

Recyclage agricole des cendres de bois au Québec - État de la situation, impacts et bonnes pratiques agro-environnementales

*M. HÉBERT¹ ET B. BRETON

RÉSUMÉ - M. Hébert et B. Breton. Recyclage agricole des cendres de bois au Québec - État de la situation, impacts et bonnes pratiques agro-environnementales. *Agrosolutions* 19 (2) : 18-33. L'utilisation des cendres de bois pour le chaulage et la fertilisation des sols, autrefois pratique courante, a été délaissée au début du 20^e siècle suite à l'arrivée de produits alternatifs (chaux agricole, muriate de potassium). Avec l'augmentation de la valorisation énergétique des résidus provenant de l'industrie du bois, la ressource redevient largement disponible au Québec. On évalue la quantité annuelle générée au Québec à plus de 300 000 tm (base humide). Près de la moitié a été recyclée comme matière fertilisante en 2007, dont 80 000 tonnes pour un usage agricole sur 250 fermes. La littérature établit clairement que les cendres permettent de corriger l'acidité du sol et fournissent des éléments nutritifs aux plantes. Elles produisent d'ailleurs des rendements généralement supérieurs à l'usage de la chaux agricole naturelle. On estime leur valeur entre 20 et 65 \$/tm (bh) pour des cendres moyennes, selon la méthode de calcul utilisée. L'usage de cendres permettrait aussi de diminuer les émissions de gaz à effet de serre en agriculture, ce qui pourrait éventuellement donner droit à des crédits. Cependant, la qualité des cendres est variable d'une usine à l'autre, selon le type de bois brûlé, le mode de combustion et l'ajout d'eau. De plus, leur alcalinité, leur contenu en potassium et leur texture fine et pulvérulente commandent des précautions particulières aux plans agronomique et environnemental. Une réglementation gouvernementale et des normes commerciales (BNQ) encadrent l'utilisation de ce produit qui requiert cependant l'emploi de bonnes pratiques agronomiques. L'ensemble de ces mesures permet une utilisation sécuritaire et économique des cendres de bois en agriculture et ce de façon compatible avec les principes du développement durable.

Mots clés : *bonnes pratiques, cendres, chaulage, réglementation, rendements.*

ABSTRACT- M. Hébert and B. Breton. Wood ash recycling on agricultural land in Quebec - Current situation, impacts and agricultural practices. *Agrosolutions* 19 (2): 18-33. The use of wood ash to improve soil pH and increase soil fertility, formerly a common practice, was largely abandoned in the early 20th century when alternative products arrived on the market (agricultural lime, muriate of potash). Burning large quantities of wood industry residues for energy purpose, contributed to increase availability of wood ash in Québec. More than 300 000 tm (wet weight) are produced yearly in the province and approximately half of this amount was recycled as soil amendment in 2007; more than 80 000 tm were applied for agricultural purposes on 250 farms. Literature clearly shows that using ash is efficient for correction of soil acidity and contributes to bring nutrients to crops. Ash applications to soil also generally allow increase in crop yields compared to agricultural limestone. Its economic value has been estimated between 20 and 65 \$/tm for normal ash. Its agricultural use could also reduce greenhouse gases emission, which may lead to credits of carbon. However, ash quality varies, mainly because of wood type, burning conditions and water addition. In addition, alkalinity, potassium and dust contents require both environmental and agronomic precautions. Government regulations and commercial standards (BNQ), govern their use. However, this underlying framework must be complemented with the use of best agronomic practices. Both regulations and appropriate practices allow safe and economical use of ash in agriculture, in accordance with sustainable development.

Key words: *Ash, best practices, liming, regulation, yields.*

1. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. Direction des politiques en milieu terrestre. Service agricole. Édifice Marie-Guyart, 9^e étage, 675, boul. René Lévesque Est, boîte 71. Québec (Québec)

*Auteur pour la correspondance : téléphone : (418) 521-3950, poste 4826, télécopieur : (418) 644-8562, courriel : marc.hebert@mddep.gouv.qc.ca

Historique du recyclage des cendres de bois

Des documents produits en Nouvelle-France, et datés de la deuxième moitié du 17^e siècle, relatent des activités commerciales concernant la cendre de bois (Gardiner (1949), cité par Scott (1968)). On brûlait alors le bois spécifiquement pour en récolter la cendre de laquelle on extrayait ensuite la potasse (hydroxyde de potassium ou KOH) par lessivage. L'origine du mot potasse (pot-ash) est d'ailleurs associée au mot cendre en néerlandais et en anglais (ash). Vers la fin du 18^e siècle, le Bas-Canada contribuait largement à faire de la colonie britannique francophone le plus grand exportateur mondial de potasse. Durant toute cette époque, le chauffage au bois était aussi très répandu et les colons et cultivateurs avaient ainsi accès à une certaine quantité de cendres de bois pour fertiliser et amender leurs potagers et leurs champs.

L'usage agricole de la cendre de bois est demeuré populaire au Québec jusque dans les années 1930 lorsqu'on a commencé à exploiter des dépôts de sels potassiques aux États-Unis (Scott, 1968). À la même époque, la pierre à chaux agricole devenait disponible à un prix très compétitif dans la province de Québec (ministère de l'Agriculture, 1932). Ainsi, à l'aube de l'industrialisation de l'agriculture au Québec, l'exploitation des gisements de calcaire et de muriate de potassium a sonné le glas à l'usage traditionnel des cendres de bois en agriculture.

Dans les décennies qui suivirent, l'industrie du bois allait cependant générer de plus en plus de cendres. En l'absence d'un marché, les cendres ont alors été gérées comme des déchets, de manière plus ou moins appropriée, jusqu'à l'apparition des réglementations sur les papetières, dans les années 1980 et 1990. Ces resserrements réglementaires augmentèrent les coûts d'enfouissement des cendres. Parallèlement, le MAPAQ avait déjà cessé de subventionner l'utilisation de la chaux en agriculture depuis plusieurs années. Ces deux phénomènes et les études agronomiques réalisées en Nouvelle-Angleterre, puis au Québec, ont contribué au regain d'intérêt pour l'épandage des cendres au Québec depuis une quinzaine d'années.

Cette valorisation des cendres peut être considérée comme une activité de recyclage, car il s'agit d'une réutilisation d'éléments fertilisants provenant des végétaux forestiers (arbres) dans un autre cycle de production végétale (agricole). Cependant, afin de s'assurer que ce recyclage se fasse de façon sécuritaire, le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs a élaboré dans les années 1990 des critères et des normes d'utilisation (MENV, 1997) qu'il a révisés par la suite (MDDEP, 2008). Le Bureau de normalisation du Québec a également produit une norme commerciale pour définir les exigences de qualité des cendres certifiées et leur mode d'emploi (BNQ 1997, 2005, 2006). Cependant, il n'existe pas de document de référence au Québec qui fasse le point sur les résultats de recherche et les bonnes pratiques agronomiques de la valorisation agricole des cendres de bois. Le présent article vise à combler une partie de ce vide.

Quantités produites et recyclées

À la fin des années 1980, on estimait à 45 000 tm (bh) la quantité de cendres de bois produite annuellement au Québec par l'industrie des pâtes et papiers (AIFQ, 1990), alors que la quantité produite par l'ensemble de l'industrie forestière était évaluée à 71 000 tm (Vigneux, 1993). En 2006, on produisait plus de 300 000 tm de cendres par an (tableau 1), les deux tiers provenant des fabriques de pâtes et papiers et l'autre tiers d'usines de cogénération d'énergie, ainsi que de scieries et autres industries du bois (panneaux). Les principales industries générant des cendres de bois au Québec sont présentées au tableau 2. Le gros du volume provient des équipements de dépoussiérage; ces cendres sont appelées « cendres volantes ». Les « cendres de grilles » sont pour leur part accumulées dans le bas des chaudières. La région ouest du Québec (Outaouais et Abitibi-Témiscamingue) génère plus de 40 % du total. La région élargie du Saguenay-Lac-Saint-Jean suit avec près de 30 %. Les quantités produites pourraient augmenter, compte tenu du fait que de gros incinérateurs de biosolides papetiers n'ont pas encore atteint leur capacité de traitement (Kruger énergie, à Bromptonville, et la papetière Stadacona, à Québec).

Tableau 1. Évaluation des quantités de cendres dérivées du bois générées annuellement - période 2006-2007¹.

Région	Quantité (tm, bh) ¹ Générée
Bas Saint-Laurent	11 500
Saguenay- Lac-Saint-Jean	90 000 ²
Québec	10 500
Mauricie	14 500
Estrie	25 000
Montréal	0
Outaouais	85 000
Abitibi-Témiscamingue	50 000 ²
Côte-Nord	23 000
Gaspésie	5500
Lanaudière	2500
Total	317 500

1. Compilation réalisée à partir du Bilan annuel de conformité annuelle - secteur des pâtes et papiers 2006 (MDDEP 2007) et de diverses sources publiées et non publiées. Elle ne tient pas compte des importations qui sont considérées limitées. Elle inclut cependant les exportations de cendres québécoises vers l'Ontario. Pour le taux de recyclage, voir le texte.

2. En 2006, une partie des cendres de l'Abitibi-Est était valorisée dans la région du Lac-Saint-Jean, la quantité de cendres en question a donc été comptabilisée dans la région Saguenay-Lac-Saint-Jean.

En 2007, 150 000 tonnes de cendres ont été recyclées comme matières fertilisantes, soit près de la moitié du « gisement » produit annuellement (Hébert et coll., 2008). La majorité (54 %) des cendres recyclées l'ont été en agriculture, et le reste pour la végétalisation de sites dégradés, la fabrication de terreaux, le compostage et d'autres fins. La majorité des cendres non recyclées ont été enfouies.

Les quantités recyclées spécifiquement en agriculture ont augmenté de 80 % entre 1999 et 2007, passant de 45 000 tm (bh) (Charbonneau et coll., 2000), à 81 000 t (Hébert et coll., 2008). Environ 250 fermes ont utilisé des cendres en 2007 pour amender les sols et fertiliser les cultures, dont un peu plus de la moitié (56 %) au Saguenay-Lac-Saint-Jean.

Caractéristiques chaulantes des cendres de bois

Le tableau 3 compare les caractéristiques agronomiques des cendres de bois valorisées au Québec avec la chaux agricole. Le pouvoir neutralisant de l'acidité (PN) des cendres est en moyenne de 49 % ÉCC (équivalent carbonate de calcium) sur base humide, soit la moitié de la chaux agricole

Tableau 2. Principaux générateurs de cendres de bois au Québec.

Région	Compagnie	Ville
Côte-Nord	Abitibi Bowater	Baie Comeau
	Abitibi Bowater	Clermont
Gaspésie/Bas-Saint-Laurent	Uniboard	Sayabec
	Norampac	Cabano
	F.F. Soucy	Rivière-du-Loup
Mauricie	Abitibi Bowater (division Laurentides)	Shawinigan
	Kruger	Trois-Rivières
	Kruger (Wayagamak)	Trois-Rivières
Capitale nationale	Cascades Lupel	Trois-Rivières
	Abitibi Bowater	Beaupré
	Stadacona (White Birch)	Québec
Saguenay-Lac-Saint-Jean	SFK	Saint-Félicien
	OM Cogénération	Saint-Félicien
	Abitibi Bowater	Dolbeau
	Abitibi Bowater	Alma
	Cascades	Jonquière
	Abitibi Bowater (scierie)	La Doré
Estrie	Louisiana Pacific	Chambord
	Cascades (pâte)	East Angus
	Cascades (Carton)	East Angus
	Domtar	Windsor
	Kruger énergie (co-génération)	Bromptonville
Outaouais	Abitibi Bowater	Gatineau
	Smurfit Stone	Portage du Fort
	Fraser Nexfor	Thurso
Abitibi-Témiscamingue	Tembec (complexe)	Témiscamingue
	Abitibi Bowater	Amos
	Boralex (co-génération)	Senneterre
	Norbord	La Sarre
	Chapais énergie (co-génération)	Chapais

Tableau 3. Caractéristiques agronomiques des cendres de bois et de la chaux agricole valorisées en agriculture (base humide).

Paramètre	Cendres		Chaux agricole certifiée BNQ	
	Moyenne ¹	CV ²	Moyenne ¹	CV ²
Matière sèche (%)	75	27 %	99	-
PN (% ECC)	49	65 %	94	5 %
Efficacité (E - %)	100 ³	-	81	8 %
IVA (%)	49 ³	-	77	11 %
pH	12,6	5 %	9,1	5 %
Mat. Organique (%)	12	61 %	-	-
Ca (kg/tm)	160	50 %	318	18 %
P ₂ O ₅ (kg/tm)	10 ⁴	70 %	0,7	121 %
K ₂ O (kg/tm)	22 ⁴	61 %	0,4	77 %
Mg (kg/tm)	12	51 %	35	105 %
S (kg/tm)	22 ⁵	-	-	-
Ratio (Ca + Mg)/(Na + K)	7	90 %	1300	80 %

1. Statistiques établies à partir de données brutes du MDDEP pour 20 cendres, ainsi que de données brutes du BNQ (2007) et du MDDEP pour 22 chaux agricoles certifiées BNQ.

2. Coefficient de variation. CV = écart-type/moyenne x 100.

3. L'efficacité (E) de la cendre est considérée à près de 100 % (BNQ, 2006). La méthode des tamis utilisée pour la chaux ne convient pas à la cendre, car elle tend à sous-estimer l'efficacité réelle. Voir le texte.

4. L'efficacité du P et du K est respectivement estimée à 50 et 100 % en équivalence avec les engrais minéraux (voir le texte). Mentionnons que l'analyse de l'acide phosphorique assimilable, utilisée couramment pour les engrais minéraux, sous-estime possiblement la valeur agronomique réelle, car la méthode n'a pas été développée pour des matrices fortement alcalines. Dans un essai d'extraction (Poisson et Vigneux, 1994), la valeur « assimilable » ne représentait que 30 % du P₂O₅ total, ce qui est significativement moindre que ce que donnent les essais agronomiques.

5. La majorité du soufre est sous forme de sulfates, donc potentiellement disponibles aux plantes.

commerciale. Le PN des cendres du Québec varie beaucoup d'une cendre à l'autre (CV de 65 %), comme aux États-Unis (Ohno et Erich, 1990; Siddique, 2008). Cette variabilité s'explique principalement en fonction des différences de teneur en eau, en matière organique imbrûlée et en particules de sols. En effet, les cendres contiennent en moyenne 25 % d'eau sur base humide (la matière sèche est de 75 % en moyenne). Cette eau est ajoutée aux cendres pour les éteindre, abattre la poussière et transformer les formes oxydes (CaO et K₂O), selon une réaction exothermique, en formes hydroxydes (Ca (OH)₂ et KOH), moins réactives au plan chimique.

Les cendres contiennent en moyenne 12 % (bh) de matière organique imbrûlée, mais cette quantité est très variable (CV = 61 %). Cette forme de carbone biologiquement stable résulte d'une combustion incomplète du bois et confère une couleur noirâtre à plusieurs cendres. Les particules de sable, de limon et d'argile, n'ont pas été quantifiées. Elles adhèrent aux écorces et aux résidus de cours à bois entrés en contact avec le sol. Elles se concentrent ensuite dans les cendres après la combustion de la matière organique. Ces particules sont plus abondantes dans les cendres qui ont un faible PN (sur base sèche), comme les cendres de grilles dans lesquelles on retrouve également des cailloux. Mentionnons que les cendres provenant du brûlage des résidus de désencrage de papier magazine contiennent également des quantités importantes d'argile de type kaolinite. Ce type d'argile est utilisé dans la fabrication du papier pour lui conférer sa propriété glacée. La quantité de particules de sol peut être déduite à partir de la teneur en silicium des cendres (extraction à l'acide fluorhydrique). La teneur en argile peut également être déduite par l'aluminium total (Estes et coll., 1995).

Le PN des cendres est causé principalement par la présence d'hydroxydes de calcium (Ca(OH)₂), de potassium (KOH) et de magnésium (Mg(OH)₂). Il est mesuré au laboratoire par titration acide, mais peut également être estimé par la teneur en cations selon la formule suivante (MDDEP, 2008) :

$$\text{PN}_{\text{estimé}} (\% \text{ ECC}) = (\% \text{ Ca} \times 2,5) + (\% \text{ K} \times 1,2) + (\% \text{ Mg} \times 4,2)$$

À partir des analyses de 17 cendres valorisées en agriculture, on a obtenu une valeur de $PN_{\text{estimé}}$ quasi identique à la moyenne des $PN_{\text{mesurés}}$ (58 vs 61 % ÉCC, bs). La relation statistique entre les 2 paramètres est exprimée à la figure 1.

Comme les cendres sont généralement fines et pulvérulentes, on confère à leur PN une efficacité (E) de 100 % (BNQ, 2006). Il s'est avéré contre-indiqué d'utiliser le tamisage pour estimer l'efficacité de la cendre, contrairement à la chaux agricole, car cette méthode peut amener une sous-estimation de 50 % de l'efficacité réelle, et donc de l'indice de valeur agricole (IVA) (Olivier, 1993; Chalifour, 1995). En effet, la cendre peut contenir des agrégats ne passant pas les tamis fins, mais qui sont néanmoins solubles à l'eau. Toutefois, l'imputation d'une efficacité de 100 % pourrait amener une surestimation de l'efficacité réelle s'il y a abondance de concrétions fortement indurées (cimentation).

Grâce aux valeurs de PN et de E, on peut calculer l'indice de valeur agricole des cendres ($IVA = PN * E$). Il s'ensuit que l'IVA d'une cendre sera égal à son PN, soit 49 % en moyenne, ce qui représente environ le 2/3 de l'IVA de la pierre à chaux sur base humide (tableau 3).

La présence de formes hydroxydes explique que le pH moyen des cendres se situe à 12,6 (tableau 3), soit beaucoup plus qu'avec la chaux agricole (pH 8,2 – 10,3, selon la teneur en Mg). Ce pH alcalin est assez constant à la sortie de l'usine (CV = 5 %). Il peut cependant diminuer au cours du stockage au champ, avant l'épandage.

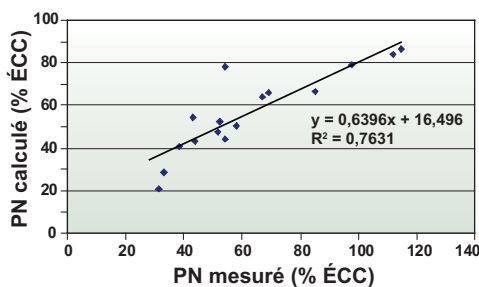


Figure 1. Relation entre le $PN_{\text{calculé}}$ selon l'équation théorique du MDDEP (2008) et le $PN_{\text{mesuré}}$ par titration chimique pour 16 cendres valorisées en agriculture au Québec (données du MDDEP sur base sèche).

Tableau 4. Teneurs en oligo-éléments et en contaminants stricts des cendres de bois et de la chaux agricole épandus au Québec (mg/kg base sèche)

Paramètre analysé	Cendres ¹		Chaux agricole ²		Teneurs limites MRF ³		Sols agricoles - argiles ⁴ Moyenne
	Moyenne	CV	Moyenne	CV	C1	C2	
Oligo-éléments pour les plantes ou les animaux							
As	2	65 %	4 ⁵	124 %	13	41	-
B	135	60 %	<10	-	-	-	-
Co	10	46 %	2	88 %	34	150	23
Cr	40	91 %	4	125 %	210	1060	82
Cu	74	63 %	12	365 %	400	1000	33
Fe	8 490	38 %	3 950 ⁵	80 %	-	-	32 300
Mn	8 160	50 %	862 ⁵	214 %	-	-	589
Mo	< 5	-	1 ⁵	174 %	5	20	-
Na	4 500	52 %	92	63 %	-	-	-
Ni	47	176 %	3	71 %	62	180	42
Se	< 1	-	<0,7	-	2	14	-
Zn	924 ⁶	76 %	39	325 %	700	1850	96
Contaminants stricts⁷							
Cd	6 ⁶	76 %	<0,25 ⁵	-	3	10	1,4
Hg	< 0,1	-	0,07	57 %	0,8	4	0,06
Pb	< 22	-	3	92 %	150	300	42
Dioxines et furannes	< 1 ng ÉQT/kg	-	-	-	17	50	-

1. Moyennes tirées de Charbonneau et coll., 2001. Coefficients de variation calculés à partir des données brutes.

2. Analyses réalisées par le MDDEP sur 22 chaux agricoles certifiées par le BNQ.

3. Tiré de MDDEP (2008).

4. Tiré de Giroux et coll. (1992).

5. Les teneurs maximales observées sur 22 échantillons de chaux agricole sont de 17 mg As/kg; 3,2 mg Cd/kg; 7 mg Mo/kg; 8300 mg Mn/kg et 12 000 mg Fe/kg. Trois des 22 échantillons de chaux agricole échantillonnées sont donc de catégorie C2.

6. La moyenne des cendres épandues excède le critère C1 pour Cd et Zn et la majorité est donc de catégorie C2. Les cendres ayant subi une combustion complète et contenant peu de terre contiennent davantage de ces éléments, en raison du phénomène de concentration et peuvent parfois excéder les critères C2 en Cd et Zn. En contrepartie, elles ont également un PN plus élevé et seront donc épandues à une dose moindre, limitant la charge d'ÉTM réellement apportée au sol à des niveaux semblables aux critères C1. La norme du BNQ (tableau 6) a tenu compte de ce double phénomène en établissant un ratio PN/ÉTM comme critère de qualité.

7. À titre indicatif, la teneur moyenne en aluminium de la cendre est de 14 000 mg/kg (C.V. = 114 %), de 760 mg/kg dans la chaux agricole (C.V. = 57 %) et de 35 000 mg/kg pour les argiles.

Les hydroxydes réagissent alors progressivement avec le gaz carbonique de l'air pour former des carbonates de calcium, qu'on retrouve également dans la chaux agricole (Bordeleau, cité par MDDEP, 2006). Le pH peut diminuer jusqu'à 10,5 (Hébert, 2006), ce qui réduit l'alcalinité de façon importante. Suite à un épandage à la surface du sol, la cendre agira également comme une « trappe à CO₂ ». Un délai de quelques jours avant son incorporation au sol permettra donc une réduction du pH de la cendre (Ohlsson, 2000), sans réduire pour autant son pouvoir neutralisant. L'effet protecteur de la carbonatation des hydroxydes sera davantage marqué avec un épandage sur prairie, sans incorporation.

Teneurs en éléments fertilisants

La teneur en calcium des cendres est élevée, en moyenne 160 kg/tm (bh), mais deux fois moindre que la chaux agricole (tableau 3). Les teneurs en potassium et en phosphore sont aussi importantes, avec des teneurs moyennes de 22 kg K₂O/tm et de 10 kg P₂O₅/tm (bh), ce qui est un autre trait distinctif entre les cendres et la chaux. Ces teneurs sont cependant assez variables (CV de l'ordre de 65 %). Les cendres provenant du brûlage de particules de bois et de biosolides papetiers tendraient à être moins riches P et K que les cendres provenant de branches ou d'écorces contenant l'aubier. Il peut aussi y avoir des différences selon l'essence (résineux et feuillus) et selon la

richesse naturelle des sols sur lesquels ces arbres ont poussé. Cependant, une analyse de régression avec 17 cendres a montré que les contenus en P et K ne sont pas reliés entre eux de façon importante ($r^2 = 0,04$). La relation est également faible entre Ca et K ($r^2 = 0,15$).

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

Les cendres de bois contiennent aussi une quantité intéressante de magnésium (12 kg/tm), ce qui correspond à la valeur moyenne des chaux calciques vendues au Québec, mais qui est bien moindre que la chaux dolomitique et magnésienne. Vigneux et Barnett (2001) ont cependant démontré que l'apport de cendres augmentait la disponibilité de Mg dans les sols. Un test de solubilité du Mg de la cendre pourra donner une indication à cet effet (BNQ, 2006). Un autre élément distinctif de la cendre, qui a été peu documenté, est son contenu élevé en soufre (22 kg/t) dont la majorité est sous forme de sulfates facilement assimilables par les plantes.

Le brûlage du bois concentre également dans la cendre les oligo-éléments naturellement présents dans les arbres, comme le manganèse, le fer et le zinc qui sont en quantités non négligeables, comparativement à la chaux agricole (tableau 4). Toutefois, afin d'éviter le risque d'excès en oligo-éléments (phytotoxicité) suite à des apports répétés, des teneurs limites ont été établies et seront détaillées plus loin avec les considérations environnementales. Mentionnons finalement que les cendres ne sont pas une source significative d'azote (moyenne de 0,3 kg/t bh). Cet élément étant perdu sous forme gazeuse lors de la combustion.

Autres propriétés des cendres potentiellement bénéfiques pour les sols et les cultures

Des recherches en Alberta suggèrent que l'épandage de cendres pourrait améliorer la structure du sol (Lickaz, 2002). En effet, la présence des cations divalents tels le calcium (Ca^{++}) et le magnésium (Mg^{++}) favorise la floculation des sols (complexe argilo-humique). À l'inverse, les ions monovalents (Na^+ , K^+) ont tendance à disperser les argiles. C'est pourquoi la norme BNQ (2006) comporte un ratio minimal à respecter entre les ions divalents et monovalents :

$$(\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}) / (\text{Na}^+ + \text{K}^+) \geq 2,5$$

Le ratio de la cendre étant en moyenne de 7 (tableau 3), on considère que les cendres agissent plutôt comme un agent structurant des sols. Le ratio est cependant beaucoup moindre que la chaux agricole, principalement en raison de la différence de contenu en potassium.

Une teneur élevée en matière organique permettrait également d'améliorer la fertilité globale des sols en raison de la forme particulière du carbone. Ce carbone étant biologiquement stable, l'impact sur les sols pourrait se poursuivre sur des décennies. C'est du moins ce que suggèrent des études faites aux États-Unis avec le « bio-char » (Guo, 2008). Des études en serre ont aussi montré que les propriétés de type charbon activé des cendres ont pour effet d'adsorber les herbicides incorporés au sol, comme l'atrazine. Cela pourrait donc théoriquement causer une baisse de l'efficacité du désherbage chimique au champ, surtout en conditions de semis direct sans incorporation des cendres, mais réduirait également la phytotoxicité résiduelle pour la culture suivante (Estes et coll., 1995).

Impacts sur le pH du sol

Un des principaux intérêts de l'utilisation de la cendre de bois est de neutraliser l'acidité du sol. Le calcul de la dose d'épandage se fait alors en première approximation selon la méthode utilisée pour la chaux agricole (CRAAQ, 2003). Celle-ci tient simultanément compte de l'IVA de l'amendement chaulant, de l'analyse du sol, de sa texture et de la profondeur d'incorporation.

Cependant, la cendre réagit plus rapidement que la chaux agricole en raison de son contenu en ions hydroxydes (OH^-) plutôt qu'en ions carbonates (CO_3^{2-}). Pour une dose équivalente de chaux et de cendres, sur la base de l'IVA, le comportement des deux produits dans le sol sera donc légèrement différent. La figure 2, dérivée de travaux québécois sur divers produits chaulants en incubation de sols (Laverdière et coll., 1992; Simard et coll., 1998), illustre le comportement typique des formes hydroxydes et carbonates. Ainsi, la cendre tend à réagir plus rapidement que la chaux

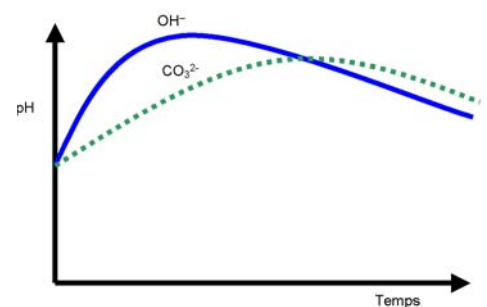


Figure 2. Réactivité théorique des amendements calciques en incubation de sol, selon la prédominance des formes carbonates (CO_3^{2-}) ou hydroxydes (OH^-).

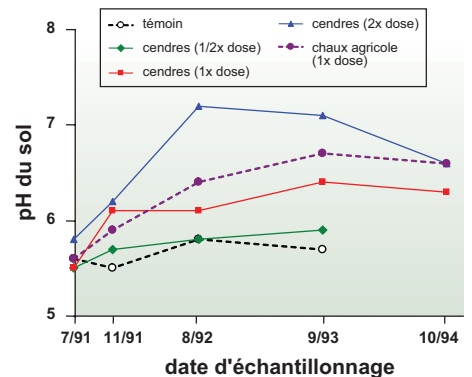


Figure 3. Évolution du pH pour une argile de la série Fabre amendée de cendres ou de chaux agricole pour l'atteinte d'un pH de 6,5 (adapté de Olivier (1993) et Chalifour (1995)).

Notes : la légende des doses a été révisée en considérant que l'efficacité des cendres est de 100 %, selon l'approche du BNQ, et non pas 50 % selon les calculs des auteurs réalisés à partir des essais de tamisage. Sur cette base, l'IVA de la cendre et celle de la chaux étaient toutes les deux de 70 %. C'est pourquoi la dose 1x présentée ici correspond à la dose 2x dans l'étude originale. Une seule donnée de pH a été considérée par année, en fin de saison, afin de simplifier la présentation et d'enlever l'effet de la variabilité saisonnière du pH du sol. L'épandage a été réalisé une seule fois en octobre 1991.

agricole. Un comportement similaire a été observé lors d'essais au champ en Abitibi (figure 3). Pour une dose comparable sur la base de l'IVA (dose 1x, efficacité de la cendre estimée à 100 %), on voit que l'élévation du pH est plus rapide avec la cendre qu'avec la chaux. Cependant, l'élévation de pH est moindre qu'avec la chaux, comparativement au comportement attendu des hydroxydes (figure 2). Dans un essai ultérieur en Abitibi, avec un autre type de cendre et en sol limoneux, Olivier (1997) a obtenu un pH final de 6,3, légèrement inférieur au pH cible, en considérant une efficacité de la cendre de 100 %.

Comme on pouvait s'y attendre, la demi-dose ne permet pas une élévation substantielle du pH, comparativement au témoin (figure 3). Des essais en Estrie (Vigneux et Barnett, 2001) ont d'ailleurs mis en évidence que le fractionnement de la dose de correction du pH sur plusieurs années ne permettait pas d'atteindre une élévation sensible du pH la première année, comparativement à un apport unique. Des études réalisées par Agriculture et Agroalimentaire Canada en Mauricie (Ziadi et coll., 2007) avec des doses de cendres de 3 tm/ha épandues annuellement, pendant 6 ans sur un loam La Chaloupe, indiquaient une correction progressive du pH. Cependant, dans les 3 dernières années, le pH s'était stabilisé près de la cible (6,5). La figure 3 indique qu'un dépassement du pH cible est toutefois possible avec une dose supérieure au besoin de chaulage (2x), ce qui pourrait être excessif pour une culture de céréales.

On constate aussi que la correction du pH avec la cendre s'est prolongée 3 ans après l'épandage. Ces recherches confirment que le calcul de la dose d'épandage sur la base de l'IVA est une approche sécuritaire. Cependant, l'IVA doit être calculé en considérant une efficacité de près de 100 % (et non pas selon la méthode du tamisage utilisée pour la chaux). Sur la base des 2 études abitibiennes, on peut cependant penser que l'efficacité réelle (E) de la cendre serait en fait légèrement inférieure à 100 %, puisque le pH cible (6,5) n'est pas entièrement atteint, contrairement à la chaux (figure 3). Considérer une efficacité de 100 % permet cependant d'éviter le risque de surchaulage.

En pratique, les doses d'épandage de cendres observées en agriculture sont en moyenne de 8 tm/ha (bh) avec un CV de 53 % (Hébert et coll., 2008). En considérant un PN et un IVA moyens de 49 %, cela correspondrait à environ 5 tm/ha de chaux agricole ayant un IVA de 77 % (tableau 3), soit une dose normale de correction du pH, et non pas une dose d'entretien. Au Saguenay-Lac-Saint-Jean, après 20 ans d'épandages de cendres sur des dizaines de fermes, on n'aurait pas rapporté de cas de surchaulage pour des apports correspondant aux besoins. Mentionnons finalement que dans une série d'essais comparatifs entre divers produits chaulants épandus à doses élevées (10 et 14 t/ha) dans Lanaudière, on n'a pas rapporté de différence significative entre les apports de chaux agricole et de cendres de bois sur le pH du sol (Royer et coll., 2004). Le pH cible n'a pas même été atteint avec ces fortes doses.

Impacts sur le rendement des cultures

Au-delà de l'impact mesurable sur les sols, ce qui importe pour l'agriculteur et l'agronome est l'impact sur le rendement des cultures. Dans les années 1930, le ministère de l'Agriculture indiquait que « *ce sont surtout les cultures de grains sur terres légères qui bénéficient davantage de l'utilisation des cendres... qui favorisent (aussi) la prise du trèfle* » (MAPQ, 1932). Olivier (1997) rapporte qu'un apport sur un loam en Abitibi, sur la base des besoins en chaux (E estimé à 100 %), a permis d'augmenter de 83 % le rendement de l'orge, comparativement à la parcelle témoin, et de 30 % comparativement à la demi-dose. Des recherches en Alberta confirment

l'augmentation de la productivité de l'orge, ainsi que du canola (Patterson et coll., 2004). L'impact sur le canola pourrait notamment être attribuable à l'augmentation de la disponibilité du bore du sol observée par d'autres chercheurs (Vigneux et Barnett, 2001).

Des études ont comparé plus précisément l'efficacité de la cendre avec la chaux agricole (tableau 5). Dans le maïs, Ziadi et coll. (2007) rapportent une augmentation de rendement de 9 % comparativement à la chaux avec de faibles doses de cendres (3 t/ha). Krejzl (1995) obtient les mêmes résultats avec le blé. La supériorité de la cendre est davantage accentuée avec les légumineuses, car Ziadi et coll. (2007) observent une augmentation d'environ 15 % avec le haricot et le soya, alors que Krejzl (1995) observe une augmentation de 63 % avec le pois vert. Cette supériorité de la cendre avec le maïs et le soya n'a pas été observée par Royer et coll. (2004), possiblement en raison de la variabilité statistique des résultats.

Les prairies de légumineuses, comme le trèfle et la luzerne, bénéficient aussi particulièrement des cendres (Scott, 1968; Seekins, 1986; Robitaille, 1996; Olivier, 1997), notamment au niveau de l'implantation. Un suivi réalisé auprès d'agriculteurs de la Nouvelle-Angleterre indique que les cendres ont aussi un impact marqué en épandage sur les vieilles prairies, en augmentant la productivité et les populations de légumineuses (Coleman, 1995). Seekins (1986) rapporte des études au Vermont démontrant une augmentation du rendement de 75 % avec la luzerne. Poisson et Vigneux (1994) rapportent pour l'Estrie des

Tableau 5. Gains de rendement obtenus au champ avec l'utilisation de la cendre comparativement à la chaux agricole, à des doses agronomiques, pour différentes cultures au Québec et dans le nord des États-Unis.

Culture	Gain de rendement par rapport à la pierre à chaux (%)	Lieux	Source
Blé	9	État de Washington	Krejzl (1995)
Maïs	9	Mauricie	Ziadi et coll. (2007)
Soya	14	Mauricie	Ziadi et coll. (2007)
Haricot sec	15	Mauricie	Ziadi et coll. (2007)
Pois vert	63	État de Washington	Krejzl (1995)
Prairies de légumineuses (trèfle)	12 à 35	Bas-Saint-Laurent	Robitaille (1996)
Luzernière	45-61	New Hampshire	Estes et coll. (1995)
Prairies	28	Alberta (centre)	Lickaz (2002)

augmentations de rendement plus modestes de 5 à 18 % pour les parcelles amendées de cendres comparativement à des parcelles témoins. Dans un essai ultérieur en Estrie avec 5 fermes, Vigneux et Barnett (2001) ont obtenu les gains de rendement les plus élevés (10 %) sur une période de 3 ans quand la dose de 9 t/ha était apportée en un seul apport, plutôt qu'en apports fractionnés (figure 4). Les impacts de la cendre sur le rendement se sont également faits sentir la deuxième année. Tout comme les études sur le pH du sol, ceci suggère de ne pas fractionner les apports, sauf dans des situations particulières. D'ailleurs, Laroche et coll. (1997) ne rapportent pas d'augmentation du rendement des fourrages au Lac-Saint-Jean lorsqu'une faible dose d'entretien (1 t/ha bh) est apportée.

Même en cas de dépassement du pH cible, la cendre aurait un effet protecteur en prairies, puisque des études réalisées au Vermont indiquent que des doses de cendres excédant le besoin en chaux des luzernières n'entraînaient pas de carences nutritionnelles, contrairement à une surdose de chaux agricole (Coleman, 1995). Cela pourrait possiblement s'expliquer par l'apport conjoint en oligo-éléments contenus dans la cendre, notamment en bore (Seekins, 1986). Des essais au New Hampshire ont en effet établi que la teneur foliaire en bore de la luzerne augmentait

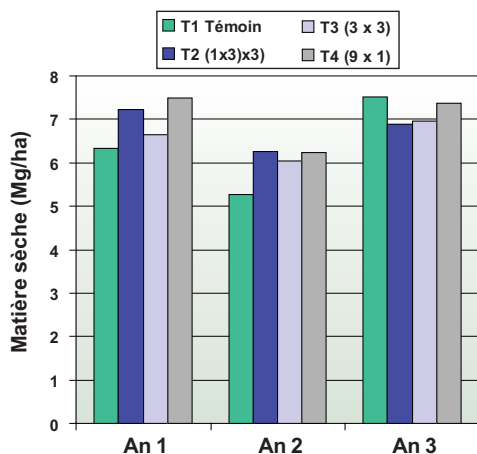


Figure 4. Rendements moyens de prairies sur 5 fermes suite à un apport de 9 tm (bh)/ha de cendres en un seul apport (T4), avec un fractionnement annuel (T3) ou un double fractionnement (annuel et intra annuel). Tiré de Vigneux et Barnett (2001). Les différences entre les traitements et le témoin étaient significatives pour les deux premières années, à l'exception de T3, la première année.

avec la dose d'épandage de cendres (Estes et coll., 1995). Ce phénomène a été confirmé au Québec par Vigneux et Barnett (2001) qui observent également une augmentation de K et Mn dans les tissus et les sols, par rapport au témoin. Royer et coll. (2004) observent d'ailleurs que les parcelles avec des cendres de bois ont un contenu plus élevé en Mn extractible, bien que ce contenu tende à revenir à la normale après 2 ans. Le contenu en fer et en soufre des cendres pourrait également être un facteur protecteur, notamment pour le soufre dont les besoins sont particulièrement importants chez la luzerne (CRAAQ, 2003).

D'autres essais sur prairies ont comparé l'efficacité relative de la cendre avec la chaux agricole (tableau 5). Pour des sols sableux dans le Bas-Saint-Laurent, Robitaille (1996) rapporte une augmentation de 12 à 35 % du rendement dans les parcelles avec cendres. En Alberta on a observé un gain de productivité de 28 % comparativement au traitement à la chaux seule, et de 19 % comparativement à un apport conjoint chaux-engrais phosphaté (Lickaz, 2002). Des études semblables au New Hampshire (Estes et coll., 1995) en sol acide (pH 5,3), montrent une augmentation de rendement de 45 % de la luzerne pour une dose identique de cendres et de chaux de 9 t/ha (bs) en pré-semis. L'augmentation de rendement était de 61 %, avec une dose élevée de 18 t/ha (b.s.). La cendre étant plus soluble que la chaux, elle serait plus rapidement disponible aux racines des plantes déjà établies (Lickaz, 2002) et serait donc plus indiquée pour un chaulage d'entretien des prairies en surface, sans incorporation.

Dans le domaine du maraîchage, des recherches en Europe du Nord indiquent que le rendement de légumes racines, comme la pomme de terre et la betterave, est proportionnel à la dose des cendres appliquée (Butkuvienė, 2005); la dose de 6 tm (bh) donnant un gain de productivité de 26 % avec la pomme de terre comparativement au témoin. Au Maine, Porter et Ocaya (2008) ont obtenu des rendements de pomme de terre semblables entre un traitement de chaux avec engrais minéraux et un traitement de cendres avec une dose réduite d'engrais.

De façon plus globale, dans l'état d'Alabama, un suivi de plus de 50 projets de démonstration d'épandage agricole des

cendres de bois aux doses agronomiques (besoin en chaux) a montré systématiquement des résultats positifs sur la croissance des végétaux (Mitchell, 1995). Cela confirme encore une fois que le calcul de la dose selon les besoins en chaux est sécuritaire pour la culture.

Impacts sur la qualité des récoltes

Au niveau de la teneur en éléments majeurs (N, P, K, Ca et Mg) des grains comme le maïs, le soya et le pois sec, Ziadi et coll. (2007) ne constatent pas de différence significative entre les traitements avec les cendres ou la chaux agricole. Ces auteurs observent d'ailleurs peu ou pas d'impacts sur la disponibilité en éléments majeurs ou en oligo-éléments du sol. Contrairement aux grains, les fourrages peuvent toutefois emmagasiner des quantités excessives de K (Estes et coll., 1995), ce qui peut être préjudiciable à la santé des bovins qui en consomment. Vigneux et Barnett (2001) rapportent en effet une importante augmentation du rapport K/(Ca+Mg) des fourrages produits avec des cendres, comparativement à la parcelle témoin. L'utilisation de cendres sur les sols déjà très riches en K (ou pauvres en Mg) est donc contre-indiquée dans certaines situations qui seront examinées plus loin.

La cendre n'augmenterait pas la gale commune avec les variétés résistantes de pommes de terre (Porter et Ocaya, 2008). Pour les variétés sensibles, l'apport devrait donc plutôt se faire sur une culture en tête de rotation ou sinon, en assurant un délai d'incorporation après l'épandage qui soit suffisant pour permettre une carbonatation de la cendre et une réduction de son pH.

Valeur économique de la cendre de bois

Puisque la cendre est un substitut à la chaux agricole et aux engrais minéraux, sa valeur peut être estimée en fonction du prix de vente pour ces matières concurrentes. En se basant d'une part sur les teneurs moyennes des cendres pour l'IVA, le P₂O₅ disponible et le K₂O disponible (tableau 3), et d'autre part sur les coûts unitaires de la chaux agricole non livrée (environ 20 \$/t; IVA = 77 %) et des engrais (2,40 \$/kg P₂O₅; 2,00 \$/kg K₂O, prix à l'été 2008), on obtient une valeur moyenne de 69 \$/tm (bh)

de cendres, dont 13 \$ pour la valeur neutralisante, 12 \$ pour le P disponible et 44 \$ pour le K disponible. En retranchant les coûts d'épandage de la cendre pour l'agriculteur (environ 4 \$/tonne), on obtient 65 \$/tm (bh) comme valeur moyenne de substitution, sans tenir compte de l'apport en soufre et en bore. Cette valeur relative peut cependant varier, compte tenu de la variabilité des caractéristiques agronomiques des cendres et de l'évolution du prix du marché des engrais. À cela s'ajoute la variabilité des coûts de transport de la cendre et de la chaux pour une région donnée, ainsi que du besoin ou non de fertilisation potassique.

Une autre façon de calculer la valeur monétaire de la cendre consiste à considérer la valeur de remplacement de la chaux pour neutraliser le pH du sol, conjointement avec le gain de productivité des cultures comparativement à la chaux utilisée seule. En se basant sur les prix du marché, les rendements moyens et les augmentations de rendements spécifiques à la cendre (tableau 5), on obtient une augmentation de la valeur de la récolte de l'ordre de 190 \$/ha pour le maïs et le soya, et de 90 \$/ha pour l'orge. En considérant une dose moyenne de cendres de 8 t/ha (bh), on a donc un revenu supplémentaire de l'ordre de 11 à 24 \$/tonne de cendres, selon le type de grain cultivé. En y ajoutant la valeur liée à l'IVA (13 \$/t), moins son coût d'épandage par l'agriculteur (4 \$/t), on obtient donc une valeur moyenne de la cendre variant de 20 à 33 \$/tm (bh), sans tenir compte du transport. Si on considère que l'impact sur le rendement peut également se répercuter sur une deuxième saison, la valeur augmenterait d'autant. Encore une fois, la valeur pour une cendre donnée variera selon sa teneur en eau et le différentiel de coût de transport entre les sources de cendres et de chaux.

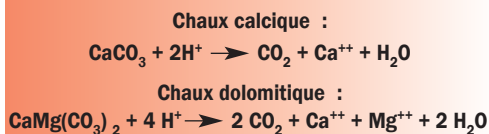
Peu importe la méthode de calcul utilisée, la valeur marchande des cendres s'avère beaucoup plus basse que sa valeur réelle, car le prix de vente actuel oscille de 0 à 17 \$ la tonne (bh), livraison comprise. Cela suggère que, malgré les connaissances acquises, la cendre est encore perçue comme un déchet et non pas comme un produit commercial à haute valeur. Ce faible prix de vente représente un avantage pour les agriculteurs qui réalisent des

économies importantes à l'achat. Elle est toutefois un frein au recyclage des cendres et au développement économique de cette filière auprès des industriels, ce qui contribue à perpétuer l'enfouissement des cendres, plutôt que leur recyclage, et l'importation d'engrais potassiques et phosphorés.

Intérêt environnemental du recyclage des cendres de bois

L'épandage agricole des cendres comporte plusieurs avantages environnementaux. Ces derniers sont liés d'une part au fait de ne pas enfouir un résidu dans un lieu d'élimination et d'autre part au fait de remplacer des ressources non renouvelables (chaux agricole, engrais minéraux) provenant d'activités minières et industrielles. L'épandage permet également de corriger l'acidité des sols agricoles qui est considérée comme une forme de dégradation des sols (Tabi et coll., 1990).

Un avantage moins connu est lié aux gaz à effet de serre (GES) et s'explique par le remplacement d'une partie de la chaux agricole. En effet, la chaux des carrières est dure et doit être finement broyée avant son usage agricole. Ce broyage implique une quantité considérable d'énergie. Lorsque cette énergie provient entièrement du pétrole, la production d'une tonne de pierre à chaux contribuerait à l'émission de 0,36 kg C/kg chaux (Lal, 2004), soit 1,3 tonne éq CO₂/tonne chaux. Cependant, au Québec, l'énergie utilisée pour le broyage serait principalement hydro-électrique et les émissions de GES seraient donc moindres. Nonobstant les GES associés à la production industrielle de chaux agricole, il faut considérer les GES générés lorsqu'elle est épandue au sol (Environnement Canada, 2003). La chaux réagit chimiquement dans la solution du sol, selon les équations suivantes :



Il y a donc un dégagement net de CO₂ d'origine fossile (gisements anciens de carbonates). En se basant sur des bilans de masse et en tenant compte de la proportion des divers types de chaux vendues au Canada (Environnement Canada, 2003), on

évalue que chaque tonne de chaux agricole épandue contribue approximativement à l'émission de 0,45 tonne de CO₂ au niveau du sol. Ces émissions sont comptabilisées depuis plusieurs années par le gouvernement fédéral dans les bilans de GES provenant des activités agricoles au Canada. À l'inverse, l'épandage des cendres ne libère pas directement de CO₂, car son alcalinité implique des hydroxydes et non des carbonates. Puisqu'une dose normale de 8 t cendres (bh)/ha (IVA = 49 %) permet d'éviter la consommation d'environ 5 t/ha de chaux agricole (IVA = 77 %), ce recyclage permettrait aussi de réduire l'émission d'environ 2,3 tonnes CO₂ ha⁻¹. Ces évitements d'émission de GES pourraient éventuellement donner le droit à des crédits carbone pour les agriculteurs ou l'industrie.

L'émission de CO₂ liée au brûlage du bois en usine n'a pas été considérée dans ces estimations, car il s'agit d'un carbone biogénique, faisant partie du cycle normal du carbone, et non pas d'un carbone fossile. De plus, même si ces sources étaient comptabilisées pour l'obtention de crédits carbone, elles seraient plutôt imputées à la fabrication d'énergie renouvelable (vapeur ou électricité) et non pas à la génération accessoire d'un résidu de procédé (cendres). À l'inverse, l'énergie fossile utilisée pour fabriquer la chaux agricole serait imputée à cette chaux (Lal, 2004), car il s'agit du principal produit commercial visé. Les estimations présentées s'avèrent d'ailleurs conservatrices, puisqu'on n'a pas calculé les émissions liées à la fabrication de chaux commerciale.

À titre indicatif, il faut toutefois souligner que le brûlage de biosolides papetiers riches en azote (environ 10 % des quantités de résidus ligneux brûlés au Québec) contribue à l'émission d'oxydes nitreux (N₂O), un puissant gaz à effet de serre. Quant aux résidus de désencrage, qui contiennent de la chaux, leur brûlage implique la libération de CO₂ fossile, tout comme avec l'épandage de chaux agricole. Le contenu en eau et en carbonates de ces résidus procure d'ailleurs un faible rendement énergétique. Même si leur brûlage produit une certaine quantité d'énergie, il émet probablement plus de GES qu'il n'en évite.

Maîtrise des risques environnementaux

L'épandage des cendres de bois est, dans une large mesure, régi par les mêmes normes réglementaires qui s'appliquent aux engrais minéraux épandus en agriculture (PAEF réalisé par un agronome, bilan équilibré du phosphore, distances d'épandage par rapport aux puits et aux eaux de surface, etc.). Comme les engrais phosphorés, les cendres augmentent la disponibilité du phosphore disponible dans le sol. Cependant, l'indice de saturation en P tend à revenir à la normale 3 ans après l'épandage (Vigneux et Barnett, 2001; Royer et coll., 2004). L'agronome doit tenir compte de cette dynamique pour déterminer des doses appropriées qui ne dépassent pas les seuils jugés sécuritaires pour l'eau de surface. Puisque les cendres sont pratiquement dépourvues d'azote, inodores et exemptes d'agents pathogènes, leur épandage peut toutefois être pratiqué durant toute la saison de culture et même tard à l'automne, si les conditions de sol le permettent.

Les cendres de bois contiennent des éléments considérés utiles ou essentiels à la vie (ex. : Co, Cu, Mo, Zn). Toutefois, un apport excessif et répété en oligo-éléments peut nuire à la qualité des sols; il en va de même pour les contaminants « stricts » (ex. : Cd, Hg, Pb). Le tableau 4 présente les teneurs en ces éléments traces (ÉT) comparativement à la chaux agricole. On constate que le cadmium et le zinc sont des éléments qui excèdent en moyenne la teneur limite C1 du MDDEP (2008), et qui méritent ainsi une attention particulière. Le nickel peut aussi impliquer un dépassement occasionnel du critère C1. La variabilité du contenu en ÉT des cendres est influencée par les mêmes facteurs que pour les paramètres agronomiques (teneur en eau, degré de brûlage, type de bois brûlé, etc.). Les plus fortes concentrations en cadmium observées au Québec (40 mg Cd/kg) provenaient du brûlage des écorces de peuplier faux-tremble en Abitibi et étaient considérées de source naturelle. Il peut cependant y avoir occasionnellement un apport par la co-combustion de résidus industriels, comme des huiles usées. La teneur en mercure et en plomb des cendres est du même ordre de grandeur que les sols naturels. Les teneurs des cendres en dioxines et furannes

chlorés sont aussi généralement négligeables (tableau 4), sauf exception (ex. brûlage de bois ayant séjourné dans l'eau de mer riche en chlore).

Les métaux (ex. : Cd et Zn), ainsi que le phosphore, sont peu solubles dans la matrice alcaline des cendres et donc peu susceptibles au lessivage vers l'eau souterraine et au ruissellement vers les cours d'eau lors de leur stockage au champ (Morris et coll., 1995; Baziramakenga, 2003; Envir-Eau, 2003). Les études d'épandage aux doses agronomiques à court terme ne rapportent pas non plus de problème relativement aux ÉT sur la qualité des sols et des cultures (Krejsl, 1995), sur la qualité de l'eau souterraine (Williams et coll.) et sur la faune (Sweeney et Jones, 1995). Après 6 ans d'épandages, Ziadi et coll. (2007) n'observent pas de différence entre les traitements de cendres ou de chaux sur la teneur en Cd, Cu et Zn extractibles du sol (méthode Mehlich 3). Seul le Ni est légèrement plus élevé dans le traitement avec la cendre, ce qui peut être en partie attribuable au fait que le pH final du sol recevant des cendres (6,6) était moindre que pour les parcelles avec la chaux (7,1). D'ailleurs, la teneur en Mo (extrait à l'eau), dont la disponibilité augmente avec le pH, était beaucoup moindre dans les parcelles avec les cendres. Vigneux et Barnett (2001) ont par contre observé une élévation de la teneur en Zn (Mehlich 3), dans des sols faiblement pourvus. L'enrichissement n'entraînait pas de dépassement des teneurs normales et le différentiel avec le sol témoin s'amenuisait après 2 ans et ne se traduisait pas par une augmentation du Zn foliaire.

Les risques relatifs aux ÉT s'avèrent donc négligeables à court ou à moyen terme. À long terme, l'épandage répété de surdoses de cendres par un agriculteur pourrait être préoccupant, mais il s'avère improbable. En effet, un surdosage régulier entraînerait une élévation excessive du pH qui inciterait l'agriculteur à cesser ou à réduire les apports ultérieurs afin d'éviter une baisse de rendement. Ces doses agronomiques sont jugées sécuritaires par le MDDEP (2008).

En raison du contenu variable en ÉT et du caractère alcalin et poussiéreux des cendres, leur recyclage agricole fait toutefois

l'objet d'un encadrement supplémentaire par les différents paliers de gouvernement. Les responsabilités des différentes organisations et les mécanismes de contrôle mis en place sont expliqués dans le Guide sur la valorisation des MRF (MDDEP, 2008). Les contrôles de qualité réalisés sur les fermes et dans les usines indiquent que les cendres épandues au Québec, ainsi que les MRF de façon générale, respectent les teneurs limites en ÉT établies par le MDDEP ou par le BNQ (MDDEP, 2006). Ce contrôle de la qualité est réalisé par l'un ou l'autre des 3 mécanismes suivants :

- Certification de conformité, par le BNQ;
- Certificat d'autorisation (CAs) annuel d'épandage, par le MDDEP;
- Avis de projet, par un agronome, transmis au MDDEP avec contrôle de la qualité par une firme d'échantillonnage accréditée.

En 2008, une cendre était certifiée par le BNQ. En contrepartie, 106 CA ont été émis par le MDDEP pour l'année 2007 et le Ministère a reçu 140 avis de projet (Hébert et coll. 2008). Les CA sont d'ailleurs appelés à être remplacés progressivement par des avis de projet, une approche qui se veut plus simple et moins coûteuse. Selon cette approche, un agronome doit attester la conformité de la cendre (à la norme BNQ), sur la base d'analyses provenant des usines, mais avec une contre vérification par une firme d'échantillonnage accréditée par le MDDEP (MDDEP, 2008). Cette attestation de conformité est ensuite transmise au MDDEP sous forme d'avis de projet, avant le début des livraisons à la ferme.

Mentionnons finalement que, lors du stockage au champ, la couche de surface des cendres s'assèche progressivement, favorisant l'emportement éolien (figure 5). Toutefois, au niveau de l'épandage, des observations terrain indiquent que cet emportement éolien serait moins important qu'avec la chaux agricole, en raison de l'humidité plus élevée des cendres (Hébert, 2006). En vertu du Règlement sur la qualité de l'atmosphère, le stockage et l'épandage de cendres ne doivent pas provoquer la dispersion de poussières à plus de 2 m hors des limites de la ferme (MDDEP,

2008). L'agriculteur et l'agronome doivent donc prendre des moyens permettant d'atteindre cet objectif, en tenant compte des vents et de la proximité des habitations.

Sécurité des travailleurs et aspects techniques

La cendre doit être additionnée d'eau en usine afin d'éteindre les braises et abattre les poussières. Cette humidification doit être suffisante pour prévenir les risques de brûlures lors de la manutention, de reprise de combustion lors du stockage, et d'emportement de poussières lors de l'épandage. Cependant, certaines cendres auront tendance à cimenter lors de leur humidification ou de leur stockage au champ, ce qui peut endommager l'équipement d'épandage et être une source de projectiles dangereux. De façon préventive, il faut donc éviter un entreposage prolongé au champ pour réduire le temps de réaction. Sinon, il faut s'assurer que l'épandeur a la capacité de briser les mottes indurées. Les cendres de grilles peuvent aussi contenir des « roches de cendres », ainsi que des cailloux, dès la sortie de l'usine. Leur usage en agriculture est généralement déconseillé.

Les cendres qui contiennent peu d'humidité et de mottes peuvent s'étendre avec les épandeurs d'engrais minéraux, alors qu'avec les cendres plus humides on préfère des épandeurs à chaux (Vigneux, 1991). Ces équipements sont cependant peu accessibles et ne permettent pas de doses élevées. On peut alors utiliser des épandeurs à fumiers standards (Coleman, 1995); ceux-ci ont également l'avantage d'être plus robustes. Cependant, le patron d'épandage serait

plus aléatoire. Les nouveaux épandeurs de précision pour les fumiers seraient idéals en termes de patron d'épandage, de robustesse et de dose d'épandage.

Comme les poussières sont irritantes pour les yeux et les voies respiratoires, il est recommandé de porter des lunettes de sécurité et des gants lors de la manutention, et, au besoin, un masque à poussières (Vigneux, 1991; Kopecky, 1995).

Étiquetage et protection des consommateurs

Toute cendre de bois vendue aux agriculteurs est assujettie aux normes d'étiquetage de la Loi sur les engrais, administrée par l'Agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA). Il s'agit de normes obligatoires, afin d'éviter toute fausse représentation commerciale. Elle oblige notamment l'inscription d'un contenu minimum garanti en principes nutritifs. Le site internet de l'ACIA fournit des exemples d'étiquetage.

La norme du BNQ va plus loin que la réglementation fédérale en termes d'exigences d'étiquetage et de description du produit, en obligeant l'inclusion de mises en garde agronomiques et environnementales pour les produits certifiés (BNQ, 2006). La norme BNQ a été élaborée par un comité de travail composé de membres de l'industrie forestière, du MAPAQ, de l'IRDA, du MDDEP, de l'UPA, de l'Université Laval et de spécialistes du secteur privé. Elle s'applique à toute une gamme de résidus chaulants industriels allant des coquilles d'oeufs aux poussières de four de cimenteries, en passant par les cendres de bois et de dérivés du bois. Le tableau 6 présente un résumé des critères de la norme BNQ s'appliquant aux cendres de bois et les justifications techniques et scientifiques. Ces exigences visent notamment à s'assurer d'une valeur minimale du produit en principes chaulants (PN minimal de 25 % (bs)), de teneurs minimales garanties en éléments fertilisants, de l'innocuité environnementale (cendres admissibles et teneurs limites en contaminants chimiques), et d'utilisation optimale et sécuritaire pour les plantes, les animaux, les humains et l'environnement (mises en garde). Les cendres qui ne peuvent rencontrer simultanément

toutes ces exigences ne peuvent être certifiées par le BNQ. La certification d'un produit à cette norme est cependant d'application volontaire.

Du point de vue agronomique, l'obligation d'une teneur minimale garantie implique toutefois que l'IVA réel du produit sera en pratique plus élevé que ce qui est indiqué sur l'étiquette (détail) ou le bon de livraison (vrac). Cela implique donc un risque de surdosage. Pour éviter un surchauffage avec les sols et cultures à risque (céréales en sol sableux), il est préférable de calculer les doses à partir de valeurs moyennes d'IVA qui peuvent être facilement obtenues sur demande auprès du fournisseur.

Synthèse des bonnes pratiques agro-environnementales

Le tableau 7 résume les bonnes pratiques agro-environnementales s'appliquant au recyclage agricole des cendres de bois. Elles tiennent compte à la fois de la littérature scientifique consultée, des consensus établis dans divers documents officiels de référence (norme BNQ, 2006); Guide de référence en fertilisation du CRAAQ (2003)), des normes réglementaires, ainsi que des informations verbales fournies par de nombreux spécialistes consultés dans l'élaboration de cet article. Ces bonnes pratiques sont présentées de façon chronologique par rapport aux étapes normales d'un projet de valorisation.

La plupart de ces bonnes pratiques réfèrent aux cultures devant être privilégiées ou évitées, à la fertilisation phosphorique et potassique, ainsi qu'aux diverses mesures de protection des sols, des plantes, de l'eau, de l'air, des animaux et des humains. On utilisera d'abord la cendre pour corriger l'acidité du sol et atteindre rapidement le pH cible en vue de l'atteinte de rendements supérieurs, puis comme fertilisation d'entretien annuelle ou bisannuelle sur la base des besoins en P-K. Puisque la cendre est plus réactive que la chaux agricole, un ensemble de mesures préventives ont été considérées pour éviter un dépassement du pH cible, notamment avec les céréales en sols sableux faiblement tamponnés.



Figure 5. Stockage des cendres de bois et transport éolien au Lac-Saint-Jean (photographie : Marc Hébert, MDDEP).

Tableau 6. Résumé des principaux critères de la norme BNQ 0419-090 s'appliquant aux cendres de bois et autres résidus ligneux.

Paramètre	Exigence	Justifications
Cendres permises	Cendres provenant de la combustion (avec ou sans combustible d'appoint) de bois, de résidus ligneux, de déjections animales, de résidus de désencrage ou de boues issues du traitement des eaux de procédé provenant des fabriques de pâtes et papiers (les cendres de grilles et les cendres volantes résultant de la combustion de ces produits sont générées soit par des scieries, par des fabriques de pâtes et papiers, par des centrales d'énergie ou par des usines de fabrication de panneaux de bois [par exemple les panneaux de particules, le contreplaqué]).	Éviter des cendres provenant du brûlage de matières de composition inconnue, notamment des résidus dangereux.
Pouvoir neutralisant (PN) minimal	≥ 25 % (bs).	Éviter des résidus ne pouvant être qualifiés de « chaulants ».
Taille maximale des agrégats	L'échantillon brut doit passer à 98 % le tamis 20 mm et à 95 % le tamis 12,5 mm.	Minimiser la présence de mottes indurées afin d'assurer une uniformité à l'épandage.
Teneur en eau minimale	≥ 1 %	Éviter la présence de CaO, fortement réactif.
Ratio des cations divalents et monovalents	$(Ca+Mg)/(Na + K) \geq 2,5$	Éviter la défloculation du complexe argilo-humique par la présence élevée de cations monovalents (Na et K).
Teneur maximale en sodium	PN/Na > 0,0025	Idem.
Éléments traces : ratio minimal = PN (%) / É.T. (mg/kg)	As (0,667), Cd (2,50), Co (0,333), Cr (0,047), Cu (0,066), Hg (10,0), Mn (0,004), Mo (2,50), Ni (0,278), Pb (0,100), Se (3,57), Zn (0,027)	Protéger la qualité des sols, tout en permettant la fourniture de certains oligo-éléments. Les critères sont exprimés sous forme de ratio avec le PN, puisque les produits avec un PN plus faible seront épandus à plus forte dose que ceux avec un PN élevé. Pour chaque paramètre, le ratio a été établi en divisant un PN (moyen) de 50 % par le critère C2 du MDDEP (tableau 4).
Éléments traces : teneur maximale absolue (mg/kg b.s.)	As (75), Cd (30), Cu (1500), Ni (420), Pb (500), Zn (2800)	Inciter à la réduction à la source en vue de minimiser l'accumulation au sol.
Dioxines et furannes	< 27 ng ETQ/kg (b.s.).	Protéger la qualité des sols. Critère tiré du MDDEP (2008). Analysé seulement avec les usines brûlant des résidus susceptibles de contenir des dioxines et furannes ou d'en générer lors du brûlage.
Formaldéhyde	< 50 mg/kg (b.s.).	Assurer une bonne destruction par combustion des colles (fabrique de panneaux).
Mélanges	Possible avec les autres produits visés par la norme et avec la chaux agricole.	Permettre le mélange cendre/chaux pouvant être bénéfique dans certaines situations. Voir le texte.
Marquage	Teneurs minimales garanties sur base humide (PN total, PN des carbonates, pH, IVA, Ca, Mg total, Mg soluble, B, K ₂ O, S, P ₂ O ₅ assimilable; teneur moyenne en P ₂ O ₅ total	Protéger le consommateur et permettre le calcul de la dose à épandre en fonction des besoins et des normes réglementaires (REA). Voir la note 4 du tableau 3 sur les analyses de P.
Mises en garde	Il est recommandé de consulter un agronome pour l'utilisation de ce produit.	Mesure générale pour favoriser les bonnes pratiques.
	Prévoir un délai de 30 jours après l'application de ce produit avant de faire paître les animaux ou de récolter le fourrage.	Éviter que les animaux ingèrent des hydroxydes pouvant déséquilibrer le pH du rumen.
	Dans certaines conditions, ce produit peut causer des brûlures aux plantes en croissance.	Éviter certaines conditions à risque. La littérature consultée ne montre cependant pas de problème avec les cendres.
	Ce produit peut générer des poussières lors de sa manutention.	Protéger la qualité de l'air pour l'agriculteur et ses voisins.
	Si des amas sont placés dans les champs, ils doivent être aménagés de façon à minimiser le ruissellement vers les rigoles, les fossés et les cours d'eau.	Minimiser le risque de ruissellement de phosphore vers les cours d'eau. Le P des cendres est toutefois peu soluble à l'eau.
	Afin de faciliter la manutention et l'épandage de ce produit, il est recommandé de l'entreposer à l'abri des précipitations.	Éviter la cimentation avec certaines cendres qui peuvent endommager les épandeurs.

1. Ce tableau ne constitue qu'un résumé de la norme BNQ 0419-090/2005 avec son modificatif de 2006.

Tableau 7. Synthèse des bonnes pratiques agro-environnementales s'appliquant aux cendres de bois et autres résidus ligneux.

Bonnes pratiques	Commentaires/précisions	
1	Avoir des analyses complètes, représentatives et fiables des sols et de la cendre.	Le besoin en chaux doit être établi avec un échantillon de sol représentatif pour éviter toute surestimation du besoin en chaux. Le nombre d'analyses des cendres doit répondre aux exigences de la démarche retenue (certification BNQ, CA, avis de projet).
2	Exclure les cendres non recyclables en agriculture.	Ex. : les cendres indurées ou excédant les critères de teneurs limites en ÉTM.
3	Choisir l'option d'encadrement externe appropriée au contexte selon les exigences de contrôle qualité, d'étiquetage, de stockage et d'épandage propres à chaque approche.	Certification BNQ, CA du MDDEP selon le guide MRF (MDDEP, 2008), ou avis de projet selon le guide MRF (MDDEP, 2008). Il est important pour l'agronome de bien maîtriser le contenu de ces documents.
4	Sélectionner les cultures qui bénéficieront le plus des caractéristiques des cendres de bois.	Toutes les cultures bénéficient des cendres, mais particulièrement les légumineuses et les prairies. Éviter d'épandre directement avant une culture de pomme de terre (risque de gale), pour les variétés sensibles.
5	Intégrer les ajustements les plus récents apportés au plan de culture (PAEF).	Les agriculteurs font souvent des modifications à leur plan de culture en fonction du prix des grains, du temps disponible, de la période de l'année, etc.
6	Exclure les parcelles dont les teneurs sont « excessivement riches en potassium » selon les grilles du CRAAQ.	Éviter le risque de tétanie d'herbage chez le bovin, s'il y a rotation des cultures avec les fourrages. Une analyse des fourrages peut cependant autoriser une recommandation différente, surtout avec une cendre moins riche en K.
7	Exclure les parcelles dont la teneur en phosphore est à risque au plan environnemental. Exclure les fermes en surplus de phosphore.	Les sols à risque ont un indice de saturation > 7,6 (sols > 30 % argile) ou 13,1 (sol < 30 % argile) selon le CRAAQ (2003). Cette restriction ne devrait pas s'appliquer pour des doses d'entretien qui respectent le besoin des cultures en P ou avec des cendres ou des mélanges cendres/chaux pauvres en P (< 3 kg P ₂ O ₅ /t).
8	Calculer les doses d'épandage selon la méthodologie utilisée pour la chaux agricole (CRAAQ, 2003; Brunelle et Vanasse, 2004).	Utiliser l'IVA moyen de préférence, plutôt qu'une « analyse minimale garantie », afin d'éviter le surchaulage. L'IVA doit être calculé en considérant une efficacité près de 100 %, et non pas selon la méthode des tamis qui sous-estime l'IVA réel de la cendre et conséquemment entraîne un risque de surdose. Pour un besoin élevé en chaux du sol équivalant à plus de 7 tonnes de carbonate de calcium, fractionner les apports pour minimiser le déséquilibre cationique. Cela est surtout important pour les sols sableux à faible capacité tampon et pour une culture de céréales qui est plus sensible au surchaulage que les légumineuses. À titre indicatif, pour une cendre moyenne (IVA = 49 %), le seuil maximum sera d'environ 14 t cendres humides/ha. Le seuil sera plus faible si l'IVA est plus élevé.
9	Pour une fertilisation d'entretien annuelle, ne pas dépasser les besoins en phosphore et en potassium (CRAAQ, 2003).	Considérer une efficacité moyenne du P de l'ordre de 50 % du P ₂ O ₅ total et de 100 % du K ₂ O total. On peut cependant viser un enrichissement en P-K des sols pauvres.
10	Intégration des règles appropriées dans le plan de fertilisation.	Guide de référence en fertilisation du CRAAQ (2003), Guide sur le chaulage des sols (Brunelle et Vanasse, 2004), etc.
11	Considérer les restrictions et mises en garde de la norme BNQ quant au type de culture, à la paissance et à la protection de l'environnement.	Voir le tableau 6.
12	Épandre le plus rapidement possible.	Éviter la formation d'agrégats indurés lors du stockage.
13	Prévenir l'émission de poussières.	Sélectionner des sites de stockage loin des voisins, réduire la durée du stockage au champ, éviter d'épandre par grand vent, incorporer rapidement si sol nu.
14	Utiliser un épandeur approprié et calibré.	L'épandeur doit permettre d'épandre uniformément la bonne dose. Il doit aussi être robuste en présence de mottes indurées.
15	Recommander des mesures pour prévenir l'inhalation des poussières et le contact avec les yeux par les travailleurs.	Ex. : lunettes de protection, masque anti-poussière au besoin. Éviter de se frotter les yeux avec les mains (port de gants), lavement de la peau après l'épandage. Il est important de rappeler que la cendre de bois doit être éteinte et ne doit pas contenir des tisons qui représentent un réel danger pour la sécurité et un risque d'incendie.
16	Éviter la compaction des sols.	Avant tout épandage, vérifier par une visite terrain que les conditions sont appropriées.
17	Respecter les distances séparatrices d'épandage et de stockage réglementaires.	Normes du REA, du RCES et du RQA. Voir le texte.
18	Incorporer au sol (sauf en prairies ou pâturage)	Pour uniformiser le pH dans l'horizon et éviter des poches de sol alcalines limitant le développement des racines. Un délai d'incorporation augmentera la dissémination des poussières, mais réduira l'alcalinité des cendres (voir le texte).
19	Laisser un délai de quelques jours à une semaine avant les semis et éviter d'épandre sur de jeunes plantules.	En raison de l'alcalinité élevée de la cendre. Cette alcalinité au niveau du sol sera réduite s'il y a un délai, surtout avant l'incorporation des cendres au sol. L'épandage après une coupe de foin ou à l'automne semble un moment idéal. L'alcalinité de la cendre sera réduite par réaction avec le gaz carbonique de l'air.
20	Faire un suivi de l'utilisation des cendres	Mettre à jour le PAEF et discuter avec l'agriculteur des impacts positifs ou négatifs de l'utilisation des cendres et des moyens d'améliorer son utilisation, comme un suivi annuel du pH du sol.

Autres utilisations possibles des cendres de bois comme matières fertilisantes

Utilisation en agriculture biologique

La cendre de bois est un des engrais les plus efficaces et les moins dispendieux pouvant être utilisés en agriculture biologique comme source de potassium, de phosphore et de soufre. La cendre est particulièrement appropriée dans les systèmes agrobiologiques où la fourniture de l'azote dépend ultimement des cultures de légumineuses. Par ailleurs, l'impact de la cendre sur le contenu en Mn des tissus végétaux pourrait théoriquement favoriser la résistance naturelle aux maladies des plantes (Huber et Wilhelm, 1988).

Cependant, certaines cendres ne sont pas admises dans les cahiers des charges. Selon la norme biologique de référence du Québec (CARTV, 2008), « *l'utilisation des cendres obtenues du brûlage de matières végétales ou animales est permise... à condition que les matières brûlées n'aient pas été traitées ou combinées avec des substances dont l'utilisation est prohibée en culture biologique* ». On en déduit que la cendre d'une usine de cogénération d'énergie brûlant exclusivement des écorces serait acceptable en agriculture biologique, alors que celle produite par une papetière brûlant des boues ne le serait pas.

Sylviculture et agro-foresterie

L'utilisation de la cendre de bois en foresterie a fait l'objet de plusieurs projets de recherche en Europe et aux États-Unis, mais elle demeure encore marginale au Québec. Pourtant, on rapporte l'effet bénéfique de la cendre de bois pour neutraliser l'acidité des sols forestiers (Lundström et coll., 2003), augmenter la minéralisation de la matière organique (Fritze et coll., 1994) et conséquemment entraîner une plus grande disponibilité des éléments, dont l'azote et le phosphore (Hakkila et Halaja (1983) et Huikari (1989), cités par Poisson et Vigneux, 1994). Ces derniers auteurs mentionnent que les changements sur la végétation forestière et sur les arbres sont très favorables, avec un impact jusqu'à 30 à 40 ans après l'épandage. Vance (1995) rapporte une étude finlandaise indiquant que 41 ans après l'épandage de cendres, on

a observé une augmentation de la productivité de pins écossais 32 fois plus élevée que dans les parcelles témoins. Cependant, cet auteur rapporte que l'épandage à des doses extrêmes (> 40 t/ha) peut avoir des impacts négatifs sur les arbres. Il recommande donc de privilégier l'épandage sur peuplements de feuillus qui ont des exigences plus élevées en termes de pH et d'éléments fertilisants du sol.

Au plan opérationnel, les équipements forestiers existants doivent être adaptés pour réaliser des épandages forestiers. Des essais sont en cours en Abitibi par la Chaire industrielle CRSNG-UQAT-UQAM en aménagement forestier durable afin de préciser les modalités d'application et les impacts.

Réhabilitation des sites dégradés

Certains parcs à résidus miniers riches en soufre génèrent spontanément de l'acide sulfurique qui contamine l'eau et solubilise les métaux lourds phytotoxiques, empêchant ainsi la remise en végétation des sites (Howard et coll., 1988; Stewart et Daniels, 1992). La cendre de bois, grâce à son pH alcalin, peut stopper, ralentir ou neutraliser la génération de l'acidité et la solubilisation des métaux. De plus, la cendre apporte des éléments fertilisants essentiels dans ces matrices pauvres permettant de favoriser la croissance végétale. Au Québec, quelques projets d'utilisation de cendres sur des sites miniers acides ont été réalisés, dont celui de la mine East-Sullivan en Abitibi. Certains autres parcs ne génèrent pas d'acidité, mais sont déficients en éléments fertilisants. Le recyclage de la cendre de bois dans de tels parcs peut favoriser la remise en végétation. En 2007, environ 35 000 tonnes de cendres ont ainsi été recyclées pour la réhabilitation de quelques sites (Hébert et coll., 2008).

Compostage et fabrication de terreaux

L'utilisation de cendres de bois dans les matières en compostage et dans les terreaux peut être utile pour ajuster le pH et enrichir le contenu en éléments minéraux des produits résultants. Les quantités doivent cependant être bien dosées pour atteindre les objectifs de qualité des terreaux et le pH visés. La cendre riche en matière organique carbonisée est la plus indiquée (Coleman, 1994), car elle a pour

effet de réduire les odeurs au compostage tout en donnant une belle couleur foncée aux terreaux.

Utilisation comme matériaux

Certaines cendres ont avantage à être utilisées dans la fabrication du béton plutôt que d'être recyclées comme matières fertilisantes (Siddique, 2008). Il s'agit notamment des cendres qui ne respectent pas les teneurs limites en contaminants, qui ont un faible contenu en éléments fertilisants (P-K) et en carbone organique, ou qui ont tendance à se cimenter à l'entreposage. Le recyclage dans le béton serait particulièrement approprié pour les cendres provenant du brûlage de bois de démolition et de résidus de désencrage. Les cendres provenant du bois traité peuvent être plus fortement concentrées en éléments traces métalliques (arseniate, cuivre chrome) ou en dioxines (traitement au penta-chloro-phénol). Les cendres issues du brûlage de résidus de désencrage contiennent quant à elles de l'argile (kaolin) qui a tendance à se cimenter avec la présence simultanée d'oxyde de calcium et d'eau. Les cendres de grilles, constituées principalement de sable, de gravier et de cailloux, ont récemment été utilisées avec succès, sur une base expérimentale, comme matériau de surface de roulement pour les chemins de ferme au Saguenay-Lac-Saint-Jean.

Besoins de recherche et de développement

Il serait important de mieux quantifier l'impact de la cendre de bois au niveau des rendements des cultures, notamment avec les cendres riches en matière organique carbonisée. L'efficacité du phosphore et du soufre devrait également être précisée. La performance d'autres types de cendres, comme les cendres provenant de l'incinération des boues municipales, devrait aussi être investiguée. Au niveau technique, des solutions préventives simples devront être trouvées pour minimiser ou contrer le phénomène de cimentation. Au plan environnemental, le bilan global de gaz à effet de serre devra être mieux quantifié. Au niveau économique, la valeur des cendres devrait faire l'objet de vulgarisation et d'un marketing approprié par les instances concernées, afin d'augmenter les quantités recyclées comme matières fertilisantes. Le

développement de mélanges commerciaux cendres/chaux pourrait en ce sens être une avenue à développer (Magdoff et coll. (1983), Clapham et Zibilske (1992)), notamment par l'industrie de la chaux et des engrais. De tels mélanges seraient d'ailleurs certifiables par le BNQ. Des engrais granulaires à haute valeur ajoutée pourraient également être développés. Des recherches sont d'ailleurs en cours dans la région de Portneuf pour évaluer l'efficacité d'un engrais granulaire combiné cendres/gypse dans la culture de pommes de terre.

Conclusion

L'usage agricole des cendres de bois est une pratique ancestrale qui a été délaissée au Québec dans les années 1930. Depuis le début des années 1990, elle est à nouveau considérée dans une perspective de recyclage. En 2007, 80 000 tonnes (bh) de cendres ont été recyclées en agriculture sur environ 250 fermes. Cette pratique permet de neutraliser l'acidité des sols, tout en procurant aux plantes des éléments fertilisants majeurs et des oligo-éléments. Ces effets combinés expliquent pourquoi l'impact sur les cultures est généralement supérieur à celui de la chaux agricole. L'encadrement et le contrôle de qualité obligatoire permettent de s'assurer que les cendres sont épandues de façon sécuritaire. Le recyclage des cendres permet en outre d'éviter le recours à l'enfouissement sanitaire, tout en réduisant l'émission de gaz à effet de serre associée à l'usage de la chaux agricole. Ce dernier aspect devra cependant être davantage quantifié (bilans de GES). Au plan économique, le prix de vente apparaît grandement sous-évalué par rapport à la valeur réelle d'une cendre moyenne qui se situerait entre 20 et 65 \$/tm (bh), selon les méthodes de calcul utilisées.

Toutefois, compte tenu de la nature de la cendre de bois et du cadre réglementaire, elle doit être recyclée sous la supervision d'un agronome familier avec ce type d'activité. L'agronome considérera toutes les pratiques agronomiques pertinentes, en fonction des caractéristiques de la cendre utilisée, du sol récepteur, de la culture visée et de l'environnement. Utilisée à des doses agronomiques et en fonction des

besoins de chaulage, l'utilisation de cendres permettra d'augmenter la productivité des cultures et les recettes agricoles, de façon sécuritaire. Il faut cependant éviter un enrichissement excessif des sols en potassium. L'utilisation généralisée de l'épandage agricole des cendres de bois au Québec, selon de bonnes pratiques agro-environnementales, ferait de ce recyclage un modèle de développement durable et de partenariat entre l'industrie du bois et le monde agricole.

Remerciement

Les auteurs tiennent tout particulièrement à remercier les personnes suivantes pour leur collaboration dans la recherche d'informations ou la révision du manuscrit original : Mmes Andréanne Bilodeau (BNQ), Rachel Thibault (CIFQ) et Élisabeth Groeneveld (MDDEP), ainsi que MM. Régis Baziramakenga (Université Laval), Lucien Bordeleau (Holistik), François Bossanyi (CEAEQ); Gyula Bossanyi (Les Produits BCC), Marc F. Clément (MAPAQ), Louis Drainville (Terre-Eau), Cyrias Girard (Les Produits BCC), Marcel Giroux (IRDA), François Granger (CSST), Toma Guillemette (UQAT), Louis Jean (Solutions 3R), Sylvain Larouche, Jacques Latreille (CEAEQ), Robert Robitaille (MAPAQ) et Jean Vigneux (GSI Environnement).

Références

- AAC. 1996. Guide d'interprétation du règlement sur les engrais. Division des produits végétaux. Agriculture et Agroalimentaire Canada. 107 p.
- AIFQ. 1990. Pourquoi gaspiller nos déchets? Association des industries forestières du Québec ltée. Dans Forêt Conservation. Septembre 1990.
- Baziramakenga, R. 2003. Disponibilité du phosphore des biosolides et cendres de papetières. *Agrosol*, octobre 2003. Vol. 14, no 1, p. 4-14.
- BNQ. 1997. Document explicatif. Critères de la Norme BNQ 0419-090/1997. 7 p.

- BNQ. 2005. Amendements minéraux – Amendements calciques ou magnésiens provenant de procédés industriels. BNQ 0419-090/2005. 41 p.
- BNQ. 2006. Modificatif. Amendements minéraux – Amendements calciques ou magnésiens provenant de procédés industriels – Norme BNQ 0419-090/2005. 10 p.
- BNQ. 2006b. Résultats BNQ - Pierre à chaux naturelle 2006. Amendements minéraux – Pierre à chaux naturelle. Norme BNQ 0419-070/1998. 1 p.
- Brunelle, A. et A. Vanasse. 2004. Le chaulage des sols. CRAAQ.
- Butkuvienė, E. 2005. Wood ash use for plants fertilization. In *Technology of progressive farming*. Lithuanian Institute of Agriculture.
- CARTV. 2008. Norme biologique de référence du Québec Version 4.0. Conseil des appellations réservées et des termes valorisants. 113 p.
- Chalifour, F. 1995. Valorisation de la cendre en agriculture. *Bio-bulle*. Juin-juillet, 1995. p. 12-16.
- Charbonneau, H., M. Hébert et A. Jaouich. 2000. Portrait de la valorisation agricole des matières résiduelles fertilisantes au Québec. Partie 1 : Aspects quantitatifs. *Vecteur environnement*. Vol. 33 No. 6 p. 33-51.
- Charbonneau, H., M. Hébert et A. Jaouich. 2001. Contenu en éléments fertilisants et qualité environnementale. Portrait de la valorisation agricole des matières résiduelles fertilisantes au Québec. Partie 2. *Vecteur environnement*. Vol. 34, No. 1 p. 56-60.
- Clapham, W.M. and L.M. Zibilske. 1992. Wood ash as a liming amendment. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 23 (11 et 12) 1209-1227.
- Coleman, P.M. 1995. Land application of wood ash : 12 years in northern New England. In: *Symposium on land application of wood-fired and combination boiler ashes*. 1995 NCASI meetings. Asheville, North Carolina. August 2-3. p. 4-6.

- CRAAQ. 2003. Guide de référence en fertilisation. 1^{re} édition. 297 p.
- Envir-Eau. 2003. Entreposage hivernal de cendres en champ. Impacts sur les eaux de surface (printemps 2002 et 2003). Préparé pour Les Produits B.C.C. inc. 29 p. + annexes.
- Environnement Canada. 2003. Inventaire canadien des gaz à effet de serre 1990-2001. Division des gaz à effet de serre. 23 p.
- Estes, G.O., J.R. Mitchell and M. Crispi. 1995. Production, characterization & agricultural value of wood ash. In: Residuals management and land stewardship. University of New-Hampshire. Research Report no. 132.
- Fritze, H., A. Smolander, T. Levula, V. Kitunen et E. Mälkönen. 1994. Wood ash fertilization and fire treatments in a Scots pine forest stand: Effects on the organic layer, microbial biomass, and microbial activity. *Biol. Fertil Soils*. 17: 57-63.
- Gardiner, G. 1949. La potasse, industrie passée à l'oubli. *Oval CIL* 18, no 2 : 17. Cité par Scott (1968)
- Giroux, M., M. Rompré, D. Carrier, P. Audesse et M. Lemieux. 1992. Caractérisation de la teneur en métaux lourds totaux et disponibles des sols du Québec. *Agrosolutions*, Vol. 5, No 2, p. 46-55.
- Guo, M. 2008. Black gold agriculture may revolutionize farming, curb global warming. Dans : 235th ACS National Meeting. April 6-10, 2008. New Orleans, LA.
- Hakkila, P. and H. Halaja. 1983. The technique of recycling wood and bark ash. *Folia Forestalia*, 552: 7-37.
- Hébert, M. 2006. Valorisation agricole des cendres de bois. Exclusions à des certificats d'autorisation pour des activités à faible risque environnemental. Projet pilote dans la région 02. Rapport final. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs.
- Hébert, M., G. Busset et E. Groeneveld. 2008. Bilan 2007 de la valorisation des matières résiduelles fertilisantes (MRF). Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs.
- Huber, D.M. et S. Wilhelm. 1988. The role of manganese in resistance to plant diseases. In: International symposium on manganese in soils and plants, Vol. 33, p. 155-173. <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsid t=7358300>
- Howard, J.L., D.F. Amos and W.L. Daniels. 1988. Phosphorus and potassium relationships in southwestern Virginia coal-mine spoils. *J. Environ. Qual.* 17 695-700.
- Huikari, O. 1989. FYTO-2H Remedial nutrients: a natural remedy for use in silviculture. *Biofuture Research Reports*. No 2, 24 p. Espoo, Finlande.
- Kopecky, M.J., N.L. Meyers and W. Wallo. 1995. Using wood ash as a soil amendment. University of Wisconsin-Extension. Cooperative Extension. 4 p.
- Krejsl, J. 1995. The effect of wood ash on wheat and green pea yields. In: Symposium on land application of wood-fired and combination boiler ashes. 1995 NCASI meetings. Asheville, North Carolina. August 2-3. p. 22-23.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*. Vol. 304, June 2004. p. 1623-1627.
- Laroche, L., L. Larouche et M. Giroux. 1997. Amendement du sol avec des cendres de bois. Projet No 23-817258-12006. Entente auxiliaire Canada-Québec. 27 p.
- Laverdière, M.R., S. Beauchemin et R.R. Simard. 1992. Évaluation des boues chaulées de stations d'épuration municipales comme amendement calcaire et des effets d'apports de boues sur la mobilité des éléments. Département des sols. Université Laval.
- Lickaz, J. 2002. Wood ash - An alternative liming material for agricultural soils. *Agri-Facts*, Practical information for Alberta's agriculture industry. AGDEX 534-2, Alberta Agriculture, Food and Rural Development. 6 p.
- Lundström, U.S., D.C. Bain, A.F.S. Taylor, P.A.W. Hees, *et al.* 2003. Effects of acidification and its mitigation with lime and wood ash on forest soil processes in southern Sweden. A joint multidisciplinary study. *Water, Air and Soil Pollution: Focus* 3: 167-188.
- Magdoff, F., R. Bartlett and D. Ross. 1983. Wood ash research project - Final report. Burlington Electric Dept. Dept. Plant and Soil Science. University of Vermont. Vermont.
- Min. Agr. de la province de Québec. 1932. L'emploi raisonné des engrais chimiques. Recommandations des mélanges les plus appropriés aux diverses cultures, par le Conseil provincial des engrais chimiques. Juillet 1932 à juillet 1933. 24 p.
- MDDEP. 2006. Questions et réponses sur des éléments soulevés par le documentaire Tabou(e)! sur la valorisation agricole des boues municipales. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. [http://www.mddep.gouv.qc.ca/matieres/articles/documentaire/tabou\(e\).asp#17](http://www.mddep.gouv.qc.ca/matieres/articles/documentaire/tabou(e).asp#17)
- MDDEP. 2007. Bilan annuel de conformité annuelle – secteur des pâtes et papiers 2006. http://www.mddep.gouv.qc.ca/milieu_ind/bilans/pates.htm
- MDDEP. 2008. Guide sur la valorisation des matières résiduelles fertilisantes, Critères de référence et normes réglementaires. Environnement Québec. 127 p. http://www.mddep.gouv.qc.ca/matieres/mat_res/fertilisantes/critere/index.htm
- MENV. 1997. Critères provisoires pour la valorisation des matières résiduelles fertilisantes. 1^{ère} édition.

- Morris, L.A., W.E. Miller, F.M. Sanders and J.F. Sanders. 1995. Characteristics of ash and alkaline pulp mill residues affecting their use as lime substitutes. In: Symposium on land application of wood-fired and combination boiler ashes. 1995 NCASI meetings. Asheville, North Carolina. August 2-3. p. 9-10.
- Ohlsson, K.E.A. 2000. Carbonation of wood ash recycled to a forest soil as measured by isotope ratio mass spectrometry. *Soil Science Society of America journal*. Vol. 64, p. 2155-2161.
- Ohno, T. and S. Erich. 1990. Effect of wood ash application on soil pH and soil test nutrient levels. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 32: 223-239.
- Olivier, N. 1993. Amendement du sol avec de la cendre de bois. Programme d'essais et expérimentation en agroalimentaire. Projet AE-69650530-026 (Agriculture et Agroalimentaire Canada).
- Olivier, N. 1997. Utilisation de la cendre de bois sur les sols acides de l'Abitibi-Est. Projet # 23-817201-09005 (Agriculture et Agroalimentaire Canada).
- Patterson, S.J., S.N. Acharya, J.E. Thomas, A.B. Bertschi and R.L. Rothwell. 2004. Barley biomass and grain yield and canola seed yield response to land application of wood ash. *Agron. J.* 96: 971-977.
- Poisson, G. et J. Vigneux. 1994. Évaluation de l'utilisation du Biofil^{MC} comme engrais. GSI Environnement.
- Porter, G. and P. Ocaya. 2008. Wood ash: Aliming and Nutrient Sour for Potato Production Systems. University of Maine. http://www.newea.org/Residuals_2008/08Res_Session2_Porter-Wood%20Ash_Nov08.pdf
- Robitaille, R. 1996. La cendre tient ses promesses. *Bio-bulle*. Déc.-janv. 1996. p. 11.
- Royer, I., R. Lalande, D. Angers et R. Simard. 2004. Étude comparative des produits chaulants sur les propriétés biologiques, chimiques et physiques des sols et le rendement des cultures de maïs-grain et de soja. Agriculture et Agroalimentaire Canada.
- Scott, A. 1968. Les sols, nature, propriétés, améliorations. Faculté d'agriculture de l'Université Laval, 372 p. Réévalué en 2003 par l'Association québécoise des spécialistes en sciences du sol.
- Seekins, B., D. Aksler, C. Orians and A. Russek. 1986. Usable waste products for the farm. Maine Department of Agriculture, Food, and Rural Resources. p. 12:1- 12:6.
- Siddique, R. 2008. Wood Ash. In: *Waste Materials and By-Products in Concrete*. Chap. 9. Springer. p. 303-321.
- Simard, R. R., S. Beauchemin et M. Laverdière. 1998. Limed sewage sludge effects on nutrient status and metal fractions in acidic soils. *Canadian journal of Soil Science*. Vol. 79. p. 173-182.
- Stewart, B.R. and W. L. Daniels. 1992. Physical and chemical properties of coal refuse from southwest Virginia. *J. Environ. Qual.* 21: 635-642.
- Sweeney, J.R. and P.D. Jones. 1995. Heavy metal whole body burdens of fauna inhabiting mill as recycling sites in southeastern coastal plain forests. In: *Symposium on land application of wood-fired and combination boiler ashes*. 1995 NCASI meetings. Asheville, North Carolina. August 2-3. p. 39-40.
- Tabi, M., L. Tardif, D. Carrier, G. Laflamme et M. Rompré. 1990. Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec. Entente auxiliaire Canada-Québec. 71 p.
- Vance, E. 1995. Opportunities for the beneficial use of boiler ashes as soil amendments. In: *Symposium on land application of wood-fired and combination boiler ashes*. 1995 NCASI meetings. Asheville, North Carolina. August 2-3. p. 1-3.
- Vigneux J. 1993. Sources, caractéristiques et potentiel d'utilisation des cendres de bois au Québec. Dossier d'opportunité : préparé pour le Centre québécois de valorisation de la biomasse (CQVB). CQV171-R.A27 56 p. (Courtage Alenag inc.).
- Vigneux, J. et G.M. Barnett. 2001. Évaluation de la cendre de bois de centrales thermiques comme amendement fertilisant et chaulant. 15^e Congrès annuel de l'AQSSS. Août 2001. La Pocatière.
- Vigneux, J. 1991. Évaluation de l'utilisation de la cendre de bois comme amendement agricole dans cinq cultures. GSI Environnement.
- Williams, T.M., B.R. Smith and C.A. Hollis. 1995. Soil and water chemistry following boiler bottom ash application. In: *Symposium on land application of wood-fired and combination boiler ashes*. 1995 NCASI meetings. Asheville, North Carolina. August 2-3. p. 37-38.
- Ziadi N., B. Gagnon, M. Chantigny et D. Angers. 2007. Effet à long terme de l'application répétée de biosolides papetiers et de résidus calciques en grande culture. Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures, Sainte-Foy, Québec. Compostage Mauricie inc. 50 p.