

Sécuriser les filières de production face à la contamination des sols : développement de stratégies de séquestration adaptées au contexte Antillais

Introduction

Parmi les nombreux services écosystémiques que le sol offre, la fonction de production joue un rôle critique dans la garantie de la sécurité alimentaire des populations. Dans les Antilles, un contexte insulaire, l'agriculture locale se caractérise par sa diversité tant sur le plan de la production animale que végétale. Elle constitue une source d'emplois et renforce l'autonomie des Antilles. Cependant, la présence de la Chlordécone (CLD), qui perturbe la sécurité chimique des produits locaux, a des répercussions négatives sur la résilience des filières de production et la confiance des consommateurs. Pour rétablir cette sécurité, l'une des approches envisageables serait de prévenir le transfert de ces polluants du sol vers les organismes vivants, qu'il s'agisse de végétaux ou d'animaux.

Au cours de la dernière décennie, une méthode spécifique a été largement étudiée pour atteindre cet objectif, notamment en ce qui concerne la CLD : l'amendement des sols contaminés à l'aide de matériaux carbonés hautement poreux dans le but de séquestrer les polluants. Cette approche améliore la texture du sol tout en contribuant à la séquestration du carbone. Les avantages agronomiques qu'elle offre se combinent avec la capacité de ces matériaux à adsorber les polluants organiques. Deux projets financés par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) (INSSICCA et PYROSAR) ainsi qu'un projet de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) (PIEGEACHLOR) ont eu pour objectif d'utiliser des biochars et des charbons actifs comme agents d'amendement afin de développer, d'évaluer et de perfectionner des stratégies de séquestration des polluants organiques. Ces projets ont également permis de comparer l'efficacité de cette stratégie pour différents types de polluants et de sols.

Démarche expérimentale

Trois objectifs distincts et successifs ont été poursuivis : (i) évaluer la réduction de transfert de polluants organo-chlorés (POC) à 3 biotes (ii) comparer la séquestration de la chlordécone à celle d'autres polluants organiques (iii) affiner la stratégie de séquestration en déterminant l'impact du taux d'amendement et de la taille des particules. A défaut de détailler l'ensemble des techniques utilisées, les méthodes utilisées sont présentées succinctement ci-dessous.

Quatre biochars ont été produits, 3 par la société Carbofrance (Montiers-sur-Saulx, France) et un par COVACHIM M2E (Université des Antilles). Cinq charbons actifs commerciaux différents ont été de mêmes employés. Les matériaux ont été caractérisés^{1,2,5-7}. Les sols contaminés à la chlordécone sont originaires de Guadeloupe (Andosols et Nitisols). Afin de comparer la susceptibilité de différents POC à cette stratégie, un même sol « OCDE » a été employé et contaminé par (i) de la CLD à hauteur de 1mg/kg de MS ou (ii) un mix PCB - PCDD/F⁴. Ces sols ont été maturés 3 mois avant l'étape d'amendement.

La disponibilité environnementale de la Chlordécone a été évaluée à l'aide d'une méthode in vitro conformément à la norme ISO/TS 16751 Partie A. Les tests de transfert ont été conduits sur trois types d'organismes. Dans le cas de l'expérience réalisée sur les plants de courgettes, les parties aériennes ont été récoltées après 12 semaines. Quant aux essais impliquant des animaux, les poules pondeuses et les porcelets ont été exposés par voie orale, en mélangeant le sol contaminé à leur alimentation. Après respectivement 21 jours et 10 jours d'exposition, les animaux ont été euthanasiés, et des échantillons de tissus cibles ont été prélevés : les jaunes d'œufs des trois derniers jours et le foie pour les poules, ainsi que les muscles et le tissu adipeux pour les porcelets. Tous les échantillons de tissus

cibles ont été soumis à une analyse détaillée dans des laboratoires spécialisés. Les calculs et les tests statistiques présentés ont été réalisés à l'aide du logiciel R, et la méthodologie est expliquée en détail dans les études précédentes.

Principaux résultats

La plupart des charbons actifs apparaissant plus efficaces que les biochar pour limiter le transfert *in vitro* ou *in vivo* (Tableau 1). Le BCS permet une réduction de moitié du transfert, seul BC ayant démontré une efficacité. De manière générale un plus grand transfert a été observé chez les poules pondeuses, comparativement aux autres tests pour l'ensemble des stratégies¹⁻⁷.

Tableau 1. Taux transfert relatifs évalués *in vivo* et *in vitro* observés suivant les matrices carbonées employées, les molécules étudiées et le type de test.

	Sols OCDE		Nitisol		
	BC1 - BC2 - BC3 - CA1	CA2 - CA3		ORBO-DARCO	BCS
CLD	 96.2 ± 7.2 %	 70.7 ± 14 %	 71 ± 6%	 11%- 33%	 48±10%
	 100%*	 11 ± 1%	 2%#	 5±1%- 20±2%	 45±2%
	 100%*	 6 ± 2%	 8 ± 4%		

Les données présentées sont la moyenne obtenue pour le groupe de matrice séquestrante étudiée

* : les données supérieures à 100% ont été remplacées par 100%, de ce fait aucun écart-type n'a été calculé

: Toutes les données sont inférieures à la Limite de Quantification (LQ) et ont été remplacées par la LQ.

Afin de mieux expliquer ces données, une mise en relation avec les caractéristiques de porosité de ces matériaux montre qu'au moins 700m².g⁻¹ de surface poreuse semble nécessaire pour obtenir une réduction de plus de 60% du transfert¹.

Les taux de transfert du sol vers l'œuf des PCDD/F, PCB-NDL et DL, et CLD ont été établis pour des sols amendés par CA1, CA2, CA3 et BC1, BC2, BC3 et sont présentés dans le tableau 2. Les PCDD/F, sont les molécules répondant le mieux à cette stratégie et présentant les plus forts niveaux de réduction (CA2-CA3 ; BR de 16.1 ± 4.8%), suivi des PCB-DL (pour le CA2-CA3 BR de 40,6 ± 8.9 %, moyenne ± ET). La CLD, quant à elle, apparaît moins sensible à cette stratégie. Ainsi, la réduction observée est la plus faible, même pour les charbons actifs les plus efficaces (CA2-CA3 ; BR de 70.7 ± 14 %), les autres matrices apparaissant inopérantes (BR 96.2 ± 7.2 %).

Tableau 2. Classification hiérarchique non supervisée de données de caractérisation et composition de clusters.

TEF : Facteur d'équivalent toxique moyen des PCDD/F du cluster. DF-légers : 2,3,7,8-TCDF, 2,3,7,8-TCDD, 2,3,4,7,8-PCDF. DF-lourds : 1,2,3,7,8-PCDD, 1,2,3,6,7,8-HxCDF, 1,2,3,6,7,8-HxCDD, 7,8-HpCDF, 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD, 1,2,3,4,6,7,8,9-OCDF, 1,2,3,4,6,7,8,9-OCDD. PCB-NDL-lourds : PCB 138, PCB 153, PCB 180. PCB-NDL-légers : PCB 28

Cluster	Biodisponibilité relative (%)	TEF	BC et CA	Composés
1	54±13% (9)	0,28	BC2, BC3, AC1	DF-légers ; PCB-NDL-légers, PCB 77
2	99±6% (18)	-	BC2, BC3, AC1	CLD ; PCB-NDL-lourds
3	65±16% (9)	0,17	BC2, BC3, AC1	DF-lourds
4	49±16% (12)	0,16	AC2, AC3	DF-léger ; PCB-NDL-légers ; PCB-NDL-lourds ; PCB 77 ; CLD
5	15±2 (6)	0,17	AC2, AC3	DF-Lourds

Enfin, les PCB-NDL apparaissent être le groupe de molécules les plus récalcitrants à la stratégie de séquestration employée. Tout d'abord une biodisponibilité relative élevée subsiste malgré l'emploi de la stratégie de séquestration même avec les charbons actifs les plus efficaces (CA2-CA3 ; BR 76 ± 21%),

cette stratégie apparaissant non efficace pour les autres matrices (BR $87 \pm 19\%$). Ces résultats s'expliquent par les propriétés des molécules (Log K_{ow} , masse moléculaire, ...), et la distribution de porosité des matériaux testés².

De nombreuses publications démontrent l'impact de l'amendement de matrices carbonées sur les fonctionnalités du sol agricole sans obtenir de consensus concernant son effet positif ou négatif. Les essais préliminaires menés sur les communautés microbiennes et fongiques démontrent un effet immédiat de l'ajout de ces matrices puis une récupération tant en termes de quantité (Figure 1) que de qualité des consortia à J28. De manière intéressante le CA3, une des matrices les plus efficaces, ne paraît pas modifier l'abondance microbienne (comparativement au sol non amendé). Ce résultat irait dans le sens d'un amendement pouvant impacter l'écologie du sol à court terme avec un impact limité à moyen termes.

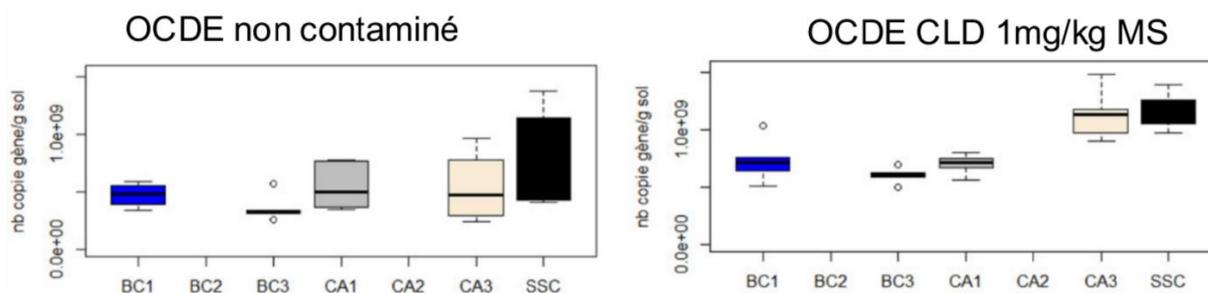


Figure 1. Nombre de copies de gènes 16S (communautés bactériennes) à J28 dans le sol OCDE non contaminé et contaminé (CLD) quand amendé avec les matrices carbonées (ou non amendé SSC). Les matrices BC2 et CA2 ne sont pas présentées.

Afin d'améliorer l'efficacité de la stratégie, deux paramètres sont en cours d'investigation sur le BCS⁵: la taille des particules et le taux d'amendement. Les études relatives à la taille des particules indiquent qu'une taille réduite de particule entraîne une séquestration plus efficace⁷ (Figure 3). De la même manière une augmentation du taux d'amendement permet de réduire sensiblement ce transfert⁷.

Des essais *in situ* sont d'ores et déjà programmés sur de petites parcelles. Un chiffrage de son emploi de cette méthodologie est en cours. Mêlant des approches participatives, ces parcelles permettront d'assurer l'efficacité de cette stratégie au cours du temps et d'évaluer son innocuité. Son impact sur la fertilité du sol, et l'apport d'éléments à même de la perturber (Sel, Arsenic) seront des paramètres investigués lors de la thèse en cours de Perrine Stephan (URAFPA – LAE, Université de Lorraine). Pour répondre plus largement à la problématique antillaise, il serait nécessaire de produire localement des quantités significatives de biochars et/ou de charbons actifs. Une relocalisation tant dans sa mise en œuvre que dans la production de ces matrices sera donc à envisager.

Conclusion

Il apparaît que (i) seuls les matériaux présentant une porosité importante limitent significativement le transfert de ces POC, (ii) la taille des particules et le taux d'amendement utilisés sont corrélés (respectivement positivement et négativement) avec le transfert de ces polluants, (iii) l'efficacité d'une telle stratégie dépend du biote cible. Une voie de gestion locale et intégrée pourrait être un des outils de gestion des parcelles de jardins et des petites exploitations contaminées.

Contacts

Matthieu DELANNOY⁽¹⁾, Yves LE ROUX⁽¹⁾, Sarra GASPARD⁽²⁾, Stefan JURJANZ⁽¹⁾, Séverine PIUTTI⁽³⁾, Guido RYCHEN⁽¹⁾, Cyril FEIDT⁽¹⁾

(1) URAFPA, Université de Lorraine, INRAE, 2 Avenue de la Forêt de Haye, 54505 Vandœuvre-Lès-Nancy, France – matthieu.delannoy@univ-lorraine.fr

(2) COVACHIM- M2E - Connaissance et Valorisation : Chimie des Matériaux, Environnement, Energie, Université des Antilles, 97157 Pointe-à-Pitre, France

(3) LAE, Université de Lorraine, 2 Avenue de la Forêt de Haye, 54505 Vandœuvre-Lès-Nancy, France



Bibliographie citée

1. Delannoy M., Yehya S., Techer D., Razafitianamaharavo A., Richard A., Caria G., Baroudi M., Montarges-Pelletier E., Rychen G., Feidt C. (2018). Amendment of soil by biochars and activated carbons to reduce chlordecone bioavailability in piglets. *Chemosphere*, 210:486-494. [hal-01818267](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.07.088)
2. El Wannay N., Le Roux Y., et al (2022). Organochlorine POPs sequestration strategy by carbonaceous amendments of contaminated soils: Toward a better understanding of the transfer reduction to laying hens. *Journal of Hazardous Materials*, 434:128871. [hal-03643621](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128871)
3. Feidt C., El Wannay N., Ranguin R., Gaspard S., Baroudi M., Yacou C., Rychen G., Delannoy M. (2021). In vitro and in vivo assessment of a CLD sequestration strategy in Nitisol using contrasted carbonaceous materials. *Environmental Geochemistry and Health*. [hal-03600751](https://doi.org/10.1007/s12665-021-10064-0)
4. Piutti S., El Wannay N., Laflotte A., et al. (2022). Assessment of an NDL-PCBs Sequestration Strategy in Soil Using Contrasted Carbonaceous Materials through In Vitro and Cucurbita pepo Assays. *Applied Sciences*. [hal-03641108](https://doi.org/10.3390/app12103641)
5. Ranguin R., Delannoy M., Yacou C., Jean-Marius C., Feidt C., Rychen G., Gaspard S. (2021). Biochar and activated carbons preparation from invasive algae *Sargassum* spp. for Chlordecone availability reduction in contaminated soils. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4):105280. [hal-03600826](https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105280)
6. Ranguin R., Jean-Marius C., Yacou C., Gaspard S., Feidt C., Rychen G., Delannoy M. (2020). Reduction of chlordecone environmental availability by soil amendment of biochars and activated carbons from lignocellulosic biomass. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(33):41093-41104. [hal-02510064](https://doi.org/10.1007/s11356-020-02510-6)
7. Stephan P., Le Roux Y., et al (2022). Effects of particle size and amendment rates of *Sargassum* biochar on chlordecone sequestration in West Indian soils. *Environmental Science and Pollution Research*. [hal-03754233](https://doi.org/10.1007/s11356-022-04233-3)