



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'économie,
de la formation et de la recherche DEFR

Agroscope

La valorisation des cendres en agriculture : *l'expérience suisse*

S. Sinaj, A. Maltas, H. Kebli & MP. Turpault

18-19/11/2015



Avec la participation de





○ La demande croissante en énergie se double aujourd'hui de l'utilisation accrue de ressources renouvelables telle que la biomasse. La combustion du bois génère des cendres, qui sont actuellement mises à la décharge parce que leurs teneurs en éléments traces métalliques dépassent les seuils autorisés en Suisse pour l'épandage d'engrais de recyclage sur des terres agricoles. Cette élimination constitue une perte importante d'éléments fertilisants naturels, alors même que les quantités de cendres ne cessent de croître en conséquence de l'intérêt porté pour les énergies vertes.

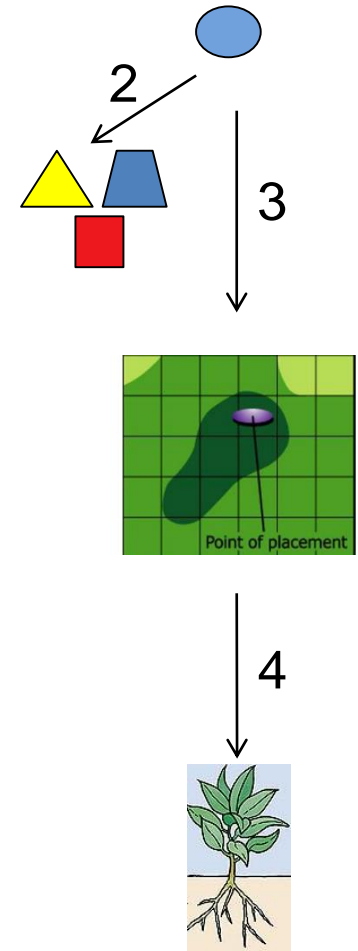
○ A la demande de l'entreprise Romande Energie, l'équipe de nutrition des plantes d'Agroscope à Changins a réalisé une étude pour évaluer précisément les répercussions agronomiques et environnementales de l'utilisation agricole de ces sous-produits industriels.

Objectifs et plan



1. Caractérisation des cendres sous foyer & identification de l'origine des ETM contenus dans ces cendres.
2. Spéciation des macroéléments (P, K, Ca, Mg) et des ETM (Cu, Ni, Zn) contenus dans ces cendres.
3. Dynamique de libération dans le sol des macroéléments et des ETM contenus dans ces cendres.
4. Effet des cendres sur le rendement et la qualité de la production agricole.

Cendres sous foyer



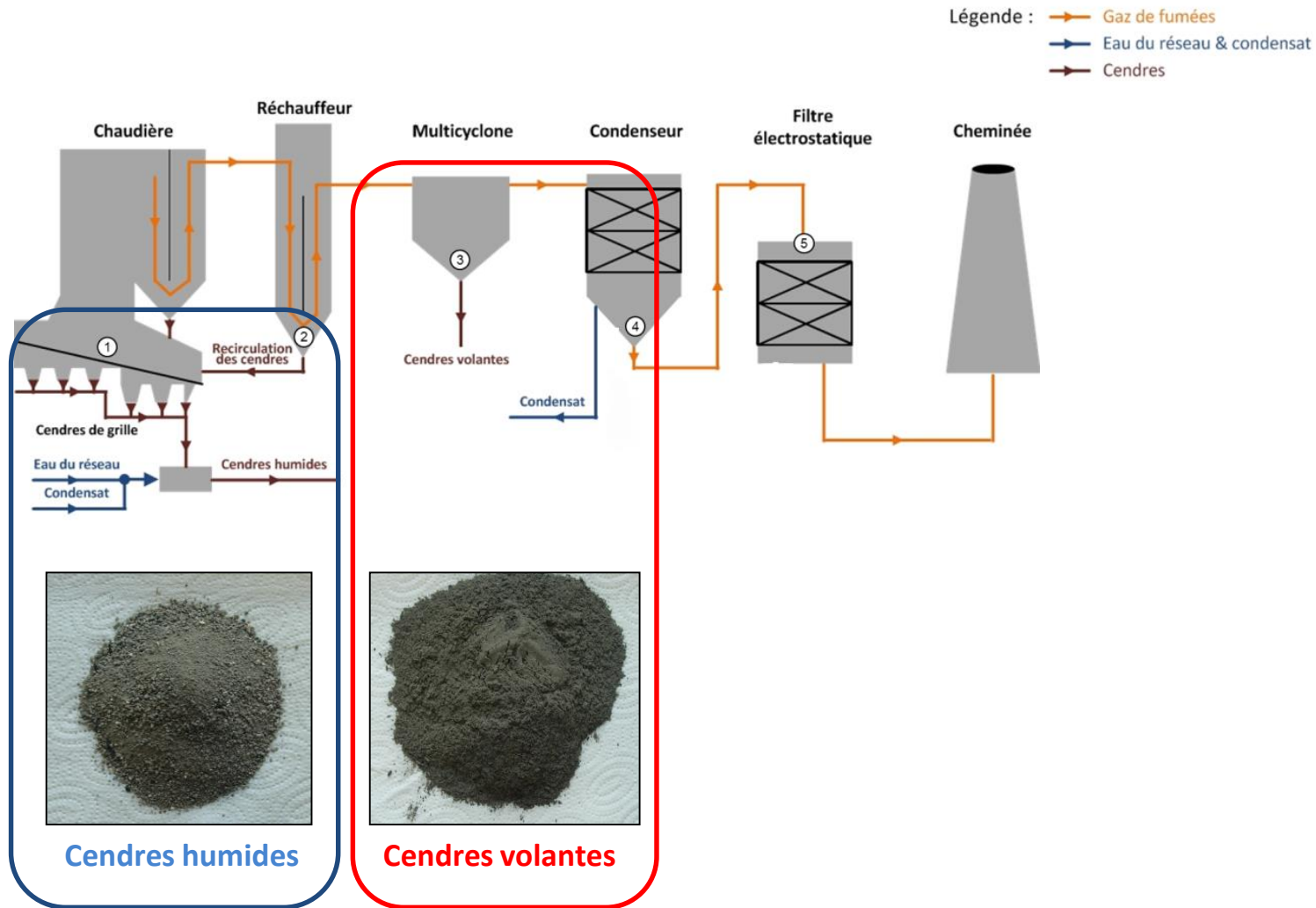
Composition chimique



Centrale Enerbois



Ecorces & plaquettes



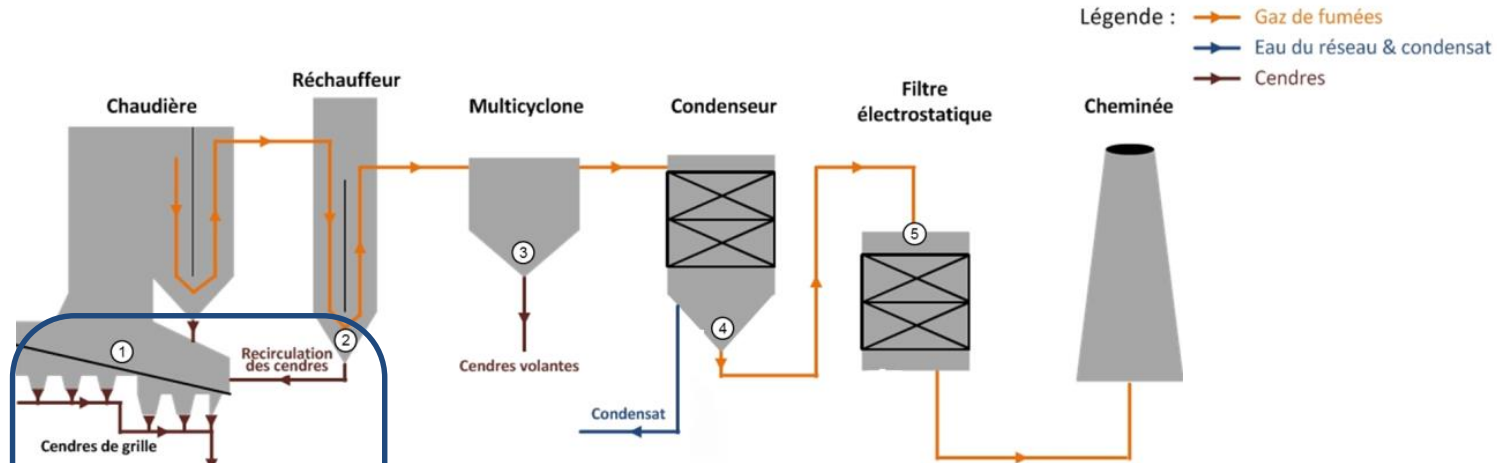
Composition chimique



Centrale Enerbois



Ecorces & plaquettes



Légende : — Gaz de fumées



Cendres humides

	Moyenne	CV (%)
MO (g/kg MS)	15.1	55
pH-H₂O	13.2	1
Macroéléments (g/kg MS)		
Ca-total	281.3	2
K-total	67.4	9
Mg-total	16.5	5
P-total	9.2	9
S-total	0.77	9
N-total	0.07	27

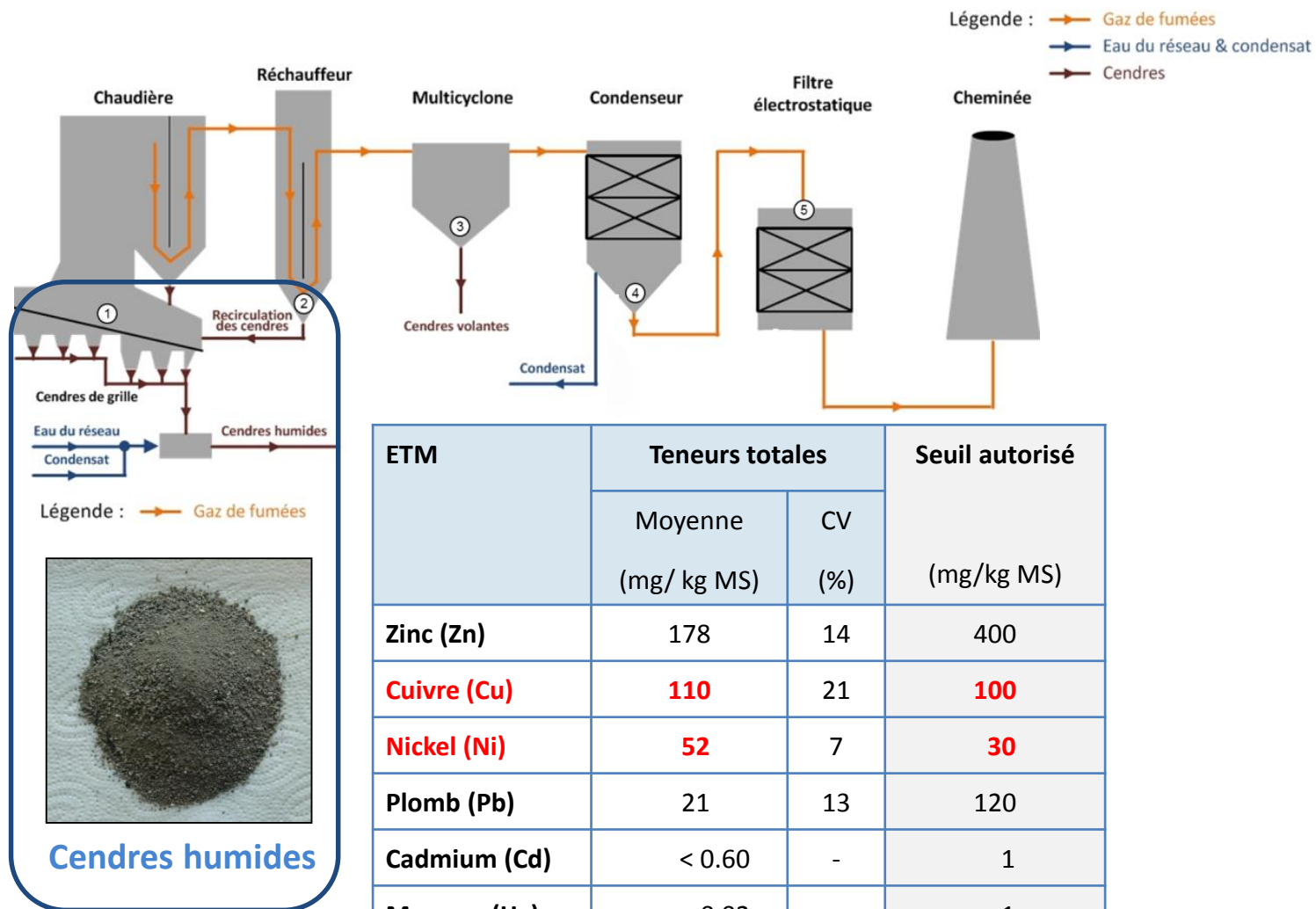
Composition chimique



Centrale Enerbois



Ecorces & plaquettes



Cendres humides

ETM	Teneurs totales		Seuil autorisé (mg/kg MS)
	Moyenne (mg/ kg MS)	CV (%)	
Zinc (Zn)	178	14	400
Cuivre (Cu)	110	21	100
Nickel (Ni)	52	7	30
Plomb (Pb)	21	13	120
Cadmium (Cd)	< 0.60	-	1
Mercure (Hg)	< 0.02	-	1

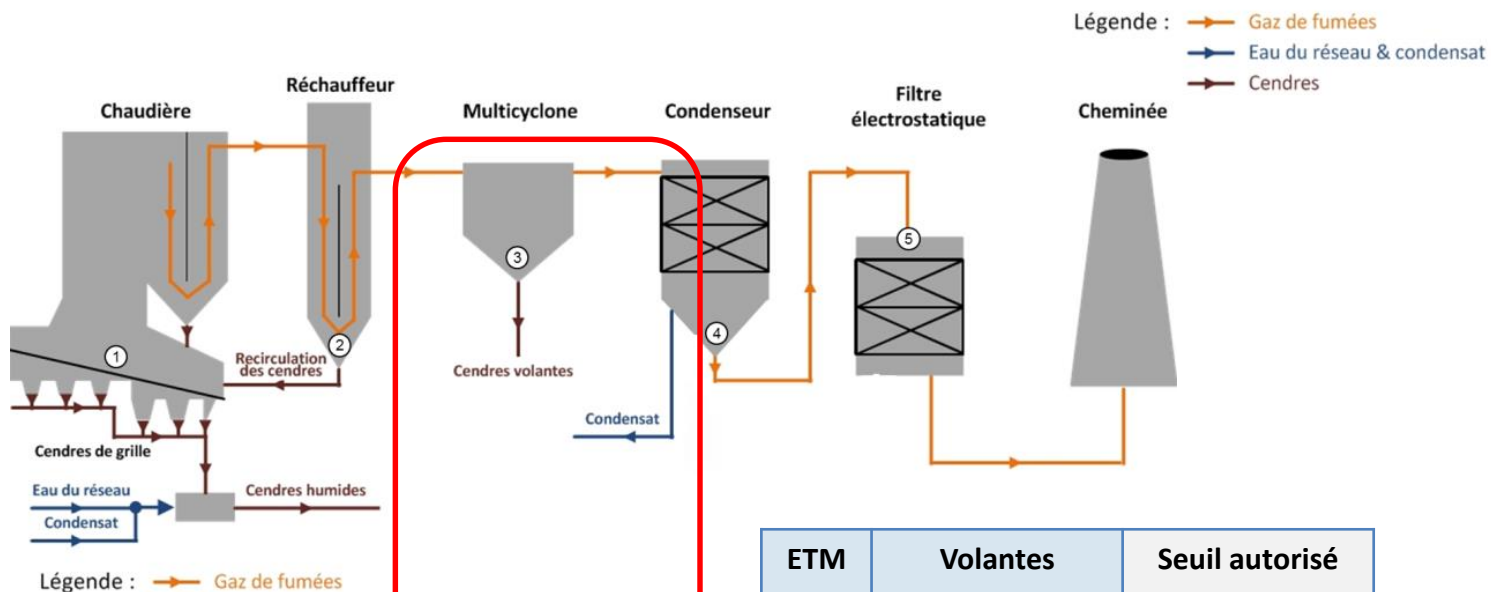
Composition chimique



Centrale Enerbois



Ecorces & plaquettes



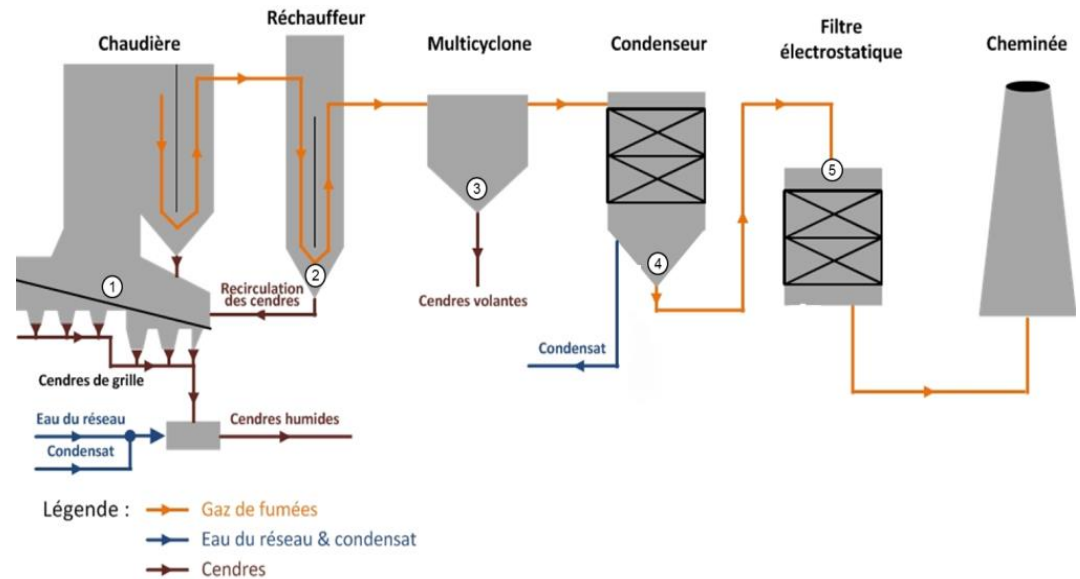
Cendres volantes

ETM	Volantes (mg/kg MS)	Seuil autorisé (mg/kg MS)
Zn	1245 ± 14%	400
Cu	137 ± 27%	100
Ni	50 ± 5%	30
Pb	97 ± 62%	120
Cd	8 ± 14%	1
Hg	0.19 ± 93%	1

Origine des ETM dans les cendres?



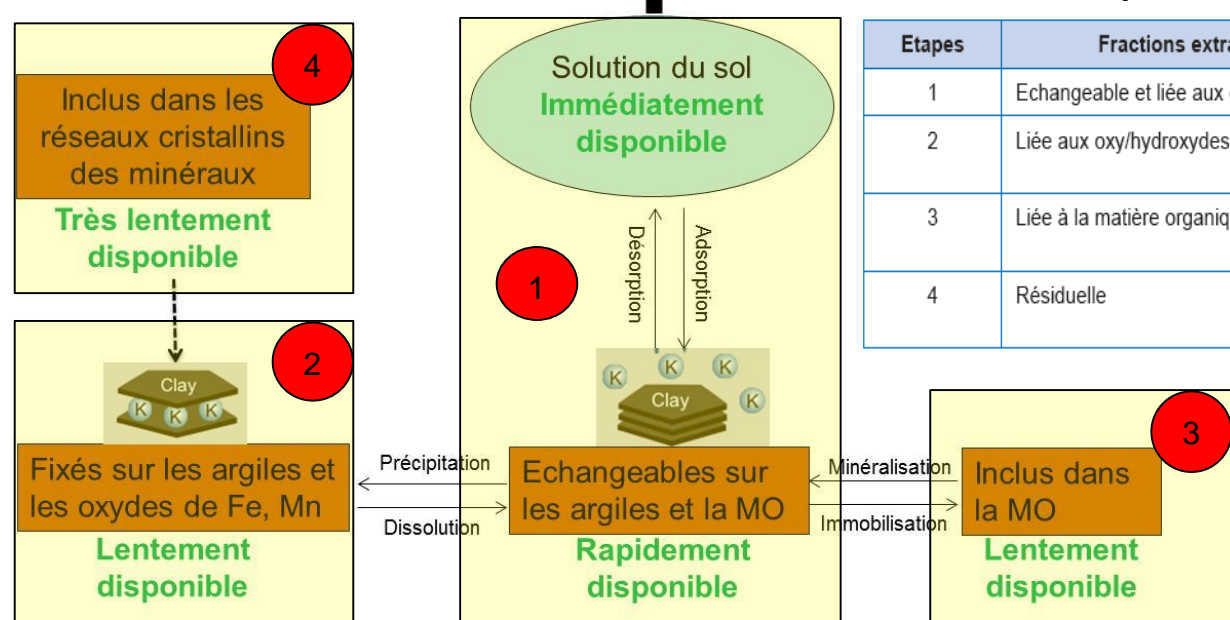
ETM	Teneurs dans les cendres (humides + volantes)	
	Réelle (mg/kg MS)	Théorique (mg/kg MS)
Zn	609 (76)	1782 (353)
Cu	196 (49)	282 (103)
Ni	49 (1)	68 (9)
Pb	52 (28)	< 25 (-)
Cd	3.0 (0.4)	8.5 (1.9)
Hg	< 0.07 (-)	< 0.7 (-)



Base de calculs:

- Matériaux de combustion = 1/3 d'écorces + 2/3 de plaquettes.
- Cendres = 2.3% de la masse des matériaux de combustion.
- Cendres = 1/3 de cendres volantes + 2/3 de cendres humides.

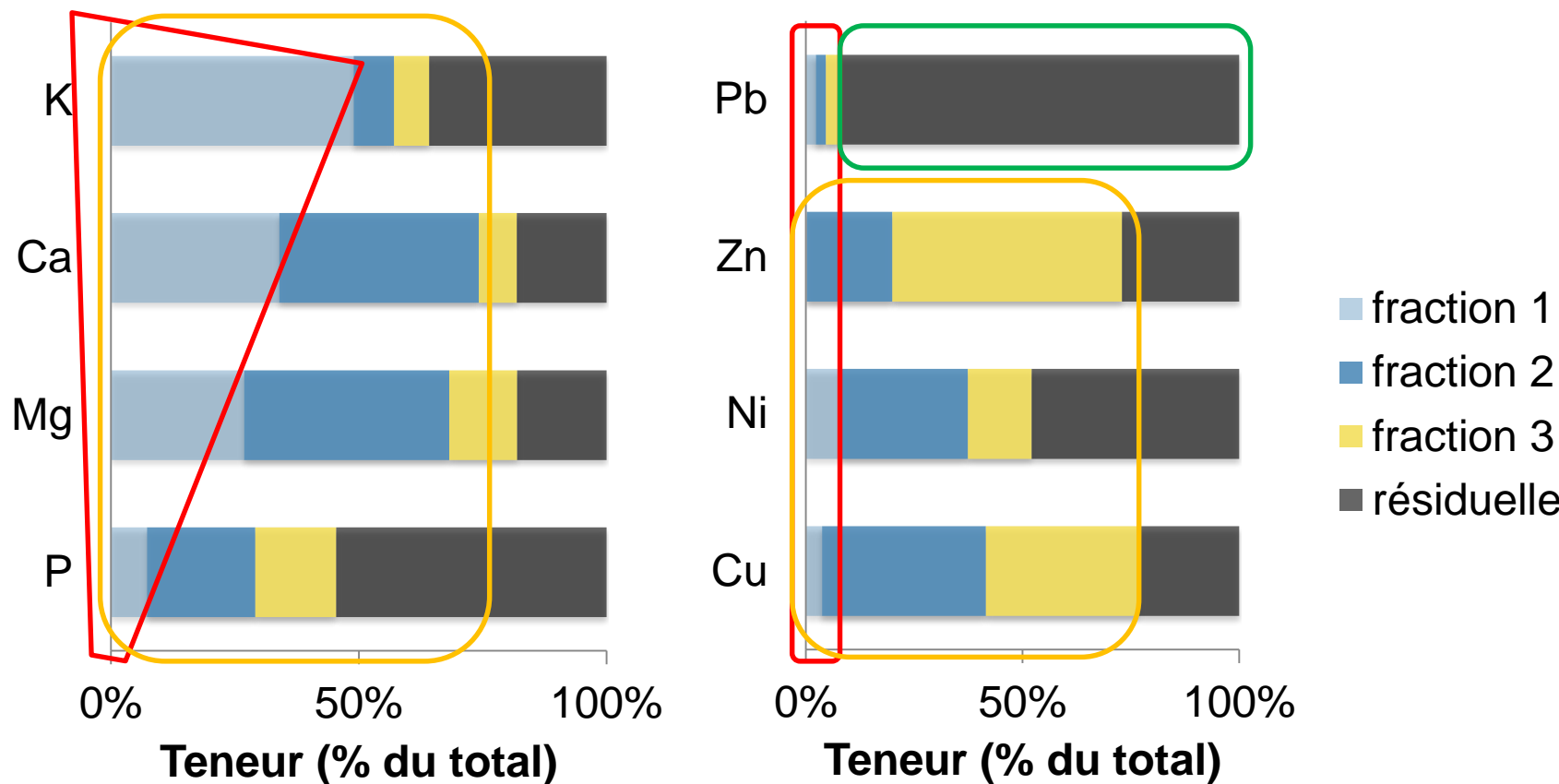
Spéciation des macroéléments et des ETM des cendres humides



Extractions séquentielles

Etapes	Fractions extraites	Réactifs
1	Echangeable et liée aux carbonates	Acide acétique (CH_3COOH , 0,11 M)
2	Liée aux oxy/hydroxydes de Fe et Mn	Chlorure d'hydroxylamine ($\text{NH}_2\text{OH-HCl}$, 0,1 M), pH 2 (HNO_3)
3	Liée à la matière organique	Peroxyde d'hydrogène (H_2O_2 , 8,8 M) puis acétate d'ammonium ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$, 1 M), pH 2 (HNO_3)
4	Résiduelle	Acides fluorhydrique et perchlorique (HF-HClO_4 ; 15,5 M)

Spéciation des macroéléments et des ETM des cendres humides



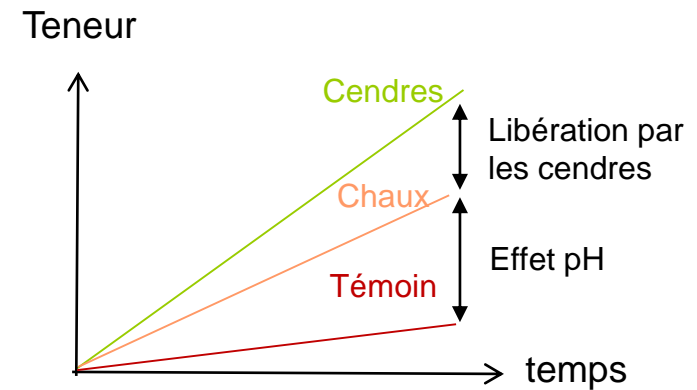
Dynamique de libération dans le sol

Dispositif expérimental & objectifs:

- Evolution de la disponibilité des éléments dans le sol en présence et en absence de cendres
- Effet des cendres comme amendement calcique

Sol	pH	Argile	Ca recommandée
FRIBO	5.8	15%	18 dt/ha soit 0.7g/kg de sol
29C	6.7	54%	

- Incubation de sol en phytotron avec 3 traitements
- 6 dates analysées du 14 mai au 18 sept/13:
0, 15, 28, 63, 99, 127j d'incubation



Dynamique de libération dans le sol

Analyses:

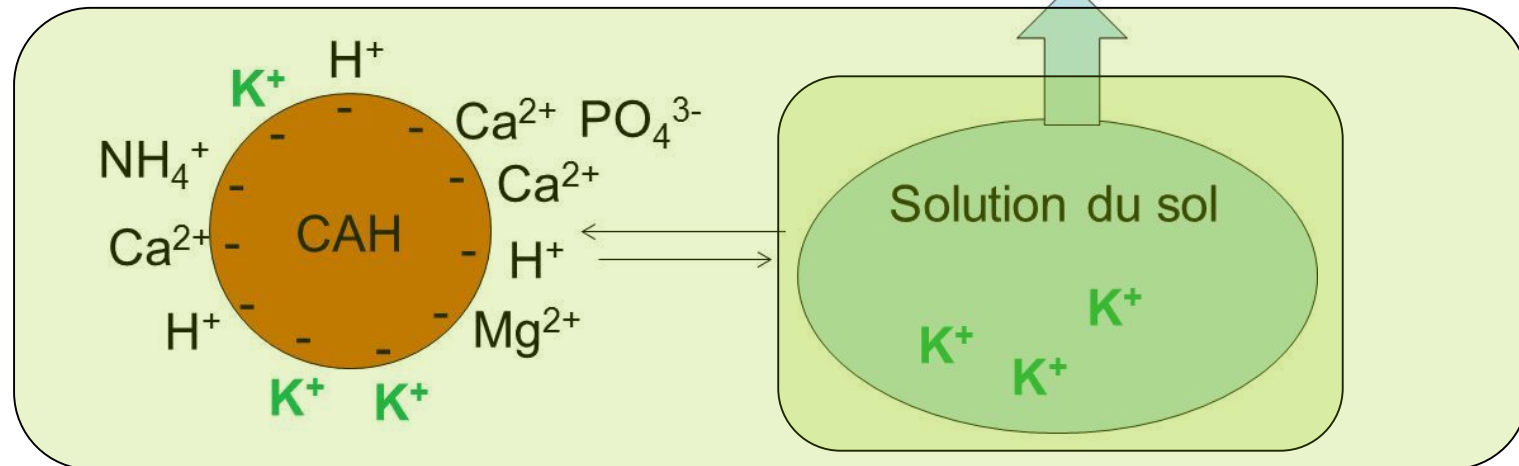
- pH et activité microbienne
- P, K, Ca, Mg et Cu, Ni, Cd, Pb, Zn (H₂O & AAE)



Extrait à l'AAE

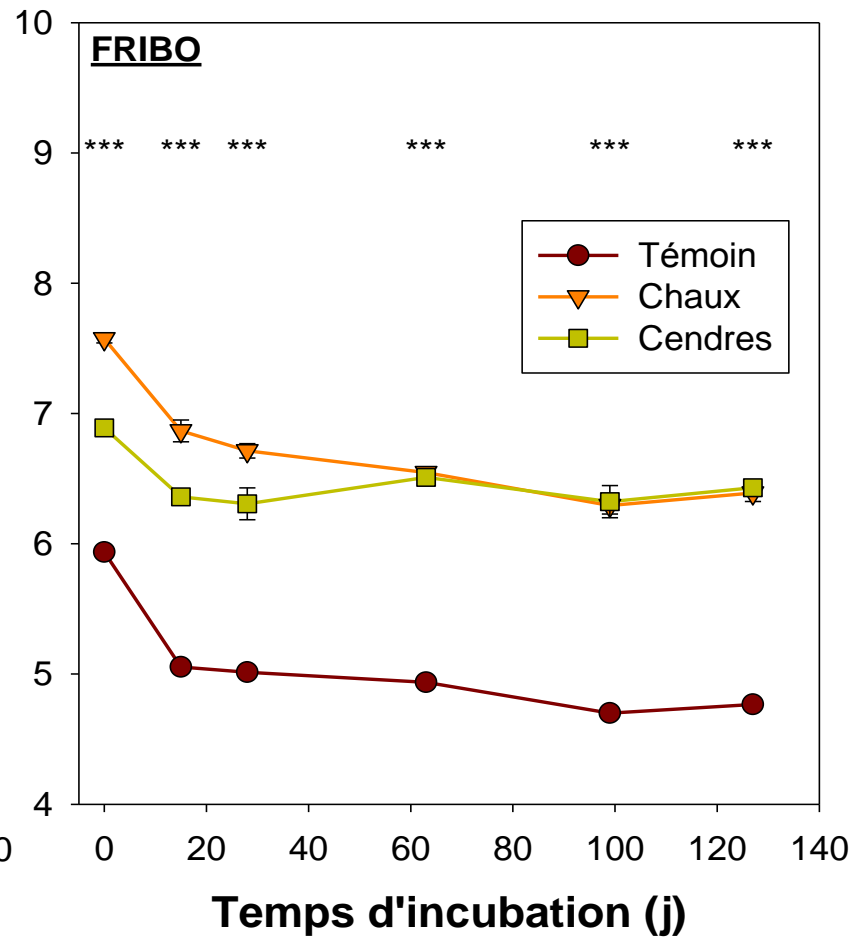
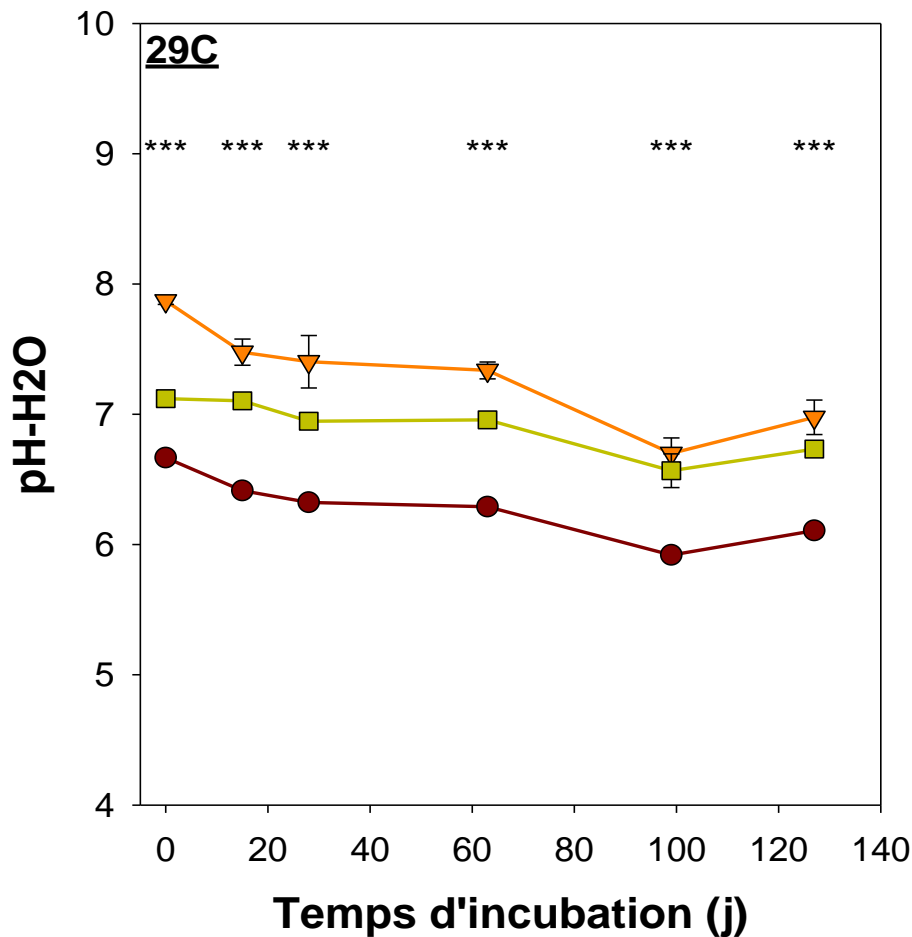


Extrait à l'H₂O



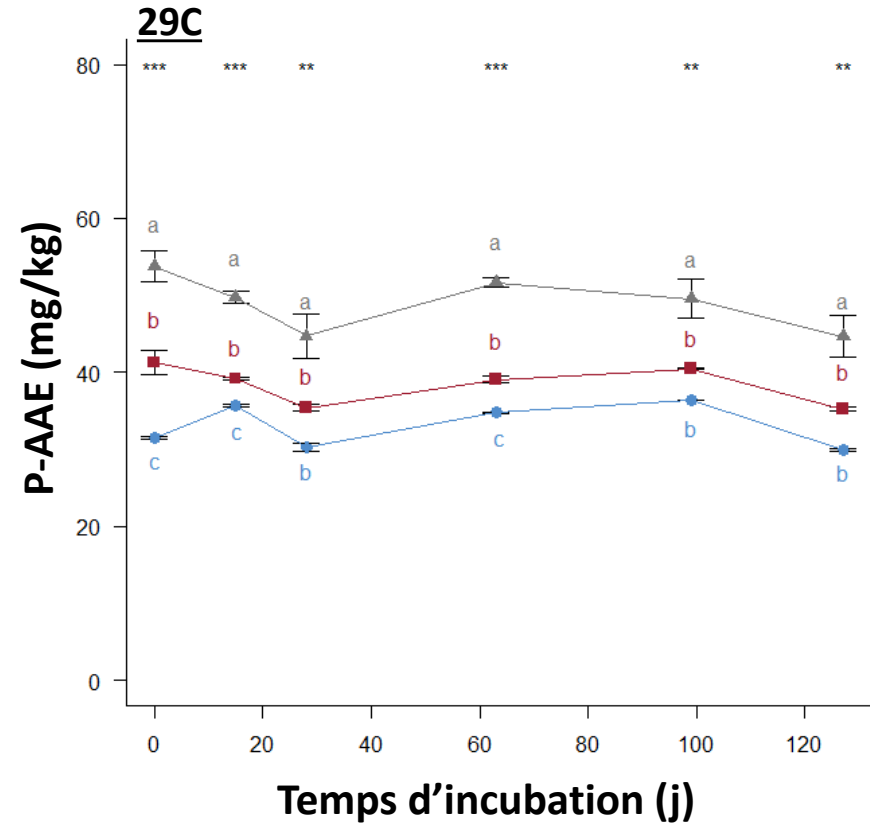
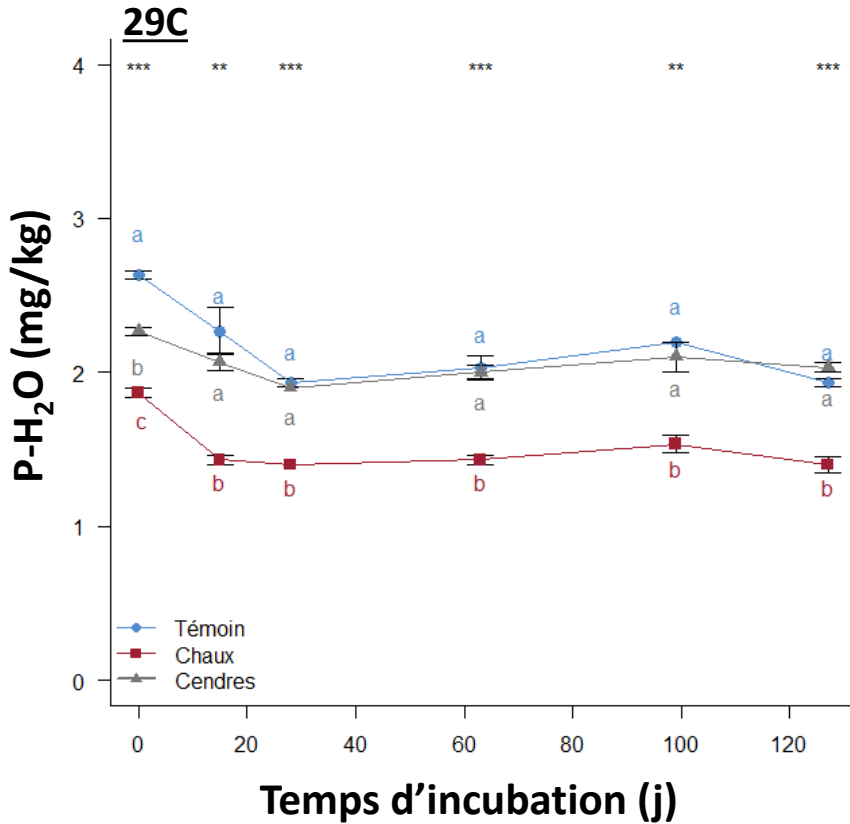
Dynamique de libération dans le sol

Effets des traitements sur le pH du sol



Dynamique de libération dans le sol

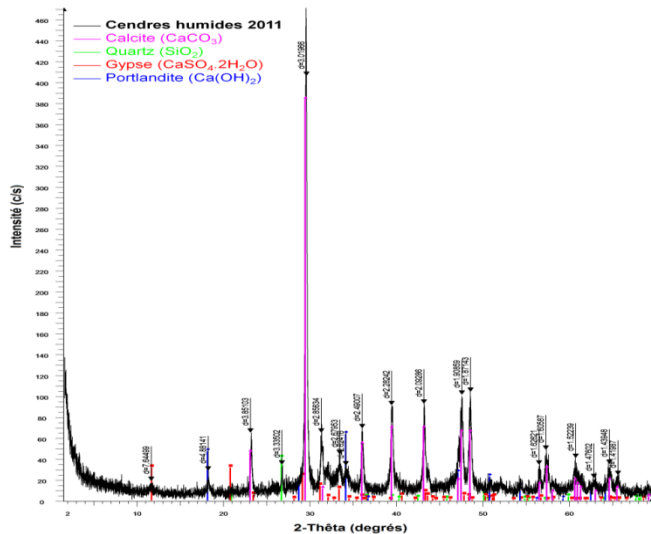
Effets des traitements sur le P disponible du sol



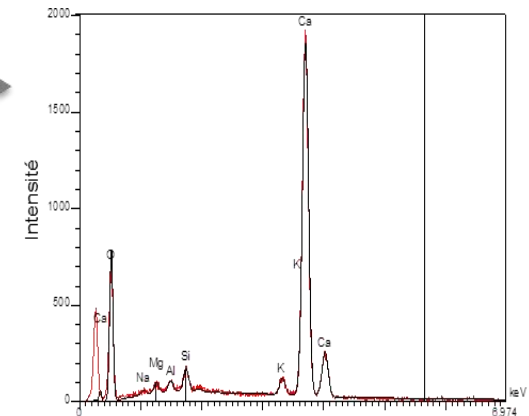
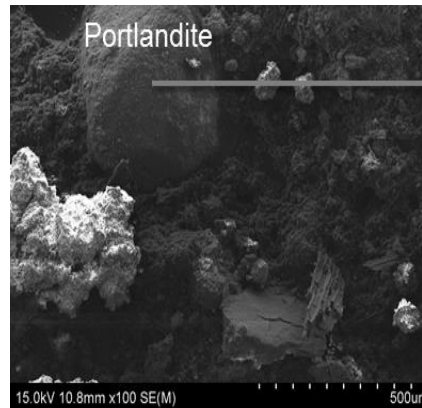
Dynamique de libération dans le sol

Les formes du Ca dans les cendres

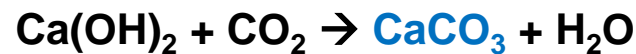
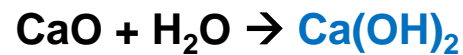
Analyse par diffraction aux rayons X (DRX)



Analyse par microscopie électronique à balayage (MEB)



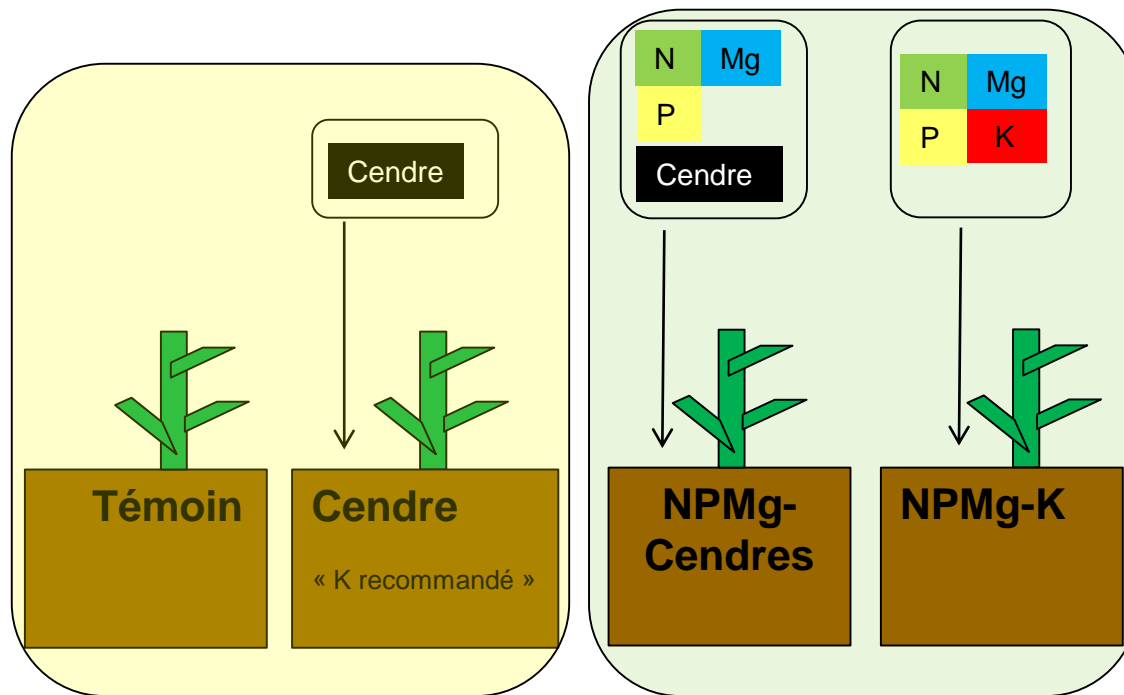
Chaux-vive	Cendres
CaO	Calcite (CaCO ₃)
	Portlandite Ca(OH) ₂
	Gypse (CaSO ₄), Silicate de Ca



Effets sur la production agricole



Effets des cendres humides utilisées comme fertilisant K sur tournesol, culture très exigeante en K



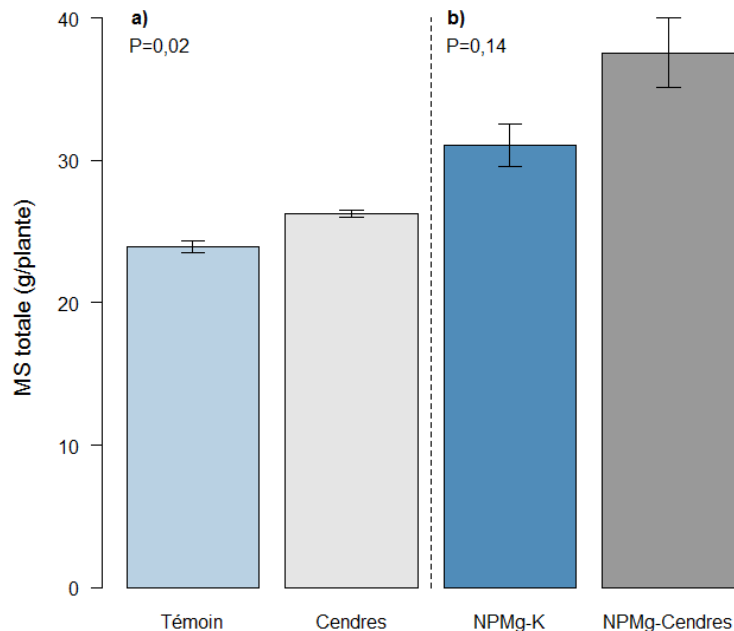
50'000 plantes/ha

	Dose kg/ha	Dose g/plante
N	60	1.2
P	21	0.4
Mg	55	1.1
K	196	3.9

Effets sur la production agricole



MS totale du tournesol à la récolte en conditions
(a) limitantes et (b) non limitantes en NPMgK.

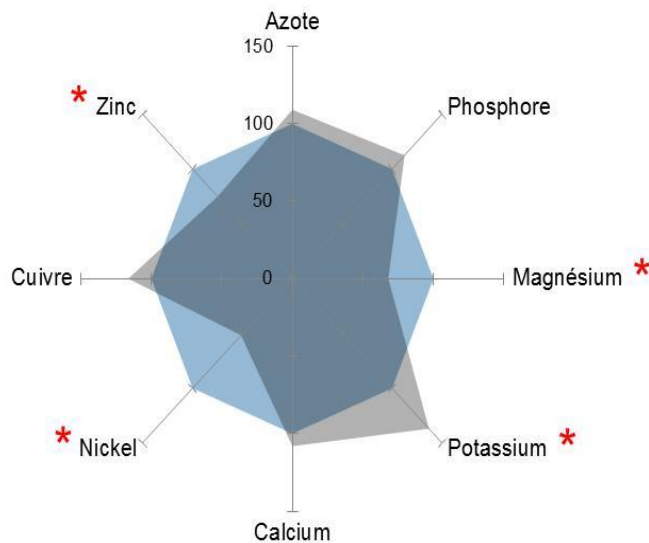
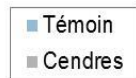


Effets sur la production agricole

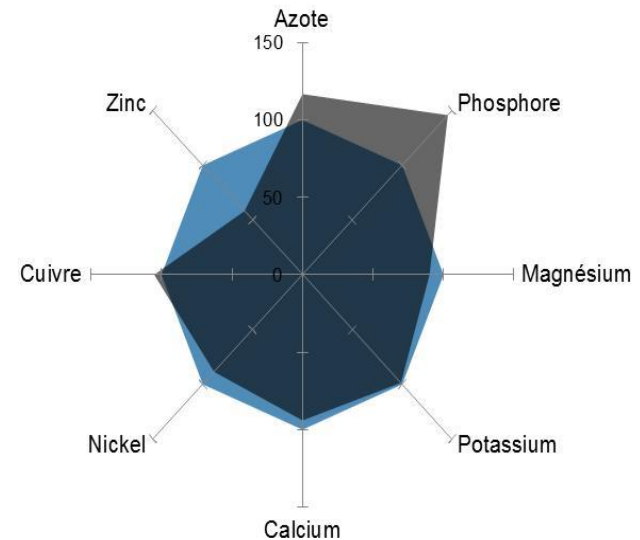
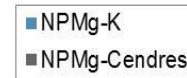


Absorption des minéraux par le tournesol en conditions (a) limitantes et (b) non limitantes en NPMgK.

a)



b)



Les résultats sont exprimés en valeur relative par rapport aux traitements sans cendres (traitements «témoin» et «NPMg-K» respectivement pour la figure a et b). Les astérisques indiquent des différences significatives entre les deux traitements au seuil de 5% selon le test *t*.



Les cendres humides de la centrale Enerbois:

- Représentent un amendement calcique moins agressif que la chaux
- Représentent un très bon engrais potassique enrichi en P, Mg et «oligo-éléments» avec une efficacité du K équivalente à celle du KCl
- Contiennent également du Cu, Ni, Zn et Pb mais sous une forme peu disponible voir indisponible
- Les ETM semblent provenir en grande partie du bois utilisé



L'application des cendres (par rapport à un témoin sans apport):

- Diminue la quantité disponible de Ni et de Zn dans le sol et réduit en conséquent leurs teneurs dans le tournesol
- Pas d'effet négatif à court terme sur la contamination du sol et de la plante par les ETM
- Mais la question des effets à long terme se pose toujours car des quantités non négligeables de Cu, Ni et Zn peu disponibles, mais potentiellement disponibles, sont apportées.

Mars 2016: Soumission du projet «Mise au point d'engrais à base de cendres».



Merci de votre attention