Awirs »). Ces teneurs sont généralement du même ordre de grandeur par origine du bois combustible mais varient néanmoins en fonction de leur provenance. Plusieurs facteurs peuvent influencer la composition des cendres, tels que la qualité de la combustion ou, dans une moindre mesure l'essence de bois brûlée mais aucune donnée à ce sujet n'a été trouvée. On observe comme attendu des concentrations élevées en CaO, particulièrement dans les plaquettes forestières et les écorces, ainsi qu'en K₂O, en MgO et en P₂O₅.

Les valeurs de pH (comprises entre 10,5 et 12,8) et de Valeur Neutralisante (de 22,6 à 56,2) sont intéressantes en ce qui concerne un amendement basique. A titre de comparaison, les écumes ont une valeur neutralisante de 21, le biocal de 43, la chaux vive de 95 et la chaux magnésienne de 110 par 100 kg (Fourrages-Mieux, 2008).

Tableau 10. Composition physico-chimique et concentration en ETM des cendres de différentes formes de bois combustible (Source : Mivière, 2008 ; ADEME, 2005 ; IEA Bioenergy Task 32, 2012) et teneurs maximales autorisées dans la législation (normes B1 et B2, décrites à la page 5, Chapitre 1).

			Plaquettes forestières			Issus de déchets de bois non traités			Ecorces		Issus de l'industrie du bois			Granulés			
		Unité	BE66	ADEME	IEA	BE66	ADEME	IEA	BE66	IEA	BE66	ADEME	ERDA	BE66	Awirs		
	n		7	9	20 à 36	6	8	1	6	1	5	8	2	3	10		
Eléments fertilisants	Na2O	%	0,6		1,09			1,35	0,62	1,62	0,48			0,75			
	K2O	%	6,21	3,9	6,72	3,3	4,0	3,98	3,94	5,31	6,07	2,7	1,91	5,9			
	MgO	%	4,17	4,2		2,89	5,6		3,96		5,66	4,8	1,25	4,52			
	CaO	%	34,38	45,9		18,6	25,5		39,02		48,23	43,3	20,16	31,67			
	FeO	%	2,3		3,12			2,19	3,09	5,66	3,45			3,28			
	Al2O3	%	4,6		12,32			10,3	4,32	13,98	1,52		5,1	3,57			
	P2O5	%	3,39	3,5	4,98	1,21	2,4	4,54	0,91	2,15	2,18	3,7	0,6	1,35			
	C	%	8,54	8,0		6,75	5,6		1,6		2,06	6,3		0,73			
	N	%	0,07	0,12		0,38	0,09		0,03		0,08	0,13		0,07			
	C/N		110	67,0		42	62,6		53		26	48,8		10	Teneurs maximales		
	pH		12,5	12,8		10,5	12,3		11,9		11,9	12,3		11,9			
	VN		40,2	51,7		22,6	33,4		44,6		56,2	50,1	21,9	38		B1	B2
	n		7	3 à 10	9 à 36	6	7 à 8	1	6	1	5	5 à 10	2	3	10		
ETM	Cu	mg/kg	287	96,3	2795,6	743	994,4	124	175	138	101	64,6	76,3	193	58,6	100	600
	Mo	mg/kg	1,1	1,4	1,4	9,2	8,4		2,8	4	0,87	1		0,05		-	-
	Zn	mg/kg	181	152,3	330	2332	1655,3	559	745	420,5	168	119	116	935	238	400	2000
	As	mg/kg	2,99	4,4	6,8	44	61,5		6,6		5,2	4,8	3,16	10,1	0,32	20	-
	Cd	mg/kg	1,71	1,3	2,7	9	7,5		3,8	2	2,06	1,8	0,2	1,02	1,27	1,5	(10) 5
	Cr	mg/kg	33,9	20,9	1955,8	405	568,5	243	91,8	53,5	51,1	45,8	57,3	115	7,56	100	500
	Hg	mg/kg	0,1	0		0,36	0,3		0,13		0,08	0,2	0,02	0,02	0,09	1	(10) 5
	Ni	mg/kg	26,5	24	83,4	112,5	84,3	123	56,6	37,5	25	21,6	27,4	59,8	7,63	50	100
	Pb	mg/kg	15,95	31,8	78,6	680	506,3	316	125,6	152	79,4	94,6	28,7	249	37,5	100	500
	Se	mg/kg	0,59	0,9		1,8	2,3		0,8	138	0,79	1,1		0,22			

4. EVALUATION ET COMPARAISON DE LA VALEUR FERTILISANTE DES CENDRES EN FONCTION DE LA NATURE DES MATIERES PREMIERES

La caractérisation des propriétés physico-chimiques présentées au point 3 montre des teneurs intéressantes en plusieurs éléments. Ces teneurs permettent d'estimer la valeur fertilisante des cendres en provenance des diverses formes de combustible, présentée au Tableau 11. Celle-ci est calculée comme la teneur en un élément multipliée par le Coefficient Apparent d'Utilisation (CAU) et par la valeur de cet élément dans l'engrais minéral correspondant. On considère pour tous les éléments un Coefficient Apparent d'Utilisation (CAU) de 1, à l'exception de l'azote qui n'est pas pris en compte pour le calcul de la valeur fertilisante des cendres (Godden, 2013).

La valeur fertilisante des cendres de bois varie donc environ de 100 à 175 €/tonne. A titre de comparaison, celle du fumier de bovins est de 13,07 €/t, celle du lisier de porcs de 14,45 €/t et celle du fumier de poules de 74,94 €/t (teneurs très élevées en azote et en phosphore).

Tableau 11. Valeur fertilisante (VF) des cendres des différentes formes de combustible.

Eléments	Plaquettes forestières		Issus de déchets de bois non traités		Ecorces		Issus de l'industrie du bois		Granulés		Valeur vrac en ferme (€/unité)
	kg/t	VF	kg/t	VF	kg/t	VF	kg/t	VF	kg/t	VF	
Na ₂ O	8,5	2,5	13,5	4,1	11,2	3,4	4,8	1,4	7,5	2,3	0,3
K ₂ O	64,7	42	36,4	23,7	46,3	30,1	39,9	25,9	59	38,4	0,65
MgO	41,7	25	28,9	17,3	39,6	23,8	34,6	20,7	45,2	27,1	0,6
CaO	344	34,4	186	18,6	390	39,0	342	34,2	317	31,7	0,1
P ₂ O ₅	41,8	71,1	28,7	48,9	15,3	26,0	13,9	23,6	13,5	23	1,7
Valeur totale (€/t)		175,1		112,5		122,2		105,9		122,3	

La valeur fertilisante des plaquettes forestières est la plus intéressante et nous verrons par la suite que cette catégorie semble présenter relativement peu de risques de contamination des sols. Bien que moins élevées, les valeurs des autres catégories ne sont pourtant pas négligeables.

5. DETERMINATION DES RISQUES DE CONTAMINATION POTENTIELLE EN FONCTION DE L'ORIGINE ET DE LA NATURE DES MATIERES UTILISEES

5.1. Concentrations en ETM

Les concentrations en ETM dans les différentes formes de combustibles sont présentées dans le

Tableau 10.

Les teneurs en ETM des cendres de **plaquettes forestières** sont majoritairement sous les teneurs maximales autorisées. Les teneurs en Cu et en Cr données par l'IEA sont à considérer avec précaution. Ce sont des moyennes calculées sur des effectifs de respectivement 36 et 32 objets dont les maxima sont très élevés. Les médianes de ces valeurs sont de 130,5 pour le Cu et de 130 pour le Cr et les valeurs maximales sont quant à elles de 89 300 et 57 800. Ces valeurs ne devraient donc pas être prises en compte ultérieurement. Etant donné les éléments en notre possession, les cendres de plaquettes forestières pourraient entrer dans la sous-classe B2.

Dans les cendres **issues de déchets de bois non traités**, les concentrations en ETM sont trop élevées, notamment en Zn, en Ni et en Cr. Les valeurs supérieures aux teneurs maximales autorisées proviennent cependant de l'étude « Bois Energie 66 » (colonne « BE66 ») pour laquelle nous ne disposons pas des valeurs statistiques. Les valeurs venant de l'étude réalisée par l'ADEME semblent cependant confirmer ce constat.

En ce qui concerne les cendres d'**écorces**, les teneurs en Cu, Zn, Cd, Ni et Pb sont supérieures aux valeurs limites de la classe B1 mais pas à celles de B2.

Les cendres de bois **issus de l'industrie du bois** présentent des teneurs relativement faibles. Cependant, les valeurs provenant d'analyses françaises sont plus élevées que celles venant de la société ERDA (colonne « ERDA ») mais il est toutefois important de noter que ces teneurs en éléments fertilisants sont plus faibles que les valeurs spécifiées dans l'étude « Bois Energie 66 ».

Les **granulés** montrent des valeurs de concentration en ETM faibles, particulièrement les analyses réalisées dans une chaudière wallonne (les Awirs). Comme pour les cendres venant de l'industrie du bois, il serait intéressant de pouvoir également comparer les concentrations en éléments fertilisants.

Les rares données concernant les composés traces organiques ne suffisent pas à montrer une différence selon l'origine du bois combustible. Les analyses disponibles, effectuées sur des cendres de granulés de bois de la centrale des Awirs (données du SPF Santé Publique) sont cependant bien inférieures aux limites tolérées.

Notons encore qu'il existe des données d'analyses basées sur des tests de lixiviation sur les cendres d'installations de cogénération wallonnes. Cependant, d'après les Collectivités Bois Energie (2005), les analyses sur la lixiviation des métaux sont inutiles dans un cadre agronomique opérationnel. Ce type d'analyses relève plutôt d'un contexte de recherche ou d'une filière d'élimination par mise en décharge. Ces analyses sont tout au plus utiles dans le cas de l'entreposage non couvert et de longue durée des cendres avant épandage. Ces analyses, une fois réalisées à titre d'information, n'ont plus besoin d'être répétées dans la routine des opérations d'épandage.

6. CONCLUSION

Les analyses des cendres de différentes formes de combustible présentées dans ce livrable montrent une grande variabilité de la teneur en éléments fertilisants et en ETM des cendres en

fonction de leur origine. Les cendres de déchets de bois ont des concentrations en ETM élevées et il est nécessaire de veiller particulièrement à leur composition dans le cas d'une valorisation potentielle sur les sols. Les cendres de plaquettes, de granulés ou celles issues de l'industrie du bois possèdent des teneurs plus faibles et seraient donc plus susceptibles d'être valorisées de cette façon. Les cendres d'écorces se situent entre les deux catégories précédentes et tendent à montrer des teneurs en ETM supérieures à la norme B1 mais toujours inférieures aux valeurs limites de la norme B2. Il est important de noter que les analyses réalisées par le SPF Santé Publique montrent des teneurs en ETM plus faibles que celles générées par les analyses françaises et toujours inférieures à la norme B1.

L'influence du mode et de la température de combustion n'a pas pu être démontrée en raison du manque de données relatives à ces caractéristiques. La valorisation des cendres de bois devrait donc passer par des analyses préalables afin de déterminer la composition des cendres des unités de combustion wallonnes en fonction de leurs particularités et selon les types de bois-énergie utilisés, les essences dominantes et leur origine (Anonyme, 2005).

7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADEME, Gestion et valorisation des cendres de chaufferie bois. Analyses moyennes des cendres. 5p.
- Anonyme, (2005). *Fiche n°4 : La valorisation agronomique des cendres de bois*. Collectivité Bois énergie. 6p.
- Bruyère, C. (2013). *La valorisation des cendres de bois en France*. Bioenergie international n°23 février 2013. 16-21.
- Collectivités Bois Energie, (2005). *Fiche N°4 : La valorisation agronomique des cendres de bois. Eléments méthodologiques et conseils pour la mise en œuvre d'une chaufferie bois*.
- Demeyer, A., Voundi Nkana, J.C. and Verloo, M.G. (2001). *Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview*. Bioresource Technology 77 (2001) 287-295
- Fourrage-Mieux (2008). Les amendements basiques ou chaulage des prairies URL : <http://www.fourragesmieux.be/SSSMentretienchaulage.htm>, consulté le 04/02/2013
- Hébert, M. et Breton, B. (2008). *Recyclage agricole des cendres de bois au Québec – Etat de la situation, impacts et bonnes pratiques agro-environnementales*. Agrosolutions 19 (2) : 18-33
- IEA Bioenergy task 32 (2012). Biomass combustion and cofiring. URL: <http://www.ieabcc.nl/database/ash.php>, consulté le 11/12/2012
- Lerat, D. (2012). *Etude préliminaire : Analyse et gestion des cendres issues des chaudières industrielles fonctionnant à la biomasse*. Travail de fin d'étude.
- Lickaz, J. (2002). *Wood ash – An alternative liming material for agricultural soils*. Agri-Facts, Practical information for Alberta's agriculture industry. AGDEX 534-2, Alberta Agriculture, Food and Rural Development. 6 p.
- Mivière, J.M. (2008). *Les cendres des chaudières automatiques au bois et leurs possibilités de valorisation*. Les cahiers du Bois énergie : Fascicule 1. Bois énergie 66. 8p.
- Narodoslawsky M, Obernberger I. (1996). *From waste to raw material — the route from biomass to wood ash for cadmium and other heavy metals*. J Hazard Mater 1996; 50: 157–68.
- Omil, B., Piñeiro V., Merino A. (2007). *Trace elements in soils and plants in temperate forest plantations subjected to single and multiple applications of mixed wood ash*. Science of the Total Environment 381 (2007) 157–168
- Wallonie.be (2013). Législation environnementale et agricole applicable en Wallonie. URL: <http://environnement.wallonie.be/legis/eau/easur102.htm>, consulté le 13/02/2013

Communications personnelles

- Generet, A. (2012). *Données d'analyses de cendres*.
- Ghysel, F. (2011). *Réglementation en vigueur en Wallonie concernant la valorisation et l'utilisation des matières au niveau agricole*
- Godden, B. (2013). *Calcul de la Valeur Fertilisante d'un produit organique*.
- Lepoint, P. (2013). *Précisions concernant les normes administratives*

CHAPITRE 3.
ETUDE DES SYSTEMES DE VALORISATION EN AGRICULTURE
ET EN FORET

1. INTRODUCTION

1.1 Objectifs

Les cendres sont reconnues depuis très longtemps pour leur action fertilisante, ainsi des systèmes de production se sont développés au cours du temps, basés sur leurs effets : culture sur brûlis (slash and burn) en Afrique, essartage en Ardenne, etc. Chez nous, anciennement, les cendres des foyers étaient épandues dans les jardins. Les cendres sont effectivement riches en calcium, en potassium et en phosphore mais peuvent également présenter des teneurs en éléments traces métalliques (ETM) et en composés traces organiques (CTO) non négligeables.

L'objectif de ce livrable est de décrire les différentes filières de recyclage ou de valorisation existantes des cendres, de comparer la valeur fertilisante de ces différents modes de valorisation et enfin, de proposer des modes de valorisation des cendres.

1.2 Activité pouzzolanique

L'activité pouzzolanique d'un matériau peut être définie comme la capacité des silicates et aluminates de ce matériau à réagir, en présence d'eau, avec la chaux hydratée pour former des hydrates (ADEME, 2001).

2. DESCRIPTION DES DIFFERENTES FILIERES DE RECYCLAGE/VALORISATION EXISTANTES

2.1 Valorisation industrielle

Le secteur de la construction utilise, depuis de nombreuses années, des sous-produits d'autres secteurs industriels et on peut citer en particulier l'utilisation de cendres volantes de centrales thermiques à charbon. Ces cendres volantes sont même devenues des matières à part entière dans la fabrication des bétons et leurs confèrent des propriétés particulières. Ces cendres présentent, en général, des propriétés pouzzolaniques. Le liant pouzzolanique permet la formation d'une large gamme de produits hydratés qui contribuent à la prise et au durcissement du matériau. L'incorporation d'un tel matériau dans un béton ou mortier se fait en remplacement d'une partie du ciment et permet ainsi une économie sur la fourniture en ciment. Il est rappelé que la chaux hydratée ou éteinte Ca(OH)_2 est la forme hydratée de la chaux vive (CaO). La teneur en chaux libre représente la somme des concentrations en chaux éteinte et en chaux vive. C'est la teneur en chaux éteinte qui est significative pour l'activation des réactions hydrauliques dont résulte la prise du ciment (ADEME, 2001).

Dans le cas des cendres de bois, seules les cendres volantes paraissent adaptées à ce mode de valorisation, qui n'est dès lors pas concurrent à une éventuelle valorisation sur les sols. Les cendres de fond ne présentent en effet qu'une faible activité pouzzolanique.

Les compositions chimiques des cendres ont toutefois été transmises à des cimentiers pour avis d'experts. Un prétraitement des cendres pourrait peut-être les rendre compatibles avec une utilisation en cimenterie, les cimentiers recherchant des alternatives aux cendres de charbon du fait de la fermeture annoncée des dernières centrales thermiques.

Si les cendres ne possèdent pas de propriétés pouzzolaniques intéressantes, il est toujours possible d'envisager leur incorporation dans les mortiers et bétons en tant que correcteur granulométrique (apport d'éléments de type sable fin ou filler).

Après extinction de la chaux vive et élimination des éléments grossiers (imbrûlés ou éléments métalliques), les cendres pourraient être utilisées en tant qu'ajout de type filler afin d'optimiser le fuseau granulaire. Les analyses granulométriques ont démontré la finesse de ces sous-produits avec un passant à 160 µm important (estimé à environ 90 %, excepté pour les cendres de palettes). Ainsi, les cendres pourraient être utilisées pour la réalisation de matériaux tels que les parpaings où le filler calcaire serait remplacé par les cendres (ADEME, 2001).

Les cendres de biomasse peuvent entrer dans la constitution de remblais et sous couches de chaussées en tant que :

- liant à faible caractère pouzzolanique,
- correcteur granulométrique ou filler dont le rôle est de compléter la granulométrie d'un matériau pauvre en fraction fine (inférieure à 500 µm).

2.2 Valorisation agricole ou forestière

Les cendres peuvent être assimilées à des engrais ou des amendements. Un engrais est destiné à nourrir les plantes, alors qu'un amendement apporte des éléments au sol. Au vu de leur composition moyenne, les cendres de biomasse peuvent a priori être classées dans les deux catégories de matières fertilisantes. Elles peuvent être considérées comme engrais si elles apportent des éléments P, K et Mg. Elles peuvent aussi être considérées comme amendement si elles participent à l'apport de chaux pour lutter contre l'acidification du sol.

Les cendres de biomasse (issues principalement de la combustion de plaquettes et d'écorces) constituent une forme d'amendement agricole intéressante compte tenu de leur richesse en éléments minéraux. En France, des expériences pilotes d'épandage sont en cours dans le domaine agricole mais il en existe peu dans le domaine forestier.

La réponse forestière à des applications de cendres de chaudières à biomasses a par contre été étudiée dans les pays scandinaves. En Scandinavie, le développement des chaufferies bois de forte puissance, dans l'industrie et le tertiaire, conduit à une production élevée de cendres de bois (plus de 100 000 t/an en Finlande par exemple). La question des filières de valorisation des cendres est donc primordiale. La restitution en forêt résineuse sur sol acide de ces éléments minéraux fertilisants, exportés lors de l'exploitation du bois, est particulièrement intéressante. Elle fait l'objet de nombreux programmes de recherche.

Plusieurs solutions technologiques ont ainsi émergé en Scandinavie pour conditionner et épandre les cendres de bois :

- un pré-traitement, qui consiste à injecter de l'eau dans les cendres pulvérulentes pour parvenir à une humidité de 35 % sur masse brute (solidification des cendres). Elles sont alors stockées jusqu'à la période d'épandage (après les coupes) et concassées lors du chargement du camion qui les transporte sur les parcelles forestières,

- la granulation (compaction d'un matériau qui demeure sec) est particulièrement intéressante pour accélérer la vitesse du chantier d'épandage ou pour l'épandage par hélicoptère. En Finlande, où la mise en place de ces filières est en cours, environ 15 000 t de cendres sont d'ores et déjà recyclées chaque année en forêt. Des études sont toutefois en cours sur l'impact environnemental.

En termes de résultat, des gains de 25 à 60 % sur la croissance du saule, du peuplier et du pin sylvestre sont observés après plusieurs années en Finlande et sur un bon nombre d'espèces nord-américaines, en relation avec l'augmentation dans le sol du potassium, du calcium et du magnésium.

Néanmoins, ces résultats prometteurs sont à nuancer. En effet, une expérimentation de l'AFOCEL (Association forêt cellulose : organisme privé de recherche qui a pour mission d'améliorer la compétitivité des approvisionnements de l'industrie et de la filière forêt-bois-papier), menée en partenariat avec l'usine « International Paper » de Saillat-sur-Vienne sur des taillis de châtaigniers, a démontré que la réponse en matière de gain de production n'est pas acquise dès les premières années. Cette étude conclut à la nécessité de réaliser des essais complémentaires afin de définir plus précisément les quantités, les espèces et les situations forestières les mieux appropriées.

Une étude de l'Institut de recherche SkogForsk (Suède) a montré que la réintroduction des cendres dans la forêt nuit à la croissance des arbres. L'écocycle artificiel des minéraux, c'est-à-dire la réintroduction des cendres en forêts, provoquerait une augmentation du pH du sol et une diminution des réserves d'azote de la forêt, réserves qui participent à la croissance des arbres (ADEME, 2001).

2.2.1. Epandage en l'état

Les cendres peuvent être épandues telles qu'elles se présentent suite à leur extraction de la chaudière. Dans ce cas, il faut considérer leur voie d'extraction dans le mode d'épandage. L'extraction par **voie sèche** est essentiellement retrouvée dans les chaufferies de collectivités et rarement dans les chaufferies industrielles. De plus, ces chaufferies sont le plus souvent de faible ou moyenne puissance et ne fonctionnent qu'une partie de l'année. Le stockage de ces cendres doit permettre avant tout d'éviter l'humidification des cendres et leur prise en masse.

La solution la plus intéressante est de conditionner les cendres en big-bags. Ceci permet une manipulation aisée des cendres lors de leur chargement dans l'épandeur à chaux ou de leur mélange avec le fumier. Des stations de remplissage de big-bags existent sur le marché. Elles permettent, via un entonnoir monté sur supports, de remplir les big-bags. D'après une étude réalisée par l'ADEME en 2005, leur prix se situe entre 900 et 1000 €. Le prix unitaire d'un big-bag spécifique est d'environ 20 € (1,5 tonne de capacité, résistant à des températures de 180 °C).

Cependant, en fonction de la quantité de cendres produites, la surface nécessaire au stockage est plus ou moins importante. Deux solutions de stockage des big-bags existent :

- Soit ils sont stockés sur le site de la chaufferie dans le cas où la surface sur le site est suffisante. Le transfert des cendres sur l'exploitation agricole peut alors être réalisé dès que l'exploitant de la chaufferie et l'agriculteur se sont entendus.

- Soit ils sont transférés sur l'exploitation agricole au fur et à mesure, la surface sur le site de la chaufferie n'étant pas suffisante.

D'autres possibilités de stockage existent, comme par exemple l'utilisation d'une benne munie d'un dispositif protégeant le contenu (bâche ou toit mouvant). Cependant, dans le cadre d'une valorisation agricole, ce moyen de stockage rend difficile la manipulation des cendres : leur transfert chez l'agriculteur, puis leur stockage sur l'exploitation et enfin leur chargement dans l'épandeur, génèrent des nuages de cendres très importants. La respiration de ces poussières de cendres est à éviter pour des raisons évidentes de santé (si ce mode de stockage est retenu, le port d'un masque est recommandé).

Les **cendres humides** sont, au contraire des cendres sèches, retrouvées dans les chaufferies des industries de la transformation du bois. La solution de stockage idéale est l'utilisation d'une benne couverte de 10-12 m³. D'après les observations, les cendres, en sortie de chaudière, tombent dans un premier bac puis sont transférées dans la benne de stockage.

Compte tenu de leur humidité (25% en moyenne d'après Hébert et Breton, 2008), les cendres ont tendance à se coller contre le fond de la benne. Lorsque celle-ci est vidée, il n'est pas rare de ne pas pouvoir récupérer la totalité des cendres. Pour éviter ce phénomène, il est envisageable de tapisser le fond de la benne de quelques centimètres de sable.

Selon la quantité de cendres produites, des transferts peuvent être nécessaires tout au long de l'année vers l'exploitation agricole. Un lieu de stockage sur l'exploitation doit donc être déterminé. L'idéal est de disposer d'un silo, mais cela n'est pas toujours le cas. Il n'y a pas véritablement de solution type, la seule condition à remplir est de protéger ces cendres des intempéries.

Dans le cas d'une chaufferie produisant moins de dix tonnes de cendres par an, l'idéal est d'avoir un seul transfert par an des cendres.

Le stockage et le transport des cendres nécessitent beaucoup d'espace, la manutention des cendres est impur, et l'homogénéité et la régularité de l'épandage ne sont pas assurées (Väätäinen *et al.*, 2000). Par ailleurs, les poussières de cendres érodent les pièces de machine et peuvent provoquer des risques sanitaires. Pour éviter ces problèmes dans le cas d'une utilisation à grande échelle des cendres, un pré-traitement est nécessaire. L'objectif de ce pré-traitement est de compacter ou de granuler les cendres afin d'éviter les problèmes de poussières pendant le transport et l'épandage (Korpilahti *et al.*, 1998).

2.2.2. Epandage en mélange avec des matières organiques

L'opération préalable à l'épandage consiste à incorporer les cendres dans de la matière organique (par ex. boues, compost, digestat, etc.). Ce procédé permet d'une part de fournir un produit plus « complet » en éléments fertilisants et d'autre part de diminuer les éventuels effets négatifs des cendres sur les sols et l'opérateur (effet de dilution).

Une étude suédoise (Olsson *et al.*, 2010) portant sur le mélange de cendres avec la phase liquide du digestat afin d'obtenir un mélange riche en N et en P et K a montré que les émissions d'ammoniac n'augmentent pas avec l'ajout de cendres dans le digestat tant que la proportion de cendres ne dépasse pas 5% (proportion maximale testée), potentiellement en raison de la fixation

de l'ammoniac avec des ions métalliques. Cependant, le pouvoir abrasif des cendres est si grand que le risque d'usure des pièces des machines d'épandage est très élevé. De plus, seule une petite proportion des cendres se dissolvent dans l'eau, ce qui mène à un taux élevé de sédimentation des cendres dans le digestat liquide. Un mélange avec la phase solide du digestat semblerait donc plus adapté.

D'après une étude réalisée en 2012 par Materechera, l'ajout de cendres de bois à deux types de sol (limon argileux et limon sableux) mélangées à du fumier de bovins ou de poulet a significativement augmenté le pH, ce qui rend le P plus disponible dans le sol. La cendre de bois pourrait être utilisée en mélange avec du fumier partiellement décomposé sans compromettre la disponibilité du phosphore pour les cultures.

2.2.3. Epandage après prétraitement

Les deux techniques de prétraitement sont la granulation et le durcissement des cendres après humidification. Cette dernière technique serait particulièrement efficace dans le cas de grandes quantités de cendres à traiter, comme c'est le cas dans les usines de pâte à papier.

Les cendres sous forme de granulés contiennent très peu de particules fines, de sorte que les problèmes de poussière et leurs conséquences peuvent être évités. Le dosage est facilité et l'épandage est rendu plus uniforme et plus facilement réglable (Väätäinen *et al.*, 2000). La granulation des cendres peut être réalisée en utilisant plusieurs méthodes, telles que les granulateurs à plaques, à disques ou à tambours.

Une étude a été réalisée en Finlande sur la granulation des cendres et leur épandage en forêt (Andersson *et al.*, 2004). Le processus de granulation consiste à humidifier les cendres (d'écorces dans ce cas) avant d'homogénéiser le mélange qui sera amené dans un granulateur à plaques. Un équipement spécial intervient après la granulation et permet de réduire le diamètre des granulés de 10 – 20 mm à 3 – 10 mm. Les granulés sont ensuite transportés jusqu'à la zone de stockage, consistant en une zone à découvert située à 200 mètres de l'usine de granulation. L'humidité finale des granulés doit se situer dans une fourchette de 10 à 30% afin d'avoir un produit suffisamment stable.

Dans certaines centrales en Finlande et en Suède, le durcissement des cendres s'est révélée être une méthode peu coûteuse pour le traitement des cendres (Väätäinen *et al.*, 2000). Dans cette méthode, les cendres sont hydratées (humidité d'environ 30 - 40%) puis la cendre humide est transférée à la zone de stockage pour la phase de durcissement. Selon la température, le temps de durcissement peut varier de 7 à 14 jours. Avant l'épandage en forêt, la cendre durcie est tamisée et les plus gros morceaux sont broyés si nécessaire. La taille des particules peut aller jusqu'à quelques centimètres et la densité des cendres durcies varie entre 700 à 800 kg/m³. Les cendres durcies contiennent également un peu de particules fines, de sorte que les problèmes liés aux poussières ne disparaissent pas complètement. Des tests en laboratoires ont montré que l'humidité idéale qui mène à une dureté maximale des granules et à une diminution de la proportion de fines particules est de 34 - 35%.

Des boues industrielles peuvent également être mélangées aux cendres à la place de l'eau (Kuusela, 2003). La part des boues dans le mélange est de 25 - 35%. Le problème des cendres pures

en forêt est qu'elles libèrent trop rapidement leurs éléments. Les granulés et agrégats de cendres durcies, eux, se dissolvent assez lentement, ce qui est préférable dans un contexte forestier.

Une étude suédoise (Väätäinen *et al.*, 2000) a révélé que les cendres durcies puis écrasées étaient très solubles, ce qui a été mesuré par une augmentation de la conductivité électrique et des concentrations de Na, K, Ca et SO₄ dans la solution du sol à environ 50 cm de profondeur. La quantité de métaux lourds dans la solution du sol n'a pas augmenté de manière significative, même pour une dose de 9 t/ha de cendres solubles. Néanmoins, une augmentation de la disponibilité du Cd a été observée.

2.2.4. Introduction dans des engrais minéraux

Des cendres de céréales et de fientes de volailles sont actuellement utilisées par la société Walagri dans la fabrication d'un engrais minéral dénommé « KalcipHos ». Ces cendres permettent d'augmenter la teneur en P et K de l'engrais et de lui apporter leur VN. L'engrais se présente sous forme de poudre. La substitution de ce type de cendres par des cendres de bois pourrait être envisagée moyennant des teneurs suffisantes en éléments fertilisants et chaulants.

3. COMPARAISON DE LA VALEUR FERTILISANTE DES DIFFERENTS MODES DE VALORISATION

3.1 Epandage en l'état

La valeur fertilisante des cendres provenant de différentes sources de bois combustible a déjà été abordée dans le livrable 2. En ce qui concerne l'épandage de cendres en l'état, ces valeurs sont toujours d'actualité et sont présentées dans le Tableau 12.

Tableau 12. Valeur fertilisante (VF) des cendres des différentes formes de combustible dans le cas de l'épandage de cendres seules.

Eléments	Plaquettes forestières		Issus de déchets de bois non traités		Ecorces		Issus de l'industrie du bois		Granulés		Valeur vrac en ferme (€/unité)
	kg/t	VF	kg/t	VF	kg/t	VF	kg/t	VF	kg/t	VF	
Na ₂ O	8,5	2,5	13,5	4,1	11,2	3,4	4,8	1,4	7,5	2,3	0,3
K ₂ O	64,7	42	36,4	23,7	46,3	30,1	39,9	25,9	59	38,4	0,65
MgO	41,7	25	28,9	17,3	39,6	23,8	34,6	20,7	45,2	27,1	0,6
CaO	344	34,4	186	18,6	390	39,0	342	34,2	317	31,7	0,1
P ₂ O ₅	41,8	71,1	28,7	48,9	15,3	26,0	13,9	23,6	13,5	23	1,7
Valeur totale (€/t)		175,1		112,5		122,2		105,9		122,3	

3.2 Epandage en mélange avec des matières organiques

La composition du mélange sera dictée par la proportion de chaque matière y entrant. Ainsi, les mélanges de trois types d'engrais de ferme (fumier de bovins, fumier composté et lisier de porcs) avec 5% de cendres de différentes origines auront les valeurs fertilisantes présentées dans le Tableau 13.

Tableau 13 : Valeur fertilisante des mélanges de trois engrais de ferme avec 5% de cendres de différentes origines.

	Plaquettes forestières	Issus de déchets de bois non traités	Ecorces	Issus de l'industrie du bois	Granulés
	€/t				
Fumier de bovins	21,2	18,0	18,5	17,7	18,5
Compost de fumier	26,4	23,3	23,8	23,0	23,8
Lisier de porcs	22,5	19,4	19,8	19,0	19,8

Les valeurs fertilisantes des mélanges obtenus sur base de ces trois engrais de ferme se situent entre 18 et 26 €/tonne. De manière générale, les cendres possèdent des valeurs fertilisantes très élevées en raison de leurs hautes concentrations en éléments fertilisants et chaulants, dues à un taux de MS très élevé. Cette caractéristique induit que les cendres ajoutées à une matière organique augmentent sa valeur fertilisante.

3.3 Epandage après prétraitement

Si les cendres ont été prétraitées avec de l'eau, le produit final présentera des teneurs en MS plus faibles et perdra donc de la valeur par rapport à son poids. Deux paramètres modifient la valeur fertilisante des cendres ainsi traitées :

- le degré d'humidité qui peut varier de 10 à 40% ; à quantité égale, les cendres traitées sont d'une valeur fertilisante inférieure aux cendres brutes.
- la formation d'agréats ou de granules recherchée dans ces types de traitement qui diminue la disponibilité immédiate des éléments contenus dans les cendres.

Le taux d'humidité idéal pour les cendres traitées est de 20 à 25%, ce qui diminue d'un cinquième à un quart les valeurs fertilisantes présentées dans le Tableau 12. Cependant, il faut noter que ce prétraitement est réalisé afin de faciliter le transport et l'épandage et de retarder la mise à disposition des éléments contenus dans les cendres. Ces critères ne sont pas inclus dans le calcul de la valeur fertilisante.

Le Tableau 14 présente le coût de l'épandage de cendres sous forme de granulés en forêt.

De tels travaux d'épandage ont été réalisés en Wallonie. Le prix demandé pour ce travail était de 2146,5 € (TVA à 6%) pour 15 tonnes (fourniture + épandage), soit un prix pour 3 t/ha d'environ 430 €/ha). La condition pour obtenir ces prix est de disposer d'une surface suffisante pour le même chantier d'épandage (+/- 400 ha) ce qui peut nécessiter de se réunir entre propriétaires (Luxen, 2013).

Tableau 14 : Coût de la granulation des cendres et de l'épandage en forêt (Väättäinen *et al.*, 2000).

	€/tonne
Granulation des cendres	25
Transport sur une courte distance	1
Chargement	0,34
Transport sur une longue distance (50 km)	3,9
Epandage par transporteur	8,1
Epandage par hélicoptère	50,5
Total (transporteur)	38
Total (hélicoptère)	81

3.4 Introduction dans des engrais minéraux

L'engrais commercialisé par Wal.Agri n'étant pas encore disponible à la vente, sa composition n'a pas été divulguée. Il n'est dès lors pas possible de calculer sa valeur fertilisante en fonction des cendres incluses dans ce produit. Il est cependant fort probable que les cendres de bois contiennent moins de P et K que les cendres utilisées actuellement.

4 PROPOSITION DE MODALITES D'UTILISATION

4.1 Stockage et périodes d'épandage

Dans la majorité des cas, la production des cendres est continue sur l'année. L'épandage des cendres ne peut s'opérer qu'à des périodes bien précises du calendrier. De ce fait un stockage des cendres s'impose.

Les objectifs sont de :

- prévenir toute humidification des cendres pour éviter une prise en masse (type ciment)
- éviter les stockages en zones ventées
- faciliter la reprise pour les systèmes d'épandage
- d'aller relativement vite pour ne pas perdre les qualités agronomiques des cendres (Mivière, 2008).

L'apport de cendres peut se pratiquer en théorie à n'importe quelle période de l'année. Dans la pratique, il est préférable de chauler quand les terres supportent bien le passage de chantier d'épandage. Il est préférable d'appliquer les amendements basiques au début du printemps ou en été et en automne après la récolte (Logiag, 2013).

4.2 Matériel d'épandage

Le choix du matériel d'épandage doit découler des caractéristiques physiques de la cendre à épandre et de la dose à appliquer. Le matériel doit épandre la dose calculée de façon homogène en tout point de la parcelle agricole. L'épandage des cendres de bois sous forme sèche devrait s'apparenter à celui des scories potassiques, fertilisants traditionnels bien connus en agriculture (même si leur utilisation a décru en France). Pour l'épandage sous forme humide, des matériels dérivés de ceux utilisés pour les chaux crues ou les boues chaulées solides devraient convenir (matériels à fond mouvant, avec hotte arrière et disques d'épandage) (Anonyme, 2005). Pour les autres filières de valorisation, le matériel d'épandage est décrit ci-dessous.

4.3 Doses à épandre

Le calcul des doses à apporter doit être effectué sur base d'un bilan de fertilisation prenant en compte les besoins du sol, de la plante (plantation d'arbres ou culture) et les caractéristiques des cendres dans le but de respecter les flux maximaux à ne pas dépasser.

Cet aspect sera développé plus en détail dans le chapitre 5 dans le point concernant les besoins en agriculture et en forêt.

4.4 Filières de valorisation

4.4.1. Epandage en l'état

a. Cendres sèches

Dans le cas des cendres sèches, le matériel recommandé est un épandeur à chaux vive. Ce type d'épandeur permet d'apporter des cendres à des doses relativement faibles (1,5 tonne/ha), à condition que les cendres soient exemptes de clous et autres éléments métalliques, ainsi que de concrétions.

Le matériel est un épandeur à caisse monocoque, muni d'une toile de protection évitant l'envol des cendres. La caisse est munie d'un tapis qui convoie, à vitesse variable, les cendres ou la chaux vers une trappe dont l'ouverture est variable. Les cendres tombent ensuite sur une double vis qui alimente la rampe d'épandage. Celle-ci est équipée d'une jupe qui limite l'envol des cendres. La vitesse du tracteur, la vitesse d'avancement du tapis et le réglage de l'ouverture de la porte permettent des gammes de dosage variées.

Ce matériel nécessite que les cendres soient dépourvues de tout élément inerte tel que les clous, morceaux de ferraille, pointes, etc. qui risquent d'endommager gravement l'épandeur (blocage des vis). De même, il est préférable que les cendres ne comportent pas de concrétions qui bouchent les trous de la rampe d'épandage. Un criblage de ces cendres est fortement recommandé.

Le coût moyen d'épandage est de 20 € / tonne (les coûts de criblage sont à rajouter mais sont très difficilement estimables).

b. Cendres humides

Deux types de matériel répondent aux attentes fixées pour l'épandage des cendres humides. Le premier est un épandeur à fumier, à hérissons verticaux, muni d'une porte guillotine. Le second est également un épandeur à fumier, muni de hérissons verticaux et d'une table d'épandage.

L'épandeur à hérissons verticaux et à porte guillotine est constitué d'une caisse monocoque. Cette caisse est munie d'un tapis qui peut être à avance hydraulique et commande électrique. Un régulateur de débit à pression compensée permet une variation de vitesse. Une trappe arrière guillotine débouche sur 2 hérissons verticaux de 4 ou 5 spires. Un éparpilleur est également présent et permet d'épandre les cendres sur une largeur d'environ 6-7 m. Ce matériel permet d'épandre à doses très faibles (1 t/ha) et propose une très bonne répartition des cendres au sol.

Le second type d'épandeur est constitué d'une caisse munie d'un tapis à vitesse variable qui se termine par deux hérissons verticaux puis une porte. Les produits chargés dans l'épandeur sont

émiettés par les hérissons, projetés contre la porte et tombent sur la table d'épandage. Cette table est constituée de 2 ou 4 plateaux qui propulsent les produits sur le sol. Ces tables offrent des largeurs de travail un peu plus importantes (10 à 12 m). Ce système permet également de travailler à des doses inférieures à 10 t/ha tout en conservant une bonne qualité de répartition transversale.

Pour garantir un épandage optimal, les cendres doivent être chargées correctement dans la caisse. Leur répartition transversale dans la caisse doit être homogène. Il faut également veiller à ce qu'elles ne prennent pas en masse lors de leur stockage. Il faut également noter qu'il est difficile d'obtenir une répartition homogène en-dessous de dix tonnes à l'hectare avec ce type d'épandeur. Ce matériel devrait donc être privilégié pour l'épandage en mélange avec des matières organiques.

Le coût moyen d'épandage est de 15 € / tonne.

c. Essais d'épandage de cendres réalisés par Agra-Ost

Deux essais d'épandage de cendres, l'un en prairie et l'autre en forêt ont été mis en place par Agra-Ost en 2012 et sont actuellement en cours. Les objectifs de ces essais sont d'étudier l'effet de l'épandage de plusieurs doses de cendres sur la production végétale et sur le sol.

L'essai réalisé **en prairie** est situé à Outrewarche (commune de Waimès), en Haute Ardenne sur une prairie permanente mixte (fauche et pâturage). La Figure 1 représente une photo aérienne de la prairie où a été implanté l'essai et la Figure 2, le plan de l'essai ainsi que les traitements appliqués.



Figure 1 : photo aérienne du site d'essai.

Chacune des parcelles a reçu une dose de 16 m³/ha de lisier de bovins. La prairie a été coupée deux fois en ensilage et une fois pâturée. Après chaque coupe, 50 unités d'azote minéral ont été apportées sous forme de nitrate d'ammoniaque. Quatre des modalités ont reçu des cendres à raison de 4,44 ou 8,88 t/ha, seules ou en complément d'un engrais calcaire (biocal). Une des modalités a reçu uniquement un engrais calcaire (biocal) et une autre est fertilisée seulement avec un engrais P K, dont la dose apportée est celle recommandée dans l'avis de fumure, réalisé par le Centre de Michamps.

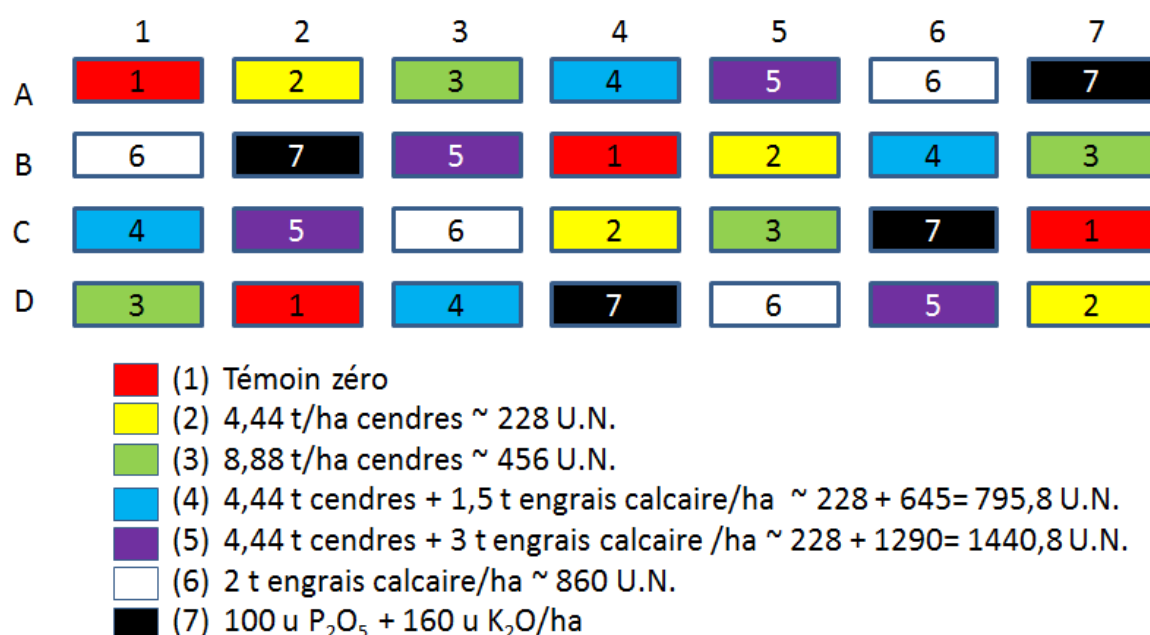


Figure 2 : Schéma de l'essai en prairie et répartition des modalités.

Les cendres utilisées dans cet essai sont des cendres de l'installation de cogénération « Renogen », qui fonctionne au bois. Elles ont été transportées et stockées en big-bag. Les cendres épandues sont des cendres humides (environ 80% de matière sèche) qui ont été tamisées avant l'épandage. Le Tableau 15 et le Tableau 16 détaillent la composition en éléments fertilisants et les teneurs en ETM des cendres épandues (colonnes jaunes). Il y a deux charges différentes de cendres, car elles ont été épandues en deux fois.

Tableau 15 : Composition en éléments fertilisants des cendres utilisées dans l'essai en prairie. Les colonnes surlignées en jaune représentent la fraction des cendres effectivement épandues.

	1ère charge	1ère charge partie fine	1ère charge partie grossière	2ème charge	2ème charge partie fine	2ème charge partie grossière
<i>Kg/tonne de produit frais</i>						
N	0,46	***	***	***	***	***
K₂O	5,85	5,89	3,76	5,29	5,8	3,59
P₂O₅	5,43	6,71	5,12	5,75	6,39	3,73
Na₂O	1,09	1,43	1,21	1,28	1,45	0,97
MgO	5	5,24	3,69	5,18	4,9	2,51
CaO	44,43	47,79	37,25	39,34	41,51	29,8

Les cendres ont été dans un premier temps tamisées manuellement à l'aide d'un tamis de 12 mm. La partie dite fine, qui a été épandue sur l'essai en prairie, reprend donc des particules inférieures à 12 mm. La partie dite grossière n'est pas utilisable en prairie en raison de la présence de nombreux corps étrangers comme des morceaux de fer, des clous, etc. La granulométrie de chaque partie des deux charges a ensuite été mesurée en laboratoire (voir Tableau 17).

Tableau 16 : Teneurs en ETM dans les cendres utilisées dans l'essai en prairie. Les colonnes surlignées en jaune représentent la fraction des cendres effectivement épandues.

	1 ^{ère} charge	1 ^{ère} charge partie fine	1 ^{ère} charge partie grossière	2 ^{ème} charge	2 ^{ème} charge partie fine	2 ^{ème} charge partie grossière
	<i>mg/kg de MS</i>					
Cd	0,08	0,2	0,53	0,067	0,033	0,033
Cu	82,69	115,36	159,66	173,56	***	174,33
Ni	19,61	26,8	35,23	29,56	56,367	63,26
Pb	14,59	64,1	37,7	34,5	***	25,33
Zn	53,38	147,13	122,93	130,36	***	148
Hg	0,84	0,007	0,008	0,013	0,021	0,009
Cr	27,54	57,9	93,46	113	66,2	82,67

Tableau 17 : Granulométrie des cendres utilisées dans l'essai en prairie. Les colonnes surlignées en jaune représentent la fraction des cendres effectivement épandues.

	1 ^{ère} charge cendres	1 ^{ère} charge partie fine	1 ^{ère} charge partie grossière	2 ^{ème} charge cendres	2 ^{ème} charge partie fine	2 ^{ème} charge partie grossière
	<i>%</i>					
Tamis en 0,20 mm	6,49	6,89	1,49	5,68	5,89	1,62
Tamis en 0,50 mm	7,87	14,63	2,41	10,27	16,11	1,93
Tamis en 1,00 mm	5,89	14,03	1,52	8,63	16,69	0,63
Tamis en 2,00 mm	7,77	19,04	1,43	12,29	20,53	0,33
Tamis en > 2,00 mm	71,97	45,41	93,15	63,14	40,78	95,5
TOTAL	100	100	100	100	100	100

Deux coupes et un pâturage ont été réalisés sur l'essai. Le rendement a été mesuré pour chaque coupe ainsi qu'avant le pâturage. Pour détecter des éventuelles différences de pâturage d'un traitement à l'autre, dix mesures de la hauteur de l'herbe ont été prises dans chaque modalité avant et après le pâturage.

La modalité qui a reçu une fertilisation supplémentaire en P et K a atteint le rendement le plus haut avec 10,9 T de MS. Les deux modalités ayant reçu des quantités relativement importantes d'amendement calcaire (modalités 8,88 T de cendres / ha et 4,44 T de cendres + 3 T biocal / ha) ont atteint des productions élevées relativement semblables de 10,2 T de MS / ha. Le témoin qui a reçu uniquement le lisier a produit 9,6 T MS, soit le rendement le plus faible toutes modalités confondues.

La modalité fertilisée au P et K a mieux été pâturée que les autres modalités, mais il n'y a pas de grande différence entre les autres modalités.

Le pH ainsi que les éléments nutritifs du sol ont été évalués pour les différentes modalités.

La Figure 3 représente l'influence des traitements sur les éléments nutritifs du sol. La base de référence est le témoin qui a reçu uniquement l'apport de lisier.

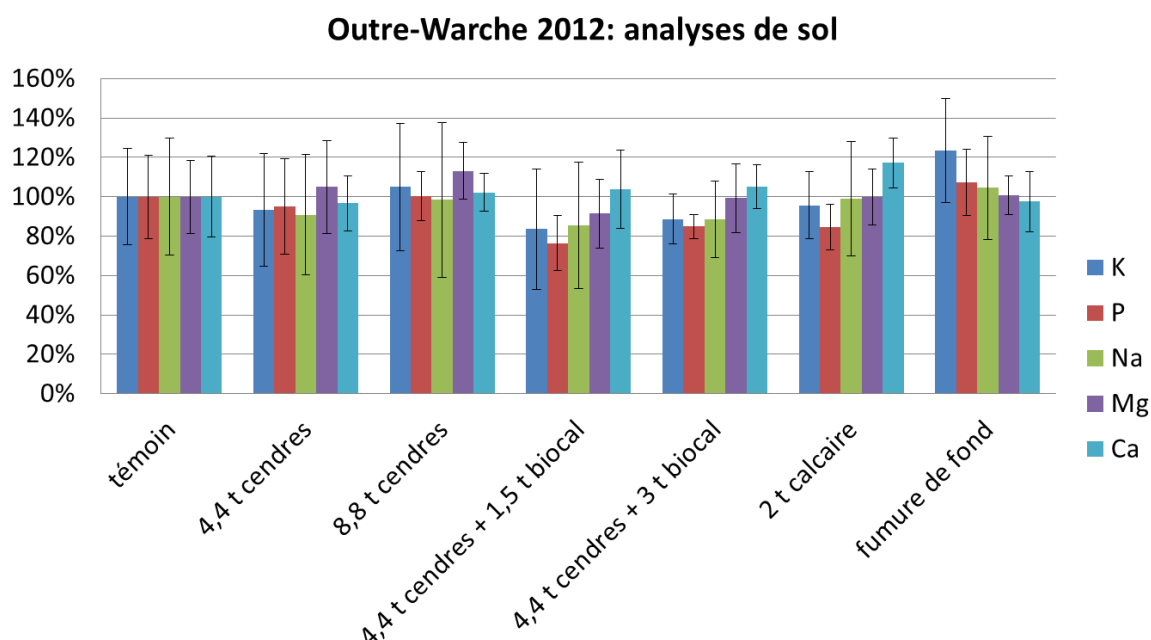


Figure 3 : Influence des traitements sur les éléments nutritifs du sol par rapport à l'analyse de départ.

Les résultats obtenus sont à considérer prudemment étant donné qu'il s'agit des analyses réalisées après une année d'essai. Les essais concernant ce type d'apport doivent être considérés sur une période de plusieurs années afin de pouvoir tirer des conclusions fiables.

Pour chaque modalité, la concentration de la plupart des éléments ont tendance à diminuer suite aux apports effectués. La concentration en P et K diminue sauf pour les modalités 8,8 t de cendres et la fumure de fond. Les teneurs en Ca restent relativement inchangées pour toutes les modalités à l'exception des deux tonnes de calcaire. Les teneurs en Na et Mg diminuent également dans toutes les modalités (excepté pour les 8,8 tonnes de cendres dans le cas du Mg). L'explication de cette diminution de richesse en éléments nutritifs dans le sol pourrait résider dans une absorption plus élevée de ces éléments par la végétation. Les analyses prévues sur le fourrage pourront apporter plus d'informations à ce sujet.

Le pH a été mesuré dans le sol pour chaque modalité. Les valeurs obtenues sont présentées dans le Tableau 18. Le pH KCl se situait avant l'épandage à 4,4. Il a augmenté pour toutes les modalités mises en place jusqu'à environ 4,7. Le pH du témoin a évolué de la même manière que celui des autres modalités, ce qui montre que les traitements apportés n'ont pas encore eu de grand impact sur le pH du sol. La modalité traitée avec la fumure de fond P K est la seule pour laquelle le pH est un peu plus faible.

Tableau 18 : Analyse du pH avant et après l'épandage pour l'essai en prairie.

	pH H ₂ O	pH KCl
	analyse de départ	
Avant épandage	5,2	4,4
	moyennes après l'épandage	
témoin	5,73	4,68
4,4 t cendres	5,68	4,68
8,8 t cendres	5,68	4,73
4,4 + 1,5	5,68	4,68
4,4 + 3	5,70	4,70
2 t calcaire	5,70	4,73
fumure de fond	5,53	4,55

L'essai en forêt est installé sur une parcelle forestière située à Mont-le-Soie sur la commune de Vielsalm, en Ardenne. La parcelle de 83 ares 25 ca a été mise à blanc en janvier 2010 et broyée en février 2012.

La plantation de douglas a été effectuée du 23 au 28 avril 2012. Il s'agit d'un essai « longue durée », qui est destiné à rester en place pour les 60 années à venir. L'effet des cendres sur la croissance des arbres et sur le sol (pH, teneurs en éléments nutritifs) sera observé durant toute cette période.

Les données obtenues jusqu'à présent concernent les résultats d'une seule année (2012). Le plan de l'essai est présenté à la Figure 4.

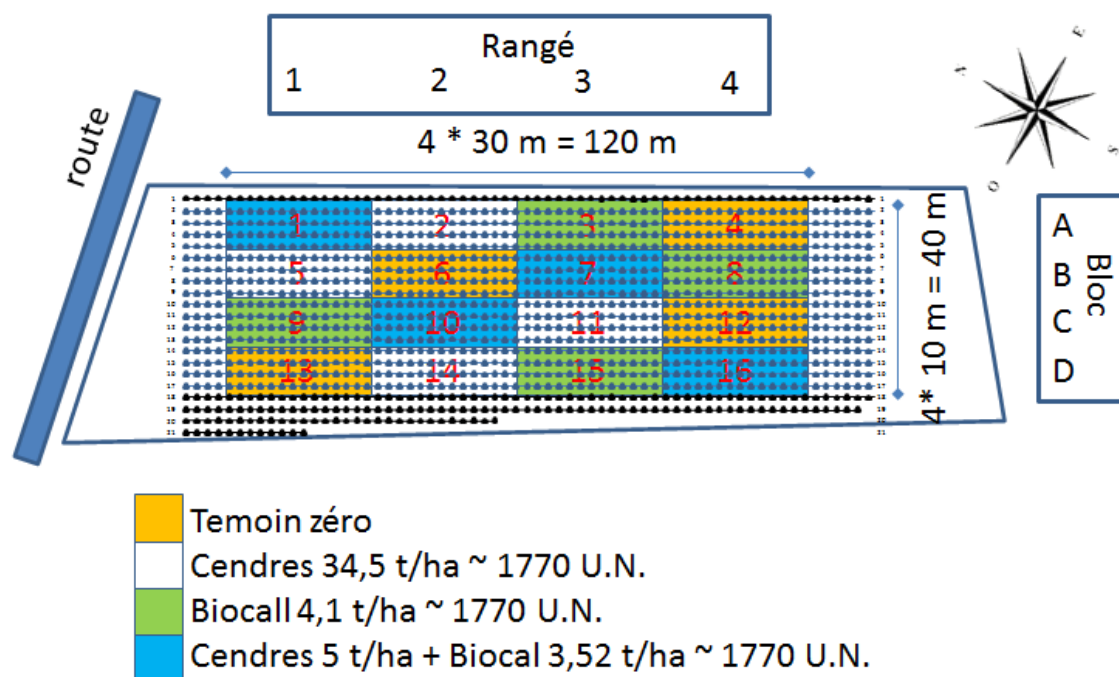


Figure 4 : Schéma de l'essai en forêt et répartition des modalités.

Quatre modalités sont testées dans cet essai à raison de quatre répétitions chacune.

Les modalités mises en place sont les suivantes :

- Témoin zéro : aucune fertilisation
- 34,5 t cendres/ha équivalentes à 1770 unités de VN/ha
- 4,1 t biocal/ha équivalentes à 1770 unités de VN/ha
- 5 t cendres/ha et 3,52 T biocal/ha équivalentes à 1770 unités de VN/ha

L'apport en CaO correspond pour chaque modalité traitée à 1770 unités neutralisantes/ha. Cet apport a été décidé sur base d'une fumure classique en milieu forestier qui est de 3 t/ha de dolomie. La dolomie est un amendement à 33% de CaO et 18% de MgO avec une VN de 58. 3 t/ha de dolomie représentant un apport d'environ 1740 VN, ce qui est semblable à l'apport de cendres et d'amendement calcaire effectué.

Le diamètre et la hauteur des arbres ont été mesurés, sans voir de grandes différences entre les différentes modalités. Comme pour l'essai en prairie, les éléments nutritifs du sol (voir Figure 5) et le pH (Tableau 19) ont été mesurés.

Les cendres ne semblent pas avoir encore eu de grand effet sur les teneurs du sol en phosphore, en potassium et en manganèse. Par contre, les teneurs en calcium et en magnésium ont augmenté fortement.

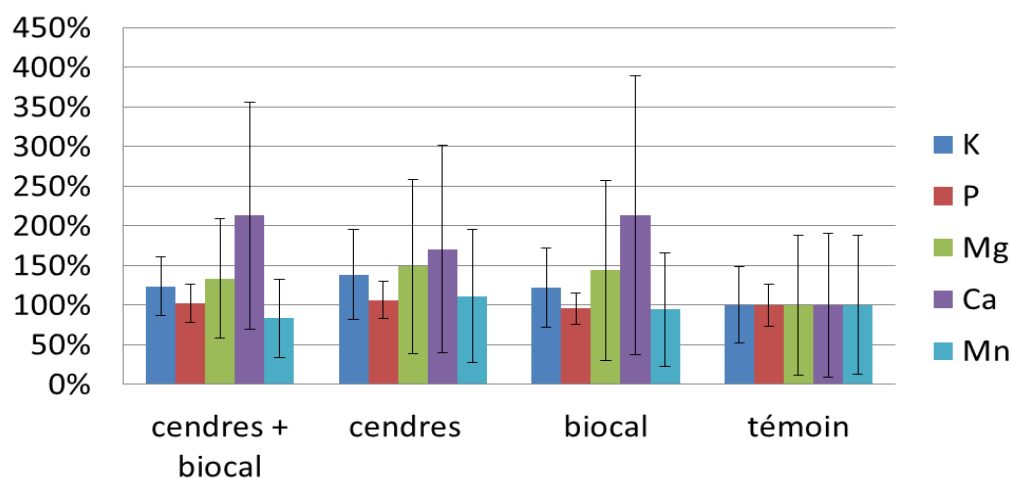


Figure 5 : Influence des traitements sur les éléments nutritifs du sol en forêt.

Malgré les fortes augmentations des teneurs en calcium et magnésium dans le sol, on ne constate pas de changements importants de pH de sol en fonction des modalités. Les changements éventuels du pH devront cependant être suivis au cours du temps.

Tableau 19: Analyse du pH du sol pour l'essai en forêt.

	pH	
	H ₂ O	KCl
	Analyse avant épandage	
	4,225	3,625
	Analyses après épandage	
cendres + biocal	4,275	3,675
cendres	4,35	3,725
biocal	4,325	3,775
témoin	4,35	3,775

4.4.2. Epandage en mélange avec des matières organiques

L'épandage des cendres en mélange avec diverses matières organiques peut être réalisé à l'aide des épandeurs utilisés habituellement pour les matières en question pour peu que leur état initial n'ait pas été modifié de façon trop importante. Comme expliqué au point 2.2.2, une quantité de cendres trop importantes dans du digestat liquide peut poser des problèmes de solubilité et provoquer l'accumulation de sédiments dans le fond de la cuve.

Une autre possibilité de valorisation des cendres (sèches) est leur mélange avec du fumier. Il faut cependant pouvoir s'assurer que l'incorporation des cendres dans le fumier soit homogène. La meilleure solution envisageable est de placer les cendres directement dans l'épandeur, entre deux couches de fumier, de façon homogène. Connaissant la dose de fumier à épandre sur une surface donnée, la quantité de cendres à mélanger avec ce fumier peut être facilement déduite.

D'après une étude réalisée en 2012 par Materechera, l'ajout de cendres de bois à deux types de sol (limon argileux et limon sableux) mélangées à du fumier de bovins ou de poulets a significativement augmenté le pH, ce qui rend le P plus disponible dans le sol. La cendre de bois pourrait être utilisée en mélange avec du fumier partiellement décomposé sans compromettre la disponibilité du phosphore pour les cultures.

4.4.3. Epandage après prétraitement

Au cours du projet RecAsh, deux modalités d'épandage des granulés de cendres ont été testées : une par hélicoptère et l'autre par un transporteur forestier équipé d'une benne et de disques d'épandage.

Pour l'épandage par hélicoptère, les cendres sont d'abord chargées dans le conteneur d'épandage par un chargeur « Bobcat », qui, en même temps tamise et écrase les granules de cendres de trop grandes dimensions. Afin d'accélérer le chargement et l'épandage, deux conteneurs sont prévus (charge de 500kg chacun) : un est en cours de chargement tandis que l'autre est utilisé pour l'épandage. Le trajet de l'hélicoptère est déterminé par GPS.

Dans le cas d'un épandage par transporteur forestier, les cendres sont chargées par le grappin du transporteur, pour une charge de 4,5 tonnes. Le transporteur doit cependant emprunter les routes puis les chemins forestiers. La charge doit donc être adaptée au trajet prévu.

L'avantage de l'épandage par hélicoptère est qu'il peut être réalisé en toute saison pour autant que les conditions de vol soient suffisantes, contrairement au transporteur forestier qui est parfois arrêté par les conditions hivernales. L'épandage par voie aérienne est cependant plus coûteux.

4.4.4. Introduction dans des engrais minéraux

L'engrais développé par la société Wal.Agri (KalcipHos) est un engrais de fond à épandre en début d'automne, avant une culture intermédiaire. Il est sous forme de poudre et la dose conseillée est de 1 – 1,5 tonne/ha (Roiseux O., 2013).

5. CONCLUSION

Les cendres peuvent être valorisées de plusieurs façons, dont certaines correspondent à des utilisations ciblées. L'utilisation de cendres pures est la plus simple, mais également celle qui comporte le plus de risques, environnementaux ou sanitaire, via l'envol de poussières fines pendant le stockage, le transport ou l'épandage. D'un côté pratique, ce mode de valorisation est exempt de traitement préalable des cendres qui peuvent dès lors être utilisées directement et qui comporte les concentrations en éléments fertilisants les plus élevées.

L'utilisation en mélange avec des matières organiques est un mode d'utilisation qui conviendrait mieux aux exploitants agricoles, qui utilisent fréquemment des matières organiques en temps normal et qui sont équipés pour de tels épandages.

Le prétraitement des cendres a majoritairement été étudié dans un contexte forestier. La disponibilité des éléments fertilisants peut être lente en forêt alors qu'en agriculture, les éléments nutritifs doivent être disponibles pour la culture en cours (càd dans les quelques mois à venir). Les cendres prétraitées sont donc à réserver à un épandage en forêt.

Enfin, les cendres intégrées dans la fabrication d'engrais minéraux sont jusqu'à présent produites à des fins agricoles. L'intérêt dans le cadre de la valorisation des cendres de bois est de pouvoir obtenir un produit final complexe très stable.

6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADEME (2001). Gestion et valorisation des cendres de chaufferie bois. Etude des cendres de chaufferie bois dans le cadre du « programme bois-énergie 1999-2006 ». 97p.
- Andersson, L., Emilsson, S., Rinne, S., Korpijärvi, K., Isännäinen, S., Paappanen, T. and Lindh, T. (2004). *Regular Recycling of Wood Ash to Prevent Waste Production (RecAsh)*. Case Study Evaluation Report. LIFE03 ENV/S/000598. 46p.
- Anonyme (2005). *Fiche n°4 : La valorisation agronomique des cendres de bois*. Collectivité Bois énergie. 6p.
- Bruyère, C. (2013). *La valorisation des cendres de bois en France*. Bioénergie international n°23 février 2013. 16-21.
- Destain, JP. (2008). Support du cours de « Matières fertilisantes ».
- Fourrage-Mieux (2008). *Les amendements basiques ou chaulage des prairies*. URL : <http://www.fourragesmieux.be/SSSMentretienchaulage.htm>, consulté le 04/06/2013
- Genot, V., Colinet, G., Brahy, V., Bock, L. (2007). *L'état de fertilité des terres agricoles et forestières en région wallonne (adapté du chapitre 4 - sol 1 de « L'État de l'Environnement wallon 2006-2007 »)*. Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 2009 13(1), 121-138
- Hébert, M. et Breton, B. (2008). *Recyclage agricole des cendres de bois au Québec – Etat de la situation, impacts et bonnes pratiques agro-environnementales*. Agrosolutions 19 (2) : 18-33
- Insam H, Franke-Whittle IH, Knapp BA, Plank R. (2009). *Use of wood ash and anaerobic sludge for grassland fertilization: Effects on plants and microbes*. Die Bodenkultur 2009; 60:43–55.
- Korpilahti, A., Moilanen, M. and Finér, L. (1998). *Biomass ash utilization in Finland*. Joule III Programme / International Biomass Ash Workshop, Graz, Austria, October 1998.
- Kuusela, S. (2003). Ash granulation and forest spreading in practise. In: Presentations of Ash in growing of peatland forests seminar. 5.6.2003, Helsinki, Finland.
- Logiag (2013). *Questions fréquemment posées sur l'épandage de chaux*. URL : <http://www.logiag.com/menu.php?idCategorie=36&idDetail=245>, consulté le 24/04/2013
- Materchera S. A. (2012). *Using Wood Ash to Ameliorate Acidity and Improve Phosphorus Availability in Soils Amended with Partially Decomposed Cattle or Chicken Manure*. Communications in Soil Science and Plant Analysis Vol. 43, Iss. 13, 2012
- Mivière, J.M. (2008). *Les cendres des chaudières automatiques au bois et leurs possibilités de valorisation*. Les cahiers du Bois énergie : Fascicule 1. Bois énergie 66. 8p.
- Olsson J., Bernesson S., Rodhe L., Salomon E. and Hansson P.A. (2010). *Admixture of cereal ash into liquid biogas digestate*. Proceedings of the 14th Ramiran International Conference 12-15 September 2010.
- Väätäinen, K., Sikanen, L. & Asikainen, A. (2000). *Logistics of recycling granulated wood ash back to forest*. University of Joensuu, Faculty of Forestry, Research Notes 116. Joensuu 2000.
- Vesterinen, P. (2003). *Wood ash recycling. State of the art in Finland and Sweden*. Research report, PRO2/6107/03, October 2003

Communications personnelles

- Luxen, P. (2013). *Informations sur la pratique du chaulage sur parcelles forestières*.
- Roiseux, O. (2013). *Informations sur les engrais minéraux à base de cendres de la société Wal.Agri*.

CHAPITRE 4.
ETUDE DE FAISABILITE ET ETUDE DES ASPECTS
ECONOMIQUES

1. OBJECTIF

L'objectif de ce chapitre est de réaliser une étude économique et de comparer l'impact environnemental des cendres avec d'autres matières fertilisantes

2. EVALUATION DE LA VALEUR D'UTILISATION (VALEUR FERTILISANTE) DES CENDRES

Ce point a déjà été développé au point 4 du livrable 2 en reprenant la valeur fertilisante des cendres en fonction de différentes matières premières. Ces valeurs sont reprises dans le tableau 1.

Tableau 20 : Valeur fertilisante des cendres en fonction de différentes formes de combustible.

Eléments	Plaquettes forestières		Issus de déchets de bois non traités		Ecorces		Issus de l'industrie du bois		Granulés		Valeur vrac en ferme (€/unité)
	kg/t	VF	kg/t	VF	kg/t	VF	kg/t	VF	kg/t	VF	
Na ₂ O	8,5	2,5	13,5	4,1	11,2	3,4	4,8	1,4	7,5	2,3	0,3
K ₂ O	64,7	42	36,4	23,7	46,3	30,1	39,9	25,9	59	38,4	0,65
MgO	41,7	25	28,9	17,3	39,6	23,8	34,6	20,7	45,2	27,1	0,6
CaO	344	34,4	186	18,6	390	39,0	342	34,2	317	31,7	0,1
P ₂ O ₅	41,8	71,1	28,7	48,9	15,3	26,0	13,9	23,6	13,5	23	1,7
Valeur totale (€/t)		175,1		112,5		122,2		105,9		122,3	

3. EVALUATION DU COÛT/BÉNÉFICE LIÉ À LA COMMERCIALISATION OU L'UTILISATION DES CENDRES

D'après Mivière (2008), le coût d'élimination des cendres en France vers un CET est de l'ordre de 75 €/tonne, transport non compris. En Wallonie, d'après une information prise auprès de la société ERDA, le prix de cette élimination serait d'à peu près 30 €/tonne. Comme expliqué dans le livrable 1, la plupart des cendres produites en Wallonie sont éliminées en CET, ce qui représente un coût important pour les installations de production d'énergie et/ou de chaleur fonctionnant au bois. Pour de grosses installations, telle que Burgo Ardennes, qui élimine ses cendres en CET, cette étape peut donc représenter une somme de plus de 700.000 €. Les installations de dimension plus réduite doivent tout de même supporter des sommes conséquentes en fonction du volume de cendres produites.

La valorisation (en agriculture et/ou en forêt) des cendres présentant une qualité satisfaisante peut éviter aux gérants de ces installations de supporter le coût d'élimination des cendres en CET. Afin de valoriser les cendres de manière durable, il est bien sûr nécessaire de s'assurer au préalable qu'elles satisfont aux conditions nécessaires à leur utilisation, sans risques d'accumulation des ETM dans les sols. D'après Mivière (2008), le coût d'une analyse de cendres en France est d'environ 300 € (coût qui peut être pris en charge collectivement et réparti sur l'ensemble du parc chaufferies utilisant le même type de bois). Les analyses réalisées sur les cendres utilisées dans les essais mis en place par Agra-Ost ont coûté 236 € et ont été effectuées au laboratoire de Michamps selon la méthode de l'absorption atomique (méthode de référence).

Du côté des agriculteurs et/ou des propriétaires forestiers, la possibilité d'utiliser des cendres sur leurs parcelles représenterait une économie d'engrais minéraux. La valeur monétaire des cendres basée sur leur composition en éléments fertilisants et sur la valeur vrac de ces éléments en ferme est décrite au point 2. Sur cette base, les utilisateurs potentiels pourraient espérer économiser entre 100 et 170 €/tonne. Selon ces informations, les producteurs ainsi que les utilisateurs pourraient sortir gagnants d'une utilisation raisonnée de cendres de bois en agriculture ou en forêt.

Le Tableau 21 présente les économies financières évaluées dans le cas de l'utilisation des cendres par les agriculteurs/forestiers dans le cas où le producteur ne fait pas payer ses cendres. Dans ce cas, le producteur économise le coût d'élimination des cendres en CET et l'agriculteur économise l'équivalent d'éléments minéraux qu'il devrait dans le cas contraire apporter sous forme d'engrais. Les valeurs reprises ci-dessous prennent en compte les valeurs du Tableau 20 corrigées par la disponibilité de chaque élément.

Tableau 21 : Synthèse du coût/bénéfice lié à l'utilisation des cendres, pour le producteur de cendres et l'agriculteur utilisant des cendres.

	Economie potentielle pour l'agriculteur ou l'exploitant forestier (€/t)	Economie potentielle pour le producteur (€/t)	Coût d'analyse (€)	Total
Elimination en CET	-	30	200 - 300 (analyse)	30 €/t + 200 - 300 €
Cendres seules	95 - 140	-	-	95 - 140 €/t
Prétraitement	55 - 125	-	-	55 - 125 €/t

Pour les producteurs d'engrais également, les cendres de bois peuvent représenter une source d'économie. Comme expliqué dans le livrable 3, la société Wal.Agri produit un engrais PK fabriqué à partir de cendres de fientes de volailles et de céréales. L'intérêt des cendres de bois dans ce cas dépend d'une part de leur composition qui devra être satisfaisante afin de rentrer dans la fabrication de cet engrais et d'autre part, de l'intérêt économique qu'elles représentent par rapport aux cendres utilisées actuellement (Roiseux, 2013).

4. REALISATION D'UN BILAN ENVIRONNEMENTAL DES CENDRES PAR RAPPORT A D'AUTRES SOURCES DE MATIERES FERTILISANTES

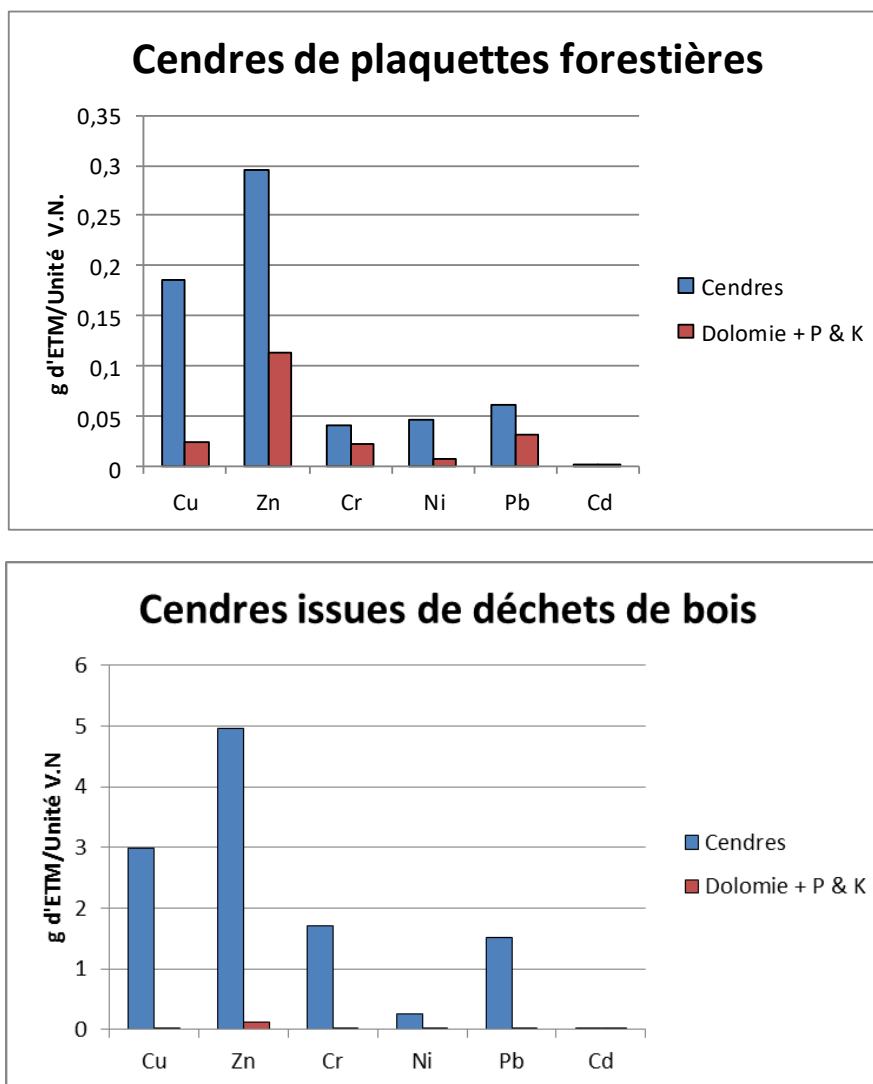
4.1. Quantité d'ETM par unité de valeur neutralisante

La réglementation en vigueur limite l'utilisation de matières sur les sols sur base de leur concentration en ETM.

Afin d'évaluer le risque de contamination des sols, la démarche utilisée ici est de comparer, pour un apport équivalent de VN, de P et de K, la quantité d'ETM apportée par des engrais minéraux (dolomie, phosphate naturel et sulfate de potassium) et par les cendres des différentes origines identifiées dans le cadre de ce projet. Les teneurs utilisées pour les matières autres que les cendres ont été fournies par Piazzalunga (2013).

Le principe du calcul est le suivant : les quantités de P, de K et des différents ETM apportés par les cendres sont calculées pour une unité de VN. Les apports d'ETM par l'engrais calcaire (sous forme de dolomie) sont également calculés pour une unité de VN. Les quantités d'engrais phosphatés (phosphate naturel) et potassiques (sulfate de potassium) à apporter sont calculées sur base des quantités de P et K apportées par une unité de VN de cendres et les ETM provenant de ces engrais sont calculés d'après ces quantités.

La Figure 6 montre les apports d'ETM par les cendres et par les engrais minéraux, pour une unité de VN et pour une quantité d'éléments fertilisants équivalente. Ces graphiques montrent que les cendres de plaquettes forestières et celles issues de l'industrie du bois apportent des quantités d'ETM plus importantes que les engrais minéraux mais qui restent dans un même ordre de grandeur. Par contre, pour les cendres issues de déchets de bois, les cendres d'écorces et les cendres de pellets, les quantités d'ETM dépassent largement celles apportées par les engrais minéraux, d'un facteur parfois supérieur à 100. Ceci est dû principalement à la VN et aux teneurs plus faibles en éléments fertilisants dans ces types de cendres.



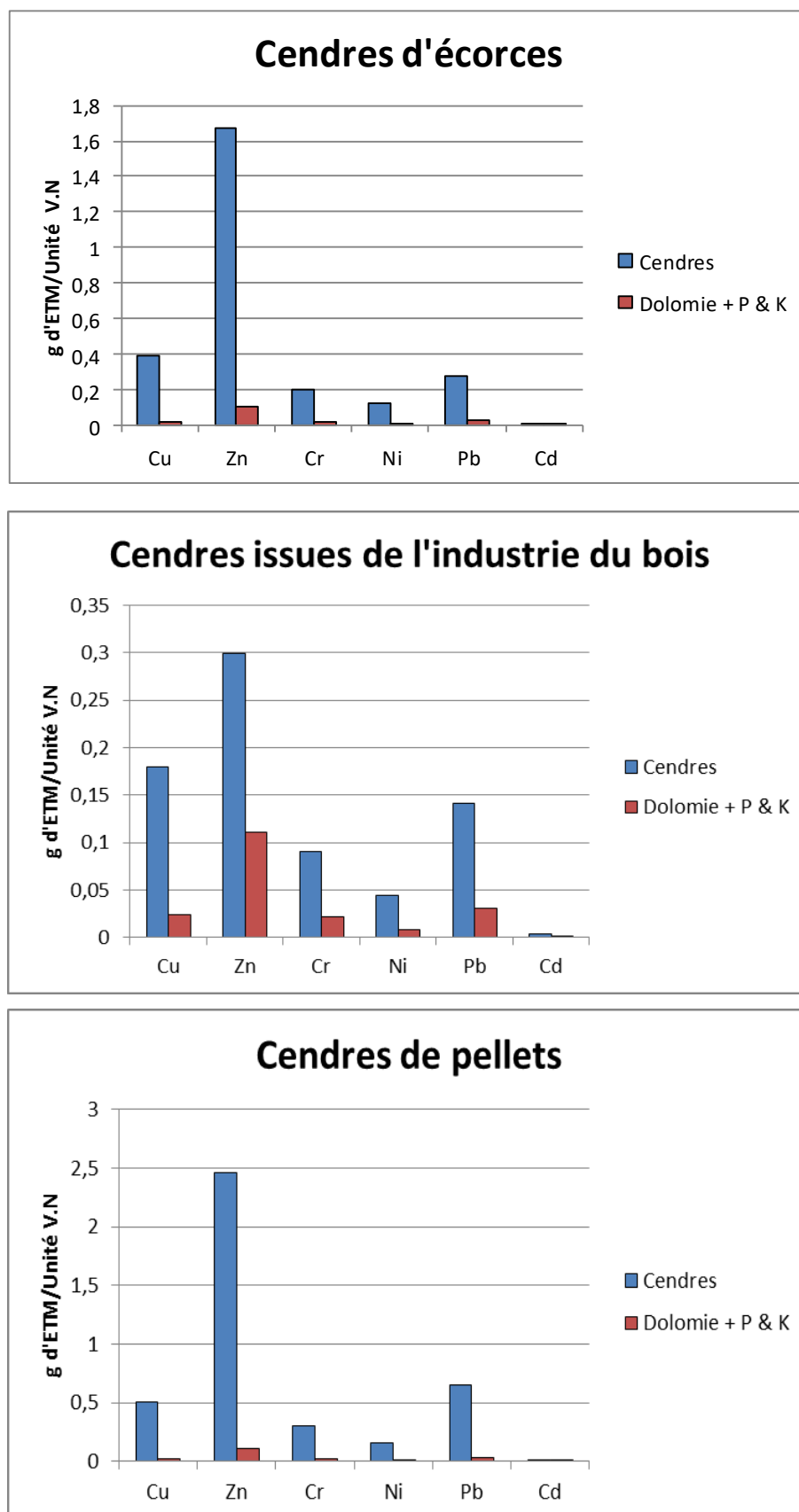


Figure 6 : Quantité d'ETM apportée pour une unité de VN de cendres et d'engrais minéraux.

4.2. Flux d'ETM

Afin d'évaluer le risque associé aux cendres, il est intéressant d'estimer les flux d'ETM apportés par des quantités représentatives de cendres apportées. Par ailleurs, les comparer à d'autres matières peut être intéressant également afin d'estimer leur impact relatif sur l'accumulation d'ETM dans les sols. Les teneurs des matières autres que les cendres ont été fournies par Piazzalunga (2013).

La Figure 7 montre la comparaison des flux d'ETM apportés par un épandage de 2000 VN de cendres et de boues de différentes origines en relation avec les quantités maximales fixées par la norme B2. On remarque que les cendres de déchets de bois sont les plus chargées en ETM et se rapprochent parfois du flux maximum (jusqu'à près de 90% du flux max pour le Cd). Les boues urbaines amènent également une quantité élevée d'ETM.

La Figure 8 reprend les mêmes valeurs que la Figure 7 à l'exception des cendres issues de déchets de bois. Les cendres d'origines autres que celles issues de déchets de bois apportent moins d'ETM, qui ne dépassent jamais les 20% et sont limités le plus souvent à moins de 10% du flux maximum autorisé (voir Figure 8).

La Figure 9 présente les flux d'ETM apportés d'une part par des cendres de bois de différentes origines et par deux types de chaux crues (dolomie et carbonate de calcium) par rapport aux limites maximales imposées par la norme B2. Comme expliqué dans le livrable 1, il s'agit de la norme à respecter dans le cas d'une volonté de valoriser les cendres (environnement.wallonie.be, 1995). Cette norme impose des limites de concentration en ETM dans les boues susceptibles d'être épandues sur les sols. Elle fixe également une quantité maximale qui peut être utilisée sur ou dans les sols exprimée en tonnes de matière sèche par hectare sur une période de trois ans. Cette quantité maximale est égale à 3 fois (pour une utilisation en prairie) et à 6 fois (pour les autres utilisations) la teneur de référence d'un ETM divisée par la teneur mesurée dans la matière. Les flux maximaux en ETM potentiellement autorisés sont donc de 6 fois les teneurs maximales de la norme B2 (on considère ici le cas d'un apport sur culture). Les flux considérés par ETM dans la Figure 9 sont calculés pour une quantité de matière nécessaire à l'apport de 2000 VN.

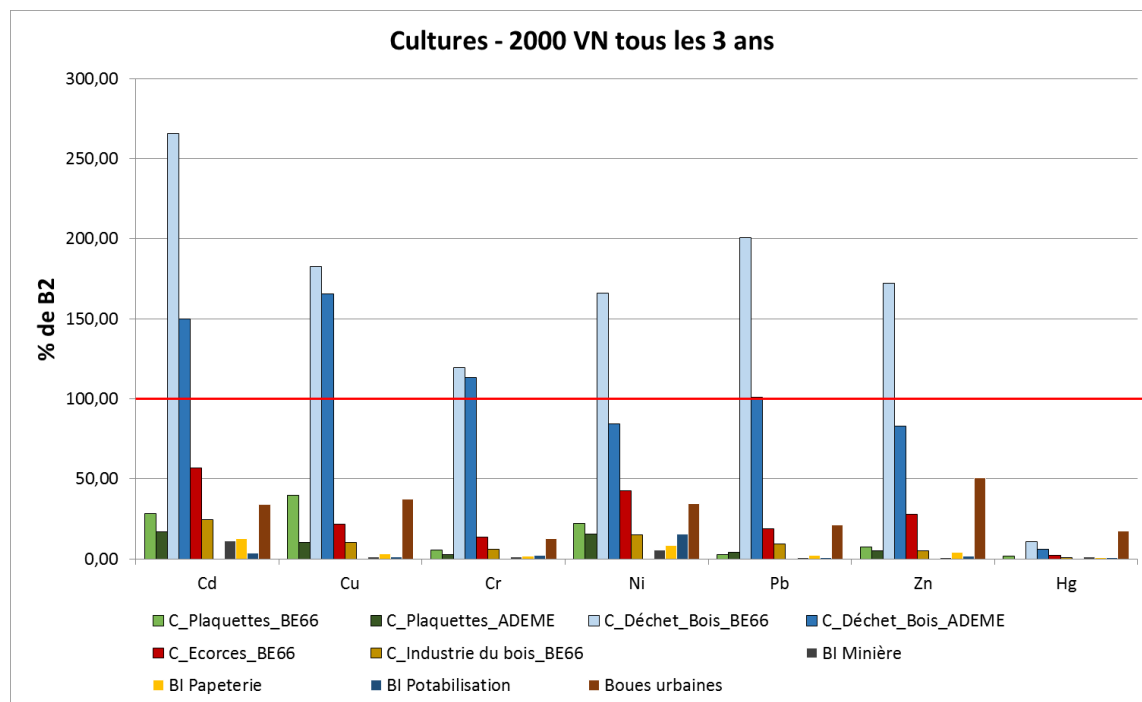


Figure 7 : Comparaison en fonction de la norme B2 des flux d'ETM apportés par des cendres de différentes origines et par des boues de différentes origines.

La Figure 9 montre que les cendres apportent de manière générale plus d'ETM que les chaux. Cependant, hormis les cendres d'écorces qui sont à l'origine d'un flux plus important d'ETM pour des VN équivalentes, les cendres d'autres origines n'apportent pas des quantités d'ETM très élevées et hormis les cendres d'écorces et à une exception près, elles sont toutes sous les 10% du flux maximum fixé par la norme B2.

Par ailleurs, les cendres de bois sont indissociables du processus de production de chaleur et/ou d'énergie. De ce fait, le dégagement de CO₂ dû à la combustion du bois, et donc à la production de cendres, est inévitable, que les cendres soient valorisées ou éliminées en CET. De plus, le bilan carbone de la filière bois énergie est considéré comme nul. Ce constat n'est pas applicable aux chaux utilisées habituellement, pour lesquelles de l'énergie est dépensée pour l'extraction et un dégagement de CO₂ est comptabilisé.

Une étude commandée par l'ADEME a été réalisée par le bureau d'études BIO Intelligence Service concernant le bilan environnemental du chauffage collectif (avec réseau de chaleur) et industriel au bois en 2005. Elle conclut que dans les émissions de métaux toxiques dans les sols, les cendres de bois sont les plus préjudiciables.

5. CONCLUSION

La valorisation agricole ou forestière raisonnée de cendres de bois peut présenter des avantages financiers pour l'ensemble des acteurs de la filière. En effet, leur valorisation permettrait d'éviter aux producteurs de payer pour leur élimination, aux exploitants agricoles ou forestiers d'économiser des engrais minéraux, voire aux fabricants d'engrais de diminuer leurs coûts grâce à

un prix éventuellement moins élevé des cendres de bois par rapport aux cendres de fientes de volailles ou de céréales.

La comparaison des cendres avec les différentes sources de matières fertilisantes montre que les cendres ont tendance à apporter plus d'ETM que les engrais minéraux pour la même action neutralisante. Les cendres issues de déchets de bois, malgré qu'ils soient non traités, apportent une quantité d'ETM largement supérieure aux valeurs fixées par la norme B2. Elles ont donc été rejetées dans le cadre de cette étude mais devraient cependant être prises en compte pour une éventuelle valorisation, sous réserve d'une analyse satisfaisante. En effet, les valeurs disponibles ici laissent à penser que ces déchets de bois ont été souillés, expliquant leur concentration élevée en ETM. Les cendres d'écorces ont montré également des flux relativement importants d'ETM, néanmoins inférieurs à la norme B2. Enfin, les cendres de plaquettes et de l'industrie du bois présentent des flux moins élevés mais toutefois plus importants que les engrais minéraux, particulièrement en Cd, en Cu et en Ni.

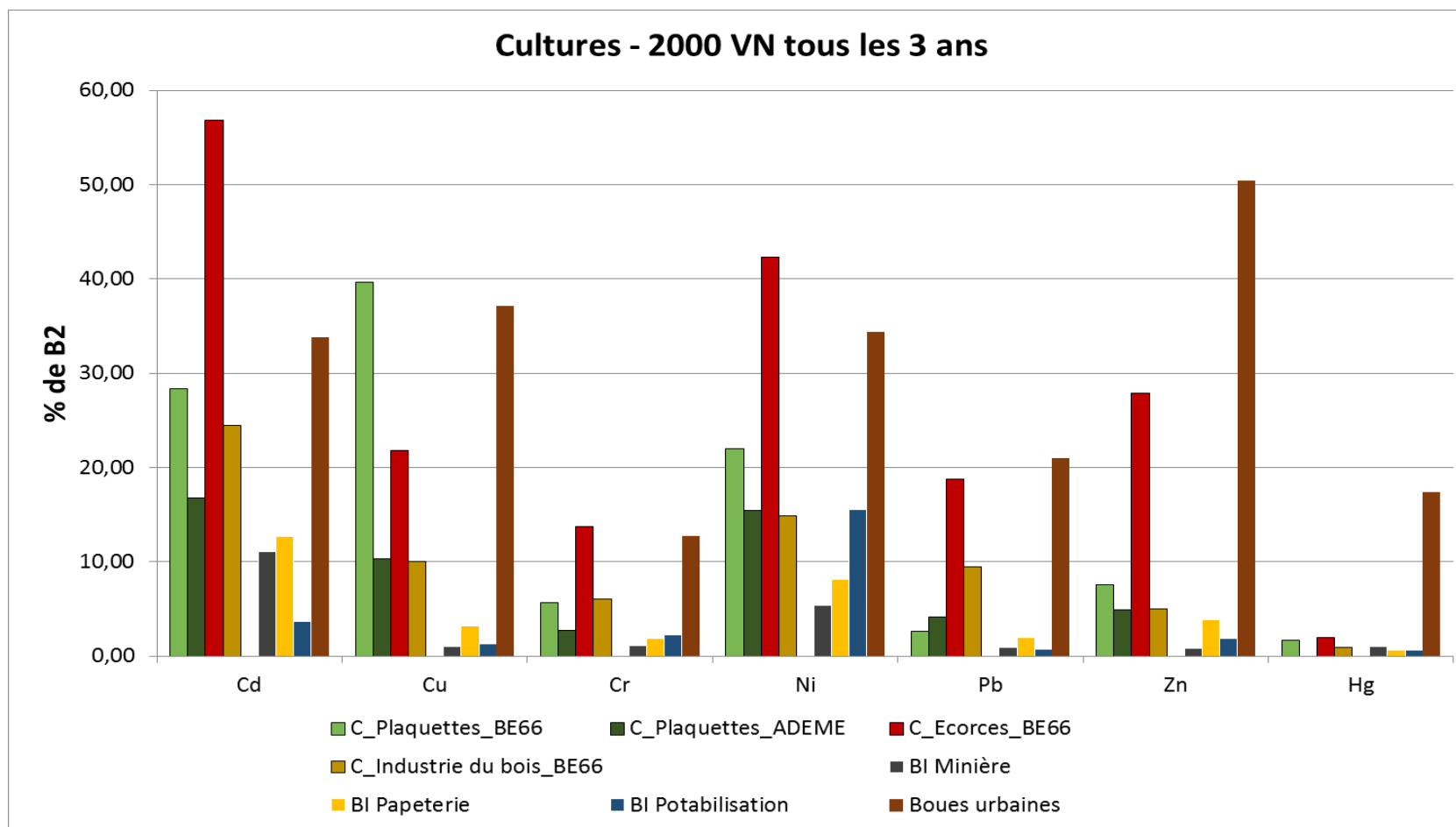


Figure 8 : Comparaison en fonction de la norme B2 des flux d'ETM apportés par des cendres de différentes origines et par des boues de différentes origines.

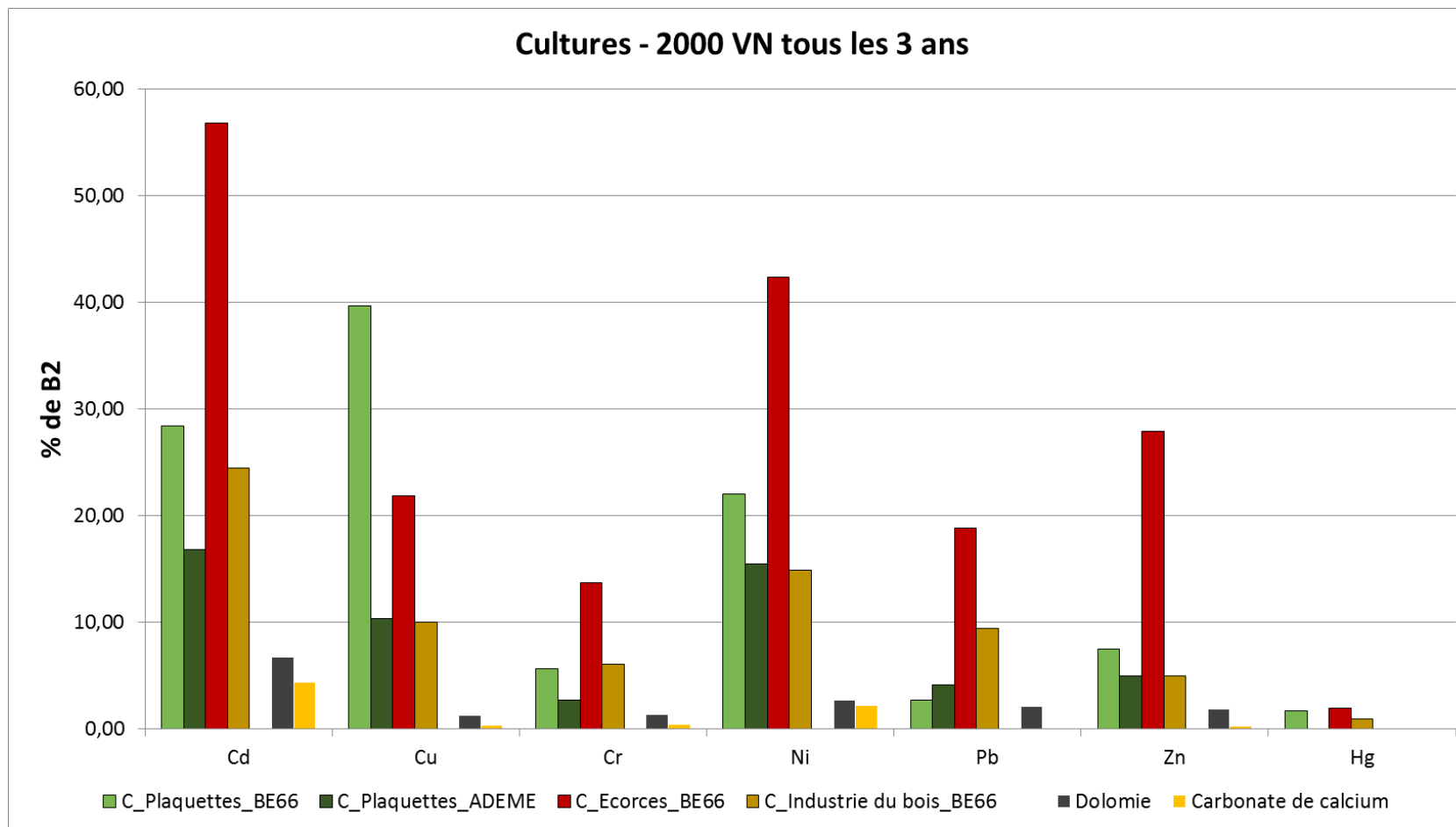


Figure 9 : Comparaison en fonction de la norme B2 des flux d'ETM apportés par des cendres de différentes origines et par deux types de chaux crues (dolomie et carbonate de calcium).

6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Environnement.wallonie.be (1995). 12 janvier 1995 - *Arrêté du Gouvernement wallon portant réglementation de l'utilisation sur ou dans les sols des boues d'épuration ou de boues issues de centres de traitement de gadoues de fosses septiques* (M.B. 12.04.1995). URL :

<http://environnement.wallonie.be/legis/solsoussol/sol002.htm>, consulté le 07/06/2013

Mivière, J.M. (2008). *Les cendres des chaudières automatiques au bois et leurs possibilités de valorisation*. Les cahiers du Bois énergie : Fascicule 1. Bois énergie 66. 8p.

Communications personnelles

Piazzalunga, G. (2013). *Teneurs en éléments fertilisants et en ETM dans les boues et les engrais minéraux*. Projet CONTASOL.

Roiseux, O. (2013). *Informations sur l'engrais PK fabriqué par Wal.Agri à partir de cendres de céréales et de fientes de volailles*.

CHAPITRE 5. ETUDE DES LIMITES DES SYSTEMES ETUDIES
--

1. EVALUATION DES BESOINS DES DIFFERENTS SYSTEMES DE PRODUCTION (AGRICULTURE ET FORET)

En agriculture, on distingue deux grands types de chaulage : le chaulage d'entretien et le chaulage de redressement. Le premier consiste à apporter régulièrement (environ tous les 3 ans) un amendement basique destiné à maintenir le pH et à restituer au sol les quantités de calcium et de magnésium utilisées au cours du temps. On évalue les quantités à apporter en fonction des exportations des cultures, du lessivage et de l'action acidifiante des engrais minéraux (Fourrages-Mieux, 2008).

Toutes les cultures ont besoin d'amendement calcique mais à des quantités variables. Pour les cultures tolérant les sols acides, on appliquera une dose inférieure que pour celles tolérant peu d'acidité. Voici quelques exemples :

- La pomme de terre, le seigle et l'avoine tolèrent bien l'acidité, ce qui nécessite un pH aux alentours de 6.
- Pour le maïs et le froment, le sol ne doit être ni acide, ni alcalin.
- La luzerne et le haricot tolèrent peu l'acidité, c'est-à-dire qu'il faudra maintenir un pH au-dessus de 7.

Dans le cas d'une dose d'entretien, on considère en général qu'un apport de 1000 à 1500 unités de VN tous les 3 ans est nécessaire pour un sol limoneux (Destain, 2008).

De plus, il est déconseillé de chauler directement après un épandage de lisier ou de fumier, ainsi que d'épandre des engrais de ferme sur de la chaux. Cette pratique tend à favoriser le dégagement d'azote gazeux sous forme ammoniacale. De plus, le chaulage est déconseillé durant les 12 mois qui précèdent une culture de pommes de terre car cela comporte un risque de gale (Logiag, 2013).

Le chaulage de redressement consiste en l'apport important d'amendements basiques sur plusieurs années de manière à redresser le pH du sol. Cependant, un apport trop important de chaux modifie trop vite les caractéristiques du sol. Il est préférable de répartir le redressement de pH sur plusieurs années. Il ne faut pas relever le pH de plus d'une unité à la fois sous peine de bloquer certains éléments (Fourrages-Mieux, 2008).

Dans le cas d'une dose de redressement, on conseille généralement l'apport de 1000 unités de VN pour un sol sableux afin d'augmenter d'une unité le pH du sol. L'apport est de 1500 unités de VN pour un sol sablo-limoneux, 2000 unités de VN pour un sol limoneux et 2500 unités de VN pour un sol argileux (Destain, 2008).

Par exemple, compte tenu des teneurs des cendres des différentes formes de bois combustible détaillées dans le livrable 2, une dose d'entretien pour un sol limoneux équivaut à un apport de 1,5 à 4 tonnes de cendres (de plaquettes forestières ou de bois issus de l'industrie) tous les trois ans par hectare.

Dans le cas des **sols forestiers**, les doses sont épandues à des intervalles de temps beaucoup plus espacés. Le caractère acide des sols forestiers est bien marqué, étant donné que 75 % des sols échantillonnés lors de l'étude réalisée par Genot *et al.* en Wallonie en 2007 présentent un pH_{eau}

inférieur à 4,5. Dans ces conditions, l'équilibre nutritionnel des arbres est précaire et les risques de carences ou de toxicité aluminique ne sont pas négligeables. Au cours de l'histoire, cet équilibre fragile a souvent été menacé directement ou indirectement par l'activité humaine (taillis, essartage, soutrage, pluies acides).

Les sols forestiers sont naturellement soumis à un processus d'acidification qui a connu des phases d'accélération du fait des pratiques ancestrales et de la pollution atmosphérique. De nos jours, alors que les besoins des arbres en nutriments s'intensifient suite à l'augmentation de la productivité, certains sols ne sont plus aptes à fournir une alimentation minérale équilibrée, ce qui engendre des pertes de vitalité notamment en conditions de sécheresse. De plus, la pression sur la forêt risque de s'accroître afin de répondre aux défis énergétiques futurs (bois-énergie).

Le forestier peut peser sur l'équation du bilan de fertilité de deux manières, soit en réduisant les exportations minérales, soit en procédant à des apports par amendement. Dans les écosystèmes forestiers pauvres en nutriments, il est recommandé de ne pas exporter les rémanents et de se contenter d'exploiter le bois fort. Dans certains cas, une exploitation raisonnée ne suffira pas à équilibrer le bilan de fertilité ; un amendement peut alors être envisagé. Afin d'étudier l'impact de l'amendement sur la vitalité des peuplements, des dispositifs expérimentaux ont été installés en 1995 en hêtraie, chênaie et pessière au travers de toute l'Ardenne. Trois t/ha d'amendement calcaro-magnésien (dolomie) ont été épandues dans les placettes traitées de ces dispositifs. Trois ans après l'amendement, le pH avait augmenté de l'ordre d'une demi-unité et les teneurs en calcium et magnésium échangeables étaient trois à quatre fois plus élevées dans les dix premiers centimètres du sol alors que l'aluminium échangeable avait diminué de 20%. La nutrition foliaire en calcium et en magnésium s'est améliorée et une limitation de la dégradation de l'état sanitaire qui s'est produite suite à la sécheresse estivale de 2003 a été constatée. Il faut cependant noter que l'effet bénéfique de l'amendement sur la croissance radiale se réduit fortement en conditions de sécheresse (Van der Perre *et al.*, 2010). En effet, l'amendement modifie surtout la disponibilité en nutriments dans les horizons de surface, qui sont les premiers à s'assécher (Jonard *et al.*, 2013).

Le moment idéal pour l'apport d'engrais calcaire en forêt est après la mise à blanc en raison de la facilité d'épandage même si dans la pratique, il est possible de chauler à tout âge du peuplement. Une des possibilités dans ce cas est d'épandre de la dolomie à l'aide de puissantes souffleries après avoir effectué des éclaircies au sein de la parcelle. L'engrais est donc soufflé dans les layons (ou rangées d'arbres) éliminés durant l'éclaircie ce qui assure une répartition homogène de l'engrais. Le prix de cette méthode d'épandage est de 300 €/ha pour 3 t/ha avec la possibilité d'épandre 30 tonnes par jour, soit 10 ha de forêt/jour (Luxen, 2013).

Plusieurs études ont montré qu'un apport de cendres régulier augmente le statut nutritionnel et la croissance des arbres, prouvé notamment par l'accroissement du contenu en macronutriments dans les aiguilles (Omil *et al.*, 2010 ; Saarsalmi and Kukkola, 2010).

Comme précisé dans le chapitre 2, l'efficacité potassique des cendres de bois est considérée comme étant de 100 % comparativement aux engrais minéraux et l'efficacité phosphorique se situerait pour sa part entre 25 et 75 % (Hébert *et al.*, 2008).

Il est important de préciser que les produits fins sont plus actifs que les produits grossiers mais leur réactivité est à double tranchant car elle engendre plus de risques de blocage de certains éléments

et plus de sensibilité au lessivage : pour éviter ces inconvénients, il faut les réserver pour des apports annuels à petite dose (ne dépassant pas en sol sablo-limoneux 500 kg/ha de produit brut). D'après Godden (2013), la disponibilité du P dépend de la finesse du produit plus que de sa solubilité dans divers acides. Ces acides ne solubilisent en effet pas le phosphore organique, qui est pourtant bien disponible pour les plantes.

La présence de petites quantités d'ETM ou de CTO dans les cendres est à l'origine d'un risque environnemental et sanitaire potentiel qui est à surveiller dans le cadre du retour au sol des cendres. L'effet alcalinisant des cendres réduit cependant la disponibilité de ces polluants dans le sol et le plus souvent aucun impact n'est observé sur les teneurs en ETM dans les plantes et les eaux souterraines (Bruyères, 2013).

2. IDENTIFICATION DES FACTEURS SOCIO-ECONOMIQUES OU REGLEMENTAIRES SUSCEPTIBLES DE FAVORISER LA VALORISATION DES CENDRES EN AGRICULTURE ET EN SYLVICULTURE

Il n'existe actuellement aucune réglementation dédiée à la valorisation des cendres de bois sur les sols agricoles ou forestiers. Dans un premier temps, l'édiction de règles concernant les cendres sous forme de textes de loi pourrait largement contribuer à ce mode de valorisation. Cependant, ceci nécessite dans un premier temps de connaître quelles sont les normes à mettre en place dans le cas des cendres. La mise en place de cette réglementation inciterait sans doute les producteurs à s'organiser afin d'écouler leurs cendres.

Les prix des engrais minéraux ont fortement augmenté depuis 2008 et constituent un coût de plus en plus important dans les investissements des agriculteurs. Leur substitution par des engrais de ferme ou par des matières organiques peut sensiblement diminuer ces charges financières. Il a été montré dans le chapitre 3 que les cendres représentent un intérêt potentiel pour l'ensemble des utilisateurs de la filière, ce qui pourrait conduire à favoriser leur utilisation en supposant un coût des cendres à l'achat nettement inférieur aux engrais minéraux. Par ailleurs, certains aspects réglementaires peuvent également contribuer à l'utilisation d'une matière, telle une prime à l'épandage, de manière à favoriser le recyclage des cendres.

Par ailleurs, plusieurs facteurs d'ordre environnemental peuvent être considérés comme des facteurs sociaux. Ainsi, la diminution des ressources naturelles en phosphore contribue à rechercher des solutions alternatives à l'utilisation de matières non renouvelables. Ainsi, l'utilisation des engrais de ferme et de matières organiques exogènes au monde agricole ou forestier est de plus en plus privilégiée. Les cendres rentrent exactement dans ce cadre, pour lesquelles la valorisation permettrait non seulement d'utiliser une source renouvelable d'éléments fertilisants mais également d'éviter un enfouissement coûteux de ces déchets.

La cendre de bois est un des engrais les plus efficaces et les moins dispendieux pouvant être utilisé en agriculture biologique comme source de P, de K et de S. La cendre est particulièrement appropriée dans les systèmes agrobiologiques où la fourniture de l'azote dépend ultimement des cultures de légumineuses. Par ailleurs, l'impact de la cendre sur le contenu en Mn des tissus végétaux pourrait théoriquement favoriser la résistance naturelle aux maladies des plantes (Huber et Wilhelm, 1998). Le développement de l'agriculture biologique, tel que souhaité par la politique mise en place par le Ministre wallon des Travaux publics, de l'Agriculture, de la Ruralité, de la

Nature, de la Forêt et du Patrimoine, Carlo Di Antonio, pourrait donc être un des facteurs favorisant l'utilisation de cendres de bois en agriculture. Ainsi, un accroissement de l'intérêt des consommateurs pour les produits issus de l'agrobiologie pourrait augmenter le nombre d'exploitations fonctionnant selon le système biologique et impacter ainsi l'utilisation de produits tels que les cendres de bois.

3. CONCLUSION

Les besoins des systèmes de production dépendent d'un grand nombre de critères : pH du sol, type de sol, dose de redressement ou d'entretien, culture suivante, etc. Chaque cas doit être considéré afin de prévoir une dose qui dépendra également de la qualité des cendres et de leur valeur neutralisante. On préconise généralement des quantités en MS qui n'excèdent pas 5 à 6 tonnes de MS (correspondant à un apport de 2000 VN).

Le développement de l'agriculture biologique, l'adoption de règles précises concernant l'utilisation des cendres, la hausse du prix des engrais ou encore les diminutions des ressources naturelles non renouvelables sont autant de facteurs identifiés susceptibles de favoriser l'épandage des cendres en agriculture et en forêt.

4. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bruyère, C. (2013). *La valorisation des cendres de bois en France*. Bioenergie international n°23 février 2013. 16-21.
- Destain, JP. (2008). *Support du cours de « Matières fertilisantes »*.
- Fourrage-Mieux (2008). *Les amendements basiques ou chaulage des prairies*. URL : <http://www.fourragesmieux.be/SSSMentretienchaulage.htm>, consulté le 04/06/2013
- Genot, V., Colinet, G., Brahy, V., Bock, L. (2007). *L'état de fertilité des terres agricoles et forestières en région wallonne* (adapté du chapitre 4 - sol 1 de « L'État de l'Environnement wallon 2006-2007 »). Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 2009 13(1), 121-138
- Hébert, M. et Breton, B. (2008). Recyclage agricole des cendres de bois au Québec – Etat de la situation, impacts et bonnes pratiques agro-environnementales. Agrosolutions 19 (2) : 18-33
- Huber, D.M. et Wilhelm, S. (1998). *The role of manganese in resistance to plant diseases*. In : International symposium on manganese in soils and plants, Vol. 33, p. 155-173
- Jonard, M., Van der Perre, R., Ponette, Q. (2013). *La fertilité chimique des forêts est-elle menacée par les changements globaux ?* Silva Belgica - Vol. juillet-août, no.4, p. 32-37 (2013)
- Logiag (2013). *Questions fréquemment posées sur l'épandage de chaux*. URL : <http://www.logiag.com/menu.php?idCategorie=36&idDetail=245>, consulté le 24/04/2013
- Omil, B., Sánchez-Rodríguez F., Merino A. (2010). *Tree response to a continual supply of ash on acid soils*. Conference on Recycling of Biomass Ashes, Innsbruck, March 22-23, 2010
- Saarsalmi, A. and Kukkola M. (2010). *Finnish wood ash experiments: long-term effects on soil chemical*. Conference on Recycling of Biomass Ashes, Innsbruck, March 22-23, 2010 properties and stand growth on mineral soil

Communications personnelles

- Godden, B. (2013). *Informations sur la disponibilité du phosphore*
- Luxen, P. (2013). *Informations sur le chaulage des parcelles forestières*

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'utilisation des cendres sur les sols représente une source d'éléments fertilisants non négligeable qu'il convient cependant de gérer prudemment, en raison de leur contenu en éléments traces métalliques. Il ressort de cette étude qu'il convient de considérer ces deux critères conjointement afin de limiter le risque d'accumulation de métaux lourds dans les sols.

La composition des cendres, très variable en fonction du type de bois brûlé, de la qualité de la combustion et d'autres critères, ne suffit cependant pas en elle-même à déterminer leur effet sur les sols. Ceci dépend également en grande partie du sol en lui-même, de la finesse du produit et de la disponibilité des éléments principaux P et K.

L'intérêt des cendres en agriculture, et surtout en forêt est cependant reconnu par la communauté scientifique et la principale limitation à l'heure actuelle est le manque de données disponibles sur les effets des cendres produites en Wallonie sur les sols. Les essais réalisés par l'asbl Agra-Ost devraient apporter plus d'informations à ce sujet dans les années à venir. Par ailleurs, les différentes filières de valorisation identifiées ont des débouchés bien définis, qui permettent de tirer le meilleur parti des cendres utilisées dans une situation précise.

Ce projet a permis de réaliser un état des lieux du gisement de cendres en Wallonie et de montrer leur composition en éléments fertilisants et contaminants, en fonction de l'origine du bois utilisé dans les différentes installations de combustion. Différentes filières de valorisation ont été identifiées et des modes d'utilisation sont proposés. Par ailleurs, les cendres ont été comparées en fonction de leur origine avec d'autres matières fertilisantes afin de considérer leur impact potentiel sur les sols. Enfin, les besoins en agriculture et en forêt ont été évalués et divers facteurs favorisant la valorisation des cendres ont été identifiés.

Le potentiel wallon. En Wallonie, des installations de cogénération alimentée au bois produisent une moyenne de 85 000 tonnes de cendres par an à partir de bois de diverses origines et qualités. Les grandes installations de cogénération produisent la majeure partie de ces cendres et ce en utilisant du bois non traité.

Composition des cendres de bois. La valeur agronomique et les risques de contamination par les éléments traces métalliques des cendres sont fort dépendants de l'origine du bois valorisé en combustion. Les cendres trouvant leur origine dans les plaquettes et granulés, ou celles issues de l'industrie du bois possèdent des teneurs en ETM faibles devant permettre leur valorisation en agriculture et en sylviculture. Par contre les cendres produites lors de la combustion de déchets de bois, montrent des teneurs en ETM qui peuvent être élevées (supérieures aux seuils des normes B1 et B2) et donc faire obstacle à la valorisation comme amendement sans prétraitement. Il est donc prudent de recommander une analyse des cendres de déchets de bois.

Les systèmes de valorisation. Les cendres peuvent être valorisées de plusieurs façons. L'utilisation de cendres pures est la plus simple, mais également celle qui comporte le plus de risques, environnementaux ou sanitaire, via l'envol de poussières fines pendant le stockage, le transport ou l'épandage. Cependant c'est sous cette forme que les concentrations en éléments fertilisants sont les plus élevées. L'utilisation en mélange avec des matières organiques est un mode d'utilisation qui conviendrait mieux aux exploitants agricoles, qui utilisent fréquemment des matières

organiques en temps normal et qui sont équipés pour de tels épandages. Le prétraitement des cendres a majoritairement été étudié dans un contexte forestier. La disponibilité des éléments fertilisants peut être lente en forêt alors qu'en agriculture, les éléments nutritifs doivent être disponibles pour la culture en cours (càd dans les quelques mois à venir). Les cendres prétraitées sont donc à réserver à un épandage en forêt. Enfin, les cendres intégrées dans la fabrication d'engrais minéraux sont jusqu'à présent produites à des fins agricoles. L'intérêt dans le cadre de la valorisation des cendres de bois est de pouvoir obtenir un produit final complexe (NPK et valeur neutralisante) très stable.

Bilan économique et environnemental. La valorisation agricole ou forestière raisonnée de cendres de bois peut présenter des avantages financiers pour l'ensemble des acteurs de la filière. En effet, leur valorisation permettrait d'éviter aux producteurs de payer pour leur élimination (30 à 75€/t hors frais de transport) en CET (problèmes environnementaux non résolus), aux exploitants agricoles ou forestiers d'économiser des engrais minéraux, voire aux fabricants d'engrais de diminuer leurs coûts grâce à un prix éventuellement moins élevé des cendres de bois par rapport aux cendres de fientes de volailles ou de céréales. La comparaison des cendres avec les différentes sources de matières fertilisantes montrent que les cendres ont tendance à apporter plus d'ETM que les engrais minéraux pour la même action neutralisante. A valeur neutralisante égale, les cendres de plaquettes et de l'industrie du bois présentent les flux en ETM les plus faibles parmi les cendres testées. Toutefois ce flux est plus important que pour les engrais minéraux, particulièrement en Cd, Cu et Ni. Les cendres d'écorces montrent également des flux relativement importants d'ETM, néanmoins inférieurs à la norme B2. Les cendres issues de déchets de bois, analysées dans cette étude, apportent une quantité d'ETM largement supérieure aux valeurs fixées par la norme B2. Il est probable qu'il s'agisse de bois souillés malgré qu'ils soient catégorisés comme non-traités. Pour une valorisation agricole ou sylvicole des cendres de déchets de bois il est hautement recommandé de procéder à une analyse des teneurs en ETM avant d'envisager toute valorisation sous forme d'amendement.

Limites et avantages pratiques. Le rôle principal de l'épandage des cendres est de pratiquer un chaulage destiné à relever le pH et/ou à compenser les lessivage et l'exportation du Ca et Mg provenant de la roche mère. Cependant les teneurs intéressantes en P et K dans les cendres leur permettent de contribuer aux fertilisations phosphorique (efficacité fertilisante de 25-75%) et potassique (efficacité fertilisante de 100%). Les cendres ont donc des propriétés fertilisantes indéniables tempérées par les contaminations en ETM et CTO ne pouvant être exclues (cendres de déchets de bois). Ces propriétés avantageuses sont d'intérêts croissants au vu du prix en hausse permanente des engrais chimiques, des limites des réserves mondiales en phosphore (majoritairement hors territoires européens), et de la demande croissante pour des engrais P&K d'origine non chimique en agriculture biologique. La mise en place d'une réglementation dédiée à la valorisation des cendres de bois sur les sols agricoles ou forestiers sous forme de textes de loi pourrait largement contribuer à stimuler ce mode de valorisation. Il est fort probable qu'une telle réglementation inciterait à la mise en place d'une filière cendres.