

## Une innovation agroécologique : la séquestration des pesticides

**Aux Antilles françaises, la pollution des sols et des ressources en eau par la chlordécone, un pesticide organochloré longtemps utilisé dans les bananeraies, représente un problème environnemental, sanitaire et socio-économique majeur pour les pouvoirs publics. En effet, aucune méthode simple et efficace de dépollution n'existe actuellement face à cette molécule résistante.**

**Focus sur une solution agroécologique alternative à la dépollution : la séquestration des pesticides dans le sol par ajout de matière organique.**

# A

ux Antilles Françaises, agriculteurs et pouvoirs publics doivent faire face à un problème de pollution des écosystèmes, par un pesticide organochloré (la chlordécone). La chlordécone (formule  $C_{10}Cl_{10}O$ ) est un insecticide de la famille du DDT (dichlorodiphényltrichloroéthane) qui a été largement utilisé entre 1972 et 1993 pour lutter contre le charançon du bananier. Son emploi pour divers usages a également concerné l'Afrique (Cameroun et Côte d'Ivoire), le continent américain (États-Unis et Panama) ainsi que l'Asie. En Allemagne et dans divers pays d'Europe de l'Est, le Kélévan, qui se transforme partiellement en chlordécone a été utilisé pour lutter contre le doryphore de la pomme de terre.

Aux Antilles, bien qu'interdite depuis vingt ans, cette molécule particulièrement persistante dans les sols est à l'origine de pollutions chroniques, des sols, eaux, végétaux et animaux. Le volume total de sols contaminés par la chlordécone a été estimé à 52 millions de  $m^3$ , dont 11 millions couvrent les zones d'alimentation des captages d'eau souterraine ou de rivières. En Martinique, 40 à 50 % des points d'eau suivis dépassent la norme pour l'eau potable ( $0,1 \mu g/L$ ). La chlordécone rend impropre les sols pour certaines cultures, en particulier les plantes à racines, bulbes et tubercules qui absorbent ce polluant.

Son impact est aussi avéré chez l'homme (augmentation du risque de cancer de la prostate, perturbation du développement chez les jeunes enfants) pour des expositions chroniques *via* l'alimentation (Multigner *et al.*, 2010). Compte tenu des caractéristiques intrinsèques de

la chlordécone, très forte persistance et sorption sur les matières organiques, des simulations par modèle font état de plusieurs siècles avant un retour à la normale de l'état de pollution des sols si rien n'est mis en œuvre pour y remédier (Cabidoche *et al.*, 2009).

Actuellement, on ne dispose d'aucun moyen d'action pour réduire les contaminations dans les milieux naturels. La gestion de cette crise pose un véritable défi à la recherche et aux autorités car peu de cas similaires existent dans des milieux complexes, spécifiques (sols volcaniques, climat tropical humide, milieu insulaire, population dense...) et, de ce fait, fragiles. Les quantités de chlordécone épandues (300 tonnes estimées), les superficies concernées, entre 15 et 20 % des surfaces agricoles utiles, et les impacts socio-économiques et sanitaires font de cette problématique un enjeu sanitaire, environnemental, social et économique majeur (OPECST, 2009).

### Une alternative à la dépollution : la séquestration de la chlordécone par ajout de matière organique

En raison des propriétés physicochimiques de ce pesticide (faible solubilité, hydrophobicité, très faible biodégradabilité...) et de la forte rétention de la chlordécone dans les argiles, il sera difficile et coûteux de dépolluer les sols par des techniques simples d'excavation, de décontamination chimique, de phytoremédiation (extraction par les plantes) ou biodégradation (dégradation par des microorganismes). Dans l'attente de procédés efficaces, une solution serait de piéger fortement la molécule dans



➊ Apport de matière organique dans un champ contaminé.

© M. Lesueur-Jannoyer

le sol afin que, bien que contaminé, il ne restitue que faiblement cette contamination. La chlordécone étant peu volatile, il n'y a pas de transfert vers l'air ; en revanche, la molécule peut être relarguée du sol vers les eaux souterraines et de surface ainsi que vers les plantes (Cabi-doche, 2009 ; Woignier, 2013). Nous proposons donc une alternative à la dépollution complète : la séquestration. L'objectif est de limiter le transfert du contaminant présent dans les sols vers l'eau et les cultures. Comme beaucoup de pesticides organiques, la chlordécone a une forte affinité chimique pour les matières organiques dans le sol : les résultats expérimentaux démontrent que l'aptitude du sol à fixer la chlordécone dépend directement de sa concentration en matières organiques. L'incorporation de matières organiques exogènes dans un sol pollué est connue comme levier agroécologique pour le piégeage de différents pesticides (atrazine, propachlor, simazine...) (Beesley *et al.*, 2010), nous chercherons à valider cette hypothèse pour la chlordécone en contexte tropical volcanique.

Pour démontrer l'efficacité du procédé, nous avons donc réalisé deux types d'expériences permettant de quantifier la réduction de la contamination de la solution du sol et de la contamination des cultures, entre un sol témoin et un sol sur lequel un apport de 5 % massique de matières organiques exogènes a été effectué (photo ➊). Le type de sol étudié est un andosol, sols volcaniques, les plus contaminés. L'argile constitutive de ce sol (allophane) est formée par l'agrégation de nano-particules sphériques dont la microporosité joue un rôle dans le mécanisme de séquestration comme nous l'expliquons plus loin (page 18). Deux types d'apports organiques ont été testés : un amendement organique riche en matière humique et à décomposition lente et un fertilisant organique, éléments plus solubles et à décomposition

rapide. L'amendement se différencie de l'engrais par un rendement humique dix fois plus élevé. Ces différences très marquées permettront d'apprécier les effets de ces apports de matière organique. À court terme (un à trois mois), on peut espérer voir des résultats comparables entre les deux produits. En revanche, à moyen terme (six mois), seul l'amendement est encore susceptible d'avoir un effet notable sur le pesticide et le sol, l'engrais étant pour sa part déjà largement décomposé.

### Effets de l'apport de matières organiques sur la contamination de l'eau

Pour caractériser la réduction de la contamination de l'eau, nous avons mesuré la quantité de chlordécone présente dans de l'eau pure ayant percolé dans un sol contaminé. Le tableau ➊ montre que trente jours seulement après incorporation au sol de l'amendement organique et du fertilisant, la concentration en chlordécone présente dans la solution du sol est fortement réduite, par un facteur de 2 et 3,9 respectivement.

Ces résultats démontrent que l'apport de la matière organique favorise la rétention de la chlordecone dans le sol et donc un moindre transfert du polluant vers l'eau. Une période de trente jours d'incubation de la matière organique semble suffisante pour réduire notablement la contamination de l'eau, les résultats après quarante-cinq ou quatre-vingt-dix jours d'incubation étant similaires. De plus, l'amendement organique semble plus efficace en vertu de ses caractéristiques biochimiques. Il est en effet plus riche en matière sèche et en matière organique. Par ailleurs, sa composition biochimique plus complexe et moins réactive permet une minéralisation plus progressive et une meilleure contribution au pool de carbone du sol.

- Ces résultats sont en accord avec des études récentes montrant que l'ajout de matière organique accroît l'adsorption d'atrazine, de propachlor et de simazine dans le sol et se traduit par une concentration plus faible en pesticides dans la solution du sol (l'eau présente dans la porosité du sol).

### Effets de l'apport de matières organiques sur la contamination des cultures

Compte tenu de ces résultats, nous avons testé l'hypothèse d'une moindre disponibilité de la chlordécone pour les transferts sol/cultures pour les racines qui sont plus fortement contaminées par les pesticides organiques

polluant le sol. Ainsi, des radis ont été cultivés dans un sol pollué et traité selon deux modalités : sans apport (témoin) et avec apport de 5 % d'amendement organique (trente jours d'incubation après l'apport). Nous avons mesuré la contamination dans différents organes de la plante : racinelle, partie comestible et feuille (figure 1). Nous avons aussi suivi le transfert sol/cultures pour d'autres légumes : un légume-fruit (concombre) et un légume-feuilles (laitue). La figure 2 confirme que le transfert sol/cultures est fortement diminué grâce à l'apport de matière organique (Woignier, 2013). La réduction de la contamination est plus importante dans le cas des radis compte tenu des mécanismes de transfert des polluants qui se font préférentiellement par contact. Les racines et les tubercules, directement en contact avec le sol, seront alors beaucoup plus sensibles aux paramètres contrôlant le transfert sol/cultures.

On peut supposer que cette moindre contamination est le simple résultat de l'affinité chimique du pesticide avec la matière organique exogène ajoutée. Cependant, des résultats expérimentaux montrent aussi une fermeture de la porosité des agrégats d'argile consécutive à l'ajout de matières organiques pour un type de sol particulier (andosol). La séquestration du pesticide ne dépend alors plus seulement de la concentration en matière organique, mais aussi de la microporosité (pores inférieure à 0,1 microns). Les tensions capillaires internes apparaissant au cours de l'incubation vont comprimer et réduire la porosité de l'argile. La fermeture de la microporosité induira un piégeage du pesticide et diminuera ainsi sa disponibilité pour des transferts sol/eau et sol/plantes. Il y a une synergie des effets chimiques (affinité avec la matière organique) et des effets physiques (fermeture de la porosité) favorisant une moindre disponibilité du pesticide.

Les mêmes expériences ont été menées sur un autre sol, le nitisol, présentant des caractéristiques physico-chimiques contrastées par rapport à l'andosol, notamment du fait de la présence d'argiles en feuillets (halloysite). Les résultats obtenus sur nitisol confirment un effet de séquestration par l'ajout de matière organique.

En conclusion, bien que les sols soient fortement pollués, la moindre disponibilité de la chlordécone en présence de matières organiques permettrait d'envisager l'utilisation de ces sols contaminés pour certaines cultures (même en présence de taux relativement élevés de chlordécone) sans que la qualité sanitaire des produits cultivés soit dégradée.

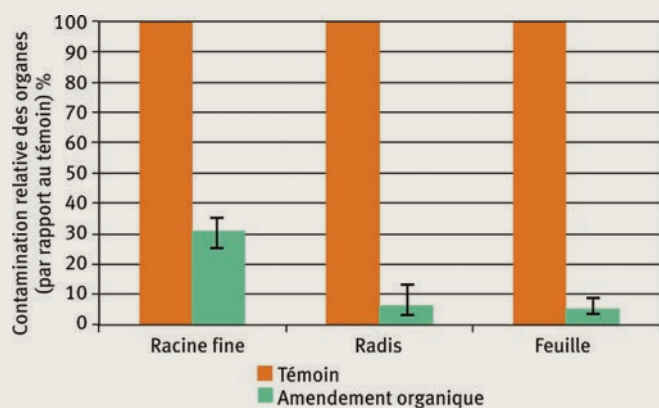
### Conclusion

Les grandes filières agricoles de Martinique et de Guadeloupe, en particulier celle de la banane, sont marquées par une réduction de leurs surfaces en raison d'une part d'un plafonnement de la productivité à l'hectare mais également d'une déprise agricole générale. Cela libère des surfaces agricoles et devrait permettre des reconversions vers d'autres productions agricoles permettant l'accroissement souhaité par les filières du taux de couverture des productions locales en légumes frais et racines et tubercules. Ceci requiert, compte tenu des risques de contamination par la chlordécone des produits de récolte, la mise en place d'un système de gestion

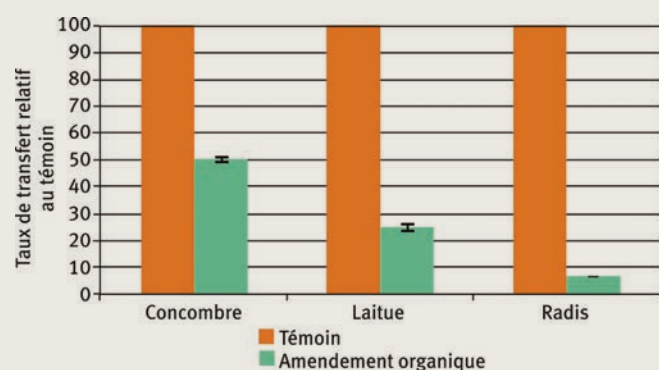
#### 1 Facteur de réduction de la contamination après incorporation de l'apport organique (amendement et fertilisant).

Durée d'incubation après apport (jours)		15	30	45	90
Facteur de réduction de la contamination de la solution du sol	Amendement organique	1,4	3,9	4,0	4,5
	Fertilisant organique	1,6	2,2	2,0	2,1

#### 1 Réduction de la contamination dans les divers organes du radis après incorporation de la matière organique.



#### 2 Réduction de la contamination pour différentes cultures après incorporation de la matière organique.



du risque car il n'existe pas aujourd'hui de méthodes simples et efficaces de dépollution. Si dépolluer semble si difficile, pourquoi ne pas simplement confiner la chlordécone dans le sol en réduisant les transferts vers les eaux et les cultures ? Nous proposons une alternative à la décontamination totale : la séquestration de pesticides par apport de matière organique exogène.

L'utilisation de matières organiques pour augmenter la séquestration de pesticides dans les sols a fait ses preuves en laboratoire et en bacs de culture. En traitant des échantillons de sols contaminés avec un apport de matière organique, nous avons réduit le taux de transfert de la chlordécone d'un facteur variant de 2 à 4 du sol dans l'eau et 2 à 10 dans les cultures. L'étude de la porosité et de la structure à l'échelle du nanomètre a mis en évidence que la faculté à piéger la chlordécone va de pair avec une réduction de la porosité dans la micro-structure des agrégats d'argile.

L'expérience réalisée sur trois mois montre des intensités différentes dans le temps selon les caractéristiques biochimiques des apports. En effet, cet outil de gestion de la contamination n'est pas pérenne en raison de la dégradation de la matière organique, la minéralisation de la matière organique conduisant à un retour à la situation initiale. Il est donc important de connaître la durabilité du procédé. Pour cela, un programme d'expérimentation en conditions réelles a été mis en place, à la fois afin de valider les résultats *in situ*, mais aussi de tester la durabilité du pouvoir de confinement par les matières organiques pour le sol traité. L'objectif est d'évaluer l'effet de l'ajout de matières organiques pour différents intervalles de temps (fréquences des apports) et de déterminer les pratiques d'apport (plan d'épandage).

Il n'y a actuellement aucune solution de décontamination proposée aux agriculteurs. Après la mise au point du plan d'apport en matières organiques, ce procédé permettra de limiter les transferts vers l'eau et les cultures. Ainsi, il sera possible de remettre en culture des sols contaminés et de limiter la pollution de la ressource en eau en des points stratégiques (captage...). Ce procédé présente d'autres avantages. Tout d'abord, l'apport de matière organique fait partie des bonnes pratiques agricoles : il restaure les sols, accroît le rendement et réduit

le temps de culture. D'autre part, ce procédé n'a pas les désavantages des procédés de décontamination classiques (chimiques, biodégradation) qui peuvent conduire à une détérioration des propriétés du sol, mais aussi à l'apparition de produits de dégradation dont la nocivité est mal connue. Enfin, il est facile à mettre en œuvre pour les agriculteurs et ne présente pas de risque sanitaire pour l'utilisateur.

Cette méthode devrait permettre de gérer la pollution et le transfert de polluant dans l'attente de procédés définitifs. ■

### Les auteurs

#### Thierry WOIGNIER

CNRS – UMR 7263 – Institut méditerranéen de biodiversité et d'écologie marine et continentale IMBE – Université Aix Marseille  
IRD – UMR 237 – Campus Agro Environnemental Caraïbes – BP 214 – Petit Morne  
F-97232 Le Lamentin – Martinique – France  
✉ [thierry.woignier@imbe.fr](mailto:thierry.woignier@imbe.fr)

#### Luc RANGON

IRD – UMR 237 – Campus Agro Environnemental Caraïbes – BP 214 – Petit Morne  
F-97232 Le Lamentin – Martinique – France  
✉ [luc.rangon@imbe.fr](mailto:luc.rangon@imbe.fr)

#### Paula FERNANDES, Florence CLOSTRE et Magalie LESUEUR-JANNOYER

CIRAD/CAEC – Unité HortSys  
BP 214 – Petit Morne –  
F-97232 Le Lamentin – Martinique – France  
CIRAD – Unité HortSys – TA-B103/PS4  
Boulevard de la Lironde  
F-34398 Montpellier Cedex 5 – France  
✉ [paula.fernandes@cirad.fr](mailto:paula.fernandes@cirad.fr)  
✉ [florence.clostre@cirad.fr](mailto:florence.clostre@cirad.fr)  
✉ [magalie.jannoyer@cirad.fr](mailto:magalie.jannoyer@cirad.fr)

#### Alain SOLER

CIRAD/CAEC – Unité PerSyst  
BP 214 – Petit Morne – Martinique – France  
CIRAD – Unité PerSyst – TA-B103/PS4  
Boulevard de la Lironde  
F-34398 Montpellier Cedex 5 – France  
✉ [alain.soler@cirad.fr](mailto:alain.soler@cirad.fr)

### EN SAVOIR PLUS...

- 📖 **BEESLEY, L., MORENO-JIMENEZ, E., GOMEZ-EYLES, J.-L.**, 2010, Effects of biochar and greenwaste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil, *Environmental Pollution*, n° 158(6), p. 2282-2287.
- 📖 **CABIDOCHÉ, Y.-M., ACHARD, R., CATTAN, P., CLERMONT-DAUPHIN, C., MASSAT, F., SANSOULET, J.**, 2009, Long-term pollution by chlordecone of tropical volcanic soils in the French West Indies: a simple leaching model accounts for current residue, *Environmental Pollution*, n° 157 (5), p. 1697-1705.
- 📖 **MULTIGNER, L., NDONG, N., GIUSTI, A., ROMANA, M., DELACROIX-MAILLARD, H., CORDIER, S., JEGOU, B., THOME, J.-P., BLANCHET, P.**, 2010, Chlordecone Exposure and Risk of Prostate Cancer, *Journal of Clinical Oncology*, n° 28 (21), p. 3457-3462.
- 📖 **OPECST** (Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologique), 2009, Rapport sur les impacts de l'utilisation de la chlordécone et des pesticides aux Antilles : bilan et perspectives d'évolution, par M. Jean-Yves LE DÉAUT, député et Mme Catherine PROCACCIA, sénateur. 223 p. <http://www.senat.fr/rap/r08-487/r08-4871.pdf>.
- 📖 **WOIGNIER, T., FERNANDES, P., SOLER, A., CLOSTRE, F., CARLES, C., RANGON, L., JANNOYER-LESUEUR, M.**, 2013, Soil microstructure and organic matter: Keys for chlordecone sequestration, *Journal of Hazardous Materials*, n° 262(0), p. 357-364.