

A D E M E



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Energie

ETUDE SUR LA VALORISATION DES CENDRES DE BIOMASSE EN FORET 2011-2013

Rapport final

13 mars 2014

Etude financée avec le soutien de l'ADEME (Contrat n°11-60-C0051)

Coordination technique : UCFF Caroline VIVANCOS, Pilar FUENTE TOMAI et Maxime COUASSE

Suivi ADEME : Caroline RANTIEN, service agriculture et forêts

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

Sommaire

INTRODUCTION	4
1. LA PRODUCTION DE BOIS ENERGIE EN FRANCE	5
1.1. LA PRODUCTION DE BOIS BUCHE	5
1.2. LA PRODUCTION DE PLAQUETTES FORESTIERES	5
1.3. LES PRODUITS CONNEXES DE SCIERIE	5
1.4. BOIS RECYCLE	6
2. RECOMMANDATIONS REGLEMENTAIRES	7
2.1. LA NOUVELLE NOMENCLATURE DES ICPE 2910	7
2.2. VALORISATION DES CENDRES DES INSTALLATIONS ENERGETIQUES	9
2.2.1. <i>Les installations non classées de puissance inférieure à 2MW</i>	9
2.2.2. <i>Les ICPE 2910</i>	10
a) Interprétation de la réglementation	10
b) Réglementation relative à l'épandage	11
c) Réglementation relative aux cendres	12
d) Réglementation relative au sol	14
e) Réglementation relative au stockage	15
f) Réglementation relative au suivi de l'épandage	16
g) Réglementation relative à la sécurité lors de l'épandage	17
2.2.3. <i>Argumentaire pour défendre d'éventuelles améliorations du dispositif national</i>	18
3. RECOMMANDATIONS TECHNIQUES SUR LA GESTION DES CENDRES – ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES	21
3.1. CARACTERISATION DES CENDRES	21
3.1.1. <i>Les cendres sous foyer et les cendres volantes</i>	21
3.1.2. <i>Les cendres sèches et humides</i>	22
3.2. LE TRAITEMENT DES CENDRES	22
3.2.1. <i>L'auto-durcissement et le broyage</i>	24
3.2.2. <i>La granulation scandinave</i>	25
3.2.3. <i>La granulation compactée ou pelletisation</i>	26
3.3. VEILLE TECHNOLOGIQUE SUR LE MATERIEL D'EPANDAGE	27
3.3.1. <i>Le matériel d'épandage agricole</i>	27
3.3.2. <i>Veille technologique sur le matériel d'épandage forestier</i>	32
4. ESSAIS EXPERIMENTAUX	35
4.1. LES CHANTIERS D'EPANDAGE DE CENDRES BRUTES	35
4.1.1. <i>Organisation des chantiers</i>	35
4.1.2. <i>Conformité des chantiers d'épandage</i>	38
a) Les cendres	38
b) Les sols	40
4.2. LES ESSAIS DE GRANULATION / PELLETISATION	41
4.2.1. <i>L'unité de granulation</i>	41
4.2.2. <i>Organisation des essais</i>	42
4.2.3. <i>Les essais</i>	42
4.2.4. <i>Interprétation des analyses</i>	45

5. COUT D'UN EPANDAGE	48
5.1. LA FERTILISATION EN FORET.....	48
5.1.1. <i>L'intérêt de la fertilisation en forêt</i>	48
5.1.2. <i>L'épandage des cendres : fertilisation et amendement</i>	49
5.1.3. <i>Les traitements des cendres</i>	50
5.2. ANALYSE ECONOMIQUE	51
5.2.1. <i>Bibliographie</i>	51
5.2.2. <i>Analyse de la rentabilité d'un chantier d'épandage</i>	52
a) Méthodologie	52
b) Création des Scenarii	55
c) Résultats	58
d) Bilan de l'analyse	67
6. CONCLUSION	69
7. BIBLIOGRAPHIE	71
8. ANNEXES	72
ANNEXE 1	72
ANNEXE 2	78
ANNEXE 3	87
ANNEXE 4	93

Introduction

Les systèmes incitatifs (fiscalité, subventions, réglementation) mis en place par les pays européens pour atteindre les objectifs de 20% d'énergie renouvelable en 2020 a pour conséquence une augmentation des volumes de bois énergie consommés à travers toute l'Europe. La multiplication des centres de consommation de bois énergie : chaufferies, cogénération, et gazéificateurs engendre automatiquement une augmentation de la quantité de cendre produite annuellement.

Aujourd'hui, les cendres représentent un coût pour ces chaufferies qui sont obligées de les évacuer en Centre de Stockage des Déchets Ultimes (CSDU). Il existe d'autres exemples de valorisation, comme le mélange avec du compost, mais ces filières sont un marché de niche et les démarches sont très complexes. L'épandage des cendres en forêt pourrait être une voie de valorisation intéressante sous réserve que la réglementation française y soit favorable.

D'autre part, compte tenu de l'augmentation de l'exploitation des gisements de biomasses forestières jusqu'alors non valorisées (rémanents, 1^{ère} éclaircie), la préservation de la structure des sols forestiers et le retour aux sols des éléments nutritifs sont des problématiques de plus en plus présentes. Or de nombreuses études montrent que les cendres sont riches en éléments fertilisants (phosphore et potassium) et en calcium et pourraient être utilisées pour remédier à ces situations.

Face à ce constat, l'épandage de cendre est plus lié à la restauration des sols forestiers appauvris en minéraux qu'à la compensation de minéraux liés à l'exploitation des rémanents pour l'énergie.

Compte tenu de l'acidité des sols forestiers et de la teneur en cadmium et en métaux lourds des cendres, il était interdit d'épandre des cendres en forêt. Aujourd'hui, la réglementation le permet dans certains cas.

D'autre part, **le traitement des cendres (granulation et auto durcissement) permettrait de s'affranchir de la problématique des métaux lourds en les rendant moins « disponibles »**. Des études scientifiques ont montré que des cendres propres, non contaminées et stabilisées pouvaient remonter le pH du sol.

L'épandage des cendres permettrait d'assurer, d'une part, la restauration de certains sols forestiers et d'entrer dans une économie cyclique de la production de matière première, les plaquettes forestières, à la gestion du « déchet », les cendres. L'épandage de cendre en forêt offre une voie de valorisation autre que les CSDU. On transforme alors un « déchet ultime » en produit. Cela va dans le sens de l'objectif européen de la réduction de la quantité de déchets.

Ce guide fait des recommandations technico-économiques sur l'épandage de cendre en forêt. Il reprend les conclusions des études réalisées sur le sujet en France et dans d'autres pays européens où l'épandage de cendres en forêt est aujourd'hui autorisé.

1. La production de Bois Energie en France

1.1. La production de bois bûche

Selon les estimations françaises, la récolte de bois pour la filière bûche est de 32 millions de m³ soit 51 millions de stères (*étude 2012 ADEME/SOLAGRO/Biomasse Normandie/BVA*). Le marché du chauffage domestique est en majorité alimenté par le bois bûche bien que l'utilisation de granulés de bois se développe considérablement depuis les trois dernières années.

1.2. La production de plaquettes forestières

La production de plaquettes forestières reste modeste par rapport à la quantité de bois bûche récolté en France mais est en forte augmentation depuis les 5 dernières années. On estime que près de 1.2 million de tonnes ont été commercialisées en 2013. Ce combustible « bois déchiqueté » sert à alimenter principalement des installations collectives et industrielles (chaufferies et cogénérations), une très faible quantité étant utilisée par le marché domestique.

Les **plaquettes forestières représentent environ 1/3 du bois énergie** consommé actuellement (sous réserve du respect de la consommation de chaque catégorie de combustible déclarée). Cette part devrait augmenter, tant en valeur absolue (multiplication par 3 à attendre) qu'en pourcentage avec une prévision de **4.5 à 5 millions de tonnes/an consommées en 2015** (hors importation), soit 45% des quantités de bois énergie attendues.

Le taux de cendres dépend des matières minérales constitutives du bois ainsi que des impuretés acheminées avec le bois (terres, cailloux, graviers, chutes de métal, etc.). Ainsi, selon le type de bois utilisé pour la production de plaquettes forestières (arbres entiers, houppiers, rémanents, billons) et les modalités de production (ressuyage, débardage) la quantité de cendre produite peut être variable. Les taux de cendres indiqués dans les normes françaises sur les biocombustibles solides sont de 3 à 5 % pour des plaquettes issues de rémanents forestiers et de 0,3 % pour des plaquettes issues de perches, grumes, chutes de bois massifs.

Ainsi la quantité de cendre induite par l'utilisation de plaquettes forestières est estimée entre 10 000 et 50 000 tonnes et devrait être multipliée par 3 d'ici 2015.

1.3. Les produits connexes de scierie

Ils représentent la majorité des produits utilisés actuellement dans les chaufferies collectives et industrielles et cogénérations. Leur production est estimée à 3 millions de tonnes par an.

Les produits connexes de scierie sont quasiment tous valorisés à ce jour. Or, le développement de ce gisement est limité puisqu'il concerne la valorisation de sous produits des industries dites de la première de transformation (scieries, menuiseries...). Pour que ce gisement augmente, il faudrait que ces industries augmentent fortement leurs capacités de production, ce qui n'est pas le cas dans le contexte économique que nous rencontrons.

Le taux de cendres indiqué dans les normes françaises sur les biocombustibles solides est compris entre 1 et 5 % pour des écorces.

1.4. Bois recyclé

Les bois de recyclage (consommation de plus d'un million de tonnes par an) connaissent sensiblement la même situation, et des inquiétudes pèsent même, du fait de l'évolution de la réglementation, sur la valorisation future d'une partie de ces produits.

En effet, la procédure de révision de la rubrique 2910 (installations de combustion) a été menée par le Ministère (DGPR). Le décret du 11 septembre 2013 apporte plusieurs modifications importantes dont une nouvelle répartition de chaque catégorie de combustible entre les installations des rubriques 2910-A et 2910-B.

Le nouveau décret prévoit ainsi d'exclure les bois en fin de vie de la classe A (bois propres) en les faisant tous basculer en classe B. Une éventuelle réintégration en classe A ne pourra se faire qu'après l'aboutissement de la « procédure de sortie du statut de déchet » (SSD). Or, les déchets de l'emballage / logistique représenteraient plus de 500 000 t/an.

Pour toutes les chaudières d'une puissance supérieure à 0,1 MW qui utilisent du bois de recyclage propre (80 % de la puissance installée), deux options se présentent : utiliser un autre type de combustible bois (plus onéreux) ou entamer une démarche de mise en conformité de l'installation.

En fonction de l'aboutissement de la procédure de sortie de statut de déchet en cours actuellement, les cendres produites par les installations collectives et industrielles seront vraisemblablement modifiées. Actuellement, ces produits contiennent une part non négligeable de polluants et autres composés rendant impossible une valorisation des cendres par épandage (présence par exemple de métaux lourds).

2. Recommandations réglementaires

Les installations de combustions sont des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) rangées sous la rubrique 2910. La nomenclature pour la rubrique 2910 a été modifiée par le décret n°2013-814 du **11 septembre 2013**. Le classement dans la rubrique 2910-A, 2910-B ou 2910-C est fonction du combustible ou de la nature de la biomasse utilisée et le classement dans le régime Autorisation, Enregistrement ou Déclaration est fonction de la puissance thermique nominale de l'installation.

2.1. La nouvelle nomenclature des ICPE 2910

- **Les ICPE 2910 A** : lorsque l'installation consomme exclusivement, seuls ou en mélange, du gaz naturel de pétrole liquéfiés, du fioul domestique, du charbon, de fiouls lourds, de la biomasse telle que les produits composés d'une matière végétale agricole ou forestière susceptible d'être employée comme combustible en vue d'utiliser son contenu énergétique ou les déchets végétaux agricoles et forestiers ou les déchets de liège, des produits connexes de scierie issus des déchets de bois, à l'exception des déchets de bois qui sont susceptibles de contenir des composés organiques halogénés ou des métaux lourds à la suite d'un traitement avec des conservateurs du bois ou du placement d'un revêtement, y compris notamment les déchets de bois de ce type provenant de déchets de construction ou de démolition (définition de biomasse) ou lorsque la biomasse est issue de déchets au sens de l'article L. 541-4-3, à l'exclusion des installations visées par d'autres rubriques de la nomenclature pour lesquelles la combustion participe à la fusion, la cuisson ou au traitement, en mélange avec le gaz de combustion, des matières entrantes, si la puissance thermique nominale de l'installation est :
 - * Supérieure ou égale à 20 MW => **ICPE soumise à Autorisation**
 - * Supérieur à 2 MW, mais inférieur à 20 MW => **ICPE soumise à Déclaration**
- **Les ICPE 2910 B** : lorsque les produits consommés seuls ou en mélange sont différents de ceux visés en A et C ou sont de la biomasse telle que les déchets végétaux provenant du secteur industriel de la transformation alimentaire, si la chaleur produite est valorisée ou les déchets végétaux fibreux issus de la production de pâte vierge et de la production de papier à partir de pâte, s'ils sont co-incinérés sur le lieu de production et si la chaleur produite est valorisée ou les déchets de bois, à l'exception des déchets de bois qui sont susceptibles de contenir des composés organiques halogénés ou des métaux lourds à la suite d'un traitement avec des conservateurs du bois ou du placement d'un revêtement, y compris notamment les déchets de bois de ce type provenant de déchets de construction ou de démolition, et si la puissance thermique nominale de l'installation est
 - * Supérieur ou égale à 20 MW => **ICPE soumise à Autorisation**
 - * Supérieure à 0.1 MW mais inférieur à 20 MW :
 - ▶ en cas d'utilisation de biomasse, ou de biogaz autre que celui visé en 2910-C, ou de produit autre que biomasse issu de déchets au sens de l'article L. 541-4-3 du code de l'environnement => **ICPE soumise à Enregistrement**
 - ▶ dans les autres cas => **ICPE soumise à Autorisation**

- **Les ICPE 2910 C** : Lorsque l'installation consomme exclusivement du biogaz provenant d'installation classée sous la rubrique 2781-1 et si la puissance thermique nominale de l'installation est supérieure à 0.1 MW :

- * Lorsque le biogaz est produit par une installation soumise à autorisation ou par plusieurs installations classées au titre de la rubrique 2781-1 => **ICPE soumise à Autorisation**
- * Lorsque le biogaz est produit par une installation soumise à enregistrement au titre de la rubrique 2781-1 => **ICPE soumise à Enregistrement**
- * Lorsque le biogaz est produit par une seule installation, soumise à déclaration au titre de la rubrique 2781-1 => **ICPE soumise à Déclaration**

La puissance thermique nominale correspond à la puissance thermique fixée et garantie par le constructeur exprimée en pouvoir calorifique inférieur et susceptible d'être consommée en marche continue.

Résumé de la modification de la nomenclature

	2910-A	2910-B	2910-C	
Combustibles « produits »	Gaz naturel, GPL, Charbon, FOD, Fioul Lourd	Autres produits que ceux visés en A et C	-	
Biogaz	-	Autres que ceux en 2910-C	Issu de 2781-1	
Biomasse	Biomasse à l'état naturel		-	-
	a) Produit végétal agricole/forestier		-	
	b) I) déchet végétal agricole/forestier		-	
	-		b)ii) déchet végétal (alimentaire)	
	-		b)iii) déchet fibreux (pâte à papier)	
	c)iv) déchet de liège		-	
	Produit connexe de scierie du b)v)		b)v) déchet de bois sauf si organohalogénés ou métaux lourds	
Déchets SSD	Biomasse b)ii), b)iii), b)v) sorti du statut déchet	Déchets autre que biomasse sortis du statut de déchet	-	

≥20 MW	A	A	A, E ou DC
2 - 20 MW	DC	A	En fonction du régime de l'installation de méthanisation
0.1 – 2 MW	Non classé	E	

On entend par « biomasse », au sens de la rubrique 2910 :

a) Les produits composés d'une matière végétale agricole ou forestière susceptible d'être employée comme combustible en vue d'utiliser son contenu énergétique ;

b) Les déchets ci-après :

i) Déchets végétaux agricoles et forestiers ;

ii) Déchets végétaux provenant du secteur industriel de la transformation alimentaire, si la chaleur produite est valorisée ;

iii) Déchets végétaux fibreux issus de la production de pâte vierge et de la production de papier à partir de pâte, s'ils sont co-incinérés sur le lieu de production et si la chaleur produite est valorisée ;

iv) Déchets de liège ;

v) Déchets de bois, à l'exception des déchets de bois qui sont susceptibles de contenir des composés organiques halogénés ou des métaux lourds à la suite d'un traitement avec des conservateurs du bois ou du placement d'un revêtement, y compris notamment les déchets de bois de ce type provenant de déchets de construction ou de démolition.

2.2. Valorisation des cendres des installations énergétiques (chaufferie et cogénération)

2.2.1. Les installations non classées de puissance inférieure à 2MW

Les installations < 2 MW th représentent plus de 85% du parc des chaudières et 45% du gisement de cendres (estimation maximale). Ces installations dont la puissance est inférieure au seuil de déclaration n'ont aucun encadrement réglementaire spécifique, ce ne sont pas des ICPE. Elles doivent respecter le cadre du règlement sanitaire départemental (RSD) qui oriente le gestionnaire vers une démarche « produit », c'est-à-dire soit vers la **normalisation**, soit vers l'**homologation**. Or toutes les cendres ne peuvent pas être normalisées ou homologuées notamment à cause des teneurs en éléments traces métalliques :

	Arrêté du 8 janvier 1998	Norme NFU 44-051	Homologation*
Arsenic (mg/kg)	Non défini	18	Non défini
Cadmium (mg/kg)	10	3	2
Chrome (mg/kg)	1000	120	150
Mercure (mg/kg)	10	2	1
Nickel (mg/kg)	200	60	50
Plomb (mg/kg)	800	180	100
Zinc (mg/kg)	3000	600	300
Cuivre (mg/kg)	1000	300	100
Sélénium (mg/kg)	Non défini	12	Non défini
Molybdène (mg/kg)	Non défini	Non défini	Non défini
Cr+Cu+Ni+Zn (mg/kg)	4000	Non défini	300

*L'homologation fixe des flux en ETM maximaux autorisés sur 10 ans. La valeur utilisée ici est ce flux ramené à une année.

2.2.2. Les ICPE 2910

a) Interprétation de la réglementation

L'arrêté du 26 août 2013 est entré en vigueur le 1er janvier 2014. Il modifie l'arrêté du 25 juillet 1997 relatif aux prescriptions générales applicables aux **ICPE soumises à déclaration** sous la rubrique 2910 A et introduit la possibilité d'épandage des cendres issues de la combustion de la biomasse en précisant les modalités. Depuis cette date, l'épandage de cendres en forêt est explicitement autorisé et cadré par l'arrêté en question.

L'arrêté du 24 septembre 2013 relatif aux prescriptions générales applicables aux **installations relevant du régime de l'enregistrement** au titre de la rubrique 2910 B définit l'ensemble des dispositions applicables. Cet arrêté est entré en vigueur le 1^{er} janvier 2014. Les règles d'épandage sont définies à l'annexe III du présent arrêté. Ce sont exactement les mêmes règles d'épandage définies dans l'arrêté du 26 août 2013 des ICPE soumises à déclaration.

Pour les installations de puissance supérieure, il faut se référer à **l'arrêté du 26 août 2013** qui ne cadre pas directement l'épandage de cendres.

L'article 53 de cet arrêté stipule que les sous-produits et déchets de la combustion (cendres, mâchefers, résidus d'épuration des fumées ...) sont, lorsque la possibilité technique existe, valorisés, en tenant compte de leurs caractéristiques et des possibilités de marché (ciment, béton, travaux routiers, comblement, remblai ...).

L'arrêté préfectoral peut autoriser la valorisation par retour au sol dans le cadre d'un plan d'épandage qui respecte l'ensemble des dispositions de la section 4 du chapitre V et des annexes associées de **l'arrêté du 2 février 1998** (relatif aux prélèvement et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement). Or l'objet de cet arrêté est de fixer les prescriptions techniques auxquelles doivent satisfaire les opérations d'épandage **uniquement sur sols agricoles (article 1^{er})** : « On entend par épandage toute application de déchets ou effluents sur ou dans **les sols agricoles** ».

L'article 53 fait également référence au **code rural**. Les cendres peuvent être mises sur le marché en application des dispositions des articles L. 255-1 à L.255-11 du code rural applicables aux matières fertilisantes. L'article L.255-2 du code rural spécifie précisément l'utilisation des matières fertilisantes par les voies d'homologation ou normalisation et **par exception les épandages sur des terrains agricoles**.

Deux conséquences :

- Il existe une incohérence entre les arrêtés déclaration/enregistrement et autorisation :

Les premiers ouvrant la possibilité à des épandages en forêts « exploitées », l'autre maintenant l'interdiction pour les forêts puisque renvoyant aux articles L. 255-1 à L. 255-11 du code rural c'est à l'épandage sur sols agricoles uniquement.

- l'interdiction d'épandage de boues en forêt repose sur l'article L.255-2 (sauf dans un cadre expérimental avec une autorisation préalable : article de l'arrêté du 2 février 1998). Si on demande des évolutions pour les cendres, cela embarque aussi probablement la question des boues.

b) Réglementation relative à l'épandage

Thème	Réglementation	Remarques et préconisations
EPANDAGE	Epandage autorisé si le volume annuel de l'installation < 5000 tonnes/an	C'est le volume maximum estimé de cendres sous foyer produites par une chaudière de 20MWth. La fixation de cette limite permet de garantir que le volume des cendres épandues annuellement est inférieur à 500 000 m ³ /an.
	Les cendres ont un intérêt pour les sols ou la nutrition des cultures.	La bibliographie ¹ montre que les cendres sont riches en calcium et en potassium et contiennent aussi, en quantité notable, du phosphore et du magnésium. Les cendres peuvent, à ce titre, apporter des éléments minéraux sur des sols carencés ou des sols organiques. Elles peuvent également améliorer la fertilité des sols en augmentant le pH des sols acides et donc en favorisant le développement de l'activité microbienne et la libération des éléments minéraux de la litière dans le sol.
	Les cendres ne doivent pas être épandues sur des sols dont le pH avant épandage est inférieur à 6, sauf lorsque les trois conditions suivantes sont simultanément remplies : * le pH du sol est supérieur à 5 ; * la nature des cendres peut contribuer à remonter le pH du sol à une valeur supérieure ou égale à 6 * le flux cumulé maximum des éléments apportés aux sols est inférieur aux valeurs du tableau 4 de l'arrêté (annexe 1).	Le fait de ne pas pouvoir épandre sur des sols de pH inférieurs à 5 est une contrainte forte car 2/3 des sols forestiers ont un pH inférieur à 5.5 contre 12% des sols agricoles. Les cendres ont une teneur importante en carbonates (CaCO ₃) et en oxydes de calcium (chaux vive = CaO), potassium (potasse = K ₂ O) et sodium (soude = Na ₂ O). Ce sont les carbonates, les oxydes et hydroxydes, présents dans les cendres qui ont un pouvoir de chaulage très fort et permettent de remonter le pH des sols. Le pH des cendres est toujours fortement basique (aux alentours de 12) et d'après plusieurs retours d'expériences la valeur neutralisante peut être comprise entre 30 et 45.
	Les apports de phosphore et de potasse, organique et minérale, tiennent compte de la rotation des cultures ainsi que de la nature particulière des terrains et de leur teneur en éléments fertilisants Les quantités épandues et les périodes d'épandage sont adaptées compte tenu des apports de toute nature, y compris les engrais et les amendements.	Prescriptions faites pour les sols agricoles. A adapter sur terrain forestier.
	Les périodes d'épandage et les quantités sont adaptées de manière : * A adapter l'apport des	Il faut définir la dose de cendres à épandre en fonction des besoins du sol et non pas en fonction des besoins des peuplements. Il est préférable de privilégier l'épandage de cendres sur des sols acides, organiques et des sols carencés en Calcium, Potassium et dans une

¹ Rendez-Vous Technique n°35, hiver 2012, ONF

	<p>éléments utiles aux sols et aux cultures</p> <ul style="list-style-type: none"> * A empêcher la stagnation prolongée sur les sols, le ruissellement en dehors des parcelles d'épandage, une percolation rapide ; * A empêcher l'accumulation dans le sol de substances susceptibles à long terme de dégrader sa structure ou de présenter un risque ecotoxicologique. 	<p>moindre mesure en Potassium.</p> <p>Il existe peu de données et de références bibliographiques pour calculer la dose. Elle doit se faire au cas par cas.</p> <p>Si l'on raisonne sur les deux composants majoritaires des cendres (CaO et K₂O), les besoins des sols et les besoins des peuplements varient dans la plupart des situations entre 0,3 et 8 tonnes par hectare et cela de 1 à 3 fois sur la vie du peuplement (plantation, éclaircies avec ou sans récoltes des rémanents)².</p> <p>Si l'on raisonne par rapport au pH, la quantité corrective³ pour augmenter le pH d'une unité sur les 3 types de sols suivant :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 4 à 8 tonnes de cendres sur les terrains sablonneux - 8 à 12 tonnes de cendres sur les terrains limoneux 12 à 20 tonnes de cendres sur les terrains argileux
	Les distances et délais d'épandage doivent respecter à minima les valeurs du tableau D5 (annexe 1) pour protéger certaines activités (zones humides, habitations)	

c) Réglementation relative aux cendres

Thème	Réglementation	Remarques et préconisations
CENDRES	Les cendres ne contiennent pas d'éléments indésirables (morceaux de plastique, de métaux, de verre) etc.	Les cendres sèches peuvent être directement récupérées sans éléments indésirables. Si ce n'est pas le cas, il est possible de les traiter avant toute opération d'épandage avec du matériel adapté : outil pour enlever les ferrailles et tamiser les cendres.
	<p>Les cendres ne peuvent être épandues :</p> <ul style="list-style-type: none"> * dès lors que les teneurs en éléments-traces métalliques ou en composés organiques dans les cendres dépassent l'une des valeurs limites figurant aux tableaux 1 a et 1 b de l'arrêté (annexe 1) * des lors que le flux cumulé sur une durée de 10 ans, apporté par les cendres sur l'un de ces éléments ou composés excède les valeurs limites figurant aux tableaux 1 a et 1 b (annexe 1) 	<p>Réaliser une seule et même analyse de cendres pour évaluer la teneur en Cadmium, Chrome, Cuivre, Mercure, Nickel, Plomb, Zinc, Chrome+Cuivre+Nickel+Zinc et la teneur en composés traces-organiques : total des 7 principaux PCB (28, 52, 101, 118, 138, 153, 180)</p> <p>Vérifier également si le flux cumulé d'apport de cendres est conformes au tableau 1a (ETM) et 1b composés traces organiques OU au tableau 3 si le pH du sol est compris entre 5 et 6 (annexe 1)</p>
	<p>Les cendres ne peuvent être épandues :</p> <ul style="list-style-type: none"> * dès lors que les teneurs en éléments-traces métalliques ou en composés organiques dans les cendres dépassent l'une des valeurs limites figurant aux tableaux 1 a et 1 b de l'arrêté (annexe 1) * des lors que le flux cumulé sur une durée de 10 ans, apporté par les cendres sur l'un de ces éléments ou composés excède les valeurs limites figurant aux tableaux 1 a et 1 b (annexe 1) 	<p>Réaliser des analyses de cendres pour évaluer la teneur en Cadmium, Chrome, Cuivre, Mercure, Nickel, Plomb, Zinc, Chrome+Cuivre+Nickel+Zinc</p> <p>⇒ Les valeurs doivent être inférieures aux valeurs du tableau tableau 1a (annexe 1)</p> <p>Dans ces mêmes analyses, demander également la teneur en composés traces-organiques : total des 7 principaux PCB (28, 52, 101, 118, 138, 153, 180)</p> <p>⇒ Les valeurs doivent être inférieures aux</p>

² Gestion et Valorisation des Cendres de Chaufferies Bois, 2005, SOLAGRO

³ Projet BIOCEN, 2003, Italie

		<p>valeurs du tableau 1b (annexe 1)</p> <p>Vérifier également si le flux cumulé d'apport de cendres est conformes au tableau 1a (ETM) et 1b composés traces organiques OU au tableau 3 si le pH du sol est compris entre 5 et 6 (annexe 1)</p>
	<p>L'échantillonnage représentatif est réalisé soit :</p> <ul style="list-style-type: none"> * soit sur chaque lot destiné à l'épandage : 25 prélèvements élémentaires uniformément répartis en différents points et différentes profondeurs dans les différents contenants constituant le lot sont effectués à l'aide d'une sonde en dehors de la croûte de surface et des zones où une accumulation d'eau s'est produite. Ils sont mélangés dans un récipient ou sur une bâche et donnent, après réduction, l'échantillon représentatif envoyé au laboratoire pour analyse ; * soit en continu : un prélèvement élémentaire est effectué sur les cendres évacuées du foyer de combustion une fois par semaine lorsque le volume annuel de cendres sous foyer est supérieur à 2000 tonnes, une fois par mois sinon. Chaque prélèvement élémentaire contient au moins 50 grammes de matière sèche et tous doivent être identiques. Ils sont conservés dans des conditions ne modifiant pas leur composition. Lorsqu'un lot de cendres prêtes à être épandues est constitué, l'ensemble des prélèvements élémentaires sont rassemblés dans un récipient sec, propre et inerte. Ils sont homogénéisés de façon efficace à l'aide d'un outil adéquat pour constituer un échantillon composite, et donnent après réduction éventuelle, l'échantillon représentatif envoyé au laboratoire pour analyse. 	<p>La définition d'un lot de cendres est à préciser :</p> <ul style="list-style-type: none"> * Qu'est ce qu'un lot de cendres ? la production d'une année ? la production par saison ? * Si l'on fait des analyses de cendres tous les mois, cela peut alourdir l'analyse économique <p>Le laboratoire a pour l'instant une méthode d'échantillonnage moins lourde qui consiste à réaliser 10 prélèvements élémentaires uniformément répartis en différents points et différentes profondeurs.</p>
	<p>L'échantillon représentatif envoyé au laboratoire représente entre 500 grammes à 1 kg de matière sèche.</p> <p>Les analyses réalisées par le laboratoire portent sur l'ensemble des paramètres listés aux tableaux 1a et 1b du point G.2 (annexe 1) ainsi que sur les paramètres suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> * matière sèche (%) ; * pH ; * phosphore total (en P2O5); potassium total (en K2O); calcium total (en CaO); magnésium total (en MgO) ; * oligo-éléments (bore, cobalt, cuivre, fer, manganèse, molybdène, zinc). 	<p>Elles sont réalisées dans un délai tel que les résultats d'analyse sont connus avant réalisation de l'épandage.</p> <p>Les frais d'analyse sont à la charge de l'exploitant de l'installation de combustion.</p> <ul style="list-style-type: none"> * Les données relatives aux caractéristiques des cendres et aux doses d'emploi sont adressées au préfet du lieu de déclaration de l'installation de combustion à l'issue de la première année de fonctionnement. * Les résultats d'analyses ainsi que les valeurs limites figurant aux tableaux 1a et 1b du point G.2 sont transmises avant chaque épandage au prêteur de terre.

d) Réglementation relative au sol

Thème	Réglementation	Remarques et préconisations
SOL	<p>Les cendres ne peuvent être épandues :</p> <ul style="list-style-type: none"> * dès lors que les teneurs en éléments-traces métalliques dans les sols dépassent l'une des valeurs limites figurant au tableau 2 <p>Autorisation possible par le préfet en cas de dépassement de certaines valeurs dans les sols, s'il est prouvé que les ETM ne sont pas mobiles, biodisponibles ou que les sols contiennent à l'origine des teneurs naturelles en métaux supérieures aux valeurs limites</p>	<p>Réaliser une seule et même analyse de sols pour l'ensemble de ces éléments.</p>
	<p>Les analyses pour la caractérisation de la valeur agronomique des sols portent sur :</p> <ul style="list-style-type: none"> * la granulométrie, * les mêmes paramètres que pour la caractérisation de la valeur agronomique des cendres en remplaçant les éléments concernés par P₂O₅ échangeable, K₂O échangeable, MgO échangeable et CaO échangeable. <p>Les résultats d'analyses ainsi que les valeurs limites figurant au tableau 2 du point G.2 (annexe 1) sont transmis au prêteur de terre dès que les résultats d'analyse sont connus.</p>	
	<p>Les méthodes d'échantillonnage et d'analyse s'appuient sur les normes en vigueur.</p> <p>Les sols sont analysés sur chaque point de référence représentatif de chaque zone homogène :</p> <ul style="list-style-type: none"> * après l'ultime épandage, sur le ou les points de référence, sur chaque parcelle exclue du périmètre d'épandage; * au minimum tous les dix ans. <p>Par zone homogène, on entend une partie d'unité culturale homogène d'un point de vue pédologique n'excédant pas 20 hectares.</p> <p>Par unité culturale, on entend une parcelle ou un groupe de parcelles exploitées selon un système unique de rotations de cultures par un seul exploitant agricole.</p>	<p>Il y a une incohérence dans la réglementation qui préconise de réaliser une analyse de sol après l'ultime épandage alors qu'il faudrait en réaliser un avant l'épandage pour connaître la nature du sol, savoir si on est autorisé à épandre et définir la dose. Cette partie n'est pas adaptée au contexte forestier mais garde tout son sens dans un contexte d'épandage sur sol agricole</p>

e) Réglementation relative au stockage

Thème	Réglementation	Remarques et préconisations
STOCKAGE	<p>Toutes les dispositions sont prises pour que les dispositifs d'entreposage ne soient pas source de gêne ou de nuisances pour le voisinage et n'entraînent pas de pollution des eaux ou des sols par ruissellement ou infiltration. Le déversement dans le milieu naturel des trop-pleins des ouvrages d'entreposage est interdit. Les ouvrages d'entreposage à l'air libre sont interdits d'accès aux tiers non autorisés.</p>	<p>Les cendres peuvent être stockées soit sur le site de la chaufferie, soit chez le propriétaire forestier qui peut avoir de la place dans sa propriété ou sur la parcelle sur laquelle va être réalisée l'opération d'épandage. Dans le cas de cendres granulées ou auto-durcies, on peut envisager de stocker les cendres sur le site de traitement.</p>
	<p>Le dépôt temporaire de déchets, sur les parcelles d'épandage et sans travaux d'aménagement, n'est autorisé que lorsque les cinq conditions suivantes sont simultanément remplies :</p> <ul style="list-style-type: none"> * Les déchets sont solides et peu fermentescibles, à défaut, la durée du dépôt est inférieure à quarante-huit heures ; * Toutes les précautions ont été prises pour éviter le ruissellement sur ou en dehors des parcelles d'épandage ou une percolation rapide vers les nappes superficielles ou souterraines ; * Le dépôt respecte les distances minimales d'isolement définies précédemment (distances et délais), sauf pour la distance vis-à-vis des habitations ou locaux habités par des tiers, qui est toujours égale à 100 mètres. En outre, une distance d'au moins 3 mètres vis-à-vis des routes et fossés est respectée ; * Le volume du dépôt est adapté à la fertilisation raisonnée des parcelles réceptrices pour la période d'épandage considérée ; * La durée maximale ne dépasse pas un an et le retour sur un même emplacement ne peut intervenir avant un délai de trois ans. 	<p>Si les cendres sont humides, il est important de ne pas les laisser à l'air libre trop longtemps (moins de 48h) pour éviter qu'elles ne prennent en masse. La meilleure solution est de les stocker dans une benne si possible couverte.</p> <p>Si les cendres sont sèches, elles peuvent être stockées soit à même le sol, soit sur une dalle ou dans une benne. Il est important que le lieu de stockage soit propre (sans pierres par exemple) pour éviter le chargement d'éléments indésirables dans l'épandeur qui pourraient le bloquer.</p> <p>Les cendres sèches peuvent être stockées à l'air libre si les conditions météorologiques (pluie et vent) pour éviter les envolées de cendres et le ruissellement.</p> <p>Le stockage en big bag peut être envisagé pour éviter ce genre de situations (chargement d'éléments indésirables dans l'épandeur et intempéries)</p> <p>Il est à noter qu'il est important dans certaines cas, notamment lorsque les cendres sont stockées en big bag, sous fortes chaleur, et lorsqu'il y a du vent, d'éteindre la chaux vive présente dans les cendres pour éviter les phénomènes d'autoéchauffement qui pourraient être à l'origine d'incendies.</p>
	<p>Les ouvrages permanents d'entreposage des cendres sont dimensionnés pour faire face aux périodes où l'épandage est soit impossible, soit interdit par l'étude préalable.</p>	

	L'exploitant de l'installation de combustion identifie les installations de traitement de déchets auxquelles il peut faire appel en cas de dépassement de ces capacités de stockage de cendres.	
--	---	--

f) Réglementation relative au suivi de l'épandage

Thème	Réglementation	Remarques et préconisations
SUIVI DE L'EPANDAGE	<p>L'étude préalable d'épandage justifie la compatibilité de l'épandage avec les contraintes environnementales recensées et les documents de planification existants, notamment les plans prévus à l'article L 541-14 du code de l'environnement et les schémas d'aménagement et de gestion des eaux, prévus aux articles L 212-1 et 3 du code de l'environnement.</p> <p>L'étude préalable d'épandage établit :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Caractérisation des cendres - Doses - Emplacement, volume, caractéristiques et modalités d'emploi des stockages de cendres; l'identification des filières alternatives d'élimination ou de valorisation - caractéristiques des sols <p>Adéquation entre les <u>surfaces agricoles</u> maîtrisées par l'exploitant de l'installation de combustion ou mises à sa disposition par le prêteur de terre et les flux de cendres à épandre (productions, rendements objectifs, doses à l'hectare et temps de retour sur une même parcelle, périodes d'interdiction d'épandage)</p>	<p>Analyses de sols de moins de 3 ans</p> <p>La définition des doses à épandre méritent d'être définies. Elles doivent se faire au cas par cas, vu la variabilité des cendres.</p> <p style="text-align: center;">⇒ Besoin en R&D identifiés</p>
	<p>Plan d'épandage :</p> <ul style="list-style-type: none"> - carte à une échelle minimum de 1/25000ème - document mentionnant l'identité et l'adresse des prêteurs de terres qui ont souscrit un contrat écrit avec l'exploitant de l'installation de combustion, précisant notamment leurs engagements et responsabilités réciproques 	<p>Pour qu'un tiers gère l'épandage de cendre, il est nécessaire de vérifier si un transfert de responsabilité peut être établi entre l'exploitant de l'installation et le tiers, puis entre le tiers et le prêteur de terre.</p>
	<p>Programme prévisionnel annuel d'épandage :</p> <ul style="list-style-type: none"> * La liste des parcelles concernées par la campagne ainsi que la caractérisation des systèmes de culture (culture implantées avant et après épandage, période d'interculture) sur ces parcelles ; * Les préconisations spécifiques d'apport des cendres (calendrier et doses d'épandage) ; * L'identification des personnes morales ou physiques intervenant dans la réalisation de l'épandage. 	<p>A faire un mois avant le début des opérations concernées</p> <p>Ce programme prévisionnel est tenu à la disposition de l'inspection des installations classées. Il lui est adressé sur sa demande.</p>
	<p>Un cahier d'épandage, tenu sous la responsabilité de</p>	<p>Quand ? Chaque semaine au cours de</p>

	<p>l'exploitant de l'installation de combustion, à la disposition de l'inspection des installations classées pendant une durée de dix ans, comporte pour chacune des parcelles (ou îlots) réceptrices épandues :</p> <ul style="list-style-type: none"> * les surfaces effectivement épandues ; * les références parcellaires ; * les dates d'épandage ; * la nature des cultures ; * l'origine et la nature de la biomasse utilisée dans l'installation de combustion, * les volumes et la nature de toutes les matières épandues au titre du présent plan d'épandage de l'ICPE ; * les quantités d'éléments traces métalliques épandues au titre du présent plan d'épandage de l'ICPE ; * l'identification des personnes morales ou physiques chargées des opérations d'épandage ; * l'ensemble des résultats d'analyses pratiquées sur les sols et les matières épandues avec les dates de prélèvements et de mesures et leur localisation. 	<p>laquelle des épandages ont été effectués.</p> <p>Qui ? l'exploitant de l'installation de combustion, à défaut le tiers qui effectue l'épandage</p> <p>Pour qui ? à la disposition de l'inspection des ICPE pendant une durée de 10 ans</p> <p>Lorsque les cendres sont épandues sur des parcelles mises à disposition par un prêteur de terres, un bordereau cosigné par l'exploitant de l'installation de combustion et le prêteur de terre est référencé et joint au cahier d'épandage. Ce bordereau est établi au plus tard à la fin du chantier d'épandage et au moins une fois par semaine. Il comporte l'identification des parcelles réceptrices et les volumes épandus.</p>
--	---	--

g) Réglementation relative à la sécurité lors de l'épandage

Thème	Réglementation	Remarques et préconisations
SECURITE	Elles ne portent pas atteinte à la santé des hommes.	<p>L'épandage de cendres sèches crée un nuage de poussières : Port des équipements de protection individuels obligatoires (gants, masques, lunettes, bottes, etc.).</p> <p>Présence de chaux vive entre 25 et 50% dans les cendres sèches : éteindre la chaux vive en les humidifiant avant manipulation ou traitement.</p> <p>Risque d'autoéchauffement dans certains conditionnements.</p>
	Elles ne portent pas atteinte à la santé des animaux, à la qualité et à l'état phytosanitaire des cultures, et à la qualité des sols et milieux aquatiques	
	<p>L'épandage des cendres est mis en œuvre afin que les nuisances soient réduites au minimum. Des moyens appropriés sont mis en œuvre pour éviter les envols de cendres pulvérulentes. En particulier, les cendres sont enfouies le plus tôt possible, dans un délai maximum de 48 heures.</p> <p>Les cendres pulvérulentes sont enfouies dans un délai maximum de 4h lorsque la parcelle sur laquelle aura lieu l'épandage se situe dans le périmètre d'un plan de protection de l'atmosphère.</p>	<p>La société Tembec a utilisé un automoteur pour épandage de chaux muni d'une jupe pour éviter les envols de poussières.</p>  <p>Utiliser un cover crop pour l'enfouissement des cendres dans le sol.</p>
	Toute anomalie constatée sur les sols, les cultures et leur environnement lors ou à la suite de l'épandage de cendres et susceptible d'être en relation avec ces épandages est signalée sans délai au préfet du lieu de déclaration de l'installation de combustion.	

Résumé des règles d'épandage :

Les principes de valorisation par épandage des cendres sont équivalentes entre les différents régimes. La différence réside dans le fait que les cendres issues des ICPE soumises à déclaration et enregistrement peuvent être épandues dans les forêts exploitées alors que les cendres issues des ICPE soumises à autorisation ne peuvent être actuellement épandues que sur sols agricoles au vu de l'interprétation de la réglementation.

Le propriétaire des cendres doit :

- Démontrer un intérêt pour les sols ou la nutrition des cultures ;
- Démontrer que leur application ne porte pas atteinte, directement ou indirectement, à la santé de l'homme et des animaux, à la qualité et à l'état phytosanitaire des cultures, et à la qualité des sols et des milieux aquatiques ;
- Réaliser une étude préalable à l'épandage ;
- Réaliser un plan d'épandage ;
- Tenir un cahier d'épandage ;
- Respecter des caractéristiques/seuils en éléments traces métalliques, en composés-traces organiques dans les cendres ;
- Réaliser des analyses sur échantillons représentatifs des cendres ;
- Suivre les modalités d'épandage.

2.2.3. Argumentaire pour défendre d'éventuelles améliorations du dispositif national

Arrêté du 26 août 2013 pour les ICPE soumises à Autorisation

L'épandage des cendres issues des installations soumises à autorisation (>20MW) en forêt n'est pas encadré spécifiquement. Pour épandre des cendres en forêt, il faut se référer à l'arrêté du 2 février 1998 relatif à l'épandage des déchets et effluents sur sols agricoles.

Il paraît essentiel de créer parallèlement un nouveau projet d'arrêté pour les installations soumises à autorisation, qui encadrerait spécifiquement l'épandage des cendres en forêt. Cela permettrait de clarifier les choses, d'être cohérent avec l'arrêté du 26 août 2013 relatif aux installations soumises à déclaration et que l'application du texte en question ne soit pas discutable.

Le ministère de l'Energie du Développement Durable et de l'Ecologie répond que les prescriptions pour les ICPE soumises à autorisation sont généralement moins précises que celles fixées dans les arrêtés des ICPE soumises à déclaration car les sites bénéficient d'un arrêté préfectoral délivré qui précise et adapte certaines prescriptions. Il y a une instruction à partir d'une étude d'impact qui est réalisée et c'est en fonction de ces éléments que les prescriptions sont élaborées par le Préfet. La définition de prescriptions types dans l'arrêté des ICPE soumises à autorisation ne paraît donc pas adaptée.

Une autre solution pour pouvoir épandre en forêt tout en respectant la loi sur les épandages sur les sols agricoles, serait d'assimiler un sol forestier à un sol agricole. Aujourd'hui, aucun texte législatif ou réglementaire ne donne de définition juridique de la forêt et encore moins d'un sol forestier.

Néanmoins, un principe préliminaire est constant, la qualification de bois ou forêt est une question de fait. C'est l'état concret du terrain concerné qui compte et non un zonage ou un classement administratif ou fiscal.

Ainsi, le code forestier s'applique pleinement à un terrain devenu boisé même s'il est resté classé en lande ou terre agricole par le cadastre. A l'inverse, l'édification d'un bâtiment sur une parcelle cadastrée « bois » ne nécessite pas d'autorisation de défrichement s'il est édifié dans une clairière qui n'a jamais été boisée. L'institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN) définit ainsi la forêt : occupant une superficie d'au moins 50 ares avec des essences forestières capables d'atteindre une hauteur supérieure à 5 m à maturité in situ, un couvert arboré de plus de 10 % et une largeur moyenne d'au moins 20 m". Mais cette définition précise n'est pas celle retenue en droit, dont le plus grand flou laisse plus de marge d'appréciation.

La circulaire du 18 janvier 1971 relative à la taxe sur le défrichement est un des rares textes à avoir énoncé une définition de la forêt pour l'application du code forestier. Sans avoir aucune valeur légale, elle reste sans doute actuellement la plus valable au regard de la pratique et de la jurisprudence.

Selon celle-ci, les "bois et forêts" sont "les formations végétales comprenant des tiges d'arbres d'essences forestières dont les cimes, si elles arrivaient simultanément à maturité, couvriraient la plus grande partie du terrain occupé par la formation, que celle-ci soit au moment de l'enquête à l'état de semis, de rejets sur souches, de fourrés, de gaulis, de perchis ou de futaie", et elle ajoute que, selon une jurisprudence constante, "les peupleraies sont des peuplements forestiers" pour ceux qui en doutent.

On peut retenir les éléments importants suivants, confirmés par la jurisprudence :

- une forêt est composée d'arbres. Une formation composée uniquement d'espèces ligneuses "arbustives" ne dépassant pas quelques mètres (genêts, aubépine, chêne kermès, cornouillers, etc...) n'est pas une forêt. (c'est aussi le point de vue de l'IGN).
- Un terrain peut être considéré comme boisé, en droit, avec à peine une centaine de plants à l'hectare, et il n'est pas nécessaire pour cela d'atteindre les fortes densités prescrites pour les aides de l'Etat aux plantations forestières.
- L'âge du boisement importe peu, de même que son mode de traitement et sa qualité (sa médiocrité n'exonère pas des règles du code forestier !!!).
- Le code forestier ne s'applique pas à une haie (Cour de cassation 2e civ. 25 mai 1976).

La notion de destination forestière est un complément nécessaire à la définition physique de la forêt sous deux aspects. En cas de coupe rase ou de destruction des arbres d'une forêt par un incendie, une tempête, le terrain, même s'il n'y reste aucun arbre, est réputé garder sa destination forestière, ce qui veut dire qu'il reste assimilé à une forêt tant qu'il ne fait pas l'objet d'une autre utilisation du sol (agriculture, construction...), car ce n'est pas la destruction du boisement mais le changement d'affectation du sol qui caractérise le défrichement. Ainsi, une coupe rase n'est pas un défrichement et ne met pas fin à l'application d'un document de gestion forestière, ni du code forestier. De même, un boisement détruit par un incendie ou la tempête reste soumis au code forestier et à autorisation de défrichement si l'on veut l'affecter à un autre usage. Un terrain totalement déboisé ou une lande peuvent ainsi rester juridiquement des forêts, même 40 ans plus tard, pour la seule raison qu'ils étaient antérieurement boisés et qu'on ne leur a jamais donné d'autre destination effective depuis. Cette ancienne jurisprudence a été transcrite depuis 2001 à l'article L. 341-1 du code forestier

Parfois, un groupe d'arbres peut ne pas être une forêt sur le plan juridique. Le second emploi de cette notion est qu'une formation arborée qui répond à la définition physique de la forêt peut n'en être pas une si elle a une destination autre que forestière ou incompatible avec cette dernière. Quelques exemples :

- les formations arborées principalement destinées à une production agricole et spécialement cultivées à cet effet : vergers, plantations de sapins de Noël (c'est de l'horticulture), truffières cultivées.
- Les parties boisées des parcs et jardins publics ou bois très artificialisés (Bois de Boulogne).
- L'affectation d'un espace boisé à toute activité habituellement soumises à autorisation d'utilisation du sol met généralement fin à sa destination forestière, même si l'on n'y coupe aucun arbre. Ceci vaut pratiquement pour toute construction, installation d'un camping ou d'un parking sous forêt, d'un golf, ... Cela nécessite donc une autorisation de défrichage et est incompatible avec un classement en espace boisé à conserver.

Arrêté du 26 août 2013 pour les ICPE soumises à Déclaration et annexe III de l'arrêté enregistrement :

Avec ce nouvel arrêté, il sera difficile d'épandre des cendres des ICPE soumises à déclaration car plusieurs points sont limitants :

- l'interdiction d'épandre sur des sols acides
- l'enfouissement des cendres pulvérulentes dans les 48h
- le droit d'épandre uniquement sur des forêts exploitées
- Pour les deux arrêtés, il est nécessaire de préciser quand et comment réaliser les analyses de cendres, notamment pour les installations produisant moins de 2000 tonnes de cendres
- La réglementation définie pour les analyses de sols est adaptée au contexte agricole et non au contexte forestier.

3. Recommandations techniques sur la gestion des cendres – Etudes bibliographiques

3.1. Caractérisation des cendres

3.1.1. Les cendres sous foyer et les cendres volantes

Tous les types de chaudières sont équipés d'un système d'évacuation des fumées. **Les cendres sous foyer sont appelées mâchefer, tandis que les cendres évacuées avec les fumées sont appelées cendres volantes.** Le système d'évacuation peut être associé avec un système de traitement permettant la récupération des cendres volantes (séparateur à cyclone, filtre électrique et filtre physique). Les différentes étapes de nettoyage des gaz de combustion produisent des fractions de cendre avec des granulométries différentes. Le séparateur à cyclone capture les plus grosses particules et la barrière physique filtrant les particules les plus fines. La répartition de la granulométrie varie considérablement entre les différents types de chaudières.

Les cendres volantes sont généralement plus fines que le mâchefer. Les concentrations de métaux volatils tels que le **mercure** et le **cadmium** sont souvent plus faibles dans les cendres sous foyer que dans les cendres volantes et plus élevée dans les fractions à granulométrie fine que dans les fractions à grain grossier.

Si les cendres fines contaminées sont éliminés, il existe une possibilité d'utiliser les cendres restantes. Il est important de noter que la qualité des cendres sous foyer et volantes varie entre les différents types de chaudières. Les cendres sous foyers de chaudière à lit fluidisée ne doivent pas être épandues sur les sols forestiers car elles sont principalement constituées de matériaux du lit (sable), alors que les cendres volantes de ces chaudières ont des caractéristiques appropriées compte tenu de la qualité de la combustion et du système de traitement des fumées.

La contamination des cendres volantes avec la matière du lit fluidisé (sable) diminue la teneur en éléments nutritifs, augmente les coûts de manipulation et d'épandage, et comporte un risque de lésion mécanique du tronc des arbres lors de l'épandage.

Avec les chaudières, le mâchefer est plus approprié car il est plus brûlé et a de faibles concentrations de métaux que les cendres volantes. Les cendres sous foyer et les cendres volantes sont souvent mélangées dans les petites installations de combustion.

Les études nationales et internationales menées jusqu'à lors, montrent que les cendres sous foyer sont principalement riches en calcium, en potassium et dans une plus faible mesure en phosphore et magnésium. **Les cendres semblent donc être un amendement ou fertilisant intéressant.**

Cependant, **la caractérisation des cendres est une étape indispensable pour vérifier la conformité** de la composition chimique des cendres vis-à-vis de la réglementation sur l'épandage. En effet, les cendres restent un produit physiquement et chimiquement atypique. Leur pH dépasse généralement les 10 unités, ce qui leur donne une propriété alcaline semblable aux produits utilisés pour le chaulage des sols acides. D'autre part, la concentration en métaux lourds (Cadmium, Zinc, Mercure, Nickel, etc.) qui dépend principalement de la qualité du bois brûlé (DIB, plaquette de scierie, plaquette forestière, etc.) est un facteur à contrôler pour éviter toutes sortes de pollution.

3.1.2. Les cendres sèches et humides

Le procédé d'élimination des cendres de la chaudière affecte également son aptitude à une utilisation ultérieure. Les cendres peuvent être extraites directement (voie sèche) ou être évacuées avec un système hydraulique (voie humide). Compte tenu du volume de cendre qui doit être extrait les grosses chaudières sont généralement équipées de système d'évacuation hydraulique automatique.



Les cendres sèches sont faciles à traiter, mais elles sont pulvérulentes et peuvent être difficiles à manipuler : ce sont de fines particules basiques qui peuvent causer des blessures à la peau et aux yeux. Les cendres sèches contiennent généralement encore beaucoup de carbone et sont très inflammables si elles sont mal évacuées ou mal stockées. Les cendres humides sont plus faciles et moins « dangereuses » à manipuler, cependant si elles durcissent spontanément il est difficile de produire un produit uniforme et donc facilement épanchables.

3.2. Le traitement des cendres

Les données sont issues des pratiques actuelles en Finlande, du projet ReCash et des retours d'expérience du projet SYLVOGENE.

La littérature explique que les cendres de bois non transformées, pulvérulentes, sont majoritairement composées d'oxydes, ont un pH élevé et peuvent être très réactives. **Pour être épanchées en forêt et avoir des effets de fertilisation et d'amendement à long terme, sans causer de dommages à la végétation et à la faune du sol, les cendres doivent être traitées avant l'épandage.** Le traitement a pour objectif de stabiliser les cendres et de les rendre aussi homogènes que possible en minimisant la proportion de particules fines. Les effets des chocs alcalins sur la végétation au sol peuvent ainsi être évités. Une fois traitées, les cendres sont de qualité homogène et sont également plus faciles à épancher en forêts.

La stabilisation est également chimique. Le « durcissement » chimique est basé sur la présence d'oxydes convertis en hydroxydes par addition d'eau et éventuellement en carbonates par réaction avec du dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère. Ces réactions chimiques rendent les cendres moins réactives et les éléments chimiques présents moins solubles.

Il existe actuellement deux méthodes principales pour le traitement des cendres : l'auto-durcissement et le broyage et la granulation. Ces méthodes sont toutes basées sur l'humidification des cendres sèches avec de l'eau. L'humidification est une étape qui peut se révéler délicate selon le degré de volatilité et d'électrostaticité des cendres. Plus elles sont fines plus il est difficile d'humidifier uniformément.

L'humidification

Plusieurs types de machines sont disponibles pour le processus d'humidification :

- la bétonnière, cette technique à l'avantage d'être bon marché, facilement accessible et adaptable. Elle est adaptée pour des sites avec une petite production de cendre. Une fois par an, l'entreprise équipée de la bétonnière peut se déplacer de chaufferie en chaufferie pour récolter la cendre et la granuler.



Figure 1: Humidification de cendre de bois à l'aide d'une bétonnière, source : ReCash

- le malaxeur, alimenté avec un convoyeur à vis sans fin, composé d'un récipient cylindrique horizontal où les cendres et l'eau sont mélangées avec un axe en rotation auquel des pelles ou des lames sont fixées. Ce système est généralement installé dans des chaufferies ayant une grosse production de cendre en continue.

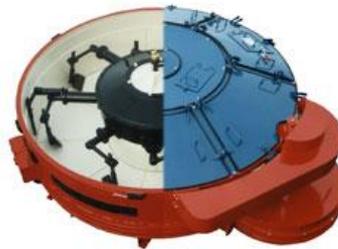


Figure 2 : Mélangeur à cendre de la société suédoise Fejmert

Pour éviter des coûts de transport de machine élevés, la centralisation de la production de cendres granulées est la solution économiquement la plus pertinente. Des sites sous dimensionnés ou trop dispersés entraînent des coûts supplémentaires prohibitifs pour le développement d'une filière de grande échelle.

La granulation est souvent plus coûteuse que la technique d'auto-durcissement et de broyage, mais elle donne un produit final plus uniforme avec une plus faible proportion de fines. L'obtention de ce type de granulés homogènes est souhaitable.

3.2.1. L'auto-durcissement et le broyage

L'auto-durcissement amélioré, suivi d'un broyage, est la technique la plus largement pratiquée dans les pays nordiques, principalement parce qu'elle est peu coûteuse et nécessite peu d'équipements.

La cendre est humidifiée dans un mélangeur, les grosses bétonnières qui ont été utilisées donnent de bons résultats. Une quantité d'eau suffisante pour humidifier toutes les surfaces des particules de cendre (environ 40% pour des cendres volantes et 15% pour les cendres sous foyer, calculée en % de la masse) est ensuite ajoutée. L'eau et les cendres doivent être mélangées très délicatement dans les bonnes proportions, grâce à un malaxeur ou à la vis sans fin du mélangeur présent sous le silo de stockage des cendres de la chaufferie. La cendre humidifiée est ensuite répartie sur une surface plane (zone de stockage temporaire), où elle va s'auto-durcir. La qualité du produit fini peut être améliorée par le saupoudrage de cendre en couches minces (maximum 40 cm de haut à la fois), sur le tas formé par les cendres humides. Chaque couche ensuite est mélangée sur elle-même à plusieurs reprises avec un tracteur. La reprise du tas rend les cendres de plus en plus difficilement solubles et permet de réduire la quantité de particules fines produites lors du broyage.

Remarque : Si la teneur en carbone des cendres est trop élevée, le processus de stabilisation ne fonctionnera pas, les cendres ne durciront pas. Les cendres seront plus friables et la proportion de fines sera plus importante conduisant à une plus haute solubilité dans le sol.



Figure 3 : godet de criblage pour le concassage des cendres auto durcies

Après la formation du tas de cendre humide, il est important que la cendre soit laissée au repos assez longtemps pour que l'auto-durcissement chimique puisse se produire. Le temps nécessaire dépend de plusieurs facteurs, notamment la température et la quantité de cendres. Avec une manipulation correcte et une bonne qualité de cendre, une production datant de l'hiver devrait être entièrement durcie à la fin du printemps ou début de l'été. Pour un tas de taille réduite, le durcissement peut s'opérer en quelques jours.

Une fois que la cendre a durci, le tas formé doit être brisé. Si la pile a durci correctement et en profondeur, la meilleure façon de le casser est avec une pelleteuse. Les cendres sont ensuite broyées afin d'obtenir des particules de taille plus fine pour un épandage homogène. Le broyage peut être effectué avec un broyeur ou un godet de criblage, godet monté sur un tracteur avec des cylindres de broyage à sa base. Le produit broyé peut souvent être déversé directement dans un camion ou dans une

benne pour être transportée en forêt. Si un broyage produit beaucoup de fine, la cendre peut être criblée avant d'être épandue.

Les cendres traitées sont sensibles à la réhumidification et à la déshydratation. Elles doivent donc être recouvertes avec une bâche de protection en cas de fortes précipitations ou si elles sont stockées pendant une longue période avant l'épandage. Cependant, les cendres peuvent être réhumidifiées si nécessaire avant d'être chargées dans l'épandeur, de sorte que cela ne crée pas de poussières lors de leur manipulation et de l'épandage. La quantité d'eau qui doit être ajoutée varie, mais généralement la poussière peut être contenue en ajoutant 5% d'eau.



Figure 4: granules de cendre obtenue par auto durcissement, source SLU

Il est difficile de préciser le coût de la technique d'auto-durcissement des cendres, en particulier pour les grandes chaufferies qui ont leurs propres aires de stockage. Les étapes pour lesquelles les coûts peuvent être estimés sont : le mélange à l'eau dans une bétonnière, la formation du tas pour l'auto-durcissement, la reprise du tas et son broyage/criblage. Le coût approximatif est de 5-11 €/tonne pour mélanger avec de l'eau ; de 4-7 €/tonne pour concassage et de criblage ou 2-5€/tonne pour le broyage/criblage avec un godet. **Soit un prix de revient du produit fini de 11-20€/tonne.**

3.2.2. La granulation scandinave

La granulation consiste à « rouler » le mélange de cendres et d'eau dans un tambour type bétonnière. Une fois les granulés formés, ils sont séchés à l'air chaud pour éviter qu'ils ne s'agglomèrent ensemble. **La manipulation des cendres granulées est**



plus propre que la manipulation des cendres auto durcies. La granulation a été testée à échelle industrielle en Finlande. En Suède, la méthode a été utilisée dans le cadre de projets scientifiques. La technique a surtout produit des particules très dures avec un taux de lixiviation lente. La principale objection à cette technique est son coût, due aux besoins de chaleur lors de la formation des granulés. **Cependant cette technique de granulation existe également avec une formation des granulés sans chaleur, auto-séchés, ce qui réduit les coûts.** Différents types de liants peuvent également être ajoutés dans le procédé de granulation pour rendre le produit final encore plus stable. Les granulés peuvent également être revêtus d'une couche superficielle dense, par exemple, de lignine ou de stéarate, afin de réduire davantage le taux de lixiviation.

Une compagnie suédoise a mis au point un procédé de granulation où les granulés sont auto-séchés. La méthode est utilisée depuis 1997. Le processus de mélange/granulation est basé sur un mélangeur utilisé pour le mélange d'asphalte. Le type de mélangeur à pales actuellement utilisé pour le mouillage des cendres des installations de chauffage pourrait facilement être adapté pour la granulation. Pour assurer la qualité, la cendre passe au travers d'une grille avec des mailles de 50 mm. Les morceaux qui restent sur la grille sont collectés, rebroyés et remixés dans les cendres. La quantité de matière rejetée varie pour différents types de cendres. Basé sur l'expérience de la société suédoise environ 15% des cendres sont rebroyées.

La quantité de cendre, d'eau et de liant qui entrent dans le granulateur est contrôlée par la vitesse du tapis d'alimentation, de la vis sans fin, et du débit de la pompe. Le type et la quantité de liant et/ou d'additif (chaux, engrais, etc.) dépend de la réactivité des cendres. Il y a une trémie pour chaque type de matériau et le débit, la dose totale est contrôlée grâce à l'ordinateur central du système de mélange.

La taille des granulés et leur vitesse de formation dépend de divers facteurs : la vitesse du mélange, l'humidité, la quantité de particules fines, de liant, la disposition des pales du granulateur, etc. La production journalière de granulés peut atteindre 150 à 200 tonnes selon le type de mélangeurs. **Le prix varie entre 8-12€/tonne de granulés finis (auto-séchés).** Le coût le plus important étant lié à l'installation du matériel et au réglage du système. Quand l'unité de fabrication atteint son rythme de croisière le coût peut tourner autour de 4-5€/tonne de granulés finis.

L'expérience des pays nordiques montre que la granulation fonctionne beaucoup moins bien si les cendres contiennent encore beaucoup de carbone non brûlé. Dans ce cas les cendres doivent subir une recombustion. Les granulés peuvent être stockés avant d'être épanchés. Si le temps de stockage est supérieur à 1 ou 2 mois, la pile doit être recouverte par une bâche pour réduire le risque de déshydratation de la couche externe du tas et réduire ainsi le risque de formation de poussières.

Ce type de procédé de production en ligne/en continu est généralement adapté pour de grosses installations compte tenu de l'investissement nécessaire : granulateur, tapis, convoyeur, ordinateur, etc.

3.2.3. La granulation compactée ou pelletisation

Le procédé de compactage consiste à produire de gros granulés formés à partir du mélange de cendres et d'eau grâce à une machine de pressage. Par exemple, la cendre mouillée peut être pressée entre les cylindres (processus connu sous le nom compactage à cylindre). Les agents liants tels que le ciment peuvent être ajoutés pendant le compactage pour produire des produits plus stabilisés.



Figure 6 : Granules de cendres obtenus par granulation compactée

Une variété de techniques de compactage à cylindre ont été développées en Suède dans le cadre du projet Ecocycle : 1500 tonnes de granulés ont été produites dans le projet, principalement à partir de cendres, mais aussi des bous provenant de l'industrie du papier (Emilsson, 2006).

La technique de compactage à cylindre consiste à compacter la cendre mouillée grâce à un cylindre rainuré. Les cylindres de cendres formés dans les rainures peuvent être coupés à la longueur désirée. La technique est robuste et peut être adaptée pour accueillir une automatisation poussée.

Le cylindre pour la pelletisation est intégré dans le récipient et équipé d'un ensemble complet de commandes. Il est **facile à transporter et à installer**. Les cendres devront être plus ou moins homogènes.

Pour le montage du système, deux jours et deux personnes seront nécessaires. La production moyenne du cylindre est de 5t/h mais dans le projet jusqu'à 10 t/h de granulés ont été produits dans sans aucun problème de fonctionnement.

Après granulation, le produit devra durcir pendant quelque temps (un mois en Suède).

Le coût approximatif (opérations + transport) est de **9.5 €/tonne pour des cendres sèches et 6.6 €/t pour des cendres humides**. Il faudrait **ajouter un investissement de capital de 3-8.7 €/t** de cendres (Emilsson, 2006).

3.3. Veille technologique sur le matériel d'épandage

3.3.1. Le matériel d'épandage agricole

Une large gamme de produits existe sur le marché. Ils permettent de passer entre les lignes y compris dans les vignes en utilisant des matériels surbaissés et de moindre largeur. Au vu de leur coût pour des cultures pérennes, l'option d'achat groupé via les Coopératives d'Utilisation de Matériel Agricole (CUMA) ou l'appel à l'entreprise semble souvent la meilleure alternative.

Ces épandeurs agricoles ne sont pas forcément adaptés aux conditions forestières. D'une part à cause des terrains accidentés que l'on rencontre en forêt (souche, pente, pierre, faible portance des sols...), de l'encombrement du matériel pour circuler dans les peuplements et d'autre part à cause des faibles doses de cendres qui doivent être épandues. En effet, les quantités de cendres qui sont épandues en forêt sont généralement plus faibles que pour des terrains agricoles. Pour cela d'autres types d'épandeurs peuvent être choisis.

Les matériels rencontrés sont les épandeurs horizontaux et verticaux avec ou sans table d'épandage (tableau 1), les épandeurs à tapis, les épandeurs pendulaires et centrifuges, les épandeurs à chaux (tableau 2) et les épandeurs pour produits liquides (tableau 3).

Tableau 1 : Principales caractéristiques des épandeurs pour produits sous forme de granulés ou poudre

Épandeurs à hérissons				
	Épandeur à hérisson horizontal	Épandeur à hérisson vertical	Épandeur à hérisson verticaux ou horizontaux + table d'épandage	Épandeurs à hérissons verticaux + poussoir + guillotine
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Rapidité d'épandage - Fort tonnage (5 à 15 tonnes) 	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne largeur d'épandage (6 à 12m) - Grande variabilité de dose 	<ul style="list-style-type: none"> - Largeur d'épandage importante (14 à 20m) - Fort tonnage (8 à 20 tonnes) - Bon émiettement - Régularité 	<ul style="list-style-type: none"> - Bon épandage en terrain accidenté - Bon épandage des produits liquides (< 25% MS) + Epandeur table
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Ne passe pas à faible dose - Largeur d'épandage réduite (verticale) 	<ul style="list-style-type: none"> - Hauteur matériel - Plus d'entretien par rapport à l'horizontal 	<ul style="list-style-type: none"> - Peu adapté pour les produits pailleux - Produit léger 	<ul style="list-style-type: none"> - Plus d'entretien - Coût élevé
Précaution d'emploi pour bon usage	<ul style="list-style-type: none"> - Besoin de produit homogène - Attention aux cailloux 		<ul style="list-style-type: none"> - Technicité dans le réglage - Consommation d'énergie plus importante 	Technicité dans le réglage
Dose épandue	30 tonnes/ha	10 à 40 tonnes/ha	5 à 15 tonnes/ha	5 tonnes/ha et plus
Photos				
Produit épandu	Matériel grossier et pailleux (Fumier)	Matériel grossier et pailleux (Fumier)	Compost, fientes et sous produits divers	

Source : Guide des Produits Organiques utilisables en Languedoc Roussillon

Notes : Les épandeurs à hérissons horizontaux sont très peu utilisés.

Concernant la dose de cendres à épandre elle peut aller de 0.3-20 t/ha avec en moyenne 4t/ha selon le type de sol et le peuplement (études SOLAGRO, Biocen 2003, RecAsh). Pour autant les épandeurs les plus adaptés seraient l'épandeur à hérisson vertical ou horizontal plus une table d'épandage et l'épandeur à hérissons verticaux plus un poussoir et une guillotine.

Tableau 2 Principales caractéristiques des épandeurs pour produits sous forme de granulés ou poudre

	Épandeur pendulaire	Épandeur centrifuge (à disques)	Épandeur à tapis	Épandeurs à chaux* : produit pulvérulent
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Faible coût - Peu de puissance nécessaire - Faible adaptabilité de la largeur d'épandage - Possible d'adapter la localisation de l'apport facilement - Très peu d'entretien 	<ul style="list-style-type: none"> - Largeur d'épandage adaptable (avec déflecteur) - Un peu plus d'entretien que le pendulaire - Produit pulvérulent passe 	<ul style="list-style-type: none"> - Localisation possible à différents endroits (1 rang, interrang, 2 rang) - Adapté aux cultures pérennes en entretien 	<ul style="list-style-type: none"> - Adapté au produit pulvérulent (chaux, cendres,...)
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Adapté seulement pour les granulés - S'use vite - Moindre régularité de l'épandage en plein 	<ul style="list-style-type: none"> - Adapté seulement pour des granulés 	<ul style="list-style-type: none"> - Capacité limitée 	<ul style="list-style-type: none"> - Granulométrie doit être très fine
Précaution d'emploi pour bon usage	<ul style="list-style-type: none"> - Le produit épandu ne doit pas s'humidifier 	<p>Le produit épandu ne doit pas s'humidifier</p>	<p>200 – 300 kg/ha</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Enfouir les cendres dans les 48 heures - Epannage interdit avec vent supérieur à 5 m/s
Dose épandue	<ul style="list-style-type: none"> - 50kg/ha sur prairie soit 0.05 tonne/ha - 200 kg/ha soit 0.2 à 0.6 t/ha 	<ul style="list-style-type: none"> - 50 kg/ha si produit de bonne qualité soit 0.05t/ha 		
Photos				

Source : Guide des Produits Organiques utilisables en LR

L'épandeur à tapis est particulièrement adapté aux cultures pérennes ; il est cependant peu répandu.

*Le matériel recommandé pour des cendres sèches est généralement les épandeurs à chaux vives. C'est ce type de matériel qui a été utilisé par une papeterie pour des essais expérimentaux sur des sols agricoles. Ce type d'épandeur permet d'apporter des cendres à des doses relativement faibles

(1.5 tonnes/ha), à condition que les cendres soient exemptes de clous et d'autres éléments métalliques, ainsi que de concrétions. Un criblage des cendres est des plus recommandé pour ne pas endommager le matériel.

C'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. Dans le cadre des essais menés par cette papeterie, les propriétaires agricoles étaient responsables de l'enfouissement des cendres dans les 24 heures après l'épandage. La vitesse du tracteur et le réglage de l'ouverture de la porte permettent des gammes de dosage variées.



Figure 7 : Automoteur pour épandage de chaux, matériel utilisé par SAS TEMBEC pour ces essais expérimentaux (2011)

Tableau 3 Principales caractéristiques des épandeurs pour produits liquides

	Tonne à lisier	Tonne à lisier pendillard	Tonne à lisier enfouisseur
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Simple d'emploi - Rapidité d'épandage - Adapté aux différents types de terrains 	<ul style="list-style-type: none"> - Régularité de l'apport - Grande largeur d'épandage - Réglage plus fin des quantités - Moins d'odeurs 	<ul style="list-style-type: none"> - Régularité de l'apport - Grande largeur d'épandage - Réglage plus fin des quantités - Pas d'odeur
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Faible volume en vigne et arboriculture 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût élevé 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût élevé - Forte puissance de traction nécessaire - Débit de chantier plus faible
Précaution d'emploi pour bon usage	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de vent (pour éviter les odeurs) - Brassage 	Brassage	Déconseillé sur terrain en pente
Dose épandue	30m3/ha	15m3/ha	15m3/ha
Photos			

L'épandage par hélicoptère en France n'est autorisé que si on a démontré qu'il présentait « des avantages manifestes pour la santé ou pour l'environnement dûment justifiés par rapport à l'utilisation de matériels de pulvérisation terrestres »⁴.

L'épandage fait par hélicoptère est un : système flexible car il peut intervenir quelque soit la saison, l'âge du peuplement, la pente. Il a un **bon rendement** (quand la distance d'épandage est courte ≤ 4 km, notamment entre 0-1km) et évite des problèmes concernant la capacité portante du sol, mais le **coût reste élevé**.

Hélicoptère	
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Système flexible ; il peut intervenir quelque soit la saison, l'âge du peuplement, la pente, l'accessibilité du peuplement... - Haut rendement - Il évite des problèmes concernant le tassement du sol
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Coût élevé - Disponibilité du matériel
Précaution d'emploi pour bon usage	<ul style="list-style-type: none"> - Opération effectuée sans vent - Suffisamment de place dan le lieu de chargement des cendres - Utilisation préconisée seulement pour les cendres traitées
Capacité de chargement	<ul style="list-style-type: none"> - 1tonne (dose épandue normalement 4t/ha)
Photos	

⁴ Arrêté du 31 mai 2011 relatif aux conditions d'épandage des produits mentionnés à l'article L. 253-1 du code rural et de la pêche maritime par voie aérienne

3.3.2. Veille technologique sur le matériel d'épandage forestier

L'épandage en forêt est plus complexe que sur des terrains agricoles. Les contraintes physiques (pente, souche, faible portance des sols, etc.) imposent au matériel d'être très maniable et léger

Le porteur forestier a plus capacité de chargement que l'hélicoptère est moins coûteux, le rendement est moins sensible à l'augmentation de la distance d'épandage (distance entre le tas de cendres et le lieu d'épandage), mais il sera nécessaire le transport par route du porteur ce qui augmentera le coût, de même il pourrait avoir des problèmes de tassement du sol, et difficultés pour travailler en conditions de pente et en peuplements très denses.

L'épandeur est un caisson d'épandage monté sur un débardeur forestier, solidaire du tracteur ou articulé.



L'épandeur est un caisson d'épandage monté sur un débardeur forestier, solidaire du tracteur ou articulé.

Par rapport au matériel agricole, le matériel forestier est équipé de pneus renforcés basse pression, de chaînes, d'un châssis avec une garde au sol plus importante. La cendre est chargée de 4 à 5 tonnes avec le godet de chargement monté sur la grue à la place du grappin, dans un camion équipé de disques de distribution (idem matériel agricole). Le rendement journalier est de 50 tonnes/jour et 1000 tonnes par mois.

Ce matériel est plus approprié pour circuler en conditions forestières strictes (présence de rémanents, ornières, rochers, légères pentes) mais il nécessite cependant de bonnes conditions de circulation (encombrement et sol).

Les situations boisées suivantes sont à privilégier (source étude ADEME SOLAGRO) :

- peuplements résineux au stade éclairci ;
- coupe rases de taillis de feuillus ;
- futaies larges de feuillus ou de résineux.



Source : Recash



Porteur forestier muni d'un épandeur

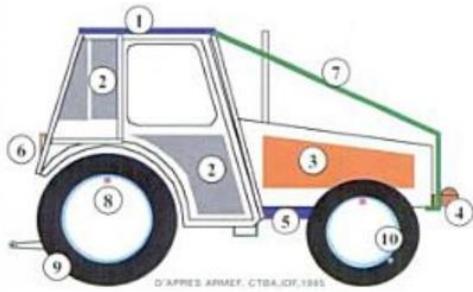
Actuellement en France, ce type de matériel n'existe pas. Si nous devons nous lancer dans la construction de ce type d'épandeur forestier, plusieurs solutions techniques ou économiques sont possibles pour rendre ce matériel très efficace sur des terrains accidentés, plus attractif d'un point de vue économique. En effet, la rentabilité d'un tel ensemble (porteur + épandeur) pour effectuer uniquement de l'épandage de cendre sera très limitée compte tenu du peu de temps d'utilisation de la machine par rapport au prix d'achat. Il est donc impératif que l'épandeur monté sur le porteur soit démontable ou soit utilisé de manière intensive par une entreprise spécialisée.

Pour des cendres humides et lorsque les conditions le permettent du matériel agricole (tonne à lisier, épandeur à fumier) peut être utilisé pour un épandage en forêt. C'est notamment le cas dans des forêts de plantation où la circulation dans les inter-rangs est plus facile. Dans ce cas les tracteurs doivent être adaptés.



Figure 8 épandage de cendres humides

Adaptation du tracteur agricole pour une utilisation en forêt :



1. Protection de la cabine
2. Grillage de protection de la cabine
3. Grillage latéral de protection du moteur
4. Treuil et pare-chocs renforcés
5. Blindage ventral
6. Protection des feux
7. Fixation du pot d'échappement
8. Protection de la valve
9. Pneumatique forestier
10. Jante renforcée

Sécurité : cabine renforcée, portique en tubes métalliques, extincteur, trousse de secours ;

Puissance : 50 à 120 cv et 540 ou 1000 tours/min selon l'emploi ;

Maniabilité : garde au sol suffisante (40 à 50cm), petit rayon de braquage ;

Adhérence : 4 roues motrices, pneus à carcasse diagonale renforcée résistance à la perforation et montés sur jantes larges, répartition convenable des charges (poids à l'avant) ;

Stabilité : centre de gravité bas, voie et empattement suffisants ;

Accessoires : boîte à outils, treuil, pelle à l'avant, grue à grappin pour la manipulation des bois façonnés

4. Essais expérimentaux

4.1. Les chantiers d'épandage de cendres brutes

4.1.1. Organisation des chantiers

Les chantiers organisés par la coopérative ALLIANCE Forêts Bois (AFB)



ALLIANCE Forêts Bois est une Union de coopératives regroupant les trois coopératives du grand Sud-Ouest : CAFSA, COFOGAR et FORESTARN. Elle regroupe 44 000 adhérents sylviculteurs sur les régions Aquitaine, Midi-Pyrénées, Poitou-Charentes, Limousin et Languedoc-Roussillon. En 2011, cela représente 170 M€ cumulés, 4 millions de tonnes de bois commercialisées et 12 000 ha de reboisements.

Les cendres de Smurfit Kappa Cellulose du Pin

Smurfit Kappa est le leader mondial de l'emballage à base de papier. Ils emploient 41 000 personnes à travers 32 pays et réalisent un chiffre d'affaires de 7.4 milliards d'euros en 2011. L'usine papetière de Biganos, en Gironde, est spécialisée dans la production de papier kraft destiné au secteur de l'emballage. Avec 40 mètres de haut pour une puissance de 140 MWth, cette **chaudière** à vapeur fonctionne à une pression de 120 bars et une température de 580 °C. Cette vapeur détendue dans 2 turboalternateurs produit **69 MWé** qui sont vendus à l'EDF tandis que la vapeur basse pression produite permet de sécher le papier produit sur site. Ce projet a fait partie des lauréats de l'appel d'offre électricité biomasse de la CRE. L'installation consomme chaque année **500 000 tonnes de bois** soit environ 200 000 t de connexes, 200 000 de biomasses forestières approvisionnées en partie par AFB et 80 000 t de DIB et déchets verts.

Les cendres d'Air Bus

Sur son site de Toulouse, Airbus développe un système de chauffage au bois à grande échelle. Il a été mis en service cet hiver et l'approvisionnement est assuré par AFB. Le réseau est alimenté à 100% par des plaquettes forestières. La chaudière bois a une puissance de 12 MW et produit 52 000 MWh. Elle est alimentée par 22 000 tonnes de bois par an et couvre 60% des besoins en chaleur du site Clément Ader.

Organisation des chantiers

Chantier	A	B
Description parcelle	Reboisement de pin maritime	Pin maritime
Surface (ha)	3-4	3-4
Type de cendre	Sèches	Sèches
ph	7.99	-
Dose	*	*

*Chantier annulé : suite à l'analyse de cendres, la concentration en Cadmium est supérieure à la réglementation.

Les chantiers organisés par la coopérative Forêts et Bois de l'EST (F&BE)



La coopérative forestière mène son action sur les territoires français du Grand Est de la France. Elle regroupe 4000 adhérents soit 75 000 ha gérés, et 90 000 t de plaquettes forestières vendues.

Les cendres de DISLAUB



DISLAUB est une société spécialisée dans la production d'alcool agricole et la régénération d'alcools et de solvants. La chaudière est positionnée sur le site de Buchères dans l'Aube et produit de la vapeur nécessaire au fonctionnement de l'usine. Filiale de Cristal Union, Dislaub est spécialisé dans la production d'alcools agricoles et la régénération de solvants pour l'agriculture. Le projet de DISLAUB a été retenu dans le cadre de l'appel à projet de l'ADEME, le BCIAT 2010, et a donc bénéficié du soutien Fonds Chaleur. Après les premiers essais en juin dernier, les équipes techniques ont procédé aux réglages et ajustements nécessaires pour optimiser la production de vapeur. Cette **chaudière**, d'une puissance utile de **14 MW** produit 20 t de vapeur à 15 bars de pression. Le fonctionnement de la chaudière nécessite **40 000**

tonnes de bois par an : il s'agit de plaquette forestière issue de F&BE et ONFe. Cela représente 600 à 700 t de bois par semaine soit 12 à 14 t de cendres également par semaine, l'équivalent d'une benne.

Réalisation des chantiers :

F&BE a épandu les cendres de la chaudière de DISLAUB sur 3 parcelles différentes : Peupleraie (1), jeune peupleraie (2) et terrain nu (3).



1



2



3

Les cendres ont été transportées de la chaufferie jusqu'à la propriété du prêteur de terre, puis du lieu de stockage vers la parcelle.



L'épandage a été fait avec épandeur agricole à hérissons verticaux + poussoir + guillotine.



Chantier	C	D	E
Situation boisée	Peuplier	Jeune peuplement	Terrain nu
Surface (ha)	3	2	2
ph	7.87	7.89	7.93
Type de cendre	Sèches	Sèches	Sèches
Dose (t/ha)	2	0*	5
			

*Chantier stoppé à cause du sol et parce que l'épandeur roulait sur les peuplements. Distance entre lignes trop faible.

Pour des informations complémentaires sur le matériel, temps et bilan économiques consulter les fiches chantiers dans l'annexe 2.

Le chantier de la coopérative Unisylva



Unisylva regroupe 10 500 adhérents soit 350 000 ha gérés en Auvergne, Bourgogne, Centre et Limousin. Unisylva a décidé de s'investir dans la mise en place de l'activité bois énergie pour valoriser les bois qui ne peuvent pas être valorisés sur les marchés traditionnels et d'obtenir à terme une source même modeste de revenu supplémentaire.

Les cendres de Bonilait Protéines

Bonilait Proteines est une unité de production de poudres de produit laitiers d'une capacité de 1 130 000 litres équivalents lait/jour. La chaufferie de Bonilait Proteines est d'une puissance **5.50 MW**, c'est une ICPE soumise à Déclaration. Elle consomme de la plaquette forestière approvisionnée par Unisylva et des connexes de scierie. Les cendres sont humides.

Organisation du chantier

Chantier	F
Situation boisée	Douglas
Surface (ha)	7
Type de cendre	Humides
ph	5.09
Dose	3

Pour des informations complémentaires sur le matériel, temps et bilan économiques, consulter les fiches chantiers dans l'annexe 2.

4.1.2. Conformité des chantiers d'épandage

a) Les cendres

Pour l'échantillonnage des cendres, la procédure dépend de la voie d'extraction, l'idée est d'obtenir un échantillon représentatif de ce qui sera épandu.

« Les échantillons représentatifs des cendres soumis à l'analyse sont constitués de **10 prélèvements** élémentaires uniformément répartis en différents points et différentes profondeurs du lot cendres destinées à être épandues. Les prélèvements sont effectués à l'aide d'une sonde en dehors de la croûte de surface et des zones où une accumulation d'eau s'est produite. Les prélèvements élémentaires sont mélangés dans un récipient ou sur une bâche et donnent, après réduction, un échantillon d'un kilogramme environ envoyé au laboratoire. »

Les résultats d'analyses de cendres

Ci-dessous sont présentés les résultats des analyses menées dans le cadre de l'étude ADEME/UCFF et ADEME/SOLAGRO donnent :

	Unité	Valeur limite	ADEME/UCFF			ADEME SOLAGRO*
			AFB	F&BE	UNISYLVA	
Installation énergétique			AIRBUS	DISLAUB	BONILAIT	
% de cendres						
pH			13.38	13.41	9.97	12.8
Carbone	g/kg MB		35.1	27.11	64.39	80.4
Azote total	g/kg MB	N + P2O5 + K2O > 7%	0.575	0.853	0.614	1.2
Phosphore total	g/kg MB	P2O5 > 2%	27.69	24.49	10.2	15.4
Potassium total	g/kg MB	K2O > 5%	100.95	153.95	28.29	32.5
Calcium total	g/kg MB		294.51	441.41	86.84	327.9
Magnésium total	g/kg MB		62.75	28.49	18.75	25.3
Cadmium	mg/kg MS	10	15.16	6.49	2.92	1.3
Chrome	mg/kg MS	1000	93.8	69.2	95.9	20.9
Mercuré	mg/kg MS	10	<0.010	<0.01	0.086	0.2
Nickel	mg/kg MS	200	36.5	15.6	49.8	24.0
Plomb	mg/kg MS	800	38.5	39.4	7.2	31.8
Zinc	mg/kg MS	3000	425.61	952.67	215.06	152.3
Cuivre	mg/kg MS	1000	148.7	136.1	86.1	96.3
Cr+Cu+Ni+Zn	mg/kg MS	4000	705.0	1174	447	321.7
7 principaux PCB	Mg/kg MS	0.8	<0.07	<0.07	<0.07	/
Fluoranthène	Mg/kg MS	5	<0.01	0.055	<0.018	/
Benzo(b)fluoranthène	Mg/kg MS	2.5	<0.01	0.029	<0.01	/
Benzo(a)pyrène	Mg/kg MS	1.5	<0.01	0.049	<0.01	/

*9 pour la partie agro ; 3 à 9 pour ETM

La matière non consommée peut poser des problèmes lors du traitement des cendres (stabilisation) et plus particulièrement pour l'opération de granulation. La quantité de carbone total donne une indication sur le niveau de matière non brûlés au sein des échantillons. En effet, lorsque la concentration est trop élevée

Chantier	A	B	C	D	E	F
Coopératives	AFB	AFB	F&BE	F&BE	F&BE	Unisylva
Description parcelle	Reboisement de pin maritime	Pin maritime	Peuplier	Jeune peuplement	Terrain nu	Douglas
Surface (ha)	3-4	3-4	3	1	1	7
Type de cendre	Sèches	Sèches	Sèches	Sèches	Sèches	Humides
Analyses de cendres et de sols	Chantier annulé : La concentration en Cadmium des cendres est supérieure à la réglementation.		Conformes	Conformes	Conformes	Conformes
pH du sol			Conformes	Conformes	Conformes	Conformes

b) Les sols

Pour un échantillonnage du sol pour mesurer les concentrations de métaux lourds, le laboratoire d'analyse du sol de l'INRA de Lille conseille de faire 20 à 30 coups de tarière par ha sur l'horizon de sol 0-25cm (hors litière) puis de faire un échantillon composite par hectare quand le sol n'est pas homogène.

Une autre technique étant de faire 50 coups de tarière et de réaliser l'échantillon composite en tirant au sort 25 échantillons. Cette méthodologie se rapproche de celle préconisée dans le dossier d'autorisation d'épandage de boues sur sols agricoles de la DREAL et de la norme AFNOR 10381. Il faut envoyer 500 g mini par échantillons composite.

Les résultats des analyses de sols

Chantier	A	B	C	D	E	F	
Coopératives	AFB*	AFB*	F&BE	F&BE	F&BE	Unisylva	
Description parcelle	Reboisement de pin maritime	Pin maritime	Peuplier	Jeune peuplement	Terrain nu	Douglas	
pH	7.99	*	7.87	7.89	7.93	5.09	
Métaux lourds							
Valeur limite Mg/kg de MS							
Cadmium	2	0.297	*	0.351	0.557	0.475	0.202
Chrome	150	74.6	*	66.1	65.1	59.1	36.2
Cuivre	100	2.86	*	12.3	14.8	11.1	13.1
Mercure	1	0.024	*	0.071	0.088	0.069	0.064
Nickel	50	37.7	*	26.3	31.5	28.5	18.7
Plomb	100	22.1	*	50.6	27.1	20.5	23.7
Zinc	300	1.73	*	93.5	1.74	77.6	93.2

* Analyse annulée.

Récapitulatif des chantiers

Suite aux analyses de sols et de cendres, les deux chantiers prévus par la coopérative Alliance Forêt Bois ont été annulés en raison d'une trop forte teneur en Cadmium dans les cendres.

Quelques préconisations suite à la réalisation des chantiers d'épandage

- Eteindre la chaux vive des cendres sèches en les humidifiant. Cela peut représenter un risque réel pour la sécurité et un risque d'incendie.
- Le site de stockage de cendre doit être propre, c'est-à-dire, sans éléments qui peuvent endommager l'épandeur (pierres, ferrailles et autres éléments désirables, etc.).
- Il est absolument nécessaire de prendre des mesures de sécurité pour la manipulation des cendres : masque, lunettes, gants, casque, bottes, etc. Il est préférable que la cabine soit fermée.
- Les épandeurs agricoles ne sont pas adaptés aux sols forestiers, notamment quand ceux-ci ont été préparés (passage du cover-crop). Il est préférable d'utiliser du matériel forestier ou à défaut d'équiper l'épandeur avec des roues forestières.

4.2. Les essais de granulation / pelletisation

4.2.1. L'unité de granulation

Les tests de granulation ont été réalisés en partenariat avec LUZEAL. LUZEAL, née de la fusion des coopératives Alfaluz et Euro luz, a pour mission principale la déshydratation des productions agricoles de ses adhérents. Les principales sont :

- La luzerne
- Le maïs
- La pulpe de betterave
- L'oiellette
- Le miscanthus
- La farine et le pépin de raisin

L'activité de LUZEAL représente près de 25 000 ha de récolte et regroupe 2000 adhérents, 21 000 ha de luzerne et produit annuellement 400 à 450 000 t de produits déshydratés.

A travers sa filiale Agromi, LUZEAL développe son activité de production de granulés de bois et d'agrocombustibles sur le site de Sept Saulx.



4.2.2. Organisation des essais

Une analyse de cendre et un test de granulométrie ont été réalisés au préalable et une deuxième analyse de cendre a été réalisée après formation des granulés. Les cendres sont sèches et proviennent de DISLAUB, basé sur le site de Buchères à 125 km de Sept Saulx, site sur lequel a été réalisée la granulation. Les cendres ont été stockées dans une benne bâchée.

Les granulés de cendres ont été produits à partir de filières de granulation qui produisent actuellement des pellets de bois ou des agro-pellets sur le site LUZEAL. Ces tests ont permis de voir l'adaptation de ce type de matériel à la production de granulés de cendres (robustesse,...).

D'après LUZEAL, il est impossible de granuler de la cendre simplement mélangée à de l'eau. LUZEAL a donc testé différentes recettes de granulation, en modifiant les proportions et le type de liants et/ou d'additifs. Ces tests ont permis de déterminer des recettes adaptées à la production de granulés de cendres avec une filière correspondant au cylindre métallique percée de trous.



L'adjonction de matière organique à la recette a permis de moduler le caractère variable de la composition chimique des cendres. Celle-ci dépend de la qualité de la combustion mais également du type de biomasse brûlée. Des analyses ont été menées afin de déterminer si le granulé produit peut entrer dans une logique « produit » et plus particulièrement dans la norme « engrais » NFU 42-001 ($P_2O_5 > 2\%$ et $K_2O > 5\%$; $N+K+P > 7\%$) ou dans la norme « compost » NFU 44-051.

Remarque : en l'état actuel de la réglementation la norme NFU 44-051 exclue l'utilisation de cendre comme un composant d'amendement organique pour relever les teneurs en éléments fertilisants majeurs. Concernant la norme NFU 42-001, les seuils en éléments traces devraient être abaissés dans le cadre de la révision en cours et diminuer encore les possibilités pour les cendres de bois de relever de cette norme, notamment la teneur en Cadmium.

4.2.3. Les essais

Luzeal a réalisé 5 tests de granulation. Les cendres (sauf pour l'essai 1) ont été mélangées sur une dalle à l'aide d'un godet de chargeur. Le mélange ainsi obtenu, a été incorporé sur le tapis, puis broyé, mélangé, pressé et refroidit.

Essai	1	2	3	4	5
Ingrédients	Cendres de bois uniquement	Cendres bois et Miscanthus	Cendres de bois et farine de pulpe de raisin	Cendres de bois, farine de marc de raisin et huile de colza	Cendres de bois, issues de triage de colza, huile de colza
Granulés	Impossible de produire le moindre granulé	Impossible de produire le moindre granulé	Granulation assez dure, voir dure. Production de granulés de couleur grise, d'un aspect terne, de qualité moyenne (tendance à l'effritement), forts poussiéreux	Granulés durs qui se tiennent bien, de couleur noire assez soutenue	Granulés assez durs, de couleur grise non homogène (certains granulés paraissent verts : effet issues de triage), moins longs que ceux de l'essai précédent, avec une tendance à se casser dans la longueur.
Poussières	/	/	Encore de la poussière fine qui se dégage des installations	Un peu moins d'envolées de poussière dans l'usine (effet favorable de l'huile colza)	Un peu moins d'envolées de poussière dans l'usine (effet favorable de l'huile colza)
Débit	/	/	500kg granulés/h (vis d'alimentation au minimum de rotation).	1 t/h	1t/h
Observations	/	/	Incorporation d'huile de colza au niveau de la vis d'alimentation de la presse sur la fin de l'essai afin de faciliter la granulation	Granulés mis en big-bag en vue d'un essai d'épandage. Observation d'un phénomène d'auto-échauffement !	

Résultats des tests en valeur agronomique :

Caractéristiques physico-chimiques					
	Unité	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Normes
Matière organique	% brut	42.78	55.71	42.78	
Matière sèche	% brut	94.2	95	94.2	
C organique / N total	Dumas	18.2	22.7	18.2	
Matière organique	% sec	45.4	58.6	45.4	
Azote total (N)	% brut	1.17	1.23	1.17	
Phosphore sur brut (P ₂ O ₅)	% brut	1.32	1.24	1.32	> 2%
Potasse sur brut (K ₂ O)		6.45	6.18	6.45	> 5%
N + P ₂ O ₅ + K ₂ O		8.94	9.09	8.94	> 7%

Eléments traces métalliques						
	Unité	Valeurs limites PrNF U42-001-2 (mg/kg MS)	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Résultats des cendres brutes
Arsenic	Mg/kg de MS	< 60	<4.1	<4.2	<4.1	
Cadmium	Mg/kg de MS	< 3	3.4	2.2	3.4	6.49
Chrome	Mg/kg de MS	< 120	33.7	29.8	33.7	69.2
Cuivre	Mg/kg de MS	< 300	78.3	57.5	78.3	136.1
Mercuré	Mg/kg de MS	< 2	0.01	< 0.01	0.01	<0.01
Nickel	Mg/kg de MS	< 120	9.4	7.6	9.4	15.6
Plomb	Mg/kg de MS	< 150	19.3	15.1	19.3	39.4
Sélénium	Mg/kg de MS		<3.1	<3.1	<3.1	
Zinc	Mg/kg de MS	< 600	442	331.5	442	952.67

Caractéristiques physiques			
	Essai 3	Essai 4	Essai 5
Humidité (% produit brut)	5.8	5.0	6.2
Matière sèche (% produit brut)	94.2	95.0	93.8
Matière minérale (% produit brut)	51.5	39.3	39.4
Matière organique (% produit brut)	42.8	55.7	54.4
pH	12.7	12.4	12.4

Valeur amendante			
	Essai 3	Essai 4	Essai 5
Carbone organique (% MS)	22.7	29.32	22.7
N total (% MS)	1.24	1.29	1.24
Rapport C/N	18.2	22.7	18.2

Valeur fertilisante (apport d'éléments minéraux)							
		Essai 3		Essai 4		Essai 5	
		g/kg (ou kg/tonne) produit brut	g/kg produit sec	g/kg (ou kg/tonne) produit brut	g/kg produit sec	g/kg (ou kg/tonne) produit brut	g/kg produit sec
AZOTE	Azote	11.0	11.66	11.8	12.43	11.0	11.66
	Azote nitrique (N NO ₃)	0.56	0.6	0.34	0.35	0.56	0.6
	Azote ammoniacale (N NH ₄)	0.2	0.18	0.1	0.14	0.2	0.18
	Azote minéral (N NH ₄ + N NO ₃)	0.7	0.78	0.5	0.49	0.7	0.78
	Azote Dumas (N orga + N NO ₃)	11.6	12.26	12.1	12.79	11.6	12.26

Eléments majeurs	Azote total	11.7	12.44	12.3	12.92	11.7	12.44
	Phosphore (P ₂ O ₅)	13.2	14.00	12.4	13.06	13.2	14.00
	Potassium (K ₂ O)	64.5	68.43	61.8	65.05	64.5	68.43
	Magnésium (MgO)	11.9	12.62	10.1	10.59	11.9	12.62
	Calcium (CaO)	197.3	209.31	152.5	160.51	197.3	209.31
Oligo-éléments	Zinc	417	442	314.8	331.48	417	442
	Cuivre	73.8	78.28	54.6	57.5	73.8	78.28

4.2.4. Interprétation des analyses

Les échantillons analysés sont des mélange de granulés de cendres, de matière organique (farine de marc de raisin : essai 3 et 4, colza : essai 5) et d'huile (essai 4 et 5). Ils pourraient donc être valorisés comme une matière fertilisante organique.

Les matières fertilisantes sont définies par la loi n°79-595 du 13 juillet 1979, codifiée aux articles L.255-1 à L.255-11 du code rural : « les matières fertilisantes comprennent les engrais, les amendements et, d'une manière générale, tous les produits dont l'emploi est destiné à assurer ou améliorer la nutrition des végétaux ainsi que les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. »

Le code rural définit la modalité de commercialisation des matières fertilisantes (article L.255-2) :

- Soit la matière fertilisante est homologuée
- Soit la matière fertilisante est référencée dans une norme DSM (Dénomination, Spécification, Marquage) avec arrêté de mise en application.

Les normes DSM définissent des critères de qualité et d'innocuité que la matière fertilisante doit respecter pour pouvoir être conforme à cette norme et ainsi être commercialisable.

Les échantillons analysés pourraient se rattacher à 2 normes DSM :

- La NF U44-051 (amendements organiques – dénominations, spécifications et marquage – décembre 2010).
- La NF U42-001/A10 (Engrais-Dénominations et spécifications – janvier 2009).

⇒ Conformité à la NF U44-051

Un amendement organique est avant tout un produit destiné à améliorer l'état organique des sols. La norme NF U44-051 fixe donc des teneurs minimums en matière organique et matière sèche. Comme son rôle premier n'est pas de fertiliser, la NF U44-051 fixe des valeurs à ne pas dépasser pour N, P₂O₅, K₂O et la somme des 3.

Le tableau 1 compare les résultats d'analyses des 3 échantillons aux seuils de la NF U44-051. **Bien que les échantillons analysés soient riches en matière organique, la teneur en potassium est trop élevée pour le classer comme amendement organique.**

Tableau 1 : paramètres organiques et azote à la norme NF U 44-051

Paramètres	Valeurs limites NF U44-051	Valeurs mesurées		
		Essai 3	Essai 4	Essai 5
Matière sèche (%MB)	Valeur > 30%	94.2	95	93.8
Matière organique (%MB)	Valeur > 20%	42.78	55.71	54.36
N total (%MB)	Valeur < 3%	1.17	1.23	1.21
P ₂ O ₅ total (%MB)	Valeur < 3%	1.32	1.32	1.25
K ₂ O total (%MB)	Valeur < 3%	6.45	6.18	5.55
N + P ₂ O ₅ + K ₂ O total (%MB)	Valeur < 7%	8.94	9.09	8.53
C organique / N organique	Rapport > 8	18.2	22.7	22.4

⇒ **Conformité à la NF U42-001/A10**

Un engrais organique est destiné à fertiliser les cultures. La norme fixe donc des teneurs minimales en N, P₂O₅, et la somme des 3.

Les cendres, le marc de raisin et le colza sont tous les deux des intrants autorisés dans les engrais organiques de la NF U42-001/A10. Par contre, l'huile n'est pas citée dans cette norme. Il faudra vérifier auprès des autorités que son usage est autorisé dans les engrais organiques. Les échantillons analysés étant des mélanges, ils pourraient être rattachés à la classe VI (a) « engrais organiques NPK, NP ou NK entièrement d'origine animale et/ou végétale », type 12 « engrais organique NPK, NP ou NK ».

Les exigences de cette classe sont les suivantes :

- Azote organique > 1% MB
- N ou P₂O₅ ou K₂O > 3% MB
- N + P₂O₅ + K₂O > 7% MB
- P₂O₅ > 2% MB pour la dénomination « engrais organique NP »
- K₂O > 2% MB pour la dénomination « engrais organique NK »
- P₂O₅ et K₂O > 2% MB pour la dénomination « engrais NPK »

Les résultats d'analyses sont donc conformes à la dénomination « engrais organique NK » :

	Essai 3	Essai 4	Essai 5
Azote total	1.1 % MB	1.18% MB	1.16% MB
K ₂ O	6.45% MB	6.18% MB	5.55% MB
N + P ₂ O ₅ + K ₂ O	8.94% MB	9.09 % MB	8.53% MB

Au niveau de l'innocuité, la norme actuellement en vigueur ne précise pas de seuil pour les éléments traces métalliques. Le projet de norme en cours d'élaboration propose les seuils suivants :

Élément	Seuils prNF U42-001-2 (mg/kg MS)	Résultats		
		Essai 3	Essai 4	Essai 5
Arsenic	< 60	< 4.1	< 4.2	< 4.2
Cadmium	< 3	3.4	2.2	2.2
Chrome	< 120	33.7	29.8	28.4
Cuivre	< 300	78.3	57.5	51.6

Mercur	< 2	0.01	< 0.01	<0.01
Nickel	< 120	9.4	7.6	7.3
Plomb	< 150	19.3	15.1	14
Zinc	< 600	442.4	331.5	323.9

Tous les éléments mesurés sont inférieurs aux seuils du projet de norme, à l'exception du cadmium pour l'essai 3. Ces seuils ne sont encore qu'à l'état de projet et n'ont donc aucune valeur réglementaire pour l'instant. Ce paramètre sera cependant à surveiller : étant juste au dessus du seuil, des analyses de contrôle sont envisageables.

Conclusion

Les résultats d'analyses sont conformes aux exigences de la norme NF U42-001/A10, classe VI (a) « engrais organiques NPK, NP ou NK entièrement d'origine animal et/ou végétale » type engrais 12 « engrais organique NK ».

Il faudra vérifier la possibilité d'avoir de l'huile comme intrant.

5. Coût d'un épandage

Les cendres issues de la combustion de bois et des autres matériels végétaux ont été utilisées comme amendement de sols pendant des siècles. Malgré la diminution de cet usage traditionnel à cause de l'apparition des matériaux industriels, des nouvelles attentes ont surgi au cours des dernières années. Les cendres des chaufferies utilisant de la biomasse sont aujourd'hui évacuées en Centre de Stockage de Déchet Ultime (CSDU). L'idée de compenser l'exportation de matière minérale pour réussir une gestion plus durable, de restaurer les sols en atténuant leur acidification et d'augmenter potentiellement la production de bois sont quelques arguments pour la valorisation des cendres par épandage en forêt.

Des études agricoles montrent que les cendres peuvent être utilisées en remplacement de la chaux agricole avec des avantages nutritifs supplémentaires. L'épandage de cendres en forêt est moins fréquent mais des études et pratiques scandinaves montrent que cet épandage peut se traduire en **augmentation de la production de bois** dans certaines stations (Vance, 1996.).

5.1. La fertilisation en forêt

5.1.1. L'intérêt de la fertilisation en forêt

Les sols forestiers, tout comme les sols agricoles, doivent offrir un stock suffisant d'éléments nutritifs sous forme assimilable pour soutenir la croissance des arbres. S'il n'en n'est pas ainsi, la production est alors limitée, quelle que soit l'essence forestière.

Les jeunes arbres sont en général plus sensibles à l'insuffisance de fertilité du sol que les arbres adultes principalement à cause du faible volume du sol prospecté par les racines. Les sols forestiers sont généralement pauvres en éléments nutritifs facilement assimilables.

La fertilisation des plantations peut avoir un intérêt certain dans deux situations principales, la sylviculture où la gestion intensive vise l'amélioration de la production de bois et dans le cas de sols appauvris.

Cependant, cette pratique est peu courante en France, la fertilisation des plantations forestières restant marginale malgré la pauvreté relative de certains sols forestiers.

Les **objectifs de la fertilisation** sont nombreux, variés et d'importance différente. On peut chercher à augmenter la production, à modifier les propriétés physiques du sol, à remédier à la carence de un ou plusieurs éléments minéraux ou à préserver les réserves minérales du sol. La fertilisation d'une plantation dépend à la fois des propriétés physico-chimiques du sol et des exigences en éléments minéraux de l'essence cultivée, variable aussi selon son âge. Les analyses du sol et/ou le diagnostic foliaire sont les deux méthodes utilisées pour apprécier le besoin de fertilisation.

Ces techniques ont permis d'ailleurs une **large application de la fertilisation dans des peupleraies et des peuplements de pin maritime dans les Landes, de l'épicéa et du douglas dans le Massif-Central et le Nord-Est de la France.**

Généralement, un seul **apport d'engrais est réalisé avant ou quelques années après la plantation.** Cet apport porte sur un ou plusieurs éléments minéraux sous forme minérale ou organique. Il s'agit principalement d'éléments majeurs (azote, phosphore, potassium, calcium et magnésium) et dans quelques rares cas d'oligo-éléments comme le cuivre, le zinc.

A l'heure actuelle, il n'y a pas de fertilisant qui ait été spécifiquement mis au point pour une utilisation sylvicole. Les produits utilisés en sylviculture sont donc de même nature que ceux utilisés en agriculture et il est impossible à partir des statistiques actuelles de donner des estimations des quantités d'engrais utilisées uniquement en sylviculture (Bailly, et al., 2004).

5.1.2. L'épandage des cendres : fertilisation et amendement

L'INRA a réalisé une méta-analyse pour tenter de quantifier les effets des cendres de b sur la production des peuplements forestiers en extrapolant les effets des cendres sur la croissance de la forêt scandinave à d'autres contextes à savoir les pays tempérés chauds. Les conclusions de cette étude montrent que **l'épandage de cendres peut augmenter la production de bois** lorsque les forêts sont installées sur des **sols minéraux** carencés en Ca, Mg, K et sur des **sols organiques** (Augusto, et al., 2008).

De ce fait, il est possible de dire que les **cendres** de bois s'apparentent à un **amendement calcaire** (2 t de cendres \approx 1 t de CaCO_3) (Augusto, et al., 2008).

En effet l'augmentation du pH dans **les sols organiques** est associé également à une augmentation du carbone organique dissout qui favorise l'activité biologique de la microflore du sol. Par conséquent, le taux de décomposition de matière organique du sol augmente et **le flux d'éléments nutritifs, comme le N, NO_3^- augmente. Cette augmentation dépendra de la quantité de cendres épandues, la forme de cendres et de la teneur en matière organique initiale du sol. Dans ces conditions, cette augmentation serait associée une augmentation de la croissance des arbres** (Augusto, et al., 2008).

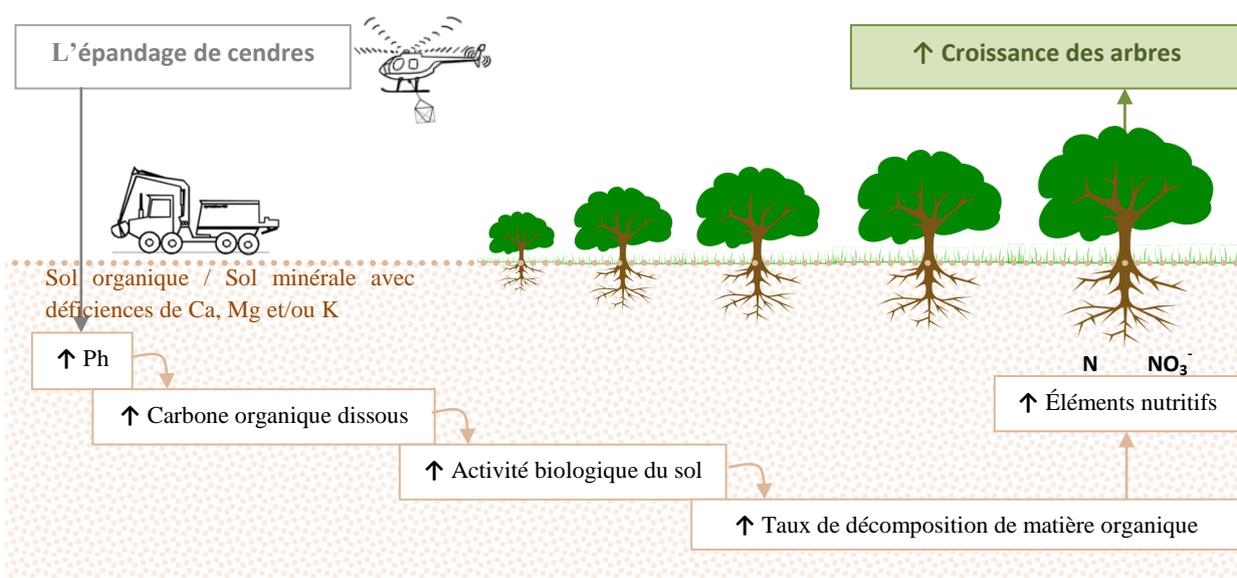


Figure 9 L'effet de l'épandage de cendres dans un sol organique

Les phénomènes de mise à disposition pour la plante de l'azote (principal élément nutritif limitant en la croissance des arbres) sont donc dépendants des processus biologiques de décomposition des matières organiques mortes et de la dynamique de renouvellement des microorganismes du sol (Augusto & Bakker, 2009).

Des expérimentations réalisées en **Finlande** démontrent que en moyenne **un épandage de 4t/ha de cendres permet de gagner +2-4m³/ha/an, avec une durée des effets de 30-40 ans** (Swedish Forest Agency, 2006). Une autre étude montre que les effets des cendres sur la productivité durent deux fois

plus longtemps que les fertilisants chimiques P-K (on fait un épandage de cendre quand on fait deux passages pour les engrais) (Väätäinen, et al., 2011).

Cette durée « extra » des cendres par rapport à la durée de l'effet des fertilisants P-K sur la croissance des peuplements finlandais peut être due à l'apport de Ca par les cendres, impliquant une modification sur le sol qui dure plus longtemps qui met à disposition des peuplements des nouveaux nutriments (notamment azote) pas disponibles au préalable.

Bien que l'effet de l'épandage des cendres peut durer plus longtemps il faudra prendre en compte que à l'heure de faire un épandage, pour avoir les mêmes quantités de P et K dans les cendres que dans un fertilisant P-K, les dose devra être plus grande puisque les cendres ont un concentration inférieure de ces éléments:

- Cendre granulée : 4 000 kg/ha
- Engrais (fertilisant P-K): 600 kg/ha

Cette différence en la dose à épandre fait que le coût totale d'une opération d'épandage de fertilisants P-K soit plus économique que cela de cendres granulés (Figure 10) (Väätäinen, et al., 2011).

Figure 10 Coût de la fertilisation par cendres granulées-fertilisant chimique (cas finlandais)

	Cendres (Granulation suédoise)	Fertilisant chimique
	Hélicoptère	Hélicoptère
Coût de fertilisation (€/ha)	241	203

(Väätäinen, et al., 2011).

Les cendres contiennent aussi des métaux lourds, notamment le cadmium. Des études ont montré que l'épandage de cendre en forêt n'a pas eu pour effet une augmentation de la concentration de ces métaux dans les baies et les champignons (bons indicateurs de pollution). Au contraire, après l'épandage de cendre, les expériences ont montré que les concentrations en métaux lourds restaient constantes voir diminuaient dans certains cas (Perkiömäki, 2004) (Moilanen, et al., 2006).

5.1.3. Les traitements des cendres

D'après les expérimentations, la principale difficulté rencontrée est le transport des **cendres brutes** à cause de sa pulvérulence. Leur manipulation est un travail très salissant (nuage de poussière), la précision et l'uniformité de l'épandage est parfois inadaptée. De plus, les cendres sèches sont très corrosives pour les machines et peuvent induire des risques, notamment respiratoires, pour l'opérateur.

De même, il pourrait avoir des effets contre-productifs à long terme, telles que des dommages sur la végétation et la faune du sol (Swedish Forest Agency, 2006).

Des différents traitements sont réalisés pour éviter ces inconvénients, et pour gagner des avantages tels que faciliter à la fois l'opération même d'épandage, le stockage et le transport, ainsi que une meilleure action fertilisant due à le délai de mise à disposition des éléments minéraux contenus dans les granulés (Emilsson, 2006) (Couturier, et al., 2005):

- Auto-durcissement (**7-15.7€/t*** (Emilsson, 2006))
 - La cendre est humidifiée à 30-40%, puis déposée sur un site à l'air libre pour durcir.
 - Le tas de cendre durci (temps de séchage : 6 mois) est concassé, broyé, criblé.
 - Densité des cendres auto-durcies : **700-800 kg/m³** (Väätäinen, et al., 2011).

- Granulation scandinave (**8-12€/t***) (Emilsson, 2006).
 - Économiquement et du point de vue environnemental plus faisable.
 - Plus technique que l'auto-durcissement : connaître la bonne recette (taux d'humidité), avoir le bon mélangeur.
 - La taille des granulés varie de 3-16mm et la densité est de **1100 kg/m³** (Väätäinen, et al., 2011).

- Granulation compactée ou pelletisation (**12.5€/t-18.2€/t*** pour cendres sèches ; **9.6 €/t-15.3 €/t*** pour cendres humides) (Emilsson, 2006).
 - La méthode la plus technique.
 - Production de un produit plus uniforme (intéressant pour des opération d'épandage en sols agricoles et aussi pour des raisons écologiques).

- Autres : Épandages des cendres en mélange avec les boues papetière
 - Épandages des boues très complexes techniquement vis-à-vis du matériel (il reste des morceaux de cendres dans les boues) et le chantier n'est pas très propre.
 - Idée prometteuse : granulation boues de papeterie + cendre même si une part non négligeable de N, présente dans les boues, est perdue sous forme de gaz lors de la granulation (Bailly, et al., 2004) (Väätäinen, et al., 2011).

5.2. Analyse économique

5.2.1. Bibliographie

L'hélicoptère pourrait se révéler une voie parfois indispensable pour des endroits inaccessibles au porteur (Emilsson, 2006),(Väätäinen, et al., 2011).

Il faudrait aussi prendre en compte i) la forte diminution du rendement de l'hélicoptère avec la distance entre le tas de cendres et le lieu d'épandage (80% de diminution en 4 km) compte tenu de sa faible capacité de chargement ii) la haute productivité initiale par rapport au porteur dû à sa vitesse de déplacement (Figure 11) (Väätäinen, et al., 2011).

* Prix scandinaves.

Les prix son variables selon la bibliographie consultée. Voir : (Emilsson, 2006) (Couturier, et al., 2005).

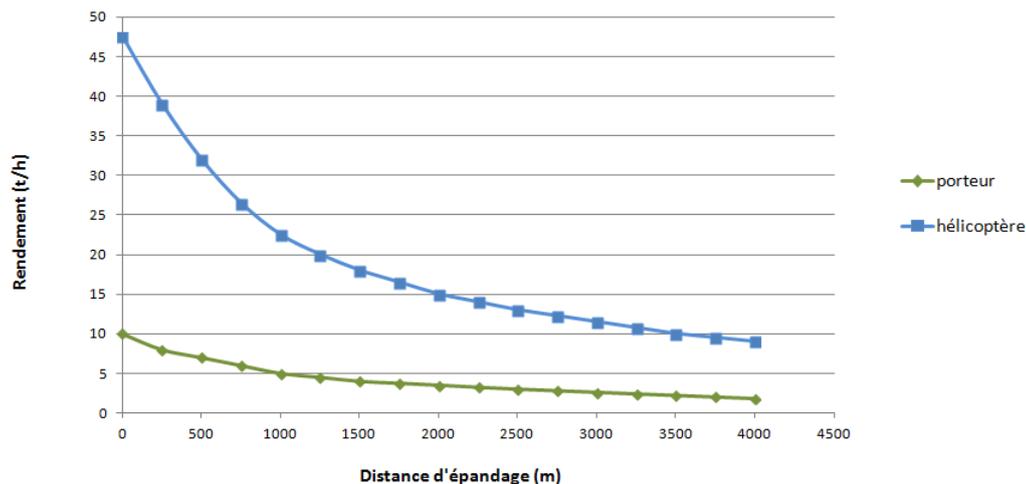


Figure 11 Rendements de l'opération d'épandage (Väätäinen, et al., 2011)

L'épandage avec un porteur forestier reste la solution la plus économique étant donné son très faible coût horaire (Emilsson, 2006)(Väätäinen, et al., 2011).

Pour amortir le chantier, il faudra épandre sur une surface assez grande et prévoir une bonne planification des épandages (Väätäinen, et al., 2011).

Au cours de la dernière décennie, le raffinage de cendres de bois a été développé à l'échelle industrielle en Finlande. L'objectif était d'en faire un produit fertilisant et aujourd'hui différents types de **produits de cendres** sont déjà disponibles sur les marchés finlandais des engrais forestiers.

5.2.2. Analyse de la rentabilité d'un chantier d'épandage

Dans cette étude, au-delà des problèmes réglementaires et techniques, **l'épandage de cendres en forêt pourra devenir une voie de valorisation acceptable** lorsque le coût de l'opération d'épandage sera inférieur au coût de l'évacuation des cendres en CSDU (Centre de Stockage des Déchets Ultimes). Dans l'analyse économique réalisée dans cette étude, certaines conditions le permettent.

De plus, **le nombre de cas pourraient augmenter si l'effet des cendres contribue également à une augmentation de la production des peuplements, tout comme l'a démontré certaines les expériences scandinaves.** Les propriétaires pourraient percevoir un revenu supplémentaire qui compenserait l'investissement fait pour financer l'opération d'épandage, soit un retour sur investissement. Pour l'instant, très peu d'études ont été menées sur ce sujet en France.

a) Méthodologie

Dans cette étude, nous avons défini des **scenarii d'épandage** (figure 12) dans lesquels nous avons formulé plusieurs hypothèses :

1. Les quantités de cendres à épandre (40t, 60t, 80t et 120t) correspondant à la production annuelle des chaufferies de taille moyenne et moyenne-grande.
2. la surface moyenne par chantier correspondant à des surfaces typiques des opérations forestières (3-7ha coupes rases, 12-20ha éclaircies).

Ces hypothèses permettent de planifier l'épandage en fonction du coût et des opérations sylvicoles prévues sur une zone :

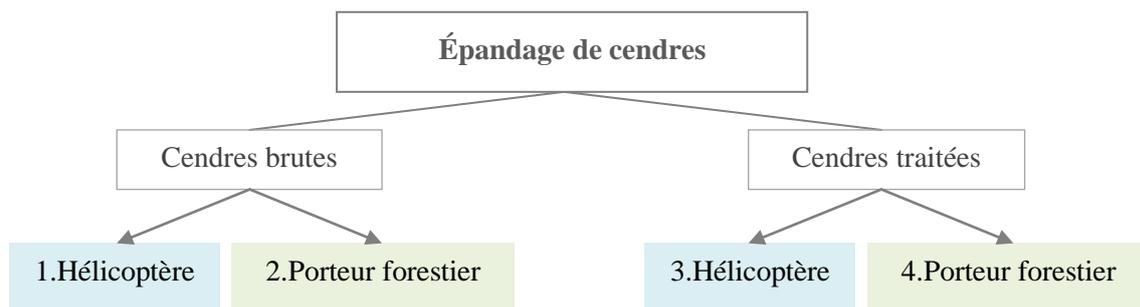
- S'il s'agit de parcelles de surface comprise entre 12-20ha, l'épandage serait à envisager après des travaux d'éclaircies,

S'il s'agit de parcelles de surface comprise entre 3-7ha, l'épandage serait à envisager quelques décennies avant la coupe rase : soit 20 à 30 ans avant la coupe rase, car l'effet des cendres peut durer jusqu'à 20 à 30 ans dans certaines conditions ((Emilsson, 2006), soit 10 ans avant la coupe rase pour augmenter la production des dernières années (Interview Ecolan, Finlande).

		Tonnes à épandre				Bilan €/t
		40	60	80	120	
Surface par chantier (ha)	3					scenarii
	7					
	12					
	20					
		10	15	20	30	Surface totale d'épandage (ha)

Figure 12 Table des scenarii

Ces scenarii ont été définis pour quatre cas d'épandage :



Pour le calcul des coûts, les **activités prises en compte dans l'opération d'épandage** sont :

- Le temps de suivi des chantiers
- L'analyse du sol
- Le transport des cendres (chaufferie-chantier ou chaufferie-centre de traitement-chantier)
- Le traitement des cendres (pour le cas des cendres traitées)
- Le transport des machines entre chaque chantier (pour le cas d'épandage avec porteur forestier)
- Le déplacement de l'hélicoptère (aérodrome-1^{er} chantier et entre les parcelles)
- Le coût de l'épandage.
- La facturation aux chaufferies (montant qui correspond à ce que payent les chaufferies pour évacuer les cendres en CSDU).
- Les subventions (si c'était le cas)
- L'investissement par le propriétaire (si c'était le cas)

Les variables suivantes ont également été prises en compte :

⇒ les **variables d'entrée** : il s'agit des valeurs bien précises d'une situation concrète :

- La dose à épandre (t/ha)
- La quantité de cendres à épandre (t)
- La surface des chantiers (ha)
- La capacité de chargement de l'hélicoptère (t)
- La capacité chargement porteur forestier (6t)
- La capacité de chargement benne transport (t)
- La distance d'épandage : chantier – bord de route (lieu de stockage du tas de cendres) (m)
- La distance moyenne : aéroport-1^{er} chantier (A/R en km)
- La vitesse de déplacement de l'hélicoptère (km/h)
- Le coût de déplacement de l'hélicoptère (hors opération d'épandage) (€/minute)

Épandage avec hélicoptère

⇒ et les **variables secondaires qui résultent des variables d'entrée**:

- Le nombre de chantiers : quantité de cendres à épandre /dose * surface de chantier
- Le rendement de l'opération (t/h) (Formule (Väätäinen, et al., 2011))
- La surface d'épandage (ha) : quantité de cendres à épandre / dose
- La distance de déplacement entre chaque chantier (m) :

(Négligeable pour l'épandage en hélicoptère)

Pour l'épandage fait par porteur forestier:

0.33m pour des chantiers entre 12-20ha

0.13m pour des chantiers entre 3-7ha

Hypothèses : la vitesse de déplacement est de 60km/h, la distance entre les chantiers entre 12-20ha est de 20km, la distance entre chantiers entre 3-7ha est de 10 km)

- La durée des chantiers (h) : quantité des cendres / rendement de l'opération
- Durée de l'opération (h) : Durée des chantiers pour les opérations faites par hélicoptère
- Pour les opérations faites par porteur forestier : (Durée des chantiers + temps de déplacement entre chantiers) *(nombre des chantiers -1)

Le résultat final se traduit en une table à remplir selon chaque hypothèse considérée :

Variables d'entrée				Variables secondaires		Choisir type de traitement	
Dose	4 t/ha	Quantité de cendres à épandre	80 t	Nombre de chantiers	1	granulation scandin	10 €/t
		Surface de chantier	20 ha	Rendement de l'épandage	8,33 t/h		Onglet prix des traitements
		Capacité chargement porteur	6 t	Surface d'épandage	20 ha		
		Capacité chargement benne transport	10 t	T déplacement	Chantiers 3-7ha		
		Distance d'A : chantier-BDR (Dist. d'épandage)	250 m	Durée des chantiers	9,60 h		
				Durée de l'opération	9,60 h		

Opération d'épandage	Quantité	Unité	Prix unitaire €	Dépense €	Recette €	
Suivi des chantiers (technicien)	2	jours/chantier	450	900		
Analyse du sol	1	analyses	150	150		
Transport des cendres (chaufferie - centre de traitement des cendres)	1	km	7,6	912		
Traitement des cendres	80	tonnes	10	800		
Transport des cendres (Centre t-<->chantier)	1	Forfait	60 - 80 km	1524		
Transport de machinerie entre chantiers	1	chantiers	300	300		
Coût de l'épandage (PORTEUR)	2	jours	1225	2.450		
Facturation aux chaufferies	80	tonnes	80		6.400	
Subvention	20	hectares	0		0	
Investissement par le propriétaire						
				TOTAL (€/t)	88	80
				TOTAL (€/ha)	352	320
				BILAN (€/t)		-8,0

b) Création des Scenarii

On considère que l'opération est économiquement rentable lorsque le coût de l'opération d'épandage (sommées des dépenses) est inférieur à 80 euros/tonnes, montant qui correspond en moyenne à ce que payent les chaufferies pour évacuer les cendres en CSDU. Le propriétaire ne fait aucun investissement.

Les valeurs prises pour les variables d'entrée sont :

- La dose à épandre : 4 t/ha⁶
- La quantité de cendres à épandre : 40t, 60t, 80t ou 120t (selon le scenario)
- La surface des chantiers : 3ha, 7ha, 12ha, ou 20ha (selon le scenario)
- La capacité de chargement de l'hélicoptère : 0.9t
- La capacité de chargement porteur forestier : 6t
- La capacité de chargement d'une benne : 10t
- La distance d'épandage (distance entre le tas de cendres et le chantier): (250m)⁷
- La distance moyenne aéroport-1^{er} chantier: (A/R) 200km (hypothèse selon la distribution des aéroports français et les entreprises de location d'hélicoptères).
- La vitesse de déplacement de l'hélicoptère : 180km/h (estimation moyenne)
- Le coût de déplacement de l'hélicoptère (hors opération d'épandage) : 30€/min)⁸

Les coûts unitaires des activités impliquées dans l'opération d'épandage sont :

- Le suivi des chantiers : temps de technicien considéré (préparation et suivi): 2.5 jours/ chantier
Coût : 450€/jour⁹
- L'analyse du sol : 1 par chantier, coût 150 €/analyse¹⁰
- Le transport de cendres :

Chaufferie-chantier ou centre de traitement-chantier¹¹

Scenario	Distance	Explication /sources
40t	20-40 km	Plus la quantité de cendres augmente, plus de distance est grande.
60t	40-60 km	
80t	60-80 km	Ces rayons correspondent aux rayons d'approvisionnement des chaufferies en plaquette forestière (distance chantier-chaufferie)
120t	80-100 km	

La distance entre la chaufferie et le centre de traitement : 20km soit 9.6 euros/tonne

On envisage une distance relativement faible entre la chaufferie et le centre de traitement, et on pourrait même envisager, selon le type de traitement notamment auto-durcissement et

⁶ Bonneau, 1996

⁷ Source : experts UCFF, assimilation à la distance moyenne entre le lot de bois et un chantier forestier.

⁸ Source ONF

⁹ Source UCFF

¹⁰ Source LAS Inra

¹¹ Source : Contrat cadre réalisé pour les prestataires de transport de plaquettes forestières en camion à fond mouvant (FMA):

Paramètres pour le prix : distance / durée du tour + chargement-déchargement

Tarifcation selon les distances correspondant à un nombre de tours

Prix unitaire 2012

granulation scandinave une distance égale à zéro si le traitement est effectué dans la chaufferie).

- Le traitement des cendres (pour les scénarii avec des cendres traitées)

Traitement	Fourchette de prix €/t	Moyenne €/t	Source
Auto-durcissement	7-15,7	11,35	(Emilsson, 2006)
Granulation scandinave	8-12	10	(Emilsson, 2006)
Granulation compactée ou pelletisation	95		Expérimentations UCFE

- Le transport des machines entre les chantiers (pour le cas d'épandage avec porteur forestier) : 300€/chantier¹²

- Le déplacement de l'hélicoptère* (aérodrome-1^{er} chantier et entre parcelles) : 30€/min¹³

Pour connaître le temps parcouru, on s'appuie sur la vitesse de l'hélicoptère et la distance de déplacement. Pour évaluer la distance les déplacements entre les chantiers, il faut prendre en considération la surface du chantier.

Hypothèses :

distance entre les chantiers de surfaces comprises entre 3 et 7ha : 10km

distance entre les chantiers de surface comprise entre 12 et 20ha : 20km

- Le coût de l'épandage :

Porteur : 175 €/h

Coût porteur + Bob cat : 175€/h ; location porteur 60€/h ; main d'œuvre 40€/h ; Bob cat 75€/h (location+main d'œuvre)¹⁴.

Hélicoptère* : 110€/ha¹⁵

- Facturation aux chaufferies (montant qui correspond à ce que payent les chaufferies pour évacuer les cendres en CSDU) : 80€/t
- Subvention (si c'était le cas) : 200€/ha. En Finlande, les chantiers d'épandage sont subventionnés à hauteur de 200€/ha.

*Note : pour les déplacements réalisés en hélicoptère, on considère i) le déplacement de l'aérodrome au premier chantier ii) le déplacement du dernier chantier à l'aérodrome et iii) les déplacements entre les chantiers dont le coût est de l'ordre de 30€/minute. Le déplacement réalisé lors de l'épandage est calculé différemment: 110€/ha¹⁶

¹² Source experts UCFE

¹³ Source ONF

¹⁴ Source: expérimentations UCFE.

¹⁵ Source ONF

¹⁶ Source ONF

Tableau résumé des coûts et valeurs choisies pour les différentes variables de différents scénarii

Variables d'entrée			
Dose à épandre	4t/ha		
Quantité de cendres à épandre	40t-60t-80t-120t		
Surface des chantiers	3ha-7ha-12ha-20ha		
Capacité chargement de l'hélicoptère	0.9t		
Capacité chargement porteur forestier	6t		
Capacité chargement benne transport	10t		
Distance d'épandage	250m		
Distance moyenne : aérodrome-1 ^{er} chantier: (A/R)	200km		
Vitesse de déplacement de l'hélicoptère	180km/h		
Vitesse de déplacement du porteur forestier	60km/h		
Activités impliquées dans l'opération d'épandage			
Suivi des chantiers (technicien)	450€/jour ; 2 jours/chantier		
Analyse du sol	150€/analyse ; 1 analyse/chantier		
Transport des cendres (chaufferie - centre de traitement)	20km	9,6€/t	
Déplacement de l'hélicoptère: aérodrome-1 ^{er} chantier	200km (aller/retour)	30€/min	
Transport des cendres (centre de traitement-chantier) ou (chaufferie-chantier → cendres brutes)	Scenario	Distance	Coût €/t
	40 t	20-40 km	9,6
	60t	40-60 km	11,3
	80t	60-80 km	12,7
	120t	80-100 km	13,8
Traitement des cendres	Auto-durcissement	11,35€/t	
	Granulation scandinave	10€/t	
	Pelletisation	95€/t	
Transport de machine entre chantiers (porteur forestier)	300€/chantier		
Déplacement de l'hélicoptère entre chantiers	30€/minute		
Coût de l'épandage	hélicoptère	porteur	
	110€/ha	175€/h	
Facturation aux chaufferies	80€/t		
Subvention	(200€/ha)		
Investissement par le propriétaire	-		

c) Résultats

1. Scenarii : Épandage de cendres brutes par hélicoptère

L'épandage de cendres brutes fait par hélicoptère est rentable pour le scenario 120t-20ha/chantier. Il s'agit de chantiers de surface sur lesquels seraient réalisés des travaux d'éclaircies, distants de 10km en moyenne.

Dans l'hypothèse où il existerait des mesures compensatoires (200€/ha), presque tous les scenarii seraient rentables (sauf pour les scenarii où les chantiers ont une petite surface de seulement 3ha).

Note : pour des raisons environnementales, l'épandage de cendres brutes par hélicoptère reste à notre avis un cas peu faisable.

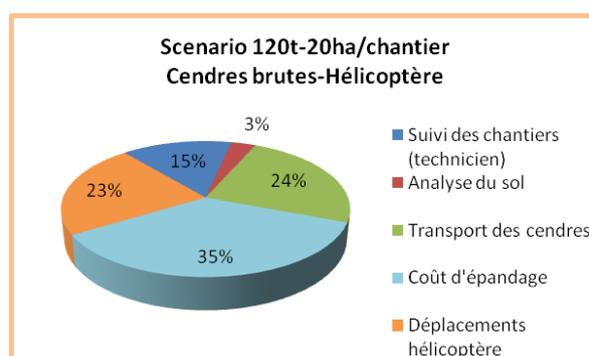
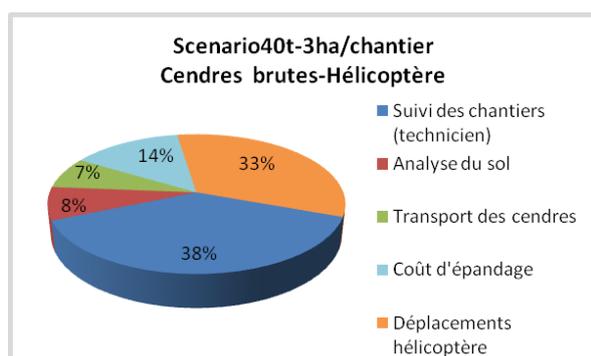
Rentabilité selon les différents scenarii :

		Tonnes à épandre				Bilan €/t
		40	60	80	120	
Surface par chantier (ha)	3	-117	-99	-95	-87	
	7	-56	-44	-34	-30	
	12	-34	-23	-15	-9	
	20	-27	-11	-5	0	
		10	15	20	30	
		Surface totale d'épandage (ha)				

Bilan négatif : scenario pas rentable

Bilan positif : scenario rentable

Exemples de répartition des activités impliquées dans l'opération d'épandage dans deux scenarii différents.



Rentabilité selon les différents scénarii en considérant une subvention de 200€/ha (en se basant sur le cas finlandais) :

		Tonnes à épandre				Bilan €/t
		40	60	80	120	
Surface par chantier (ha)	3	-67	-49	-45	-37	
	7	-6	6	16	20	
	12	16	27	35	41	
	20	23	39	45	50	
		10	15	20	30	
		Surface d'épandage (ha)				
Bilan négatif : scénario pas rentable						
Bilan positif : scénario rentable						

2. Scénarii : Épandage de cendres brutes par porteur forestier

L'épandage de **cendres brutes fait par porteur forestier est plus rentable dans plus de cas** (chantiers avec une surface typique pour de travaux des éclaircies (12-20 ha)) **que l'épandage réalisé par l'hélicoptère**, même sans mesures compensatoires.

Une bonne planification des journées de travail complètes (7h) est fondamentale pour optimiser l'opération.

Les opérations d'épandage de grandes quantités de cendres faites sur des petits chantiers (3ha) sont des opérations qui comprennent plusieurs chantiers (jusqu'à dix) et pour autant supportent des coûts très élevés dû au suivi des chantiers et au déplacement du matériel d'épandage (porteur). Ce dernier coût n'existerait pas dans le cas d'un épandage fait avec un épandeur agricole car la réglementation autorise le déplacement sur route. L'inconvénient est qu'ils ne sont pas suffisamment adaptés aux conditions forestières.

		Tonnes à épandre				Bilan €/t
		40	60	80	120	
Surface par chantier (ha)	3	-85	-90	-84	-84	
	7	-20	-32	-19	-22	
	12	5	-11	0,3	-1	
	20	12	3	13	10	
		10	15	20	30	
		Surface d'épandage (ha)				
Bilan négatif : scénario pas rentable						
Bilan positif : scénario rentable						

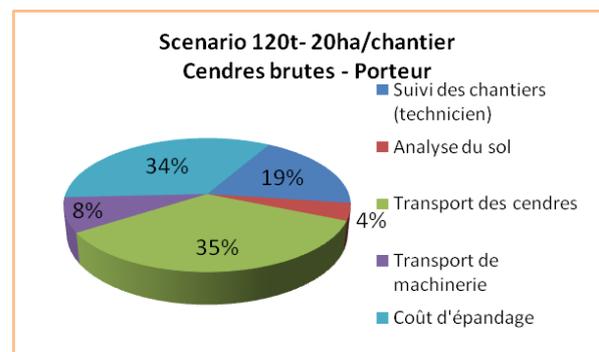
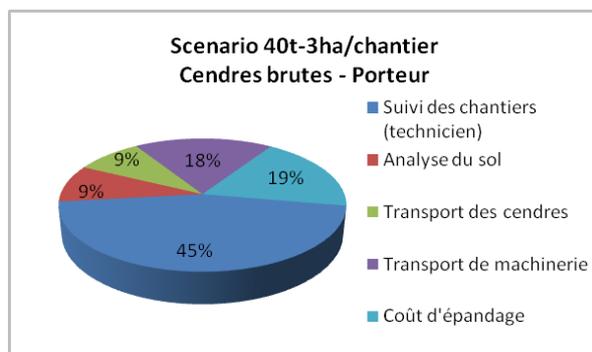
Les scénarii carrés en rouge, sont le résultat de journées de travail légèrement inférieures à 8h et 16h. Pour les calculs, on a considéré que cela correspondait à 1 journée et 2 journées de travail respectivement (journée de 7h). Le fait qu'il y ait des coûts fixes liés à la journée de travail (coût du porteur, bob cat et main d'œuvre pour l'épandage) fait que le coût total de l'opération est élevé.

Si de telles journées étaient arrondies à 7h et 14 h soit 1 et 2 journées de travail, on obtiendrait des scénarii plus avantageux. Une bonne planification de l'épandage pour compléter les journées de travail est fondamentale.

		Tonnes à épandre				
		40	60	80	120	
Surface par chantier (ha)	3	-85	-90	-84	-84	Bilan €/t
	7	-20	-12	-19	-12	
	12	5	9	0,3	9	
	20	12	24	12	20	
		10	15	20	30	
		Surface d'épandage (ha)				

Bilan négatif : scénario pas rentable
Bilan positif : scénario rentable

Exemples de répartition des activités impliquées dans l'opération d'épandage dans deux scénarii différents



3. Scenarii : Épandage de cendres traitées par hélicoptère

L'épandage de **cendres traitées par hélicoptère** est rentable seulement dans l'hypothèse de l'existence de mesures de compensation dans les scenarii considérés et pour les cendres auto-durcies et granulées à la manière scandinave.

Il s'agit des chantiers avec une surface typique pour des travaux d'éclaircies (12-20 ha) distants de 10km en moyenne.

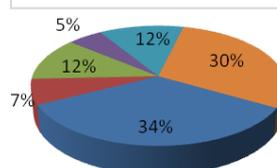
Le suivi de chantiers est le coût le plus influent sur le coût total de l'opération pour le cas de petits chantiers et peu quantité de cendres à épandre. Mais à fur et à mesure que la quantité de cendres augmente, le transport des cendres par benne devient le coût plus important, suivi de l'épandage en lui-même. Par contre quand la surface des chantiers reste petite (3ha) et que la quantité de cendres reste importante, le suivi de chantiers devient le coût le plus important.

Le déplacement de l'hélicoptère entre l'aérodrome et la zone d'épandage représente toujours un coût très important dans l'ensemble de l'opération.

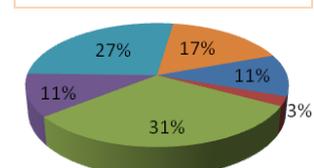
Le coût du traitement de **granulation compactée** (pelletisation) reste trop élevé pour être rentable dans un épandage en forêt. Cependant, il est possible de produire des granulés en mélangeant plusieurs types de cendres à de la matière organique. Cela rendrait ce type de produit plus **homogène et des valorisations** pourraient être envisagées **en milieu agricole si le produit est répond à la norme des car des engrais organiques** (cf partie granulation).

		Tonnes à épandre				Bilan €/t
		40	60	80	120	
Auto-durcissement						
Surface par chantier (ha)	3	-140	-121	-117	-110	
	7	-79	-67	-57	-53	
	12	-57	-46	-38	-32	
	20	-50	-34	-27	-22	
		10	15	20	30	
		Surface totale d'épandage (ha)				

Scenario 40t-3ha/chantier Auto-durcissement

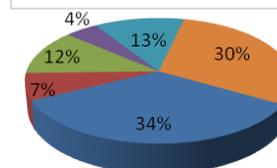


Scenario 120t-20ha/chantier Auto-durcissement

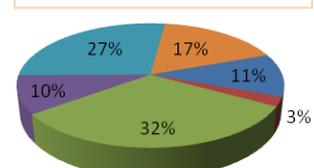


		Tonnes à épandre				Bilan €/t
		40	60	80	120	
Granulation Scandinave						
Surface par chantier (ha)	3	-138	-120	-116	-108	
	7	-79	-65	-56	-51	
	12	-57	-45	-37	-30	
	20	-50	-33	-26	-21	
		10	15	20	30	
		Surface totale d'épandage (ha)				

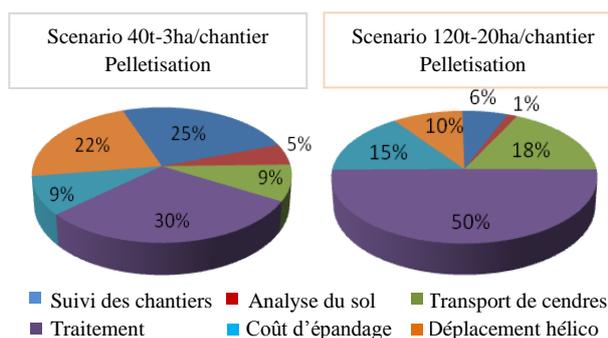
Scenario 40t-3ha/chantier Granulation Scandinave



Scenario 120t-20ha/chantier Granulation Scandinave



		Tonnes à épandre				Bilan €/t
		40	60	80	120	
Pelletisation						
Surface par chantier (ha)	3	-218	-200	-196	-189	
	7	-158	-145	-136	-131	
	12	-136	-125	-117	-110	
	20	-128	-113	-106	-101	
		10	15	20	30	
		Surface totale d'épandage (ha)				



Rentabilité des différents scénarii en introduisant une **subvention** de 200€/ha (cas finlandais) :

		Tonnes à épandre				Bilan €/t
		40	60	80	120	
Auto-durcissement						
Surface par chantier (ha)	3	-90	-71	-67	-60	
	7	-29	-17	-7	-3	
	12	-7	4	12	18	
	20	0	16	23	28	
		10	15	20	30	
		Surface totale d'épandage (ha)				

		Tonnes à épandre				Bilan €/t
		40	60	80	120	
Granulation Scandinave						
Surface par chantier (ha)	3	-88	-70	-66	-58	
	7	-29	-15	-6	-1	
	12	-7	5	13	20	
	20	0	17	24	29	
		10	15	20	30	
		Surface totale d'épandage (ha)				

		Tonnes à épandre				Bilan €/t
		40	60	80	120	
Pelletisation						
Surface par chantier (ha)	3	-168	-150	-146	-139	
	7	-108	-95	-86	-81	
	12	-86	-75	-67	-60	
	20	-78	-63	-56	-51	
		10	15	20	30	
		Surface totale d'épandage (ha)				

4. Scenarii : Épandage de cendres traitées par porteur forestier

L'épandage de **cendres traitées fait par porteur forestier est rentable seulement si des mesures de compensation** sont mises en place **dans les scenarii considérés** et lorsque les cendres sont auto-durcies ou granulées à la manière « scandinave ».

Il s'agit des chantiers avec une surface typique pour des **éclaircies** (12-20 ha) distants de 10km en moyenne et des chantiers de **coupes rases** (7ha) distants de 20km en moyenne.

Une bonne planification des journées de travail (journées complètes de 7h) est fondamentale pour optimiser l'opération et rendre les scenarii presque rentables.

Le suivi de chantiers reste le coût le plus influent sur le coût total de l'opération pour les petits chantiers avec peu quantité de cendres à épandre. Mais au fur et à mesure que la quantité de cendres augmente, le transport des cendres par benne devient le coût plus important, suivi de l'épandage en lui-même. Par contre, lorsque la surface des chantiers reste petite (3ha), et la quantité de cendres à épandre importante, le suivi de chantiers devient le coût le plus important.

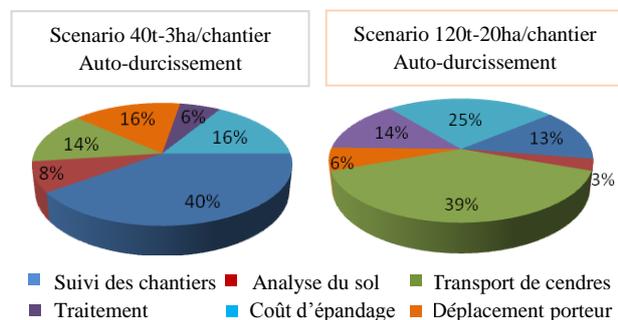
Le déplacement de l'hélicoptère entre l'aérodrome et la zone d'épandage représente toujours un coût élevé dans l'ensemble de l'opération.

Le coût du traitement de **granulation compactée** (pelletisation) reste trop élevé pour être rentable dans un épandage en forêt.

		Tonnes à épandre					
		40	60	80	120		
Auto-durcissement							
Surface par chantier (ha)	3	-108	-113	-107	-107	Bilan	€/t
	7	-42	-55	-41	-45		
	12	-18	-34	-22	-24		
	20	-10	-19	-9	-13		
		10	15	20	30		
		Surface totale d'épandage (ha)					
		↓ Optimisation journées ↓					
		Tonnes à épandre					
		40	60	80	120		
Auto-durcissement							
Surface par chantier (ha)	3	-108	-113	-107	-107	Bilan	€/t
	7	-42	-38	-41	-35		
	12	-18	-18	-22	-14		
	20	-10	-3	-9	-3		
		10	15	20	30		
		Surface totale d'épandage (ha)					

Note : Pour les scenarii carrés en gris on obtient des journées de travail inférieures à 8h et 16h alors qu'on a considéré pour les calculs 1 journée à 2 journées de travail (7h) respectivement. Les coûts fixes liés à la journée de travail (coût du porteur, bob cat et main d'œuvre pour l'épandage) rende le coût total de l'opération élevé en n'étant pas optimisée.

En considérant que de telles journées pourraient être arrondies à 7h et 14 h (une et deux journées de travail respectivement) on obtiendrait des scenarii plus avantageux.



		Tonnes à épandre					
Granulation Scandinave		40	60	80	120		
Surface par chantier (ha)	3	-106	-112	-105	-105	Bilan	€/t
	7	-41	-54	-40	-44		
	12	-16	-33	-21	-23		
	20	-9	-18	-8	-11		

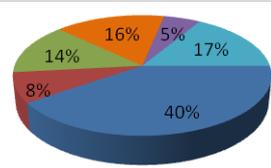
Surface totale d'épandage (ha)

Optimisation journées

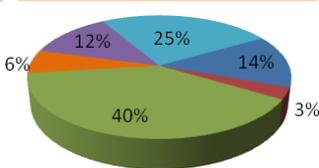
		Tonnes à épandre					
Granulation Scandinave		40	60	80	120		
Surface par chantier (ha)	3	-106	-112	-105	-105	Bilan	€/t
	7	-41	-37	-40	-33		
	12	-16	-16	-21	-12		
	20	-9	-1	-8	-1		

Surface totale d'épandage (ha)

Scenario 40t-3ha/chantier Granulation Scandinave



Scenario 120t-20ha/chantier Granulation Scandinave



■ Suivi des chantiers ■ Analyse du sol ■ Transport de cendres
 ■ Traitement ■ Coût d'épandage ■ Déplacement porteur

		Tonnes à épandre					
Pelletisation		40	60	80	120		
Surface par chantier (ha)	3	-186	-192	-185	-185	Bilan	€/t
	7	-121	-134	-120	-124		
	12	-96	-113	-101	-103		
	20	-89	-98	-88	-91		

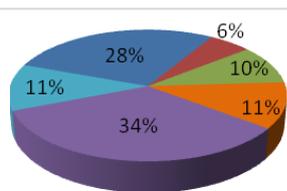
Surface totale d'épandage (ha)

Optimisation journées

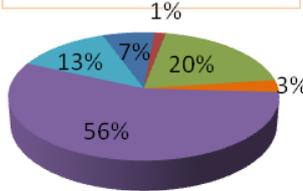
		Tonnes à épandre					
Pelletisation		40	60	80	120		
Surface par chantier (ha)	3	-186	-192	-185	-185	Bilan	€/t
	7	-121	-117	-120	-113		
	12	-96	-96	-101	-92		
	20	-89	-81	-88	-81		

Surface totale d'épandage (ha)

Scenario 40t-3ha/chantier Pelletisation



Scenario 120t-20ha/chantier Pelletisation



■ Suivi des chantiers ■ Analyse du sol ■ Transport de cendres
 ■ Traitement ■ Coût d'épandage ■ Déplacement porteur

Analyse des différents scénarii dans le cas où il existe une **subvention** de 200€/ha (cas finlandais) :

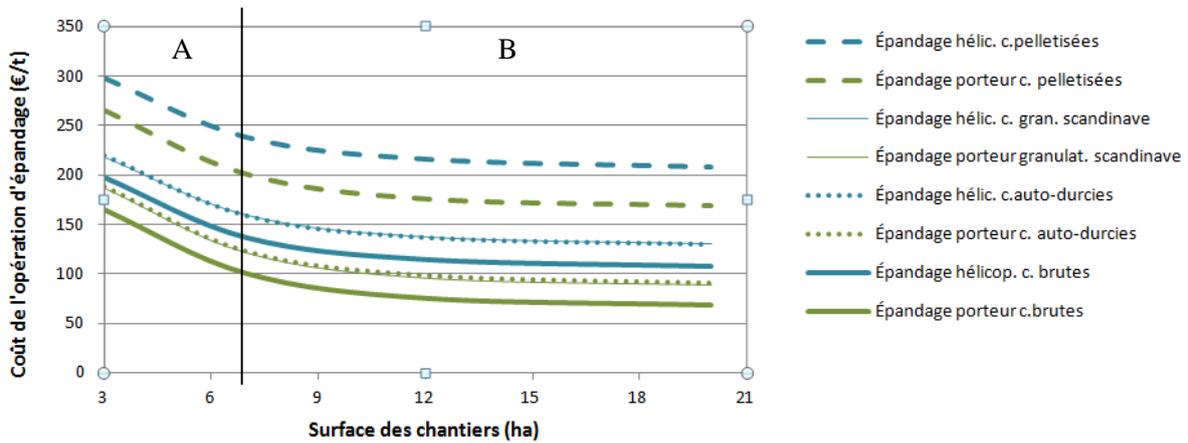
		Tonnes à épandre				Bilan €/t
		40	60	80	120	
Auto-durcissement		40	60	80	120	
Surface par chantier (ha)	3	-58	-63	-57	-57	
	7	8	12	9	15	
	12	32	32	28	36	
	20	40	47	41	47	
		10	15	20	30	
		Surface totale d'épandage (ha)				

		Tonnes à épandre				Bilan €/t
		40	60	80	120	
Granulation Scandinave		40	60	80	120	
Surface par chantier (ha)	3	-56	-62	-55	-55	
	7	9	13	10	17	
	12	34	34	29	38	
	20	41	49	42	49	
		10	15	20	30	
		Surface totale d'épandage (ha)				

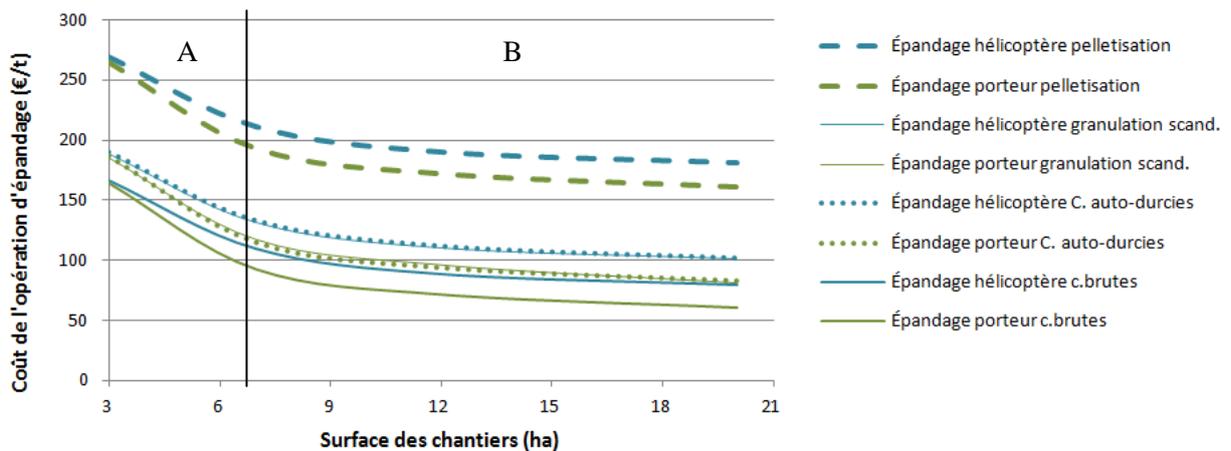
		Tonnes à épandre				Bilan €/t
		40	60	80	120	
Pelletisation		40	60	80	120	
Surface par chantier (ha)	3	-136	-142	-135	-135	
	7	-71	-67	-70	-63	
	12	-46	-46	-51	-42	
	20	-39	-31	-38	-31	
		10	15	20	30	
		Surface totale d'épandage (ha)				

Les chantiers d'épandage réalisés sur des petites surfaces coûtent extrêmement chers. Ceci est notamment lié aux coûts fixes de l'opération. Le graphique ci-dessous montre que le coût de l'épandage commence à se stabiliser à partir de chantier de 7ha.

Influence de la taille des chantiers dans le coût de l'opération d'épandage de 40 tonnes



Influence de la taille des chantiers dans le coût de l'opération d'épandage de 120 tonnes



Le coût de l'épandage fait par hélicoptère se révèle toujours plus cher **que celui fait avec un** porteur forestier (de l'ordre de 1.2-1.4 fois plus)

d) Bilan de l'analyse

L'opération d'épandage de cendres brutes en forêt est **rentable** lorsqu'elle est faite avec un **porteur forestier**, que les **cendres ne sont pas traitées**, que les **surfaces des chantiers** sont supérieures ou égales à 20ha et distantes de 10km au maximum. Cela s'apparente aux chantiers au stade éclaircie qui pourraient être réalisés avec un porteur forestier (forêt plus « ouverte »).

L'épandage de cendres **brutes par hélicoptère** est rentable pour certains scénarii mais pour des **raisons environnementales** semble **peu faisable**.

L'épandage de **cendres traitées (auto-durcissement et granulation scandinave)** fait avec un porteur ou un hélicoptère est **rentable** seulement si des **mesures de compensation** existent (200€/ha) et dans des conditions bien définies. Il s'agit de chantiers de surfaces comprises entre 7 et 20ha (7-20ha pour le porteur, 12-20 pour l'hélicoptère) destinés soit à des coupes rases (7ha) soit à des éclaircies (12-20ha) distants jusqu'à 10km pour les éclaircies et jusqu'à 20km pour les coupes rases.

Le coût du traitement de la **granulation compactée** (pelletisation) reste trop élevé pour être rentabilisé dans un épandage en forêt. Cependant, le fait de granuler des cendres mélangées à de la matière organique permet de créer un **produit** plus stable et de composition conforme à un engrais organique. Ces granulés pourraient être valorisés sur sols agricoles et se substituer aux engrais chimiques.

Une **bonne planification des journées de travail** (journées complètes de 7 heures) est nécessaire pour amortir les coûts fixes (main d'œuvre, location de matériel, déplacement de l'hélicoptère).

Bien que l'épandage fait par hélicoptère soit environ quatre fois plus productif que celui fait par **porteur forestier**, ce dernier se révèle toujours **plus économique** (de l'ordre de 1.2-1.4 fois moins cher sur des parcelles supérieures ou égales à 7 hectares).

Pour l'épandage d'une quantité de cendres fixe, la petite **taille des chantiers** implique généralement de réaliser un nombre plus élevé de chantiers. Ces conditions d'épandage se révèlent peu rentables notamment à cause des coûts d'analyse de sol, de transport de matériel (épandage avec porteur), de déplacement de l'hélicoptère entre chantiers, etc.

L'analyse montre qu'il est nécessaire d'épandre sur une surface de 7ha au minimum pour amortir l'ensemble de ces coûts.

D'où l'importance du regroupement des propriétaires entre eux, de la mutualisation des surfaces, afin de pouvoir acheter collectivement la prestation d'épandage et diminuer d'autant le prix de revient de l'opération sylvicole. Cela demande aux propriétaires forestiers de s'organiser afin d'établir au mieux un planning d'épandage.

Le **coût du transport de matériel**, inclus dans le cas de l'épandage fait avec porteur forestier, peut être évité si l'opération est faite avec un épandeur agricole (possibilité de rouler sur les routes) mais les conditions de chantier doivent être adaptées à ce type de matériel, ce qui n'est pas toujours le cas en forêt.

Concernant l'influence des différents **coûts de l'opération** d'épandage, c'est le **suivi de chantiers** qui reste le coût le plus important notamment lorsque les chantiers sont réalisés sur des petites parcelles et que la quantité de cendres à épandre est faible. Lorsque l'épandage est réalisé sur des surfaces plus grandes avec plus de cendres à épandre, c'est le **transport des cendres par benne** qui devient le coût le plus important, suivi de **l'épandage en lui-même**. Par contre quand la surface des chantiers reste

petite de l'ordre de 3ha et que la quantité de cendres est importante, c'est le suivi de chantiers qui redevient le coût le plus important.

Cette analyse a pour objectif d'identifier toutes les variables nécessaires à calculer le coût d'un épandage de cendres en forêt. Cependant, les résultats devraient être re-considérés si les **conditions de la station permettent une augmentation de la croissance des peuplements** dû à l'effet cendres (sur les sols organiques ou les sols minéraux carencés en Ca, Mg et/ou K). Dans ce cas, les gains de productivité obtenus pourraient permettre un investissement initial de la part du propriétaire pour compléter le financement de l'opération. Dans le projet RecAsh, on observe une augmentation de la productivité de l'ordre de +5m³/ha/an sur 5000ha de forêt sur lesquels ont été épandus des cendres (station dominée par des résineux sur sols organiques) (Swedish Forest Agency, 2006).

Sujets d'intérêt pour les études à venir:

- L'effet de l'épandage sur la croissance dans un contexte français,
- L'étude sur le coût des différents traitements de cendres dans un contexte français,
- La différenciation des coûts d'épandage selon le type de cendre utilisé (brute, auto-durcie, granulée ou pelletisée). Différents densités auront différents volumes et probablement différents rendements.
- L'optimisation de la logistique de l'opération : répartition des chaufferies, quantité de cendres produites, périodes de disponibilité, forêts cibles pour l'épandage, etc.
- L'étude sur l'épandage de cendres traitées différemment sur plusieurs chantiers avec des différentes conditions forestières pour comptabiliser le temps de panne des machines et le rendement de l'épandage.

6. Conclusion

La nouvelle réglementation, en vigueur depuis le 1^{er} janvier 2014 introduit la possibilité d'épandre des cendres sous foyer de biomasse en forêt pour les installations de combustion de puissance comprise entre 2 et 20 MW, c'est-à-dire pour les ICPE 2910 soumises à Déclaration et à Enregistrement.

Pour les installations de puissance supérieure, la partie valorisation des déchets n'a pas été modifiée par rapport au précédent arrêté. Il faut toujours se référer au texte relatif à l'épandage des déchets sur sols agricoles. De fait, l'épandage de cendres en forêt n'est pas explicitement autorisé aujourd'hui pour ces installations.

Les modalités d'épandages de cendres en forêt pour les ICPE soumises à déclaration et à enregistrement ont été définies à partir du texte relatif à l'épandage des déchets sur sols agricoles. Celles-ci ne sont pas toujours adaptées au contexte forestier et pourraient se révéler difficiles à respecter dans certains cas.

Les cendres de bois sont composées de carbonates de calcium, d'oxyde de calcium, de potassium et de sodium.

Les carbonates et oxydes ont un effet de chaulage très fort et peuvent servir à remonter le pH d'un sol acide. Cependant, il faudrait épandre dans certains cas jusqu'à 20 tonnes de cendres à l'hectare pour remonter le pH d'un point. Si on préconise une dose bien inférieure, définie en prenant en compte conjointement le type de peuplement et le sol, cela aurait pour conséquence :

- D'une part fertiliser les sols en éléments minéraux
- Et d'autre part, d'augmenter la libération des éléments nutritifs déjà présents dans les sols, notamment l'azote même avec une faible augmentation du pH.

Ainsi, l'épandage de cendres garde tout son sens lorsqu'il est réalisé sur les sols acides, organique et minéraux carencés en calcium, magnésium, potassium et phosphore.

Les risques biologiques, agronomiques et écotoxicologiques associés à l'épandage de cendres méritent d'être mieux quantifiés à ce stade.

En raison du caractère innovant de l'épandage de cendres en forêt, **des recherches complémentaires sont également à mener pour améliorer l'analyse économique d'un épandage de cendre en forêt et arriver à des résultats 100% français. L'opération peut s'avérer rentable** lorsqu'elle est faite par un porteur forestier, que les cendres ne sont pas traitées et les surfaces des chantiers impliquées sont supérieures ou égales à 20ha. Pour les autres scénarii, l'épandage de cendre pourrait être rentable s'il existait de **mesures de compensation** ou **si les conditions de la station permettaient une augmentation de la croissance des peuplements** dû à l'effet des cendres. Augmentation qui se traduirait en revenus supplémentaires pour le propriétaire et qui pourrait l'inciter à investir au départ pour compléter le financement de l'opération. De même, la bonne planification logistique (transport de cendres) ainsi que l'optimisation des journées de travail et la bonne calibration de la dimension des chantiers jouent un rôle fondamental dans le coût final de l'opération.

Les essais d'épandage réalisés montrent que la manipulation des cendres sèches est parfois compliquée voire dangereuse. La présence de chaux vive peut être source de brûlures et d'incendie si celle-ci est mal éteinte. La pulvérulence des cendres implique également le port des équipements protection individuels.

Il en est de même pour les cendres humides qui doivent être épanchées dans un délai assez court pour éviter qu'elles ne prennent en masse.

Plus généralement, pour maîtriser ces risques et avoir un effet sur le long terme, la granulation (compactée et pelletisation) peut être une solution intéressante. Cela permettrait également d'obtenir un produit plus homogène. Deux voies sont alors envisageables :

- La granulation avec de la matière minérale
- Et la granulation avec de la matière organique

Les tests effectués dans cette étude montrent que les mélanges de cendre à de la matière organique sont possibles et conformes à la norme engrais organiques N, K.

Il reste à étudier la rentabilité de la production et de la valorisation de ces deux types de produits dans un contexte forestier et agricole.

7. Bibliographie

- Augusto, L. & Bakker, M., 2009. *Les sols forestiers landais : caractéristiques et effets des pratiques de gestion*, Bordeaux: UMR TCEM INRA-ENITA.
- Augusto, L., Bakker, M. R. & Meredieu, C., 2008. Wood ash applications to temperate forest ecosystems—potential benefits and drawbacks. *Plant Soil*, p. 306:181–198.
- Couturier, C., Doublet, S. & Ruscassie, C., 2005. *Gestion et Valorisation des Cendres de Chaufferies Bois*, s.l.: Solagro, ADEME, .
- Emilsson, S., 2006. *From Extraction of Forest Fuels to Ash Recycling*, s.l.: Swedish Forest Agency.
- Foray, S. & Brassat, T., 2005. *La valorisation des cendres de chaufferie en agriculture*, s.l.: AquaSol, ADEME,.
- Moilanen, M. et al., 2006. Does wood ash application increase heavy metal accumulation in forest berries and mushrooms?. *Elsevier. Forest Ecology and Management*, Volume 226, p. 153–160.
- Perkiömäki, J., 2004. *Wood ash use in coniferous forests a soil microbiological study into the potential risk of cadmium release*, University of Helsinki: Faculty of Agriculture and Forestry,.
- SA, B., 2005. *Les cendres de chaufferies bois*, s.l.: Biocombustibles SA, ADEME.
- Swedish Forest Agency, 2006. *Regular Recycling Wood Ash to Prevent Waste Production*, s.l.: Swedish Forest Agency.
- Väätäinen, K., Esko, S., Räisänen, M. & Tahvanainen, T., 2011. The costs and profitability of using granulated wood ash as a forest fertilizer in drained peatland forests. *Elsevier*, p. 3335e3341.
- Vance, E. D., 1996.. Land Application of Wood-Fired and Combination Boiler Ashes: An Overview. *Journal of Environmental Quality*, p. 937–944.

8. Annexes

ANNEXE 1 - Article 5.8 de l'arrêté du 26 Août 2013 pour les ICPE soumises à Déclaration et annexe III de l'arrêté du 24 septembre 2013 pour les ICPE soumises à Enregistrement :

A. Les cendres épandues ont un intérêt pour les sols ou la nutrition des cultures et leur application ne porte pas atteinte, directement ou indirectement, à la santé des hommes et animaux, à la qualité et à l'état phytosanitaire des cultures, et à la qualité des sols et des milieux aquatiques.

B. Etude préalable d'épandage justifie la compatibilité de l'épandage avec les contraintes environnementales recensées et les documents de planification existants, notamment les plans prévus à l'article L 541-14 du code de l'environnement et les schémas d'aménagement et de gestion des eaux, prévus aux articles L 212-1 et 3 du code de l'environnement.

L'étude préalable d'épandage établit :

- * la caractérisation des cendres à épandre : quantités prévisionnelles, rythme de production, valeur agronomique au regard des paramètres définis au point G.2 ci-après, état physique, traitements préalables, innocuité dans les conditions d'emploi ;
- * les doses de cendres à épandre selon les différents types de culture à fertiliser et les rendements prévisionnels des cultures ;
- * l'emplacement, le volume, les caractéristiques et les modalités d'emploi des stockages de cendres en attente d'épandage ; l'identification des filières alternatives d'élimination ou de valorisation ;
- * les caractéristiques des sols notamment au regard des paramètres définis au point G.2 ci-après et des éléments traces métalliques visés au tableau 2 du point G.2 ci-après, au vu d'analyses datant de moins de trois ans ;
- * l'adéquation entre les surfaces agricoles maîtrisées par l'exploitant de l'installation de combustion ou mises à sa disposition par le prêteur de terre et les flux de cendres à épandre (productions, rendements objectifs, doses à l'hectare et temps de retour sur une même parcelle, périodes d'interdiction d'épandage) ;

C. Plan d'épandage est réalisé au vu de l'étude préalable d'épandage. Il est constitué :

- * d'une carte à une échelle minimum de 1/25000ème (ou autre échelle plus adaptée) permettant de localiser les surfaces où l'épandage est possible compte tenu des surfaces exclues de l'épandage (cf. notamment D. règles d'épandages). Cette carte fait apparaître les contours et les numéros des unités de surface permettant de les repérer, ainsi que les zones exclues à l'épandage ;
- * d'un document mentionnant l'identité et l'adresse des prêteurs de terres qui ont souscrit un contrat écrit avec l'exploitant de l'installation de combustion, précisant notamment leurs engagements et responsabilités réciproques ;
- * d'un tableau référençant les surfaces repérées sur le support cartographique et indiquant, pour chaque unité, les numéros d'îlots de référence PAC ou à défaut les références cadastrales, la superficie totale et la superficie épandable, ainsi que le nom du prêteur de terre.

D.1. Les apports de phosphore et de potasse, organique et minérale, toutes origines confondues sur les terres faisant l'objet d'un épandage, tiennent compte de la rotation des cultures ainsi que de la nature particulière des terrains et de leur teneur en éléments fertilisants. Les quantités épandues et les périodes d'épandage sont adaptées de manière à assurer l'apport des éléments utiles aux sols ou aux cultures sans excéder les besoins, compte tenu des apports de toute nature, y compris les engrais et les amendements.

D.2. Les cendres ne contiennent pas d'éléments indésirables (morceaux de plastique, de métaux, de verre) etc.

Les cendres ne peuvent être épandues :

- * dès lors que les teneurs en éléments-traces métalliques dans les sols dépassent l'une des valeurs limites figurant au tableau 2 du G2 du présent point ;
- * ou dès lors que les teneurs en éléments-traces métalliques ou en composés organiques dans les cendres dépassent l'une des valeurs limites figurant aux tableaux 1 a et 1 b ci-dessous
- * des lors que le flux cumulé sur une durée de 10 ans, apporté par les cendres sur l'un de ces éléments ou composés excède les valeurs limites figurant aux tableaux 1 a et 1 b

Toutefois, des limites en éléments-traces métalliques supérieures à celles du tableau 2 du G.2 du présent point peuvent être accordées par le préfet du lieu de déclaration de l'installation de combustion sur la base d'études du milieu concerné montrant que les éléments-traces métalliques des sols ne sont pas mobiles ni biodisponibles ou que les sols contiennent à l'origine des teneurs naturelles en métaux supérieures à ces valeurs limites.

En outre, lorsque les cendres sont épandues sur des pâturages, le flux maximum des éléments-traces métalliques à prendre en compte est celui du tableau 3 du G.2 :

Les cendres ne doivent pas être épandues sur des sols dont le pH avant épandage est inférieur à 6, sauf lorsque les trois conditions suivantes sont simultanément remplies :

- * **le pH du sol est supérieur à 5 ;**
- * **la nature des cendres peut contribuer à remonter le pH du sol à une valeur supérieure ou égale à 6**
- * **le flux cumulé maximum des éléments apportés aux sols est inférieur aux valeurs du tableau 3 ci-dessus.**

D.3. Un programme prévisionnel annuel d'épandage est établi , en accord avec les prêteurs de terres, au plus tard un mois avant le début des opérations concernées. Il inclut également les parcelles de l'exploitant de l'installation de combustion lorsque celui-ci est également prêteur de terres.

Ce programme comprend au moins :

- * La liste des parcelles concernées par la campagne ainsi que la caractérisation des systèmes de culture (culture implantées avant et après épandage, période d'interculture) sur ces parcelles ;
- * Les préconisations spécifiques d'apport des cendres (calendrier et doses d'épandage) ;
- * L'identification des personnes morales ou physiques intervenant dans la réalisation de l'épandage.

Ce programme prévisionnel est tenu à la disposition de l'inspection des installations classées. Il lui est adressé sur sa demande.

D.4. L'épandage des cendres est mis en œuvre afin que les nuisances soient réduites au minimum. Des moyens appropriés sont mis en œuvre pour éviter les envols de cendres pulvérulentes. En particulier, **les cendres sont enfouies le plus tôt possible, dans un délai maximum de 48 heures.**

Les cendres pulvérulentes sont enfouies dans un délai maximum de 4h lorsque la parcelle sur laquelle aura lieu l'épandage se situe dans le périmètre d'un plan de protection de l'atmosphère tel que prévu à l'article R. 222-13 du code de l'environnement.

D.5. Sous réserve des prescriptions fixées en application de l de l'article L. 20 du code de la santé publique, l'épandage de cendres respecte les distances et délais minimaux suivants :

Nature des activités à protéger	Distance minimale	Domaine d'application
Puits, forages, sources, aqueducs transitant des eaux destinées à la consommation humaine en écoulement libre, installations souterraines ou semi-enterrées utilisées pour le stockage des eaux, que ces dernières soient utilisées pour le stockage des eaux, que ces dernières soient utilisées pour l'alimentation en eau potable ou pour l'arrosage des cultures maraîchères	35 mètres	Pente du terrain inférieure à 7 %
	100 mètres	Pente du terrain supérieure à 7%
	Ou, si cette distance est inférieure, dans les conditions définies par l'acte fixant les règles de protection du prélèvement	
Cours d'eau et plans d'eau	5 mètres des berges	Pente du terrain inférieure à 7%
	100 mètres des berges	Pente du terrain supérieure à 7%
	Dans tous les cas, l'épandage est effectué avec un système ou selon une pratique qui ne favorise pas le lessivage immédiat vers les berges	
Lieux de baignade	200 mètres	
Sites d'aquaculture et zones conchylicoles	500 mètres	
Habitations ou locaux occupés par des tiers, zones de loisirs et établissements recevant du public	50 mètres	En cas de cendres odorantes
	100 mètres	

Nature des activités à protéger	Délai maximum
Herbages ou cultures fourragères	Trois semaines avant la remise à l'herbe ou de la récolte de culture fourragères
Terrains affectés à des cultures maraîchères ou fruitières, à l'exception des cultures d'arbres fruitiers	Pas d'épandage pendant la période de végétation
Terrains destinés ou affectés à des cultures maraîchères ou fruitières en contact avec les sols ou susceptibles d'être consommés à l'état cru	Dix mois avant la récolte et pendant la récolte elle-même

D.6. Les périodes d'épandage et les quantités sont adaptées de manière :

- A adapter l'apport des éléments utiles aux sols et aux cultures sans excéder leurs besoins en la matière compte tenu des apports de toute nature qu'ils peuvent recevoir par ailleurs ;
- A empêcher la stagnation prolongée sur les sols, le ruissellement en dehors des parcelles d'épandage, une percolation rapide ;
- A empêcher l'accumulation dans le sol de substances susceptibles à long terme de dégrader sa structure ou de présenter un risque ecotoxicologique.

L'épandage est interdit :

- pendant les périodes où le vent a une vitesse supérieure à 5 m/s, en cas de cendres pulvérulentes ;
- dès lors que le seuil d'alerte des particules PM10 est déclenché, conformément à l'article R221-1 du code de l'environnement ;
- pendant les périodes où le sol est pris en masse par le gel ou abondamment enneigé ;
- pendant les périodes de forte pluviosité et pendant les périodes où il existe un risque d'inondation ;
- en dehors des terres régulièrement travaillées et des prairies ou des forêts exploitées ;
- sur les terrains à forte pente, dans des conditions qui entraîneraient leur ruissellement hors du champ d'épandage.

D.7. Toute anomalie constatée sur les sols, les cultures et leur environnement lors ou à la suite de l'épandage de cendres et susceptible d'être en relation avec ces épandages est signalée sans délai au préfet du lieu de déclaration de l'installation de combustion.

E.1. Les ouvrages permanents d'entreposage des cendres sont dimensionnés pour faire face aux périodes où l'épandage est soit impossible, soit interdit par l'étude préalable. De plus, l'exploitant de l'installation de combustion identifie les installations de traitement de déchets auxquelles il peut faire appel en cas de dépassement de ces capacités de stockage de cendres.

Toutes les dispositions sont prises pour que les dispositifs d'entreposage ne soient pas source de gêne ou de nuisances pour le voisinage et n'entraînent pas de pollution des eaux ou des sols par ruissellement ou infiltration. Le déversement dans le milieu naturel des trop-pleins des ouvrages d'entreposage est interdit. Les ouvrages d'entreposage à l'air libre sont interdits d'accès aux tiers non autorisés.

E.2. Le dépôt temporaire de déchets, sur les parcelles d'épandage et sans travaux d'aménagement, n'est autorisé que lorsque les cinq conditions suivantes sont simultanément remplies :

- Les déchets sont solides et peu fermentescibles, à défaut, la durée du dépôt est inférieure à quarante-huit heures ;
- Toutes les précautions ont été prises pour éviter le ruissellement sur ou en dehors des parcelles d'épandage ou une percolation rapide vers les nappes superficielles ou souterraines ;
- Le dépôt respecte les distances minimales d'isolement définies précédemment (distances et délais), sauf pour la distance vis-à-vis des habitations ou locaux habités par des tiers, qui est toujours égale à 100 mètres. En outre, une distance d'au moins 3 mètres vis-à-vis des routes et fossés est respectée ;
- Le volume du dépôt est adapté à la fertilisation raisonnée des parcelles réceptrices pour la période d'épandage considérée ;
- La durée maximale ne dépasse pas un an et le retour sur un même emplacement ne peut intervenir avant un délai de trois ans.

F. Un cahier d'épandage, tenu sous la responsabilité de l'exploitant de l'installation de combustion, à la disposition de l'inspection des installations classées pendant une durée de dix ans, comporte pour chacune des parcelles (ou îlots) réceptrices épandues :

- les surfaces effectivement épandues ;
- les références parcellaires ;
- les dates d'épandage ;
- la nature des cultures ;
- l'origine et la nature de la biomasse utilisée dans l'installation de combustion,
- les volumes et la nature de toutes les matières épandues au titre du présent plan d'épandage de l'ICPE ;

- les quantités d'éléments traces métalliques épandues au titre du présent plan d'épandage de l'ICPE ;
- l'identification des personnes morales ou physiques chargées des opérations d'épandage ;
- l'ensemble des résultats d'analyses pratiquées sur les sols et les matières épandues avec les dates de prélèvements et de mesures et leur localisation.

Ce cahier d'épandage est renseigné de manière inaltérable à la fin de chaque semaine au cours de laquelle des épandages ont été effectués.

Lorsque les cendres sont épandues sur des parcelles mises à disposition par un prêteur de terres, un bordereau cosigné par l'exploitant de l'installation de combustion et le prêteur de terre est référencé et joint au cahier d'épandage. Ce bordereau est établi au plus tard à la fin du chantier d'épandage et au moins une fois par semaine. Il comporte l'identification des parcelles réceptrices et les volumes épandus.

G.1. Des analyses sont effectuées, sur un échantillonnage représentatif de cendres, selon les normes en vigueur.

L'échantillonnage représentatif est réalisé soit :

- soit sur chaque lot destiné à l'épandage : 25 prélèvements élémentaires uniformément répartis en différents points et différentes profondeurs dans les différents contenants constituant le lot sont effectués à l'aide d'une sonde en dehors de la croûte de surface et des zones où une accumulation d'eau s'est produite. Ils sont mélangés dans un récipient ou sur une bâche et donnent, après réduction, l'échantillon représentatif envoyé au laboratoire pour analyse ;
- soit en continu : un prélèvement élémentaire est effectué sur les cendres évacuées du foyer de combustion une fois par semaine lorsque le volume annuel de cendres sous foyer est supérieur à 2000 tonnes, une fois par mois sinon. Chaque prélèvement élémentaire contient au moins 50 grammes de matière sèche et tous doivent être identiques. Ils sont conservés dans des conditions ne modifiant pas leur composition. Lorsqu'un lot de cendres prêtes à être épandues est constitué, l'ensemble des prélèvements élémentaires sont rassemblés dans un récipient sec, propre et inerte. Ils sont homogénéisés de façon efficace à l'aide d'un outil adéquat pour constituer un échantillon composite, et donnent après réduction éventuelle, l'échantillon représentatif envoyé au laboratoire pour analyse.

L'échantillon représentatif envoyé au laboratoire représente entre 500 grammes à 1 kg de matière sèche.

Les analyses réalisées par le laboratoire portent sur l'ensemble des paramètres listés aux tableaux 1a et 1b du point G.2 ainsi que sur les paramètres suivants :

- matière sèche (%) ;
- pH ;
- phosphore total (en P₂O₅); potassium total (en K₂O); calcium total (en CaO); magnésium total (en MgO) ;
- oligo-éléments (bore, cobalt, cuivre, fer, manganèse, molybdène, zinc).

Elles sont réalisées dans un délai tel que les résultats d'analyse sont connus avant réalisation de l'épandage.

Les frais d'analyse sont à la charge de l'exploitant de l'installation de combustion.

- Les données relatives aux caractéristiques des cendres et aux doses d'emploi sont adressées au préfet du lieu de déclaration de l'installation de combustion à l'issue de la première année de fonctionnement.

- Les résultats d'analyses ainsi que les valeurs limites figurant aux tableaux 1a et 1b du point G.2 sont transmises avant chaque épandage au prêteur de terre.

G.2. Seuils en éléments-traces métalliques et en substances organiques

Tableau 1 a. : Teneurs limites en éléments traces métalliques dans les cendres :

Eléments-traces métalliques	Valeur limite dans les cendres (mg/kg de matière sèche)	Flux cumulé maximum apporté par les cendres en dix ans (g/m ²)
Cadmium	10	0.015
Chrome	1000	1.5
Cuivre	1000	1.5
Mercure	10	0.015
Nickel	200	0.3
Plomb	800	1.5
Zinc	3000	4.5
Chrome + Cuivre + Nickel + Zinc	4000	6

Tableau 1 b. : Teneurs limites en composés-traces organiques dans les cendres

Composés-traces organiques	Valeur limite dans les cendres (mg/kg matière sèche)	Flux cumulé maximum apporté par les cendres en 10 ans (mg/m ²)
Total des 7 principaux PCB (*)	0.8	1.2
Fluoranthène	5	7.5
Benzo(b)fluoranthène	2.5	4
Benzo(a)pyrène	2	3
(*) PCB 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180.		

Tableau 2 : Valeurs limites de concentration dans les sols

Eléments-traces dans les sols	Valeur limite (mg/kg matière sèche)
Cadmium	2
Chrome	150
Cuivre	100
Mercure	1
Nickel	50
Plomb	100
Zinc	300

Tableau 3 : Flux cumulé maximum en éléments-traces métalliques apporté par les cendres pour les pâturages ou les sols de pH inférieur à 6

Éléments-traces métalliques	Flux cumulé maximum apporté par les cendres en 10 ans (g/m ²)
Cadmium	0.015
Chrome	1.2
Cuivre	1.2
Mercure	0.012
Nickel	0.3
Plomb	0.9
Sélénium (pour le pâturage uniquement)	0.12
Zinc	3
Chrome + Cuivre + Nickel + Zinc	4

G.3. Les méthodes d'échantillonnage et d'analyse s'appuient sur les normes en vigueur.

Les sols sont analysés sur chaque point de référence représentatif de chaque zone homogène :

- après l'ultime épandage, sur le ou les points de référence, sur chaque parcelle exclue du périmètre d'épandage;
- au minimum tous les dix ans.

Par zone homogène, on entend une partie d'unité culturale homogène d'un point de vue pédologique n'excédant pas 20 hectares.

Par unité culturale, on entend une parcelle ou un groupe de parcelles exploitées selon un système unique de rotations de cultures par un seul exploitant agricole.

Les analyses pour la caractérisation de la valeur agronomique des sols portent sur :

- la granulométrie,
- les mêmes paramètres que pour la caractérisation de la valeur agronomique des cendres en remplaçant les éléments concernés par P2O5 échangeable, K2O échangeable, MgO échangeable et CaO échangeable.

Les résultats d'analyses ainsi que les valeurs limites figurant au tableau 2 du point G.2 sont transmis au prêteur de terre dès que les résultats d'analyse sont connus. »

ANNEXE 2 - Arrêté du 2 février 1998 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation.

Version consolidée au 10 avril 2013

Section 4 : Epandage.

Article 36

On entend par "épandage" toute application de déchets ou effluents sur ou dans les sols agricoles.

Seuls les déchets ou les effluents ayant un intérêt pour les sols ou pour la nutrition des cultures peuvent être épandus.

La nature, les caractéristiques et les quantités de déchets ou d'effluents destinés à l'épandage sont telles que leur manipulation et leur application ne portent pas atteinte, directe ou indirecte, à la santé de l'homme et des animaux, à la qualité et à l'état phytosanitaire des cultures, à la qualité des sols et des milieux aquatiques, et que les nuisances soient réduites au minimum.

Article 37

I. - Les périodes d'épandage et les quantités épandues sont adaptées de manière :

- à assurer l'apport des éléments utiles aux sols ou aux cultures sans excéder les besoins, compte tenu des apports de toute nature, y compris les engrais, les amendements et les supports de culture ;
- à empêcher la stagnation prolongée sur les sols, le ruissellement en dehors des parcelles d'épandage, une percolation rapide ;
- à empêcher l'accumulation dans le sol de substances susceptibles à long terme de dégrader sa structure ou de présenter un risque écotoxique ;
- à empêcher le colmatage du sol, notamment par les graisses.

II. - L'épandage est interdit :

- pendant les périodes où le sol est pris en masse par le gel ou abondamment enneigé, exception faite des déchets solides ;
- pendant les périodes de forte pluviosité et pendant les périodes où il existe un risque d'inondation;
- en dehors des terres régulièrement travaillées et des prairies ou des forêts exploitées ;
- sur les terrains à forte pente, dans des conditions qui entraîneraient leur ruissellement hors du champ d'épandage ;
- à l'aide de dispositifs d'aéro-aspersion qui produisent des brouillards fins lorsque les effluents sont susceptibles de contenir des microorganismes pathogènes ;

III. - Sous réserve des prescriptions fixées en application de l'article L. 20 du code de la santé publique, l'épandage de déchets ou d'effluents respecte les distances et délais minima prévus au tableau de l'annexe VII b.

IV. - Les déchets solides ou pâteux non stabilisés sont enfouis le plus tôt possible, dans un délai maximum de quarante-huit heures, pour réduire les nuisances olfactives et les pertes par volatilisation.

Des dérogations à l'obligation d'enfouissement peuvent toutefois être accordées pour des cultures en place à condition que celles-ci ne soient pas destinées à la consommation humaine directe.

Article 38

Tout épandage est subordonné à une étude préalable, comprise dans l'étude d'impact, montrant l'innocuité (dans les conditions d'emploi) et l'intérêt agronomique des effluents ou des déchets, l'aptitude du sol à les recevoir, le périmètre d'épandage et les modalités de sa réalisation.

Cette étude justifie la compatibilité de l'épandage avec les contraintes environnementales recensées ou les documents de planification existants et est conforme aux dispositions du présent arrêté et à celles qui résultent des autres réglementations en vigueur.

Cette étude préalable doit comprendre au minimum :

- La présentation des déchets ou effluents : origine, procédés de fabrication, quantités et caractéristiques ;
- La représentation cartographique au 1/25 000 du périmètre d'étude et des zones aptes à l'épandage ;
- La représentation cartographique, à une échelle appropriée, des parcelles aptes à l'épandage et de celles qui en sont exclues, en précisant les motifs d'exclusion ;
- La liste des parcelles retenues avec leur référence cadastrale ;
- L'identification des contraintes liées au milieu naturel ou aux activités humaines dans le périmètre d'étude et l'analyse des nuisances qui pourraient résulter de l'épandage ;
- La description des caractéristiques des sols, des systèmes de culture et des cultures envisagées dans le périmètre d'étude ;
- Une analyse des sols portant sur les paramètres mentionnés au tableau 2 de l'annexe VII a et sur l'ensemble des paramètres mentionnés en annexe VII c, réalisée en un point de référence, représentatif de chaque zone homogène ;
- La justification des doses d'apport et des fréquences d'épandage sur une même parcelle ;
- La description des modalités techniques de réalisation de l'épandage ;
- La description des modalités de surveillance des opérations d'épandage et de contrôle de la qualité des effluents ou déchets épandus ;
- La localisation, le volume et les caractéristiques des ouvrages d'entreposage.

L'étude préalable est complétée par l'accord écrit des exploitants agricoles des parcelles pour la mise en oeuvre de l'épandage dans les conditions envisagées.

Une filière alternative d'élimination ou de valorisation des déchets solides ou pâteux doit être prévue en cas d'impossibilité temporaire de se conformer aux dispositions du présent arrêté.

Le préfet peut faire appel à un organisme indépendant du producteur de déchets ou d'effluents et mettre en place un dispositif de suivi agronomique des épandages dans un objectif de préservation de la qualité des sols, des cultures et des produits.

Article 39

I.

1° Le pH des effluents ou des déchets est compris entre 6,5 et 8,5. Toutefois, des valeurs différentes peuvent être retenues sous réserve de conclusions favorables de l'étude préalable.

2° Les déchets ou effluents ne peuvent être épandus :

- si les teneurs en éléments-traces métalliques dans les sols dépassent l'une des valeurs limites figurant au tableau 2 de l'annexe VII a. Des dérogations aux valeurs du tableau 2 de l'annexe VII a peuvent toutefois être accordées par le préfet sur la base d'une étude géochimique des sols concernés démontrant que les éléments-traces métalliques des sols ne sont ni mobiles ni biodisponibles ;

- dès lors que l'une des teneurs en éléments ou composés indésirables contenus dans le déchet ou l'effluent excède les valeurs limites figurant aux tableaux 1 a ou 1 b de l'annexe VII a ;
- dès lors que le flux, cumulé sur une durée de dix ans, apporté par les déchets ou les effluents sur l'un de ces éléments ou composés excède les valeurs limites figurant aux tableaux 1 a ou 1 b de l'annexe VII a ;
- en outre, lorsque les déchets ou effluents sont épandus sur des pâturages, le flux maximum des éléments-traces métalliques à prendre en compte, cumulé sur une durée de dix ans, est celui du tableau 3 de l'annexe VII a.

3° Lorsque les déchets ou effluents contiennent des éléments ou substances indésirables autres que ceux listés à l'annexe VII a ou des agents pathogènes, le dossier d'étude préalable doit permettre d'apprécier l'innocuité du déchet dans les conditions d'emploi prévues.

L'arrêté d'autorisation fixe la concentration maximum et le flux maximum de l'élément, de la substance ou de l'agent pathogène considéré, apporté au sol.

4° Les déchets ou effluents ne doivent pas être épandus sur des sols dont le pH avant épandage est inférieur à 6, sauf lorsque les trois conditions suivantes sont simultanément remplies :

- le pH du sol est supérieur à 5 ;
- la nature des déchets ou effluents peut contribuer à remonter le pH du sol à une valeur supérieure ou égale à 6 ;
- le flux cumulé maximum des éléments apportés aux sols est inférieur aux valeurs du tableau 3 de l'annexe VII a.

II. La dose d'apport est déterminée en fonction :

- du type de culture et de l'objectif réaliste de rendement ;
- des besoins des cultures en éléments fertilisants disponibles majeurs, secondaires et oligo-éléments, tous apports confondus ;
- des teneurs en éléments fertilisants dans le sol et dans le déchet ou l'effluent et dans les autres apports ;
- des teneurs en éléments ou substances indésirables des déchets ou effluents à épandre ;
- de l'état hydrique du sol ;
- de la fréquence des apports sur une même année ou à l'échelle d'une succession de cultures sur plusieurs années.
- Pour l'azote, ces apports (exprimés en N global), toutes origines confondues, ne dépassent pas les valeurs suivantes :
 - sur prairies naturelles, ou sur prairies artificielles en place toute l'année et en pleine production : 350 kg/ha/an ;
 - sur les autres cultures (sauf légumineuses) : 200 kg/ha/an ;
 - sur les cultures de légumineuses : aucun apport azoté. L'épandage des effluents des installations agroalimentaires ne traitant que des matières d'origine végétale sur les cultures de luzerne peut cependant être autorisé par le préfet dans des conditions définies dans l'arrêté d'autorisation et dans les limites de 200 kg/ha/an d'azote global.

Pour les cultures autres que prairies et légumineuses, une dose d'apport supérieure à 200 kg/ha/an peut être tolérée si l'azote minéral présent dans le déchet est inférieur à 20 % de l'azote global, sous réserve:

- que la moyenne d'apport en azote global sur cinq ans, tous apports confondus, ne dépasse pas 200 kg/ha/an ;
- que les fournitures d'azote par la minéralisation de l'azote organique apporté et les autres apports ne dépassent pas 200 kg/ha/an ;
- de réaliser des mesures d'azote dans le sol exploitable par les racines aux périodes adaptées pour suivre le devenir de l'azote dans le sol et permettre un plan de fumure adapté pour les cultures suivantes ;
- de l'avis de l'hydrogéologue agréé en ce qui concerne les risques pour les eaux souterraines.

La dose finale retenue pour les déchets solides ou pâteux est au plus égale à 3 kilogrammes de matières sèches par mètre carré, sur une période de dix ans, hors apport de terre et de chaux.

Article 40

I. - Les ouvrages permanents d'entreposage de déchets ou d'effluents sont dimensionnés pour faire face aux périodes où l'épandage est soit impossible, soit interdit par l'étude préalable. Toutes dispositions sont prises pour que les dispositifs d'entreposage ne soient pas source de gêne ou de nuisances pour le voisinage et n'entraînent pas de pollution des eaux ou des sols par ruissellement ou infiltration. Le déversement dans le milieu naturel des trop-pleins des ouvrages d'entreposage est interdit. Les ouvrages d'entreposage à l'air libre sont interdits d'accès aux tiers non autorisés.

II. - Le dépôt temporaire de déchets, sur les parcelles d'épandage et sans travaux d'aménagement, n'est autorisé que lorsque les cinq conditions suivantes sont simultanément remplies :

- les déchets sont solides et peu fermentescibles, à défaut, la durée du dépôt est inférieure à quarante-huit heures ;
- toutes les précautions ont été prises pour éviter le ruissellement sur ou en dehors des parcelles d'épandage ou une percolation rapide vers les nappes superficielles ou souterraines ;
- le dépôt respecte les distances minimales d'isolement définies pour l'épandage par l'article 37 sauf pour la distance vis-à-vis des habitations ou locaux habités par des tiers qui est toujours égale à 100 mètres. En outre, une distance d'au moins 3 mètres vis-à-vis des routes et fossés doit être respectée ;
- le volume du dépôt est adapté à la fertilisation raisonnée des parcelles réceptrices pour la période d'épandage considérée ;
- la durée maximale ne doit pas dépasser un an et le retour sur un même emplacement ne peut intervenir avant un délai de trois ans.

Article 41

I. - Un programme prévisionnel annuel d'épandage doit être établi, en accord avec l'exploitant agricole, au plus tard un mois avant le début des opérations concernées. Ce programme comprend :

- la liste des parcelles ou groupes de parcelles concernées par la campagne, ainsi que la caractérisation des systèmes de culture (cultures implantées avant et après l'épandage, période d'interculture) sur ces parcelles ;
- une analyse des sols portant sur des paramètres mentionnés en annexe VII c (caractérisation de la valeur agronomique) choisis en fonction de l'étude préalable ;

- une caractérisation des déchets ou effluents à épandre (quantités prévisionnelles, rythme de production, valeur agronomique,...) ;
- les préconisations spécifiques d'utilisation des déchets ou effluents (calendrier et doses d'épandage par unité culturale...) ;
- l'identification des personnes morales ou physiques intervenant dans la réalisation de l'épandage.

Ce programme prévisionnel est tenu à la disposition de l'inspection des installations classées. L'arrêté préfectoral prévoit, le cas échéant, la transmission de ce programme au préfet avant le début de la campagne.

II.

1° Un cahier d'épandage, conservé pendant une durée de dix ans, mis à la disposition de l'inspection des installations classées, doit être tenu à jour. Il comporte les informations suivantes :

- les quantités d'effluents ou de déchets épandus par unité culturale ;
- les dates d'épandage ;
- les parcelles réceptrices et leur surface ;
- les cultures pratiquées ;
- le contexte météorologique lors de chaque épandage ;
- l'ensemble des résultats d'analyses pratiquées sur les sols et sur les déchets ou effluents, avec les dates de prélèvements et de mesures et leur localisation ;
- l'identification des personnes physiques ou morales chargées des opérations d'épandage et des analyses.

Le producteur de déchets ou d'effluents doit pouvoir justifier à tout moment de la localisation des déchets ou des effluents produits (entreposage, dépôt temporaire, transport ou épandage) en référence à leur période de production et aux analyses réalisées.

2° Un bilan est dressé annuellement. Ce document comprend :

- les parcelles réceptrices ;
- un bilan qualitatif et quantitatif des déchets ou effluents épandus ;
- l'exploitation du cahier d'épandage indiquant les quantités d'éléments fertilisants et d'éléments ou substances indésirables apportées sur chaque unité culturale et les résultats des analyses de sols ;
- les bilans de fumure réalisés sur des parcelles de référence représentatives de chaque type de sols et de systèmes de culture, ainsi que les conseils de fertilisation complémentaire qui en découlent ;
- la remise à jour éventuelle des données réunies lors de l'étude initiale.

Une copie du bilan est adressée au préfet et aux agriculteurs concernés.

3° Les effluents ou déchets sont analysés lors de la première année d'épandage ou lorsque des changements dans les procédés ou les traitements sont susceptibles de modifier leur qualité, en particulier leur teneur en éléments-traces métalliques et composés organiques.

Ces analyses portent sur :

- le taux de matière sèche ;
- les éléments de caractérisation de la valeur agronomique parmi ceux mentionnés en annexe VII c ;
- les éléments et substances chimiques susceptibles d'être présents dans les déchets ou effluents au vu de l'étude préalable ;
- les agents pathogènes susceptibles d'être présents.

En dehors de la première année d'épandage, les effluents ou déchets sont analysés périodiquement.

La nature et la périodicité des analyses sont fixées par l'arrêté d'autorisation.

Les méthodes d'échantillonnage et d'analyse des effluents ou des déchets sont conformes aux dispositions de l'annexe VII d.

Le volume des effluents épandus est mesuré soit par des compteurs horaires totalisateurs dont seront munies les pompes de refoulement, soit par mesure directe, soit par tout autre procédé équivalent.

4° Outre les analyses prévues au programme prévisionnel, les sols doivent être analysés sur chaque point de référence tel que défini à l'article 38, alinéa 7 :

- après l'ultime épandage, sur le ou les points de référence, en cas d'exclusion du périmètre d'épandage de la ou des parcelles sur lesquelles ils se situent ;
- au minimum tous les dix ans.

Ces analyses portent sur les éléments et substances figurant au tableau 2 de l'annexe VII a et sur tout autre élément ou substance visé par l'arrêté préfectoral d'autorisation.

Les méthodes d'échantillonnage et d'analyse des sols sont conformes aux dispositions de l'annexe VII d.

Article 42

L'arrêté d'autorisation définit les conditions dans lesquelles l'épandage doit être pratiqué. Il prévoit notamment l'établissement d'un contrat liant le producteur de déchets ou d'effluents au prestataire réalisant l'opération d'épandage et de contrats liant le producteur de déchets ou d'effluents aux agriculteurs exploitant les terrains. Ces contrats définissent les engagements de chacun ainsi que leurs durées. L'arrêté d'autorisation fixe également :

- les traitements éventuels effectués sur les déchets ou les effluents ;
- les teneurs maximales en éléments et substances indésirables et en agents pathogènes présents dans les effluents ou déchets ;
- les modes d'épandage ;
- la quantité maximale annuelle d'éléments et de substances indésirables et de matières fertilisantes épandue à l'hectare ;
- les interdictions d'épandage ;
- les prescriptions techniques applicables pour les dispositifs d'entreposage et les dépôts temporaires ;
- la nature des informations devant figurer au cahier d'épandage mentionné à l'article 41 ;

- la transmission au préfet du bilan annuel et, le cas échéant, du programme prévisionnel ;
- la fréquence des analyses sur les déchets ou effluents et leur nature, les modalités de surveillance et les conditions dans lesquelles elles sont transmises aux utilisateurs et à l'inspection des installations classées chargée du contrôle de ces opérations ;
- la fréquence et la nature des analyses de sols.

En tant que de besoin, l'arrêté prescrit le contrôle périodique de la qualité des eaux souterraines, à partir de points de prélèvement existants ou par aménagement de piézomètres, sur ou en dehors de la zone d'épandage selon le contexte hydrogéologique local.

Tableau 1a – teneurs limites en éléments-traces métalliques dans les déchets ou effluents

Éléments-traces métalliques	Valeur limite dans les déchets ou effluents (mg/kg MS)	Flux cumulé maximum apporté par les déchets ou effluents en 10 ans (g/m ²)
Cadmium	15	0.015
Chrome	1000	1.5
Cuivre	1000	1.5
Mercure	10	0.015
Nickel	200	0.3
Plomb	800	1.5
Zinc	3000	4.5
Chrome+cuivre+nickel+zinc	4000	6

Tableau 1b – Teneurs limites en composés traces-organiques dans les déchets ou effluents

Composés-Traces organiques	Valeur limite dans les déchets ou effluents (mg/kg MS)		Flux cumulé maximum apporté par les déchets ou effluent en 10 ans (mg/m ²)	
	Cas général	Epannage sur pâturage	Cas général	Epannage sur pâturage
Total des principaux PCB (*)	0.8	0.8	1.2	1.2
Fluoranthène	5	4	7.5	6
Benzo(b)fluoranthène	2.5	2.5	4	4
Benzo(a)pyrène	2	1.5	3	2

(*) PICS 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180.

Tableau 2 – Valeurs limites de concentration en éléments-traces métalliques dans les sols

Éléments-traces dans les sols	Valeur limite (mg/kg MS)
Cadmium	2
Chrome	150
Cuivre	100
Mercure	1
Nickel	50
Plomb	100
Zinc	300

Tableau 3 – Flux cumulé maximum en éléments-traces métalliques apporté par les déchets ou effluents pour les pâturages ou les sols de pH inférieur à 6

Éléments-traces métalliques	Flux cumulé maximum apporté par les déchets ou effluents en 10 ans (g/m ²)
Cadmium	0.015
Chrome	1.2
Cuivre	1.2
Mercure	0.012
Nickel	0.3
Plomb	0.9
Sélénium (*)	0.12
Zinc	3
Chrome+cuivre+nickel+zinc	4

(*) Pour le pâturage uniquement

Tableau 4 – Distances et délais minima de réalisation des épandages

Nature des activités à protéger	Distance minimale	Domaine d'application
Puits, forages, sources, aqueducs transitant des eaux destinées à la consommation humaine en écoulement libre, installations souterraines ou semi-enterrées utilisées pour le stockage des eaux, que ces dernières soient utilisées pour le stockage des eaux, que ces dernières soient utilisées pour l'alimentation en eau potable ou pour l'arrosage des cultures maraîchères	35 mètres	Pente du terrain inférieure à 7 %
	100 mètres	Pente du terrain supérieure à 7%
Cours d'eau et plans d'eau	Pente du terrain inférieure à 7%	
	5 mètres des berges	1. Déchets non fermentescibles enfouis immédiatement après épandage
		2.
	35 mètres des berges	3. Autres cas
	Pente du terrain supérieur à 7%	
	100 mètres des berges	1. Déchets solides et stabilisés
200 mètres des berges	2. Déchets non solides ou non stabilisés	
Lieux de baignade	200 mètres	
Sites d'aquaculture et zones conchylicoles	500 mètres	
Habitations ou locaux occupés par des tiers, zones de loisirs et établissements recevant du public	50 mètres	En cas de déchets ou d'effluents odorants
	100 mètres	
DELAI MINIMUM		
Herbages ou culture fourragères	Trois semaines avant la remise de l'herbe des animaux	En cas d'absence de risque lié à la présence d'agents pathogènes

	Six semaines avant la remise à l'herbe des animaux ou la récolte des cultures fourragères	Autres cas
Terrains affectés à des cultures maraîchères et fruitières à l'exception des cultures d'arbres fruitiers	Pas d'épandage pendant la période de végétation	
Terrains destinés ou affectés à des cultures maraîchères ou fruitières, en contact direct avec les sols, ou susceptibles d'être consommés à l'état cru	Dix mois avant la récolte et pendant la récolte elle-même	En cas d'absence de risque lié à la présence d'agents pathogènes
	Dix huit mois avant la récolte et pendant la récolte elle-même	Autre cas

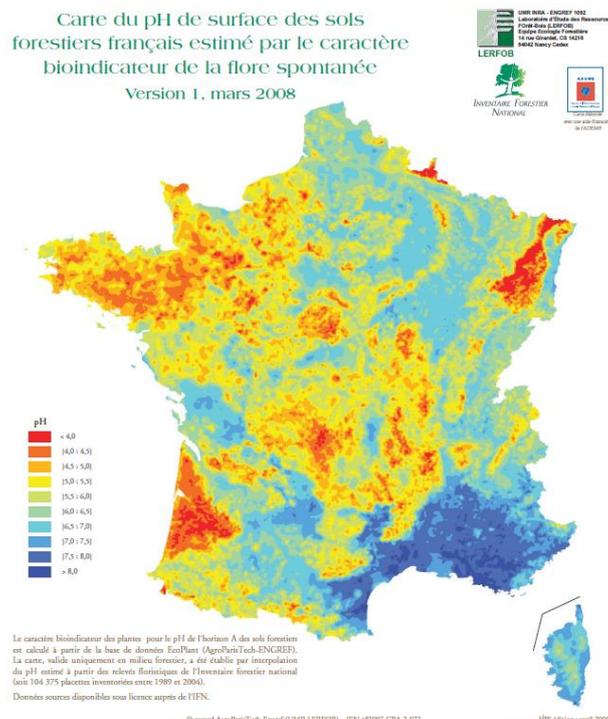
ANNEXE 3 – Extrait de l'étude SOLAGRO : Gestion et Valorisation des Cendres de Chaufferies Bois

Besoins des sols forestiers

Les sols forestiers sont généralement plus pauvres, plus acides et contiennent plus de matière organique que les sols agricoles. L'étude a identifié deux types de sol dont l'épandage des sols est justifié :

- Les sols acides et très acides

2/3 des sols forestiers français ont des pH inférieurs à 5.5 contre 12% des sols agricoles (cf. carte ci-dessous). Les plus fortes acidités (pH voisin de 4.5) sont observées dans les sols bruns acides et les podzols. Ces sols ont des textures grossières (sable dominant).



Les microorganismes sont peu actifs dans les sols acides, avec en plus une prépondérance des champignons sur les bactéries. Le cycle des éléments minéraux y est fortement perturbé.

Tableau : Quantité correctrice nécessaire pour augmenter le pH d'une unité sur trois types de terrain

	Quantité (t/ha)				
	CaO	Ca(OH) ₂	CaMg(CO ₃) ₂	CaCO ₃	Cendres
Terrain sablonneux	1-2	1.3-2.6	1.6-3.3	1.8-3.6	4-8
Terrain limoneux (10-20% d'argile)	2-3	2.6-3.9	3.3-4.9	3.6-5.4	8-12
Terrain argileux et humifère	3-5	3.9-6.6	4.9-8.2	5.4-9	12-20

(Source Biocen 2003-Italie)

L'apport de chaux, et de cendres par conséquent, a pour effet d'augmenter le pH et d'améliorer l'absorption des éléments minéraux (phosphore, potassium, molybdène) dans la plupart des sols forestiers acides et d'accélérer la minéralisation de certains humus peu actifs.

- Sols mal structurés

La structure d'un sol est le mode d'assemblage des éléments solides du sol (sables, limons, humus, argiles). **Une bonne structure se caractérise par la présence de mottes et d'agrégats qui permettent la circulation de l'eau et assurent une bonne aération aux racines, aux organismes et micro-organismes vivant dans le sol.** L'action de différents éléments, en rapport avec les mouvements de l'eau dans le sol (pluie, gel, tassement, travail du sol) peut dégrader cette structure.

Le deuxième critère appliqué à une bonne structure est la résistance à cette dégradation, ou stabilité structurale. Les sols forestiers, moins sujets aux phénomènes de battance que le sont les sols agricoles, de par leur plus **forte teneur en matières organiques**, peuvent cependant présenter des signes temporaires d'engorgement. C'est le cas des sols à gley ou pseudogleys et les sols limoneux du bassin parisien. Dans ce type de sol, les racines peu profondes et peu abondantes souffrent d'asphyxie en hiver et de manque d'eau en été.

En dehors de l'intérêt de la matière organique sur les propriétés physiques des sols forestiers, **le calcium a la faculté de flocculer le complexe argilo-humique** (fabrication d'agrégats) et ainsi de favoriser la circulation d'eau entre l'horizon de surface et les horizons inférieurs.

Les cendres de bois, riches en calcium, trouvent leur intérêt dans ce type de situation : stabilisation et amélioration de la structure.

Besoins des peuplements forestiers

D'une manière générale, sous nos latitudes, **les besoins en éléments nutritifs exogènes des arbres forestiers sont globalement faibles** dans la mesure où le recyclage des éléments minéraux est optimisé (couverture du sol, exploration de tous les horizons par les racines, restitution des éléments minéraux lessivés par le feuillage). Si on tient compte des pertes par lessivage ou par immobilisation, et si on tient compte des apports par minéralisation, les besoins globaux suivant le type de peuplement varient dans les fourchettes suivantes :

azote : 10 à 30 kg/ha/an ;

phosphore : 0,8 à 2,1 kg/ha/an ;

potassium 5 à 15 kg/ha/an ;
calcium : 5 à 22 kg/ha/an ;
 magnésium : 2 à 4,5 kg/ha/an.

Cela dit, 3 types de perturbations peuvent modifier la fertilité d'une station forestière et donc les besoins en éléments fertilisants :

- * **Récolte du peuplement** (coupe rase, éclaircies) : ouverture du milieu (entrée d'oxygène), accélération du cycle des nutriments, de la minéralisation de la matière organique et augmentation du risque de lessivage.
- * **Exportations des rémanents** (écorces, feuilles, aiguilles, branches) : exportation d'éléments hors du système sol-arbres-végétations d'accompagnement.
- * Les apports d'**azote atmosphérique et l'acidification des sols**.

Raisonnement des apports et doses sans exportation des rémanents

Si on n'exporte pas les rémanents, seules les stations forestières peu fertiles nécessitent une fertilisation.

La grande diversité des situations sylvicoles (essences, âge du peuplement, teneur foliaire en éléments minéraux, type de sols, stocks, ...) implique que la fertilisation des peuplements forestiers doit être regardée **au cas par cas** et concerne les essences pour lesquelles on dispose de suffisamment de références indiquant l'intérêt d'une telle pratique.

On peut cependant noter que :

- Le phosphore est le principal élément qui limite la croissance des arbres forestiers.
- Les apports en **potassium** s'adressent plus aux espèces feuillues qu'aux espèces résineuses (Cf. tableau ci-dessous).
- Les **jeunes arbres** sont plus exigeants que les peuplements adultes.
- Sur le plan nutritionnel, les peuplements n'ont pas de besoin particulier en **calcium**, sauf à renouveler les stocks et à remédier aux situations décrites dans les paragraphes précédents.

Tableau : Impact des apports de calcium et de potasse sur différentes espèces forestières. = sans effet, + léger effet, ++ effet positif, +++ effet très positif (Source : Bonneau 1995, Baule/Fricker 1969, AFOCEL)

Réponse à une fertilisation	Résineux					Feuillus			
	Pins	Sapins	Epicéas	Douglas	Mélèzes	Chênes	Hêtres/charmes	Eucalyptus	Peupliers
CaO	+	=	+	+	=	=	++	=	+
K ₂ O	++	+	++	++	++	++	+++	++	+++

Le tableau suivant résume les types d'engrais et les doses qui sont préconisées en matière de fertilisation forestière (Bonneau 1996).

Élément	Dose kg/ha	Sol calcaire	Sol mésotrophe (pH > 5,5)	Sols acides	Equivalence cendres (t/ha)
Fertilisation en plein sur peuplement adulte ou plantation à couvert fermé					
N	200	Ammonitrate	Sulfate d'ammonium	Ammonitrate /urée	-
P2O5	100 - 200	Super triple	Phosphate d'ammonium	Scories	3 à 7
K2O	80 - 150	Chlorure de potassium	Patentkali Sulfate de potassium	Chlorure de sulfate	1 à 2
CaO	850 - 1400	-	-	Calcaire broyé Mélange calcaire et chaux	3 à 5
MgO	100 - 150	Sulfate	Patentkali	Calcaire magnésien, mélange de calcaire magnésien et chaux magnésienne	2 à 3
Fertilisation en plein avant plantation avec enfouissement					
N	60 - 200	Sulfate	Sulfate d'ammonium	Ammonitrate Phosphate d'ammonium	-
P2O5	60 - 200	Superphosphate	Superphosphate triple	Scories Phosphore naturel	2 à 7
K2O	80 - 150	Sulfate de potassium	Patentkali Chlorure de potassium	Chlorure de sulfate Patentkali	1 à 2
CaO	1000 - 1500	-	-	Chaux éteinte Calcaire broyé Mélange calcaire et chaux	3 à 5
MgO	70 - 100	Sulfate	Patentkali	Calcaire magnésien, mélange de calcaire magnésien et chaux magnésienne	1 à 2

Raisonnement des apports et doses avec exportation des rémanents

La récolte des houppiers conduit à des exportations plus fortes par rapport à l'exploitation des troncs seuls allant jusqu'à trois fois plus de pertes lors d'une exploitation par arbres entiers. Les bilans entrées-sorties indiquent en général que le **calcium** est l'élément le plus susceptible d'être en déficit lors d'une intensification de la récolte. **L'exploitation par arbres entiers peut donc provoquer l'acidification des sols.**

Si on récolte des rémanents, le guide pratique (AFOCEL-ADEME-INRA-IDF-UCFF-2005) préconise une fertilisation variable en fonction de la richesse de la station et du type de peuplement. Le tableau ci-après résume ces préconisations.

Tableau : Fertilisation recommandée (données en kg/ha)

Type peuplement	Sylviculture recommandée		N	P2O5	K2O	CaO	MgO	
Sol riche, peu sensible à la récolte des rémanents, à risque faible								
Résineux		Récolte des rémanents 2 fois maximum dans la vie du peuplement	-	-	-	-	-	
Feuille	Taillis et sous futaie	Au moins 15-20 ans entre 2 récoltes des rémanents	-	-	-	-	-	
	Futaie	Pas de restriction	-	-	-	-	-	
	Peupleraie	Pas de restriction (sauf TCR : Cf. raisonnement agricole)	-	-	-	-	-	
Sol moyennement riche, sensible à la récolte des rémanents, à risques moyens								
Résineux	Epicéa commun	Récolte des rémanents 2 fois maximum dans la vie du peuplement	-	-	-	-	-	
		Si récolte supplémentaire	50	80	80	90	5	
	Autres résineux	Récolte des rémanents 1 fois maximum dans la vie du peuplement	-	-	-	-	-	
		Si récolte supplémentaire	Douglas	70	60	80	130	20
		Autres	50	20	80	90	5	
Feuille	Taillis	Si moins de 30 ans entre 2 récoltes	70	10	40	270	50	
		Si enrichissement feuillu après coupe	Fertilisation par plant (g/plant)	5	30	20	50	5
		Si enrésinement	Fertilisation à la plantation	-	35	25	700	100
	Taillis sous futaie	Si maintien du régime TSF et temps entre 2 récoltes < 30 ans, fertiliser comme pour le taillis		-	-	-	-	-
		Si conversion en futaie, 1 seule récolte de rémanents	Si récolte supplémentaire	40	10	20	50	10
	Futaie	1 seule récolte de rémanents	Si récolte supplémentaire	40	10	20	50	10
Sol pauvre, très sensible à la récolte des rémanents, à risques forts								
Résineux	Tous types	Fertiliser après récolte des rémanents	Douglas	120	90	130	200	30
			Epicéa commun	70	20	120	120	10
			Autres	70	20	120	120	10
Feuille	Taillis	Entre 2 récoltes		110	10	60	410	80
		Si enrichissement feuillu après coupe	Fertilisation par plant (g/plant)	5	40	30	70	10
		Si enrésinement, fertilisation à la plantation		-	50	35	700	100
	Taillis sous futaie	Si maintien du régime TSF		110	10	60	410	80
		Si conversion en futaie	Fertilisation après récolte des rémanents	70	10	30	80	10
	Futaie	Fertilisation après récolte des rémanents		70	10	30	80	10

Tableau : Synthèse des besoins en éléments fertilisants dans le cadre d'une exploitation des rémanents et évaluation des besoins en cendres

Besoin en élément fertilisant (kg/ha)	Equivalence cendres (t/ha)
N 40 à 120	-
P2O5 10 à 80	0,3 à 3
K2O 20 à 130	0,3 à 2
CaO 50 à 700	0,5 à 2
MgO 5 à 100	0,1 à 2

Les besoins d'éléments fertilisants exogènes en forêt sont limités. Ils ne sont envisagés que dans le cas de stations forestières pauvres et/ou dans le cas d'une sylviculture particulière (exploitation des

rémanents, coupe rase, ligniculture). Dans tous les cas, ces besoins identifiés correspondent à des apports de cendres compris entre **0,1 et 7 tonnes par hectare**.

Synthèse

Si l'on raisonne sur les deux composants majoritaires des cendres (CaO et K₂O), les besoins des sols et les besoins des peuplements varient dans la plupart des situations entre 0,3 et 8 tonnes par hectare et cela de 1 à 3 fois sur la vie du peuplement (plantation, éclaircies avec ou sans récoltes des rémanents).

L'étude SOLAGRO montre que les situations nécessitant un apport exogène sont liés à deux facteurs : l'acidité de la station (et sa fertilité) et l'exportation des nutriments.

Temps globaux pour le chantier d'épandage							
N°	Opération	Matériel(s) utilisé(s)		Commentaires		Durée (h)	
1	Chargement de la benne			à la chaufferie		0,33	
2	pesée					0,33	
3	transport chaufferie - stockage (propriété)	benne + camion		70 km		1,5	
4	déchargement					0,16	
5	transport	Camion + benne		70 km		1,5	
2	reprise des cendres/chargement épandeur	Manitou		5 tonnes		0,16	
3	Transport des cendres	Tracteur		Distance stockage - parcelle : 2km		0,33	
4	Epandage	Tracteur + épandeur		100 m d'épandage		0,03	
6	...						
7							
Quantité de cendres épandues		0,5	tonnes	Linéaire de peuplement			
				100	m		
						Total	4,34

Détails du bilan économique sur la base des facture prestataire						
N°	Opération	Quantité	Unité	Prix	Dépense	Recette
1	Déplacement benne chaufferie - propriété	70	km	440	0	
2	Déplacement des cendres sur chantier	2	km	1	0	
3	Prix de la cendre	11	tonne	0	0	
4	Chargement cendre dans épandeur	0,16	h	55	0	
5	Epandage - coût épandeur	2	hectare	60 €	0	
6	coût de la personne conduisant l'épandeur					
7	suivi coopérative					
TOTAL					0	

Synthèse de l'opération d'épandage						
Rendement moyen	9	tonne/h	Prix revient plantation	€/MWh	Taux d'activité chantier	%
Qualité de l'épandage	<input checked="" type="checkbox"/> A reprendre...	<input type="checkbox"/> Médiocre	<input type="checkbox"/> Acceptable	<input checked="" type="checkbox"/> Bonne		
	Chantier stoppé à cause du sol et parce que l'épandeur roulait sur les peuplements. Distance entre 2 lignes trop faible					
Comportement du matériel lors de l'épandage	<input checked="" type="checkbox"/> Inadaptée	<input type="checkbox"/> Acceptable	<input checked="" type="checkbox"/> Bonne			

Chantier D – Peupleraie (Coopérative : Forest et Bois de l'Est)

Cendre ADEME UCFF

SUIVI DU CHANTIER d'EPANDAGE de CENDRE

Date	ene-14	Rédacteur	Caroline Vivancos	Organisme	UCFF
------	--------	-----------	-------------------	-----------	------

Identification du chantier

Surface	3	ha	Référence interne	
Commune	Saulsotte		Département	Aube

CARACTERISTIQUES DU CHANTIER

Description simplifiée de la parcelle

Surface totale	3	ha							
Surface objet de l'essai	3	ha							
Distance de la première piste	0	m							
Distance de la première route	5	m							
Possibilités de stockage	<input checked="" type="checkbox"/> Sur parcelle <input type="checkbox"/> Sur place de dépôt (distance à préciser) <input type="checkbox"/> Autre (préciser)								
Autres informations	Le stockage a été réalisé au sein de la propriété du propriétaire								

Description simplifiée de la station

Position topographique	<input checked="" type="checkbox"/> Haut de versant	<input type="checkbox"/> Milieu de versant	<input type="checkbox"/> Bas de versant	<input type="checkbox"/> Dépression	<input type="checkbox"/> Replat
		<input type="checkbox"/> Vallon	<input type="checkbox"/> Groupe		
Pente	<input checked="" type="checkbox"/> Aucune	<input type="checkbox"/> Légère (1 à 5 %)	<input type="checkbox"/> Faible (5 à 9 %)	<input type="checkbox"/> Moyenne (10 à 14 %)	<input type="checkbox"/> Forte (+ 15 %)
pH	<input type="checkbox"/> < 5	<input checked="" type="checkbox"/> 5 < <6	<input type="checkbox"/> autre préciser		
Analyse chimique → besoin en...	<input checked="" type="checkbox"/> amendement	<input type="checkbox"/> fertilisant	<input type="checkbox"/> autre préciser		
Station, portance, difficulté progression, ...	Pas de difficulté, bonne portance				
Texture de surface dominante	Terre				
Facteurs limitants					
Autres informations					

Description simplifiée du peuplement

Type de peuplement	<input type="checkbox"/> futaie régulière <input type="checkbox"/> futaie irrégulière <input type="checkbox"/> TSF <input type="checkbox"/> Taillis simple <input checked="" type="checkbox"/> Peupleraie <input type="checkbox"/> Autre (préciser)							
Origine	<input checked="" type="checkbox"/> Plantation <input type="checkbox"/> Régénération							
Essence	Peuplier				Variété/clone			
Interligne	8	m	Interplants	8	m	Densité actuelle	160-170	N/ha
Age	8 à 10	ans	Hauteur totale moyenne	10 à 15	m	Ø moyen à 1,30	15	cm
Surface terrière		m ² /ha	Volume biologique moyen		m ³ /ha	Ø moyen à la souche	20	cm
Autres informations (problème sanitaire, ...)								

Type de cendre épandue

Type de cendres	<input checked="" type="checkbox"/> Pulvérulentes (sèche) <input type="checkbox"/> Granulés <input type="checkbox"/> Humides <input type="checkbox"/> Liquides			
Autres éléments	<input type="checkbox"/> Machefer <input type="checkbox"/> Autres éléments indurés			
Quantité épandue (tonnes)	6			
Surface d'épandage (ha)	3			
Dose (t/ha)	2			
Distance d'épandage (km)	4			

Matériel d'épandage

Type de matériel	<input type="checkbox"/> Porteur avec épandeur <input checked="" type="checkbox"/> Tracteur + épandeur <input type="checkbox"/> Quad + épandeur <input type="checkbox"/> Autre préciser :			
Préciser le modèle (marque, puissance, ...)	Tracteur John Deer Epandeur à assiettes à hérissons verticaux			
Prix d'achat du matériel	90 000 euros			
Age du matériel	Tracteur : 5ans			
Capacité de chargement	épandeur 10 t			
Utilisation annuelle totale				

Temps globaux pour le chantier d'épandage						
N°	Opération	Matériel(s) utilisé(s)		Commentaires		Durée (h)
1	Chargement de la benne			à la chaufferie		0,33
2	pesée					0,33
3	transport chaufferie - stockage (propriété)	benne + camion		70 km		1,5
4	déchargement					0,16
5	transport	Camion + benne		70 km		1,5
2	reprise des cendres/chargement épandeur	Manitou		5 tonnes		0,16
3	Transport des cendres	Tracteur		Distance stockage - parcelle : 2km		0,33
4	Epandage	Tracteur + épandeur		4 km d'épandage		0,66
6	...					
7						
Quantité de cendres épandues		6	tonnes	Linéaire de peuplement	4000 m	Total 4,97

Détails du bilan économique sur la base des facture prestataire						
N°	Opération	Quantité	Unité	Prix	Dépense	Recette
1	Déplacement benne chaufferie - propriété	70	km	440	220	
2	Déplacement des cendres sur chantier	2	km	1	1	
3	Prix de la cendre	11	tonne	0	0	
4	Chargement cendre dans épandeur	0,16	h	55	8,8	
5	Epandage - coût épandeur	0,66	heure	60	39,6	
6	coût de la personne conduisant l'épandeur					
7	suiti coopérative					
TOTAL					269,4	

Synthèse de l'opération d'épandage						
Rendement moyen	9	tonne/h	Prix revient plantation	€/MWh	Taux d'activité chantier	%
Qualité de l'épandage	<input type="checkbox"/> A reprendre... <input type="checkbox"/> Médiocre <input type="checkbox"/> Acceptable <input checked="" type="checkbox"/> Bonne		Commentaires			
Comportement du matériel lors de l'épandage	<input type="checkbox"/> Inadaptée <input type="checkbox"/> Acceptable <input checked="" type="checkbox"/> Bonne		Commentaires			

Chantier E – Terrain nu (Coopérative : Forest et Bois de l'Est)

Cendre ADEME UCFF

SUIVI DU CHANTIER d'EPANDAGE de CENDRE

Date	2014	Rédacteur	Caroline Vivancos	Organisme	UCFF
------	------	-----------	-------------------	-----------	------

Identification du chantier

Surface	3	ha	Référence interne	
Commune	Poit Saint Nicolas		Département	Aube

CARACTERISTIQUES DU CHANTIER

Description simplifiée de la parcelle

Surface totale	1 ha
Surface objet de l'essai	1 ha
Distance de la première piste	0 m
Distance de la première route	500 m
Possibilités de stockage	<input checked="" type="checkbox"/> Sur parcelle <input type="checkbox"/> Sur place de dépôt (distance à préciser) <input type="checkbox"/> Autre (préciser)
Autres informations	Le stockage a été réalisé au sein de la propriété du propriétaire

Description simplifiée de la station

Position topographique	<input type="checkbox"/> Haut de versant <input type="checkbox"/> Milieu de versant <input type="checkbox"/> Bas de versant <input type="checkbox"/> Dépression <input type="checkbox"/> Replat
	<input checked="" type="checkbox"/> Plateau <input type="checkbox"/> Vallon <input type="checkbox"/> Groupe <input type="checkbox"/> Vallée
Pente	<input checked="" type="checkbox"/> Aucune <input type="checkbox"/> Légère (1 à 5 %) <input type="checkbox"/> Faible (5 à 9 %) <input type="checkbox"/> Moyenne (10 à 14 %) <input type="checkbox"/> Forte (+ 15 %)
pH	<input type="checkbox"/> < 5 <input checked="" type="checkbox"/> 5 < < 6 <input type="checkbox"/> autre préciser
Analyse chimique → besoin en...	<input checked="" type="checkbox"/> amendement <input type="checkbox"/> fertilisant <input type="checkbox"/> autre préciser
Station, portance, difficulté progression, ...	Difficulté car le terrain a été travaillé (cover crop)
Texture de surface dominante	Terre
Facteurs limitants	
Autres informations	

Description simplifiée du peuplement

Type de peuplement	<input type="checkbox"/> futaie régulière <input type="checkbox"/> futaie irrégulière <input type="checkbox"/> TSF <input type="checkbox"/> Taillis simple <input type="checkbox"/> Peupleraie <input type="checkbox"/> Autre (préciser)				
Origine	<input type="checkbox"/> Plantation <input type="checkbox"/> Régénération				
Essence	Peuplier				Variété/clone
Interligne	0 m	Interplants	m	Densité actuelle	N/ha
Age	ans	Hauteur totale moyenne	m	Ø moyen à 1,30	cm
Surface terrière	m ² /ha	Volume biologique moyen	m ³ /ha	Ø moyen à la souche	cm
Autres informations (problème sanitaire, ...)	jeune peuplement				

Type de cendre épandue

Type de cendres	<input checked="" type="checkbox"/> Pulvérulentes (sèche) <input type="checkbox"/> Granulés <input type="checkbox"/> Humides <input type="checkbox"/> Liquides
Autres éléments	<input type="checkbox"/> Machefer <input type="checkbox"/> Autres éléments indurés
Quantité épandue (tonnes)	5
Surface d'épandage (ha)	1
Dose (t/ha)	5t/ha
Distance d'épandage (km)	14

Matériel d'épandage

Type de matériel	<input type="checkbox"/> Porteur avec épandeur <input checked="" type="checkbox"/> Tracteur + épandeur <input type="checkbox"/> Quad + épandeur <input type="checkbox"/> Autre préciser :
Préciser le modèle (marque, puissance, ...)	Tracteur John Deer Epandeur à assiettes à hérissons verticaux
Prix d'achat du matériel	90 000 euros
Age du matériel	Tracteur : 5ans
Capacité de chargement	épandeur 10 t
Utilisation annuelle totale	

Temps globaux pour le chantier d'épandage								
N°	Opération	Matériel(s) utilisé(s)		Commentaires		Durée (h)		
1	Chargement de la benne			à la chaufferie		0,33		
2	pesée					0,33		
3	transport chaufferie - stockage (propriété)	benne + camion		70 km		1,5		
4	déchargement					0,16		
5	transport	Camion + benne		70 km		1,5		
2	reprise des cendres/chargement épandeur	Manitou		5 tonnes		0,16		
3	Transport des cendres	Tracteur		Distance stockage - parcelle : 2km		0,33		
4	Epandage	Tracteur + épandeur		épandage pur		0,41		
6	...							
7								
Quantité de cendres épandues		5	tonnes	Linéaire de peuplement	14000	m	Total	4,72

Détails du bilan économique sur la base des facture prestataire						
N°	Opération	Quantité	Unité	Prix	Dépense	Recette
1	Déplacement benne chaufferie - propriété	70	km	440	440	
2	Déplacement des cendres sur chantier	2	km	1	1	
3	Prix de la cendre	11	tonne	0	0	
4	Chargement cendre dans épandeur	0,16	h	55	8,8	
5	Epandage - coût épandeur	0,41	heure	60	24,6	
6	coût de la personne conduisant l'épandeur					
7	suivi coopérative					
TOTAL					474,4	

Synthèse de l'opération d'épandage							
Rendement moyen	12	tonne/h	Prix revient plantation	€/MWh	Taux d'activité chantier	%	
Qualité de l'épandage	<input type="checkbox"/> A reprendre...	<input type="checkbox"/> Médiocre	<input checked="" type="checkbox"/> Acceptable	<input type="checkbox"/> Bonne			
Comportement du matériel lors de l'épandage	<input type="checkbox"/> Inadaptée	<input checked="" type="checkbox"/> Acceptable	<input type="checkbox"/> Bonne				
	matériel bloqué à cause de présence de triques et de pierre dans l'épandeur. Ces éléments proviennent du stockage des cendres, à la propriété du prêteur de te						

Chantier F – Plantation de douglas (Coopérative : Unisylva)

Cendre ADEME UCFF

logo

SUIVI DU CHANTIER d'EPANDAGE de CENDRE

Date: feb-14 Rédacteur: cïterme Organisme: UNISYLVA

Identification du chantier

Surface: 7 ha Référence interne: 2014/PCI/12
Commune: SAINT PONCY Département: CANTAL

CARACTERISTIQUES DU CHANTIER

Description simplifiée de la parcelle

Surface totale: 16 ha
Surface objet de l'essai: 7 ha
Distance de la première piste: 0 m
Distance de la première route: 500 m
Possibilités de stockage: Sur parcelle Sur place de dépôt (distance à préciser) Autre (préciser)
Autres informations: 500M

Description simplifiée de la station

Position topographique: Haut de versant Milieu de versant Bas de versant Dépression Replat
 Plateau Vallon Croupe Vallée
Pente: Aucune Légère (1 à 5 %) Faible (5 à 9 %) Moyenne (10 à 14 %) Forte (+ 15 %)
pH: < 5 5 < <6 autre préciser
Analyse chimique → besoin en...: amendement fertilisant autre préciser
Station, portance, difficulté progression,...: Potance faible due à l'abondance de précipitations, difficultés à tourner en bout de tigne
Texture de surface dominante: limoneuse
Facteurs limitants:
Autres informations:

Description simplifiée du peuplement

Type de peuplement: futaie régulière futaie irrégulière TSF Taillis simple Peupleraie Autre (préciser)
Origine: Plantation Régénération
Essence: douglas Variété/clone: luzette
Interligne: 4 m Interplants: 3 m Densité actuelle: 800 N/ha
Age: 1 ans Hauteur totale moyenne: 1 m Ø moyen à 1,30 cm
Surface terrière: m²/ha Volume biologique moyen: m³/ha Ø moyen à la souche: cm
Autres informations (problème sanitaire, ...): tous les plants sont protégés par deux tuteurs bois

Type de cendre épanchée

Type de cendres: Pulvérulentes (sèche) Granulés Humides Liquides
Autres éléments: Machefer Autres éléments indurés
Quantité épanchée (tonnes): 8
Surface d'épandage (ha): 2,5
Dose (t/ha): 3
Distance d'épandage* (km): 0,5

* distance entre le tas de cendres et le lieu d'épandage

Matériel d'épandage

Type de matériel: Porteur avec épandeur Tracteur + épandeur Quad + épandeur Autre préciser:
Préciser le modèle (marque, puissance, ...):
Prix d'achat du matériel:
Age du matériel:
Capacité de chargement: 16m³
Utilisation annuelle totale: heure totale/an + heure épandage/an

Temps globaux pour le chantier d'épandage						
N°	Période (mois/an)	Opération	Matériel(s) utilisé(s)		Commentaires	Durée (h)
1		récupération des cendres en chaufferie	berne		facturé à la chaufferie	1
2		transport cendre BdR	polyberne			4
3		reprise des cendres/chargement épandeur	meilot			0,5
4		transport cendre sur site	épandeur			0,5
6		...				
7						
Quantité de cendres épandues		8	tonnes	Linéaire de peuplement	800 m	Total

Bilan quantitatif global du chantier d'épandage						
		Quantité	Unité	Prix unitaire	Prix total	Observation
Déplacement vers chantier						
1	Matériel	18	km	1,5 euros HT	27	
2	Cendre	23	km	0,5 euros HT	11,5	
3	Hommes	8	heure	35 euros HT	280	
Travail productif sur chantier						
4	Matériel	2	heure	45 euros HT	90	
5	Hommes	2	heure	35 euros HT	70	
Travail improductif sur chantier						
6	Maintenance		heure	35 euros HT		
7	Pannes(embourbé+crevaisson)	8	heure	-		
Quantité totale de cendres épandues		8	tonnes	Total	478,5	

Détails du bilan économique sur la base des facture prestataire						
N°	Opération	Quantité	Unité	Prix	Dépense	Recette
1	Déplacement du matériel sur chantier (coût de transport épandeur)	18	km			
2	Déplacement des cendres sur chantier (coût de transport)	21	km	20	420	
3	Prix de la cendre	21	tonne	0	0	
4	Chargement cendre dans épandeur (Bobcat)		h			
5	Epandage		hectare			
6						
7						
				TOTAL		