

**RESPONSABLE SCIENTIFIQUE**

**Yves-Marie CABIDOCHÉ** - INRA,  
Unité de Recherche Agropédoclimatique  
Centre Antilles-Guyane  
Unité Agropédoclimatique de la Zone  
Caraïbe  
Domaine Duclos  
97170 Petit-Bourg  
05 90 25 59 64  
cabidoch@antilles.inra.fr

**PARTENAIRES**

Unité de Recherche Agropédoclimatique  
Centre Antilles-Guyane  
**C. Clermont-Dauphin, A. Lafont,  
J. Sansoulet**  
CIRAD-FLHOR GUADELOUPE  
**P. Cattan**  
PRAM/CIRAD FLHOR  
**R. Achard, A. Caron, C. Chabrier**

## STOCKAGE DANS LES SOLS ET DISSIPATION DANS LES EAUX DE ZOOCIDES ORGANOCHLORÉS AUTREFOIS APPLIQUÉS EN BANANERAIES AUX ANTILLES : RELATION AVEC LES SYSTÈMES DE CULTURE

**MOTS CLÉS**

Guadeloupe – Martinique – Chlordécone – Contamination  
– Sols – Racines – Tubercules – Lessivage - Culture banna-  
nière

**OBJECTIFS**

Donner des éléments de diagnostic scientifique pour la gestion d'une crise de pollution des sols, des eaux et des végétaux aux Antilles françaises par un pesticide organochloré persistant (POP), la chlordécone (C<sub>10</sub>Cl<sub>10</sub>O). Cette molécule a été appliquée entre 1972 et 1993 pour lutter contre le charançon *Cosmopolites sordidus*, dont la larve attaque les bulbes des bananiers. Interdite aux USA dès 1976, son devenir n'a pas fait l'objet de recherches dans ce pays depuis les années 80. Malgré des alertes précoces sur son accumulation dans les sols et sa capacité à contaminer les eaux<sup>1</sup> et les biontes<sup>2</sup>, l'application de cette molécule a été autorisée entre 1982 et 1990 en France, uniquement sur les bananeraies (dérogation prolongée jusqu'en 1993). Aucune recherche n'a accompagné cette décision. Les données scientifiques concernant cette molécule sont donc rares et anciennes. Sa composition chimique laissait présumer :

- Une stabilité thermodynamique élevée, et une résistance à la dégradation chimique ou biologique : photodégradation aux UV seulement après mobilisation par l'éthylène-diamine, biodégradation minime par des *Pseudomonas* sp. conduisant à une hydrogénation de 2 sur 10 des atomes de chlore, en milieu de culture<sup>3</sup>.
- Une hydrophobie particulièrement élevée, entraînant une faible solubilité et une forte sorption sur la matière organique des sols : le coefficient de partage (Koc) entre la fraction adsorbée sur le carbone du sol et la fraction en solution dans l'eau serait de 17 500 L/kg<sup>(4)</sup>.

**DATES REPÈRES DE LA CRISE**

- Détection de multiples pollutions par la chlordécone des eaux captées aux Antilles (1998, DSDS).
- Détection de la contamination d'un lot de patates douces exportées de Martinique à Dunkerque (2002, Douanes).
- Principe de précaution : arrêtés préfectoraux en Guadeloupe et Martinique (2003) conditionnant la production des « légumes-racines » à une analyse de sol, et, si conta-

1-Snegaroff J., 1977. Les résidus d'insecticides organochlorés dans les sols et les rivières de la région bananière de Guadeloupe. *Phytiatrie-Phytopharmacie*, 26: 251-268.

2-Kermarrec A. et al, 1980. Niveau actuel de contamination des chaînes biologiques en Guadeloupe : pesticides et métaux lourds. INRA Antilles-Guyane, rapport de contrat avec le Ministère de l'Écologie, 155p.

mination, leur commercialisation à une analyse de récolte négative.

• Production par l'AFSSA (2005) de Limites Maximales provisoires : 50 µg/kg PF pour les « racines » igname, taro, patate douce.



## LE PROJET

L'INRA et le CIRAD-FIhor ont mis en œuvre en 2003 un projet de diagnostic sur les deux îles (3 ETP chercheurs, 2 VCAT, co-financé par le programme « Pesticides » du MEDAD), pour apporter des réponses claires à des questions clés :

- La chlordécone se dégrade-t-elle dans les sols tropicaux volcaniques ?
- La chlordécone s'est-elle fortement stockée dans les sols en fonction des systèmes de culture, passés et actuels ?
- Quelles sont les zones polluées ?
- Quelle est l'incidence de la pollution des sols sur la contamination des racines ?
- Quelles sont les voies de décontamination des sols, et combien de temps cela prendra-t-il ?
- Peut-on envisager une bio-remédiation ?



## PRÉSENTATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE

Les sols ont été analysés sur une sélection d'un réseau de parcelles de cultures bananières en andosols, dont le choix avait été antérieurement commandé par la diversité des systèmes de culture bananiers (Clermont-Dauphin *et al.*, 2004) : depuis les bananeraies renouvelées tous les trois ans après de profonds travaux du sol, recevant des quantités massives d'engrais et de pesticides, jusqu'à des bananeraies dites pérennes, dont on laisse les rejets se relayer depuis plusieurs décennies, et parfois sans intrant. Sur les couches 0-30 cm, 30-50 cm, et parfois 50-80 cm ont été déterminés les densités apparentes, le pH, les teneurs en carbone (SOC) et en chlordécone. Des prélèvements de 6 échantillons par couche ont été réalisés sur deux positions topographiques de chaque parcelle : haut convexe et bas concave, respectivement zone de départ et d'accumulation de terre en situation éventuelle d'érosion hydrique ou mécanique superficielles. Quelques parcelles supplémentaires déjà analysées par les Services de la Protection des Végétaux de Guadeloupe et Martinique, sur des sols différents, ont fait l'objet d'analyses et d'enquêtes complémentaires.

La sélection a été orientée par la fiabilité et la diversité des chroniques rétrospectives d'apport de chlordécone et plus généralement d'itinéraires techniques pratiqués pendant et après la période d'apport. Pour 50 parcelles, ont été établis :

- les calendriers de successions d'occupation des sols par la végétation naturelle ou spontanée et les cultures,
- pour ces dernières les rythmes et profondeurs de travail du sol,

- les dates et doses d'apport de la chlordécone dans les phases de bananeraies, de densité de plantation connue.

Dès l'instant qu'une régression multiple expliquait plus de 90 % de la variabilité des teneurs résiduelles par trois facteurs - teneur en carbone des sols, profondeur des labours, et quantités de chlordécone cumulées épandues (sans prendre en compte le temps) - un modèle simple de simulation du lessivage de la chlordécone dans les sols a été développé. Il prend en compte la stabilité de la molécule (pas de biodégradation), sa très forte affinité pour la matière organique des sols, la dilution mécanique plus ou moins forte du carbone et de la chlordécone par le travail du sol, et son lent lessivage par les eaux de drainage, selon une cinétique de premier ordre. Les eaux de drainage sont concentrées les 3 à 5 premières années sous les pieds de bananiers, près desquels la molécule avait été apportée.

Dans la collection de parcelles retenues, certaines étaient en culture de « racines », sur lesquelles un échantillonnage soigneux des tubercules et racines et du sol contaminé au contact a permis d'explorer la relation entre la contamination des « racines » et celle des plantes. Sur deux de ces parcelles enfin, ont été menés des essais de culture de « racines » sur couches profondes peu contaminées, après excavation locale des couches contaminées (cultures en créneaux). Les analyses de chlordécone ont toutes été effectuées au Laboratoire Départemental d'Analyses de la Drôme (LDA26).

Il y a très peu de contamination interparcellaire, ou de transferts superficiels intra-parcellaires : la chlordécone reste où on l'a épandue. Les parcelles n'ayant jamais reçu de chlordécone n'en contiennent pas, sauf quelques traces mesurables sur quelques dizaines de mètres dans les talwegs collecteurs du ruissellement de parcelles d'amont contaminées. Le ruissellement, rapide et fugace malgré une pluviométrie élevée, ne contient pas de quantités notables de chlordécone. Les transferts ne sont significatifs que si le ruissellement concentré transporte des agrégats. Les seuls transferts intra-parcellaires notés sont liés à l'érosion mécanique sèche. Les seules contaminations amont→aval en solution, faibles, sont associées à des zones d'émergence de nappes (arrières-mangroves, terrasses).

Le modèle de lessivage a été validé pour les andosols. La comparaison des teneurs en chlordécone calculées par le modèle et des teneurs mesurées dans les 30 premiers centimètres de sol (Figure 1) est remarquable pour les andosols des bananeraies pérennes, où l'essentiel de la chlordécone est contenu dans le premier décimètre, la couche 0-30 cm contenant la totalité détectable. Elle est encore très bonne, dans l'intervalle d'incertitude de profondeur de labour, pour des parcelles en bananeraie ou autres occupations, travaillées

au moins une fois. Les teneurs mesurées dans les eaux, sur lysimètres, sont conformes aux teneurs calculées. Le modèle reste valide pour les sols contenant des argiles vraies (phyllosilicates) à condition de leur attribuer des coefficients de partage sol/solution plus faibles. Ces derniers sont confirmés par des concentrations plus élevées dans les eaux de drainage, à mêmes concentrations dans les sols. Si les coefficients de partage sols/solutions différents selon les matrices restent à expliquer, la validité de ce modèle de lessivage tend indirectement à montrer que nul **phénomène de dégradation, en particulier biodégradation** n'a eu lieu depuis les épandages de la chlordécone, après 10 à 30 ans.

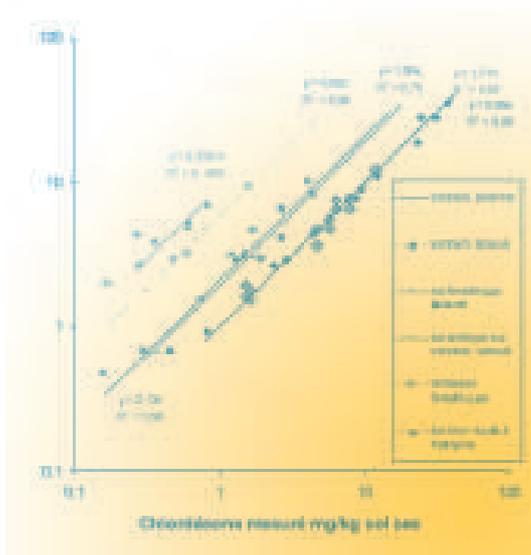


Figure 1. Comparaison des teneurs en chlordécone calculées par le modèle d'éluion de premier ordre et des teneurs mesurées sur la couche 0-30 cm de sols contaminés de Guadeloupe et Martinique ( $K_{oc} = 17500 \text{ L kg}^{-1}$ ).

**La validité du modèle** a permis son extrapolation temporelle, qui montre que la contamination des sols est très durable (entre 1 et 7 siècles selon les types de sols et les apports passés sur les zones contaminées).

**La contamination des racines** et tubercules est proportionnelle à celle des sols. Elle se fait essentiellement par contact. Les cortex sont ainsi au moins 10 fois plus contaminés que les pulpes. Cette contamination est majorée par une force de puits équivalente de la matière sèche des racines et du sol encaissant. Aucune des plantes testées n'a montré une bio-accumulation, nous n'avons pour l'instant pas de piste de phyto-remédiation concernant cette molécule non polaire, très hydrophobe.

**Les décapages de couches de sols contami-**

**nées sont irréalistes.** A titre d'exemple, les labours ont incorporé en général la chlordécone à une profondeur telle qu'il faudrait décaper puis stocker (où ?) 25 millions de mètres de cube de terre à la Martinique, sans évoquer les risques d'infertilité et d'érodibilité des sols ainsi tronqués. Les cultures en créneaux sont techniquement possibles, mais les surfaces candidates combinant des possibilités de mécanisation et des contaminations superficielles sont très rares.

## ACQUIS EN TERMES DE TRANSFERT

Compte tenu de la crise environnementale que provoque la pollution des sols, des eaux et des « racines » par la chlordécone aux Antilles, les résultats ont été communiqués en temps réel :

- Aux groupes d'acteurs concernés par les conséquences des applications de produits phyto-sanitaires, GREPP en Guadeloupe et GREPHY en Martinique, animés par les services extérieurs de l'Etat (DAF, DIREN, DSDS, DGCCRF).
- A la mission interministérielle chargée de l'évaluation et du renforcement des actions engagées.

- A la mission d'information parlementaire chargée d'analyser la crise et d'évaluer les moyens déployés pour en sortir.

Devant le désarroi des services de l'État face à la crise de la pollution par la chlordécone, les cinq Ministres en charge de l'agriculture, de l'écologie, de l'outre-mer, de la répression des fraudes et de la santé ont commandé en avril 2005 à l'AFSSA, à l'INRA et au CIRAD, un diagnostic de la pollution et une approche prospective de gestion de crise. L'INRA a désigné le coordinateur de ce projet pour le représenter dans ce « Groupe d'Étude et de Prospective » (GEP<sup>3</sup>), qui a remis son rapport en mai 2006. Après accord des Ministères sur une version publiable, le rapport du GEP a été mis en ligne sur le site web du Cirad en octobre 2006. Les principales contributions opérationnelles en aval de ce projet ont été :

- La conviction des autorités que la pollution était installée dans le long terme, et qu'il fallait prendre des décisions courageuses et cohérentes dans le continuum agriculture – environnement – santé.
- La circonscription des risques de contamination (cartographie rétrospective des soles bananières entre 1969 et 1993)
- La proposition d'un outil de gestion fondé sur le plafonnement des relations de contamination sol  $\Rightarrow$  plante : définition d'un seuil de contamination des sols en deçà duquel les « racines » ne seront pas contaminées au-delà des Limites Maximales de Résidus définies par l'AFSSA (et l'UE).

## VALORISATION

### Articles scientifiques

Clermont-Dauphin C., Cabidoche Y.-M. & Meynard J.-M., 2004. Effects of intensive mono-cropping of bananas on properties of volcanic soils in the uplands of the French West Indies. *Soil Use and Management*, 20: 105-113.

Cattan P., Cabidoche Y.-M., Lacas J.-G. & Voltz M., 2006. Occurrence of runoff on high infiltrability andosol under two banana cropping systems. *Soil Tillage Research*, 86: 38-51.

Cattan P., Voltz M., Cabidoche Y.-M., Lacas J.-G. & Sansoulet J., 2007. Spatial and temporal variations in percolation fluxes in a tropical Andosol influenced by banana cropping patterns. *Journal of Hydrology*, 335: 157-169.

Sansoulet J., Cabidoche Y.-M. & Cattan P., 2007. Adsorption and transport of nitrate and potassium in an Andosol under banana (Guadeloupe, French West Indies). *European Journal of Soil Science*, 58: 478-489.

### Publications de transfert

Lesueur Jannoyer M., Cabidoche Y.-M. & Vannière H., 2007. Synthèse sur la pollution par les organochlorés aux Antilles. Aspects agronomiques. Conclusions du Groupe d'Étude et de Prospective (GEP). *Phytoma*, 606 : 29-31.

### Communications dans des congrès

Sansoulet J., Cabidoche Y.-M., Cattan P., Clermont Dauphin C., Desfontaines L. & Malaval C., 2004. Solute transfert in an andisol of the French West Indies after application of KNO<sub>3</sub> : from the aggregate to the field experiment. "Volcanic Soil Resources in Europe", COST Action 622 final meeting, June 4-8 2004, Reykjavik, Iceland (poster). *Rala Report*. 214: 111-112 (résumé).

Cabidoche Y.-M., Achard R., Caron A., Cattan P., Chabrier C., Clermont-Dauphin C. & Laffont A., 2005. Stockage dans les sols à charges variables et dissipation dans les eaux de zoocides organochlorés autrefois appliqués en bananeraies aux Antilles : relation avec les systèmes de culture. In Actes du Colloque du Programme Évaluation et réduction des Risques Associés à l'Utilisation des Pesticides, Pesticides – *Comment réduire les risques associés*, Avignon, 14-16 novembre 2005. Poster + Résumé étendu. Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, Paris, 5 p.

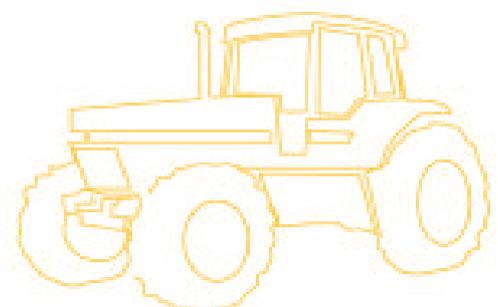
Cabidoche Y.-M., Lehmann S., Martin M. & Tillieut O., 2006. Spatialisation du risque de contamination des sols par un pesticide organochloré rémanent autrefois appliqué sur des sols tropicaux volcaniques : la chlordécone aux Antilles françaises. Journée GISsol, Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, Paris, 20 novembre 2006. (Conférence Invitée, Diaporama).

### Rapports d'expertise

Cabidoche Y.-M., Jannoyer M. & Vannière H., 2006. Conclusions du Groupe d'Étude et de Prospective « Pollution par les organochlorés aux Antilles ». Aspects agronomiques. Contributions CIRAD - INRA remises aux Ministères en charge de l'Agriculture, de l'Écologie, de l'Économie, de la Santé, et de l'Outre-mer, 55p. + annexes. Disponible sur Internet à l'adresse : [www.cirad.fr/fr/prest\\_produit/pdf/pollution\\_par\\_les\\_organochlores\\_aux\\_Antilles-juin2006.pdf](http://www.cirad.fr/fr/prest_produit/pdf/pollution_par_les_organochlores_aux_Antilles-juin2006.pdf)

### Communication grand public

35 conférences, 14 interviews (presse écrite et audiovisuelle, locale et nationale).





**PESTICIDES**

Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation

**COLLOQUE DE RESTITUTION**  
**« Évaluation et Réduction des Risques  
liés à l'Utilisation des Pesticides »**

# & PESTICIDES ENVIRONNEMENT



**INERIS**  
Institut National de l'Environnement  
Industriel et de la Santé

Les connaissances sur la dynamique et le comportement des pesticides dans l'environnement sont essentielles pour l'amélioration d'une part des procédures d'évaluation des risques *a priori*, et d'autre part du suivi post-homologation de ces molécules. En effet, ces connaissances constituent un préalable indispensable à toute évaluation des expositions, étape nécessaire pour caractériser les risques liés à l'utilisation des pesticides ou comprendre les impacts observés dans les écosystèmes. Trois projets ont été consacrés à l'étude du devenir et du comportement des pesticides dans les sols, les eaux et l'atmosphère.



12

- Stockage dans les sols à charges variables et dissipation dans les eaux d'e zoocides organochlorés autrefois appliqués en bananeraies aux Antilles : relation avec les systèmes de culture - **Yves-Marie Cabidoche** (INRA Antilles Guyane Guadeloupe)

16

- Caractérisation du risque de contamination de la nappe de Beauce par les pesticides : élucidation des mécanismes du transport préférentiel et approche spatiale du risque à l'échelle du bassin hydrologique (ESHEL) - **Yves Coquet** (INRA Grignon)

22

- Pesticides dans l'atmosphère : étude des cinétiques et mécanismes de dégradation en laboratoire et mesures dans l'atmosphère (PACT) - **Abdelwahid Mellouki** (CNRS Orléans)

