

# LA VALORISATION DES CENDRES EN AGRICULTURE : L'EXPÉRIENCE SUISSE

**S. Sinaj<sup>1</sup>, A. Maltas<sup>1</sup>, H. Kebli<sup>1</sup> and MP. Turpault<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Agroscope, Institut des Sciences en Production Végétale IPV, Route de Duillier 50, CP 1012, 1260 Nyon, Suisse; <sup>2</sup> Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers, INRA, 54280 Champenoux France.

## Introduction

L'usage traditionnel des cendres de bois en agriculture est tombé en désuétude au profit d'autres produits tels que la chaux et les engrais chimiques potassiques. Cependant, on note aujourd'hui un regain d'intérêt concernant le recyclage des cendres de bois en agriculture (Hébert et Breton, 2008 ; Vassilev *et al.* 2013a, b). Elles représentent une source non négligeable de magnésium (Mg), bore (B), phosphore (P) et surtout de calcium (Ca) et de potassium (K) (Maltas et Sinaj, 2014). De plus, en Suisse, les volumes de cendres ne vont cesser de croître dans les années à venir en raison de l'engouement pour la bioénergie et les énergies vertes.

Dans un contexte de raréfaction des ressources fossiles non-renouvelables et en l'absence de mines de phosphate et de potasse, il est important pour la Suisse de réduire à l'avenir sa dépendance vis-à-vis des engrais minéraux. C'est pourquoi, l'équipe de nutrition des plantes d'Agroscope à Changins étudie depuis 2011 les effets agronomiques de l'épandage des cendres sous foyer de la centrale Enerbois (Canton de Vaud, Suisse) (Maltas et Sinaj., 2011, 2013 & 2014). Ce travail est une synthèse de ces projets de recherche<sup>1</sup>.

La gestion efficiente de ces nouveaux sous-produits industriels représente un défi majeur pour le futur, et leur utilisation agricole offre des perspectives prometteuses; cependant les répercussions économiques, agronomiques et environnementales doivent encore être évaluées. Les cendres sous foyer de la centrale Enerbois ont été analysées pour deux types de combustible : du bois naturel et du bois en partie recyclé.

Les objectifs de ce travail étaient (i) de caractériser ces cendres sous foyer provenant de bois naturel et de bois en partie recyclé, et (ii) de tester leur utilisation comme fertilisant potassique en agriculture. Compte tenu des teneurs en éléments des cendres provenant de bois en partie recyclé (cf. résultats), seuls les résultats concernant l'essai avec les cendres issues de bois naturel est présenté.

## Matériel et méthodes

### *Echantillonnage et analyses chimiques des cendres*

La centrale Enerbois (Rueyres, Vaud) produit de l'énergie électrique et de la chaleur à partir de la combustion des sous-produits (écorces, plaquettes, résidus de souche). Elle produit deux types de cendres: (i) des cendres sous foyer, et (ii) des cendres volantes davantage chargées en éléments trace métalliques (ETM) (Maltas et Sinaj 2013). Lors de l'échantillonnage, les cendres sous foyer représentaient un tiers du total des cendres produites par la centrale. Seules les cendres sous foyer ont été utilisées dans cette étude. Les bois utilisés sont soit des résineux 100% naturels, non traités et prélevés en Suisse occidentale ; soit des résineux naturels mélangés avec du bois recyclé (environ 40% du volume total) issu de matériel de construction.

Les cendres issues de bois 100% naturel, ont été prélevées en mars 2011 alors que les cendres issues de bois en partie recyclé, ont été prélevées en mars 2014. Ces cendres ont ensuite été séchées à 40 °C et tamisées à 2 mm.

Les propriétés chimiques suivantes ont été mesurées: pH, capacité d'échange cationique (CEC), teneurs en matière organique (MO), teneurs totales en macroéléments, microéléments et ETM. La spéciation des macroéléments et des ETM a été analysée selon la méthode BCR (Rauret et al. 2000). Les analyses minéralogiques (diffractions aux rayons X) ont été effectuées par l'INRA de Nancy.

### *Dispositif de l'essai sur le tournesol*

Un essai en pot a été effectué en serre (Agroscope, Changins) pour étudier les effets agronomiques des cendres de bois naturel comme source de K sur le tournesol, une culture très exigeante en K. Chaque

pot contenait une plante et 2kg de sol sec. Le sol utilisé était un sol argileux (53,8% d'argile et 12,4% de sable) de pH neutre (6,7). L'humidité a été maintenue à environ 70% de la capacité au champ et la température de la serre variait entre 20 et 25°C. Quatre traitements ont été mis en place: (i) «Témoin», sans apport de cendres ni de nutriments chimiques; (ii) «Cendres» avec apport de K sous forme de cendres mais sans apport de nutriments chimiques, (iii) «NPMg-Cendres» avec apports de K sous forme de cendres et azote (N), P et Mg sous forme d'engrais chimiques et (iv) «NPMg-K» avec apport de N, P, Mg et K sous forme d'engrais chimiques. Les doses de cendres ont été calculées de manière à satisfaire les besoins en K du tournesol (Sinaj et al. 2009). Les engrais chimiques utilisés étaient du nitrate d'ammonium, du triple superphosphate, du chlorure de magnésium, du chlorure de potassium et de la chaux vive. A la récolte, la matière sèche (MS) totale du tournesol a été mesurée, et les teneurs en N, P, K, Mg, zinc (Zn), cuivre (Cu) et nickel (Ni) ont été analysées.

### Analyses statistiques

Les effets de l'apport de cendres ont été analysés à l'aide du test *t* de Student et du test *LSD* de Fischer avec le logiciel R 2.14.1 (R Development Core Team, 2011).

## Résultats et discussions

### Caractéristiques chimiques et minéralogiques des cendres

Les cendres issues de bois 100% naturel présentent un pH très alcalin, qui est à mettre en relation avec leur teneur élevée en Ca et Mg (tableau 1). Dans ces cendres, le Ca se présente majoritairement sous forme de carbonate [(calcite:  $\text{CaCO}_3$ )] et d'hydroxyle [portlandite:  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ], formes peu réactives qui expliquent l'action moins agressive et plus lente des cendres sur le pH des sols comparée à celle de la chaux vive (CaO) (Maltas et Sinaj, 2013).

Tableau 1: Caractéristiques chimiques et teneurs totales et disponibles en macro-microéléments et ETM des cendres provenant de bois naturel (cendres naturelles) et de bois recyclé (cendres recyclées).

	Cendres naturelles		Cendres recyclées		Seuil maximal autorisé en Suisse <sup>β</sup>
	Moyenne	CV (%)	Moyenne	CV (%)	
MO <sup>α</sup> (g/kg MS)	15,1	55	8,6	2	
pH-H <sub>2</sub> O	13,2	1	12,5	0	
CEC (cmol+/kg MS)	5,1	13	6,7	32	
<i>Macroéléments totaux (g/kg MS)<sup>ε</sup></i>					
Ca	281,3	2	188,3	1	
Mg	16,5	5	11,9	1	
K	67,4	9	45,5	1	
P	9,2	9	4,1	0,2	
N	0,07	27	<0,02	-	
<i>Microéléments et ETM totaux (mg/kg MS)<sup>ε</sup></i>					
Al	17300	7	33800	0,3	
Fe	12200	3	18500	1	
Mn	7600	7	3967	1	
B	147	12	73	9	
Zn	178	14	1328	49	400
Cu	110	21	459	47	100
Ni	52	7	43	4	30
Pb	21	53	448	19	120
Cd	<0,6	-	0,5	9	1
Hg	<0,02	-	-	-	1

<sup>β</sup> Selon l'annexe 2.6, ch. 2.2.1 de l'ORRChim (RS.814.81, 2011).

<sup>α</sup> MO, pH-H<sub>2</sub>O, CEC et N-total sont mesurés selon les méthodes standards suisse (FAL et al. 2004).

<sup>ε</sup> Les teneurs totales en macroéléments, microéléments et ETM ont été analysées par le laboratoire d'Analyse des Sols de l'INRA d'Arras ([www.lille.inra.fr/las](http://www.lille.inra.fr/las)).

Comme attendu, ces cendres sont une source importante de K et dans une moindre mesure de P et Mg (tableau 1). Elles apportent également un grand nombre de microéléments (en particulier d'aluminium (Al), fer (Fe), manganèse (Mn) et B) et d'ETM dont du Zn, Cu, Ni et plomb (Pb) (tableau 1). Les teneurs en Cu et Ni dépassent les seuils fixés dans l'ORRChim. Ces ETM, qui sont présents dans les sols suisses (Luster *et al.* 2006) et donc dans les bois, se concentrent dans les cendres lors de la combustion (Hébert et Breton 2008; Maltas et Sinaj 2013).

Les cendres provenant de bois en partie recyclé ont également un pH basique, mais ce pH est inférieur aux valeurs observées pour les cendres issues de bois 100% naturel. Les teneurs en macroéléments (Ca, Mg, K et de P) sont aussi nettement réduites. Par contre, les teneurs en Al et Fe sont plus importants et les teneurs en Mn et en B sont inférieures de près de 50%. De plus, les quantités d'ETM sont très élevées, particulièrement le Zn, Cu et Pb dont les valeurs dépassent largement les limites maximales autorisées en Suisse pour l'épandage d'engrais de recyclage sur les terres agricoles. Ces teneurs interdisent toute utilisation agricole de ces cendres. Les causes de ces différences sont dues aux matériaux de combustion (insertion de nouveaux matériaux source d'ETM), ainsi qu'à une modification du processus de combustion (rapports cendres sous foyer/cendres volantes, température de combustion).

### Spéciation des éléments contenus dans les cendres

La plupart des macroéléments cationiques (Ca, K et Mg) se trouvent dans les cendres sous foyer provenant de bois 100% naturel sous une forme facilement disponible (fraction 1, figure 1) ou potentiellement disponible (fractions 2 et 3) pour les cultures. La proportion de K facilement disponible (fraction 1) représente plus que 50% du K total.

Le P se trouve majoritairement sous une forme peu disponible (figure 1), probablement associé au Ca sous forme de phosphate de calcium du type tricalcique, qui se forme toujours à haute température lors de la combustion du bois

Le Zn, Cu, Ni et Pb sont quasiment absents de la fraction 1 (facilement disponible). Les risques relatifs aux ETM dans les cendres sont négligeables à court terme tant que le pH du milieu récepteur de ces produits reste neutre à basique. Cependant, sur le long terme, la question de la phytotoxicité des cendres demeure, en raison de possibles changements des conditions du milieu et surtout de pH du sol.

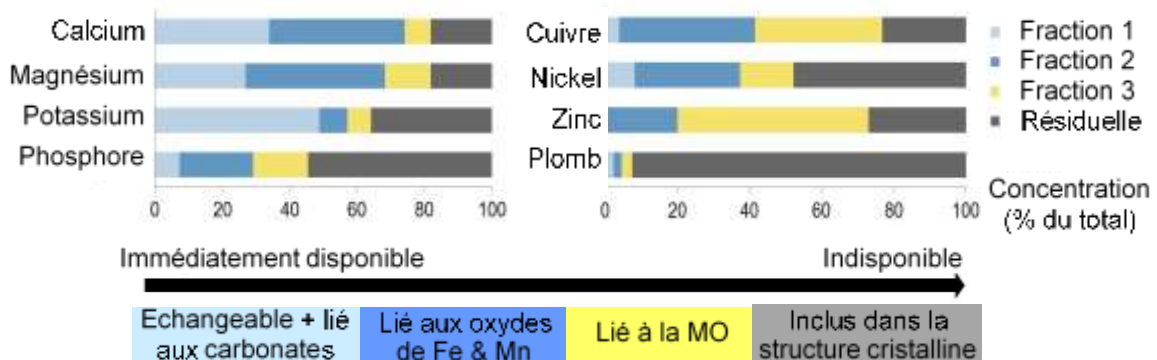


Figure 1: Spéciation des macroéléments et des ETM selon la méthode d'extractions séquentielles.

### Effet des cendres sur la biomasse du tournesol

Les résultats concernant la biomasse produite et les éléments absorbés par le tournesol sont indiqués dans le tableau 2. En présence de cendres, le tournesol produit plus de biomasse par rapport au traitement témoin, que ce soit en conditions limitantes en NPMgK ou non-limitantes. Cet effet positif a déjà été observé sur de nombreuses plantes cultivées : avoine, blé d'hiver, fétuque, épinard, pois, maïs, peuplier et soja (Demeyer et al. 2001). Cette augmentation de biomasse peut être reliée à l'effet chaulant des cendres sur ce sol faiblement acide et/ou à l'apport de microéléments.

Tableau 2: Effet des traitements sur la biomasse produite (matière sèche) et les quantités totales de macroéléments et d'ETM absorbés par le tournesol. Des lettres différentes indiquent des différences significatives selon le test LSD de Fischer ( $p < 0.05$ ).

Traitements	Biomasse	N	P	K	Ca	Mg	Zn	Cu	Ni
	g/plante								
<b>Témoin</b>	23.9 c	236.3 c	86.0 b	514.4 c	475.9 b	86.4 b	0.86 ab	0.34 a	0.11 a
<b>Cendres</b>	26.2 bc	257.7 c	96.8 b	704.2 b	514.2 b	58.8 b	0.64 b	0.39 a	0.06 b
<b>NPMg-K</b>	31.0 b	605.2 b	85.0 b	1124.5 a	1117.3 a	187.1 a	0.99 a	0.42 a	0.13 a
<b>NPMg-Cendres</b>	37.6 a	706.1 a	123.9 a	1110.1 a	1051.0 a	168.6 a	0.58 b	0.44 a	0.12 a

### Absorption des macroéléments et des ETM

L'absorption du K est plus élevée dans le traitement « Cendres » que dans le traitement « Témoin », suite à l'apport de K par les cendres. Par ailleurs, les quantités de K absorbé sont comparables quelle que soit la forme du K apporté (KCl dans le traitement «NPMg-K» et cendres dans le traitement «NPMg-Cendres»).

D'autre part, l'apport de cendres tend à améliorer l'absorption de N et P en conditions limitantes et surtout en conditions non limitantes en NPMgK (tableau 2), alors que les cendres sont pratiquement dépourvues de N. Cet effet bénéfique sur le prélèvement en N est vraisemblablement lié à l'action positive du chaulage sur la minéralisation de la MO du sol. L'effet positif des cendres sur l'absorption du P s'explique par (i) l'effet positif du chaulage sur la disponibilité du P dans les sols acides, généralement attribué à la dissolution des phosphates d'aluminium ( $AlPO_4$ ) et de fer ( $FePO_4$ ), et (ii) l'effet dû aux quantités significatives de P échangeable apportées par les cendres (figure 2).

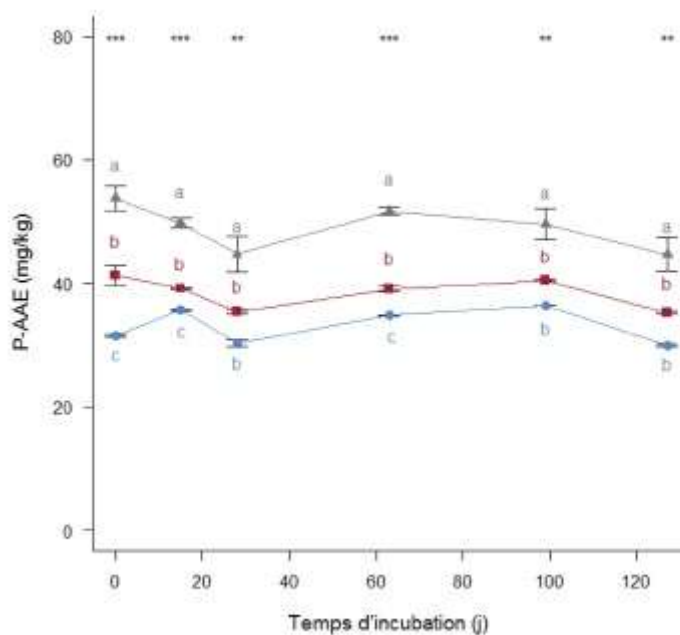


Figure 2: Effets de l'ajout de la chaux et des cendres sur les teneurs en P échangeable (extractible à l'acétate ammonium EDTA, P-AAE) dans le sol. Le sol a été incubé pendant 4 mois. Des lettres différentes indiquent des différences significatives selon le test LSD de Fischer (\*\*:  $p < 0.01$ ; \*\*\*:  $p < 0.001$ ).

En conditions limitantes en NPMgK, l'absorption du Mg par le tournesol diminue significativement en présence de cendres (tableau 2), malgré l'apport de Mg par les cendres (tableau 1). En présence d'amendement calcaire, une baisse de l'absorption du Mg par les plantes est généralement imputée à l'antagonisme entre l'absorption du Ca et du Mg (Marschner 2012, Halvin *et al.* 2005). Dans cet essai,

il n'a pas été constaté d'effet significatif des cendres sur les quantités de Ca absorbé (tableau 2). Un antagonisme avec l'absorption du K semble donc plus plausible.

En présence de cendres, le tournesol a absorbé moins de Zn et de Ni (tableau 2). Maltas et Sinaj (2013) ont montré que les teneurs dans le sol en Zn et Ni échangeables (extraits à l'AAE) diminuent lorsque le pH du sol augmente. En effet, les ETM sont adsorbés sur les oxydes de Fe et Al lorsque le pH du sol augmente, ce qui les rend indisponibles pour les cultures (Halvin et al. 2005). Le Zn et le Ni sont très sensibles à cet effet du pH alors que le Cu est peu affecté (Smith 1994). De plus, les cendres utilisées dans cette étude apportent de très petites quantités de Zn, Cu, Ni et Pb sous forme immédiatement disponibles (0,2 à 8% du total) alors que 73% du Cu et Zn, 44% du Ni et 5% du Pb contenus dans les cendres de bois naturel sont présents sous des formes lentement mais potentiellement disponibles en conditions réductrices ou oxydantes (figure 1).

### *Risques sur le long terme liés aux ETM*

La définition de quantités maximales d'ETM (kg/ha) apportées au sol permet d'éviter les risques d'accumulation à des niveaux toxiques sur le long terme. Pour éviter cela, la quantité maximale d'engrais de recyclage autorisée pour la fumure a été fixée à 25 t MS/ha en trois ans à répartir en une ou plusieurs applications (annexe 2.6, ch 3.2.2 de l'ORRChim). Sur la base des teneurs en K des cendres issues de bois 100% naturel (tableau 1) et des besoins des grandes cultures en K (Sinaj et al. 2009), la quantité de cendres nécessaire pour fertiliser une culture en K ne devrait pas excéder 5 t MS/ha. Or, les quantités d'ETM apportées par cette dose de cendres sont bien moindres que (i) les quantités maximales autorisées pour les engrais de recyclage et (ii) les quantités engendrées par un compost agricole classique utilisé à la dose maximale autorisée de 25 t MS/ha. Ce constat pose la question de la pertinence des teneurs maximales en ETM actuellement utilisées pour les cendres. Une modulation des teneurs maximales en fonction de la quantité de MS épandue permettrait de respecter les quantités d'ETM maximales autorisées tout en permettant la valorisation de nouvelles sources d'engrais naturels telles que les cendres sous foyer. D'autres études ont aussi mis en évidence que les cendres de bois utilisées occasionnellement et à des doses agronomiques ne présenteraient pas de risques environnementaux à court et long terme (Demeyer *et al.* 2001, Hébert et Breton 2008). Demeyer et al. (2001) soulignent que les besoins en amendement ou en K limitent généralement d'eux-mêmes la dose de cendres épandues.

## **Conclusions**

Les teneurs en macroéléments, microéléments et ETM sont fortement dépendantes du combustible utilisé pour produire les cendres (bois 100% naturel vs. bois en partie recyclé). Les cendres de bois 100% naturel présentent des teneurs en macroéléments particulièrement intéressantes, et contiennent des ETM mais sous une forme peu ou pas disponible. Ces cendres ne semblent donc pas présenter de risques pour les sols et les cultures et pourraient être utilisées comme engrais potassique sur les sols acides. Les cendres issues de bois en partie recyclé présentent des teneurs en macroéléments totaux plus faibles. Les teneurs en ETM sont, par contre, beaucoup plus importantes et empêchent leur utilisation en agriculture. Il serait intéressant de poursuivre les recherches en analysant les effets de ces cendres sur des sols neutres ou légèrement alcalins ainsi qu'au champ.

## **Bibliographie**

- Demeyer A., Voundi Nkana J.C. & Verloo M.G., 2001. Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview. *Bioresource Technology* 77, 287-295.
- Halvin J. L., Beaton J. D., Tisdale S. L. & Nelson W. L., 2005. *Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management*. Pearson Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ. 515 p.
- Hébert M. & Breton B., 2008. Recyclage agricole des cendres de bois au Québec – Etat de la situation, impacts et bonnes pratiques agroenvironnementales. *Agrosolutions* 19, 18-33.
- Luster, J., Zimmermann, S., Zwicky C. N., Lienermann, P., Blaser, P. (2006): Heavy metals in Swiss forest soils: Modification of lithogenic and anthropogenic contents by pedogenetic processes, and implications for ecological risk assessment. *Geological Society Special Publication*, 266: 63-78.
- Maltas A. & Sinaj S., 2011. Intérêts agronomiques des cendres humides de la centrale Enerbois. *Agroscope*. 26 p.

Maltas A. & Sinaj S., 2013. Effets des cendres de bois de la centrale Enerbois sur les propriétés du sol, le rendement des cultures et la qualité des récoltes. Agroscope. 63 p.

Maltas A. & S. Sinaj., 2014. Les cendres de bois: un nouvel engrais pour l'agriculture suisse. Recherche Agronomique Suisse 5 (6): 232-239.

Marschner, M., (2012) Mineral nutrition of higher plant, third edition, 889 p.

Rauret, G., Lopez-Sanchez, J.F. , Sahuquillo, A. , Barahona, E. , Lachica, M. , Ure, A.M., Davidson, C.M., Gomez, A., Luck, D., Bacon, J., Yli-Halla, M., Muntau H., Quevauviller, P. (2000): Application of a modified BCR sequential extraction procedure for the determination of extractable trace metal contents in a sewage sludge amended soil reference material, complemented by a three-year stability study of acetic acid and EDTA extractable metal content. Journal of Environmental Monitoring, 2: 228-233.

Sinaj S., Richner W., Flisch R., & Charles R., 2009. Données de base pour la fumure des grandes cultures et des herbages (DBF-GCH). Revue suisse d'Agriculture 41 (1), 1-98.

Smith S. R., 1994. Effect of soil pH on availability to crops of metals in sewage sludgetreated soils. I. Nickel, copper and zinc uptake and toxicity to ryegrass. Environmental Pollution 85 (3), 321–327.

Vassilev S, Baxter D., Andersen L. & Vassileva C., 2013a. An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase-mineral and chemical composition and classification. Fuel 105, 40-76.

Vassilev S, Baxter D., Andersen L. & Vassileva C., 2013b. An overview of the composition and application of biomass ash. Part 2. Potential utilization, technological and ecological advantages and challenges. Fuel 105, 19-39.

<sup>1</sup>Ce travail est une synthèse de recherches réalisées dans le cadre de plusieurs projets de recherche financés par l'entreprise Romande Energie SA, 53 rue de Lausanne, 1110 Morges.

Il a été publié dans :

Maltas A. & S. Sinaj., 2014. Les cendres de bois: un nouvel engrais pour l'agriculture suisse. Recherche Agronomique Suisse 5 (6): 232-239.

Sinaj S. et al. 2015. Wood ashes: a new fertilizer for agriculture. RAMIRAN 2015 – 16th International Conference. Rural-Urban Symbiosis, 8 - 10 September 2015, Hamburg, Germany.

Ce travail est aussi issu de deux rapports :

Maltas A. & Sinaj S., 2011. Intérêts agronomiques des cendres humides de la centrale Enerbois. Agroscope. 26 p.

Maltas A. & Sinaj S., 2013. Effets des cendres de bois de la centrale Enerbois sur les propriétés du sol, le rendement des cultures et la qualité des récoltes. Agroscope. 63 p.