Rapport d'expertise

CONFIDENTIEL

Evaluation à l'aide du RHIZOtest de la phytodisponibilité du nickel et du chrome apportés par l'épandage sur les sols agricoles des cendres de bagasse produites par Albioma à La Réunion

10 décembre 2019

Saint Denis de la Réunion, France

CONFIDENTIEL

Jusqu'au 1er août 2020

Evaluation à l'aide du RHIZOtest de la phytodisponibilité du nickel et du chrome apportés par l'épandage sur les sols agricoles des cendres de bagasse produites par Albioma à La Réunion

Matthieu Bravin[1, 2], Laure Lemal[3], Claire Chevassus-Rosset[2, 4], Mélanie Montes[2, 4], Marie Tella[5, 6], Emmanuel Doelsch[2, 4], Frédéric Feder[2, 4] et Samuel Legros[2, 4]

[1] CIRAD, UPR Recyclage et risque, F-97743, Saint-Denis, Réunion, France ; [2] Recyclage et risque, Univ Montpellier, CIRAD, Avenue Agropolis, 34398, Montpellier Cedex 5, France ; [3] MetRHIZlab , F 34830 Clapiers, France ; [4] CIRAD, UPR Recyclage et risque, F-34398, Montpellier, France ;[5] CIRAD, US Analyses, F-34398, Montpellier, France ; [6] Analyses, Univ Montpellier, CIRAD, Avenue Agropolis, 34398, Montpellier Cedex 5, France

Résumé : Suite à l'homologation des cendres de bagasse produites par Albioma sur les centrales du Gol et de Bois Rouge, l'agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) a demandé à Albioma de fournir des analyses de nickel (Ni) et de chrome (Cr) dans des plants de canne à sucre cultivés sur des sols amendés avec les deux types de cendres de bagasse produites et de comparer ces analyses avec celles réalisées sur des plants de canne à sucre issus de parcelles non amendées et ayant les mêmes caractéristiques pédologiques. Albioma souhaitant par ailleurs élargir l'homologation des deux types de cendres à l'apport sur les sols à vocation maraîchère, Albioma a confié au centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad) la réalisation d'une étude ayant pour objectif d'évaluer si le transfert (i.e. la phytodisponibilité) de Ni et Cr pour la canne à sucre et les cultures maraîchères augmentait ou non avec l'apport des deux types de cendres de bagasse d'Albioma dans les conditions d'application autorisées par l'Anses.

Pour répondre à cette question, le Cirad a conduit une expérimentation en chambre de culture basée sur l'outil RHIZOtest, à notre connaissance le seul test végétal spécifiquement normalisé pour évaluer la phytodisponibilité des éléments traces métalliques. Le travail a été mené sur un échantillon composite des deux types de cendres d'Albioma, deux échantillons de sol pour chaque type de cendres et trois espèces végétales. Le sorgho (*Sorghum bicolor*) a été sélectionné comme espèce adaptée à la culture en RHIZOtest la plus proche génétiquement de la canne à sucre. La tomate (*Lycopersicon esculentum*) et le chou (*Brassica oleracea*) ont été sélectionnés comme espèces maraîchères de référence à la fois pour l'utilisation normalisée du dispositif RHIZOtest et pour les cultures maraîchères à La Réunion. Pour chacun des deux types de cendres, les doses d'apport de 0, 26 et 50 t MS/ha ont été testées. Après avoir été pré-cultivées en hydroponie pendant deux semaines, les trois espèces végétales ont été mises en contact pendant huit jours avec les quatre sols préalablement incubés ou non avec les cendres. A l'issue de la phase de contact sol-plante, les plantes entières (parties aériennes et racinaires) ont été récoltées. La phytodisponibilité de Ni et Cr a été estimée à partir du flux de prélèvement de Ni et Cr dans la plante entière durant la phase d'exposition de la plante au sol.

Si les trois espèces végétales ont crû comme attendu entre la fin de la phase de préculture en hydroponie et la fin de la phase de contact sol-plante, les biomasses du chou et de la tomate ont été plus faibles pour les deux sols les plus argileux à l'issue de la phase de contact. Pour chaque espèce et type de sols, les biomasses des trois espèces végétales n'ont en revanche pas été affectées par l'apport de cendres. Contrairement aux types de sols, d'éléments traces et d'espèces végétales, la dose d'apport de cendres et le type de cendres n'ont individuellement eu aucun effet statistiquement significatif sur les flux de prélèvement de Ni et Cr par les plantes. Malgré le fait que les apports de cendres aient apporté entre 1 et 15 % de Ni et Cr supplémentaire à ce qui était initialement présent dans les sols, **la phytodisponibilité de Ni et Cr n'a jamais significativement augmenté avec l'apport de cendres et s'est avérée être au contraire soit d'autant plus faible que la dose d'apport de cendres a été importante, soit similaire quelle que soit la dose d'apport de cendres**.

En cohérence avec la seule autre étude trouvée portant sur la phytodisponibilité de Ni et Cr suite à l'apport de cendres de bagasse au sol, les résultats de la présente étude suggèrent que **l'apport des deux types de cendres d'Albioma n'augmenterait pas la phytodisponibilité de Ni et Cr pour la canne à sucre et les cultures maraîchères à des doses d'apport au champ équivalentes à 26 et 50 t MS/ha**.

10 décembre 2019

Saint-Denis de La Réunion, France

PREAMBULE

En 2015, suite à l'avis favorable de l'agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses), le groupe « Albioma » a obtenu de la part du ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt l'autorisation de mise sur le marché (AMM) pour la valorisation par retour au sol des cendres volantes produites dans ses deux centrales thermiques à La Réunion par la combustion de la bagasse de canne à sucre. Pour répondre aux demandes post-AMM de compléments formulées par l'Anses, Albioma a confié au centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad) la présente étude.

Cette étude a été coordonnée par l'unité de recherche Recyclage et risque du Cirad. Cette unité travaille sur la thématique de l'écodynamique des éléments traces métalliques (ETM) dans les agro-écosystèmes de La Réunion depuis près de 20 ans.

Les auteurs de cette étude souhaitent remercier Olivier Salmacis (Cirad, unité Recyclage et risque, La Réunion) pour la réalisation des prélèvements de sol, le laboratoire d'analyses agronomiques (Cirad, unité Recyclage et risque, La Réunion) pour la gestion et le conditionnement des échantillons de sol et de cendres ainsi que Lionel Le Mézo (Cirad, unité de recherche Aïda, La Réunion) pour l'analyse des données de distribution spatiale des types de sols sur les zones d'épandage des cendres à La Réunion.

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION **- 1 -**

2. MATERIEL ET METHODES **- 3 -**

2.1. CHOIX DE L'APPROCHE EXPERIMENTALE - 3 -

2.2. SELECTION ET PROPRIETES DES SOLS - 3 -

2.3. SELECTION DES CENDRES ETUDIEES - 6 -

2.4. APPORT DES CENDRES ET INCUBATION DES SOLS - 7 -

2.5. SELECTION DES PLANTES - 7 -

2.6. CULTURE DES PLANTES EN RHIZOTEST - 8 -

2.7. ANALYSE DES PLANTES ET CALCUL DE LA PHYTODISPONIBILITE - 10 -

2.8. TRAITEMENT ET ANALYSES STATISTIQUES DES DONNEES - 11 -

3. RESULTATS ET DISCUSSION **- 14 -**

3.1. BIOMASSES DES PLANTES - 14 -

3.2. PRINCIPAUX EFFETS SIGNIFICATIFS SUR LES FLUX DE PRELEVEMENTS EN NICKEL ET EN CHROME - 15 -

3.3. EFFET DU TYPE ET DE LA DOSE D'APPORT DE CENDRES - 16 -

4. CONCLUSION **- 20 -**

5. BIBLIOGRAPHIE **- 22 -**

1. INTRODUCTION

Dans ses avis rendus le 16 avril 2015, l'Anses a donné une réponse favorable aux demandes d'autorisation de mise sur le marché (autrefois homologation) des cendres de bagasse produites par Albioma par les centrales de Bois-Rouge et du Gol (Mortureux 2015a et b). L'Anses a néanmoins souligné que l'apport des deux types de cendres tous les 5 ans aux doses préconisées (i.e. 26 et 50 t MS/ha pour les cendres de Bois-Rouge et du Gol, respectivement) entraînait un dépassement des flux maximaux autorisés pour le chrome (Cr) et le nickel (Ni). Toutefois, après comparaison des concentrations de ces ETM dans les amendements apportés au sol aux fonds géochimiques des sols réunionnais, l'ANSES a considéré les seuils en ces éléments comme non pertinents pour le cas spécifique de La Réunion. Par ailleurs, les flux en Ni et Cr apportés par l'épandage de ces produits aux doses citées ci-dessus conduisent à des teneurs en ces éléments attendues dans le sol inférieures aux teneurs des fonds géochimiques de La Réunion. Des travaux sur la phytodisponibilité du Ni et du Cr ont été spécifiquement menés pour la canne à sucre cultivée sur des sols à La Réunion, concluant à l'existence d'un transfert de ces éléments vers la plante, sans pour autant que ce transfert soit corrélé à la concentration dans le sol. Aussi, l'ANSES en a conclu qu'un transfert plus important de Ni et de Cr des sols amendés avec des cendres de bagasse vers la canne à sucre serait peu probable mais a tout de même souhaité confirmer ce point en demandant à Albioma de « *fournir des analyses de Cr et Ni dans les plants de canne à sucre cultivés sur des sols amendés avec les cendres de bagasse* », en précisant que « *les teneurs observées devront être comparées à celles de plants de canne à sucre issus de parcelles non amendées et ayant les mêmes caractéristiques pédologiques* ».

Albioma a souhaité profiter de cette demande post-AMM de compléments en intégrant la culture maraîchère, en plus de la canne à sucre, en prévision d'une demande d'élargissement de l'autorisation de mise sur le marché à l'apport de cendres sur les sols avant la mise en place de cultures maraîchères. Il s'avère que les propriétés d'engrais minéral PK et d'amendement minéral basique présentées par les cendres de bagasse d'Albioma sont également intéressantes pour les cultures maraîchères, en particulier lorsque les cultures maraîchères sont implantées sur des parcelles situées en périphérie de parcelles de canne à sucre ou en tant que cultures intermédiaires entre deux cycles de canne à sucre. La question du transfert des éléments Ni et Cr apportés par les cendres lors de leur apport sur les sols canniers se pose donc dans les mêmes termes pour leur apport sur les sols à vocation maraîchère.

Dans ce contexte, Albioma a confié au Cirad la réalisation d'une étude ayant pour objectif d'évaluer si le transfert (i.e. la phytodisponibilité) de Ni et Cr vers la canne à sucre et les plantes maraîchères était plus important avec un apport des deux types de cendres d'Albioma aux doses recommandées que sans apport de cendres sur un ensemble de sols sur lesquels les deux types de cendres sont effectivement apportés.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. Choix de l'approche expérimentale

Une approche de terrain correspondant au suivi de parcelles d'agriculteurs comme celle menée par Collin et Doelsch (2010) aurait permis d'obtenir des mesures de phytodisponibilité de Ni et Cr dans des situations pédoclimatiques contrastées et des conditions réelles de culture au champ. En revanche, il aurait été d'expérience très compliqué de trouver des situations avec et sans apport de cendres qui soient toutes choses égales par ailleurs (i.e. même type de sol, même variété, stade phénologique équivalent de la culture, même itinéraire technique). La solution intermédiaire correspondant à la mise en place et au suivi pluriannuel de parcelles d'essai agronomique avec répétitions chez l'agriculteur aurait permis de travailler dans des conditions toutes choses égales par ailleurs. Cependant, la mise en place et le suivi de tels essais dans plusieurs situations pédoclimatiques contrastées restent une gageure technique.

Ainsi, étant donné que la demande de l'Anses était de vérifier l'absence de différence de phytdisponibilité de Ni et Cr, il a été choisi de travailler avec un test biologique en conditions de laboratoire afin d'assurer l'évaluation de la phytodisponibilité de Ni et Cr pour un ensemble de sols sur lesquels les deux types de cendres sont effectivement apportés dans des conditions de culture qui soient toutes choses égales par ailleurs. Pour ce faire, nous avons déployé le RHIZOtest (Bravin et al. 2010), qui est à notre connaissance le seul test biologique à être normalisé aux niveaux européen et international spécifiquement pour l'évaluation de la phytodisponibilité des ETM (NF EN ISO 16198).

2.2. Sélection et propriétés des sols

Les cendres de bagasse d'Albioma Bois Rouge (ABR) et d'Albioma Le Gol (ALG) sont respectivement épandues sur les sols canniers des zones nord-est et sud-ouest de l'île. Dans chacune de ces deux zones, la répartition des tonnages épandus varie fortement entre les communes (Fig. 1).

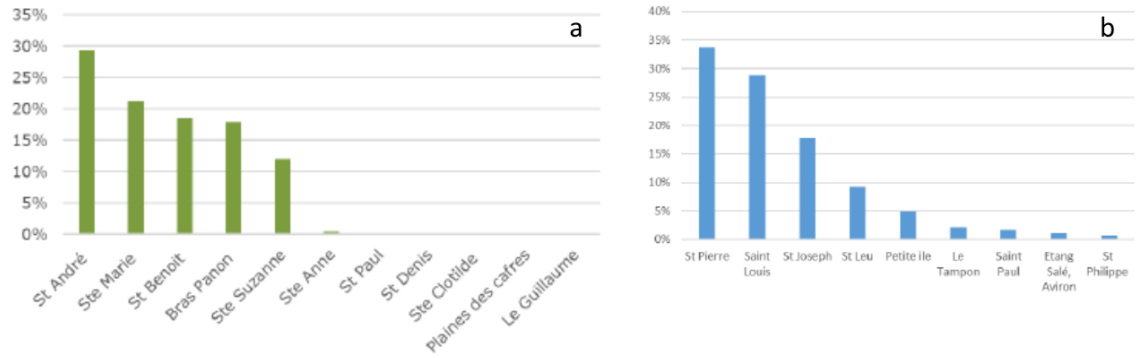

Figure 1. *Répartition des tonnages de cendres de bagasse de Bois Rouge (a) et du Gol (b) valorisées par communes. Les données sont issues des investigations de terrain et des analyses de données réalisées de 2013 à 2017.*

Pour chacune des deux cendres, le poids respectif de chaque commune a été croisé avec le pourcentage occupé par les différents types de sols cultivés en canne à sucre afin de calculer un score permettant de classer les types de sols canniers en fonction du tonnage de cendres qu'ils sont susceptibles de recevoir (Tab. 1).

Tableau 1. *Score estimant pour chaque type de sols l'importance des tonnages de cendres d'Albioma Bois Rouge (ABR) ou du Gol (ALG) qu'il est susceptible de recevoir. Les types de sols ayant un score nul ne sont pas présentés. Les sols andiques regroupent les sols perhydratés et non perhydratés.*

Types de sols	Score canne	
	ABR	ALG
Andique	10	23
Brun	14	2
Brun andique	20	4
Ferrallitique	2	17
Non sol	5	10
Sol sur alluvions	3	21

Le tableau 1 montre que les cendres d'ABR sont principalement épandues sur les sols bruns andiques, les sols bruns, puis les sols andiques, alors que les cendres d'ALG sont principalement épandues sur les sols andiques, les sols sur alluvions, puis les sols ferrallitiques. Le choix a été fait de travailler dans la suite de l'étude sur les deux types de sols les plus représentatifs pour chaque type de cendres. Pour les cendres d'ABR, il a donc été décidé de travailler sur un sol brun andique et un sol brun. Pour les cendres d'ALG, le type de sols « ferrallitique » a été préféré au type de sols « sur alluvions ». En effet, ce dernier type de sols présente, du fait de sa relative jeunesse de développement, des pH généralement supérieurs aux pH des autres types de sols de l'île (Raunet 1991). L'épandage de cendres aux propriétés d'amendement minéral basique est donc moins

pertinent agronomiquement sur le type de sols « sur alluvions ». Pour les cendres d'ALG, un sol andique et un sol ferrallitique ont été sélectionnés. Ce choix a également permis de travailler sur quatre types de sols différents et représentatifs des quatre principaux types de sols cultivés de l'île.

Tableau 2. *Principales propriétés physiques et physico-chimiques des quatre sols sélectionnés pour l'étude.*

N°	Lieu	Type	μ_a[1]	Corg	pH	CEC[2]	Saturation CEC	Cr total	Ni total
					H_2O				
			g/cm^3	g/100 g		cmol$_+$/kg	%	mg/kg	mg/kg
1	St Leu	Brun andique	1,1	2,0	6,0	8,5	90	54	54
2	St Louis	Brun	1,2	1,9	6,2	14,6	75	101	75
3	St Benoît	Andique	0,8	11,7	5,1	4,4	77	356	210
4	Ste Marie	Ferrallitique	1,2	2,7	6,2	12,7	92	68	55

[1] masse volumique apparente (d'après Borot et al. 2011)
[2] CEC cobaltihexamine

Les quatre échantillons de sol (ci-après dénommés « sols ») ont été prélevés en bordure de quatre parcelles avec la méthode des échantillonnages composites, séchés à l'air libre, tamisés à 2 mm, puis analysés par un laboratoire d'analyses agronomiques (Cirad, US Analyses, Montpellier). Les principales propriétés physico-chimiques des quatre sols sont présentées dans le tableau 2.

2.3. Sélection des cendres étudiéesAfin de travailler avec un échantillon le plus représentatif possible des deux types de cendres, dix échantillons de chacun des deux types de cendres ont été prélevés sur plusieurs semaines. Ces échantillons ont été séchés à l'étuve à 60 °C, leur humidité résiduelle a été déterminée par le séchage d'un sous-échantillon à 105 °C, puis les concentrations totales en Ni et Cr ont été déterminées par un laboratoire d'analyses agronomique (Cirad, US Analyses, Montpellier) à l'aide d'une méthode interne par double calcination et attaque tri-acide ($HClO_4$, HCl, puis HF concentrés). Les dix échantillons de cendres d'ABR ont présenté des concentrations très répétables de 133 ± 7 et 214 ± 12 mg/kg pour Ni et Cr, respectivement. Neuf des dix échantillons de cendres d'ALG ont présenté des concentrations très répétables de 172 ± 5 et 266 ± 5 mg/kg pour Ni et Cr, respectivement. Le dixième échantillon a présenté des concentrations 2,5 fois inférieures aux concentrations moyennes obtenues pour les neuf autres échantillons. Etant donné la bonne répétabilité des concentrations en Ni et Cr obtenues dans les échantillons de chacun des deux types de cendres, les dix échantillons de cendres ABR, d'une part, et les neuf échantillons de cendres ALG les plus répétables, d'autre part, ont été mélangés en proportion égale pour constituer un échantillon composite représentatif de chacun des deux types de cendres.

Tableau 3. *Comparaison des concentrations en nickel (Ni) et en chrome (Cr) mesurées par le laboratoire Sadef selon la norme NF EN 13650 sur, d'une part, 30 échantillons de cendres Albioma Bois Rouge (ABR) et 11 échantillons de cendres Albioma le Gol (ALG) entre 2013 et 2017 et, d'autre part, sur les deux échantillons composites constitués pour les besoins de la présente étude.*

Type de cendres	**Ni**		**Cr**	
de bagasse	**2013-2017**	**2019**	**2013-2017**	**2019**
ABR	85 ± 22	126	83 ± 20	114
ALG	159 ± 31	168	120 ± 13	137

La méthode de minéralisation utilisée par le laboratoire d'analyses du Cirad pour déterminer les concentrations en Ni et Cr dans les échantillons de cendres a abouti à des concentrations moyennes supérieures, en particulier pour Cr, à celles mesurées entre 2013 et 2017 par le laboratoire Sadef pour le compte d'Albioma selon la norme NF EN 13650 (Tab. 3). Pour vérifier l'adéquation des concentrations en Ni et Cr entre les deux échantillons composites constitués pour les besoins de la présente étude et les échantillons analysés entre 2013 et 2017 par le laboratoire Sadef, les deux échantillons composites ont été analysés par le laboratoire Sadef selon la norme NF EN 13650. Les concentrations en Ni et Cr mesurées en 2019 dans les deux échantillons composites se sont avérées cohérentes, mais néanmoins supérieures, avec celles mesurées entre 2013 et 2017 (Tab. 3).

L'apport de Ni et Cr réalisé dans la présente étude pour les deux types de cendres a donc simulé un apport un peu supérieur à ce qui est susceptible d'être apporté en moyenne sur les champs.

2.4. Apport des cendres et incubation des sols

Les apports de cendres réalisés au laboratoire ont été faits de manière à simuler les conditions d'apport préconisées au champ par l'Anses. Pour chacun des deux types de cendres, les doses d'apport de 26 et 50 t MS/ha ont été testées. En tenant compte de la préconisation d'usage de l'Anses précisant que les cendres devaient être incorporées au sol après épandage et étant donné que les outils utilisés pour travailler le sol à la plantation de la canne (i.e. charrue et disques lourds) travaillent en général le sol sur au minimum les quinze premiers centimètres du sol, il a été retenu pour les calculs d'apport que les cendres seraient incorporées sur les quinze premiers centimètres du sol. La masse équivalent sec de chacun des deux types de cendres apportée sur chacun des sols a donc été calculée en divisant chacune des deux doses d'apport de cendres considérées dans l'étude (i.e. 26 et 50 t MS/ha) par le produit de la profondeur d'incorporation des cendres dans le sol (i.e. 15 cm), de la surface d'un hectare (i.e. 10 000 m^2) et de la masse volumique apparente de chacun des sols (cf. Tab. 2). Ainsi, à titre d'exemple, 2,2 g équivalent sec de cendres d'ABR ont été mélangés à 100 g équivalent sec du sol 3 pour simuler l'apport de 26 t MS/ha.

En tenant compte des humidités résiduelles des cendres séchées à 60 °C et des sols séchés à 40 °C, chacun des deux types de cendres a été mélangé aux deux sols correspondants, puis les mélanges ont été mis à incuber à 25 °C pendant deux semaines en les compactant à la masse volumique apparente de chacun des sols et en portant leur humidité à 75 % de la capacité maximale de rétention de chacun des sols en ajoutant la solution nutritive utilisée durant la phase de contact de la culture en RHIZOtest (cf. partie 2.5). Chacun des sols a également été incubé de la même manière sans apport de cendres. Un jour avant la mise en contact des sols incubés avec les plantes, les sols ont été étalés dans les dispositifs de contact sol-plante en veillant à maintenir constante la masse volumique apparente de chacun des sols (cf. partie 2.5).

2.5. Sélection des plantes

Trois espèces végétales ont été sélectionnées pour l'évaluation de la phytodisponibilité de Ni et Cr apportés par les cendres. Des tests préliminaires ayant montré qu'il était difficile de cultiver de la canne à sucre à partir de semences ou de boutures dans le dispositif RHIZOtest, c'est le sorgho (*Sorghum bicolor*) qui a été choisi pour représenter le comportement de la canne à sucre. En plus de pouvoir être cultivé à partir d'une semence et d'avoir une taille adaptée à la culture en RHIZOtest, le sorgho est l'espèce végétale séquencée dont le génome est le plus proche de celui de

la canne à sucre (de Setta et al. 2014). Le sorgho est ainsi utilisé comme génome de référence pour l'étude comparative et le séquençage du génome de la canne à sucre (Garsmeur et al. 2011). Après des tests préliminaires sur plusieurs variétés de sorgho utilisées par le Cirad, c'est la variété sariaso 10 qui a été sélectionnée pour la présente étude en raison de sa bonne adaptabilité au dispositif RHIZOtest.

Les deux autres espèces végétales sélectionnées pour la présente étude ont été la tomate (*Lycopersicon esculentum* var. fline) et le chou (*Brassica oleracea* var. castelard), deux espèces maraîchères de référence à la fois pour l'utilisation du dispositif RHIZOtest et pour les cultures maraîchères à La Réunion. Les variétés de tomate et de chou sont en effet celles qui ont été utilisées pour le développement du RHIZOtest et qui sont conseillées dans la norme NF EN ISO 16198. A La Réunion, la tomate et le chou sont respectivement la deuxième et troisième espèce de légumes en termes de surfaces cultivées derrière la salade et la première et troisième espèce de légumes en termes de tonnage produits (communication personnelle de la direction de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt – Daaf – de La Réunion ; Daaf 2019).

2.6. Culture des plantes en RHIZOtest

Le RHIZOtest est un test biologique basé sur l'exposition d'une plante, préalablement pré-cultivée en hydroponie, à un sol par contact entre les racines et le sol sans pénétration des racines dans le sol. Sans empêcher les interactions entre les racines et le sol et, en particulier, le prélèvement des ETM du sol par les racines, le RHIZOtest permet une récolte aisée et propre de la plante entière (racines comprises) et ainsi une mesure standardisée et sensible de la phytodisponibilité en seulement trois semaines (Fig. 2). Le RHIZOtest a été utilisé pour la présente étude comme cela est proposé dans la norme NF EN ISO 16198.

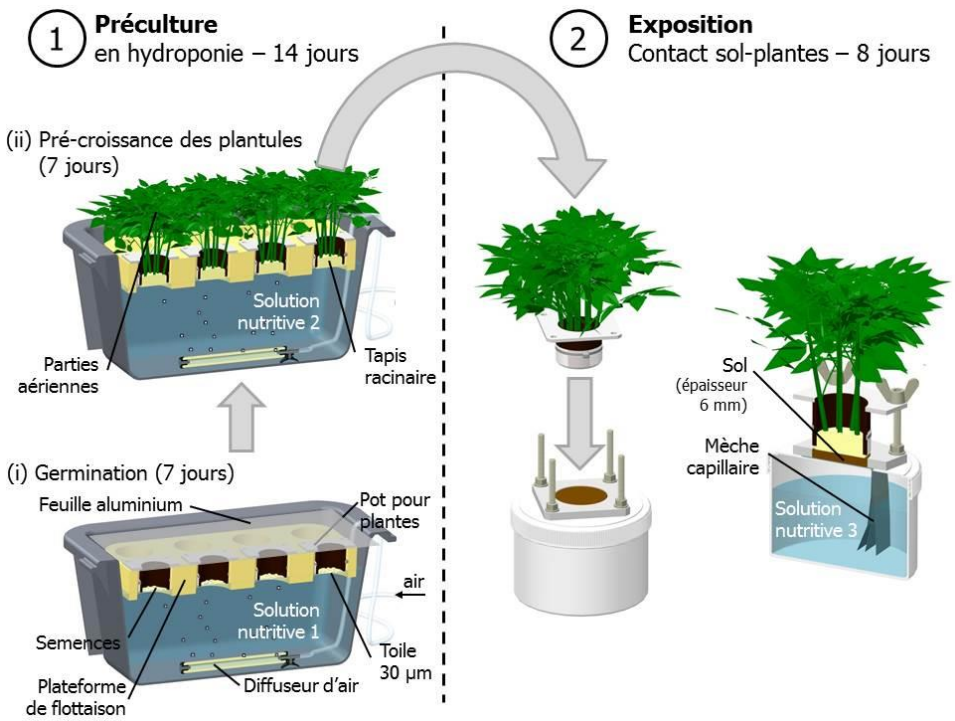

Figure 2. *Procédure expérimentale normalisée de culture en RHIZOtest (NF EN ISO 16198) utilisée pour la mesure de la phytodisponibilité du nickel et du chrome.*

Les trois espèces végétales ont été cultivées pendant vingt-deux jours en chambre de culture dans les conditions climatiques moyennes suivantes (jour/nuit) : 16 h/8 h, 24 ± 2/23 ± 2 °C, 60 ± 4 % d'humidité de l'air et entre 280 et 350 mol. photons/m^2 s d'intensité lumineuse. Deux chambres de cultures identiques ont été utilisées durant la phase de préculture. Les plantes ont été changées de chambre de culture quatre fois durant les vingt-deux jours pour limiter l'effet sur la croissance de différences minimes de conditions climatiques entre les deux chambres de culture. Après avoir été pré-cultivées en hydroponie pendant deux semaines, les trois espèces végétales ont été mises en contact pendant huit jours avec les quatre sols préalablement incubés pendant deux semaines avec un apport équivalent à 26 ou 50 t MS/ha des cendres ABR ou ALG (Fig. 3). Pour chaque sol, un échantillon sans apport de cendres a été incubé dans les mêmes conditions. L'alimentation hydrique et en éléments majeurs des plantes a été assurée grâce à trois mèches capillaires reliant la face inférieure des galettes de sol à une solution nutritive contenant $Ca(NO_3)_2$ 2 mM, KNO_3 2 mM, $MgSO_4$ 1 mM et KH_2PO_4 50 µM (Fig. 2). Chacune des trente-six modalités expérimentales (i.e. 4 sols x 3 doses d'apport x 3 espèces végétales) a été répétée cinq fois, de telle sorte que 180 dispositifs de contact RHIZOtest ont été déployés.

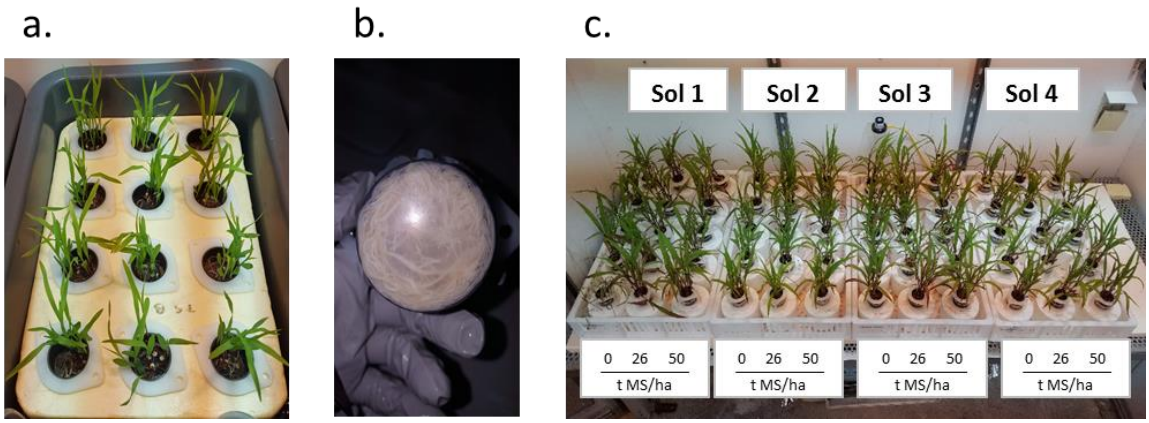

Figure 3. *Photographies de la culture du sorgho en RHIZOtest, montrant un bac de pré-culture en hydroponie (a), le tapis racinaire du sorgho à l'issue de la phase de pré-culture vu par transparence à travers la toile en polyamide (b) et vue d'ensemble des dispositifs de contact entre le sorgho et les quatre sols avec ou sans apport de cendres (c).*

A l'issue de la phase de préculture en hydroponie, les plantes de 9 à 10 pots pour chaque espèce ont été récoltées, séchées à 40 °C, pesées pour déterminer la biomasse sèche, puis découpées grossièrement avant analyses avec des ciseaux ayant des lames en céramique afin d'éviter toute contamination métallique. Ces échantillons de plantes récoltées à l'issue de la phase de préculture ont permis d'estimer les quantités de Ni et Cr accumulées dans les plantes avant leur exposition au sol. A l'issue de la phase de contact sol-plante, les plantes entières (parties aériennes et racinaires) ont été récoltées, séchées à 40 °C, pesées, puis découpées grossièrement avant analyses.

2.7. Analyse des plantes et calcul de la phytodisponibilité

Les plantes ont été minéralisées au laboratoire d'analyses agronomiques du Cirad (US Analyses, Montpellier) par la méthode de double calcination et diacide (HCl et HF concentrés) décrite dans la norme NF EN ISO 16198. La concentration en Ni et Cr dans les minéralisats a ensuite été déterminée par spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) au laboratoire HydroSciences Montpellier. Les protocoles de minéralisation et de dosage ont été validés en insérant dix échantillons de deux matériaux de référence, des feuilles de fraisiers (LGC7162) et des feuilles de thé (INCT-TL-1), à raison de 1 échantillon de chaque matériau par série et une vingtaine de blancs de minéralisation à raison de 2 à 3 blancs par série au sein des séries d'échantillons de la présente étude. Les taux de recouvrement moyens pour Ni et Cr ont été respectivement de 92 et 73 % pour la référence LGC7162 et de 81 et 106 % pour la référence INCT-TL-1. La limite de quantification du dosage par ICP-MS a été estimée à 0,012 et 0,018 µg/L pour Ni et Cr, respectivement, soit des valeurs plus de trente fois inférieures aux concentrations les plus faibles mesurées dans les échantillons de la présente étude. Le protocole de dosage par ICP-MS a également été validé par

l'analyse de sept échantillons de la solution de référence SLRS6, qui ont présenté un taux de recouvrement moyen de 100 % pour Ni et Cr.

La phytodisponibilité de Ni et Cr a été estimée à partir du flux de prélèvement de Ni et Cr dans la plante entière durant la phase d'exposition de la plante au sol. Le flux de prélèvement de Ni et Cr a été calculé comme cela est décrit dans la norme NF EN ISO 16198.

2.8. Traitement et analyses statistiques des données

Une hausse momentanée de la température dans une des deux chambres de culture au cours de la première semaine de préculture a engendré une différence visible de biomasse entre les dispositifs pour le chou. Les dispositifs présentant ces biomasses anormalement faibles ont donc été écartés, ce qui s'est traduit par un nombre de répétitions par modalité de 4 pour le chou au lieu de 5 prévues initialement. Pour le sorgho, un seul dispositif a été écarté sur l'ensemble des modalités du fait d'une biomasse anormalement faible par rapport aux autres dispositifs. Aucun dispositif n'a été écarté pour la tomate.

Lors du calcul des quantités moyennes de Ni et Cr accumulées dans les plantes à l'issue de la phase de préculture, les valeurs négatives obtenues pour Cr uniquement après retranchement de la valeur des blancs (une pour le chou, trois pour le sorgho et deux pour la tomate) pour chacun des 9 à 10 pots récoltées par espèce ont été remplacées par la moyenne des valeurs positives. Un test de Grubbs a ensuite été utilisé pour éliminer les valeurs aberrantes pour chacune des espèces. Ainsi, 2 valeurs pour Ni et 1 valeur pour Cr pour le chou et 2 valeurs pour Ni pour la tomate ont été supprimées.

Afin d'éliminer les valeurs aberrantes parmi les flux de prélèvements de Ni et Cr à l'issue de la phase de contact sol-plante, un test de Grubbs a été réalisé sur les quatre ou cinq répétitions de chacune des modalités présentant un coefficient de variation supérieur au coefficient de variation moyen de l'ensemble des modalités pour chaque espèce et chaque élément trace. Ainsi, 3 valeurs pour Ni et 4 valeurs pour Cr pour le chou, 3 valeurs pour Ni et 2 valeurs pour Cr pour le sorgho et 2 valeurs pour Ni et 1 valeur pour Cr pour la tomate ont été supprimées. Au final, en tenant compte de la suppression des valeurs anormalement faibles de biomasses et des valeurs aberrantes de flux de prélèvement, 80, 94 et 98 % des jeux de données initiaux pour le chou, le sorgho et la tomate, respectivement, ont été utilisés pour les analyses statistiques des valeurs de flux de prélèvement.

Pour chacune des trois espèces végétales, les groupes statistiquement homogènes de biomasses des plantes récoltées avant ou après la phase d'exposition au sol ont été déterminés, soit par une analyse de variance (Anova ; test de Fischer) suivie d'un test de comparaison multiple appariée (test de Fischer de différence la moins significative) lorsque les hypothèses de normalité (test de Shapiro-Wilk) et d'homoscédasticité (test de Bartlett) étaient validées, soit par un test non paramétrique (test de Kruskal-Wallis) suivi d'un test de comparaison multiple par paires (test de Dunn) dans le cas contraire.

Une Anova (test de Fischer) a été réalisée sur l'ensemble du jeu de données pour évaluer la significativité (p-value inférieure ou égale à 5 % ; $p \leq 0{,}05$) de l'effet des cinq variables testées sur les flux de prélèvement : i.e. les deux éléments traces, les quatre types de sols, les deux types de cendres, les trois doses d'apport de cendres et les trois espèces. En fonction du niveau de significativité de chacune des variables, les groupes statistiquement homogènes de flux de prélèvement ont été déterminés, soit par une Anova (test de Fischer) suivie d'un test de comparaison multiple appariée (test de Fischer de différence la moins significative) lorsque les hypothèses de normalité (test de Shapiro-Wilk) et d'homoscédasticité (test de Bartlett) étaient validées, soit par un test non paramétrique (test de Kruskal-Wallis) suivi d'un test de comparaison multiple par paires (test de Dunn) dans le cas contraire.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Biomasses des plantes

Comme attendu, les biomasses des trois espèces végétales ont augmenté significativement et en moyenne d'un facteur 3,5 entre la fin de la phase de préculture et la fin de la phase de contact sol-plante (Fig. 4).

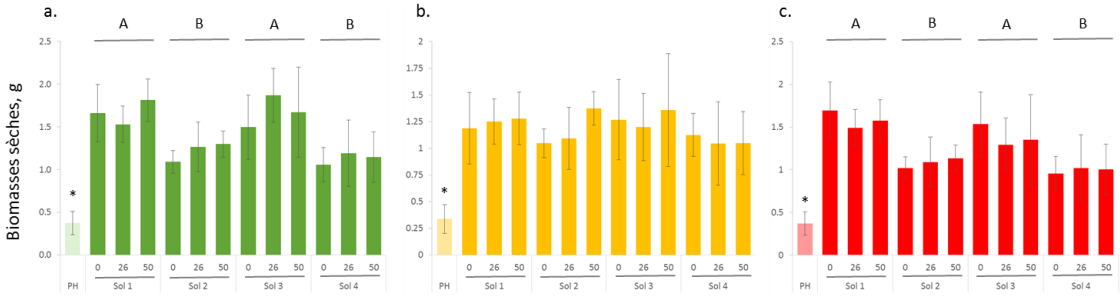

Figure 4. *Biomasses sèches du chou (a), du sorgho (b) et de la tomate (c) à l'issue des phases de préculture en hydroponie (PH) et de contact avec les quatre sols amendés avec des cendres aux doses de 0, 26 ou 50 t MS/ha. Pour chaque espèce, une étoile indique une différence significative de biomasse entre la fin des phases de préculture et de contact (p ≤0,05). Pour chaque espèce, des lettres différentes indiquent une différence significative de biomasse à l'issue de la phase de contact entre les différents types de sols (p ≤0,05), alors qu'une absence de lettre indique une absence de différence significative.*

Les biomasses du sorgho à l'issue de la phase de contact sol-plante n'ont présenté aucune différence significative quels que soient le type de sols et la dose de cendres apportée (Fig. 4). De même, les biomasses du chou et de la tomate n'ont présenté aucune différence significative pour chaque type de sols quelle que soit la dose de cendres apportée. En revanche, les biomasses du chou et de la tomate se sont avérées significativement supérieures dans les sols 1 et 3 par rapport aux sols 2 et 4. Pour le chou et la tomate cultivés sur les sols 2 et 4, un peu de solution nutritive a dû être ajoutée à la pipette par le dessus du dispositif pour éviter un flétrissement des plantes. Les conditions hydriques plus contraignantes pour ces deux sols peuvent s'expliquer par le fait qu'ils correspondent aux types de sols présentant généralement les plus fortes teneurs en argile minéralogique (Raunet 1991). Une plus forte teneur en argile se traduit généralement par une plus forte rétention de l'eau par le sol et en conséquence par une plus grande difficulté pour une espèce végétale donnée à satisfaire ses besoins en eau (Calvet 2003). Les cultures de chou et de tomate sur les sols 2 et 4 ont donc vraisemblablement vu leur croissance légèrement limitée par un stress hydrique.

3.2. Principaux effets significatifs sur les flux de prélèvements en nickel et en chrome

Sur les cinq variables explicatives testées, les types de sols, d'éléments traces et d'espèces végétales ont chacun eu un effet statistiquement significatif sur les flux de prélèvement de Ni et Cr par les plantes (Tab. 4). En revanche, **la dose d'apport de cendres et le type de cendres n'ont chacun eu aucun effet statistiquement significatif sur les flux de prélèvement de Ni et Cr par les plantes**.

Tableau 4. *Significativité de l'effet des cinq variables pouvant affecter les flux de prélèvements de Ni et Cr par les plantes.*

Variable	Degré de liberté	Sommes des carrés	*F*	Significativité
Sol	3	94,3	416	$< 10^{-3}$
Elément trace	1	26,7	354	$< 10^{-3}$
Espèce végétale	2	7,1	47	$< 10^{-3}$
Dose d'apport	1	0,3	2	0,1
Type de cendres	2	0,1	1	0,3

Le type de sols est la variable qui a eu l'effet statistiquement significatif le plus fort (Tab. 4). Les flux de prélèvements de Ni et Cr par les plantes ont pu être classés par sol dans l'ordre suivant : sol 3 > sol 2 > sol 1 = sol 4 (Fig. 5a). Ce classement des flux de prélèvement de Ni et Cr par les plantes en fonction du type de sols suit le gradient de concentration en Ni et Cr total dans les sols (Tab. 2), ce qui suggère que la disponibilité de Ni et Cr dans ces quatre sols est corrélée à la concentration totale en Ni et Cr.

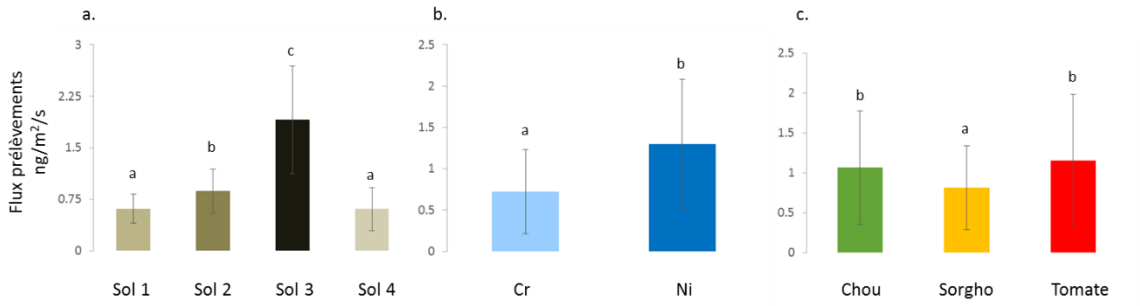

Figure 5. *Flux de prélèvements de nickel (Ni) et chrome (Cr) par les plantes pour chacun/e des quatre sols (a), des deux éléments traces (b) et des trois espèces végétales (c). Des lettres différentes indiquent une différence significative ($p \leq 0,05$).*

Le type d'élément trace est la variable ayant présenté le deuxième effet statistiquement significatif le plus fort (Tab. 4). Les flux de prélèvement par les plantes se sont avérés être en moyenne plus élevés pour Ni que pour Cr, avec des flux de prélèvement en moyenne supérieurs à 1 ng/m²/s pour Ni et à l'inverse inférieurs à 1 ng/m²/s pour Cr (Fig. 5b). Ces résultats sont cohérents avec les

mesures de flux de prélèvement de Ni et Cr par le chou et la tomate faites lors du test interlaboratoire de l'outil RHIZOtest (Bravin et al. 2012).

Le type d'espèce végétale est la variable ayant présenté le troisième effet statistiquement significatif le plus fort (Tab. 4). Les flux de prélèvement en Ni et Cr par les plantes se sont avérés être en moyenne plus faibles pour le sorgho que pour le chou et la tomate (Fig. 5c). Ce résultat est cohérent avec des résultats antérieurs : parmi dix espèces végétales évaluées pour leur capacité à prélever les éléments traces (arsenic, cadmium, cuivre, plomb et zinc), le sorgho faisait partie des trois espèces présentant les flux de prélèvement les plus faibles alors que la chou et la tomate ont été les deux espèces présentant les flux de prélèvement les plus forts (ANR NormaRHIZO, données non publiées ; NF EN ISO 16198).

3.3. Effet du type et de la dose d'apport de cendres

Nous n'avons pas observé d'effet statistiquement significatif du type et de la dose d'apport de cendres sur les données de flux de prélèvement de Ni et Cr par les plantes lorsque ces deux variables sont considérées individuellement et sans distinction des types de sols, d'éléments traces et d'espèces végétales. Nous avons donc recherché des effets significatifs entre les doses d'apport de cendres en réalisant les analyses pour chaque combinaison des quatre variables suivantes : type de sols, éléments traces, espèces végétales et type de cendres.

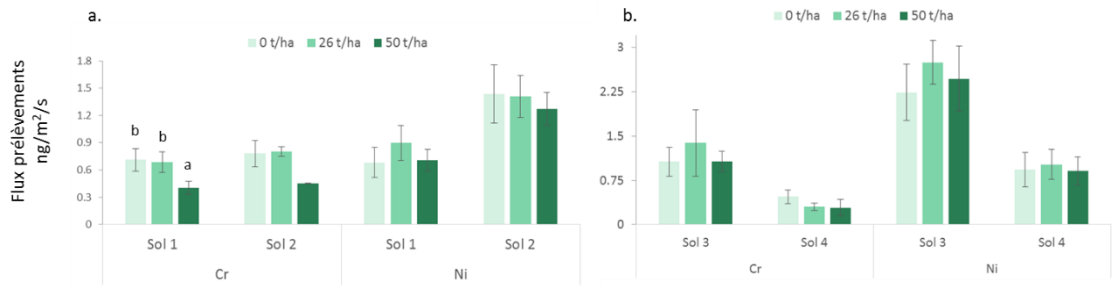

Figure 6. *Flux de prélèvements de nickel (Ni) et de chrome (Cr) par le chou exposé aux deux sols ayant reçu des apports équivalents à 0, 26 ou 50 t MS/ha des cendres d'ALG (a) ou d'ABR (b). Des lettres différentes indiquent une différence significative (p ≤0,05), alors qu'une absence de lettre indique une absence de différence significative.*

Pour le chou, il n'y a pas eu d'effet significatif des doses d'apport de cendres quel que soit le type de sols, l'élément trace ou le type de cendres, à l'exception du sol 1 pour lequel la dose d'apport de 50 t MS/ha de cendres d'ALG a engendré un flux de prélèvement de Cr significativement plus faible qu'aux doses d'apport de 0 et 26 t MS/ha (Fig. 6).

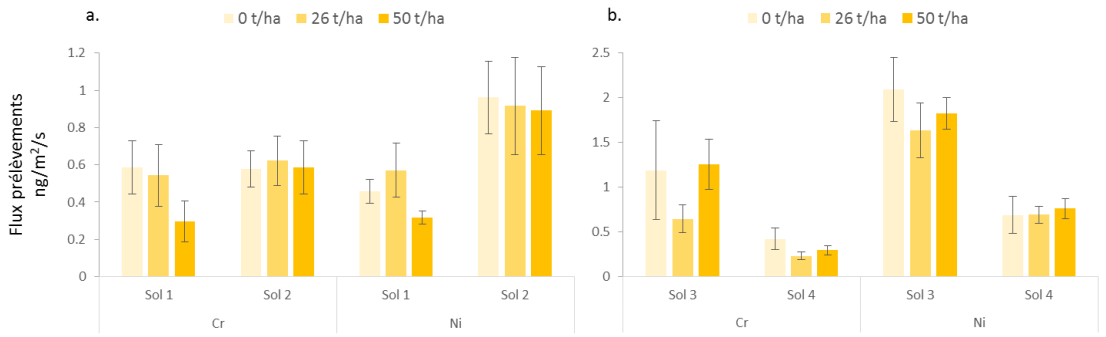

Figure 7. *Flux de prélèvements de nickel (Ni) et de chrome (Cr) par le sorgho exposé aux deux sols ayant reçu des apports équivalents à 0, 26 ou 50 t MS/ha des cendres d'ALG (a) ou d'ABR (b). Aucune différence significative n'a été observée (p > 0,05).*

Pour le sorgho, il n'y a eu aucun d'effet significatif des doses d'apport de cendres quel que soit le type de sols, l'élément trace ou le type de cendres (Fig. 7).

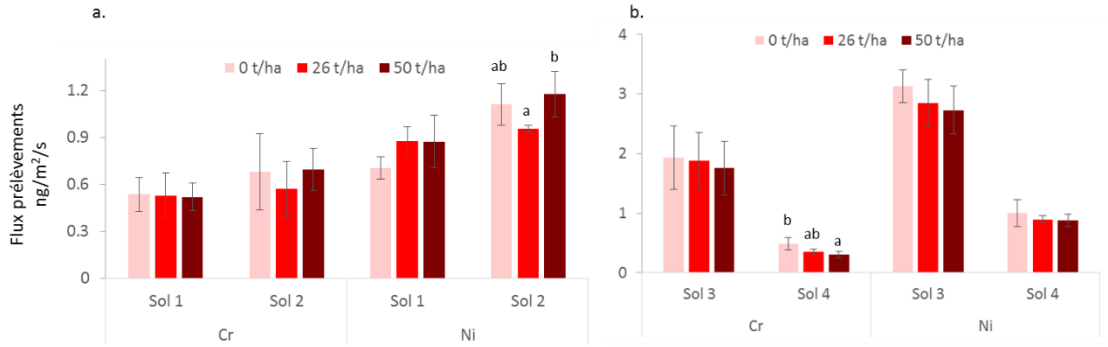

Figure 8. *Flux de prélèvements de nickel (Ni) et de chrome (Cr) par la tomate exposée aux deux sols ayant reçu des apports équivalents à 0, 26 ou 50 t MS/ha des cendres ALG (a) ou ABR (b). Des lettres différentes indiquent une différence significative (p ≤0,05), alors qu'une absence de lettre indique une absence de différence significative.*

Pour la tomate, il n'y a pas eu d'effet significatif des doses d'apport de cendres quel que soit le type de sols, l'élément trace ou le type de cendres, à deux exceptions près : (i) pour le sol 2, la dose d'apport de 26 t MS/ha de cendres ALG a engendré un flux de prélèvement de Ni significativement plus faible qu'aux doses d'apport de 0 et 50 t MS/ha et (ii) pour le sol 4, la dose d'apport de 50 t MS/ha de cendres ALG a engendré un flux de prélèvement de Cr significativement plus faible que la modalité sans apport de cendres (Fig. 8).

Sur l'ensemble du jeu de données, seules deux modalités (les flux de prélèvement de Ni par le sorgho sur le sol 4 et par la tomate sur le sol 1) ont montré une tendance (non significative) à

l'augmentation qui soit proportionnelle à l'augmentation de la dose d'apport de cendres (Fig. 6, 7 et 8). A l'inverse, dix modalités ont présenté une tendance (significative ou non significative) à la diminution qui soit proportionnelle à l'augmentation de la dose d'apport de cendres (Fig. 6, 7 et 8). Enfin, douze modalités n'ont présenté aucune tendance liée à l'apport de cendres (Fig. 6, 7 et 8). Malgré le fait que les apports de cendres aient contaminé les sols en apportant entre 1 et 15% de Ni et Cr supplémentaire à ce qui était initialement présent dans les sols (calculs non présentés), la phytodisponibilité de Ni et Cr n'a jamais significativement augmenté avec l'apport de cendres et s'est avérée être au contraire soit d'autant plus faible que la dose d'apport de cendres a été importante (pour deux modalités sur vingt-quatre) soit similaire quelle que soit la dose d'apport de cendres (pour vingt-deux modalités sur vingt-quatre).

L'absence d'augmentation des flux de prélèvements de Ni et Cr par les plantes pourraient notamment s'expliquer par l'effet alcalinisant attendu des cendres. En augmentant le pH des sols, les cendres ont diminué la disponibilité de Ni et Cr dans les sols amendés et en conséquence leur phytodisponibilité pour les plantes. La diminution de la disponibilité des cations métalliques comme Ni et Cr lorsque le pH du sol augmente est en effet largement décrit dans la littérature et est attribuée à l'augmentation de la rétention des cations métalliques par la phase solide du sol (e.g. McBride 1989 ; Sauvé et al. 2000). Notre équipe vient notamment de démontrer que l'effet alcalinisant induit par l'apport à long-terme de produits résiduaires organiques sur les sols agricoles de La Réunion est le principal facteur expliquant l'absence d'augmentation de la disponibilité du cuivre et du zinc malgré l'augmentation du niveau de contamination des sols (Laurent et al. 2019). Dans le cas de la présente étude, ce processus d'alcalinisation du sol pourrait donc être suffisamment fort pour contrebalancer l'effet de la contamination des sols par l'apport de cendres sur la phytodisponibilité de Ni et Cr. Une autre hypothèse pourrait être que Ni et Cr sont initialement sous une ou des formes chimiques très peu disponible dans les cendres.

Dans une récente méta-analyse synthétisant les résultats de 85 études sur l'effet de l'apport de cendres de différentes origines sur la phytodisponibilité des éléments minéraux, Yu et al. (2019) ont montré que, même à des doses d'apport inférieures à 5 % du sol en masse (i.e. doses équivalentes à celles de la présente étude ; calculs non présentés), une augmentation significative des concentrations en Ni et Cr dans les plantes cultivées était généralement observée. Cependant, sur ces 85 études, une seule étude semble avoir intégré des données issues de l'apport au sol de cendres de bagasse de canne à sucre. Dans cette étude réalisée sur trois ans et demi de suivi de terrain sur un type de sols sableux, Thind et al. (2012) ont observé que la concentration de Cr (la concentration en Ni n'a pas été mesurée) dans les grains et les pailles de blé n'avait pas varié

significativement quel que soit le type et la dose d'apport de cendres au sol. Même si la concentration en Cr était environ 25 fois plus faible dans l'étude de Thind et al. (2012) que la concentration moyenne mesurée dans les cendres d'ABR et d'ALG, ces résultats sont donc cohérents avec la présente étude en suggérant que **l'apport de cendres de bagasse à des doses agronomiques n'augmente pas la phytodisponibilité des éléments traces métalliques et notamment de Ni et Cr**. La contradiction apparente entre les résultats de Yu et al. (2019), d'une part, et les résultats de Thind et al. (2012) et la présente étude, d'autre part, laissent en revanche en suspens la question d'un comportement particulier des cendres issues de la bagasse de canne à sucre du point de vue de la phytodisponibilité de Ni et Cr.

4. CONCLUSION

La présente étude avait pour objectif d'évaluer si la phytodisponibilité de Ni et Cr pour la canne à sucre et les cultures maraîchères augmentait ou non avec l'apport des deux types de cendres de bagasse d'Albioma dans les conditions d'application autorisées (i.e. 26 et 50 t MS/ha) par l'Anses dans son avis rendu en avril 2015. Pour répondre à cette question, le Cirad a conduit une expérimentation en laboratoire basée sur l'outil RHIZOtest, qui est à notre connaissance le seul test végétal spécifiquement normalisé pour évaluer la phytodisponibilité des ETM.

Les résultats obtenus ont montré que, malgré le fait que les apports de cendres ont apporté entre 1 et 15% de Ni et Cr supplémentaire à ce qui était initialement présent dans les sols, la phytodisponibilité de Ni et Cr n'a jamais significativement augmenté avec l'apport de cendres et s'est avérée être au contraire soit d'autant plus faible que la dose d'apport de cendres a été importante soit similaire quelle que soit la dose d'apport de cendres et, ce, quels que soient l'espèce végétale, le type de cendres ou le type de sols considéré. En cohérence avec la seule autre étude trouvée portant sur la phytodisponibilité de Ni et Cr suite à l'apport de cendres de bagasse au sol, les résultats de la présente étude suggèrent que l'apport des deux types de cendres d'Albioma n'augmente pas la phytodisponibilité de Ni et Cr pour la canne à sucre (par extrapolation des résultats obtenus sur le sorgho) et les cultures maraîchères (par extrapolation des résultats obtenus sur le chou et la tomate) à des doses d'apport équivalentes à 26 et 50 t MS/ha.

5. BIBLIOGRAPHIE

Borot C., Bassonville P., Chabalier P. F. et Légier P. (2011) Cahier des charges du Système Expert Réunionnais D'Aide à la Fertilisation (SERDAF). Cirad, 42 p.

Bravin M. N., Michaud A. M., Larabi B. et Hinsinger P. (2010) RHIZOtest: A plant-based biotest to account for rhizosphere processes when assessing copper bioavailability. Environ. Pollut., 158, 3330-3337.

Bravin M. N, Lemal L., Cazevieille P., Chevassus-Rosset C., Marger J.-L., Montes M. et Doelsch E. (2012) Validation du RHIZOtest par un test interlaboratoire international en vue de sa normalisation. Rapport final, Ademe, contrat n° 1172C0042, 16 p.

Calvet R. (2003) Le sol : Propriétés et fonctions – Tome 2 : Phénomènes physiques et chimiques – Applications agronomiques et environnementales. Editions France Agricole, Dunod, 511 p.

Collin B. et Doelsch E. (2010) Impact of high natural soilborne heavy metal concentrations on the mobility and phytoavailability of these elements for sugarcane. Geoderma, 159, 452-458.

Daaf (2019) Agreste : La Réunion – Filière fruits & légumes. Service de l'information statistique et économique, 8 p.

de Setta N., Monteiro-Vitorello C. B., Metcalfe C. J., Cruz G. M. Q., Del Bem L. E., Vicentini R., Nogueira F. T. S., Campos R. A., Nunes S. L., Turrini P. C. G., Vieira A. P., Cruz E. A. O., Corrêa T. C. S., Hotta C. T., Varani A. de M., Vautrin S., da Trindade A. S., Vilela M. de M., Lembke C. G., Sato P. M., de Andrade R. F., Nishiyama Jr M. Y., Cardoso-Silva C. B., Scortecci K. C., Garcia A. A. F., Carneiro M. S., Kim C., Paterson A. H., Bergès H., D'Hont A., de Souza A. P., Souza G. M., Vincentz M., Kitajima J. P. et Van Sluys M.-A. (2014) Building the sugarcane genome for biotechnology and identifying evolutionary trends. BMC Genomics, 15, 540.

Garsmeur O., Charron C., Bocs S., Jouffe V., Samain S., Couloux A., Droc G., Zini C., Glaszmann J.-C., Van Sluys M.-A. et D'Hont A. (2011) High homologous gene conservation despite extreme autopolyploid redundancy in sugarcane. New Phytol., 189, 629-642.

Laurent C., Bravin M. N., Crouzet O., Pelosi C., Tillard E., Lecomte P. et Lamy I. (2019) Increased soil pH and dissolved organic matter after a decade of organic fertilizer application mitigates copper and zinc availability despite contamination. Sci. Tot. Environ., 709, 135927.

McBride M. B. (1989) Reactions controlling heavy metals solubility in soils. Advances in Soil Science, 10, 1-56.

Mortureux M. (2015a) Avis de l'agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à la demande d'homologation du produit CENDRES DE

BAGASSE ALBIOMA BOIS-ROUGE, à base de cendres de bagasse de canne à sucre, de la société ALBIOMA BOIS-ROUGE (Ile de La Réunion). Anses – Dossier n° 2013-1917, 16 avril 2015, 10 p.

Mortureux M. (2015b) Avis de l'agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à la demande d'homologation du produit CENDRES DE BAGASSE ALBIOMA LE GOL, à base de cendres de bagasse de canne à sucre, de la société ALBIOMA LE GOL (Ile de La Réunion). Anses – Dossier n° 2014-0063, 16 avril 2015, 10 p.

NF EN 13650 (2002) Amendements du sol et supports de culture – Extraction d'éléments solubles dans l'eau régale.

NF EN ISO 16198 (2015) Soil Quality – Plant-based test to assess the environmental bioavailability of trace elements to plants.

Raunet M. (1991) Le milieu physique et les sols de l'île de La Réunion : Conséquences pour la mise en valeur agricole. Cirad, 515 p.

Sauvé S., Hendershot W. and Allen H. E. (2000) Solid-solution partitioning of metals in contaminated soils: Dependence on pH, total metal burden, and organic matter. Environmental Science & Technology, 34, 1125-1131.

Thinda H. S., Yadvinder-Singha, Bijay-Singhb, Varinderpal-Singhb, Sharmaa S., Vashisthab M. and Singh G (2012) Land application of rice husk ash, bagasse ash and coal fly ash: Effects on crop productivity and nutrient uptake in rice–wheat system on an alkaline loamy sand. Field Crop Research, 135, 137-144.

Yu C.-L., Deng Q., Jian S., Li J., Dzantor E. K. and Hui D. (2019) Effects of fly ash application on plant biomass and element accumulations: a meta-analysis. Environmental Pollution, 250, 137-142.

Département PERSYST, unité RECYCLAGE ET RISQUE, Direction régionale Réunion-Mayotte

40 chemin Grand Canal, CS 12014, 97743 Saint-Denis cedex 9, La Réunion, France

Tél. : + 262 (0)2 62 72 78 30 – Secr. : + 262 (0)2 62 72 78 20

Evaluation à l'aide du RHIZOtest de la phytodisponibilité du nickel et du chrome apportés par l'épandage sur les sols agricoles des cendres de bagasse produites par Albioma à La Réunion

Résumé : Suite à l'homologation des cendres de bagasse produites par Albioma sur les centrales du Gol et de Bois Rouge, l'agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) a demandé à Albioma de fournir des analyses de nickel (Ni) et de chrome (Cr) dans des plants de canne à sucre cultivés sur des sols amendés avec les deux types de cendres de bagasse produites et de comparer ces analyses avec celles réalisées sur des plants de canne à sucre issus de parcelles non amendées et ayant les mêmes caractéristiques pédologiques. Albioma souhaitant par ailleurs élargir l'homologation des deux types de cendres à l'apport sur les sols à vocation maraîchère, Albioma a confié au centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad) la réalisation d'une étude ayant pour objectif d'évaluer si le transfert (i.e. la phytodisponibilité) de Ni et Cr pour la canne à sucre et les cultures maraîchères augmentait ou non avec l'apport des deux types de cendres de bagasse d'Albioma dans les conditions d'application autorisées par l'Anses.

Pour répondre à cette question, le Cirad a conduit une expérimentation en chambre de culture basée sur l'outil RHIZOtest, à notre connaissance le seul test végétal spécifiquement normalisé pour évaluer la phytodisponibilité des éléments traces métalliques. Le travail a été mené sur un échantillon composite des deux types de cendres d'Albioma, deux échantillons de sol pour chaque type de cendres et trois espèces végétales. Le sorgho (*Sorghum bicolor*) a été sélectionné comme espèce adaptée à la culture en RHIZOtest la plus proche génétiquement de la canne à sucre. La tomate (*Lycopersicon esculentum*) et le chou (*Brassica oleracea*) ont été sélectionnés comme espèces maraîchères de référence à la fois pour l'utilisation normalisée du dispositif RHIZOtest et pour les cultures maraîchères à La Réunion. Pour chacun des deux types de cendres, les doses d'apport de 0, 26 et 50 t MS/ha ont été testées. Après avoir été pré-cultivées en hydroponie pendant deux semaines, les trois espèces végétales ont été mises en contact pendant huit jours avec les quatre sols préalablement incubés ou non avec les cendres. A l'issue de la phase de contact sol-plante, les plantes entières (parties aériennes et racinaires) ont été récoltées. La phytodisponibilité de Ni et Cr a été estimée à partir du flux de prélèvement de Ni et Cr dans la plante entière durant la phase d'exposition de la plante au sol.

Si les trois espèces végétales ont crû comme attendu entre la fin de la phase de préculture en hydroponie et la fin de la phase de contact sol-plante, les biomasses du chou et de la tomate ont été plus faibles pour les deux sols les plus argileux à l'issue de la phase de contact. Pour chaque espèce et type de sols, les biomasses des trois espèces végétales n'ont en revanche pas été affectées par l'apport de cendres. Contrairement aux types de sols, d'éléments traces et d'espèces végétales, la dose d'apport de cendres et le type de cendres n'ont individuellement eu aucun effet statistiquement significatif sur les flux de prélèvement de Ni et Cr par les plantes. Malgré le fait que les apports de cendres aient apporté entre 1 et 15 % de Ni et Cr supplémentaire à ce qui était initialement présent dans les sols, **la phytodisponibilité de Ni et Cr n'a jamais significativement augmenté avec l'apport de cendres et s'est avérée être au contraire soit d'autant plus faible que la dose d'apport de cendres a été importante, soit similaire quelle que soit la dose d'apport de cendres**.

En cohérence avec la seule autre étude trouvée portant sur la phytodisponibilité de Ni et Cr suite à l'apport de cendres de bagasse au sol, les résultats de la présente étude suggèrent que **l'apport des deux types de cendres d'Albioma n'augmenterait pas la phytodisponibilité de Ni et Cr pour la canne à sucre et les cultures maraîchères à des doses d'apport au champ équivalentes à 26 et 50 t MS/ha**.