Potentiel agronomique des cendres issues de bois recyclé

Hedi Kebli, Alexandra Maltas et Sokrat Sinaj
Agroscope, 1260 Nyon, Suisse
Renseignements: Sokrat Sinaj, e-mail: sokrat.sinaj@agroscope.admin.ch

Cultures de ray-grass mises en place lors de l'essai en serre.

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 pour le recyclage des cendres de bois en agriculture (Hébert et Breton 2008; Vassilev *et al.* 2013). Elles représentent une source non négligeable de magnésium (Mg), de bore (B), de 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 sa dépendance vis-à-vis des engrais chimiques. Les études menées depuis 2011 par l'équipe de nutrition des plantes d'Agroscope à Changins ont donné des résultats encourageants (Maltas et Sinaj 2011, 2013 et 2014). Cette étude apporte une expertise nouvelle sur les ré-

Résumé

L'effet des cendres de bois comme engrais potassique a été testé en serre sur le ray-grass anglais. Les cendres, issues de bois recyclé, ont été épandues, associées ou non avec des engrais organiques, sur deux types de sol: un sol acide pauvre en potassium disponible et un sol alcalin normalement pourvu. Les cendres étudiées étaient riches en calcium et potassium. Elles contenaient également de fortes teneurs en micro-éléments et en éléments traces métalliques comme le zinc, le cuivre et le plomb, teneurs pouvant dépasser les seuils actuellement autorisés en Suisse. Par rapport à un autre type de cendres précédemment testé, les cendres de cette étude contenaient davantage d'éléments traces métalliques, et le potassium présent était moins disponible. Les cendres ont permis une production de biomasse du ray-grass équivalente à l'engrais de référence (KCl) sur sol acide. L'utilisation des cendres sur un sol alcalin normalement pourvu en potassium disponible semble moins pertinente. Les résultats obtenus dans cet essai montrent l'importance de la qualité des cendres utilisées qui dépend de l'origine du bois (naturel ou recyclé) et du processus de combustion.

percussions agro-environnementales de l'utilisation des cendres de grille de la centrale Enerbois. Un nouveau type de cendre est évalué: des cendres de grille issues de bois en partie recyclé. Ces cendres ont été granulées et associées ou non à des engrais organiques.

Matériel et méthodes

Echantillonnage et analyses des cendres et fumiers

La centrale Enerbois (Rueyres, Vaud) produit de l'énergie électrique à partir de la combustion des sous-produits (écorces et plaquettes) de la scierie voisine, la scierie Zahnd. Elle utilise également du bois issu de matériel de construction. La centrale produit deux types de cendres: (i) cendres de grille et (ii) cendres volantes davantage chargées en éléments trace métalliques (ETM) (Maltas et Sinaj 2013). Dans cette étude, les cendres de grille ont été prélevées en février 2014, tamisées à 3 mm puis granulées par l'entreprise MEAC (http://www.meac.fr) pour former un engrais potassique facilement utilisable par les agriculteurs. Ces cendres granulées ont été utilisées en présence ou non d'engrais organique. L'engrais organique choisi était du fumier de volaille («Optisol Universel» produit par l'entreprise Optisol). Les propriétés chimiques suivantes des cendres et des fumiers de volaille ont été mesurées: pH-H_2O, capacité d'échange cationique (CEC) par cobaltihexamine, teneurs en matière organique par combustion sèche. Les teneurs totales en macro-éléments, micro-éléments et ETM ont été analysées après mise en solution dans les acides fluorhydrique et perchlorique (NF X 31–147; Ciesielski *et al.* 1997). Les teneurs en éléments disponibles ont été analysées par extraction au bicarbonate de sodium pour le phosphore (P) (Olsen *et al.* 1954), par extraction au chlorure de cobaltihexammine pour le potassium (K), calcium (Ca), magnésium (Mg) (NF X 31–130; Orsini et Remy 1976) et au $CaCl_2$ pour les microéléments et ETM: zinc (Zn), cuivre (Cu), nickel (Ni), plomb (Pb) (NEN 5704; Houba *et al.* 1990).

Tableau 1 | Description des huit procédés de fertilisation

Procédés	Présence d'engrais organique	Fertilisant P	Fertilisant K	Amendement calcaire
1: TSP[1]	Non	TSP	Non	Non
2: TSP-KCl			KCl	Non
3: TSP-KCl-Chaux			KCl	Chaux vive
4: TSP-Cendres			Cendres	Cendres
5: Fumier	Oui	Fumier de volaille	Fumier	Non
6: Fumier-KCl			Fumier + KCl	Non
7: Fumier-KCl-Chaux			Fumier + KCl	Chaux vive
8: Fumier-Cendres			Fumier + Cendres	Cendres

[1] Triple superphosphate.

Dispositif de l'essai

Les engrais à base de cendres ont été testés en serre sur le ray-grass anglais (*Lolium perenne* L). La température de la serre a été maintenue entre 18 et 25 °C. Deux types de sol de pH et de texture contrastés ont été utilisés: un sol de texture limono-argileuse (42,6% limon et 31,4% argile) avec un pH légèrement alcalin (pH-H_2O=8,1) et normalement pourvu en K disponible (K-AAE: 0,154 g/kg) et un sol de texture sablo-limoneuse (52,6% sable et 29,9% limon) avec un pH légèrement acide (pH-H_2O=5,6) et pauvre en K disponible (K-AAE: 0,102 g/kg). Chaque pot contenait 1,25 kg de sol sec pour le sol acide, et 1,30 kg de sol sec pour le sol alcalin. L'humidité du sol a été maintenue avec de l'eau déminéralisée à 70% de la capacité au champ mesurée à l'aide de tensiomètres.

Huit procédés, différents par la forme du K et du P apportés et par la présence ou non d'amendement calcaire, ont été comparés (tabl. 1).

Le ray-grass a été fertilisé selon les normes suisses pour les prairies intensives dont les besoins s'élèvent respectivement pour le N, P, K, Mg à 150, 48, 270 et 45 kg/ha (Sinaj *et al.* 2009), soit à 60, 19, 108 et 16 mg/kg de sol en considérant une profondeur d'incorporation des engrais de 20 cm et une densité apparente de 1,4 g/cm³. Lorsque la chaux vive (CaO) a été appliquée, la dose a été calculée de manière à apporter la même valeur neutralisante que dans le procédé «cendres» correspondant (procédés 4 ou 8). Les autres engrais chimiques utilisés étaient du nitrate d'ammonium (NH_4NO_3) et de la kiesérite ($MgSO_4 \cdot H_2O$). Chaque procédé a été répliqué quatre fois. Mis à part l'azote, les engrais ont été broyés finement et apportés ensemble en une seule fois avant le semis, en mélangeant à la main le sol avec les engrais. L'azote a été réparti en trois apports, soit un apport après chacune des trois premières coupes.

L'essai a duré 12 semaines. Le ray-grass a été fauché toutes les trois semaines, pour un total de quatre coupes. Après chacune des coupes, la biomasse a été mesurée ainsi que ses teneurs totales en macro-éléments, micro-éléments et ETM: N, P, K, Ca, Mg, Cu, Zn, Cd, Ni, Pb.

La même expérience a été menée sur des pots sans plante afin d'analyser la libération dans le sol des macro-éléments, micro-éléments et ETM. L'incubation a eu lieu dans des pots contenant 200 g de sol sec sur la même période, dans la même serre et pour les deux mêmes types de sols. Les sols issus de l'incubation ont été analysés un jour après ajout des engrais, puis en même temps que la dernière coupe du ray-grass selon les mêmes méthodes décrites précédemment.

Analyses statistiques

Les effets de la fertilisation et du type de sol ont été évalués à l'aide d'analyses de variances (ANOVA) avec le logiciel R 3.1.1 (R Development Core Team, 2014). Le test de Duncan a été utilisé pour déterminer les différences significatives ($p < 0,05$) entre les procédés.

L'efficacité relative agronomique (ERA) a aussi été calculée selon l'équation suivante:

ERA (%) = (K prélevé par la plante fertilisée avec l'engrais testé – K prélevé par la plante sans engrais K) × 100/ (K prélevé par la plante avec l'engrais de référence – K prélevé par la plante sans engrais K).

Tableau 2 | Caractéristiques chimiques et teneurs totales et disponibles en macro-éléments, micro-éléments et ETM des cendres et des fumiers de volaille prélevés en 2014. Quatre échantillons par type d'engrais ont éte analysés.

	Cendres		Fumier de volaille		Seuil maximal autorisé en Suisse[1]
	Moyenne	CV (%)	Moyenne	CV (%)	
MO (g/kg MS)	8,6	2	586	4	
pH-H_2O	12,5	–	8,9	1	
CEC (cmol+/ kg MS)	6,7	32	28,0	9	
Macro-éléments (g/kg MS)					
Ca-total	188,3	1	89,3	1	
Ca-disponible	18,2	2	1,3	8	
Mg-total	11,9	1	6,7	4	
Mg-disponible	<0,001	–	1,1	1,4	
K-total	45,5	1	27,5	9	
K-disponible	3,5	8	0,3	11	
P-total	4,1	0,2	23,2	2	
P-disponible	0,2	2	3,4	5	
N-total	<0,02	–	25,9	6	
Micro-éléments et ETM (mg/kg MS)					
Al-total	33800	0,3	1300	6	
Fe-total	18500	1	1800		
Mn-total	3967	1	–	–	
B-total	73	9	–	–	
Zn-total	1328	49	684	7	400
Zn-disponible	0,79	6	13,9	16	
Cu-total	459	47	70	9	100
Cu-disponible	0,14	8	9,7	30	
Ni-total	42,5	4	7,2	12	30
Ni-disponible	0,07	0,8	1,0	26	
Pb-total	448,3	19	1,3	41	120
Pb-disponible	8,8	32			
Cr-total	128,7	3	14,9	4	
Cd-total	0,5	9	0,4	6	1

[1] Selon l'annexe 2.6, ch. 2.2.1 de l'ORRChim (RS.814.81, 2011).

Résultats et discussion

Propriétés des cendres et des fumiers

Les cendres utilisées dans cette étude ont un pH très basique (tabl. 2) en raison des teneurs élevées en Ca et Mg sous forme d'oxydes et d'hydroxydes (Maltas et Sinaj 2014). Les cendres sont une source de K et P et les micro-éléments aluminium (Al) et fer (Fe) sont également apportés en grande quantité. De plus, les quantités d'ETM sont élevées, particulièrement le Zn, le Cu et le Pb dont les valeurs dépassent les limites maximales autorisées en Suisse pour l'épandage d'engrais de recyclage sur les terres agricoles (tabl. 2).

Les caractéristiques chimiques des cendres de cette étude diffèrent de celles observées sur des cendres de 2011 par Maltas et Sinaj (2014): les teneurs en K total sont plus faibles, les teneurs en Mn et B ont diminué de près de 50% et les teneurs en Al, Zn et ETM sont plus élevées, surtout celles de Pb. On observe aussi une très forte diminution de la solubilité du K entre les cendres de 2011 et celles de cette étude. Le K disponible représente environ 8% du K total, alors que, pour les cendres de 2011, il représentait environ 36%.

Maltas et Sinaj (2014) avaient déjà reporté une détérioration de la qualité des cendres de grille d'Enerbois entre 2011 et 2012. Cette tendance s'est donc poursuivie en 2014. Les causes sont (i) une modification du processus de combustion (rapport cendres de grille/cendres volantes, température de combustion) et (ii) des matériaux de combustion différents (rapports écorces/plaquettes et insertion de nouveaux matériaux potentiellement pollués). En 2011, les cendres utilisées provenaient d'un combustible «propre», c'est-à-dire de bois 100% naturel (écorce, plaquette, résidus de souche), alors que les cendres de cette étude étaient issues d'un mélange de bois contenant environ 40% de bois recyclé.

Le fumier de volaille est une source importante de matière organique et de macro-éléments, notamment de N total, P total et K disponible. Il apporte également beaucoup de Zn, ce qui est conforme aux valeurs trouvées dans la littérature (670 mg/kg selon Sahin *et al.* 2011; 158 à 2300 mg/kg selon Bolan *et al.* 2004).

Effet sur la production de biomasse du ray-grass

L'effet des procédés sur la production de biomasse du ray-grass anglais dépend du type de sol. Sur le sol alcalin, aucun effet significatif des procédés n'est observé, alors que sur le sol acide, on note un effet positif de l'ajout de K (fig. 1).

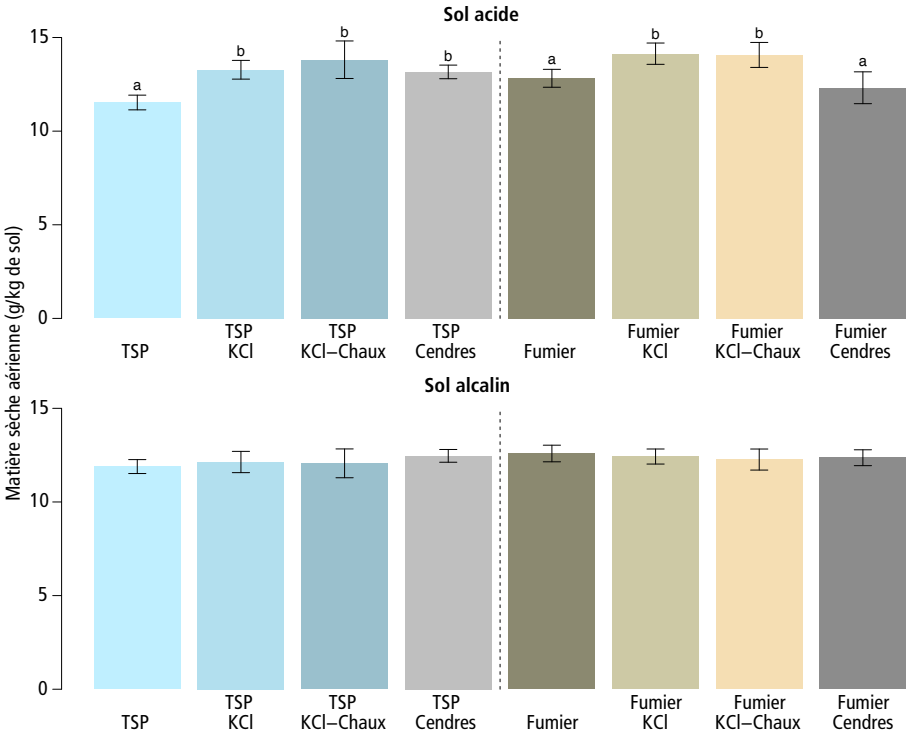

Figure 1 | Quantité totale de matière sèche aérienne produite (total des quatre coupes) selon les différents procédés sur le sol acide et le sol alcalin. Pour chacun des deux types d'apport du P (TSP ou fumier), des lettres différentes indiquent des différences significatives (p<0,05).

Sur le sol acide et sans apports organiques, la biomasse du ray-grass est augmentée en présence de cendres par rapport au témoin (TSP). Cette augmentation est équivalente à celle obtenue avec l'engrais minéral de référence (TSP-KCl). Cet effet n'est pas observé en présence d'apports organiques (Fumier vs. Fumier-Cendres), ce qui est vraisemblablement dû à l'apport de macro et microéléments par le fumier. Par contre, l'engrais minéral de référence (Fumier-KCl) a un effet positif sur la production de biomasse comparativement au témoin et au procédé avec cendres, en raison d'une moindre disponibilité du K des cendres (cf. ci-dessous).

Le sol alcalin étant déjà normalement pourvu en K et bien pourvu en Ca total et disponible (respectivement 27,2 et 3,84 g/kg de Ca) comparativement au sol acide (respectivement 3,7 g/kg et 0,78 g/kg), l'ajout de K et de Ca sous forme minérale ou de cendres n'améliore pas la production de matière sèche du ray-grass.

Effet sur les teneurs en éléments du ray-grass

Les teneurs en K du ray-grass sont inférieures sur sol acide par rapport au sol alcalin (tabl. 3), ce dernier étant mieux pourvu en K disponible. Brod *et al.* (2012) ont aussi montré que les effets de la fertilisation potassique des cendres étaient masqués par la capacité du sol à fournir du K disponible pour le ray-grass lors d'un essai en serre. Nos résultats sont aussi en accord avec ceux de Kahn *et al*. (2014) qui ont montré que dans 76% des 2121 essais de courte durée mesurés au champ, la fertilisation en K (KCl) était inefficiente pour augmenter la productivité des cultures agricoles à court terme, à cause de la facilité de prélèvement du K du sol par les cultures respectives. Le K ne semble donc pas limitant sur le sol alcalin. Cependant, dans les deux types de sol, le ray-grass présente des teneurs plus faibles en K avec les cendres qu'avec le KCl (tabl. 3 et fig. 2). Ceci est vraisemblablement dû à une moindre disponibilité de cet élément. En effet, les teneurs en K disponible dans le sol à la fin de l'expérience sont significativement inférieures en présence de cendres par rapport au procédé KCl: de 16% dans le sol alcalin et jusqu'à 32% dans le sol acide (données de l'expérience d'incubation des sols non présentées).

L'effet des procédés de fertilisation sur les teneurs en ETM, micro-éléments et macro-éléments du ray-grass dépend du type de sol et du type de P apporté (TSP ou fumier) (fig. 2). Sur sol acide, on n'observe pas d'effet significatif des procédés sur les teneurs en macro-éléments (P et Mg), alors que sur sol alcalin, les teneurs en P, Mg et Ca diminuent significativement avec l'apport de cendres (p<0,05). Ces effets sont dus à une réduction de la disponibilité de ces éléments dans le procédé avec cendres. En effet, dans l'essai d'incubation des sols en serre, les teneurs en P et Mg disponibles dans le sol alcalin étaient plus faibles en présence de cendres comparativement aux procédés avec KCl combiné ou non avec la chaux (données non présentées). Ces faibles teneurs en P et Mg disponibles dans le sol n'ont pas été observées dans le sol acide. Cela s'explique probablement par le fait qu'en sol alcalin, le P se lie au Ca et au Mg présents dans les cendres (tabl. 2) et dans le sol (Ca = 27,2 g/kg pour le sol alcalin, Ca = 3,7 g/kg pour le sol acide) (Hemwall 1957; Marschner 2011).

Tableau 3 | Teneurs moyennes en K des parties aériennes du ray-grass (moyenne des quatre coupes). Pour chacun des deux types d'apport du P (TSP ou fumier), des lettres différentes indiquent des différences significatives (p<0,05) selon le test de Duncan. Les probabilités (p-value) des effets globaux (ANOVA) des procédés, des effets du sol et de l'interaction sol/procédés sont également indiquées (*: p<0,05, **: p<0,01, ***: p<0,001).

	sol acide		sol alcalin			
Procédés	**Teneur moyenne en K (g/kg MS)**				**sol**	**procédés/sol**
TSP	17,4	c	30,6	b		
TSP-KCl	24,0	a	33,7	a		
TSP-KCl-Chaux	22,5	ab	32,8	a		
TSP-Cendres	21,0	b	30,7	b		
p-value		***		***	***	*
Fumier	19,1	b	31,0	a		
Fumier-KCl	22,3	a	32,3	a		
Fumier-KCl-Chaux	22,0	a	33,6	a		
Fumier-Cendres	21,2	a	29,5	a		
p-value		***		*0,08*	***	*0,14*

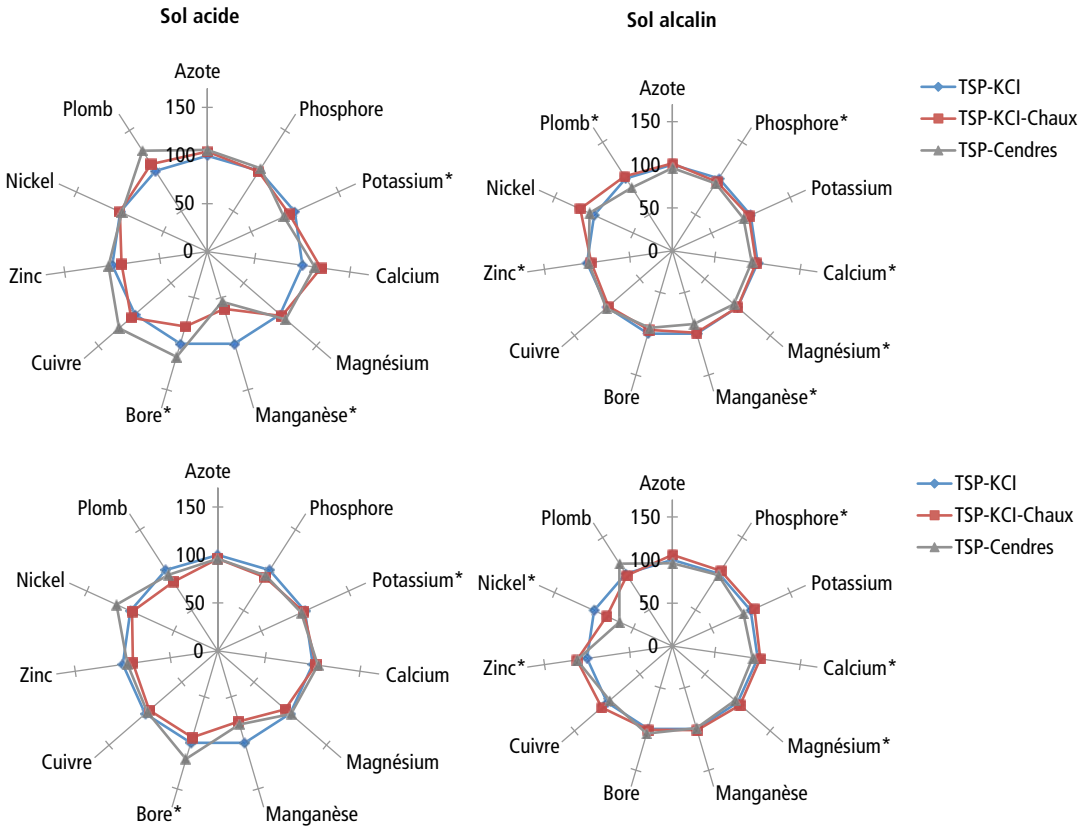

Figure 2 | Teneurs en macro-éléments et micro-éléments du ray-grass anglais (moyennes des quatre coupes) selon la fertilisation et le type de sol. Les résultats sont exprimés en valeur relative par rapport au procédé KCl. Les astérisques indiquent des différences significatives ($p < 0{,}05$) entre les procédés.

Sur sol acide, la teneur en B du ray-grass est plus élevée en présence de cendres qu'en cas d'apport de KCl. L'apport de B par les cendres (tabl. 2) et le pH acide du sol sont probablement responsables de cet effet (Marschner 2011). La baisse de Mn absorbé par le ray-grass en sol acide et en présence d'amendements basiques est expliquée par la disponibilité du Mn qui diminue avec l'augmentation de pH du sol (Marschner 2011).

Sur sol acide, les cendres n'entrainent pas d'absorption supplémentaire des ETM par rapport au KCl, que ce soit avec ou sans apport organique. Les cendres apportent de fortes concentrations en ETM (tabl. 2) mais ces éléments ne sont pas prélevés par le ray-grass car les ETM apportés dans les cendres sont peu disponibles (Maltas et Sinaj 2013). De plus, le chaulage diminue la disponibilité des ETM déjà présents dans le sol (Demeyer *et al.* 2001), comme le confirment les résultats des incubations de sol (données non présentées). Sur sol alcalin (plus chargé en Zn que le sol acide: 90 mg/kg Vs. 51 mg/kg), l'ajout d'engrais organique riche en Zn peut expliquer l'augmentation des teneurs du ray-grass dans les procédés Fumier-KCl-Chaux et Fumier-Cendres.

Efficacité relative des engrais potassiques

L'efficacité relative agronomique (ERA) d'un engrais potassique indique la proportion de K absorbée par les plantes en présence de cet engrais comparativement à un engrais de référence (TSP-KCl ou Fumier-KCl). L'ERA a été calculée seulement sur sol acide car c'est sur ce sol que les procédés ont un effet sur la biomasse du ray-grass. Lorsque le P est apporté sous forme minérale (TSP), l'ERA du procédé avec les cendres est de 64,7%, et de 33,3% lorsque le P est apporté sous forme de fumier (tabl. 4).

L'ERA des cendres est donc moindre que celle du KCl et du KCl-Chaux, que le P soit apporté sous forme minérale ou de fumier. Ceci est dû à la disponibilité du K présent dans les cendres. En effet, le K disponible dans les cendres représente seulement 8% du K total (tabl. 2).

Le pouvoir fertilisant des cendres est donc plus bas que celui du KCl, mais il est compensé par l'apport d'autres macro-éléments (Mg) et micro-éléments bénéfiques à la croissance du ray-grass (Cu). C'est pourquoi, sur le sol acide et sans apport de P sous forme de fumier, la biomasse produite est équivalente avec le KCl et les cendres

Tableau 4 | Efficacité relative agronomique (ERA) des cendres et du mélange KCl-Chaux pour le ray-grass anglais cultivé sur sol acide

	TSP		Fumier	
	Cendres	KCl-Chaux	Cendres	KCl-Chaux
ERA	64,7%	78,7%	33,3%	92,6%

(fig. 1). Par contre, en présence d'engrais organiques, l'intérêt des cendres diminue car le fumier apporte également des macro-éléments et micro-éléments bénéfiques à la croissance du ray-grass.

Conclusions

L'effet agronomique des cendres sur le ray-grass est globalement équivalent à celui de l'engrais de référence KCl. Complétées par un apport de P sous forme chimique (TSP), les cendres pourraient donc être utilisées comme alternative aux engrais potassiques classiques sur sol acide. Cependant, les teneurs en ETM dépassent les seuils actuellement autorisés en Suisse. D'autre part, les cendres issues de bois recyclé utilisées dans cette étude semblent moins intéressantes lorsqu'elles sont associées au fumier de volaille ou épandues sur un sol déjà normalement pourvu en K. En effet, les éléments apportés par le fumier annulent les effets bénéfiques des cendres. Ces résultats sont également à mettre en relation avec la dégradation de la qualité des cendres d'Enerbois utilisées dans cette étude, en raison d'une modification de la composition du bois brûlé et du processus de combustion qui ont réduit les teneurs en K (totales et disponibles) par rapport aux cendres analysées dans une étude précédente (Maltas et Sinaj 2014). ■

Remerciements

Les auteurs remercient l'entreprise Romande Energie et Micarna pour le co-financement de cette étude.

Riassunto

Potenziale agronomico delle ceneri ottenute dal legno riciclato

L'effetto delle ceneri del legno come concime potassico è stato testato in serra sul loietto perenne. Le ceneri ottenute dal legno riciclato sono state sparse, in associazione oppure no con concimi organici, su due tipi di suolo: un suolo acido povero di potassio disponibile e un suolo alcalino normalmente approvvigionato in tale elemento. Le ceneri analizzate erano ricche di calcio e potassio. Contenevano inoltre elevati tenori di microelementi e di tracce di elementi metallici quali zinco, rame e piombo; in alcuni casi tali tenori oltrepassavano le soglie attualmente autorizzate in Svizzera. Rispetto a un altro tipo di ceneri precedentemente testato, quelle del presente studio contenevano più tracce di elementi metallici e il potassio presente aveva una minore disponibilità. Le ceneri hanno consentito una produzione di biomassa del loietto perenne equivalente al concime di riferimento (KCl) su suolo acido. L'impiego di ceneri su un suolo alcalino normalmente approvvigionato in potassio disponibile sembra meno pertinente. I risultati ottenuti mostrano l'importanza della qualità delle ceneri utilizzate correlata all'origine del legno (naturale o riciclato) e al processo di combustione.

Summary

Agronomic potential of ash from recycled wood

The effect of wood ash as a potash fertiliser was tested on perennial ryegrass in a greenhouse. The ash, which was from recycled wood, was spread – in some cases in combination with organic fertilisers – on two types of soil: an acid soil low in available potassium, and an alkaline soil with normal supplies of potassium. The ash studied was rich in calcium and potassium. It also contained high levels of microelements and trace metals such as zinc, copper and lead – levels which might exceed thresholds currently authorised in Switzerland. Compared to another type of previously tested ash, the ash in this study contained more trace metals, and the potassium therein was less available. The ash enabled the production of ryegrass biomass equivalent to that of the reference fertiliser (KCl) on an acid soil. The use of ash on an alkaline soil with normal supplies of available potassium appears to be less appropriate. The results obtained in this test show the importance of the quality of the ash used, which depends on the origin of the wood (natural or recycled) and on the combustion process.

Key words: wood ash, recycling, disponibility of elements, fertilization.

Bibliographie

- Bolan N. S., Adriano D. C. & Mahimairaja S., 2004. Distribution and bioavailability of trace elements in livestock and poultry manure by-products. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* **34**, 291–338.
- Brod E., Haraldsen T. K. & Breland T. A., 2012. Fertilization effects of organic waste resources and bottom wood ash: results from a pot experiment. *Agricultural and Food Science* **21**, 332–347.
- Ciesielski H., Proix N. & Sterckeman T., 1997. Détermination des incertitudes liées à une méthode de mise en solution des sols et sédiments par étude interlaboratoire. *Analusis* **25**, 188–192.
- 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.
- Frossard E., Julien P., Neyroud J.-A. & Sinaj S., 2004. Le phosphore dans les sols. Etat de la situation en Suisse, Cahier de l'environnement n°368. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne. 180 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.
- Hemwall J. B., 1957. The fixation of phosphorus by soils. *Advances in Agronomy* **9**, 95–112.
- Khan S., Mulvaney R., Ellsworth T., 2014. The potassium paradox: Implications for soil fertility, crop production and human health. *Renewable Agriculture and Food Systems* **29**, 3–27.
- 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 H., 2011. Marschner's mineral nutrition of higher plants, Academic press.
- Olsen S.R., Cole C.V., Watanabe F.S., Dean L.A., 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. *USDA circular* **939**, 1–19.
- RS.814.81. 2011. Ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques (ORRChim). 18 mai 2005 (Etat le 1er juillet 2011).
- Sahin O., Taskin M. B., Kadioglu Y. K., Inal A., Pilbeam D. J. & Gunes A., 2014. Elemental composition of pepper plants fertilized with pelletized poultry manure. *Journal of Plant Nutrition* **37**, 458–468.
- 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.
- Vassilev S., Baxter D., Andersen L. & Vassileva C., 2013. An overview of the composition and application of biomass ash. Part 2. Potential utilization, technological and ecological advantages and challenges. *Fuel* **105**, 19–39.