



HAL
open science

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

Yves-Marie Cabidoche, Cathy Clermont-Dauphin, Antoine Lafont, Julie Sansoulet, Philippe Cattan, Raphaël Achard, Audrey Caron, Christian Chabrier

► To cite this version:

Yves-Marie Cabidoche, Cathy Clermont-Dauphin, Antoine Lafont, Julie Sansoulet, Philippe Cattan, et al.. 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 : Recherche co-financée par le Programme 2003-2005 : “Évaluation et réduction des risques liés à l’utilisation des pesticides” du Ministère de l’Écologie et du Développement Durable (APR 2002). Rapport final d’exécution, mai 2006. [Contrat] 2006. hal-02824651

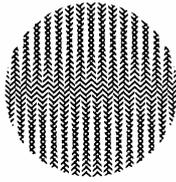
HAL Id: hal-02824651

<https://hal.inrae.fr/hal-02824651>

Submitted on 6 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L’archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d’enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



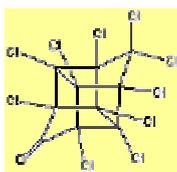
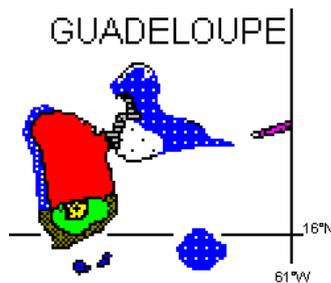
INRA

Institut National de la Recherche Agronomique



Centre Antilles-Guyane
Unité de Recherche Agropédoclimatique
de la Zone Caraïbe

CIRAD-flhor, Station de Neufchâteau, Guadeloupe
CIRAD-flhor, Pôle de Recherche Agronomique de
Martinique



Recherche co-financée par le Programme 2003-2005
“Evaluation et réduction des risques
liés à l’utilisation des pesticides”
du
Ministère de l’Ecologie et du Développement Durable

**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**

Rapport final d’exécution, mai 2006

Coordonnateur :

Yves-Marie Cabidoche

INRA Antilles-Guyane APC

Participants :

Claridge Clermont-Dauphin, Antoine Lafont, Julie Sansoulet
INRA Antilles-Guyane APC

Philippe Cattan
CIRAD-Flhor Guadeloupe

Raphaël Achard, Audrey Caron, Christian Chabrier
PRAM/CIRAD-flhor

Couverture :

La diversité des sols de Guadeloupe et Martinique est illustrée par des plages de couleur.
Se reporter à l'annexe 2 pour lire la légende et comprendre la représentativité de ces sols par rapport à ceux des petites îles de l'arc antillais.

Remerciements :

A Mesdames Catherine Bastien-Ventura (MEDD), G. Degnace et C. Maximin (INRA), pour leur disponibilité et leur ouverture face aux difficultés rencontrées dans l'exécution d'un projet de recherche dans un contexte d'urgence.

Aux techniciens qui ont mené les enquêtes et expérimentations avec une grande efficacité, notamment J. André, F. Burner, A. Mulciba, G. Onapin, C. Palmier, F. Razan.

Aux agriculteurs de Guadeloupe et Martinique, qui ont bien voulu ouvrir leurs livres et leurs mémoires.

Aux Services de la Protection des Végétaux, aux DIREN, de Guadeloupe et Martinique, et à l'Union des Producteurs de la Filière Igname de Guadeloupe pour leur soutien.

A Félix Massat, responsable des analyses de pesticides au LDA26, pour l'exécution minutieuse des nombreuses analyses d'organochlorés.

A la mémoire de Michel Robert et Jean Mamy, pour l'intérêt et la confiance qu'ils mettaient dans les recherches agro-environnementales aux Antilles.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	7
PREMIERE PARTIE : ETAT ET DETERMINANTS DE LA CONTAMINATION DES SOLS DES ANTILLES FRANÇAISES PAR LA CHLORDECONE	11
1.1. Distribution de la chlordécone dans les sols sous systèmes de culture actuellement ou anciennement bananiers (C. Clermont-Dauphin, Y.-M. Cabidoche)	11
1.1.1. Les systèmes bananiers continus sur andosols	11
1.1.1.1. Matériel et méthodes	12
1.1.1.2. Résultats	14
1.1.2. Occurrence de la chlordécone dans les sols hors des zones de production bananière habituelle	18
1.1.2.1. Matériel et méthodes	18
1.1.2.2. Résultats	18
1.2. Modélisation de la teneur résiduelle en chlordécone des sols, soumis au lessivage par les eaux de drainage, en fonction des apports passés, de la sorption sur la matière organique des sols, des systèmes de culture et des types de sols. (Y.-M. Cabidoche, C. Clermont-Dauphin, R. Achard)	20
1.2.1. Matériel et méthodes	20
1.2.2. Résultats	24
1.2.2.1. Teneurs en chlordécone des andosols sous bananeraies pérennes	24
1.2.2.2. Teneurs en chlordécone des andosols sous bananeraies labourées pendant ou après les apports	25
1.2.3. Discussion	27
1.2.3.1. Non dégradabilité de la chlordécone dans les sols	27
1.2.3.2. Comportement de sorption différentiel selon les types de sols	27
1.2.3.3. Importance et conséquences de la redistribution de chlordécone par les travaux du sol profonds	28
1.2.3.4. Analyse des situations discordantes par rapport au modèle	30
1.2.3.5. Extrapolation du modèle : contamination par la chlordécone durable sur tous les sols	32
1.3. Analyse de la cohérence entre les concentrations en chlordécone des eaux de drainages mesurées et simulées (Y.-M. Cabidoche, R. Achard, A. Caron, P. Cattan, J. Sansoulet)	33
1.3.1. Matériel et méthodes	34
1.3.2. Résultats	35
1.3.3. Discussion	38
Conclusion de l'étude de la contamination des sols	40
Bibliographie de la première partie	43
DEUXIEME PARTIE : UNE APPROCHE DE LA RELATION ENTRE LA CONTAMINATION DES SOLS ET CELLE DES ORGANES VEGETAUX SOUTERRAINS RECOLTES	45
2.1. Introduction sur l'approche des contaminations relatives plantes/sols	45
2.2. Etude sous serre de l'absorption de la chlordécone par l'igname <i>Dioscorea cayenensis</i> « Grosse caille » cultivée sur sol ferrallitique contaminé (Y.-M Cabidoche, A. Laffont)	49
2.2.1. Introduction	49
2.2.2. Matériels et méthodes	50
2.2.2.1. Les ignames	50
2.2.2.1.1. <i>Ignames contaminées</i>	50
2.2.2.1.2. <i>Ignames non contaminées</i>	50
2.2.2.2. Sols	50
2.2.2.2.1. <i>Sol contaminé</i>	50
2.2.2.2.2. <i>Sol non contaminé</i>	50
2.2.2.3. Mise en place de l'expérimentation en pot	50

2.2.2.3.1.	<i>Expérience 1 : Tubercules contaminés sur sol sain</i>	50
2.2.2.3.2.	<i>Expérience 2 : Tubercules sains sur sol contaminé</i>	51
2.2.3.	Résultats	52
2.2.3.1.	Expérience 1 : semenceaux contaminés sur sol sain	52
2.2.3.2.	Expérience 2 : développement des tubercules dans du sol sain, système racinaire de la période végétative développé en sol contaminé	52
2.2.4.	Discussion	53
2.3.	Etude sous serre de l'absorption de la chlordécone par la patate douce <i>Ipomoea batatas</i> cultivée sur andosol et sol brun-rouille à halloysite contaminés (R. Achard)	55
2.3.1.	Introduction	55
2.3.2.	Matériel et méthodes	56
2.3.2.1.	Hypothèse de travail	56
2.3.2.2.	Choix des sols pour l'expérimentation	56
2.3.2.3.	Mise en pot de la terre, plantation des patates douces, conduite de la culture	57
2.3.2.4.	Gestion de l'irrigation	57
2.3.2.5.	Récolte et préparation des patates douces pour l'analyse	58
2.3.3.	Résultats	58
2.3.3.1.	Traitement des données par rapport à la limite de détection et du résultat sur sol témoin	58
2.3.3.2.	Relation entre la contamination des patates douces par la chlordécone et celle des sols	59
2.3.4.	Discussion	60
2.4.	Analyse des contaminations relatives en chlordécone de bulbes de dachines (ou mères) <i>Colocasia antiquorum</i> et d'un andosol (R. Achard)	63
2.4.1.	Introduction	63
2.4.2.	Matériel et méthodes	64
2.4.2.1.	Choix de la parcelle	64
2.4.2.2.	Mise en place de l'expérimentation	64
2.4.2.3.	Récolte des dachines et préparation des échantillons	64
2.4.2.4.	Echantillonnage du sol	64
2.4.3.	Résultats	65
2.4.3.1.	Niveau et variabilité des teneurs en chlordécone du sol à proximité des 6 dachines étudiés	65
2.4.3.2.	Niveau et variabilité des teneurs intra-plante des 6 dachines étudiés	66
2.4.3.3.	Relation entre teneur des portions de bulbe et teneur du sol à proximité	67
2.5.	Etude au champ de l'absorption de la chlordécone par différentes espèces de végétaux, test d'une technique de décapage local de la couche de sol la plus contaminée (Y.-M. Cabidoche, A. Laffont).	71
2.5.1.	Introduction	71
2.5.2.	Matériels et méthodes	71
2.5.2.1.	Parcelles étudiées	71
2.5.2.1.1.	<i>Parcelle Réla ou CLD++</i>	72
2.5.2.1.2.	<i>Parcelle Racel ou CLD+</i>	72
2.5.2.2.	Mise en place de l'essai	72
2.5.2.2.1.	<i>Espèces étudiées</i>	72
2.5.2.2.2.	<i>Plan de l'expérience</i>	72
2.5.2.2.3.	<i>Teneur moyenne du sol en chlordécone des deux parcelles</i>	74
2.5.2.2.4.	<i>C, N, pH eau, pH KCl, CEC Metson, Ca, Mg, K, Al échangeables</i>	74
2.5.2.3.	Suivi des parcelles	74
2.5.2.3.1.	<i>Engrais, herbicides, amendements minéraux et organique</i>	74
2.5.2.3.2.	<i>Prélèvements des échantillons de végétaux et de sols</i>	74
2.5.2.4.	Laboratoires d'analyse	75
2.5.3.	Résultats	75
2.5.3.1.	Comparaison des 2 laboratoires d'analyses (LDA 26, GIRPA)	75
2.5.3.2.	Paramètres agronomiques des sols des parcelles	77
2.5.3.3.	Rendements moyens des parcelles	77
2.5.3.4.	Chlordécone dans le sol et les végétaux	78
2.5.3.4.1.	<i>Teneur moyenne du sol en chlordécone des deux parcelles</i>	78
2.5.3.4.2.	<i>Teneur en chlordécone des radis</i>	78
2.5.3.4.3.	<i>Teneur en chlordécone des navets</i>	79
2.5.3.4.4.	<i>Teneur des patates douces en chlordécone</i>	80

2.5.3.4.5.	<i>Teneur en chlordécone des ignames</i>	82
2.5.4.	Discussion	83
2.5.4.1.	Efficiencie de contamination des organes souterrains de réserve : plafonnement apparent par des forces équivalentes de puits du sol et de la plante	83
2.5.4.2.	Faisabilité des cultures en créneau	84
2.6.	Vers un schéma unique de contamination des racines par la chlordécone au contact du sol : facteurs de forme et temps de contact (Y.-M. Cabidoche)	87
2.7.	Contamination des organes végétaux souterrains récoltés frais : un plafonnement opérationnel pour la gestion du risque de contamination des « légumes - racines » (Y.-M. Cabidoche)	91
	Bibliographie de la deuxième partie	93
	CONCLUSION GENERALE	95

Introduction

Les bananeraies des Antilles française ont été généralement des monocultures intensives durant la deuxième moitié du XX^e siècle. Parmi les intrants apportés en abondance ont figuré des insecticides organochlorés, pour lutter contre le charançon *Cosmopolites sordidus*, dont la larve attaque les bulbes des bananiers : diéldrine et HCH jusque dans les années 60 à 70, chlordécone de 1972 à 1993.

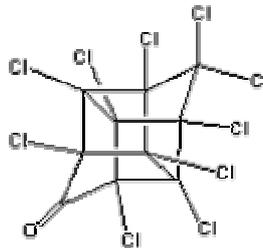
Deux spécialités commerciales à 5% de chlordécone ont été importées aux Antilles, d'usage réservé aux bananeraies :

- Képone®, fabriqué aux USA jusqu'en 1976, mis en marché aux Antilles de 1972 à 1978 (interdit aux USA depuis 1977). L'interdiction a suivi un accident de production industrielle aux USA, qui a montré la dangerosité du produit pour la santé des ouvriers, et pollué durablement les terrains environnants et des sédiments de la « James River ».
- Curlone®, sous licence de la société Calliope, mis en marché aux Antilles de 1981 à 1993

Les rares données décrivant cette molécule et son comportement, sont suffisantes pour être inquiétantes.

Sa composition chimique laisse présumer :

- Une stabilité thermodynamique élevée, et une résistance à la dégradation chimique ou biologique : photodégradation aux UV seulement après mobilisation par l'éthylène-diamine, une biodégradation minimale par des *Pseudomonas* sp conduisant à une di-hydrogénation de 2 sur 10 des atomes de chlore, en milieu de culture (Georges et Claxton, 1988).



La molécule de chlordécone

- Une hydrophobie particulièrement élevée, entraînant :
 - une faible solubilité dans l'eau à faible pH (1-2 mg.l⁻¹ à 20°C), celle-ci augmentant fortement par formation de chlordécone-hydrate (Dawson *et al.* 1979), mais seulement au-delà de pH 9
 - une solubilité dans les solvants organiques (benzène, hexane), un coefficient de partage octanol/eau élevé (log K_{ow} = 4,5)
 - une forte sorption sur la matière organique des sols : le coefficient de partage (K_{oc}) entre la fraction équivalente sorbée sur le carbone du sol et la fraction soluble dans l'eau serait de 17500 L kg⁻¹ selon Kenaga (1980). Pour autant, des valeurs extrêmement différentes sont relatées : 2000 mentionnée par Bonvallot et Dor (2004), et un log K_{oc} de 3.38 à 3.41 selon Howard *et al.* (1981), soit un K_{oc} de 2500 L kg⁻¹ environ.

Comme les autres organochlorés, elle se classe parmi les pesticides non ionisables.

Enfin, la chlordécone présente une faible volatilité (pression de vapeur : 2,5.10⁻⁵ mm Hg), à la différence d'autres composés organiques lipophiles tels que les HAPs. Elle est thermiquement

stable jusqu'à son point de sublimation (350°C) et ne subit pas d'oxydation rapide avant d'avoir atteint des températures de 450-500°C. A ces températures, de grandes quantités de dérivé d'hexachlorobenzène sont produites (Dawson *et al.*, 1979). Il en résulte une incinération de la chlordécone difficile et coûteuse, spécifique pour "déchets dangereux", requérant une température supérieure à 1000°C.

Snegaroff (INRA, Phytopharmacie, Versailles) a publié en 1977 les premières données sur la contamination des eaux et des sols de la Guadeloupe par la chlordécone. Les prélèvements réalisés début 1975, donc après 4 ans d'épandage, montraient déjà des teneurs alarmantes, de 9.5 mg/kg dans des andosols sous bananeraies de Capesterre Belle-Eau. Les eaux de rivières montraient une faible pollution, inférieure à 0.2 µg/L. L'étude soulignait le besoin « d'étudier la stabilité de la chlordécone et ses voies de dégradation dans ces sols tropicaux, ses possibilités d'accumulation, de migration, de contamination des plantes...nécessaires pour que ce produit ait son autorisation définitive d'emploi ».

Kermarrec (INRA Zoologie Antilles-Guyane) a coordonné de 1978 à 80 une étude, co-financée par le Ministère de l'Environnement, sur l'impact de la chlordécone sur les animaux. Dans la zone bananière, on a notamment trouvé jusqu'à 0.5 mg/kg chez les rats, et 2 à 5 µg/kg dans les crustacés et poissons (100 fois moins). Le rapport concluait sur le besoin de prolonger des études écotoxicologiques.

L'arrêt de vente du Képone® (1978) a peut-être contribué à l'absence de suite à ces recommandations.

Depuis la détection des multiples pollutions par les organochlorés des eaux captées aux Antilles, en 1998, le CIRAD-Flhor et l'INRA ont engagé un lourd investissement sur l'étude des transferts d'intrants par les eaux sous les bananeraies. L'option a été prise de bien connaître les voies d'écoulements (concentration de la pluie, ruissellement, drainage, alimentation des nappes) et d'évaluer leur rôle dans les transferts des engrais et des insecticides (cadusafos et fosthiazate) actuellement utilisés. Il était effectivement urgent d'évaluer l'impact environnemental des produits actuels, qui, bien que biodégradables, sont susceptibles d'être entraînés précocement par des écoulements forcés. Cette recherche, qui engage 4 ETP chercheurs et 2 doctorants, a été soutenue par un Fonds commun INRA-CIRAD et par les DocUP Guadeloupe et Martinique 2000-2006 (Axe G, instruit par les DIREN).

Cependant, la crise de la pollution par les organo-chlorés autrefois appliqués s'est aggravée par deux constats :

- la contamination, avérée en 2002, des « légumes racines »¹ par la chlordécone : elle a obligé les Préfets à prendre en 2003 des arrêtés de précaution conditionnant leur commercialisation à une analyse « négative »
- l'ampleur des surfaces de sols détectés pollués par les organochlorés aux Antilles (presque plus par diéldrine, rarement par βHCH, mais fortement par chlordécone), mis en évidence par les plans de surveillance installés par les DAF-SPV.

L'INRA a donc mis en œuvre en 2003 un projet de diagnostic commun sur les deux îles avec le CIRAD-Flhor (3 ETP chercheurs, 2 VCAT, largement co-financé par le MEDD), destiné à apporter des éléments de réponses claires à des questions clés pour la gestion de crise :

- La chlordécone se dégrade-t-elle dans les sols tropicaux volcaniques ?

¹ Aux Antilles, on désigne par le terme de « racines » les plantes alimentaires dont on consomme des organes souterrains d'accumulation d'amidon : igname, madère=dachine, patate douce, malanga = choux caraïbe, dictame...

- La chlordécone s'est-elle fortement stockée dans les sols ?
- Quelles sont les zones en apparence les plus polluées ?
- Quelles sont les voies de décontamination des sols ?
- Combien de temps cela prendra-t-il ?
- Selon quels mécanismes les plantes à organes souterrains récoltés sont elles contaminées ? par diffusion au contact du sol ? ou bien existe-t-il une voie systémique ?
- Peut-on envisager une bio-remédiation ?

Ce projet s'est déroulé dans un cadre inhabituel de quasi-désert bibliographique.

Les valeurs contradictoires de K_{oc} citées plus haut, sont peut-être liées à des évaluations sur des matrices organiques ou organo-minérales différentes : Coquet et Barriuso (2002) ont montré que le K_{oc} d'une molécule herbicide est spatialement dépendant des caractéristiques des sols. Or les sols des Antilles sont extrêmement changeants dans la nature de leur matrice minérale, sur de courtes distances, en fonction de leur âge et de la pluviométrie qui a affecté leur formation (Tableau 0.1 et Annexe 2). Par ailleurs, dès que le temps d'évolution est suffisant (quelques milliers d'année), ils sont tous très riches en minéraux secondaires, car tous les minéraux de la roche mère sont altérables. La nature du minéral secondaire, « argile » au sens large, détermine une grande partie des propriétés physico-chimiques des sols.

	Sols jeunes (10 ³ -10 ⁴ ans) Minéraux primaires sableux abondants si sol jeune	Sols anciens (10 ⁵ -10 ⁶ ans) Plus de minéral primaire
Pluviométrie < ETP (1.3 à 1.5 m/an)	Sol vertique à <i>smectite</i>	Vertisol à <i>smectite</i>
ETP < Pluviométrie < 2 ETP	Sol brun à <i>halloysite</i>	Sol fersiallitique ou ferrisol à <i>smectite et halloysite</i>
Pluviométrie > 2 ETP	Andosol à <i>allophane</i>	Sol ferrallitique à <i>halloysite et oxydes de Fe et Al</i>

Tableau 0.1 : Logique de distribution des sols dans les DOM insulaires (Cabidoche 2001, Document de cours de DEA « Environnement tropical et valorisation de la biodiversité », UAG, d'après Colmet-Daage et Lagache, 1965)

Au-delà, le caractère argileux de ces sols leur confère une teneur élevée en matières organiques (Feller *et al.*, 2001). La nature des relations organo-minérales sera cependant différente selon que l'on a affaire à des allophanes, des halloysites, ou des smectites.

On ne trouve qu'une référence concernant l'absorption de la chlordécone par les plantes : Topp *et al.*, (1986) ont étudié, dans un système fermé de laboratoire, le prélèvement de différentes molécules organiques marquées au ¹⁴C, dont la chlordécone, à partir du sol par de jeunes plants d'orge (espèce normale) et de cresson (riche en lipides) ; les quantités mesurées dans l'orge (racines, feuilles) se sont révélées négligeables pour la chlordécone. Les résultats ont par ailleurs indiqué : un faible lien entre l'accumulation racinaire de molécule organique et son affinité pour le sol (K_{oc}), et une corrélation positive entre accumulation et lipophilicité de la molécule (K_{ow}).

Ce rapport présente deux parties. La première est consacrée à l'état de contamination des sols et à ses déterminants. Une première phase, de diagnostic agronomique, a consisté à décrire la diversité des systèmes de culture bananiers actuels, et la distribution actuelle de la chlordécone en relation avec les pratiques et les valeurs des variables d'état physico-chimiques de sols qui en découlent. Dans une deuxième phase, un modèle simple d'élution de la chlordécone a été construit, validé pour les andosols, et appliqué à d'autres types de sols, les Antilles Françaises comportant une grande diversité de matrices minérales selon la pluviométrie et l'âge des sols.

La deuxième partie est consacrée à une approche de la relation entre les niveaux de contamination des sols et les niveaux de contaminations des plantes à organes souterrains récoltés (légumes « racines » amyliacés). Des expérimentations en serre et au champ, compliquées par la grande variabilité spatiale de la distribution de la chlordécone dans les sols, ont permis de confirmer l'hypothèse de contamination des « racines » par contact. En même temps, une solution d'allègement de la contrainte par décapage localisé des couches supérieures de sol contaminées a été évaluée. Une démarche de gestion de crise est enfin proposée pour les cultures de racines, fondée sur les contaminations relatives plantes/sols, qui autoriserait la mise en culture, sans risque sanitaire pour l'homme, de sols légèrement contaminés.

Les contaminations par les autres organochlorés (dieldrine, HCH, mirex) ne seront pas développées dans ce rapport :

- *La dieldrine n'a été trouvée que rarement, à de faibles teneurs (95% < 0.1 mg/kg)*
- *Le γ HCH n'a été trouvé que rarement, à des valeurs proches du seuil de quantification (95% < 0.05 mg/kg).*
- *Le β HCH a été plus souvent détecté, à des concentrations généralement faibles (95% < 0.4 mg/kg). Dans deux situations, les 5 isomères ont été dosés, dans des proportions approchant celles du HCH « technique ». Il s'agissait probablement d'une application frauduleuse récente d'un vieux stock.*
- *Le mirex (perchlordécone) a été utilisé pour lutter en Guadeloupe contre la fourmi-manioc (*Acromyrmex octospinosus*). La totalité des quantités importées relevées par les douanes, en supposant qu'il y a eu « dégradation » intégrale en chlordécone, correspond à la chlordécone apportée durant la totalité des périodes Képone et Curlone sur seulement deux hectares de bananeraies. La contamination des sols, dans ce cas très ponctuelle car les granulés étaient déposés en sachets éventrés à proximité des nids, peut être responsable de quelques faibles valeurs enregistrées dans des échantillons composites de sols de Grande-Terre, n'ayant jamais reçu d'apport de chlordécone.*

Première partie : **Etat et déterminants de la contamination des sols des** **Antilles françaises par la chlordécone**

1.1. Distribution de la chlordécone dans les sols sous systèmes de culture actuellement ou anciennement bananiers (C. Clermont-Dauphin, Y.-M. Cabidoche)

1.1.1. Les systèmes bananiers continus sur andosols

Une recherche précédente avait permis d'effectuer sur les andosols de Guadeloupe une enquête agronomique sur la diversité des systèmes de culture bananiers et sur les conséquences des pratiques associées sur les propriétés physico-chimiques et biologiques des sols (Clermont-Dauphin *et al*, 2004).

Quatre systèmes de culture avaient pu être ainsi identifiés :

- A. des bananeraies pérennes, aux sols non travaillés, sans intrant pesticide depuis longtemps (1972)
- B. des bananeraies pérennes, aux sols non travaillés, avec intrants pesticides et engrais irrégulièrement apportés, depuis les années 80, voire 90.
- C. des bananeraies pérennes, aux sols non travaillés, avec intrants pesticides et engrais massifs depuis les années 80.
- D. des bananeraies replantées tous les 3 ou 4 cycles, aux sols travaillés à chaque replantation (en général deux déchaumages lourds croisés, et un sillonnage), avec intrants pesticides et engrais massifs.

Sans rentrer dans le détail, les types A sont rares, destinés à produire de la banane de qualité sur des marchés locaux de niche.

Les types B se sont installés dans des zones de montagne, après défrichement dans les bonnes années de commercialisation de la banane d'exportation. L'irrégularité des cours a conduit les planteurs à des difficultés de trésorerie au début des années 90: les applications de pesticides et même d'herbicide, onéreuses, ont alors connu un relâchement.

Les types C ont toujours misé sur la recherche d'une productivité maximale, dans les années « Curlone », ou même dans les années « Képone », ces planteurs disposaient d'une trésorerie suffisante pour suivre les recommandations techniques d'application d'intrants fournies par les techniciens des groupements, notamment celle d'application de chlordécone.

Les types D, enfin ont tous appliqué, en même temps qu'un travail du sol mécanisé relativement profond tous les 3 ou 4 ans, les recommandations techniques d'intrants en abondance (600 kgN/ha/cycle, 1200kg K₂O/ha/cycle, 250 kgP₂O₅/ha/cycle, complément magnésien, chaulages, désherbage chimique, lutte chimique contre les nématodes et les charançons) ; ils ont notamment épandu régulièrement les 60 kg/ha/an préconisés de Curlone à 5% de chlordécone, entre 1982 et 1993. Cette dose n'a probablement pas été dépassée, car, aux dires d'agriculteurs, cette molécule était à la fois efficace et chère. Les plus anciens

avaient appliqué, aux mêmes doses préconisées, du Képone, entre 1972 (71 pour les premiers) et 1978. Entre 1978 et 1982, la chlordécone était commercialement indisponible, de fabrication non autorisée aux U.S.A., et pas encore fabriquée et autorisée à nouveau pour les bananeraies antillaises.

1.1.1.1. Matériel et méthodes

Enquêtes :

Les enquêtes antérieures (36 parcelles), concernant les pratiques et système de culture actuels, avec une rétrospective sur 10 à 15 ans, ont été reprises en 2003-2004 pour incorporer la variable chlordécone. Les interviews d'agriculteurs ont été complétées par les listes et déclarations disponibles auprès des groupements. Afin de limiter l'incertitude sur l'établissement des chroniques d'apport, nous avons, autant que possible, retenu des parcelles ayant reçu la dose nominale sur la totalité de la période « Képone et Curlone », des parcelles n'ayant reçu qu'un ou deux apports anciens, des parcelles mises en valeur plus récemment n'ayant connu que toute ou partie de la période « Curlone », et enfin des parcelles n'ayant jamais reçu de chlordécone. Une des difficultés a résidé dans le fait que les exploitants actuels étaient rarement ceux de la période « Képone ». Il a fallu alors retrouver les « anciens », dont certains étaient décédés. *In fine*, seulement **17 parcelles** ont été retenues, dont les chroniques étaient convenablement renseignées, constituant le « réseau APC ». L'effectif de type D a été complété par deux parcelles de Martinique.

Un type complémentaire (D') n'avait pas été échantillonné : le cas des grosses exploitations, techniquement très affûtées, qui ont tenté de moduler les apports selon la vigueur des infestations, suivant ainsi les recommandations de la recherche (Villardebou, 1973). Une seule a été identifiée en Guadeloupe, qui disposait d'une collection d'analyses des teneurs en chlordécone sur 0-30 cm pour l'ensemble de son parcellaire. Ces données ont donc été intégrées dans les résultats exploités.

Au total, ce sont donc 20 parcelles qui ont été retenues en Guadeloupe et Martinique, pour les systèmes bananiers cultivés sur andosols (tableau 1.1.1).

Echantillonnage de sols :

Les 17 parcelles de Guadeloupe ont été échantillonnées sur deux positions topographiques, à l'amont (zone de départ potentiel de matière) ou à l'aval (zone d'accumulation potentielle de matière) afin de prendre en compte les tronçatures/accumulations possibles sur des versants raides, notamment pour les bananeraies pérennes (types A, B, C) : ces types ne se rencontrent en général que sur les sols non mécanisables à cause de la pente.

Sur chaque position, trois situations ont été échantillonnées : au pied du bananier, au premier $\frac{1}{4}$ de l'intervalle entre bananiers proche du bananier, et à $\frac{1}{2}$ de cet intervalle : cette stratégie était destinée à intégrer de manière déterministe l'apport des intrants au pied du bananier, et leur moindre impact à distance.

On disposait ainsi de 9 prélèvements par couche, rassemblés en un échantillon composite par couche pour chacune des positions topographiques : zone de départ et zone d'accumulation. Les valeurs moyennes résultantes à l'échelle de la parcelle ont été obtenues en moyennant les valeurs sur les deux positions, ce qui est équivalent en effectif de prélèvements à ce qu'on aurait obtenu sur un composite de 18 prélèvements.

Les couches prélevées ont été les suivantes :

- 0-10 cm et 10-30 cm : rassemblées en un composite pour comparer les valeurs à celles obtenues sur les couches 0-30 cm dans les plans de surveillance et de contrôle.
- 30-50 cm : transition A/B pour les types A, B et C ; base des couches travaillées pour types D.
- 50-80 cm : horizons profonds B non travaillés.

Les 2 parcelles de Martinique et la parcelle du type D' ont été échantillonnées selon 25 prélèvements pour réaliser un composite analysé 0-30 cm.

Par souci d'économie sur des données analytiques très chères à acquérir, des données complémentaires obtenues par le SPV² Guadeloupe ont été incorporées dans certaines interprétations (analyses de la teneur des sols en chlordécone au GIRPA³ d'Angers).

Parcelle	Type Syst. de culture bananier	Apport chlordécone 3 kg/ha/an Période	Quantité cumulée chlordéc. kg/ha	SOC 0-30 cm g/100g	z _{til} m	[CLD] _{sol} Mesure 0-30 cm mg/kg
LGT	A	jamais	0		0	0
NDL	A	71	3	6,7	0	0,8
NRZ1	B	92-93	6	6,7	0	2,3
BAL	B	87-90	12	8,1	0	2,8
MOS	B	88-90	9	5	0	4,3
LGR	C	72-76& ½ 82-87	22,5	6,1	0	7,9
NRN	C	85-93	27	5	0	10,7
PMX	C	82-93 (x2)	72	8,5	0	36,8
TIL	C	82-93	36	8	0	22,5
NEY	C	71-79	27	6,7	0	9,3
DUF	C	72-78&82-93	57	4,7	0	11,3-11,8
BUR	C	72-78&82-93	57	13,6	0	23,9-30,1
NNS	D	85-93	27	3,1	0,5	4
NNS	D	85-93	27	4,4	0,5	6,2
NRZ2	D	92-93	6	8,8	0,6	1,5
NFC	D	91-93	9	6,7	0,35	4,6
BBN	D	82-93	36	6,2	0,6	7,7
ACP12	D	72-79&82-93	57	4,21	0,6	11,7
ACP8	D	71-74	12	5,5	0,6	1,6
DMY	D'	82-93	57	3,5	0,6	5,6

Tableau 1.1.1 : Parcelles de différents systèmes de culture bananière retenues sur andosols, pour la fiabilité des chroniques rétrospectives d'apport de chlordécone

Analyses de sol

Pour tous les échantillons composites réalisés, ont été mesurées :

² SPV : Service de la Protection des Végétaux de la Direction de l'Agriculture et de la Forêt (DAF)

³ GIRPA : Groupement Interrégional de Recherche sur les Produits Agropharmaceutiques, Angers

- les teneurs en chlordécone (LDA26⁴ sauf DMY analysé au GIRPA d'Angers)
- les teneurs en carbone (SOC) et en azote
- le pH_{eau} et le pH_{KCIN}
- la Capacité d'Echange Cationique et les teneurs en Ca, Mg, K échangeables à l'acétate d'ammonium
- les densités apparentes (recalculées pour 5 parcelles en fonction des teneurs en carbone pour la couche 0-30 cm, selon une relation définie par Clermont-Dauphin *et al* , 2004).

Comptages biologiques :

Les densités et biomasses du ver de terre *Pontoscolex coroethrurus* ont été évaluées sur des cubes de 30 cm de côté des couches superficielles des 17 parcelles du premier réseau.

1.1.1.2. Résultats

Profils de chlordécone et systèmes de culture :

Les teneurs en chlordécone décroissent très fortement entre les couches superficielles et profondes des bananeraies pérennes (Figure 1.1.1 a), dans un rapport de 10 à 20 entre les profondeurs barycentriques 15 et 65 cm. Ceci montre clairement qu'il n'y a pas migration massive de la chlordécone des couches de surface vers les couches profondes, et que l'activité biologique des vers, pourtant parfois conséquente, n'a pas réalisé d'incorporation profonde.

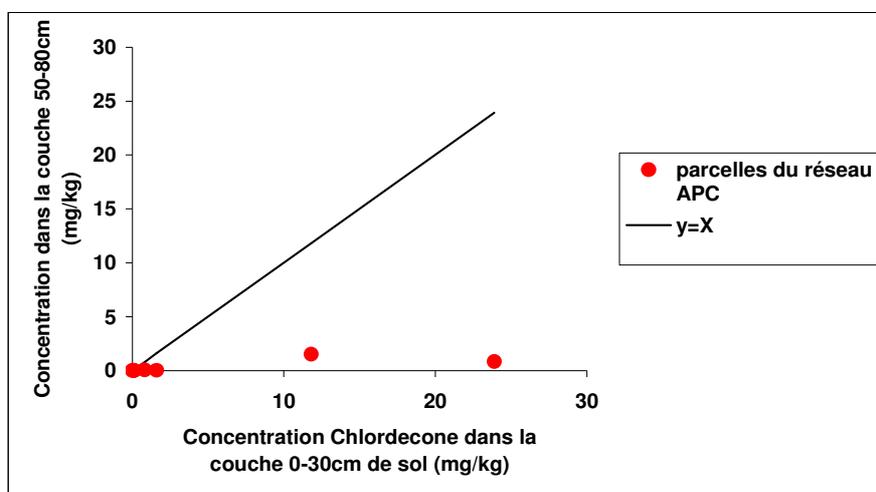


Figure 1.1.1 a : Teneurs en chlordécone des couches de surfaces et des couches profondes dans les andosols sous bananeraies pérennes

Dans les sols travaillés au contraire (Figure 1.1.1 b), on note en revanche une relative identité entre les teneurs obtenues sur 0-30 cm, et 30-50 cm. Cette identité ne peut s'expliquer que par l'incorporation par les travaux du sol sur la totalité de la couche travaillée, sauf pour un point de teneur maximale ou les rapports de teneurs seraient compatibles avec des labours à seulement 35 cm de profondeur.

⁴ LDA26 : Laboratoire Départemental d'Analyses de la Drôme

Il est donc clair que les profils de distribution seront très différents selon que l'on a affaire à des bananeraies pérennes, jamais travaillées, ou à des bananeraies qui depuis les apports ont fait l'objet de travaux du sol profonds et répétés.

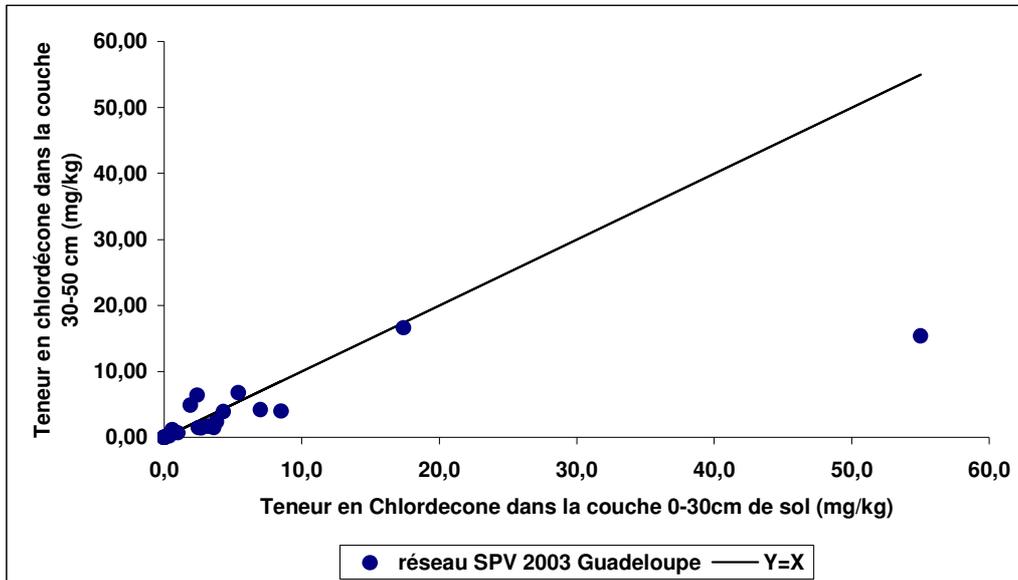


Figure 1.1.1 b : Teneurs en chlordécone des couches de surfaces et des couches de moyenne profondeur dans les andosols sous bananeraies labourées (données SPV Guadeloupe, analyses GIRPA Angers)

Relation entre apports cumulés et teneur des sols en chlordécone:

C'est de loin le premier facteur explicatif apparent des teneurs en chlordécone actuellement mesurées dans la couche superficielle 0-30 cm (Figure 1.1.2). Deux sous-populations se différencient nettement : les sols des bananeraies pérennes, et ceux des bananeraies labourées.

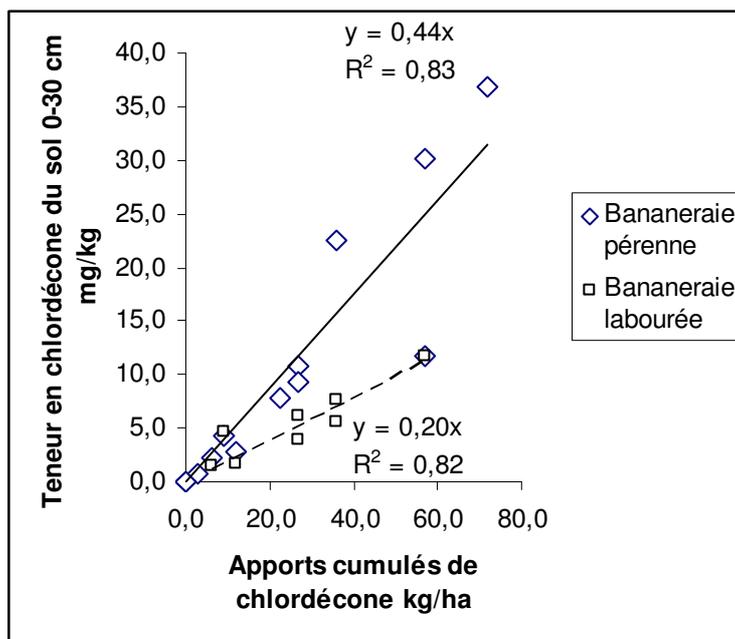


Figure 1.1.2 : Relation entre les apports passés et les teneurs actuelles en chlordécone des sols en surface (0-30 cm)

Les apports passés expliquent une part importante de la variance des teneurs actuelles : respectivement 83 et 82%. Le rapport des pentes de régression est compatible avec des labours à une soixantaine de centimètres, ce qui était couramment observé dans les bananeraies des années 1970 à 90 : le même apport demeure cantonné à 90 % dans les 30 premiers centimètres des bananeraies pérennes, alors qu'il est dilué dans la couche travaillée. Ces faits sont compatibles avec une faible mobilité de la chlordécone dans les profils de sol. Par ailleurs, aucun écart cohérent à la régression ne se dégage, qui soit explicable par l'ancienneté des apports, comme s'il était indifférent que ceux-ci aient eu lieu il y a 15 ans ou 30 ans. Ceci est compatible avec une faible dégradabilité de la molécule.

Relation entre teneur en carbone et teneur en chlordécone des sols :

La prise en compte de la teneur en carbone comme deuxième variable explicative de la teneur en chlordécone après les apports passés permet de faire passer la variance expliquée de 83 à 86 % pour les bananeraies pérennes, et de 82 à 89% pour les bananeraies labourées.

Relation entre variables de l'échange cationique ou le pH et teneur en chlordécone :

Aucune de ces variables n'a été susceptible d'expliquer une part du résidu de la régression multiple. Ceci n'est pas surprenant, dans la mesure où la chlordécone n'a pas de comportement ionique, et où le pH de l'équilibre avec la forme hydratée, plus soluble, est de 11, valeur très rarement approchée sauf dans les sols sodiques. Les andosols sont naturellement proches de leur point isoélectrique, acide, voire neutres s'ils ont été abondamment chaulés.

Réaction des vers de terre à la présence de chlordécone dans les sols :

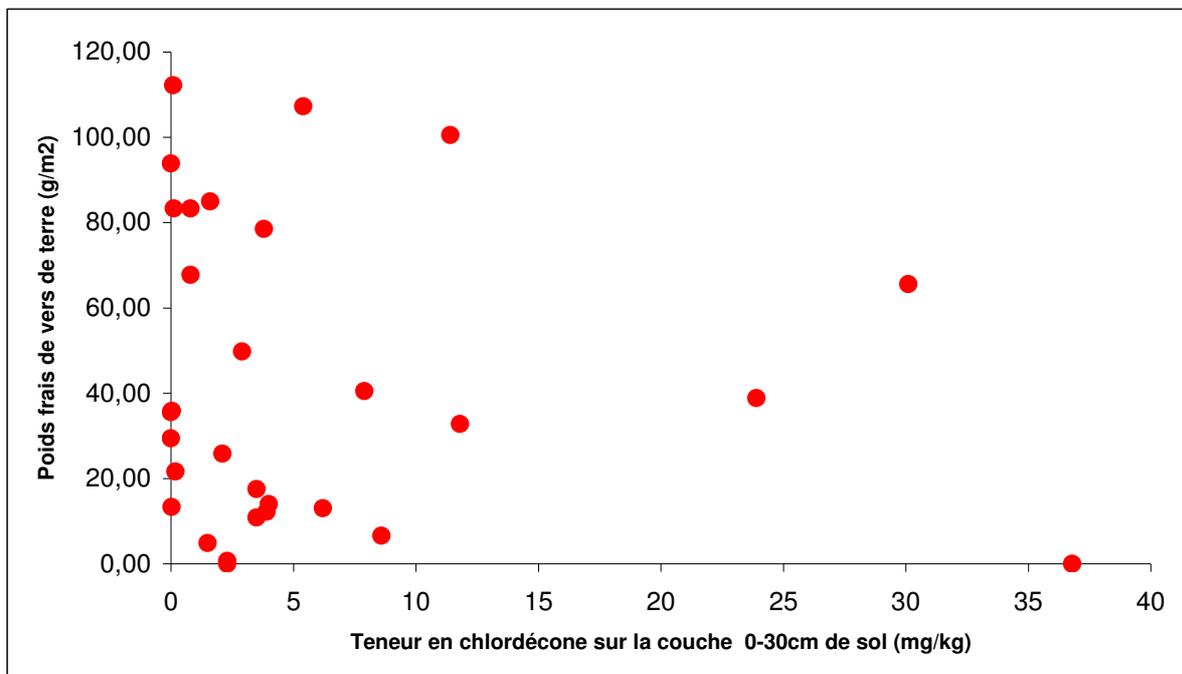


Figure 1.1.3 : Relation entre contamination en chlordécone et biomasse de vers de terre dans la couche de sol 0-30cm sur le réseau APC (17 parcelles en andosols)

La figure 1.1.3 montre qu'il n'existe pas de relation entre la biomasse de vers de terre et la teneur en chlordécone des sols : on peut conserver 100 g/m² de biomasse vivante à des teneurs en chlordécone de 10 mg/kg. La régression apparente de la biomasse de vers pour les fortes teneurs a été expliquée par l'application actuelle de fertilisants et de nématicides (Clermont-Dauphin *et al.*, 2004).

Redistribution de la chlordécone par érosion et ruissellement :

Malgré les fortes pentes, les transferts de solide assistés par le ruissellement (ablation des parties convexes hautes vers les parties concaves basses) n'apparaissent pas significatifs (Figure 1.1.4). Deux parcelles seulement ont montré des teneurs beaucoup plus faibles dans les parties hautes, imputables à une érosion mécanique sèche de ces dernières par les sarclages, toujours descendant sur les fortes pentes (voir chapitre 1.2).

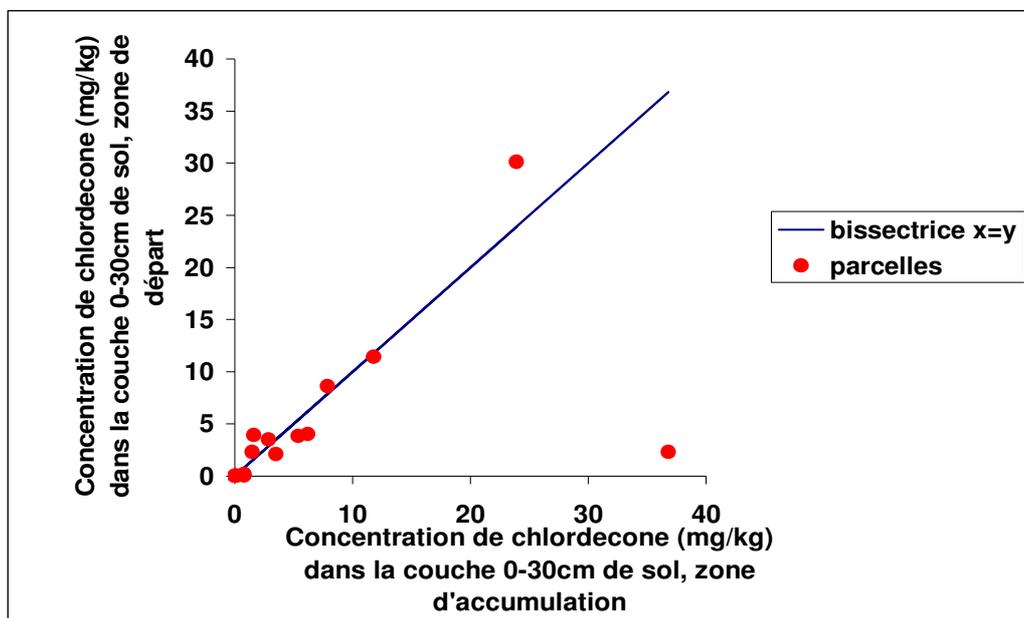


Figure 1.1.4 : Comparaison des teneurs en chlordécone des couches 0-30 cm des zones de départ (haut) et d'accumulation (bas) dans les parcelles en pente sur andosols (Guadeloupe)

La contamination faible par les eaux de ruissellement a été soupçonnée sur une parcelle n'ayant jamais connu d'apport de chlordécone, située en contrebas d'un drain routier en zone bananière : la partie haute est indemne, mais la partie basse au débouché d'un talweg contient 0,1 mg/kg soit 10 fois le seuil de quantification. Cette valeur accrédite l'absence d'apport, car elle est 8 fois plus faible que celle des situations ayant reçu un seul apport ancien.

La contamination par émergence de nappe n'a pas été réellement étudiée. Un cas a cependant été visité, suite à la détection de chlordécone (0,018 mg/kg) dans une parcelle de madère en arrière mangrove. Cette valeur très faible ne peut être imputable qu'à une contamination due à l'imprégnation par des eaux de nappe affleurantes, en aval d'une colline de sols ferrallitiques au passé bananier.

1.1.2. Occurrence de la chlordécone dans les sols hors des zones de production bananière habituelle

Le soupçon a été créé par des analyses des plans de surveillance du SPV de Guadeloupe en 2003 : de la chlordécone a été dosée dans des sols ferrallitiques du nord-est de la Basse-Terre de Guadeloupe, en dehors des communes classiquement « bananières ». L'arrêté préfectoral conditionnant les cultures de racines à l'analyse a alors été étendu à l'ensemble de la Guadeloupe « continentale », en 2004.

L'application frauduleuse sur d'autres cultures était peu probable : en première approche, ces zones ont toujours été cultivées en canne à sucre. La mémoire collective a été sollicitée : il a eu une occupation bananière spéculatrice fugace dans cette région, entre 1983 et 1986. Le hasard a permis de circonscrire cette occupation : les cartes IGN au 1/25 000^e actuelles comportent encore aujourd'hui des symboles de culture issus d'une photo-interprétation de clichés aériens de 1985.

1.1.2.1. Matériel et méthodes

Un travail d'enquête et d'analyses a été mis en œuvre, pour reconstituer les éventuels apports passés et diagnostiquer les niveaux de contamination (DEA de M. Perrault, 2005).

Trois dynamiques d'occupation ont été dégagées :

- une valorisation bananière de plusieurs centaines d'hectares par la Compagnie Fruitière (Multinationale dont le siège est à Marseille), sur des terres de la SIAPAP, dépendant du Groupe Empain à l'époque, destinées à être mises en Réforme Foncière après rachat par l'Etat, pour recapitaliser une autre filiale du groupe, Framatome.
- une valorisation bananière installée sur des terres squattérisées par de petits agriculteurs, en réaction au retard que prenait la Réforme Foncière.
- une valorisation bananière par le propriétaire foncier d'un grand faire-valoir direct planté en canne à sucre, imitée par quelques moyens propriétaires, sur une centaine d'hectares.

Malgré des dynamiques, des motivations, des capacités techniques et de trésorerie diverses, et bien que ces terres aient été indemnes de charançon au départ, **le paquet technique standard, comportant l'application de 3 kg/ha/an de chlordécone, a immédiatement été appliqué.**

Les analyses de teneurs en chlordécone des sols ont été réalisées sur deux profondeurs, 0-30 cm, et 30-60 cm, pour prendre en compte les travaux du sol profonds dont ces sols avaient été forcément l'objet, les terres étant toutes mécanisables. Le carbone a été aussi dosé. Les échantillons composites ont été obtenus à partir de 9 prélèvements à la tarière (Ø 6 cm). Les prélèvements et enquêtes ont été étendus à des occupations bananières plus durables de la commune de Petit-Bourg, qui n'avait pas été incluse dans le premier arrêté préfectoral.

1.1.2.2. Résultats

Le tableau 1.1.2 résume les variables obtenues sur cette investigation dédiée aux occupations bananières, sporadiques ou non, sur les sols ferrallitiques et terrasses ferrallitiques du nord-est de la Basse-Terre de Guadeloupe.

La figure 1.1.5 révèle, au-delà d'une contribution significative des apports anciens expliquant 50% de la variance des teneurs actuelles, un comportement de contamination résiduelle des sols et terrasses ferrallitiques différent de celui des andosols, que les teneurs en carbone n'expliquent pas : des apports identiques se traduisent par une contamination résiduelle moins forte que dans les andosols, labourés aux mêmes profondeurs.

	Type Syst. de culture bananier	Apport CLD 3 kg/ha/an Période	Quantité cumulée CLD kg/ha	SOC g/100g	Z _{til} m	[CLD] sol Mesure 0-30 cm mg/kg
Sol ferrallitique labouré						
FL Mondong	D	86-91	18	2,9	0,4	2,7
FL Fénéteau	D	72-93	57	2,1	0,6	2,7
FL Douillard2	D	82-89	24	2,07	0,6	1,2
Montgommier 3	D	82-87	18	2,21	0,5	1,9
Terrasse ferral. labourée						
Vernou	D	72-93	57	3,19	0,51	1,6
Montgommier 2	D	82-87	18	2,06	0,5	0,28
Montgommier 1	D	82-87	18	2,21	0,55	0,17
Douillard1 2003	D	82-89	24	2,1	0,6	0,6
2005					0,6	0,48

Tableau 1.1.2 : Parcelles de systèmes de culture bananière labourées sur sol ferrallitique retenues pour la fiabilité des chroniques rétrospectives d'apport de chlordécone

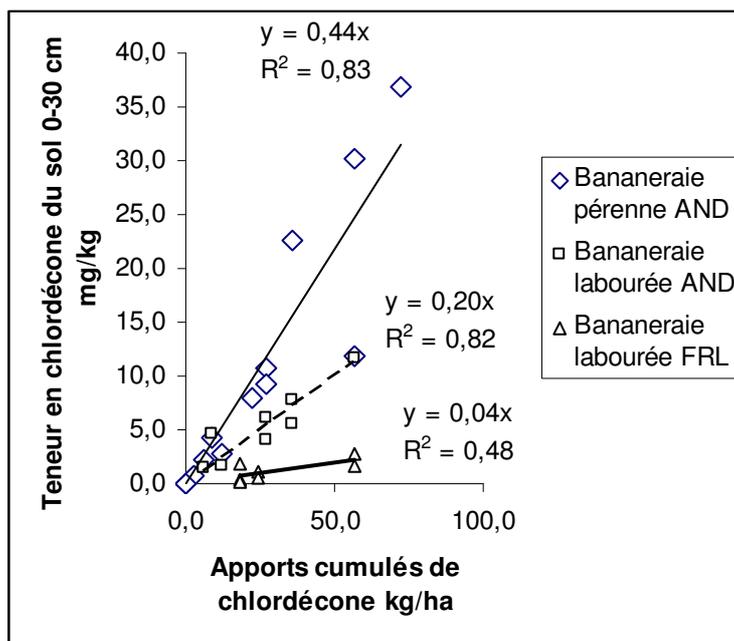


Figure 1.1.5 : Moindre part de variance des teneurs expliquée par les apports, et moindre efficacité de contamination dans les sols ferrallitiques labourés (FRL) que dans les andosols (AND)

Enfin, sur ces sols travaillés depuis les apports à une profondeur de 50 à 60 cm, on trouve des teneurs dans la couche 30-60 cm égales en moyenne aux deux tiers des teneurs de la couche 0-30 cm. Parallèlement, les teneurs en carbone en profondeur représentent plus de la moitié des teneurs de la couche de surface. Tout se passe comme si la distribution de la chlordécone, homogénéisée comme celle du carbone par les travaux du sol, avait ensuite suivi l'évolution de la teneur en carbone sur les profils.

1.2. Modélisation de la teneur résiduelle en chlordécone des sols, soumis au lessivage par les eaux de drainage, en fonction des apports passés, de la sorption sur la matière organique des sols, des systèmes de culture et des types de sols. (Y.-M. Cabidoche, C. Clermont-Dauphin, R. Achard)

1.2.1. Matériel et méthodes

Les sols ont été analysés, dans un premier temps, sur une sélection d'un réseau de parcelles de cultures bananières en andosols, dont le choix avait été antérieurement commandé par l'étude de 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 rejetons 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 9 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 suite à une éventuelle érosion hydrique superficielle. Chaque moyenne parcellaire a donc été calculée sur 18 prélèvements.

Ce premier réseau de 17 parcelles a été complété par des parcelles antérieurement analysées par les Services de la Protection des Végétaux de Guadeloupe et Martinique, sur des sols différents (sols ferrallitiques, andosols sur cendres et ponces, sols brun-rouille à halloysite), qui ont fait l'objet d'analyses et d'enquêtes complémentaires. Les échantillons composites parcellaires ont été constitués par mélange de 25 prélèvements élémentaires sur tous les sols sauf sur sols ferrallitiques qui en comptaient 18 par parcelle.

Un modèle de cadrage simple du comportement de la chlordécone dans les sols a été développé. Son originalité réside dans la prise en compte de la stabilité de la molécule, de sa très forte affinité pour la matière organique des sols, de la dilution mécanique plus ou moins forte du carbone et de la chlordécone par le travail du sol, et du fonctionnement hydrologique redistributif de la bananeraie.

On suppose que l'éluion d'un apport S_i (en kg ha^{-1}) effectué en année i suit une cinétique de premier ordre en fonction de la lame drainante annuelle D cumulée entre l'année i et l'année j , $\sum_i^j D$ (en mm), selon l'équation :

$$S_{ij} = S_i \times \exp \left(\frac{-10}{K_{oc} \times S_{soc}} \left(\sum_{n=i}^{i+a} D_{red} + \sum_{n=i+a+1}^j D_{bil} \right) \right)$$

où S_{ij} désigne le stock restant en année j de l'apport de l'année i , S_i .

Les deux seuls paramètres sont S_{soc} , désignant le stock de carbone organique sur les 30 premiers centimètres (Mg ha^{-1}), qui ont fait l'objet des mesures de teneur en chlordécone, et K_{oc} , le coefficient de partage entre la chlordécone adsorbé sur le carbone, et celui en solution (L kg^{-1}). Le K_{oc} a été pris à 17500 L kg^{-1} (source : <http://risk.lsd.ornl.gov/cgi-bin/tox>).

Concrètement, ce modèle suppose un système ouvert, où la fraction en solution est déplacée par l'excédent de bilan hydrique, puis immédiatement renouvelée en fonction du stock restant, selon le K_{oc} .

Le système de culture est pris en compte à deux niveaux :

- S_i est l'apport de chlordécone, éventuellement redistribué sur la profondeur de travail du sol (z_{til}) quand ce dernier a eu lieu, donnant alors un stock égal à $S_i \times 0.3/z_{til}$ si $z_{til} > 0.3$, pour les 30 premiers centimètres.
- Les a premières années suivant l'apport (3 ans pour les bananeraies labourées, 5 ans pour les pérennes), D est égal au drainage forcé D_{red} imposé au pied du bananier par son effet concentrateur de la pluie, précisément là où était épandu la chlordécone. $D_{red} = 1.2 \times P$ où P est la pluviométrie annuelle (mm) pour les bananiers en simples rangs ou en quinconce (Sansoulet *et al*, 2004), et $D_{red} = 1.5 \times P$ pour les bananiers en doubles rangs (données acquises dans le cadre du projet). La lame drainante annuelle est estimée par bilan hydrique, selon l'équation :

$$D_{bil} = P - ETR - R$$

où ETR est l'évapotranspiration annuelle (mm) approchée par l' ETP , et R le ruissellement (mm) pris comme 5% de la pluviométrie (Cattan *et al*, 2006), cette dernière étant évaluée par interpolation des données des pluviomètres positionnés sur des gradients locaux par Météo-France.

Les stocks restants des différents apports sont élués en parallèle, ce qui suppose que l'on n'a jamais atteint la saturation de la capacité de stockage de la chlordécone par le carbone, même en 20 ans d'apports effectifs. Cette hypothèse apparaît légitime au sens où le rapport entre la quantité cumulée de chlordécone apportée et le stock organique ne dépasse pas 2%.

Le stock S_j (kg ha^{-1}) de chlordécone restant en année j est finalement :

$$S_j = \sum_{i=1971}^j \left[S_i \times \exp \left(\frac{-10}{K_{oc} \times S_{soc}} \left(\sum_{n=i}^{i+a} D_{red} + \sum_{n=i+a+1}^j D_{bil} \right) \right) \right]$$

Ce modèle permet le calcul d'un majorant du stock restant (hors biodégradation), selon le K_{oc} de chaque pesticide organochloré : 17500 L kg^{-1} pour la chlordécone, 10600 L kg^{-1} pour le dieldrine, 3380 L kg^{-1} pour le beta-HCH.

Les valeurs prises par les différentes variables intervenant dans le modèle, concernant les 32 parcelles sélectionnées pour la fiabilité des chroniques rétrospectives d'apports de chlordécone, sont décrites dans le tableau 1.2.1.

La fiabilité de ces chroniques a été estimée selon plusieurs critères :

- La tenue de cahiers de culture mentionnant les apports et les dates (moins de 5% des enquêtés)
- Le témoignage d'apports occasionnels, en général assortis d'une méfiance ou du manque de trésorerie pour accéder à un produit efficace mais cher
- Les situations de mises en valeur bananières tardives, après conversion de systèmes de culture ou défrichements, dans la période Curlone ; à ce titre ont été particulièrement recherchées en Guadeloupe des parcelles sur défrichements tardifs (Féfé, Capesterre) ou qui ont supporté des incursions bananières spéculatives dans les zones cannières du nord-est de la Basse-Terre (Perrault, 2005).
- L'attestation de l'application du « message technique » délivré par les groupements de producteurs, selon le témoignage des planteurs et des techniciens d'encadrement.

La principale difficulté rencontrée a été l'ignorance des exploitants actuels concernant les apports éventuels de Képone (1971-78), effectués par les exploitants d'une génération dont plusieurs sont déjà décédés.

Tableau 1.2.1 : Valeurs des variables entrant dans le modèle d'éluion de la chlordécone par l'eau de drainage, pour les parcelles dotées de chroniques d'apport fiables, en Guadeloupe et en Martinique⁵, sur différents types de sols (nombre de prélèvements pour échantillon moyen = 9)

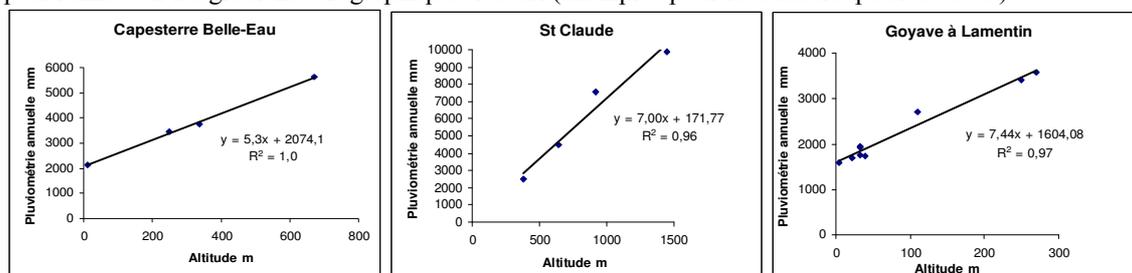
		Apport CLD 3 kg/an Période	SOC g/100g	DA kg/dm ³	Ssoc Mg/ha	P mm/an	ETP mm/an	z _{til} m	[CLD] _{sol} Mesure mg/kg	[CLD] _{sol} Modèle mg/kg
Andosol	Ban. pérenne									
LGT	jamais							0	0	0
NDL	71	6,7	0,61	123	5000	1100	0	0,8	0,9	
NRZ1	92-93	6,7	0,61	123	4000	1200	0	2,3	2,7	
BAL	87-90	8,1	0,55	134	4200	1150	0	2,8	2,9	
MOS	88-90	5	0,69	104	4200	1150	0	4,3	4,5	
LGR	72-76& ½ 82-87	6,1	0,64	117	4500	1150	0	7,9	7,8	
NRN	85-93	5	0,69	104	4200	1150	0	10,7	10,9	
PMX	82-93 (6kg/an)	8,5	0,54	138	4200	1150	0	36,8	36,2	
TIL	87-93	8	0,56	134	4000	1200	0	22,5	19,3	
NEY	71-79	6,7	0,61	123	4200	1150	0	9,3	9,1	
DUF	72-78&82-93	4,7	0,71	100	4200	1150	0	11,3- 11,8	11,1	
BUR	72-78&82-93	13,6	0,4	163	7700*	1150	0	23,9- 30,1	28,6	
<i>* pluviométrie corrigée de la pierrosité, via le sur-stockage du carbone / situation précédente de même SdC a. c 1972</i>										
Andosol	labouré									
NNS	85-93	3,1	0,83	77	3500	1300	0,5	4	5,6	
							0,4	4	6,8	
NNS	85-93	4,4	0,73	96	3500	1300	0,5	6,2	6,6	
							0,4	6,2	7,6	
NRZ2	92-93	8,8	0,5	132	4000	1200	0,6	1,5	1,6	
							0,5	1,5	2,0	
NFC	91-93	6,7	0,61	123	3700	1200	0,35	4,6	4,8	
							0,45	4,6	3,7	
BBN	82-93	6,2	0,63	117	3500	1300	0,6	7,7	7,7	
							0,7	7,7	6,6	
Acp12	72-79&82-94	4,21	0,74	93	4000	1200	0,6	11,7	12,3	
Acp8	71-74	5,5	0,67	111	4200	1150	0,6	1,6	1,8	
							0,7	1,6	1,5	
DMY1	82-93	3,5	0,79	83	3500	1300	0,6	5,6	5,6	
							0,7	5,6	4,8	
Andosol / cendres+ponce labouré										
Acp3	92	3,66	0,78	86	4200	1200	0,6	0,16	0,5	
Acp7	71-74	4,42	0,73	97	4200	1200	0,6	0,74	1,5	
Acp9	82-90	3,84	0,8	92	3500	1200	0,6	1,5	3,1	
Acp10	82-90	3,31	0,81	80	3500	1200	0,6	1,3	2,9	
AcpM2005	71-78&82-93	5,5	0,67	111	3500	1200	0,6	4,1	10	
Acp11	72-79&82-94	4,21	0,74	93	4000	1100	0,6	4,4	8,2	

⁵ Par souci de confidentialité, les coordonnées géographiques, relevées au GPS, ne sont pas exposées dans ce rapport ; elle sont disponibles sur demande auprès du coordinateur

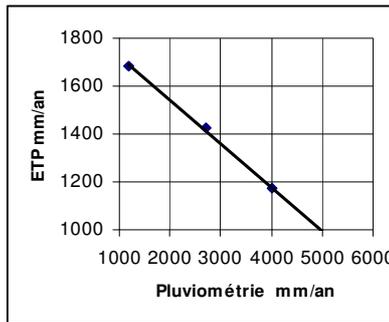
		Apport CLD 3 kg/an Période	SOC g/100g	DA kg/dm ³	Ssoc t/ha	P mm/an	ETP mm/an	z til m	[CLD] sol Mesure mg/kg	[CLD] sol Modèle mg/kg
Sol ferrallitique labouré										
RCL	76, 83	1,67	0,96	48	3200	1350	0,5	0,3	0,7	
MDG	86-91	2,92	1	88	3500	1300	0,4	2,7	4,1	
FNT	72-93	2,1	0,92	58	4000	1300	0,6	2,7	6,5	
DLD2	82-89	2,07	0,92	57	3000	1450	0,6	1,2	3,0	
MTG 3	82-87	2,21	0,91	60	2800	1500	0,5	1,9	2,9	
DMY2	82-93	1,28	1,05	40	2750	1350	0,7	1,7	4,6	
Terrasse ferrallit. labourée										
VRN	72-93	3,19	0,82	78	3500	1300	0,51	1,6	9,3	
MTG2	82-87	2,06	1	62	2800	1500	0,5	0,28	2,7	
MTG1	82-87	2,21	0,93	62	2800	1500	0,55	0,17	2	
DLD1 2003	82-89	2,1	1	63	3000	1450	0,6	0,6	3,2	
2005							0,6	0,48	2,9	
Sol brun-rouille à halloysite labouré										
Brh2	72-78,82-85,94	1,94	0,9	52	2500	1500	0,5	0,6	5,5	
Brh3	83-93	1,94	0,9	52	2500	1500	0,7	0,35	3,9	
Brh5	72-79&82-87	1,76	0,95	48	2500	1500	0,6	0,26	4,4	
Brh6	72-79&82-87	1,94	0,9	52	2500	1500	0,6	0,6	5	
Brh7	72-79&82-94	1,9	0,9	51	2500	1500	0,6	0,81	7,1	
Brh4	72-79&82-94	1,76	0,95	48	2500	1500	0,6	0,05	7,6	
<i>Inondable</i>					3500*			0,05	5,4	

* calcul avec une lame de drainage augmentée par des périodes de submersion lors des crues de la rivière proche

- CLD : chlrodécone ; [CLD]_{sol} mesurée : teneurs du sol déterminées sur carottages 0-30 cm au LDA 26 ; [CLD]_{sol} modèle : calculée avec Koc = 17500 L/kg
- SOC : teneurs en carbone organique du sol déterminées sur carottages 0-30 cm selon protocole AFNOR à l'INRA-APC ou CIRAD-Flhor
- DA : masse volumique apparente, calculée selon relation préétablie pour les andosols, mesurée au cylindre pour les autres sols
- S_{soc} : stock de carbone organique sur 30 cm
- P : pluviométrie, estimée à partir des données Météo-France 1972-2001 sur les réseaux de pluviomètres positionnés sur les gradients orographiques locaux (exemples pour la Guadeloupe ci-dessous)



- ETP : évapotranspiration potentielle, estimateur de l'ETR moyenne, selon les travaux de Robin (1990)



- z_{til} : profondeur maximale du travail du sol effectué après apports (enquêtes, parcs de matériels, profils culturaux)

1.2.2. Résultats

1.2.2.1. Teneurs en chlordécone des andosols sous bananeraies pérennes

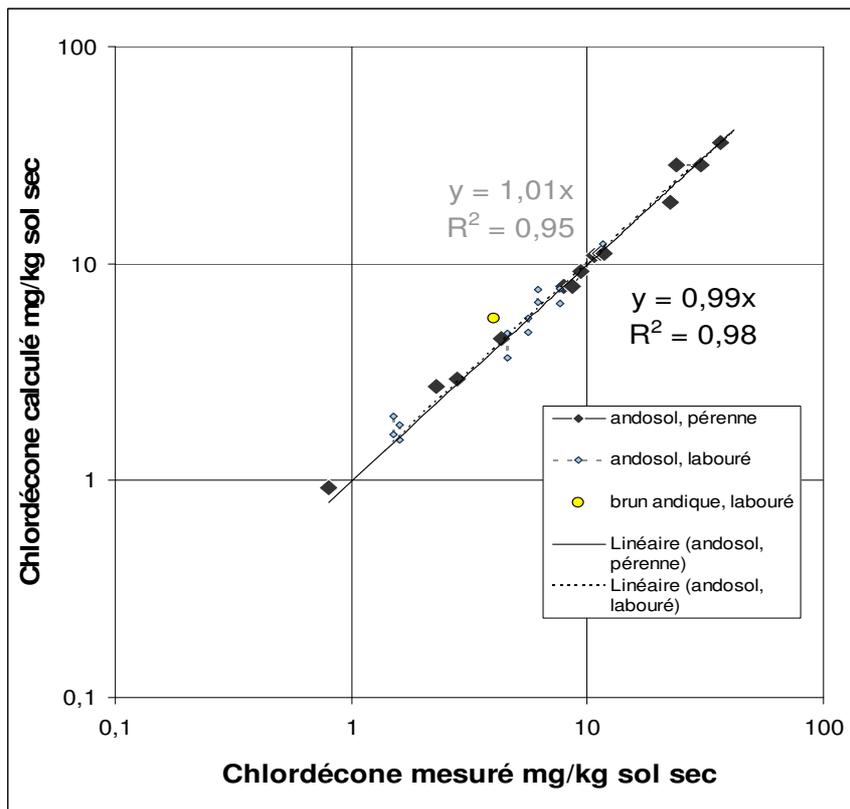


Figure 1.2.1 : Relation entre les teneurs en chlordécone mesurées sur la couche 0-30 cm, et calculées par le modèle d'éluion, pour les andosols sous bananeraies, pérennes ou labourées à l'époque des apports de chlordécone et depuis lors.

Le modèle rend bien compte des teneurs en chlordécone sur les 30 premiers centimètres des andosols sous bananeraies pérennes. La large gamme des teneurs mesurées, de 0.8 à plus de

30 mg/kg fournit une relation de grande qualité entre les valeurs calculées et mesurées (Figure 1.2.1) : pente de 0.99, $R^2=0.98$.

1.2.2.2. Teneurs en chlordécone des andosols sous bananeraies labourées pendant ou après les apports

La gamme des valeurs mesurées est plus restreinte : de 1.6 à 12 mg/kg. L'abaissement de la valeur maximale n'indique pas une moindre intensité ni durée des apports relativement aux bananeraies pérennes : les travaux du sol répétés ont incorporé la chlordécone sur une plus grande épaisseur que la couche 0-30 cm analysée et simulée. La profondeur de cette incorporation a été affectée d'une incertitude estimée à 10 cm. Cependant, même avec cette incertitude, la relation entre les teneurs en chlordécone calculées et mesurées est quasiment d'aussi bonne qualité que pour les bananeraies pérennes (Figure 1.2.1) : pente de 1,01, $R^2=0.95$.

Le modèle simple, fondé sur l'éluion de la chlordécone, sorbée sur le stock organique du sol par les eaux de drainage, au *pro-rata* du coefficient de partage K_{oc} entre la molécule sorbée et en phase liquide maximal de la littérature, rend bien compte des teneurs en chlordécone, mesurées plus de 20 ans après la fin des apports, dans les andosols.

1.2.2.3. Teneurs en chlordécone des autres sols sous bananeraies labourées pendant ou après les apports

Les teneurs calculées sur les autres sols sont des multiples, à peu près constants, des teneurs mesurées, selon un facteur propre à chaque type de sol (Figure 1.2.2). En inversant le modèle à partir des valeurs mesurées, on obtient une gamme relativement étroite de K_{oc} apparents, propre à chaque type de sol (Tableau 1.2.2).

Tableau 1.2.2 : Coefficients de partage apparent K_{oc} pour la chlordécone obtenus pour les différents types de sols par inversion du modèle d'éluion

Type de Sol	Matrice minérale	n	K_{oc} moyen	K_{oc} max	K_{oc} min
Andosol	Allophane	20	17500	19000	16500
Sol brun andique	Allophane + halloysite	1	12000	-	-
Sol ferrallitique	Halloysite et oxyhydroxides Fe	6	7900	10500	7000
Sol andique / cendres et ponces*	Allophane, verres andésitiques	6	5200	7000	4000
Terrasses ferrallitiques	Halloysite	4	2500	3000	1800
Sol brun-rouille à halloysite	Halloysite + ϵ smectite	5	2300	2500	2000

* ce type de sol a probablement fourni des valeurs biaisées, le carbone étant dosé sur la terre fine alors que la chlordécone l'a été sur la terre totale ; une granulométrie complète est à refaire pour interpréter ces données.

Les gammes de Koc apparents se différencient bien selon les types de sol : les plus élevés pour les andosols à allophane, intermédiaires pour les sols ferrallitiques à halloysite et oxyhydroxides de fer, et les plus faibles pour les sols à halloysite pauvres en oxyhydroxydes de fer. Les données concernant ces types de sol ne sont pas sujettes à biais, car ils ne contiennent pas d'éléments grossiers de la taille des graviers. La valeur du seul sol brun andique prélevé, contenant un mélange allophane et halloysite, s'inscrit dans la même logique.

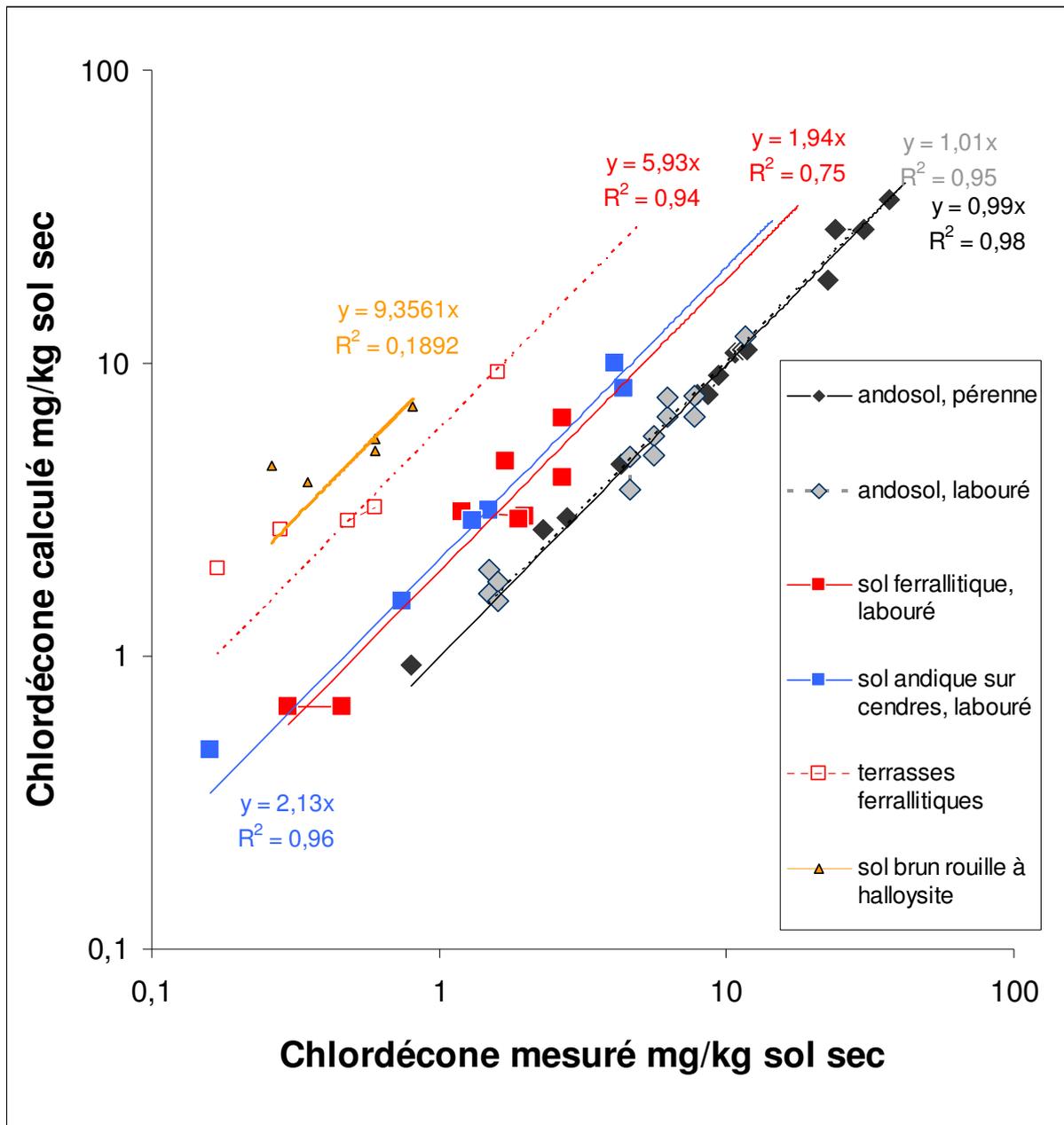


Figure 1.2.2 : Relation entre les teneurs mesurées en chlordécone (couche 0-30 cm), et les teneurs calculées en sortie du modèle d'éluion, pour les différents types de sols

1.2.3. Discussion

1.2.3.1. Non dégradabilité de la chlordécone dans les sols

La validité démontrée du modèle d'éluion de la chlordécone dans les andosols, comportant en entrée les apports de la molécule et les stocks organiques, et, en sortie, le seul lessivage par les eaux de drainage, montre qu'il n'y a pas besoin d'introduire une hypothèse de dégradabilité de la molécule pour rendre compte de l'état de contamination actuel.

Pour les autres sols, on pourrait penser qu'un Koc apparent plus faible que celui des andosols indiquerait une certaine dégradabilité. Alors, plus anciens ont été les apports et plus le Koc apparent devrait être faible. Ce n'est pas le cas, les valeurs de Koc apparent sont indépendantes de l'ancienneté des apports.

En d'autres termes, rien n'indique que la chlordécone se dégrade dans les sols des Antilles.

1.2.3.2. Comportement de sorption différentiel selon les types de sols

Les gammes relativement restreintes, et différentes d'un sol à l'autre, des valeurs des Koc apparents, semblent indiquer un comportement de sorption différentiel. Coquet et Barriuso (2002) ont du reste noté des variabilités dans un rapport de 1 à 4 du Koc d'un herbicide selon les types de sols d'un bassin versant de Picardie. En première apparence la nature de la matrice minérale interviendrait : la sorptivité serait décroissante des allophanes aux halloysites sans oxyhydroxides de fer, les sols à oxyhydroxides et halloysite étant intermédiaires.

La sensibilité du modèle au Koc est naturellement très élevée, ainsi la décroissance des teneurs en fonction du temps sera très différente selon les types de sol (Figure 1.2.3).

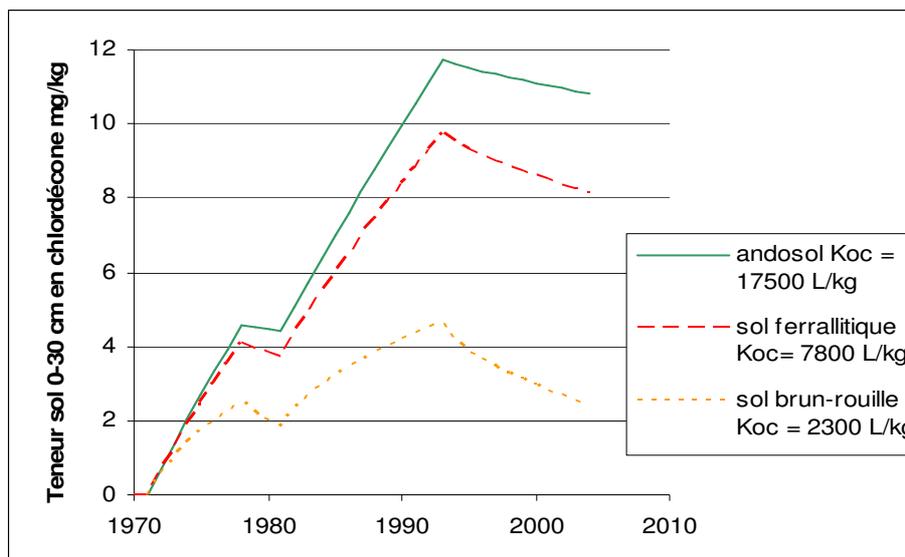


Figure 1.2.3 : Teneurs actuelles calculées en chlordécone de trois types de sols, selon les Koc apparents moyens issus de l'inversion du modèle, sur des sols ayant reçu les mêmes apports : Képone, 60 kg/an de 1972 à 1978, puis Curlone, 60 kg/an de 1982 à 1993, 5% de chlordécone

1.2.3.3. Importance et conséquences de la redistribution de chlordécone par les travaux du sol profonds

La prise en compte de la redistribution de la molécule au sein du profil, à une profondeur supérieure aux 30 premiers centimètres prélevés dans le cadre des plans de surveillance, a été nécessaire pour intégrer l'ensemble des andosols, travaillés ou non, dans le même comportement. La figure 1.2.4 montre la grande sensibilité du modèle à la profondeur de travail du sol, qui, dans les bananeraies intensives mécanisables des années « chlordécone », a pu être considérable : on retrouve aujourd'hui dans les parcs de matériel des bananeraies des charrues à défoncer très rouillées, capable de descendre à 70 – 80 cm, qui étaient autrefois tirées par des bulldozers.

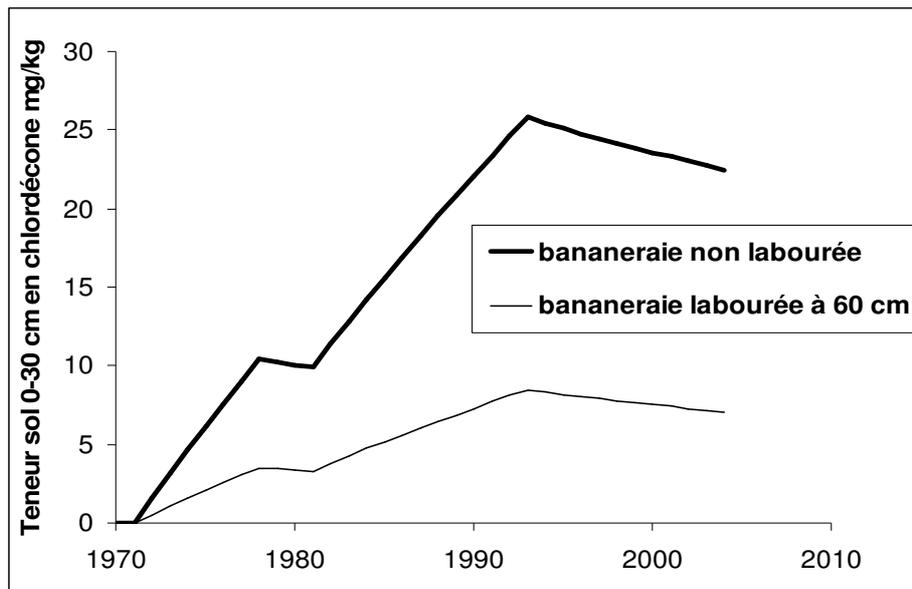


Figure 1.2.4 : Evolution de la teneur en chlordécone d'un andosol sous bananeraie, après apport de 3kg/ha/an de CLD entre 1972-1978 et 1982-1993

Cette redistribution profonde a trois conséquences :

- **Réévaluation de la contamination relative des sols de Guadeloupe et de Martinique**

On a soupçonné, en 2001 et 2002, les planteurs de Guadeloupe d'avoir été déraisonnables dans l'usage de la chlordécone, vu les teneurs record enregistrées, qui ont pu atteindre 30 mg/kg sol sec, alors que la Martinique dépassait rarement 10 ; la réalité est que la Guadeloupe dispose de surfaces importantes en bananes pérennes, alors que les données obtenues en Martinique l'ont été sur des sols autrefois profondément labourés. En témoignent les stocks organiques en général supérieurs dans les bananeraies pérennes par rapport aux bananeraies labourées (Figure 1.2.5) : sous bananeraies, 62 % des andosols non labourés ont un stock de carbone supérieur à 120 t/ha sur 30 cm, tandis que 75 % ont un stock inférieur à 120 t/ha dans les andosols labourés.

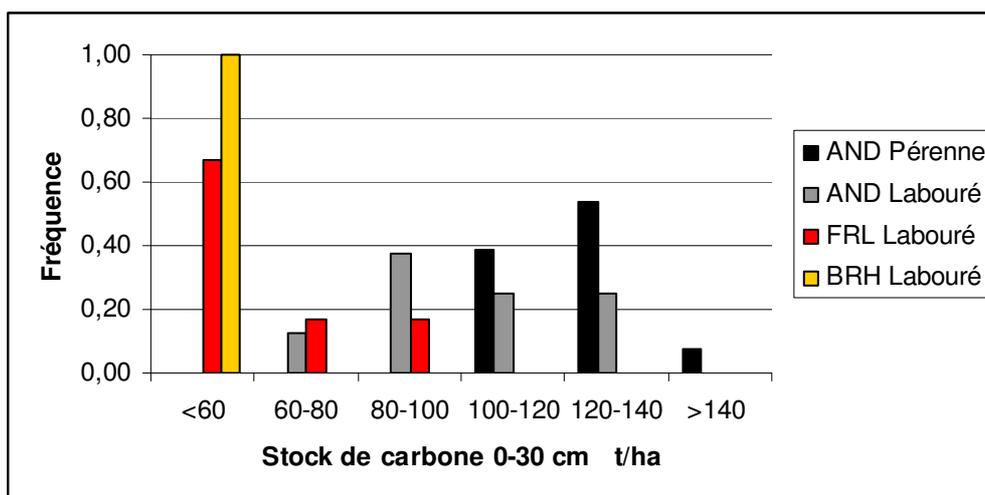


Figure 1.2.5 : Fréquence de distribution des stocks de carbone (0-30 cm) dans les différents sols, labourés ou non. AND = andosol ; FRL = ferrallitique ; BRH = brun rouille à halloysite

- **Impossibilité de remédiation par décapage**

La redistribution profonde par les labours interdit une solution de remédiation par décapage : il faudrait manipuler des millions de tonnes de terre (que l'on mettrait où ?), au risque d'atteindre des horizons profonds de fertilité minérale très réduite.

- **Variabilité spatiale des teneurs en chlordécone des sols : l'organisation probable en « copeaux »**

La chlordécone est distribuée de manière extrêmement hétérogène dans les sols labourés, parfois plus abondante en profondeur suite à des labours retournés, probablement en « copeaux » obliques suite à des labours dressés. Par ailleurs, la profondeur de redistribution est variable à l'échelle décimétrique sur les terrains non plans, la charrue ayant sur-pénétré les parties concaves et sous-pénétré les parties convexes. C'est probablement une des raisons pour lesquelles la variabilité spatiale observée dans les andosols labourés de Martinique est élevée (Figure 1.2.6).

L'extrême variabilité observée ici illustre à la fois les conséquences des apports localisés au pied du faux-tronc, la faiblesse de l'homogénéisation par les trois labours, l'irrégularité probable des profondeurs de redistribution, et le trop faible diamètre de la tarière utilisée, interceptant ou non les « copeaux » de chlordécone.

Dans l'exemple indiqué ici, le variogramme correspondant montre une indépendance des valeurs pour une distance supérieure à 10 m. Pour obtenir une précision relative de 20%, il faudrait sur cette parcelle réaliser un échantillon moyen de 20 prélèvements élémentaires séparés de plus de 10 m. Atteindre 10 % requerrait 60 prélèvements pour réaliser un échantillon composite.

Il convient donc de rester prudent sur les valeurs obtenues dans le cadre des plans de surveillance.

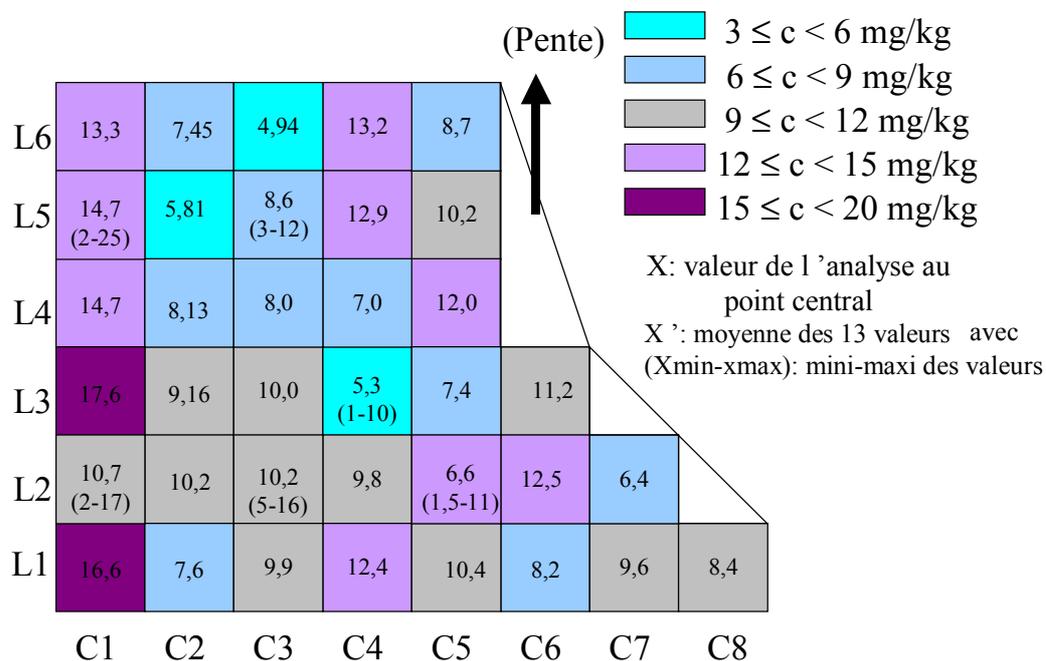


Figure 1.2.6 : Un exemple de variation spatiale forte des teneurs en chlordécone d'un andosol ayant subi trois labours depuis 1993.

Mesures au centre d'un maillage 17x17 m, et sur un sous-maillage 2x2 m dans quelques mailles principales (valeurs moyennes, valeurs extrêmes entre parenthèses). Tarière de diamètre 2 cm, prélèvements 0-30 cm.

1.2.3.4. Analyse des situations discordantes par rapport au modèle

- **Difficultés liées à l'ancienneté de la période d'application du Képone, et à l'absence de mémoire des exploitants actuels sur le sujet**

Un exemple significatif a été tiré des situations de bananeraies pérennes de Matouba, Guadeloupe (Figure 1.2.7).

Un important propriétaire foncier P, a été en mesure de nous décrire avec exactitude les apports passés de chlordécone sur sa parcelle de bananeraie pérenne échantillonnée :

- 60 kg/ha/an de Képone entre 1972 et 1975, sur bananeraies pérennes
- difficultés commerciales de la banane d'altitude, culture spéculative d'aubergine de 1976 à 1981, intenable ensuite à cause de la bactérie tellurique *Ralstonia solanacearum*.
- retour à la bananeraie pérenne en 1982, avec apport de Curlone (½ dose annuelle sur sols peu infestés par le charançon)

L'application du modèle donne des teneurs calculées en bonne adéquation avec les teneurs mesurées en 2001.

La crise de vente de la banane a conduit par ailleurs P à vendre des bananeraies pérennes, à un acheteur A1 en 1976, A2 en 1975. Lors des enquêtes, les exploitants A1 et A2 ont déclaré n'avoir jamais apporté de chlordécone sur les bananeraies pérennes qu'ils ont exploitées. Or les teneurs mesurées montrent une contamination moyenne de leurs sols. La prise en compte des pratiques de l'ancien propriétaire P, ignorées des acheteurs, dans le modèle, permet de rendre compte d'une manière satisfaisante des teneurs mesurées en 2001 (Figure 1.2.7)

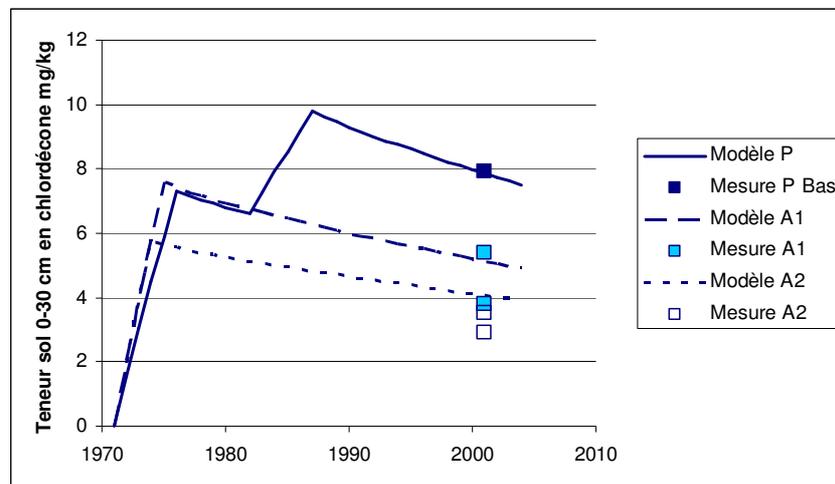


Figure 1.2.7 : Explication des teneurs en chlordécone des sols mesurées en 2001 chez des exploitants déclarant n'en avoir jamais apporté, par les pratiques de l'ancien propriétaire.

- **Troncature des profils de sols, consécutives à l'érosion mécanique sèche**

Dans les situations de bananeraies pérennes en très fortes pentes, les hauts de pente ont parfois montré des teneurs en haut de pente beaucoup plus faibles que les teneurs en bas de pente, conformes aux teneurs calculées par le modèle en fonction des apports passés (Figure 1.2.8).

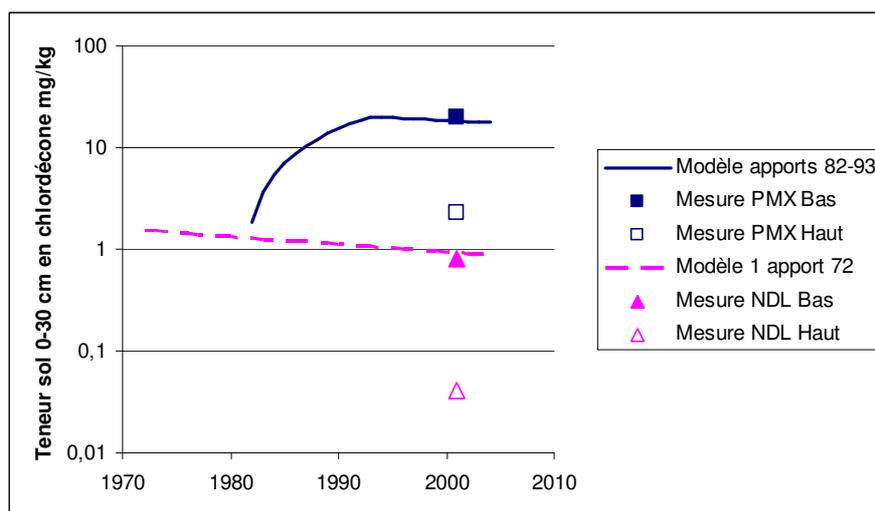


Figure 1.2.8 : Teneurs en chlordécone de deux parcelles d'andosols de bananeraies pérennes en fortes pentes (PMX et NDL), où les parties basses montrent des valeurs conformes au modèle, et les parties hautes des valeurs nettement plus faibles, à la suite d'une troncature par érosion mécanique sèche

Dans les mêmes périmètres, les cultures maraîchères, travaillées manuellement sur fortes pentes, montrent une érosion mécanique sèche que des topographies dans le sens de la pente mettent bien en évidence (Carduner et Cabidoche, 2005). Dans les bananeraies pérennes, même si la topographie de précision centimétrique est impossible, faute de visibilité, le même phénomène s'est produit à force de sarclages manuels toujours descendants. En témoignent les ressauts généralement présents en tête de parcelles, et les translations de profils de carbone entre le haut et le bas, qui montrent un décalage de plusieurs décimètres (Figure 1.2.9)

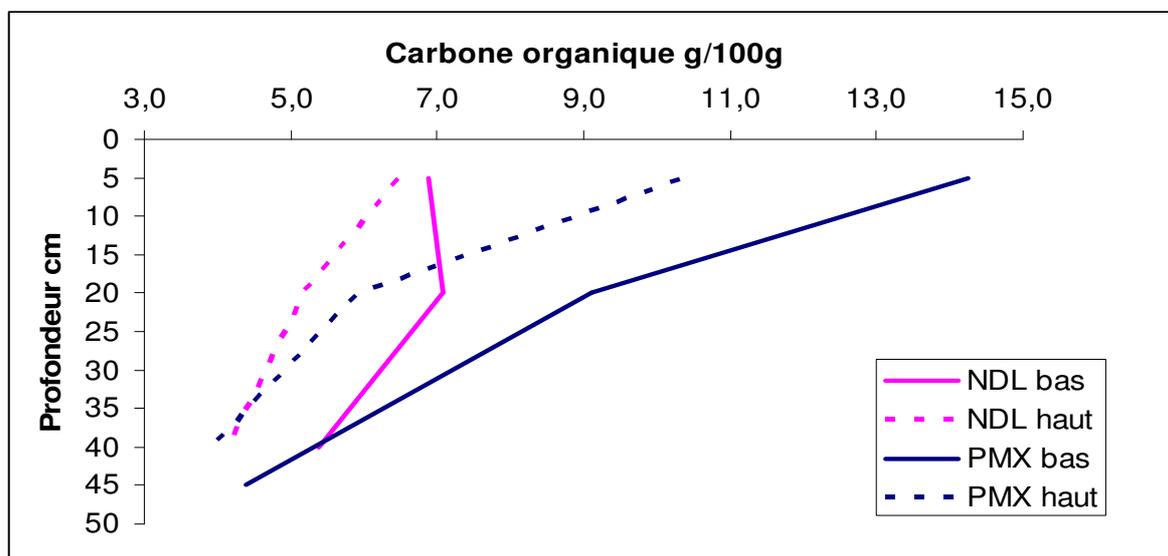


Figure 1.2.9 : Décalage des profils de carbone, dans deux parcelles de bananes pérennes en forte pente, où le travail manuel a entraîné une érosion mécanique sèche
(Codage des parcelles, c.f. tableau 1.1.1).

Ces faits ne sont pas anecdotiques : ils montrent qu'une troncature d'une vingtaine de centimètres est propre à diviser la teneur des sols des bananeraies pérennes par 15 à 20.

Il n'est donc pas inimaginable de remédier à la pollution de ces andosols sous bananes pérennes par un décapage de 20 cm, qui est praticable sans anéantir leur fertilité.

1.2.3.5. Extrapolation du modèle : contamination par la chlordécone durable sur tous les sols

La validité du modèle d'éluion appliqué aux andosols avec un Koc de 17500 L/kg, pour rendre compte des teneurs en chlordécone mesurées aujourd'hui, et les valeurs beaucoup plus faibles, et sur des gammes disjointes, des Koc apparents obtenues par inversion pour les autres sols, autorisent une extrapolation (Figure 1.2.10).

Même si cette extrapolation est entachée d'une incertitude, elle montre que le lessivage de la chlordécone des sols les plus contaminés ne permettra d'atteindre une dépollution au seuil de quantification de 0.01 µg/kg qu'au 22^e siècle pour les sols brun rouille, et au 27^e siècle pour les andosols, l'échéance étant intermédiaire pour les sols ferrallitiques.

Une approche analogue est au contraire plus rassurante s'agissant du HCH : bien que les apports maximum de γHCH (lindane) aient été de 12 kg/ha/an entre 1965 et 1975, sa simple éluion aboutirait à sa dépollution au seuil de quantification vers 2040. Or cette molécule est

transformable en d'autres isomères, l'ensemble étant par ailleurs dégradable. C'est la raison pour laquelle on ne trouve que rarement du HCH, et essentiellement l'isomère β .

On peut considérer que la pollution des sols par le HCH ne sera plus un problème d'ici quelques années.

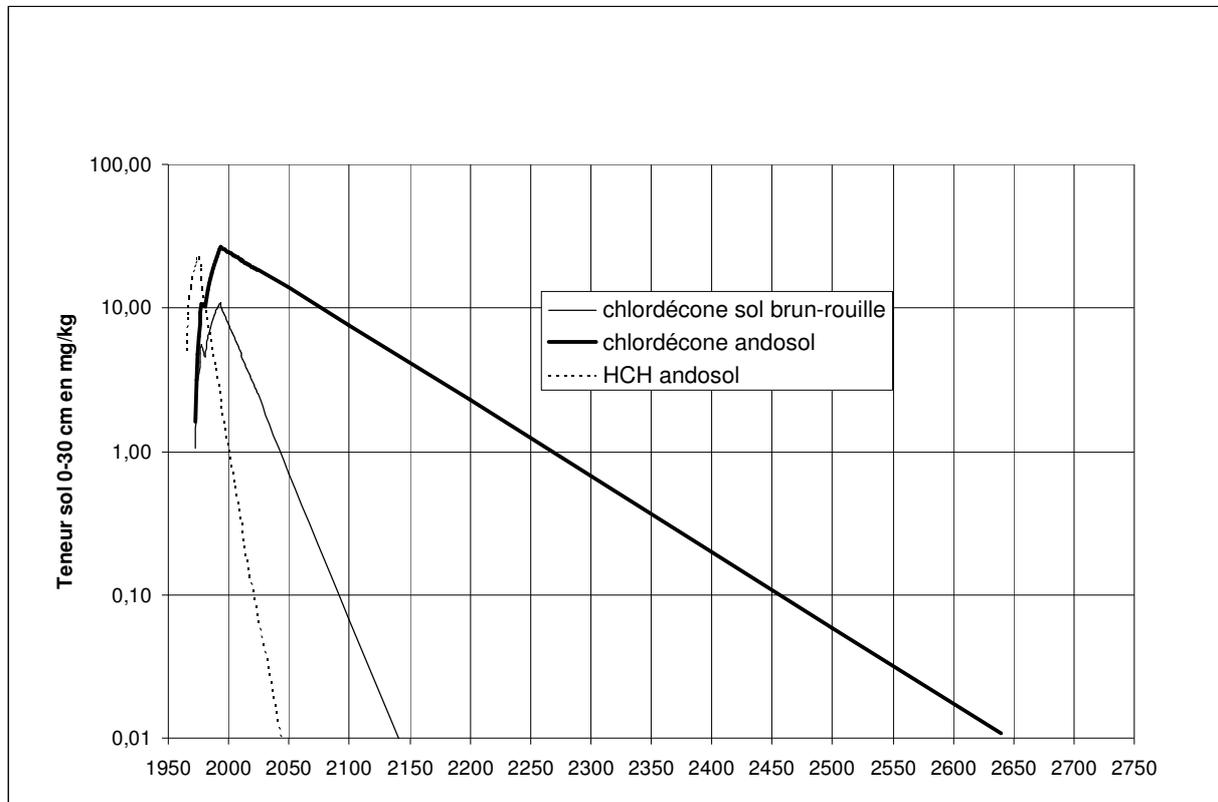


Figure 1.2.10 : Evolution de la pollution d'un sol brun rouille à halloysite après apport de 3kg/ha/an de chlordécone de 1972 à 1978 et de 1982 à 1993, d'un andosol sous bananeraie pérenne ayant reçu les mêmes apports de chlordécone, et du même andosol ayant reçu 12 kg/ha/an de HCH de 1965 à 1975.

Les paramètres appliqués sont :

pour l'andosol, $K_{oc}(\text{chlordécone}) = 17500 \text{ L/kg}$, $K_{oc}(\text{HCH}) = 1800 \text{ L/kg}$, $\text{SOC} = 6.5 \text{ g/100g}$, $P = 4 \text{ m/an}$
 pour le sol brun-rouille, $K_{oc}(\text{chlordécone}) = 2500 \text{ L/kg}$, $\text{SOC} = 3 \text{ g/100g}$, $P = 2,4 \text{ m/an}$

1.3. Analyse de la cohérence entre les concentrations en chlordécone des eaux de drainages mesurées et simulées (Y.-M. Cabidoche, R. Achard, A. Caron, P. Cattan, J. Sansoulet)

La structure du modèle permet de calculer, en complément de l'évolution des teneurs en chlordécone des sols, l'évolution de la teneur moyenne des eaux de drainage, puisqu'il suppose que **la seule voie de perte est la lixiviation**.

La mesure des concentrations dans des eaux de drainage collectées par des lysimètres à mèche, installés pour d'autres objectifs (lixiviation des éléments majeurs sous bananeraies), a

permis de mettre en cohérence les valeurs expérimentales de teneurs en chlordécone obtenues, et les valeurs calculées par le modèle.

1.3.1. Matériel et méthodes

Hydrologie distributive du couple bananier – sol :

Le bananier, par son architecture, intercepte fortement les pluies intenses du climat tropical, qui se trouve en grande partie restituée de manière concentrée au pied des faux-troncs de la plante (stemflow). Ramenée à la section du faux tronc, cette restitution peut représenter entre 15 et 40 fois la hauteur de pluie incidente (Cattan *et al*, sous presse). Sous le bananier, on peut donc faire l'hypothèse que le drainage « forcé » est considérablement plus élevé que la pluie. Au contraire, à distance des pieds, le reliquat de pluie interceptée arrivant au sol est beaucoup plus faible.

Du point de vue des transferts d'eau dans le sol, cette hétérogénéité des conditions aux limites supérieures devrait se traduire par des régimes extrêmes, différents au pied du bananier et entre les bananiers :

- au pied des bananiers (P) : saturation fréquente des couches superficielles, et prédominance des écoulements préférentiels rapides macroporaux dans un modèle « by-pass » au travers des horizons B (pores tubulaires des anciennes racines profondes observées) : dans ce cas, les concentrations des eaux de drainage à la base du B pourraient refléter directement la désorption de la chlordécone des horizons A.
- sous le feuillage des bananiers (F), faible part des écoulement « by-pass », application d'une lixiviation traversant la microporosité, et d'une possible réadsorption partielle de la chlordécone des eaux de drainage dans l'horizon B : dans ce cas, les concentrations des eaux de drainage refléteraient plutôt le bilan sorption-désorption des horizons B.

Modélisation

Dans le cas P : les teneurs moyennes des eaux en chlordécone sont calculées comme la quantité perdue par année dans la couche 0-30 cm, compte tenu de la teneur des sols, divisée par la lame drainante annuelle.

Dans le cas F : les teneurs moyennes des eaux en chlordécone sont calculées comme la quantité perdue par année dans la couche 30-60 cm, compte tenu de la teneur des sols, divisée par la lame drainante annuelle.

Le cas intermédiaire, mixte (M) entre ces deux fonctionnements caricaturaux peut être décrit par un modèle à compartiment, où l'on considère que les eaux issues de A sont une source pour B, en réitérant le modèle pour l'horizon B.

Lysimétrie

Les lysimètres installés en Guadeloupe et Martinique l'ont été à la même profondeur de 60 cm. Ce sont tous des lysimètres à mèches en fibre de verre, de 50 cm de hauteur, capables de développer une succion de - 5 kPa. La section des lysimètres est de 0.2 m² (carrée) à la Guadeloupe sous andosols (AND, station expérimentale CIRAD-flhor de Neufchâteau, parcelle « Espérance haut », sous bananier) et de 0.16 m² (circulaire) à la Martinique sous sols

andiques sur cendres et ponces (ACP, exploitation Gradis, sous ananas après bananiers) et sols brun-rouille à halloysite (BRH, ex station expérimentale CIRAD-flhor de Rivière Lézarde, parcelle « Ponterre », sous bananiers).

La position des lysimètres a tenu compte des configurations culturales des bananeraies :

- à la Guadeloupe (AND), où les bananiers sont espacés de 2.2 m entre rangs et sur le rang, les lysimètres ont été placés sous les bananiers (B) et dans l'inter-rang (IR)
- à la Martinique (BRH), où le bananier (B) est cultivé en doubles rangs espacés de 80 cm (petit inter-rang PI), séparés par un intervalle de 3.6 m (grand inter-rang GI), trois lysimètres ont été installés sous B, PI, et GI.

Les densités de plantation résultantes sont les mêmes : 2000 pieds/ha

Dans les trois situations (AND, BRH, SCP), les écoulements lysimétriques étaient collectés par des bidons de 25 L, relevés généralement toutes les semaines ou tous les 40 mm de pluviométrie en période pluvieuse.

Les eaux prélevées ont été dosées à l'Institut Pasteur de la Guadeloupe, après filtration. Compte tenu du coût des analyses, nous avons sélectionné des périodes hydrologiquement contrastées, du retour de pluies après périodes sèches jusqu'au cœur de périodes de pluie abondantes.

Eaux de ruissellement :

Elles ont fait l'objet de dosages en Martinique (BRH), sur une placette de 30 x 10 m² isolée hydrauliquement, et pourvue d'un collecteur/partiteur avec fûts de collecte.

Comparaison avec un apport récent d'une molécule organophosphorée :

A la Martinique, compte tenu des programmes en cours, l'évaluation de la lixiviation de la chlordécone a été couplée avec celle d'un apport synchrone d'une molécule organophosphorée, le cadusafos (3 g / pied).

1.3.2. Résultats

• Andosols de Guadeloupe (AND)

L'analyse d'une longue période de recueil d'eaux drainées dans les lysimètres en saison humide modérée (27/7 au 3/11/2004) vérifie le fonctionnement hydrologique complexe d'une bananeraie (Figure 1.3.1).

Les eaux de drainage collectées sous l'inter-rang (IR) représentent seulement 15 à 25 % des eaux collectées sous bananiers (B1, B2).

Sous l'inter-rang, peu lessivé, les concentrations sont constantes, de 0.26 µg/L. En revanche, sous bananiers, les concentrations sont variables. En période de pluies espacées, elles convergent avec celles des eaux collectées dans l'inter-rang. En revanche, en périodes fortement pluvieuses (points espacés), les concentrations atteignent 1 à 1.3 µg/L.

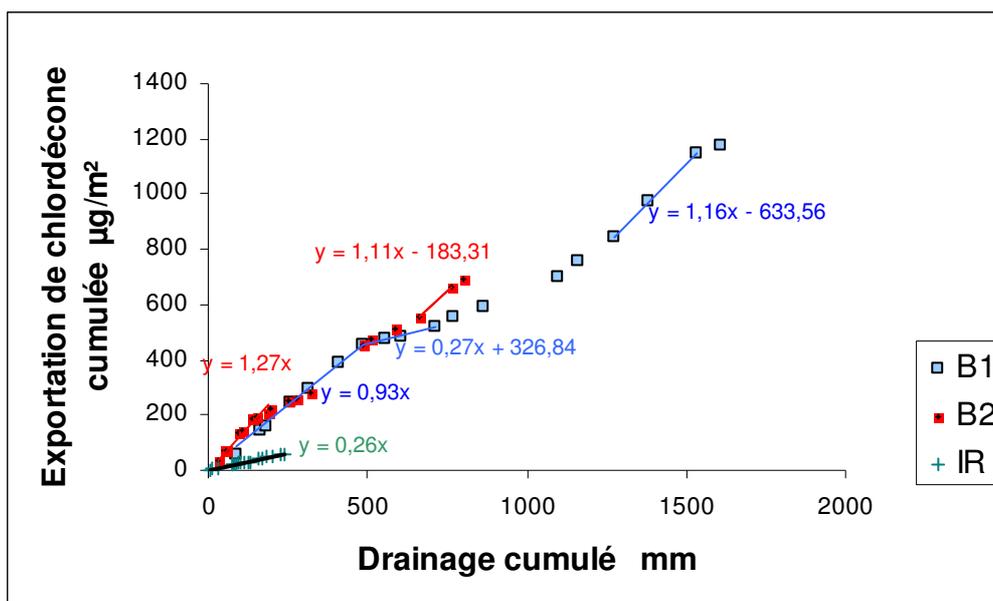


Figure 1.3.1 : Exportation de chlordécone cumulée en fonction du drainage cumulé mesuré sous bananier (B1, B2), et dans l'inter-rang (IR) du 27/7 au 3/11/2004 sur la parcelle d'andosol. (Pluviométrie moyenne 18 mm/j)

Les pentes locales, issues de régressions partielles, sont les concentrations momentanées en chlordécone, en µg/L.

L'année précédente, bénéficiant d'une période humide intense sur un mois (8/9 au 14/10/2003), a montré les mêmes tendances : concentration en début de période de 0,8 µg/L sous le bananier, et de 0,25 µg/L sous l'inter-rang, puis, à l'arrivée des pluies abondantes (27 mm/j pendant 10 jours), une concentration régulière de 2,2 µg/kg sous bananier et de 0,8 sous l'inter-rang.

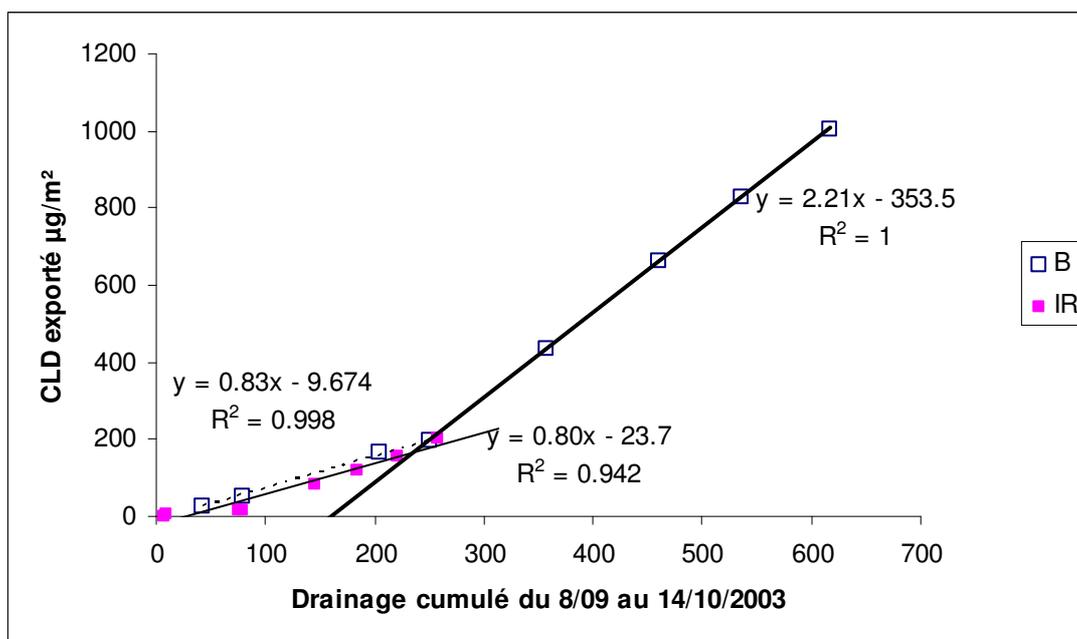


Figure 1.3.2 : Exportation de chlordécone cumulée en fonction du drainage cumulé mesuré sous bananier (B), et dans l'inter-rang (IR) du 8/9 au 14/10/2004 sur la parcelle d'andosol. (Pluviométrie moyenne 10 mm/j, puis 27 mm/j du 4 au 14/10)

- **Sols brun-rouille à halloysite de Martinique (BRH)**

Deux périodes contrastées ont été analysées, une faiblement pluvieuse du 23/11 au 24/12/2004 (pluviométrie moyenne 6 mm/j), une très pluvieuse du 3/6 au 13/6/2005 (pluviométrie moyenne 45 mm/j). La figure 1.3.3 permet d'interpréter les concentrations obtenues. On observe la même tendance, mais beaucoup moins contrastée que sur l'andosol : le lysimètre sous bananier (B) fournit en période peu pluvieuse une concentration de 4 µg/L, qui en période très pluvieuse monte à 6,5 µg/L. Pendant la période très pluvieuse de juin 2005, les volumes drainés sont très importants partout, même si le petit inter-rang (PI) se trouve suralimenté par le cumul des stem-flows du double rang de bananiers. Le grand inter-rang (GI) n'est pas nettement sous-alimenté, se trouvant à la convergence des points d'égouttage des bananiers ayant atteint leur recouvrement maximal. Les concentrations sont alors très voisines, entre 6,5 et 8,5 µg/L quelle que soit la position, et beaucoup plus élevées que dans le cas des andosols où elle plafonnait à 2,2 µg/L. La contamination du sol n'est pourtant que de 0,26 mg/kg ici, contre 4,6 mg/kg dans l'andosol.

Les eaux de ruissellement ont montré une concentration quasi constante et beaucoup plus faible, de 0,45 µg/L en 2004, et de 0,2 µg/L pendant la période très pluvieuse de 2005.

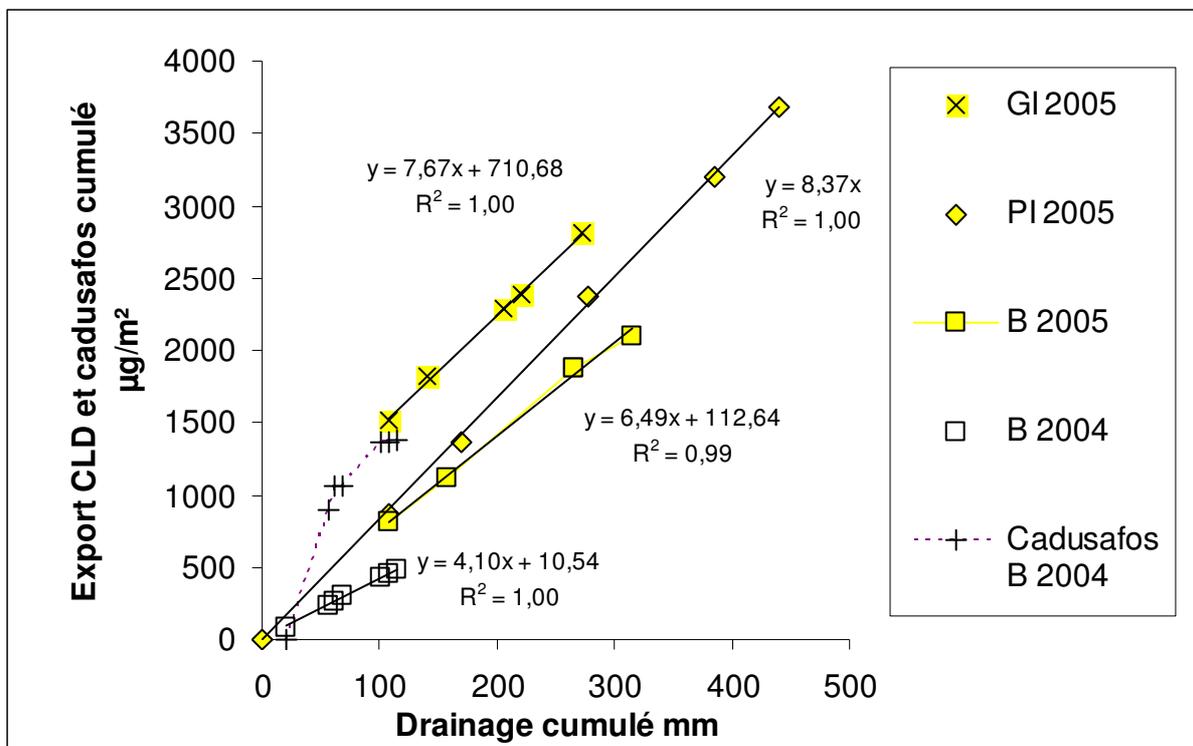


Figure 1.3.3 : Exportation de chlordécone cumulée en fonction du drainage cumulé mesuré sous bananier (B), sous le petit inter-rang (PI), et sous le grand inter-rang (GI) du 23/11 au 24/12/2004 et du 3/6 au 13/6/2005 sur la parcelle de sol brun rouille à halloysite.

Comparaison avec l'élution d'un apport récent de Cadusafos le 23/11/2004

(Pluviométrie moyenne 6.5 mm/j en 2004, 45 mm/j en 2005)

La dynamique d'un apport récent de cadusafos, beaucoup plus soluble, est différente : on observe en drainage un flush d'élution de concentration 25 µg/L sur 10 jours et 62 mm drainés, puis une stabilisation à une lente élution à moins de 1µg/L au bout d'un mois. L'export initial par le ruissellement est préoccupant : 0,1g/m² sont exportés dans les 10

premiers jours, avec des concentrations atteignant 7 mg/L. Les pertes sont ensuite minimes avec des concentrations moyennes de 1,7 µg/L, soit 4000 fois moins.

- **Sols andiques sur cendres et ponces de Martinique (ACP)**

Les eaux recueillies de manière discontinue du 25/11/2004 au 10/03/2005 dans les lysimètres sous bananiers ont montré une teneur moyenne de 0.5 µg/L, avec un maximum de 0.8 µg/L, et les eaux de ruissellement de 0.25 µg/L. La contamination des 30 premiers centimètres du sol sus-jacent était de 1.5 mg/kg.

1.3.3. Discussion

De toute évidence, il n'y a pas de relation entre la contamination des sols et la contamination des eaux de drainage récoltées avec le même type de lysimètre à mèche (Tableau 1.3.1).

Ces trois sols étant de matrice minérale différente (allophane pour AND, halloysite pour BRH, allophane + sables et graviers andésitiques pour ACP), les concentrations en chlordécone des eaux de drainage (moyenne annuelle) calculées par le modèle, tenant compte des Koc apparents des trois sols, ont été confrontées aux valeurs mesurées maximales (Tableau 1.3.1).

			CLD sol (horizon) mg/kg	CLD eau maximale lysimètre µg/L	CLD eau, modèle P µg/L	CLD eau, modèle F µg/L	CLD eau, modèle M µg/L
Ponterre Haut	BRH	Lysi PI	0.26 (A)	8.5	7.5		
Gradis	ACP	Lysi B	1.5 (A)	2.4	5.7		
<i>Gradis Terre fine</i>	<i>ACP</i>	<i>Lysi B</i>	<i>4.3 (A)</i>	<i>2.4</i>	<i>3.5</i>		
Espérance Haut A	AND	Lysi B	4.6 (A)	2.2	3.62		2.74
Espérance Haut B	AND	Lysi IR	0.7 (B)	0.82		0.81	

Tableau 1.3.1 : Teneur en chlordécone des sols (A=0-30 cm) et des eaux, mesurées sur des lysimètres à mèches, et calculées selon le modèle d'éluion selon les trois options de transferts P, F, M

La figure 1.3.4 illustre la bonne cohérence entre les concentrations calculées par le modèle, et mesurées, pour l'andosol (AND), et le sol brun rouille à halloysite (BRH). Pour AND sous bananier, la valeur calculée selon le modèle mixte (AND M) est meilleure que celle calculée selon la seule éluion de la couche de surface (AND P). Pour le même sol, dans l'inter-rang, la valeur calculée selon le modèle F, où l'intégralité des écoulements est issue de l'horizon B sans by-pass, est conforme à la valeur maximale mesurée. Pour BRH, l'abondance des pluies sur la période de mesure des valeurs maximales explique la pertinence du modèle P.

On lève ainsi l'apparente incohérence entre les teneurs en chlordécone des sols et les concentrations des eaux de drainage qui en sortent : les différents Koc obtenus par inversion ne sont pas apparents, mais bien réels. **La conséquence immédiate est qu'un sol brun rouille peu contaminé aujourd'hui, mais doté d'un faible Koc, peut être bien plus contaminant des eaux de drainage qu'un sol très pollué.**

Les sols sur cendres et ponces ont fourni des résultats divergents entre modèle et mesure en première approche (Tableau 1.3.1, Figure 1.3.4). Le biais issu de la prise en compte de la fraction grossière pour l'analyse de la chlordécone, mais non pour le dosage du carbone, qui n'a concerné que la terre fine, a déjà été signalé (tableau 1.2.2). Le modèle a été ré-appliqué en tenant compte de ce biais avec les paramètres suivants :

- 60% de fraction grossière / sol (volumique)
- 65% de fraction grossière / sol (pondéral)
- Koc rétabli à la valeur des andosols, 17500 L/kg
- Affectation de l'excédent de bilan hydrique au lessivage de la seule terre fine
- Affectation de la chlordécone dosée à la seule terre fine

On obtient alors une concentration calculée compatible avec la concentration mesurée sous bananier. La valeur calculée est cependant supérieure, car nous n'avons pu appliquer que l'option P, ne connaissant pas la teneur en chlordécone de l'horizon B.

Cette simulation confirme que les Koc apparents de 4000 à 7000 L/kg des sols sur cendres et ponce n'est qu'un artéfact, les Koc réels de la terre fine étant proches de ceux des andosols, autour de 17500 L/kg. La prise en compte de cette valeur, et l'introduction de charges grossières de 30 à 60 % volumiques aux différentes situations d'andosols sur cendre et ponce permet de rendre égales les valeurs calculées et mesurées.

Le cas des andosols sur cendres et ponces est donc à revisiter, en tenant compte de la fraction grossière ; il est probable que l'on obtiendra des valeurs de Koc proches de celles des andosols évolués, autour de 17500 L/kg.

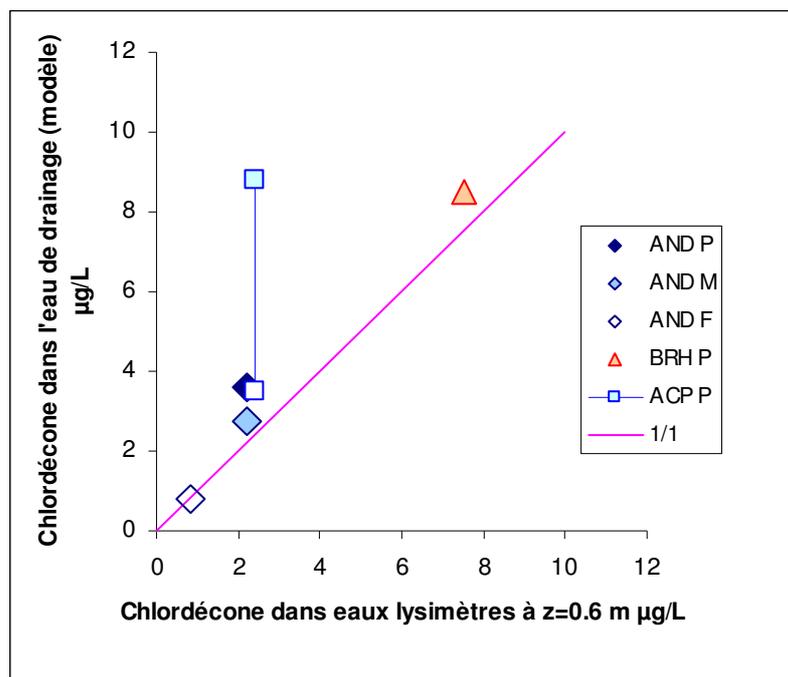


Figure 1.3.4 : Cohérence entre les teneurs en chlordécone des eaux de drainage mesurées en sortie des lysimètres et les teneurs calculées par le modèle d'éluion (Koc du tableau 1.2.2)

Pour le sol sur cendre et ponce, le carré blanc est une valeur corrigée du biais lié à la charge grossière, estimée à 60% volumique et 65% pondérale ; l'excédent de bilan hydrique est affecté à la lixiviation de la seule terre fine, dont la teneur en chlordécone est augmentée en proportion ; la terre fine est affectée d'un Koc de 17500 L/kg

Conclusion de l'étude de la contamination des sols

Dans cette première partie, consacrée au diagnostic de la contamination des sols des Antilles françaises et à l'analyse de ses déterminants, un certain nombre de réponses ont été apportées aux questions posées en introduction.

- **La chlordécone se dégrade-t-elle dans les sols tropicaux volcaniques ?**

La prise en compte de la seule élution par les eaux de drainage dans le modèle de calcul des teneurs actuelles des sols en chlordécone, et la validité du modèle pour les andosols ne fournissent **aucun argument pour laisser supposer une dégradation**. Les teneurs plus faibles enregistrées sur les autres sols, pour les mêmes apports, sont liées à une moindre capacité des autres sols à sorber la chlordécone, avec son corollaire, une élution plus importante par les eaux de drainage.

- **La chlordécone s'est-elle fortement stockée dans les sols ?**

La chlordécone est stockée dans tous les sols en fonction des apports passés, de leur stock organique, de leur Koc, et de l'excédent de bilan hydrique provoquant leur lessivage par les eaux de drainage. Les quantités maximales sont trouvées dans les andosols, qui cumulent des stocks organiques maximaux, un Koc élevé de 17500 L/kg et une vocation bananière ancienne qui a provoqué l'apport régulier de chlordécone entre 1972 et 1993, ces trois facteurs compensant plus que largement leur abondant lessivage. Viennent ensuite les sols ferrallitiques, puis les sols bruns rouille à halloysite dont les Koc et les stocks de matière organique sont plus faibles, ces facteurs étant prédominants sur le moindre lessivage.

Il est à noter que l'évaluation des degrés de contamination par les teneurs pondérales en chlordécone des couches de surface donne une image brouillée par les travaux du sol profonds qui ont pu être appliqués pendant et après les apports : ainsi le stock d'une bananeraie pérenne montrant 15 µg/kg sur 0-30 cm n'est pas supérieur à celui d'une bananeraie labourée à 70 cm montrant 5 µg/kg sur 0-30 cm. L'extension des diagnostics gagerait à se fonder sur l'analyse de deux couches 0-30 et 30-60 cm.

- **Quelles sont les zones les plus polluées ?**

La réponse à cette question est moins simple qu'il n'y paraît : l'évaluation du degré de contamination des sols par leurs teneurs ou leur stock permet le premier classement évoqué ci-dessus, mais la pollution dans ses conséquences fonctionnelles ne suit pas forcément ces teneurs ou stocks : celles-ci passent par la pollution des solutions des sols, que soit pour les contaminations des ressources en eau ou celles des plantes. Or un andosol contaminé à 4,6 mg/kg en 0-30 cm fournit des eaux de drainage 4 fois moins contaminées qu'un sol brun-rouille contaminé à seulement 0,26 mg/kg, soit près de 20 fois moins.

Finalement, on peut considérer, quel que soit le type de sol, que plus les apports de chlordécone cumulés ont été importants, et plus les sols sont pollués.

Réciproquement, **un sol n'ayant jamais reçu de chlordécone n'est pas pollué**, à deux exceptions possibles de faibles contaminations exogènes :

- les talwegs en aval de zones contaminées : des parcelles contaminées ont pu entraîner une légère contamination de zones réceptrices d'écoulements concentrés sur des parcelles d'aval.
- les terrasses ou replats d'émergence de nappes, alimentées par des reliefs ayant supporté des cultures bananières.

Ces considérations amènent à se pencher sur la cartographie du risque de pollution. Compte tenu du coût des analyses systématiques, les approches ont été indirectes, en Guadeloupe comme en Martinique.

En Martinique, la cartographie du risque de pollution (BRGM+CIRAD, 2004) s'est fondée sur les critères croisés suivants :

- occupation bananière pendant les années Képone et Curlone
- types de sols *via* leur teneur en matière organique (décroissante des andosols aux sols brun- rouille puis sols jeunes sur cendres et ponces)
- pluviométrie, sous l'hypothèse que la pression parasitaire du charançon est décroissante avec celle-ci, et que les agriculteurs n'intervenaient en traitant les sols que si la pression parasitaire dépassait un certain seuil.

Cette approche prête le flanc à deux critiques précédemment évoquées (i) le niveau de pollution des différents sols n'est pas à raisonner seulement par rapport à leur contamination, (ii) le troisième critère, pour esthétique qu'il soit, n'est pas forcément pertinent : en témoigne la présence de chlordécone dans des vertisols ne connaissant pas de pression du charançon lors de mises en valeur plus récentes (obligation d'irrigation sur ces sols, qui n'a été praticable qu'au début des années 80). Par ailleurs une troisième objection peut être formulée : des détournements d'usage de la chlordécone sur vergers de *Citrus sp.* ont été attestées à la Martinique.

A la Guadeloupe, la cartographie du risque a été mise en œuvre par le SPV en 2005, sur des critères plus simples :

- présence de cultures bananières avant les années « Képone »,
- au milieu des années « Curlone »,
- trois ans après.

Même si aucune image n'a pu être traitée sur la présence de bananeraies au milieu des années « Képone », cette approche est probablement plus robuste car une seule grande exploitation a été identifiée comme ayant appliqué des apports différenciés en fonction des niveaux d'infestation, et les rares incursions bananières sur des surfaces *a priori* indemnes de charançon ont pourtant subi des apports immédiats de « Curlone ». Par ailleurs, les types de sol n'ont pas été retenus comme critère déterminant, ce qui est conforme à nos conclusions sur les conséquences fonctionnelles équivalentes des pollutions de sols sur celles des eaux.

• Quelles sont les voies de décontamination des sols ?

Aucune voie simple de décontamination n'a malheureusement été identifiée dans le cadre de ce projet.

Les solutions de décapage des couches contaminées sont rendues irréalistes par l'incorporation de la chlordécone sur des profondeurs très importantes dans les bananeraies mécanisées.

La solution de décapage pourrait être envisagée dans les bananeraies pérennes de Guadeloupe, ce sont néanmoins des surfaces marginales ne dépassant pas 200 ha de sols contaminés, et en forte pente, ce qui rend la faisabilité technique discutable.

- **Combien de temps la contamination des sols va-t-elle durer ?**

La robustesse du modèle d'éluion de la chlorécone autorise une extrapolation de l'évolution des teneurs en chlordécone des sols. Malgré les Koc différents associés aux différents types de sol, **l'ordre de grandeur est celui du siècle**. En d'autres termes, il faut intégrer la contamination des sols, sur des pas de temps bien supérieurs à ceux régissant habituellement les politiques agricoles.

Le seul bénéfice que l'on peut attendre des Koc différents correspondants aux différents types de sol est la durée avant d'atteindre des seuils contamination non détectables des sols et des eaux : plus de cinq siècles pour les andosols, peut-être un seul pour les sols brun-rouille. Mais, dans le siècle prochain, les conséquences de la pollution de tous les types de sols sur la contamination des ressources en eau et celle des végétaux cultivés seront à considérer avec la même intensité.

- **Selon quels mécanismes les plantes à organes souterrains récoltés sont elles contaminées ? par diffusion au contact du sol ? ou bien existe-t-il une voie systémique ?**
- **Peut-on envisager une bio-remédiation ?**

Ces deux questions seront discutées dans la deuxième partie.

Bibliographie de la première partie

- Bonvallet N., Dor F., 2004. Insecticides organochlorés aux Antilles: identification des dangers et valeurs toxicologiques de référence (VTR). Etat des connaissances. Institut de veille sanitaire, Paris, 50p.
- Carduner S., Cabidoche Y.-M., 2005. Etat de la dégradation des sols des hauts de Matouba (Saint-Claude, Guadeloupe). Perspectives de pérennisation de l'agriculture. Rapport d'Expertise pour la Région Guadeloupe. INRA-APC, Petit-Bourg, 64 p. + annexes.
- Cattan P., Bussière F., Nouvellon A. (sous presse). Evidence of large rainfall partitioning patterns by banana and impact on surface runoff generation. *Hydrological processes*.
- 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 (1): 38-51.
- 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.
- Colmet-Daage F., Lagache P., 1965. Caractéristiques de quelques groupes de sols dérivés de roches volcaniques aux Antilles françaises. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, III : 2, 91-122.
- Coquet Y., Barriuso E., 2002. Spatial variability of pesticide adsorption within the topsoil of a small agricultural catchment. *Agronomie*. 22, 389-398.
- Dawson, G. W., W. C. Weimer et S. J. Shupe, 1979. Kepone - A case study of a persistent material. *The American Institute of Chemical Engineers (AIChE) Symposium Series 75(190)*: 366-374.
- Feller C., Albrecht A., Blanchart E., Cabidoche Y.M., Chevallier T., Hartmann C., Eschenbrenner V., Larré-Larrouy M.C., Ndandou J.F., 2001.- Soil organic carbon sequestration in tropical areas. General considerations and analysis of some edaphic determinants for Lesser Antilles soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 61, 19-31.
- George S.E., Claxton L.D., 1988. Biotransformation of chlordecone by *Pseudomonas* species. *Xenobiotica*, 18, 4, 407-416.
- Howard P., Michalenko E., Sage G.W., et al, 1981. Handbook of environmental fate and exposure data for organic chemicals. Lewis Publishers, New-York, 110-118.
- Kenaga E. E., 1980. Predicted Bioconcentration Factors and Soil Sorption Coefficients of Pesticides and Other Chemicals. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 4: 26-38.
- Orndorff S.A. and Colwell R.R., 1980. Distribution and characterization of Kepone-resistant bacteria in the aquatic environment. *Appl. environ. Microbiol.*, 39: 611-622.
- 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'Environnement, 155p.
- Perrault M., 2005. Les déterminants des exploitations bananières dans le nord-est de la Basse-Terre (Guadeloupe) : conséquences sur le risque de contamination des sols par la chlordécone. Mémoire de Master « Environnement, milieux, techniques, sociétés », MNHN + INA-PG + Université Paris VII, 40p. + annexes.
- Robin P., 1990. Bilan hydrique des sols : quantification de la variabilité spatiale et de l'incertitude. Thèse de Docteur de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon et de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 21 mai 1990, 141p.
- 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 KNO₃ : from the aggregate to the field experiment. "Volcanic Soil Ressources in Europe", COST Action 622 final meeting, June 4-8 2004, Reykjavik, Iceland (poster). Rala Report. 214: 111-112 (summary).
- 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.
- Topp, E., I. Scheunert, A. Attar et F. Korte, 1986. Factors affecting the uptake of ¹⁴C-labeled organic chemicals by plants from soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 11(2): 219-228.
- Villardebou A., 1973. Le coefficient d'infestation, critère d'évaluation du degré d'attaques des bananeraies par *Comopolites sordidus* Germ. Le charançon noir du bananier. *Fruits* 28 : 6, 417-426.

Deuxième partie :

Une approche de la relation entre la contamination des sols et celle des organes végétaux souterrains récoltés

2.1. Introduction sur l'approche des contaminations relatives plantes/sols

Les Antilles françaises connaissent une situation de pollution chronique des sols par la chlordécone, molécule organochlorée insecticide abondamment appliquée en bananeraies contre le charançon, de 1972 à 1993, année de son interdiction définitive.

La chlordécone appartient à la famille des organochlorés. Les pesticides de cette famille sont considérés comme les plus dangereux (Gulla et *al.*, 2001). De nombreuses études ont montré leur caractère peu dégradable. Les organochlorés se concentrent tout au long de la chaîne alimentaire par bio-accumulation et présentent des risques certains pour la santé humaine. La chlordécone, molécule comportant dix atomes de chlore, présente une très forte affinité pour la matière organique des sols avec un Koc de 17500 L/kg (Kenaga, 1980). De par ses propriétés chimiques, cette molécule présente une faible dégradabilité (U.S. Department of Health and Human Services, 1995) et une bio-dégradabilité inconnue à l'heure actuelle. Enfin cette molécule présente une mobilité dans le sol quasiment nulle (Bonvallot et Dor, 2004) et l'application du modèle d'éluion exposé dans la première partie de ce rapport montre qu'il faudra plusieurs siècles avant que les teneurs de la majorité des sol pollués en Guadeloupe et en Martinique passent sous le seuil de détection actuel (0.001 mg/kg).

A partir de 1999, des contrôles sanitaires effectués sur des sources de captages situés en aval de sol contaminé des zones bananières, on montré l'importance de la pollution des eaux à la chlordécone. Depuis 2002, les contrôles effectués sur les tubercules commercialisés (DCCRF) ou récoltables en vue de commercialisation (DAF-SPV) tant en Guadeloupe qu'en Martinique, ont montré que la contamination des sols peut s'accompagner de la contamination d'organes souterrains végétaux récoltés pour la commercialisation alimentaire.

A l'heure actuelle, les autorités gèrent la "crise chlordécone" en appliquant le principe de précaution. Les arrêtés préfectoraux de 2003 imposent aux agriculteurs de la Guadeloupe et de la Martinique, décidant de mettre en place des cultures à organes souterrains récoltés, l'analyse préalable de la teneur en chlordécone de leur sol, prise en charge par des fonds publics. Si cette analyse s'avère positive, les agriculteurs souhaitant mettre en place leur culture sont tenus de faire la preuve, à leur frais, de la non contamination des organes récoltés pour être autorisés à les commercialiser. Faute de référentiel toxicologique pour l'homme, concernant cette molécule, le seuil de contamination est pour l'instant égal au seuil de détection analytique européen (0,01 mg/kg).

Ces arrêtés préfectoraux mettent en péril plusieurs exploitations agricoles qui ont misé sur la diversification vivrière. A la Guadeloupe, la culture d'igname occupe la 3ème place en surface après la canne et la banane, plus d'un quart des exploitant agricoles la cultive (Defèche, 2004). A la Martinique, la même position est occupée par les cultures de dachine (madère en Guadeloupe, tarot dans le reste du monde francophone). De plus, de nombreuses exploitations agricoles cultivant l'igname et le dachine sont localisées sur des zones contaminées.

Le manque de connaissances sur la toxicité chronique pour l'homme et sur le degré d'exposition des populations antillaises à la chlordécone a conduit la Cellule Inter-Régionale d'Epidémiologie (CIRE) à prendre un certain nombre de mesures afin de gérer au mieux les aspects sanitaires éventuels de cette crise. Des études toxicologiques sont menées par l'INSERM afin de connaître les effets de la chlordécone sur la santé humaine et le degré de contamination de la population Guadeloupéenne.

Dans l'attente du résultat de ces recherches médicales, l'Etat français a saisi l'Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments (AFSSA), pour qu'elle définisse, en collaboration avec l'Institut de Veille Sanitaire (INVS), des limites maximales de résidus (LMR) admissibles pour la chlordécone dans les denrées. Le rapport de l'AFSSA (2005), remis en août 2005, a proposé, en suivant une démarche agréée par l'OMS croisant les valeurs toxicologiques de référence (VTR) et les régimes alimentaires décrits par une enquête de la CIRE réalisée en Martinique, des limites maximales provisoires de résidu (LMP) à deux niveaux :

- une LMP à 50µg/kg de poids frais, affectant les **légumes « racines » fortement contributifs au régime alimentaire martiniquais (dachine, igname, patate douce, carotte)**. Cette limite correspond à la teneur maximale en chlordécone que peut contenir un aliment pour être considéré comme non dangereux pour la santé humaine. A ce seuil ont été associés par précaution d'autres aliments fortement contributifs au régime alimentaire des populations, bien qu'aucune alerte sérieuse de contamination n'ait été relevée : le concombre, le melon, les tomates et la chair de poulet.
- une LMP à 200µg/kg de poids frais, affectant les autres denrées moins contributives au régime alimentaire.

Les recherches menées dans le cadre du projet ici rapporté ont donc privilégié une première approche des relations existant entre la contamination des « légumes racines », et celle des sols par la chlordécone.

Il s'agit d'une recherche effectuée dans l'urgence de la crise environnementale, agricole et sanitaire de la pollution des sols des Antilles par la chlordécone, dans laquelle nous avons recherché le meilleur compromis entre l'acquisition de connaissances sur un champ de résultats bibliographiques désert, la fourniture de référentiels, et la proposition de suggestions opérationnelles pour la gestion de la crise.

Le travail a été notamment orienté vers la définition d'un outil de prévision de risque de contamination des « légumes racines », fondé sur l'hypothèse d'une relation entre la contamination de ces derniers, et celle, mesurable *ex ante*, des sols. Il s'agissait de préparer un « assouplissement » des arrêtés préfectoraux drastiques, pris par précaution, lorsque les LMP de l'AFSSA, supposées définir des seuils notablement plus élevés que les seuils de détection, auraient été connues.

Les recherches ont donc été organisées en trois groupes :

- Des essais en conditions contrôlées, sur sol présumé homogénéisé, permettant de préciser la validité de l'hypothèse de contamination des « racines » par contact avec le sol : les modèles patate douce et igname ont été retenus.
- Des essais et suivis en parcelles agricoles, permettant de préciser, via des échantillonnages adaptés, l'existence de relations entre la contamination des sols et celle des « racines » en condition de culture *in situ* ; à cette occasion a été testée la faisabilité de cultures « en créneaux », consistant à décaper localement la couche

superficielle la plus contaminée pour diminuer la charge contaminante proposée aux « racines »

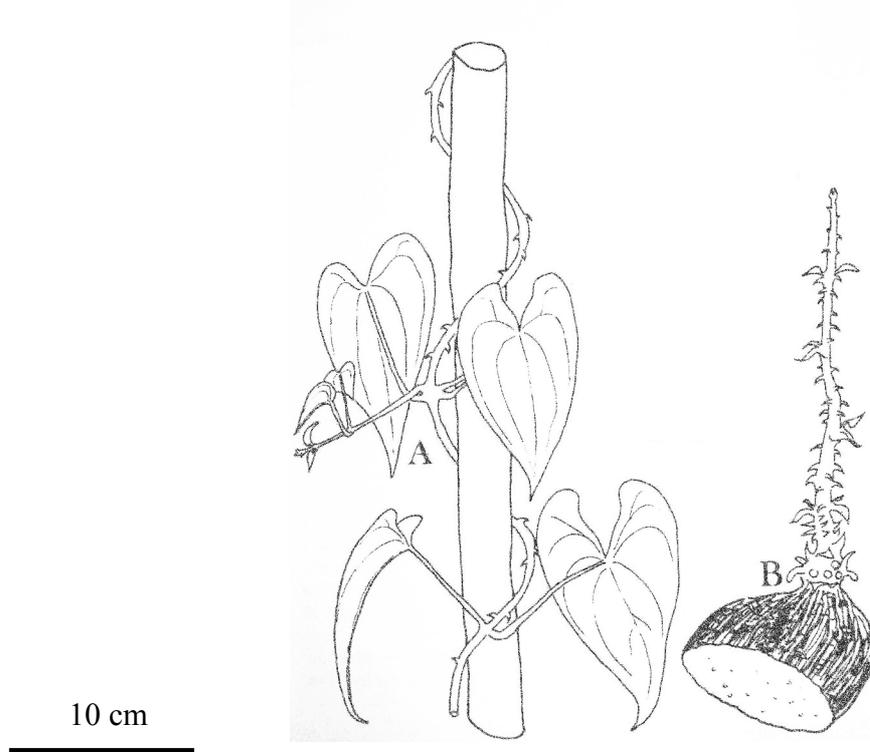
- Une réflexion globale sur les contaminations relatives « racines »/sols mesurées, pour proposer un modèle unifié de contamination par diffusion fondé sur des facteurs de forme et de temps de contact des organes souterrains récoltés.
- La traduction de ce modèle, cohérent avec les valeurs mesurées, en outil de gestion du risque, en définissant des teneurs maximales des sols en chlordécone garantissant le non dépassement des LMP produites par l'AFSSA.

Une des difficultés majeures rencontrées a été l'incohérence de certaines données antérieurement obtenues concernant les relations plantes/sol dans le cadre des plans de surveillance, explicable notamment par la fourniture de « faux positifs » ou de « faux négatifs » par certains laboratoires. Après validation croisée des résultats fournis par le LDA26 (Laboratoire départemental de la Drôme, accrédité COFRAC pour la plupart des pesticides dans les végétaux) et par le GIRPA (Angers), les deux seuls à avoir fourni des réponses analytiques cohérentes mais non identiques, nous avons décidé de n'exposer ici que les données fournies, dans le cadre d'une convention, par le LDA26.

Le protocole analytique du LDA26 n'a pas été fourni sous forme de mode opératoire, mais les étapes essentielles nous ont été précisées :

- extraction par solvant alcane (hexane)
- extraction à la soude de la chlordécone-hydrate à $pH > 11$
- acidification pour retransformer la chlordécone – hydrate en chlordécone
- dosage par CPG/MS/MS

2.2. Etude sous serre de l'absorption de la chlordécone par l'igname *Dioscorea cayenensis* « Grosse caille » cultivée sur sol ferrallitique contaminé (Y.-M Cabidoche, A. Laffont)



L'igname *Dioscorea cayenensis* cv Grosse Caille (Dessin de C.-M. Messiaen, 1975)

2.2.1. Introduction

Le but de cette partie est de préciser les voies d'absorption de la chlordécone par l'igname.

Nous nous proposons de vérifier dans une première expérience si il y a un transfert de la chlordécone entre les plants de semences et les tubercules récoltés. Pour cela nous avons planté des semenceaux contaminés en chlordécone sur un sol non contaminé.

Dans une seconde expérience nous voulons vérifier si les tubercules d'ignames absorbent la chlordécone présente dans le sol par leur système racinaire. Nous avons planté des semenceaux non contaminés par la chlordécone dans du sol sain (afin d'éliminer la possibilité d'absorption de la chlordécone par simple diffusion à travers le tubercule-fils), isolé d'un sol périphérique, contaminé par la chlordécone, dans lequel va se développer le système racinaire du plant d'igname.

Cet expérimentation a été possible grâce au partenariat de la DAF-SPV Guadeloupe, et de l'Union des Producteurs de la Filière Igname de Guadeloupe (UPROFIG).

2.2.2. Matériels et méthodes

2.2.2.1. Les ignames

2.2.2.1.1. Ignames contaminées

Tous les plants de semences de l'espèce *D. cayenensis* (Grosse caille) ont été fournis par l'UPROFIG.

Les plants contaminés provenaient de la parcelle de Mr Minatchy à Capesterre Belle Eau. La teneur du sol en chlordécone était de 17.4 mg/kg pour la couche de sol 0-30 cm et de 16.6 mg/kg pour la couche de sol 30-50 cm. La distribution de la chlordécone dans les tubercules d'ignames contaminées a été supposée radiale. Chaque plant de semence a donc subi une coupe sagittale, une partie étant utilisée pour mesurer la teneur de l'igname en chlordécone, l'autre partie a été plantée dans des pots de 15 litres contenant du sol ferrallitique indemne de toute contamination au chlordécone. Le poids moyen des semenceaux est de 0.5 kg.

2.2.2.1.2. Ignames non contaminées

Les plants de semences sains proviennent d'une parcelle dont le sol et les tubercules ont respectivement une teneur en chlordécone de 0 mg/kg.

2.2.2.2. Sols

Nous avons utilisé du sol ferrallitique à halloysite humidifié à la capacité au champ, homogénéisé et tamisé à 10 mm.

2.2.2.2.1. Sol contaminé

Nous avons prélevé du sol de la couche 0-30 cm sur la parcelle CLD++ (voir chapitre 2.5.2) dont la teneur moyenne du sol en chlordécone était de 1.68 mg/kg.

2.2.2.2.2. Sol non contaminé

Nous avons prélevé du sol ferrallitique de la couche 0-30 cm sur le site de l'INRA Duclos dont la teneur du sol en chlordécone est de 0 mg/kg. Ses caractéristiques analytiques sont identiques à celles de la parcelle CLD++ (Tableau 2.2)

2.2.2.3. Mise en place de l'expérimentation en pot

Les pots ont été placés sous une serre pourvue d'une ombrière à 75% recevant l'eau de pluie. Nous avons appliqué 5g d'engrais (N:P:K = 19:9:28) à la surface de chaque pot au début des expériences. Les ignames ont été tuteurées au bout de 45 jours. Les plantes ont reçu l'eau de pluie et un arrosage automatique a été ajouté en période de sécheresse. Nous avons mesuré la teneur en chlordécone des végétaux et du sol présent dans les pots. Toutes les analyses ont été effectuées par le LDA 26.

2.2.2.3.1. Expérience 1 : Tubercules contaminés sur sol sain

Nous avons planté 6 semenceaux contaminés dans 6 pots de 20 litres remplis de sol sains.

N° de plant	chlordécone semenceau en mg/kgPF
1	0.005
2	0.005
3	0.006
4	0.006
5	0.007
6	0.010

Tableau 3.1 : Teneur en chlordécone en mg/kg de poids frais des plants contaminés.

A la fin de l'expérience (8 mois après plantation) la teneur des tubercules en chlordécone pour chaque répétition a été déterminée, ainsi que leurs dimensions et leurs poids.

2.2.2.3.2. *Expérience 2 : Tubercules sains sur sol contaminé*

Cette expérience doit nous permettre de vérifier si le transfert du chlordécone du sol vers le tubercule se fait via le système racinaire ou par contact direct avec le tubercule. Nous avons planté 10 plants de semences de l'espèce *D. cayenensis* dans 10 pots de 15 litres contenant du sol sain ($[CLD]_{sol} = 0\text{mg/kg}$), fournissant 10 répétitions. Ces pots ont eux mêmes été placés ensuite dans des pots de 170 litres remplis de sol contaminé avec en surface une couche de sol sain (Figure 3.1).

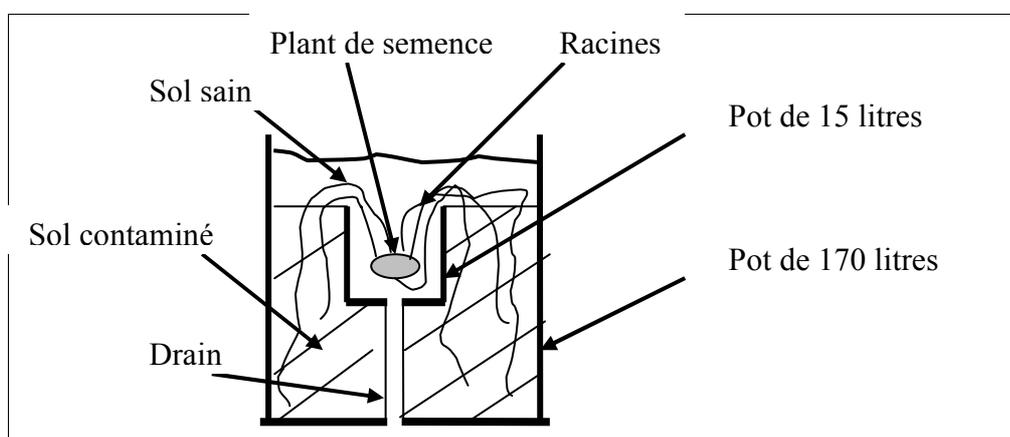


Figure 3.1 : Schéma du dispositif expérimental de test de la contamination des tubercules d'ignames par contact ou par voie racinaire

Les pots de 15 litres étaient en fer galvanisé. Ils ont été pourvus de drains permettant d'évacuer l'eau présente dans le sol sain et d'éviter un transfert des molécules de la chlordécone par ascension capillaire.

Deux témoins ont été introduits, pour lesquels les deux récipients emboîtés ont été remplis avec du sol contaminé.

A la fin de l'expérience (8 mois après plantation) ont été déterminés, pour chaque répétition, la teneur des tubercules en chlordécone, leurs dimensions et leurs poids. Le sol a été prélevé au contact des tubercules, sur une épaisseur de 1 à 2 cm.

2.2.3. Résultats

2.2.3.1. Expérience 1 : semenceaux contaminés sur sol sain

La plantation de semenceaux contaminés sur du sol sain a permis d'obtenir des tubercules fils non significativement contaminés à l'échelle des tubercules entiers. Les cortex des tubercules fils montrent cependant des contaminations, de 1 à 2 $\mu\text{g}/\text{kg}$, inférieures au seuil de quantification du LDA26.

Le sol, initialement sain, montre une contamination décelable à la fin de l'expérience, entre 10 et 20 $\mu\text{g}/\text{kg}$.

2.2.3.2. Expérience 2 : développement des tubercules dans du sol sain, système racinaire de la période végétative développé en sol contaminé

Les tubercules fils obtenus sont très peu contaminés, par rapport aux mêmes ignames dont le système racinaire et les tubercules se sont développés en sol contaminé (Figure 3.2). Pour ces derniers, les contaminations relatives plante/sol sont de 0,022 à 0,028.

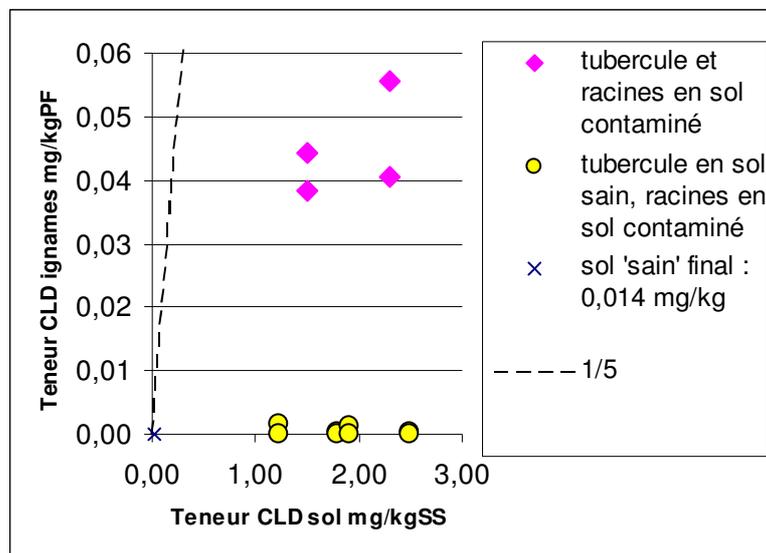


Figure 3.2 : Comparaison des contaminations des tubercules d'ignames *D. cayenensis* développés dans du sol sain ou contaminé, avec un système racinaire initial développé en sol contaminé dans un dispositif « split-root »

Les teneurs maximales en chlordécone enregistrées dans les tubercules fils développés dans le sol indemne sont de 1 $\mu\text{g}/\text{kg}$, à la limite de quantification. Dans le détail, les teneurs dans les cortex des parties hautes sont quantifiables pour les 6 ignames, et atteignent 6 $\mu\text{g}/\text{kg}$, tandis que les cortex des parties basses et les pulpes ne montrent pas de contamination significative.

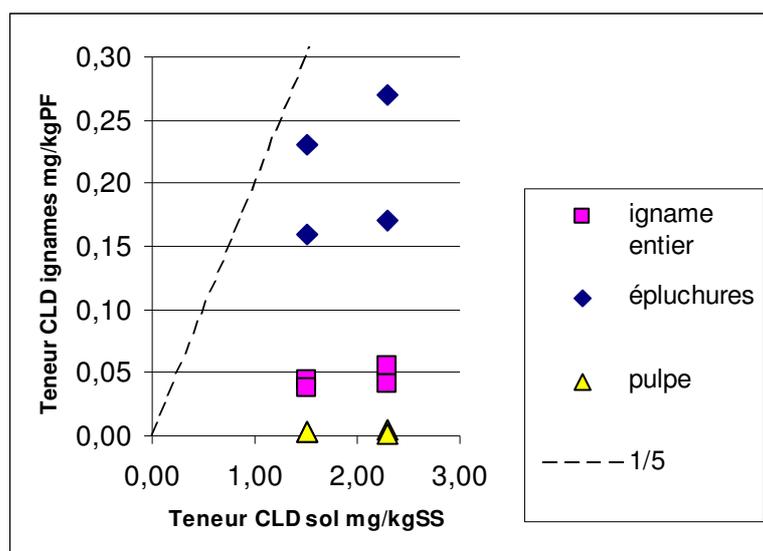


Figure 3.3 : Contamination des ignames entières, épluchures et pulpes, lorsque système racinaire et tubercules se développent dans du sol contaminé.

Ces résultats sont en tout cas très différents de ceux obtenus lorsque systèmes racinaires et tubercules se développent sur sols contaminés (Figure 3.3).

Le sol initialement sain dans lequel se sont développés les tubercules, montre une contamination finale décelable de 14 $\mu\text{g}/\text{kg}$.

2.2.4. Discussion

L'expérience 1 montre que la contamination des tubercules fils issus de semenceaux contaminés, développés dans du sol sain, est très faible. Cependant, le sol, initialement sain, se trouve en fin de cycle doté d'une contamination décelable. Sans qu'une relation quantitative n'ait pu être établie, il semble que la sénescence, puis l'incorporation des résidus des semenceaux, pourtant faiblement contaminés entre 5 et 10 $\mu\text{g}/\text{kgPF}$ ait été susceptible de contaminer les sols au contact des tubercules fils, au-delà de 10 $\mu\text{g}/\text{kg}$. En quantité, les semenceaux ont pu apporter de 2.5 à 5 μg de chlordécone, qui distribués dans les 250 g de terre prélevée au contact des ignames, permettent d'obtenir les teneurs enregistrées dans les sols en fin de cycle. Si l'on tient un raisonnement parallèle, à l'échelle de la parcelle, 2 tonnes de semenceaux à l'hectare, fortement contaminés à 100 $\mu\text{g}/\text{kg}$, apportent 200 mg de chlordécone dans les 20 cm labourés, soit 2000 tonnes de sol : au bout de 10 ans de plantation chaque année, on pourrait alors doser 1 $\mu\text{g}/\text{kg}$ de sol.

Cette valeur de contamination des sols indemnes par des semenceaux est faible, mais suffisante pour que l'on ne préconise pas de faire des régions fortement contaminées des régions de production de semenceaux d'ignames. Par ailleurs, le transfert de semenceaux des régions contaminées vers les régions n'ayant jamais reçu d'apports de chlordécone contribue probablement à la détection de traces de chlordécone dans les régions cartographiées comme à risque de contamination très faible. En Grande-Terre de Guadeloupe, en particulier, les parcelles anciennes d'igname peuvent montrer des contaminations quantifiables, car elles cumulent deux risques passés :

- le transfert de semenceaux de zones contaminées,

- **l'application de Mirex, dont la chlordécone est un produit de « dégradation », car le premier ravageur des ignames était - et est toujours - la fourmi-manioc, contre laquelle ce produit était appliqué.**

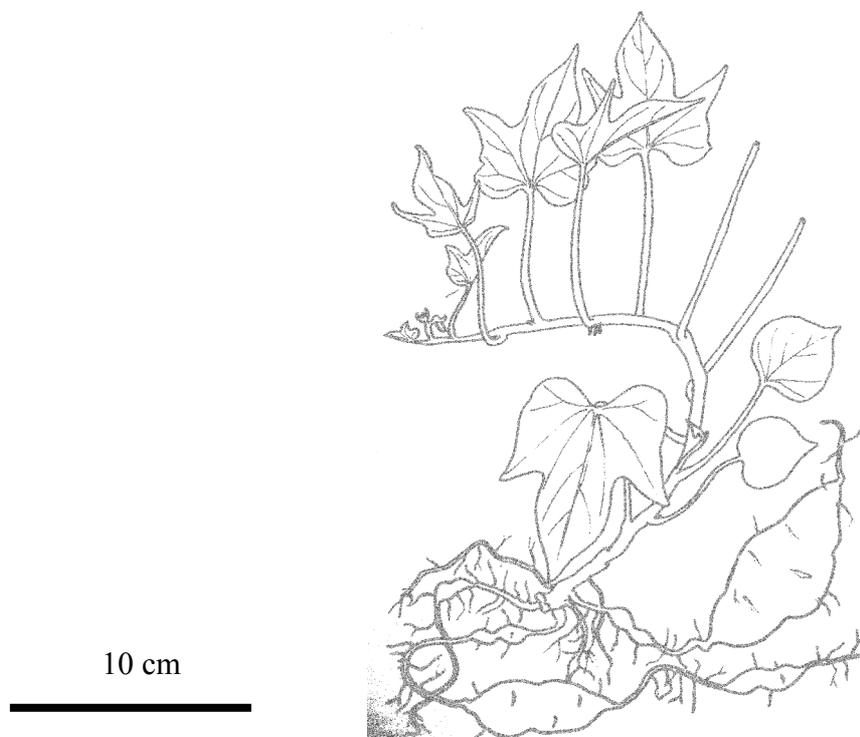
L'expérience 2 vient étayer une hypothèse forte de la discussion des résultats d'essais de cultures en créneaux : **dans le cas de l'igname *Discorea cayensis*, la contamination s'opère essentiellement par diffusion au contact du tubercule au moment de sa formation.**

Un tel schéma de contamination pose question sur la physiologie de la plante : la contamination inévitable du système racinaire principal ne semble pas contaminer le système foliaire distant, qui est ensuite la source d'un transfert d'assimilats extrêmement vigoureux au moment de la formation-remplissage des tubercules. Les cortex des parties hautes des tubercules montrent une contamination quantifiable. Ces cortex sont les plus précocement formés, et les plus proches du système racinaire principal. Cependant, les teneurs observées dans ces cortex (6 µg/kgPF au maximum) sont sans commune mesure avec les teneurs en chlordécone obtenues sur les cortex au contact de sol contaminé (160 à 270 µg/kgPF).

Ces résultats obtenus sur l'igname seront extrapolables en première approche à l'ensemble des organes souterrains de réserve : la diffusion au contact du sol est la voie principale de contamination, la voie systémique restant marginale. En conséquence, les cortex sont nettement plus contaminés que les pulpes, dont le remplissage amylicé est rapide à partir d'un transfert d'assimilats depuis les parties aériennes. Les combinaisons d'effets des facteurs de forme et du temps de remplissage, exposés au paragraphe 2.4.3. sont cohérentes avec ce schéma.

On notera enfin que malgré le tamisage centimétrique et l'homogénéisation du sol contaminé effectuée avant le remplissage des pots, les teneurs finales en chlordécone des sols conservent une dispersion notable, avec un coefficient de variation de 27%. L'incertitude analytique relative de 25% est ici aggravée par une homogénéisation incomplète : **la configuration de la chlordécone en copeaux adsorbés entraîne des difficultés expérimentales inhabituelles.**

2.3. Etude sous serre de l'absorption de la chlordécone par la patate douce *Ipomoea batatas* cultivée sur andosol et sol brun-rouille à halloysite contaminés (R. Achard)



La patate douce *Ipomoea batatas* (Dessin de C.-M. Messiaen, 1975)

2.3.1. Introduction

Dans le cadre de diagnostics effectués sur les parcelles de production des agriculteurs, les cultures de dachine (= madère) et de patate douce n'ont jamais montré de relation lisible entre teneur du sol en chlordécone et contamination des tubercules. Ceci indique que d'autres facteurs pourraient interagir, notamment :

- la variabilité spatiale de la teneur en chlordécone du sol sur les parcelles, malgré un échantillonnage composite multipoints,
- la nature du sol,
- les conditions climatiques et techniques de culture en relation avec les localités et les pratiques.

Pour explorer ces hypothèses, une expérimentation en pot sous serre a été réalisée. L'objectif était de hiérarchiser l'incidence de la teneur du sol en chlordécone, du type de sol, mais aussi celle du régime hydrique sur la teneur résultante dans les tubercules et racines. Les cultures en pots, sur sols homogénéisés, devaient permettre de contourner la question de la variabilité spatiale supra-métrique de la teneur des sols en chlordécone, rencontrée au champ. La

biodisponibilité a été approchée par défaut en considérant que les différences non expliquées par les facteurs précédents en relèvent.

Cette étude en pot a été réalisée sur patate douce plutôt que sur dachine (= madère) car son cycle est plus court (contrainte de calendrier du projet) mais aussi parce que les informations obtenues par enquêtes de terrain étaient très fragmentaires.

2.3.2. Matériel et méthodes

2.3.2.1. Hypothèse de travail

Les hypothèses sont que sur sol pollué par de la chlordécone le transfert vers la patate douce est lié :

- au type de sol,
- à la teneur du sol en chlordécone,
- au régime hydrique.

2.3.2.2. Choix des sols pour l'expérimentation

Deux types de sols ont été choisis, en complément des sols ferrallitiques expérimentés dans la deuxième partie (carte des sols ORSTOM, Colmet-Daage, 1969):

- des andosols sur cendres et ponces du nord de la Martinique situés en périphérie de la Montagne Pelée sur la côte au vent (région de Morne Rouge, Ajoupa Bouillon, Morne Capot),
- des sols brun-rouille à halloysite situés à basse altitude dans le centre de la Martinique et la côte atlantique (région St Joseph-Lamentin et Marigot).

Pour chaque type de sol, les parcelles ont été choisies pour couvrir au mieux la gamme de teneurs des sols en chlordécone rencontrée en Martinique (Tableau 1):

- sur andosols sur cendre et ponces : 0,5 à 11,5 mg/kg,
- sur sol brun-rouille à halloysite : 0,5 à 2,9 mg/kg.

Echantillons de sol	Teneur en chlordécone (mg/kg)
Andosols	
Serre Sol A12 Pot 28	0.5
Serre Sol A9 Pot 25	0.53
Serre Sol A1 Pots 1, 2, 3, 4	0.7
Serre Sol A2 Pots 5, 6	0.8
Serre Sol A13 Pot 29	1
Serre Sol A7 Pot 23	1.3
Serre Sol A10 Pot 26	1.4
Serre Sol A11 Pot 27	1.4
Serre Sol A6 Pots 17, 18, 19	2.3
Serre Sol A4 Pot 12	2.6
Serre Sol A8 Pot 24	3.4
Serre Sol A3 Pots 8, 9, 10, 11	3.6
Serre Sol A5 Pots 13, 14, 16	7.2
Serre Sol A14 Pot 30	11.5

Sol Brun rouille à halloysite	
Serre Sol BR3 Pot 32	0.21
Serre Sol BR4 Pot 33	0.33
Serre Sol BR1 Pots 20, 21, 22	1.4
Serre Sol BR2 Pot 31	2.9

Tableau 3.1 : Teneurs en chlordécone des sols prélevés et homogénéisés pour la culture de patate douce en pots sous serre

Les sols sont issus prioritairement de parcelles pour lesquelles nous avons déjà eu des données de transfert sol-plantes sur dachines. Des parcelles ayant un autre usage (banane principalement) s'ajoutent pour les gammes de teneurs non disponibles dans les situations précédentes. Un témoin sans chlordécone constitué de substrat de culture à base de tourbe importée a été ajouté à la collection comme témoin.

Environ 30 kg de sol par pot ont été prélevés sur chaque parcelle, à la pelle, dans l'horizon 0-30cm. Afin que la teneur du sol prélevée ne s'écarte pas trop de la valeur moyenne de la parcelle, le prélèvement a été réalisé sur douze points dans la parcelle. Le sol a ensuite été séché à température ambiante, tamisé afin d'éliminer la fraction graveleuse, puis soigneusement mélangé.

2.3.2.3. Mise en pot de la terre, plantation des patates douces, conduite de la culture

La terre tamisée a été conditionnée dans les pots de 20 litres. Pour éviter toute contamination entre sols, les manipulations de sol ont été réalisées avec des gants vinyles jetables, les instruments et contenants après lavage ont été rincés avec de l'eau indemne de chlordécone. Les implants de patates douces (morceaux de liane de 10 cm environ) ont été prélevés sur une parcelle indemne de chlordécone à Ajoupa Bouillon. Trois lianes de patate douce par pot ont été plantées le 02/09/05.

Les pots ont été disposés de façon randomisée sur les tables de cultures. Le bas du pot a été placé sur une coupelle à l'envers afin d'éviter une stagnation de l'eau dans les pots et tout contact direct du pot avec les eaux de drainage reçues par la table de culture.

Lors du développement des patates douces, dans un premier temps les lianes ont été maintenues dans le pot en les enroulant à son bord (lianes en contact avec le sol qui s'enracinent partiellement), puis la croissance des lianes a été contenue sur le côté du pot au bord de la table en évitant tout contact avec la table de culture.

Une semaine après plantation il a été apporté 10g/pot d'engrais 15.4.28, puis 50g/pot un mois après.

2.3.2.4. Gestion de l'irrigation

Pour la reprise des lianes, des irrigations de 8 minutes trois fois par jour ont été appliquées (8h00, 14h00, 18H00).

Par la suite l'irrigation a été gérée sur la même base horaire avec un ajustement des durées d'irrigation sur la base de l'évolution de la tension d'eau mesuré dans le sol :

- pour l'ensemble des pots menés avec une irrigation « normale », trois tensiomètres permettaient de moduler les durées d'irrigation pour que la tension d'eau dans le sol des pots ne descende pas en dessous de -120 mbar,
- pour les trois pots menés avec une irrigation « faible » à partir de un mois après plantation, l'irrigation était régulée de façon à ce que la tension d'eau dans le sol des pots soit supérieure ou égale à 400 mbar (uniquement pour les sols A1, A3, A12, un seul pot par sol).

L'eau d'irrigation est l'eau potable distribuée sur le site du PRAM (respectant en principe la limite maximale de résidu de l'eau potable de 0,1 µg/l).

2.3.2.5. Récolte et préparation des patates douces pour l'analyse

La récolte de la culture a eu lieu le 15/12/2005. Le calibre des patates douces obtenues n'était pas tout à fait conforme au calibre commercial du fait d'une récolte un peu trop précoce (la culture aurait dû être conduite sur environ 120 jours). Néanmoins, une production de 200 à 500g de patate douce par pot a été obtenue. Les quantités récoltées comprenaient donc des patates douces de calibre normal en mélange avec des patates de faible calibre.

Les patates douces ont été lavées à la récolte dans de l'eau potable changée pour chaque pot, le récipient étant soigneusement lavé à chaque fois. Avant conditionnement pour l'expédition au laboratoire d'analyse, les cicatrices de chaque patate ont été recoupées (celles-ci pouvant être souillées par de la terre), la peau soigneusement relavée et rincée avec de l'eau exempte de chlordécone, puis essuyée à l'aide d'un papier absorbant. Les patates douces ont ensuite été conditionnées dans un sachet pour expédition directe au laboratoire par fret aérien.

2.3.3. Résultats

2.3.3.1. Traitement des données par rapport à la limite de détection et du résultat sur sol témoin

La limite de quantification du laboratoire LDA26 pour l'analyse du chlordécone dans les végétaux est de 1µg/kgPF. En fait, aucun échantillon de végétal ne se situe au-dessous de la limite de quantification, le problème du traitement numérique d'échantillons inférieur à ce seuil ne s'est donc pas posé.

En préalable à l'analyse des données, nous notons que malgré les précautions prises pour éviter toute contamination entre pots, l'analyse des patates douces issues du pot témoin indemne de chlordécone a néanmoins révélé une contamination de 4µg/kg juste au-dessus de la limite de détection (1µg/kg). L'origine de cette contamination est difficilement explicable, même si elle est probablement à mettre en relation avec la forte volubilité de cette plante en cours de culture.

Cependant, cette valeur ne correspond qu'à un très faible bruit de fond au regard des niveaux de contaminations obtenues par ailleurs sur les sols pollués testés. Par la suite, les résultats exposés seront corrigés de ce léger biais, en retranchant des teneurs dosées celle du témoin.

2.3.3.2. Relation entre la contamination des patates douces par la chlordécone et celle des sols

Sur chacun des quatre niveaux de contamination des sols, les répétitions montrent une variabilité de la contamination des tubercules :

- la variabilité des teneurs des tubercules entre pots est de l'ordre de 50% (Tableau 2),
- la variabilité ne semble pas s'accroître en pourcentage (mais augmente en valeur absolue) avec le niveau de pollution du sol ou de contamination de la plante.

	Teneur du sol en chlordécone (mg/kg)	Teneur moyenne des tubercules en chlordécone (µg/kg)	
		Irrigation normale (3rép.) (C.V. %)	Irrigation faible (1rép.)
Sols Brun-Rouille à Halloysite			
Serre Sol BR1	1.4	45 (10%)	
Andosols			
Serre Sol A1	0.7	13 (70%)	7
Serre Sol A2	0.8	11 (64%)	
Serre Sol A6	2.3	21 (52%)	
Serre Sol A4	3.6	50 (31%)	38
Serre Sol A5	7.2	103 (50%)	60

Tableau 2 : Variabilité de la contamination des tubercules de patate pour un même sol.

Même en conditions contrôlées, après homogénéisation du sol, l'efficacité de contamination des plantes par le sol est affectée d'une forte variabilité. La configuration de la chlordécone sorbée en « copeaux » complique dans cette expérimentation la lisibilité des résultats.

Sur la totalité de l'échantillon, la contamination de la patate douce est très significativement corrélée à la teneur en chlordécone du sol, néanmoins une forte dispersion du nuage est présente puisque la part de la variance expliquée par la teneur du sol en chlordécone n'est que d'environ 49%.

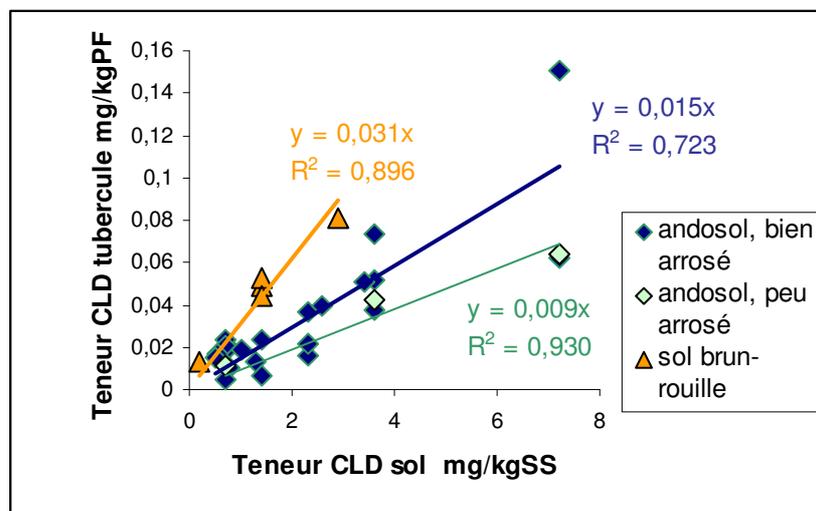


Figure 3.1 : Incidence de la teneur en chlordécone du sol, du type de sol et du régime hydrique sur la contamination de patates douces

En réalisant une interprétation par type de sol, la relation obtenue apparaît de meilleure qualité (Figure 3.1) :

- sur andosol la qualité de la relation devient meilleure avec $R^2=0,72$.
- sur sol brun-rouille à halloysite, bien que le nombre de points soit faible, la contamination des patates douces semble rester proportionnelle à la teneur sol, et l'efficacité de contamination semble plus forte que sur andosol.

Les trois pots d'andosols où a été testée l'incidence d'un rationnement en eau, ont montré une contamination plantes systématiquement moins importante que la contamination moyenne observée sur les pots normalement irrigués. Néanmoins, l'écart est modeste et reste dans la gamme de variabilité de réponse constatée avec une irrigation normale : les potentiels ont pu descendre aussi bas, aux environs de certaines patates superficielles, que dans les pots rationnés. L'incidence de ce facteur n'est donc pas formellement démontrée par la présente expérimentation et devra être tranchée ultérieurement par une approche spécifique et un nombre plus important de répétitions.

2.3.4. Discussion

En conditions contrôlées au sein d'un type de sol, malgré une variabilité des réponses des plantes qui reste présente, la teneur du sol en chlordécone explique la majorité de la contamination des patates douces. **Cela confirme donc bien que la teneur du sol en chlordécone est un indicateur de premier ordre du risque de contamination des plantes.** Si cela n'est pas forcément lisible au champ chez les producteurs, c'est que d'autres facteurs interférents ou interagissent avec cette variable.

Les contaminations relatives plantes/sols relevées sur les sols bruns pour les patates douces, et sur les sols ferrallitiques sont analogues, entre 0.02 et 0.03. **Comme cela a été montré pour l'igname, on peut donc estimer en première approche que le mécanisme de contamination de la patate douce est essentiellement la diffusion au contact du tubercule.**

L'effet du type de sol a pu être montré : le transfert de chlordécone vers la plante sur sols brun-rouille apparaît plus important que sur andosols. Il se dégage donc une réciprocity entre les capacités de rétention et de relargage, conforme à la gradation des Koc apparents des différents types de sols qui se dégageait de l'inversion du modèle de rétention (partie 1) : une moindre rétention sur un sol par la matrice organo-minérale se traduit en retour par un plus fort relargage vers les eaux et les végétaux.

L'effet du régime hydrique n'a pas été formellement identifié dans cette expérimentation du fait d'un dispositif privilégiant la mise en évidence de l'effet de la teneur du sol en chlordécone et du type de sol, cette hypothèse reste néanmoins réaliste. De ce fait, des effets saisonniers sur les risques seraient alors possibles.

La confrontation des résultats en pots en milieu contrôlé et des données d'enquêtes sur patate douce sur sols brun-rouille à halloysite (Figure 3.2) montre réponse équivalente pour les faibles teneurs des sols en chlordécone, et une moindre réponse au champ pour fortes teneurs. Ce résultat pourrait provenir de la collecte des patates en parcelles durant une période sèche, défavorable aux transferts de chlordécone vers les plantes.

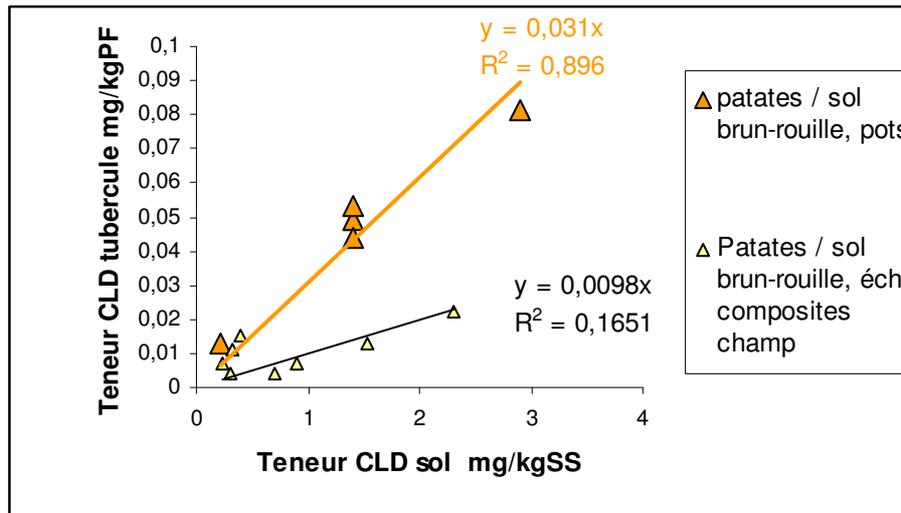


Figure 3.2 : Comparaison des contaminations des patates douces par des sols brun-rouille contaminés, en pots et au champ (enquête régionale)

Cette expérimentation a permis de valider, sur la contamination des patates douces :

- l'incidence de la teneur du sol en chlordécone,
- l'importance du type de sol, et probablement au-delà de la nature de sa matrice organo-minérale,
- l'incidence probable du régime hydrique, mais moindre que celle des facteurs précédents.

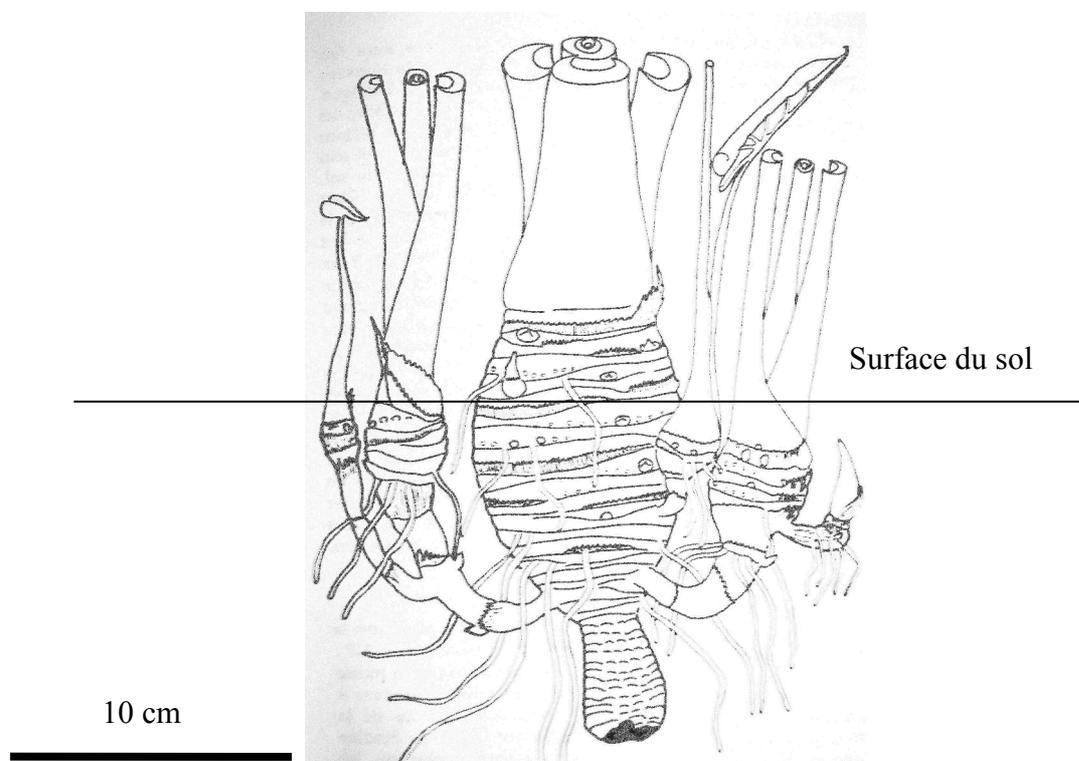
Il en résulte pour la gestion du risque de pollution :

- qu'il est justifié de chercher à gérer le risque de contamination des cultures alimentaires à organes souterrains récoltés au travers d'une détermination préalable, avant culture, de la teneur du sol en chlordécone, mais que le référentiel de gestion du risque doit aussi intégrer le type de sol dont l'incidence est tout aussi déterminante,
- qu'après avoir discerné les parcelles à faible risque de contamination, une identification des variables de milieu ou des facteurs techniques susceptibles d'influer sur le transfert du sol vers les plantes pourrait aussi contribuer à limiter encore le risque et le niveau de contamination des cultures.

Pour cela, deux aspects, non formellement démontré, sont à retravailler :

- l'incidence du régime hydrique et donc du climat,
- l'incidence du travail du sol, des configurations de plantation (trous, billons, sillons...) et, le cas échéant, de l'irrigation, qui contribuent à établir le régime hydrique au contact des tubercules, bulbes ou racines.

2.4. Analyse des contaminations relatives en chlordécone de bulbes de dachines (ou madères) *Colocasia antiquorum* et d'un andosol (R. Achard)



Le dachine (ou madère) *Colocasia antiquorum* : parties souterraines
(Dessin de C.-M. Messiaen, 1975)

2.4.1. Introduction

Parmi les plantes alimentaires à organes souterrains récoltés, les dachines ont une importance primordiale dans la diète des habitants des régions humides de la Martinique ; cependant, cette plante est aussi notablement consommée dans le sud de la Guadeloupe sous le nom de « madère ». C'est la raison pour laquelle nous avons cherché à affiner la relation de contamination sol-plante au champ.

Le dachine (ou madère, ou tarot) est une Aracée, du genre *Colocasia*. Il forme des bulbes souterrains en forme générale de toupie dont la croissance se fait en hélice, **vers le haut**. Celle-ci dure de 9 à 12 mois, les bulbes récoltés pesant généralement de 0,7 à 1,5 kg, pour des hauteurs et largeurs d'ordre de grandeur décimétrique.

2.4.2. Matériel et méthodes

2.4.2.1. Choix de la parcelle

La parcelle choisie, sur andosol sur cendre et ponces, présentait un niveau de contamination par la chlordécone relativement élevé (3,6 mg/kg de sol) et une contamination des dachines avérée en 2004, avec une variabilité à la fois des teneurs des sols et de celles des plantes.

2.4.2.2. Mise en place de l'expérimentation

Avant culture, la parcelle a subi un labour avec des disques et un billonnage (billons d'environ 40 cm de haut). La parcelle a été plantée mi-juillet 2004, avec des semenceaux de dachines issues de parcelles indemnes de chlordécone sur quatre micro-parcelles (environ 50m²) réparties au sein de la parcelle. Chaque semenceau a été planté au fond d'un trou d'environ 10 cm de diamètre, le trou n'étant pas rebouché après mise en terre.

2.4.2.3. Récolte des dachines et préparation des échantillons

Les dachines ont été récoltées en mai 2005 ; le calibre était faible (1 kg en moyenne) mais correspondait néanmoins à un bulbe commercial. Le faible rendement est probablement à mettre sur le compte d'une plantation décalée par rapport à des dates de plantation traditionnelles plus précoces. Le bulbe s'est développé en partie en période sèche ce qui est défavorable à une bonne croissance.

Trois plantes sur chaque micro-parcelle ont été prélevées individuellement. Les dachines ont été lavés et brossés à l'arrivée au laboratoire à l'eau courante ; les feuilles vivantes et les restes de feuilles sénescents ont été enlevés. Avant constitution des échantillons pour analyse, toute trace de terre a été soigneusement enlevée et les bulbes ont été rincés avec de l'eau exempte de chlordécone, puis séchés à l'aide de papier absorbant.

Les dachines récoltés individuellement ont ensuite été coupés en 4 quartiers verticaux puis de nouveau en 2 à la moitié de la hauteur du bulbe. Un fin secteur a ensuite été prélevé sur chaque morceau pour constituer un échantillon composite du bulbe. On obtient ainsi à partir d'un bulbe quatre demi quartiers bas d'environ 120g chacun, et quatre demi quartiers hauts, d'environ 100g, et un échantillon composite d'environ 120g.

Les échantillons composites correspondant à chaque plante prélevée ont été expédiés directement au laboratoire d'analyse par fret aérien. Les demi-quartiers ont été conservés au congélateur. Ceux correspondant aux six dachines qui ont été choisis pour une analyse détaillée, ont été congelés, puis envoyés pour analyse au LDA26 par fret aérien express, en glacière avec 20Kg de carboglace.

2.4.2.4. Echantillonnage du sol

L'objectif était d'analyser le sol présent à proximité immédiate du dachine. En pratique, il a été difficile de récolter seulement les quelques centimètres de sol en contact avec le dachine. En fait, il a été collecté l'équivalent d'une épaisseur de 5cm de sol autour de chaque quartier des bulbes, de 0 à 10 cm (au contact de la zone haute bulbe et à une partie du sol de surface) et de 10 à 20cm (au contact de la zone basse du bulbe). Selon la position du quartier, l'échantillon de terre est référencé H pour le côté orienté vers le haut de la parcelle, puis par rapport à celui-ci, B pour la position aval et D et G pour respectivement les côtés droit et

gauche en regardant vers le haut. Parallèlement, une carotte de sol de 5 cm de diamètre a été prélevée à proximité des zones de prélèvement D et B (Figure 4.1).

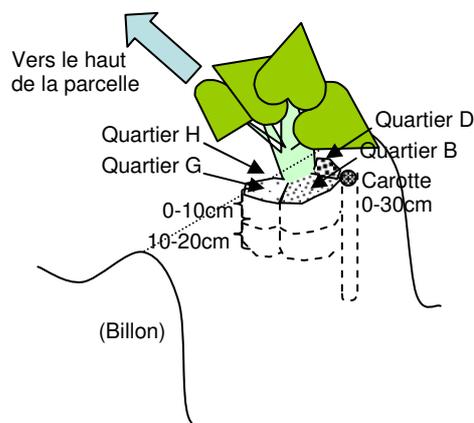


Figure 4.1 : Représentation de l'échantillonnage du sol autour d'un pied de dachine

2.4.3. Résultats

2.4.3.1. Niveau et variabilité des teneurs en chlordécone du sol à proximité des 6 dachines étudiés

Les valeurs obtenues à proximité des parties de dachines analysées sont relativement similaires et sont bien corrélées à la valeur d'une carotte sur 0-30 cm prélevée immédiatement en contact de la zone prélevée (Tableau 4.1, Figure 4.1). Cela indique que la pollution est distribuée de façon plutôt homogène dans l'horizon 0-30cm. L'application, pour chaque cycle, et depuis plusieurs années, d'un labour à disques et d'un sillonnage est probablement responsable de cette relative homogénéisation.

Teneur sol en chlordécone (mg/kg)	Dachines correspondants					
	D3	D4	D7	D9	D10	D11
Carotte 0-30 cm	2.3	1.9	4	5	3.5	5
Moyenne proximité 0-10cm	2.0	1.9	4.8	4.2	3.3	4.0
Moyenne proximité 10-20cm	2.1	2.0	4.6	4.3	3.0	4.1
Moyenne proximité 0-20cm	1.9	1.8	5.1	4.2	3.6	3.8
Ecart type proximité	0.38	0.19	0.61	0.25	0.57	0.47

Tableau 4.1 : Variabilité des teneurs en chlordécone des sols à proximité des dachines

La variabilité des teneurs du sol à l'échelle locale pour un volume de 5x10x10cm, soit environ 0,5 dm³, apparaît globalement faible, l'écart type des teneurs du sol à proximité des dachines représente 5 à 25% de la teneur du sol. Les teneurs moyennes des 10 cm supérieurs de sol au contact des dachines s'inscrivent dans l'intervalle de confiance 2.86 à 3.79 mg/kg, celles des 10 cm inférieurs dans l'intervalle 2.88 à 3.90 mg/kg, identique. L'intervalle 3.12 à 4.12 mg/kg, dans lequel s'inscrit la moyenne des teneurs des carottages 0-30 cm, n'est pas

significativement différent. Les valeurs plus élevées pourraient résulter d'un retournement du profil de chlordécone consécutif à un ancien labour profond.

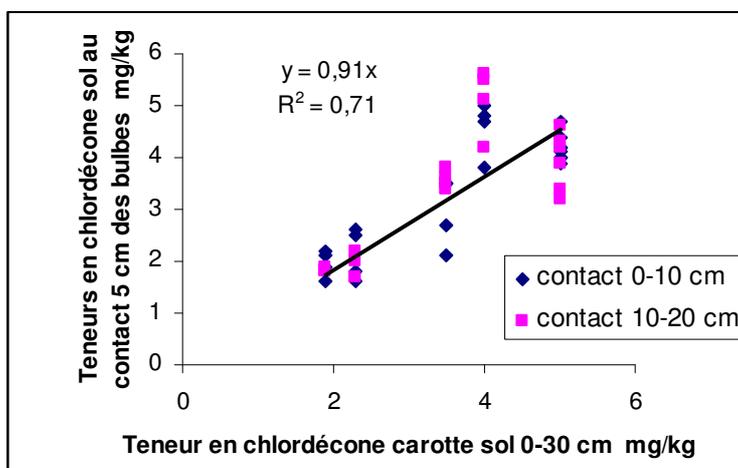


Figure 4.1 : Relation entre teneur des sols en chlordécone sur carottages 0-30cm (Ø 5cm) distants de 10 cm des pieds, et sur des volumes de 5x10x10cm au contact des bulbes

Par ailleurs, il est relevé que la gamme des teneurs des sols analysés sur cette série (1.7 à 5.5 mg/kg), n'est pas conforme à celle obtenue lors des analyses réalisées sur les mêmes zones de la parcelles en 2004 (0.7 à 2.4 mg/kg, tableau 4.2).

(mg/kg)	Dachines analysés					
Teneur sol en chlordécone 2006	D3	D4	D7	D9	D10	D11
Carotte 0-30 cm	2.3	1.9	4	5	3.5	5
Teneur / zone équivalente 2004	H6		I12	D18		
Carotte 0-30 cm	0.74		1.4	2.4		

Tableau 4.2 : Comparaison des teneurs en chlordécone obtenues sur carottages 0-30 cm sur la même zone, en 2004 et 2005

2.4.3.2. Niveau et variabilité des teneurs intra-plante des 6 dachines étudiés

Comme pour le sol, il est relevé un important écart entre les teneurs obtenues sur échantillons moyens analysés antérieurement pour identifier les dachines retenus pour une analyse plus détaillée et les moyennes de teneurs obtenues sur les huit morceaux analysés plus récemment. Ces différences peuvent s'expliquer partiellement par des importances relatives des cortex et pulpes différentes selon les échantillons. Néanmoins, ces faibles différences d'échantillonnage semblent difficilement pouvoir expliquer des différences supérieures à 100%.

Teneur plante en CLD ($\mu\text{g}/\text{kgPF}$)	D3	D4	D7	D9	D10	D11*
Ech.moyen initial	15	5	17	11	8	14
(réf. analyse initiale)	719074	719094	719075	719088	719099	719093
Analyses sur 4 quartiers/plante						
Moyenne 0-10cm (sommet bulbe)	3.8	1.6	non dispo.	non dispo.	<1	3.3
Moyenne 10-20cm (base bulbe)	61	35.0	94.0	52.5	45.8	67.5
Moyenne 0-20cm (bulbe entier)	32.5	18.3	-	-	22.9	40.0

Tableau 3 : Comparaison des teneurs en chlordécone des échantillons composites initiaux et des quartiers pour les mêmes bulbes de dachines

Un fort gradient de teneur en chlordécone est observé à l'intérieur de la plante : les parties basses sont assez fortement touchées, tandis que les parties hautes, sans être systématiquement indemnes, sont très faiblement touchées. La corrélation partie haute/basse est pratiquement inexistante ($R^2=0,06$). Sur deux morceaux adjacents, il est même observé dans la partie basse une teneur de plus de $100\mu\text{g}/\text{kg}$, alors que dans la partie haute la teneur en chlordécone est inférieure au seuil de détection. Ceci indique que la chlordécone serait très peu redistribuée au sein du bulbe.

Il en ressort que les parties basses des dachines, qui sont les plus fortement et les plus anciennement en contact avec le sol, sont les parties les plus contaminées par la chlordécone. Les moitiés hautes ne le sont pratiquement pas.

2.4.3.3. Relation entre teneur des portions de bulbe et teneur du sol à proximité

Pour les demi-quartiers du bas du dachine, la corrélation entre teneurs des sols en chlordécone et teneurs des plantes est globalement médiocre ($R^2=0,03$). Deux sous populations s'individualisent, qui ne sont pas à relier à un effet individuel de plante (Figure 4.2). Tout se passe comme si environ 50% des demi-quartiers avaient été fortement contaminés par les sols en proximité, les autres n'étant que très faiblement influencés par les niveaux de teneurs du sol à proximité.

L'interprétation suivante peut être proposée :

- pour le premier groupe, le bulbe aurait été fortement influencé par le chlordécone dosé dans le sol en proximité, la relation ainsi obtenue étant relativement étroite ($R^2=0,80$),
- pour le second groupe, la contamination du morceau de dachine est beaucoup plus faible et moins bien corrélée à la teneur du sol analysé à proximité.

Cette différence de comportement ne peut s'expliquer que par une relation de proximité entre les morceaux de dachines à forte teneur de résidus et teneur du sol à proximité. A l'inverse pour les morceaux faiblement contaminés, l'absence de proximité entre le chlordécone du sol et le bulbe aurait entraîné qu'un faible transfert vers cette partie de la plante.

La variabilité du transfert pourrait s'expliquer par un transfert à courte distance de la chlordécone dans les tissus du bulbe.

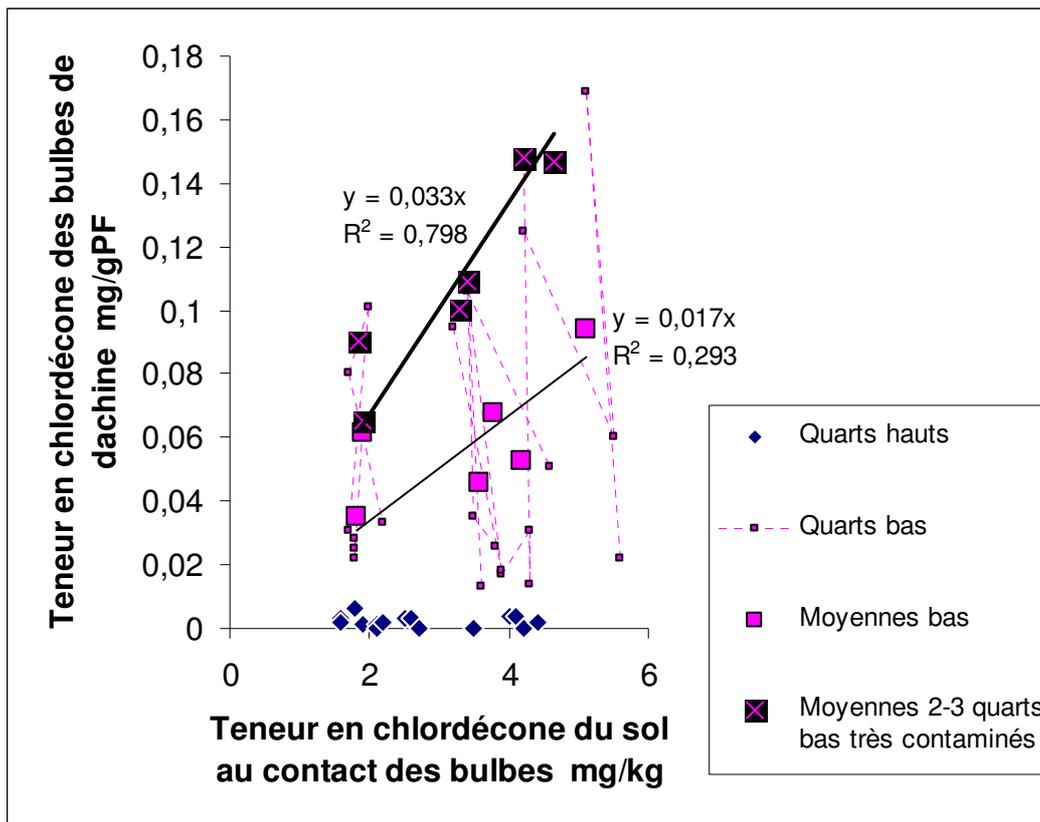


Figure 4.2 : Relation entre les teneurs en chlordécone des bulbes de dachine et celles des sols au contact, prélevés sur 5 cm d'épaisseur

La quasi absence de contamination des hauts de bulbes indique à la fois que les transferts à partir du sol au contact sont faibles, tout comme la diffusion du bas vers le haut des bulbes. La diffusion de la chlordécone du sol vers le haut du bulbe est minime pour trois raisons :

- les dachines sont plantés dans des trous qui se rebouchent lentement, et partiellement e
- la partie haute du bulbe est protégée du sol par la base des pétioles des feuilles,
- cette partie est la plus tardivement formée, le temps de contact est donc plus faible.

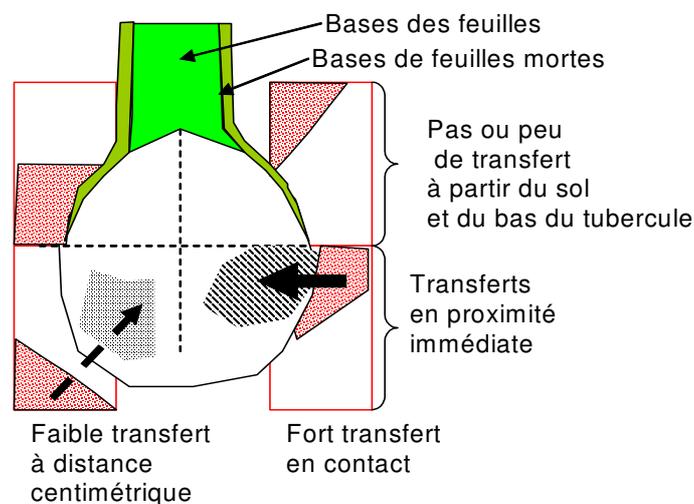


Figure 4.3 : Représentation schématique des modes de transferts probables de chlordécone vers le bulbe du dachine

La très faible contamination des parties hautes conforte donc l'hypothèse d'un transfert du chlordécone essentiellement par contamination de proximité avec le sol (Figure 4.3).

Cette relation pourrait se formaliser au niveau du sol sous la forme présence/absence de chlordécone (loi binomiale ou hypergéométrique) dans des volumes plus petits que le volume analysé (cubes de 2,5 cm de côté par exemple) et avec coefficient de transfert vers la plante au contact. Cette formalisation ne serait pas contradictoire avec une distribution normale des teneurs dans les sols pour des prélèvements sur l'horizon 0-30cm, puisque, pour un nombre suffisant de volumes élémentaires, la distribution des fréquences tend vers celle d'une loi normale.

2.5. Etude au champ de l'absorption de la chlordécone par différentes espèces de végétaux, test d'une technique de décapage local de la couche de sol la plus contaminée (Y.-M. Cabidoche, A. Laffont).

2.5.1. Introduction

Le but de cette expérience est d'étudier la dynamique d'absorption de la chlordécone du sol vers les organes souterrains et aériens de différentes espèces tout en testant la mise en place d'une pratique culturale innovante: "la culture en créneaux". Elle se base sur les hypothèses suivantes :

- La couche superficielle de sol (Horizon A <30 cm) est plus contaminée que la couche sous-jacente (Horizon B) ; le décapage localisé de la première offrira au racines et tubercules se formant dans la seconde un moindre risque de contamination.
- Le développement des végétaux ne sera convenable dans les horizons B, peu fertiles, que si les racines puisent latéralement des nutriments dans l'horizon A contaminé, sans pour autant transporter de chlordécone susceptible de contaminer racines et tubercules de réserve.

Nous avons travaillé sur deux parcelles qui se distinguent principalement par leur degré de contamination du sol (faible et moyenne) en chlordécone. Sur chaque parcelle, nous avons planté plusieurs végétaux à organes souterrains récoltés couramment cultivés en Guadeloupe.

Sous l'hypothèse que le transfert de la chlordécone, molécule extrêmement hydrophobe, du sol vers les tubercules ou racines, se fait majoritairement par diffusion au contact direct du sol vers l'intérieur de ces derniers, nous avons profité de la disponibilité de quatre niveaux de contamination de sol (2 parcelles x Horizon A ou B), pour analyser la contamination de différentes plantes à organes souterrains récoltés, différant par la forme et la taille de ces derniers tout comme par la longueur du cycle de culture.

L'igname *Dioscorea cayenensis* « Grosse Caille » a été notamment introduite dans cet essai, car c'est un tubercule très consommé à la Guadeloupe, bien plus que le dachine étudié dans la partie précédente à la Martinique. Contrairement à ce dernier, la croissance des tubercules de l'igname, qui peuvent atteindre plusieurs kilogrammes de poids et plusieurs décimètres de long, se fait **vers le bas**.

Cet expérimentation a été possible grâce au partenariat de la DAF-SPV Guadeloupe, et de l'Union des Producteurs de la Filière Igname de Guadeloupe (UPROFIG).

2.5.2. Matériels et méthodes

2.5.2.1. Parcelles étudiées

Nous avons choisi deux parcelles qui diffèrent entre elles, principalement, par leur teneur en chlordécone dans le sol exprimée en mg/kg de sol sec. Elles s'appuient sur le **même type de sol, ferrallitique à halloysite et oxi-hydroxides de fer, acide**.

2.5.2.1.1. Parcelle Réla ou CLD++

Cette parcelle est située sur l'exploitation de Monsieur Réla Léon à « Four à chaux » dans la commune de Capesterre Belle-Eau (X = 61°32'54'' ; Y = 16°06'18'' ; Z = 55 m). La pluviométrie moyenne annuelle est de 3000 mm. La teneur moyenne en chlordécone est de 1.68 mg/kg pour la couche de sol 0-30 cm (horizon A) et de 1.09 mg/kg pour la couche de sol 30-50 cm (horizon B). En 2003, le propriétaire a planté de l'igname et en 2004 la parcelle a été mise en jachère.

2.5.2.1.2. Parcelle Racel ou CLD+

Cette parcelle est située sur l'exploitation de Monsieur Racel Eddy à Mon Repos dans la commune de Capesterre Belle-Eau (X = 61°32'58'' ; Y = 16°05'36'' ; Z = 90 m). La pluviométrie moyenne annuelle est de 3100 mm. La teneur moyenne en chlordécone est de 0.40 mg/kg pour la couche de sol 0-30 cm et de 0.26 mg/kg pour la couche de sol 30-50 cm. En 2003, le propriétaire a planté de l'igname et en 2004 de l'ananas.

2.5.2.2. Mise en place de l'essai

Le même protocole est appliqué aux deux parcelles. On se propose de mesurer l'accumulation du chlordécone dans différents organes souterrains (tubercules et racines).

2.5.2.2.1. Espèces étudiées

Sur chacune des parcelles nous avons planté quatre espèces différentes :

- L'igname (*Dioscorea cayenensis*) de la variété « Grosse Caille » :
Date plantation: 13/01/05; Date de récolte: 14/10/05
- La patate douce (*Ipomoea batatas*) variété 181 :
Date plantation: 13/01/05; Dates de récolte: 13/05/2005, 20/06/05, 03/08/05
- Le radis (*Raphanus sativus*) :
Date plantation: 13/01/05; Dates de récolte: 17/02/05, 25/02/05, 03/03/05
- Le navet (*Brassica napus*) :
Date plantation: 31/05/05; Dates de récolte: 27/07/05, 01/09/05

2.5.2.2.2. Plan de l'expérience

Chaque parcelle a une surface carrée de 225 m² (15 m x 15 m). Les créneaux, parallèles et dans le sens de la pente, ont été confectionnés avec une mini-pelleteuse. L'horizon A, excavé sur 30 cm, a été disposé en billons, deux billons A et A' séparant deux créneaux B (Figure 2.1). Les créneaux ont été décompactés par un griffage complémentaire sur 25 cm. Pour compenser la faible fertilité des horizons B, et le risque de toxicité aluminique en CLD+, les segments de la zone griffée destinés à recevoir des ignames ont reçu un apport de compost, un apport de calcaire broyé et un apport de cendres de bagasse de canne à sucre à l'équivalent parcelle respectivement de 12.5, 6 et 4 tonnes par hectare de créneaux. Les horizons B étant susceptibles d'érosion par ruissellement concentré, une tranchée de pente 2% a été creusée en tête de chaque parcelle, pour intercepter le ruissellement d'amont et le disperser sur des bandes enherbées latérales aux parcelles.

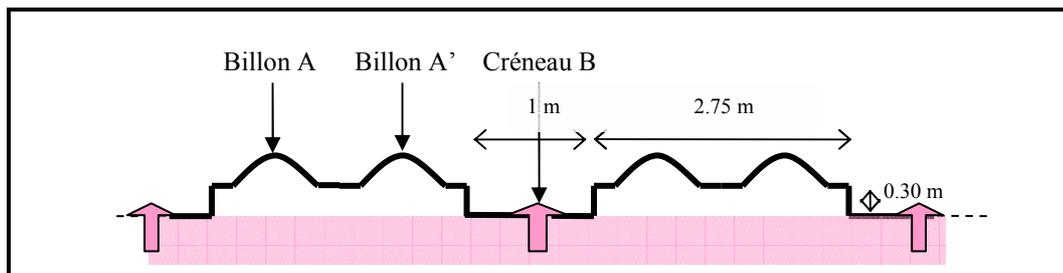


Figure 2.1: coupe verticale transversale de la parcelle expérimentale.



Photo 2.1 (A. Laffont) : segments plantés en igname « Grosse Caille », navet, patate douce dans un créneau ; segments plantés en patate douce et igname sur billon de droite ; patate douce en couverture sur billon de gauche

Nous avons planté chacune des espèces précédentes sur les billons A et créneaux B. Au total on dispose de 3 billons A et 3 créneaux B parallèles, orientés dans le sens de la pente et séparés par des billons A' sur lesquels ont été plantées des patates douces en couverture. La longueur des billons et créneaux est de 15 m et la largeur de 1 m.

Sur chaque billon A et créneau B, ont été installés un segment planté en igname (8 tubercules), un segment en patate douce (5 tubercules), et un segment où l'on a semé successivement (photo 2.1) des radis puis des navets. Les segments étaient espacés de 1,5 m. Les ignames et patates douces étaient espacées de 50 cm environ.

Chaque espèce était installée sur 3 segments de billon A et 3 segments de créneau B. Ces segments étaient disposés de manière occuper les 3 positions possibles : haut, milieu et bas de la parcelle. Le schéma du plan d'expérience est en annexe 1.

2.5.2.2.3. Teneur moyenne du sol en chlordécone des deux parcelles

Nous avons mesuré la teneur du sol en chlordécone en 9 points sur 2 profondeurs : 0-30 et 30-50 cm. Les 9 points sont disposés en carré (3*3) et espacés en moyenne de 3 mètres afin de couvrir l'ensemble de la parcelle (annexe 1).

Les échantillons de sol ont été prélevés à l'aide d'une tarière de 6 cm de diamètre. On prélève 5 carottes de sol tous les 10 cm allant de 0 à 50 cm. Ces 5 carottes ont été rassemblées en 2 échantillons composites : le premier a regroupé les 3 carottes 0-10, 10-20 et 20-30 cm, le second les 2 carottes 30-40 et 40-50 cm. Pour homogénéiser ces échantillons, le sachet, gonflé, a été brassé pendant une minute environ.

Les sols ont été conservés au réfrigérateur (4°C), sans avoir été séchés ni tamisés, puis envoyés par courrier express au laboratoire d'analyse.

2.5.2.2.4. C, N, pH eau, pH KCl, CEC Metson, Ca, Mg, K, Al échangeables

Nous avons mesuré sur les mêmes échantillons différents paramètres agronomiques selon les protocoles AFNOR : Carbone organique total, Azote total, pH_{eau}, pH_{KCl}, Capacité d'Echange Cationique Metson, Ca, Mg, K, Al échangeables.

2.5.2.3. Suivi des parcelles

2.5.2.3.1. Engrais, herbicides, amendements minéraux et organique

Trois semaines avant plantation, de l'herbicide Basta (25cc/20L d'eau/parcelle), sur chaque parcelle a été pulvérisé. 6,25 t/ha de calcaire broyé, 12,5 t/ha de compost et 4 t/ha de cendre de bagasse ont été épandus au fond des créneaux destinés à être plantés en ignames, les billons recevant 16 t/ha d'engrais (N:P:K = 19:9:28). Lorsque c'était nécessaire, de l'herbicide Basta (25 cc/20L d'eau) a été pulvérisé autour des parcelles. En cours de culture, les parcelles ont été désherbées manuellement, tous les 15 jours. Les navets, attaqués par des moucheron, ont reçu une application de l'insecticide systémique Ultracide (1.5cc/L d'eau).

2.5.2.3.2. Prélèvements des échantillons de végétaux et de sols

Des échantillons de chaque espèce ont été prélevés sur tous les segments plantés des billons A et créneaux B au stade récoltable. Chaque échantillon d'un segment est constitué :

- Pour les radis et les navets de 5 racines par échantillons.
- Pour les patates douces, un pied par groupe a été choisi, sur lequel tous les tubercules ont été rassemblés pour constituer un échantillon.
- Pour les ignames, l'ensemble des tubercules issus d'un pied a constitué un échantillon.

Le sol au contact immédiat des tubercules et racines a été prélevé avec une cuillère à soupe sur un centimètre d'épaisseur environ, et homogénéisé sur le terrain.

2.5.2.3.3. Préparations des échantillons de végétaux et de sol

Au laboratoire, les végétaux ont été nettoyés à grande eau et frottés à l'aide d'une éponge légèrement abrasive afin d'éliminer toute particule de sol susceptible de contenir de la chlordécone. Pour certains sous-échantillons, les ignames et les patates douces ont été

épluchés sur 2 mm d'épaisseur et les navets sur 0,05 mm afin de différencier la teneur de chlordécone dans les épluchures et dans la pulpe des tubercules ou racines. La teneur en matière sèche a été évaluée après 48 heures à l'étuve à 80 °C. Les végétaux ont été conservés au congélateur à -20°C avant d'être envoyés au laboratoire d'analyse.

2.5.2.4. Laboratoires d'analyse

Les majorités des analyses de la chlordécone dans le sol et les végétaux ont été effectuées par le laboratoire départemental d'analyses de la Drôme (LDA 26). Cependant afin de vérifier la fiabilité du conditionnement des échantillons de sol et de végétaux, ainsi que la répétabilité des mesures effectuées par ce laboratoire nous avons fait appel au GIRPA d'Angers pour confronter nos résultats:

- Nous avons pris 3 échantillons de sol issus des prélèvements au contact des patates douces, uniquement homogénéisés sur le terrain et envoyés tels quels. De même nous avons pris 3 échantillons de patates douces que nous avons coupés sagittalement en 2 parties égales. Chaque échantillon a été divisé en 2 sous-échantillons, l'un étant envoyé au LDA 26, l'autre au GIRPA.
- Nous avons pris 4 échantillons de sol homogénéisé tamisé à 5 mm puis séché à l'air. Chaque échantillon a été divisé en 4 sous-échantillons. 2 de ces sous échantillons étant envoyés au LDA 26 et les 2 autres au GIRPA.
- Enfin nous avons pris les doubles de 4 autres échantillons de sol homogénéisé et tamisé à 5 mm puis séché à l'air déjà envoyé au LDA 26 que nous avons renvoyé à ce même laboratoire afin de tester la répétabilité dans le temps de ses analyses.

2.5.3. Résultats

2.5.3.1. Comparaison des 2 laboratoires d'analyses (LDA 26, GIRPA)

Nature de l'échantillon	[CLD] _{LDA 26} mg/kg	[CLD] _{GIRPA} mg/kg
Sol	1.24	0.79
Sol	0.32	0.24
Sol	0.24	0.21
Patate douce	0.00	0.00
Patate douce	0.00	0.047
Patate douce	0.02	0.00

Tableau 2.1 : Teneur en chlordécone en mg/kg dans les échantillons de patates douces (mg/kg poids frais) et de sols (mg/kg sol ses) envoyés au LDA 26 et au GIRPA.

La corrélation entre les deux laboratoires d'analyses est bonne ($R^2=0.99$). Cependant on constate que le GIRPA ne détecte pas autant de chlordécone que le LDA 26. La droite de régression linéaire est: $[CLD]_{GIRPA} = 0.65 * [CLD]_{LDA 26}$ (Figure 3). Le LDA 26 ne détecte pas la chlordécone dans un échantillon de patate douce alors que le GIRPA en détecte et inversement, dans un échantillon de patate douce le LDA 26 en détecte et pas le GIRPA (tableau 2.1).

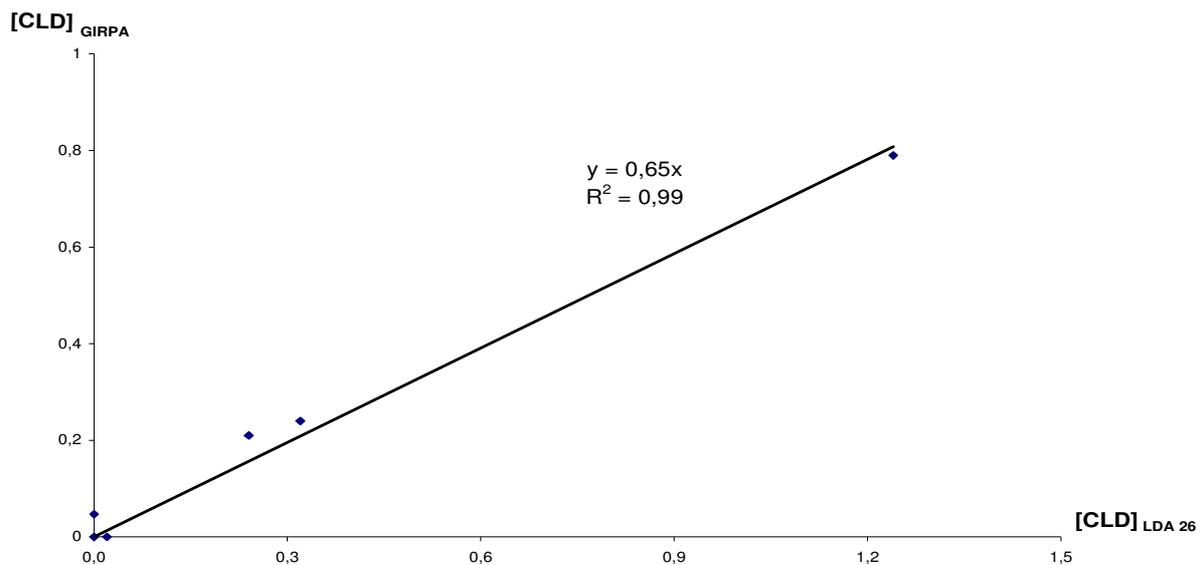


Figure 2.2 : Régression linéaire entre les teneurs de la chlordécone mesurées par le LDA 26 et le GIRPA pour un même échantillon.

La répétabilité des valeurs obtenues au LDA26 sur les sols est très bonne : sur deux envois des mêmes échantillons, la variation relative maximale a été de 14% ; la pente de la droite de régression est pratiquement égale à 1 (Figure 2.3).

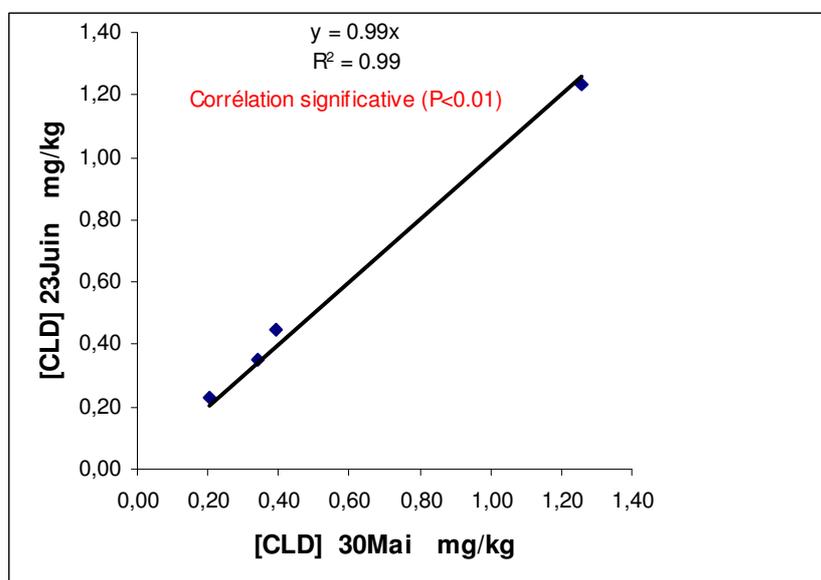


Figure 2.3 : Stabilité des teneurs moyenne en chlordécone du sol déterminées en mai et juin 2005 en CLD++ et CLD+ (moyenne de 9 échantillons, deux profondeurs, analyses LDA26)

2.5.3.2. Paramètres agronomiques des sols des parcelles

Parcelle	Profondeur	N%	C%	pH eau	pH KCl
CLD++	A:00-30 cm	0.20 (0.02)	2.27 (0.19)	5.34 (0.10)	4.69 (0.10)
CLD++	B:30-50 cm	0.12 (0.02)	1.40 (0.23)	5.01 (0.10)	4.26 (0.10)
CLD+	A:00-30 cm	0.16 (0.01)	1.67 (0.05)	5.54 (0.04)	3.77 (0.02)
CLD+	B:30-50 cm	0.10 (0.01)	0.99 (0.08)	4.41 (0.06)	3.60 (0.04)

Parcelle	Profondeur	Ca ²⁺ cmol _c kg ⁻¹	Mg ²⁺ cmol _c kg ⁻¹	K ⁺ cmol _c kg ⁻¹	CEC Metson cmol _c kg ⁻¹	Al ³⁺ cmol _c kg ⁻¹
CLD++	A:00-30 cm	4.57 (0.28)	2.69 (0.21)	1.94 (0.08)	12.32 (0.22)	0.13 (0.05)
CLD++	B:30-50 cm	3.25 (0.16)	1.82 (0.18)	1.87 (0.11)	10.91 (0.32)	0.43 (0.13)
CLD+	A:00-30 cm	2.21 (0.19)	0.97 (0.06)	1.64 (0.07)	12.86 (0.13)	3.97 (0.31)
CLD+	B:30-50 cm	1.28 (0.22)	0.69 (0.10)	2.15 (0.12)	12.86 (0.24)	5.30 (0.54)

Tableau 2.2 : Caractérisation analytique standard des sols des parcelles CLD++ et CLD+ pour les profondeurs 0-30 et 30-50 cm. L'erreur standard est entre parenthèse, n=9.

Le sol de la parcelle CLD++ est peu acide. Par contre celui de la parcelle CLD+ fait partie de la catégorie des "sols acides". Sur les deux parcelles, les pH_{eau} et pH_{KCl} diminuent avec la profondeur.

D'après les valeurs de C et de N, la minéralisation de la matière organique du sol est bonne pour les deux parcelles et sur les deux horizons.

La parcelle CLD++ a des valeurs de Mg²⁺ d'un sol magnésique. L'horizon A est riche en éléments nutritifs. Le potassium échangeable y est particulièrement élevé, en conséquence probable des sur-fertilisations potassiques des bananeraies du passé. On observe une diminution du taux de saturation en calcium et magnésium dans l'horizon B.

Le sol de la parcelle CLD+ est calci-magnésique en horizon A et magnésique en horizon B. Le taux de saturation en potassium est élevé, en raison d'un passé de bananeraies. L'horizon A est riche en élément nutritif. Dans l'horizon B, le taux de saturation en calcium du sol est faible.

2.5.3.3. Rendements moyens des parcelles

Il est délicat d'extrapoler les rendements obtenus sur les segments à l'échelle d'une parcelle, car aucune des configurations de plantation ne respecte les densités et les concurrences à l'intérieur d'une parcelle monospécifique. Les valeurs données dans le tableau 2.3 ont donc une simple valeur comparative.

parcelle	Horizon	Navet	Patate douce	Igname IC 95%
CLD++	A	38	41	26 - 38
	B	15	12	29 - 41
CLD+	A	7	28	37 - 64
	B	7	10	26 - 43

Tableau 2.3 : Rendements équivalents moyens en tonnes par hectare des parcelles CLD++ et CLD+, sur les horizons A et B, des navets, patates douces, ignames.

- Le navet semble exprimer en CLD+ sa sensibilité à la toxicité aluminique, ainsi qu'à un rapport K/Mg excessif.
- La patate douce répond en fonction de la teneur en matière organique du sol.

Au-delà de ces considérations anecdotiques concernant les plantes testées pour leurs volumes et temps de croissance différents, et non pour leur intérêt agronomique, les résultats obtenus sur l'igname *D. cayenensis* « Grosse caille » confirment une hypothèse lourde de l'essai : **l'igname a bien émis, depuis les créneaux, un système racinaire primaire, qui est allé puiser latéralement les nutriments dans l'horizon A non remanié, où se sont développés l'essentiel des embranchements d'ordre supérieur à 2. En conséquence, on n'observe pas de différence de rendement significative entre les ignames des billons et celles des créneaux. Au-delà, le système racinaire de ces ignames en créneaux a bien été majoritairement en contact avec la terre contaminée de surface.**

2.5.3.4. Chlordécone dans le sol et les végétaux

2.5.3.4.1. Teneur moyenne du sol en chlordécone des deux parcelles

La teneur en chlordécone du sol est significativement plus élevée ($P < 0.05$) en CLD++ que en CLD+. La teneur en chlordécone est significativement plus élevée ($P < 0.05$) en surface (0-30 cm) qu'en profondeur (30-50 cm) dans les deux parcelles (Tableau 2.4).

La teneur moyenne intra-parcelle en chlordécone du sol mesurée lors de l'échantillonnage des radis, navets et des patates douces n'est pas significativement différente ($P < 0.05$) de celle mesurée lors de la campagne d'échantillonnage à la tarière.

parcelle	Profondeur	chlordécone dans le sol prélevé à la tarière en mg/kg n=9	chlordécone dans le sol des radis en mg/kg n=9	chlordécone dans le sol au contact des navets en mg/kg n=9	chlordécone dans le sol des patates douces en mg/kg n=9
CLD++	A:00-30 cm	1.98 (0.28) a	1.51 (0.41) a	1.65 (0.26) a	1.36 (0.14) a
CLD++	B:30-50 cm	1.39 (0.18) b	0.91 (0.40) b	0.84 (0.29) b	0.42 (0.04) b
CLD+	A:00-30 cm	0.46 (0.05) c	0.30 (0.07) c	0.38 (0.09) c	0.34 (0.04) c
CLD+	B:30-50 cm	0.28 (0.05) d	0.21 (0.04) d	0.20 (0.16) c	0.21 (0.12) d

Tableau 2.4 : Teneur moyenne en chlordécone du sol en CLD++ et CLD+ pour les profondeurs 0-30 et 30-50 cm et le sol au contact des radis et des patates douces. L'erreur standard est entre parenthèse. La même lettre indique que la différence n'est pas significative ($P \geq 0.05$).

2.5.3.4.2. Teneur en chlordécone des radis

On retrouve de la chlordécone dans les 9 échantillons de sols analysés et dans 8 échantillons de radis sur 9. La teneur moyenne en chlordécone dans les radis sur l'ensemble des analyses est de 0.027 mg/kg. La teneur en chlordécone dans les radis n'est pas significativement différente ($P < 0,05$) entre les deux parcelles (Tableau 2.5).

Il n'y a pas de corrélation significative entre les teneurs en chlordécone dans le sol et celles des radis ($P = 0.24$). La teneur en chlordécone dans les radis n'est pas significativement différente ($P < 0,05$) entre les horizons A et B.

parcelle	Horizon	chlordécone dans le sol des radis en mg/kg n=9	chlordécone dans les radis en mg/kg
CLD++	A	1.51 (0.41) a	0.020 (0.007) a
	B	0.91 (0.40) b	0.047 (0.001) a
CLD+	A	0.30 (0.07) c	0.020 (0.017) a
	B	0.21 (0.04) d	0.010 (0.002) a

Tableau 2.5 : Teneur moyenne en chlordécone dans les radis dans les horizons A et B sur les parcelles CLD++ et CLD+. Les erreurs standard sont entre parenthèses. La même lettre indique que la différence n'est pas significative ($P \geq 0.05$).

2.5.3.4.3. Teneur en chlordécone des navets

Les deux parcelles montrent des teneurs en chlordécone significativement différentes dans les navets, et, sur CLD++, les teneurs des navets dans les créneaux sont significativement inférieures à celles obtenues sur billons (Tableau 2.6).

parcelle	Horizon	chlordécone dans les navets mg/kg	chlordécone dans le sol au contact mg/kg
CLD++	A	0.034 (0.007) a	1.65 (0.26) a
	B	0.018 (0.003) b	0.84 (0.29) b
CLD+	A	0.003 (0.002) c	0.38 (0.09) c
	B	0.009 (0.004) c	0.20 (0.16) c

Tableau 2.6 : Teneur moyenne en chlordécone dans les navets dans les horizons A et B sur les parcelles CLD++ et CLD+. Les erreurs standard sont entre parenthèses. La même lettre indique que la différence n'est pas significative ($P \geq 0.05$).

La corrélation globale entre les teneurs en chlordécone des navets et celles des sols au contact est bonne, ces dernières expliquant plus de 75% de la variance des premières. On notera que les résidus des points correspondant aux créneaux sont positifs, ce qui semble indiquer une efficacité de contamination supérieure dans les horizons B. Une explication pourrait être le meilleur contact sol/racine, favorisé par une structure plus continue, et des teneurs en eau toujours élevées à la période de croissance des navets.

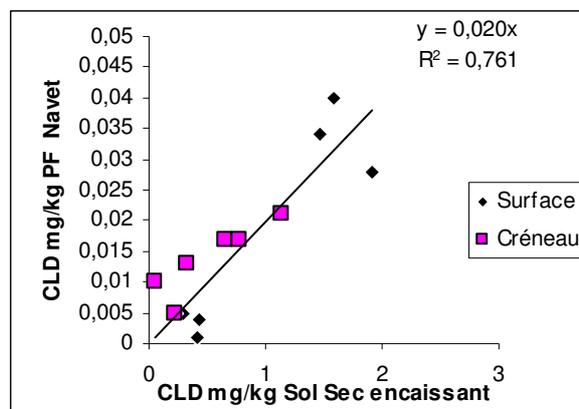


Figure 2.4 : Relation entre la contamination des sols et celle des navets (prélèvements du 27/07/2005)

2.5.3.4.4. Teneur des patates douces en chlordécone

Les teneurs en chlordécone des patates douces du prélèvement du 20/06/2005 ne sont pas significativement différentes ($P < 0,05$) entre les deux parcelles (Tableau 2.7). La teneur moyenne des deux parcelles est faible (0.009 mg/kgPF), pour une teneur moyenne des sols de 0.57 mg/kg. La teneur en chlordécone dans les patates douces n'est pas significativement différente entre les horizons A et B.

parcelle	horizon	chlordécone dans les patates douces mg/kg	Chlordécone dans le sol au contact mg/kg
CLD++	A	0.005 (0.01) a	1.24 (0.55) a
	B	0.016 (0.01) a	0.45 (0.04) b
CLD+	A	0.005 (0.01) a	0.35 (0.10) b
	B	0.011 (0.002) a	0.23 (0.06) c

Tableau 2.7 : Teneur moyenne en chlordécone des patates dans les horizons A et B sur les parcelles CLD++ et CLD+. Les erreurs standard sont entre parenthèses. La même lettre indique que la différence n'est pas significative ($P \geq 0.05$).

En revanche les contaminations relatives plante/sol apparaissent plus élevées en B qu'en A (Figure 2.5).

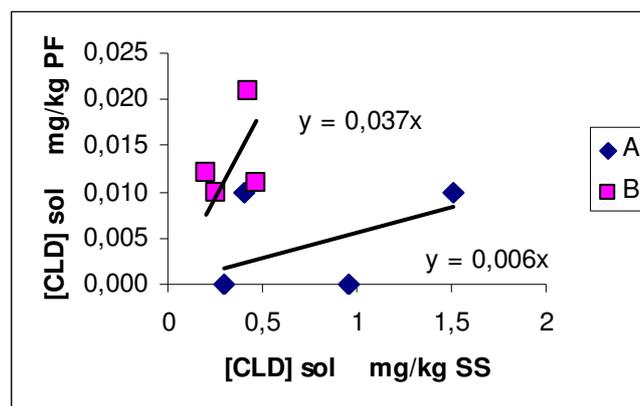


Figure 2.5 : Relation entre la contamination des sols et celle des patates douces (prélèvements du 20/06/2005)

Lors de ces prélèvements, des feuilles ont été récoltées et analysées. Malgré le faible nombre de points, il ressort sur la Figure 2.6 une relation positive, assortie d'une ordonnée à l'origine non nulle : non seulement **les feuilles de patates douces sont les premières parties aériennes identifiées comme contaminables**, mais elles pourraient être contaminées alors que les tubercules ne le sont pas. Compte tenu de l'évidence d'un transport systémique pour expliquer cette contamination, on remarquera que les feuilles se forment très tôt à chaque nœud de chaque stolon, et qu'elles ne sont éloignées des racines qui les alimentent que de quelques centimètres. Les tubercules, eux sont formés plus tardivement, et se remplissent rapidement.

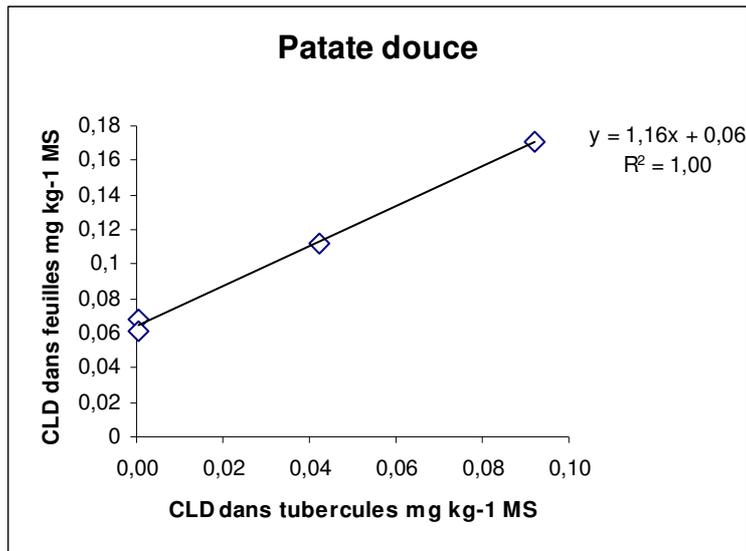


Figure 2.6 : Relation entre la contamination des feuilles de patates douces et celle des tubercules

Pour préciser la mauvaise relation obtenue entre la teneur en chlordécone des patates et celle des sols dans l'horizon A, un deuxième échantillonnage a été effectué en privilégiant ce dernier, et en prenant plus de soin lors du prélèvement de la terre au contact. Cette fois, 54 % de la variance des teneurs en chlordécone des plantes est expliquée par les teneurs des sols.

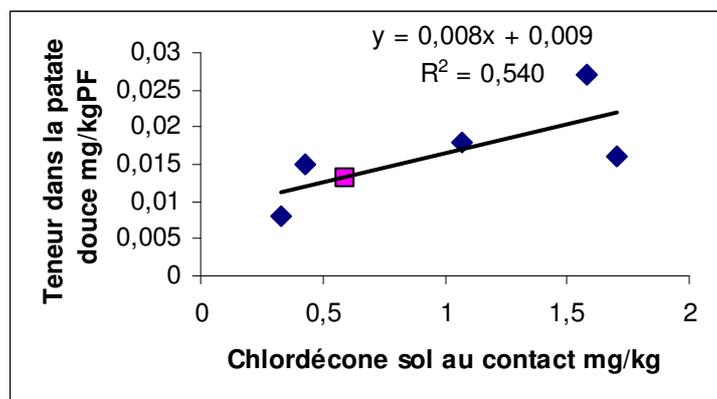


Figure 2.7 : Relation entre la contamination des sols et celle des patates douces (prélèvements du 03/08/2005)

Lors de ces mêmes prélèvements, nous avons fait aussi analyser des épluchures de patates. Celles-ci sont apparues entre 1 et 4 fois plus contaminées que les patates entières : les pulpes sont donc moins contaminées en général que les épluchures, ce qui est compatible avec la contribution d'une contamination par contact. Cette même hypothèse pourrait expliquer les contaminations relatives élevées obtenues dans l'horizon B lors du premier échantillonnage : celui-ci était consécutif à un remplissage des tubercules en période très pluvieuse. Lors de cette période, la teneur en eau, et donc la continuité de la phase liquide du sol, sont restées élevées, ce qui aurait favorisé la contamination par diffusion.

2.5.3.4.5. Teneur en chlordécone des ignames

Les teneurs en chlordécone des ignames des deux parcelles (tableau 2.8) ne montrent pas de valeurs significativement différentes, notamment à cause de la forte variabilité des teneurs des ignames A en CLD+. Cependant les différences entre les teneurs des ignames en A en CLD++ (sols de contamination maximale), en B en CLD++ et A en CLD+ (sols de contamination moyenne), et en B en CLD+ (sols de contamination faible) sont significatives.

parcelle	horizon	chlordécone dans les ignames mg/kgPF	chlordécone dans le sol au contact mg/kg
CLD++	A	0.048 (0.002) a	2.43 (0.20) a
	B	0.025 (0.004) b	1.19 (0.55) b
CLD+	A	0.020 (0.009) b	0.53 (0.20) b
	B	0.008 (0.002) c	0.23 (0.06) c

Tableau 2.8 : Teneur moyenne en chlordécone des ignames dans les horizons A et B sur les parcelles CLD++ et CLD+. Les erreurs standard sont entre parenthèses. La même lettre par colonne indique que la différence n'est pas significative ($P \geq 0.05$).

Pour chaque parcelle, la pente de contamination relative est significative, les teneurs des sols expliquant 60% de la variance des teneurs des ignames en CLD++, et plus de 90% en CLD+ (figure 2.8). Cependant, rien n'explique les différences des pentes, les sols étant *a priori* les mêmes, les cycles synchrones sous le même climat, et les dates de prélèvement identiques à un jour près. En supposant que la réponse n'est pas linéaire, une fonction puissance fournit un ajustement très correct, qui explique 87% de la variance globale.

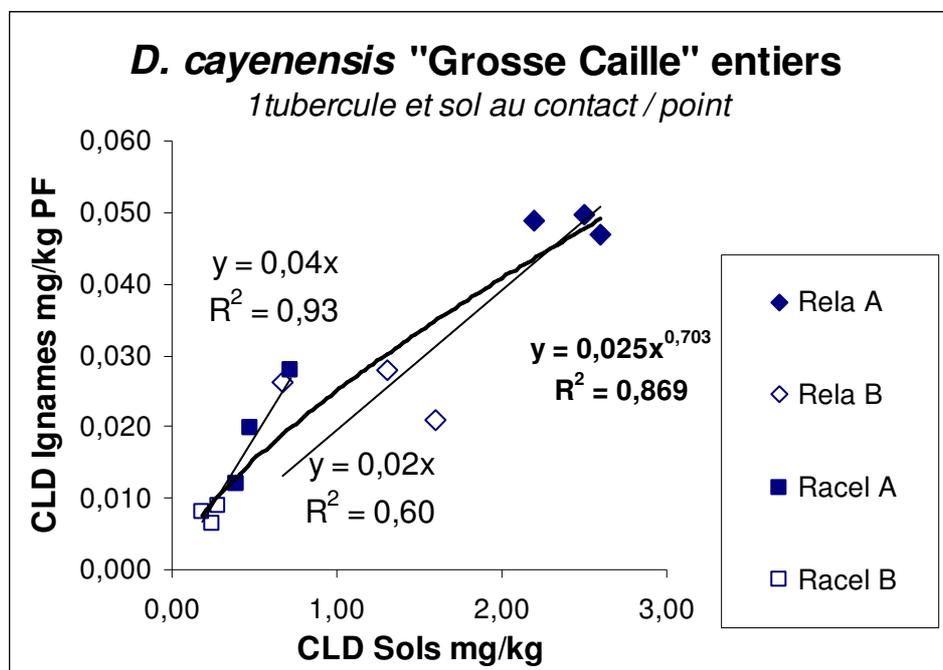


Figure 2.8 : Relation entre la contamination des sols et celle des ignames « Grosse Caille » par la chlordécone (Prélèvements des 19 et 20/09/2005)

Ces prélèvements ont fait l'objet par ailleurs d'une séparation entre les épluchures (2 mm) et les pulpes, sur lesquelles la chlordécone a été mesurée. Les épluchures apparaissent ainsi entre

9 et 20 fois plus contaminées que les pulpes, et leurs teneurs sont fortement corrélées à celles du sol adjacent : une régression puissance explique plus de 85% de la variance des contaminations corticales par celles du sol (Figure 2.9). La comparaison des pulpes, épluchures, et ignames entiers des parties hautes (plus anciennement formées) et basses (plus récentes) n'a pas montré de différences significatives.

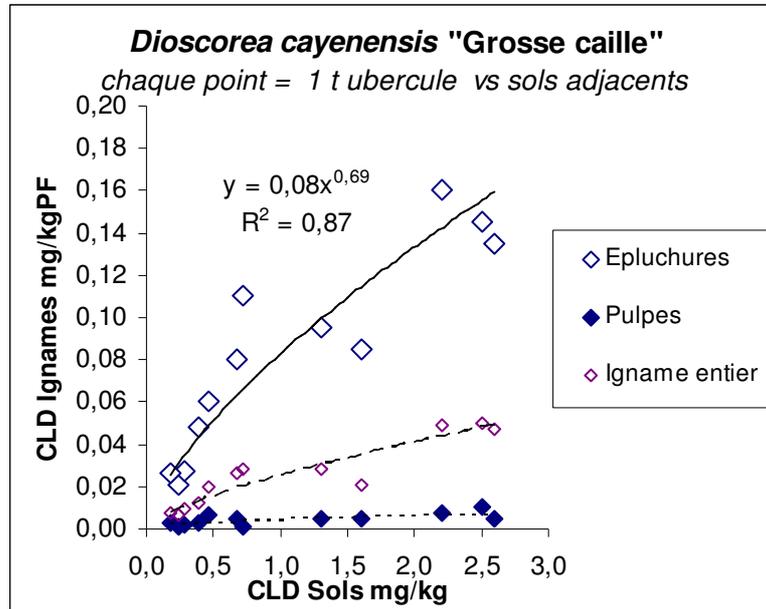


Figure 2.9 : Relation entre la contamination des sols et celle des ignames « Grosse Caille », importance de la contamination corticale. (Prélèvements des 19 et 20/09/2005)

Ce constat de contamination corticale préférentielle, particulièrement net chez l'igname, et la bonne corrélation entre les teneurs du cortex en chlordécone et celle du sol, laissent penser que la contamination par contact a une efficacité prédominante chez les racines et tubercules.

2.5.4. Discussion

2.5.4.1. Efficacité de contamination des organes souterrains de réserve : plafonnement apparent par des forces équivalentes de puits du sol et de la plante

Les cortex des racines et tubercules, en contact avec les sols, apparaissent nettement plus contaminés que les pulpes. Si l'on réfère cette contamination à la matière sèche, la contamination relative plante/sol apparaît plafonnée par l'égalité (Figure 2.10). Ce plafond d'égalité correspond à une capture par les cortex jusqu'à l'équilibre en teneur avec le sol environnant, en d'autres termes à une force de puits de la matière sèche des plantes équivalente à celle du sol pour la chlordécone.

Une première conséquence de ce constat est qu'aucune des plantes « racines » testées ne montre une affinité pour la chlordécone supérieure à celle du sol : radis, navet, patate douce et igname « Grosse Caille » ne peuvent être des plantes candidates à une phyto-remédiation. La substitution massive maximale serait aussi lente que l'action de lessivage par les eaux de drainage.

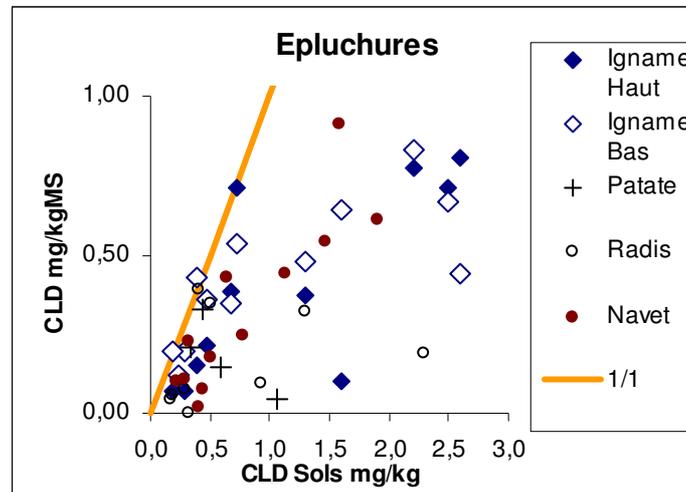


Figure 2.10 : Plafonnement de la relation entre la contamination des sols et celle des cortex des « légumes racines » rapportée à leurs matières sèches

2.5.4.2. Faisabilité des cultures en créneau

L'essai consistant à décaper localement en créneau la couche contaminée a été concluant pour la culture d'igname sur plusieurs aspects :

- La confection des créneaux est possible, avec les outils de traction existants (tracteurs 4x4 de 110 chevaux ou plus), tractant des socs opposés soudés (outils existants pour confectionner des rigoles profondes, figure 2.13).

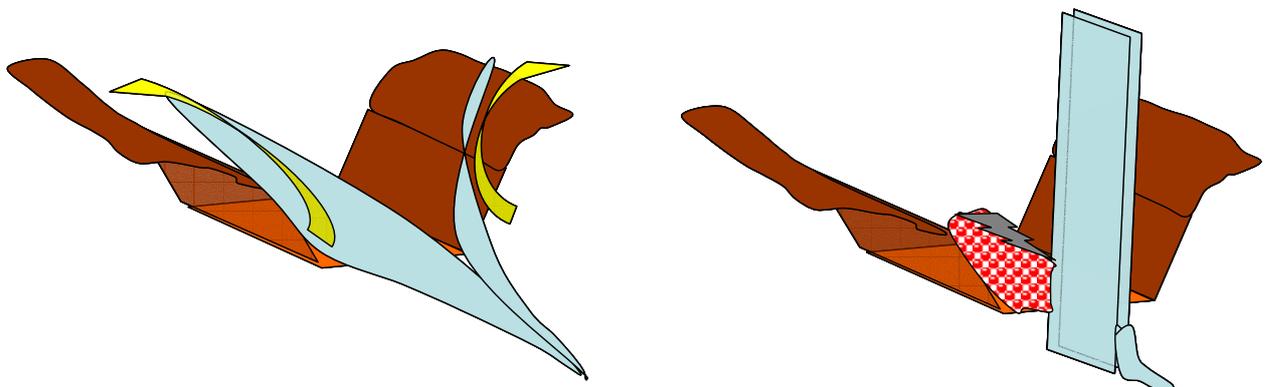


Figure 2.13 : les deux étapes de la confection des créneaux :
 (i) Ouverture par deux socs accolés
 (ii) Griffage de l'horizon B décapé

- Les ignames « Grosse caille » ont montré leur capacité à émettre des racines latérales capables d'aller chercher les nutriments et l'eau dans les horizons A constituant les murs du créneau (Photo 2.2). La traduction en est que les rendements estimés n'ont pas été significativement différents sur les billons ou sur les créneaux (tableau 2.3).



Photo 2.2 (A. Laffont) : Les racines de l'igname au premier plan sont bien allé puiser les nutriments dans l'horizon A des parois du créneau

- Les teneurs en chlordécone obtenues dans les ignames sur des créneaux aux sols contaminés de 0.6 à 1.7 mg/kg (CLD++) sont inférieures à la LMP 50µg/kg, alors que les mêmes ignames cultivés sur du sol contaminé de 2.2 à 2.6 mg/kg ont atteint et dépassé cette limite.

Les cultures en créneau sont donc une méthode plausible, pour abaisser le risque de contamination des cultures d'igname.

Cependant, la pratique des cultures en créneaux n'aura un intérêt que si le décapage local de la couche contaminée permet d'accéder à des horizons à coup sûr moins contaminés. C'est le cas dans les sols de bananeraies pérennes, mais ce système de culture bananier est presque exclusivement appliqué sur les terres en pente, non mécanisables. A l'inverse, les terres mécanisables, où la technique pourrait être appliquée, ont malheureusement subi depuis longtemps des travaux du sol profonds, qui ont incorporé de la chlordécone bien au-delà de la profondeur limite de praticabilité des cultures en créneau, 30 cm. Ces incorporations profondes ne sont souvent pas identifiables sur un profil cultural actuel. **Seule la mesure des teneurs en chlordécone du sol sur 0-30 et 30-60 cm de profondeur permettra de conseiller ou non à un agriculteur de réaliser des cultures en créneau.**

2.6. Vers un schéma unique de contamination des racines par la chlordécone au contact du sol : facteurs de forme et temps de contact (Y.-M. Cabidoche)

Pour les différentes espèces, les pentes (ou efficacités) moyennes de contamination sont légèrement différentes :

- 0.051 mg/mg pour le radis
- 0.029 mg/mg pour le madère (dachine)
- 0.028 mg/mg pour l'igname
- 0.024 mg/mg pour la patate douce
- 0.022 mg/mg pour le navet

Ce classement ne correspond ni à celui des durées de cycles, ni à celui des volumes des racines et tubercules. **En restant dans le cadre d'une hypothèse de contamination par diffusion au contact du sol, on peut penser que plus la distance à parcourir est faible et plus le temps de contact est long, plus la racine pourra être contaminée.**

Les deux variables élémentaires retenues sont donc le rapport surface (S) / volume (V) moyen au cours du remplissage (noté $S/V_{1/2}$), dépendant de la géométrie et de la taille de la racine, et la durée (t) entre l'initiation de l'organe de réserve et la récolte. La variable synthétique explicative du niveau de contamination par contact est le produit des deux précédentes : $t*S/V_{1/2}$

Les données retenues pour les différentes plantes, et les valeurs correspondantes des variables explicatives, sont fournies dans le tableau 2.10.

Plante	Modèle	Longueur <i>cm</i>	Rayon hémisphère sup <i>cm</i>	Rayon hémisphère inf <i>cm</i>	$S/V_{1/2}$ <i>cm⁻¹</i>	t <i>mois</i>	$t*S/V_{1/2}$ <i>mois cm⁻¹</i>
Radis	Sphérique		0.7	0.7	3.2	1.5	4.8
			1.4	1.4	1.6		2.4
Madère (Dachine)	Toupie	10	4	0.5	0.54	6	3.2
		15	6	0.5	0.36		2.1
Igname Gr Caille	Cylindre + 2 calottes	15	4.4	2.5	0.36	6	2.1
		38	6.5	3.5	0.23		1.3
Patate	Toupie	4.5	3.5	0.2	0.62	3	1.9
		6	6	0.2	0.36		1.1
Navet	Tronc cône + 2 calottes	20	2	1.5	0.64	2	1.3
		30	3	2.5	0.41		0.8

Tableau 2.10 : Données morphométriques mesurées et temps de remplissage estimé des racines et tubercules

Dans le cas de l'igname, où l'expérimentation en conditions contrôlées a montré que la contamination se fait au contact du sol, la contamination des épiluchures et des tubercules est bien expliquée par une telle approche (Figure 6.1).

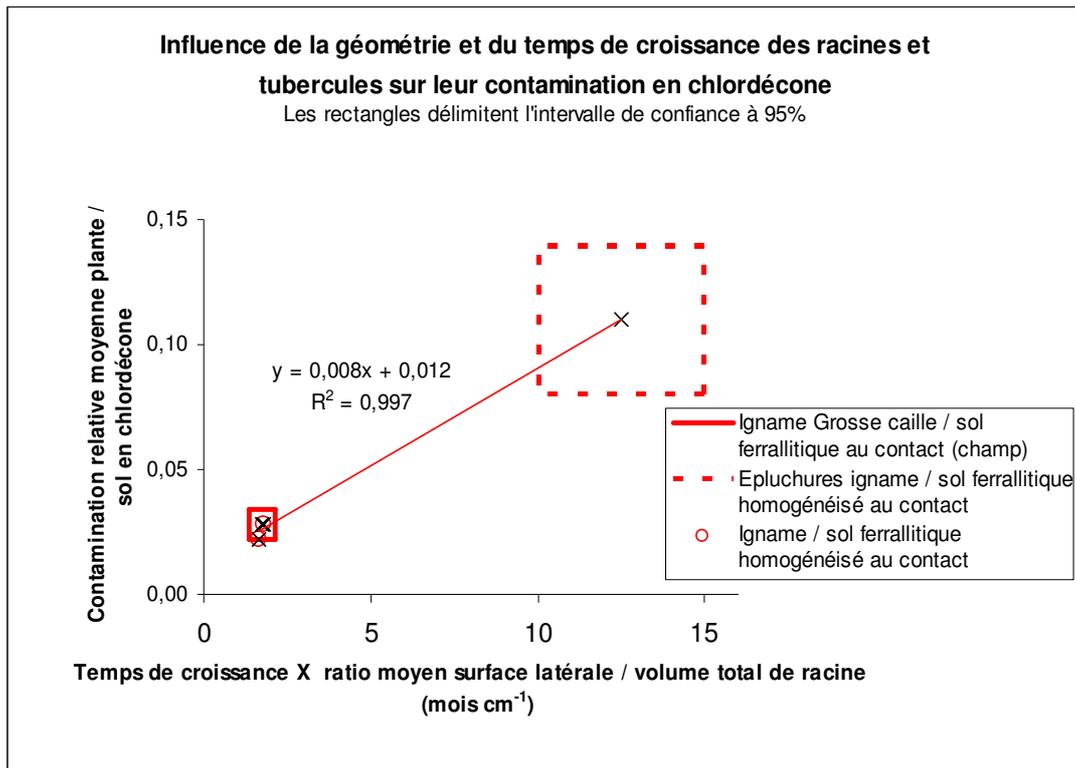


Figure 6.1 : Relation entre l'efficacité de contamination des tubercules et épluchures d'igname « Grosse Caille » et leur risque de contamination par contact, approché par des facteurs de forme et les durées de remplissage

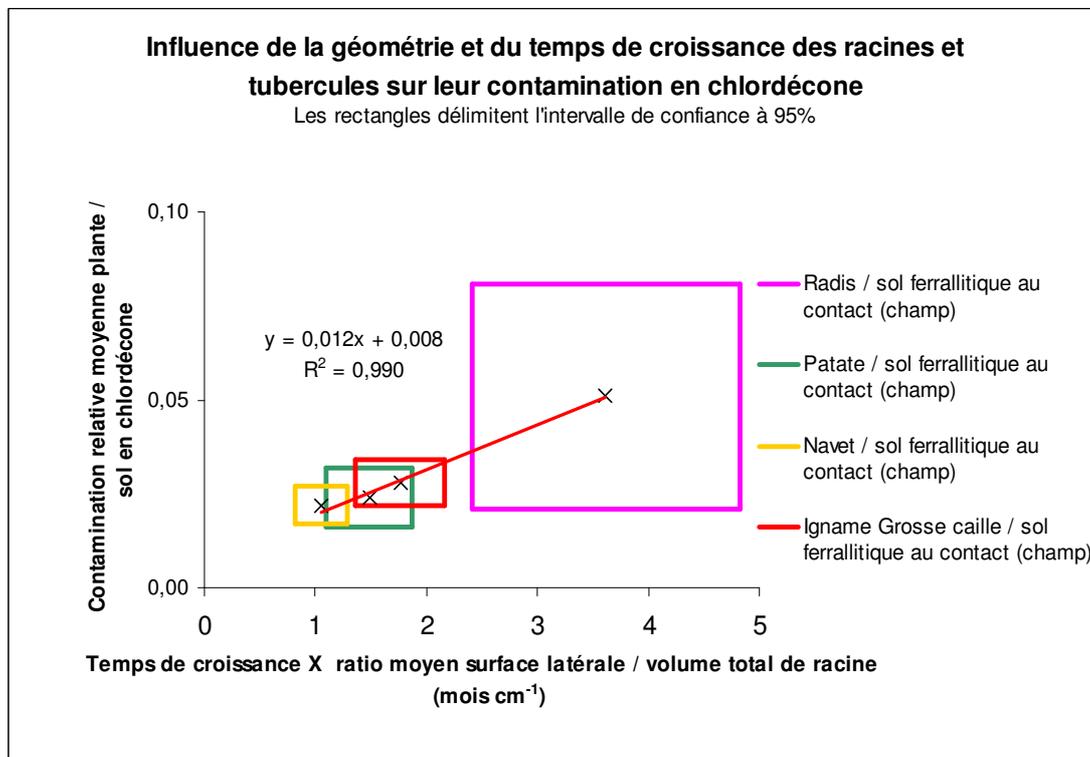


Figure 6.2 : Relation entre l'efficacité de contamination des racines et tubercules et leur risque de contamination au contact des sols ferrallitiques, approché par des facteurs de forme et les durées de remplissage

L'introduction de la variable synthétique contrôlant l'efficacité de contamination par contact, $t^*S/V_{1/2}$, explique parfaitement les moyennes obtenues sur les radis, navets, et ignames « Grosse Caille » sur sols ferrallitiques (Figure 6.2).

Un schéma de contamination prédominante au contact du sol, démontrée pour les ignames, peut être conservé pour les autres racines.

Les rectangles d'incertitude sont d'autant plus importants que les tailles des organes récoltés sont hétérogènes, et que l'épaisseur du sol prélevé au contact est importante : l'incertitude maximale concerne ici le radis.

Si l'on incorpore dans ce schéma les données obtenues sur les dachines et patates en andosol, et sur les patates en sols brun-rouille à halloysite, sa validité globale est conservée (Figure 6.3), même si un résidu se dégage, conformément à une bio-disponibilité légèrement plus faible en andosol et plus élevée dans les sols bruns-rouille.

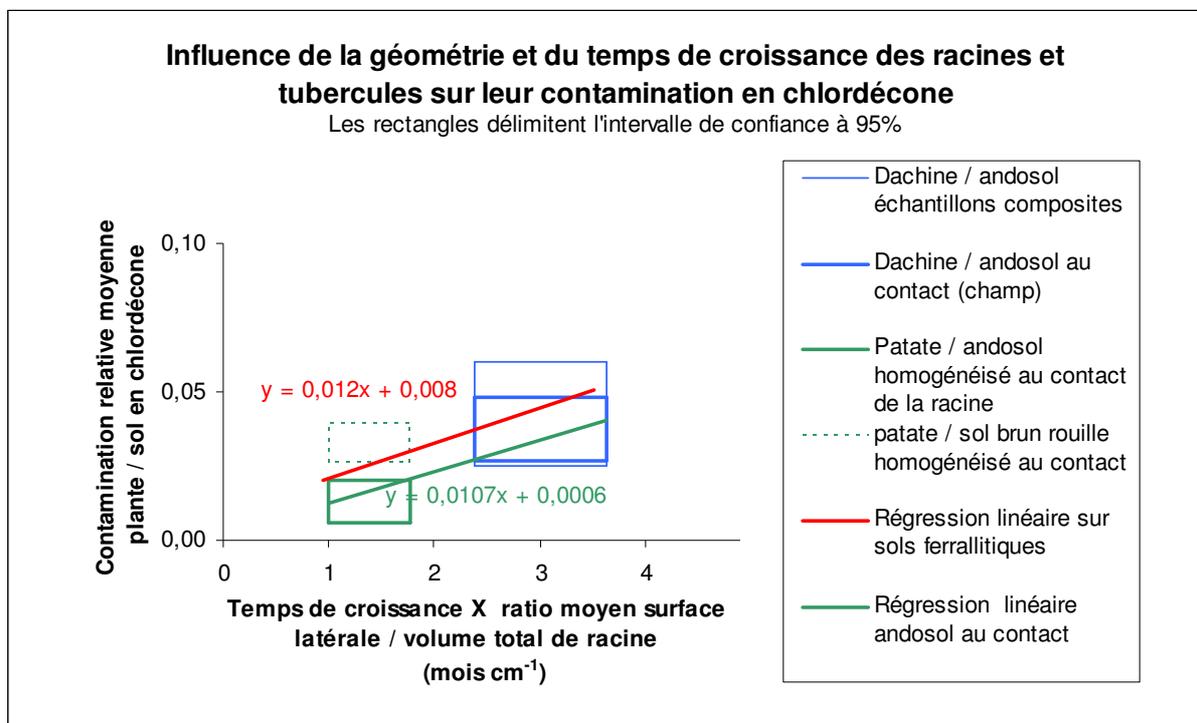


Figure 6.3 : Relation entre l'efficacité de contamination des racines et tubercules et leur risque de contamination par contact, approché par des facteurs de forme et les durées de remplissage : application aux andosols et sols brun-rouille

L'hypothèse de contamination des racines et tubercules par la chlordécone, due à une diffusion au contact du sol, apparaît valide pour des plantes aussi différentes que le radis, le navet, la patate douce, l'igname ou le madère (dachine).

Le poids des types de sols est seulement résiduel, les facteurs les plus importants étant le temps de contact et le rapport entre surface latérale et volume des différentes racines.

Dans le cadre de ce schéma, il est possible que des plantes cylindriques étroites comme la cive, ou dichotomiques comme le gingembre ou le curcuma, aient une efficacité de contamination élevée ($t^*S/V_{1/2} = 4$ à 5 pour la première, 5 à 6 pour les seconds).

2.7. Contamination des organes végétaux souterrains récoltés frais : un plafonnement opérationnel pour la gestion du risque de contamination des « légumes - racines » (Y.-M. Cabidoche)

La référence des contaminations des racines et tubercules à leur matière fraîche, peu rigoureuse en termes scientifiques, a été adoptée pour que les résultats obtenus soient immédiatement interprétables en regard des Limites Maximales Provisoires définies par l'AFSSA dans les denrées contribuant à la diète des populations antillaises :

- LMP1 = 50 µg/kg PF pour l'igname, le madère (dachine), la patate douce, le malanga, mais aussi, par précaution, la tomate, le concombre, le melon et la chair de poulet.
- LMP2 = 200 µg/kg PF pour les autres denrées, moins fréquemment consommées.

La collection de données de contamination plante/sol obtenue dans le cadre de ce travail a été globalement resituée par rapport à ces limites (Figure 7.1)

Dans l'hypothèse d'une contamination plante/sol linéaire, on obtient une relation correcte, où la teneur en chlordécone des sols explique près de 80% de la variance, de pente de contamination de 0.03 mg/mg (Sol sec / PF). Un majorant de l'ensemble du nuage de points (sauf quelques radis pour lesquels la relation de proximité sol-plante est incertaine) obtenu sur les racines complètes (telles qu'analysées par l'AFSSA et contrôlées par la Répression des fraudes) correspond à une pente de contamination de 0.05 mg/mg (Sol sec / PF). Toutefois, si l'on intègre par sécurité les épluchures d'ignames dans le diagramme, on obtient un majorant de contamination relative plante/sol de 0.2, ou 1/5^e. Ce majorant correspond du reste au majorant 1/1 relatif aux teneurs rapportées à la matière sèche, compte tenu de la teneur en matière sèche de 20% affectant les épluchures d'igname.

On peut ainsi définir une relation majorante du rapport entre la teneur en chlordécone des racines et tubercules frais et celle des sols :

$$[\text{CLD}]_{\text{racines}} \leq 0.2 \times [\text{CLD}]_{\text{sols}}$$

L'intérêt d'une telle relation est de permettre l'obtention de limites de contamination des sols à mettre en regard des LMP de l'AFSSA relatives aux plantes :

- **A la LMP1 de 50 µg/kg correspond une LM_{sol1} de 0.2 mg/kg, en deçà de laquelle on est sûr de ne pas dépasser la LMP1**
- **A la LMP2 de 200 µg/kg correspond une LM_{sol2} de 1.0 mg/kg, en deçà de laquelle on est sûr de ne pas dépasser la LMP2**

Cette relation pourra être appliquée :

- à tous les sols ayant fait l'objet de cette recherche, car la relation majorante des teneurs en chlordécone des plantes en fonction de celles des sols s'applique indistinctement, en l'état actuel des résultats, à tous les sols : sols brun-rouille à halloysite, sols ferrallitiques, andosols.
- à tous les légumes racines : radis, navet, patate douce, dachine=madère, igname, mais aussi gingembre, curcuma, cives.

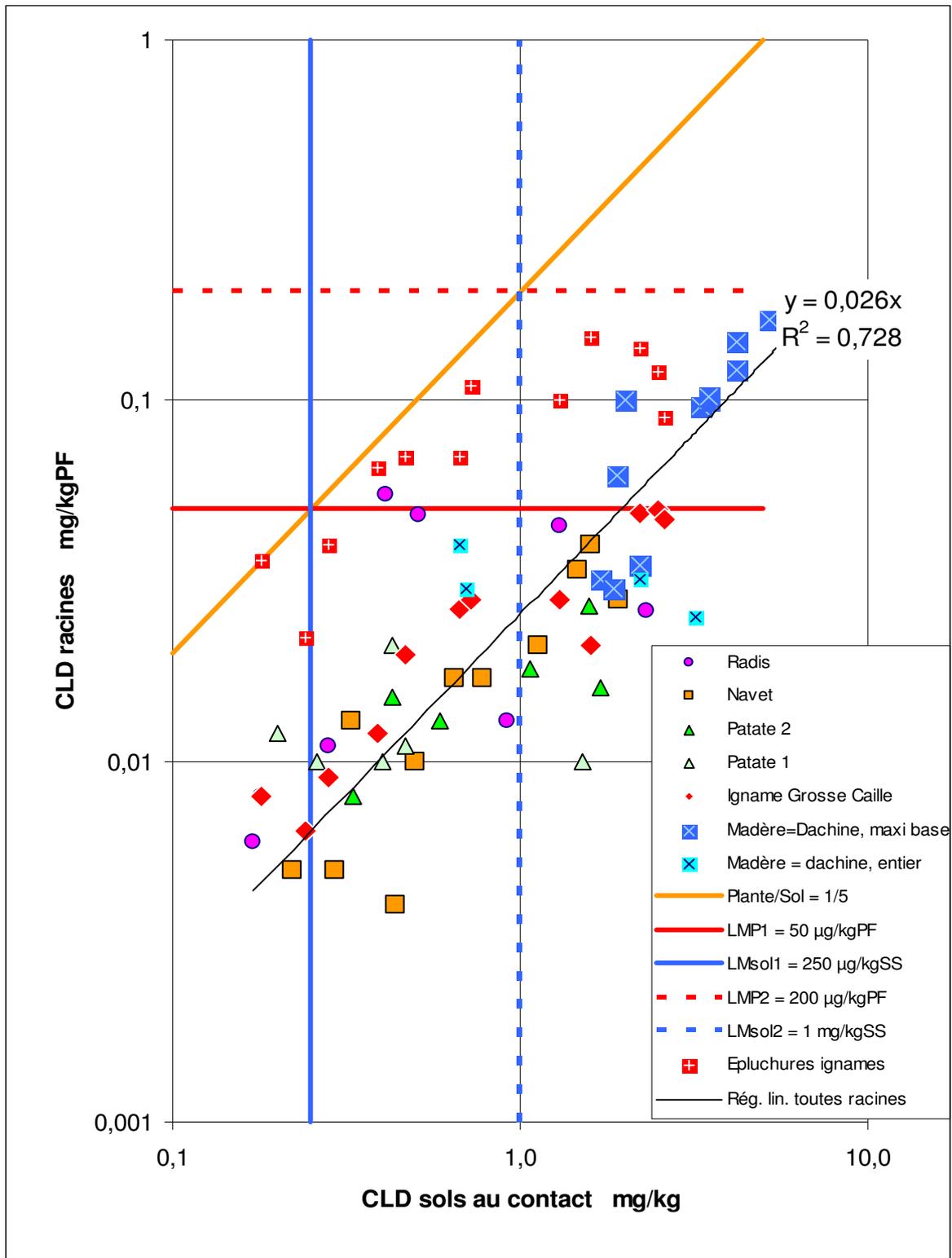


Figure 7.1 : Plafonnement de la relation entre la contamination des sols par la chlordécone et celle des « légumes racines » rapportée à leurs poids frais.
Toutes les données analytiques sources ont été obtenues au LDA26

Bibliographie de la deuxième partie

- AFSSA, 2005. Evaluation de l'exposition alimentaire théorique de la population martiniquaise au chlordécone. Propositions de limites maximales provisoires de contamination dans les principaux aliments vecteurs. Rapport technique PASER/JLV/CD/2005-176, AFSSA, Maison-Alfort, 35p.
- Bonan H., Prime J.-L., 2001. Rapport sur la présence dans les eaux de consommation humaine en Guadeloupe. Ministère de l'emploi et de la solidarité – rapport N° 2001-070 / Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement – affaire N° IGE/01/007. 80p.
- Balland P., Mestres R., Fagot M., 1998. Rapport sur l'évaluation des risques liés à l'utilisation de produits phytosanitaires en Guadeloupe et Martinique. Affaire CGPC n° 1998-0054-01. Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement –Direction de l'Eau- / Ministère de l'Agriculture et de la Pêche –Direction Générale de l'Alimentation-. 96p. +Annexes.
- Bonvallet N., Dor F., 2004. Insecticides organochlorés aux Antilles: identification des dangers et valeurs toxicologiques de référence (VTR). Etat des connaissances. Institut de veille sanitaire. 50p.
- Cabidoche Y.-M., 2004. Une modélisation simple de l'évolution des contaminations des sols en chlordécone. pp.39-52. dans INRA-APC et CIRAD-FLHOR, 2004. 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 cultures. Rapport intermédiaire d'exécution. Projet co-financé par le Programme "Evaluation et réduction des risques liés à l'utilisation des pesticides" du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. 52p.
- Clermont-Dauphin C., Cabidoche Y.M., Cattan P., 2004. Etat d'avancement du projet à la Guadeloupe. pp.3-23. dans INRA-APC et CIRAD-FLHOR, 2004. 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 cultures. Rapport intermédiaire d'exécution. Projet co-financé par le Programme "Evaluation et réduction des risques liés à l'utilisation des pesticides" du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. 52p.
- Defêche C., 2004. Diversité des pratiques agro-techniques des producteurs d'igname en Guadeloupe. Rapport de VCAT. INRA-URAPC Duclos.
- Gulla K.C., Munna S. Thakur, Karanth N.G., 2001. Biocapteurs et chasse aux pesticides. *BIOFUTUR*, 215. pp.56-59.
- Kenaga E. E., 1980. Predicted Bioconcentration Factors and Soil Sorption Coefficients of Pesticides and Other Chemicals. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 4 26-38.
- Kermarrec A., 1980. Niveau actuel de la contamination des chaînes biologiques en Guadeloupe : pesticides et métaux lourds 1979-1980. INRA-CRAAG. 155p.
- Messiaen C.-M., 1975. Le potager tropical, t.3 Cultures spéciales. PUF, Paris, 175 p.
- U.S. Department of Health and Human Services. 1995. Toxicological profile for Mirex and Chlordécone. Public Health Service. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 333p.+Appendix. Rapport PDF consultable sur internet à l'adresse <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp66.html>
- Villardebou A., 1964. Infestation d'une bananeraie par le charançon Cosmopolites sordidus GERM.: traitement de lutte. Document IRFA/Annexe 1. p.37. dans Kermarrec A., 1980. Niveau actuel de la contamination des chaînes biologiques en Guadeloupe : pesticides et métaux lourds 1979-1980. INRA-CRAAG. 155p.

Conclusion générale

Initiée dans un contexte de crise de pollution des sols, des eaux et des végétaux des Antilles françaises par les organochlorés autrefois appliqués dans les bananeraies, cette recherche s'est efforcée d'apporter des réponses simples et robustes aux questions posées pour une réaction urgente des politiques publiques.

L'accent a été porté sur l'analyse de la contamination par la chlordécone, molécule la plus longtemps appliquée, la plus persistante, la plus fortement adsorbée sur les sols, et la plus fréquemment et fortement dosée dans les sols, les eaux et les végétaux par les services de l'Etat en charge des plans de surveillance.

Parmi les facteurs multiples qui définissent le degré de contamination actuel des sols par la chlordécone, l'importance des apports cumulés de cette molécule depuis 1972 est prééminente. Au contraire, les sols n'ayant reçu aucun apport sont indemnes, en règle très générale. Les rares exceptions concernent des contaminations localisées et faibles par des eaux de ruissellement ou de nappes, ou bien consécutives à la dégradation du Mirex, jadis utilisé à la Guadeloupe pour lutter contre la fourmi-manioc.

Un modèle simple d'évolution des teneurs des sols en chlordécone a été construit, en considérant que la chlordécone ne se dégrade pas, qu'elle s'est adsorbée dans les sols au *pro rata* de leur stock organique et de l'affinité de la molécule pour ce dernier, et qu'elle ne disparaît des sols que par le lessivage opéré par les eaux de drainage. Ce modèle a été bien validé par les teneurs relevées dans des andosols, pour lesquels des chroniques fiables d'apports ont été reconstituées. Par inversion, ce modèle a fourni des coefficients de partage de la chlordécone, entre la fraction adsorbée sur le carbone et les solutions du sol, deux fois plus faibles pour les sols ferrallitiques, et plus de quatre fois plus faible pour les sols argileux alluviaux ou brun-rouille à halloysite. Ceci aurait pu être la conséquence d'une dégradation de la molécule, malheureusement les teneurs relevées dans les eaux de drainage montrent qu'il s'agit bien d'une moindre capacité de ces derniers sols à sorber la molécule. Quelques conclusions préoccupantes émergent dès lors :

- La chlordécone ne se dégrade pas dans les sols des Antilles,
- La contamination quantifiable durera entre 1 et 6 siècles selon les types de sols,
- Dans le siècle prochain la question de la contamination des eaux se posera avec la même acuité, quel que soit le type de sol.

La seule solution de remédiation identifiée est le décapage des sols. Elle n'est malheureusement envisageable que sur quelques dizaines d'hectares de bananeraies pérennes. Sur toutes les surfaces mécanisables, des labours profonds ont incorporé la chlordécone sous forme de copeaux invisibles, sur de grandes épaisseurs de sol qui rendent le décapage inenvisageable, ne serait-ce que parce qu'il mettrait à nu des horizons très peu fertiles, et par ailleurs fragiles vis-à-vis de l'érosion hydrique. Là où les labours ont été peu profonds, des solutions de décapage localisé provisoire, dites cultures « en créneaux », ont été testées avec succès, mais les surfaces d'applicabilité sont réduites.

Le deuxième apport de cette recherche concerne une meilleure compréhension des mécanismes de contamination par la chlordécone des organes souterrains végétaux récoltés. Bien que fortement bruitées par la distribution hétérogène de la chlordécone dans les sols, des relations entre la contamination des sols et celles des organes souterrains récoltés ont pu être

mises en évidence. Ces relations valident, malgré les difficultés d'échantillonnage, les campagnes d'analyses de sols engagées dans les plans d'action et dans l'application des arrêtés préfectoraux. Par ailleurs, ces relations ont permis de montrer que la voie de contact avec le sol (diffusion passive) explique l'essentiel des niveaux de contamination relevés sur des « racines » aussi différentes que radis, navet, patate douce, madère (dachine) ou igname, ainsi que la contamination bien supérieure des cortex par rapport aux pulpes. Ce dernier fait apporte un facteur de sécurité complémentaire à la définition des limites maximales provisoires de résidus (LMP) produites par l'AFSSA, qui concernent les « racines » entières alors que seules les pulpes sont consommées dans le cas de l'igname, du madère (dachine) et de la patate douce.

Enfin l'abondante collection de teneurs relevées dans les « racines », mises en regard des teneurs relevées dans les sols, a permis de proposer des limites maximales de contaminations des sols en deçà desquelles les végétaux auront des teneurs inférieures aux LMP de l'AFSSA. Ce plafonnement correspond à une hypothèse robuste : la contamination maximale des végétaux serait enregistrée lorsque les forces de puits des végétaux et du sol, en matière sèche, sont équivalentes. Le corollaire de la validité de cette hypothèse est qu'aucune des espèces testées n'autorise la perspective d'une phyto-remédiation. Cependant, l'existence de ces limites maximales de contamination des sols, nettement supérieures au seuil de quantification (0,25 mg/kg pour la plus sévère contre 0,01 mg/kg selon la norme européenne) devrait permettre de continuer la culture de « racines » sur des sols peu contaminés, sans obligation d'analyse de récolte aux frais de l'exploitant.

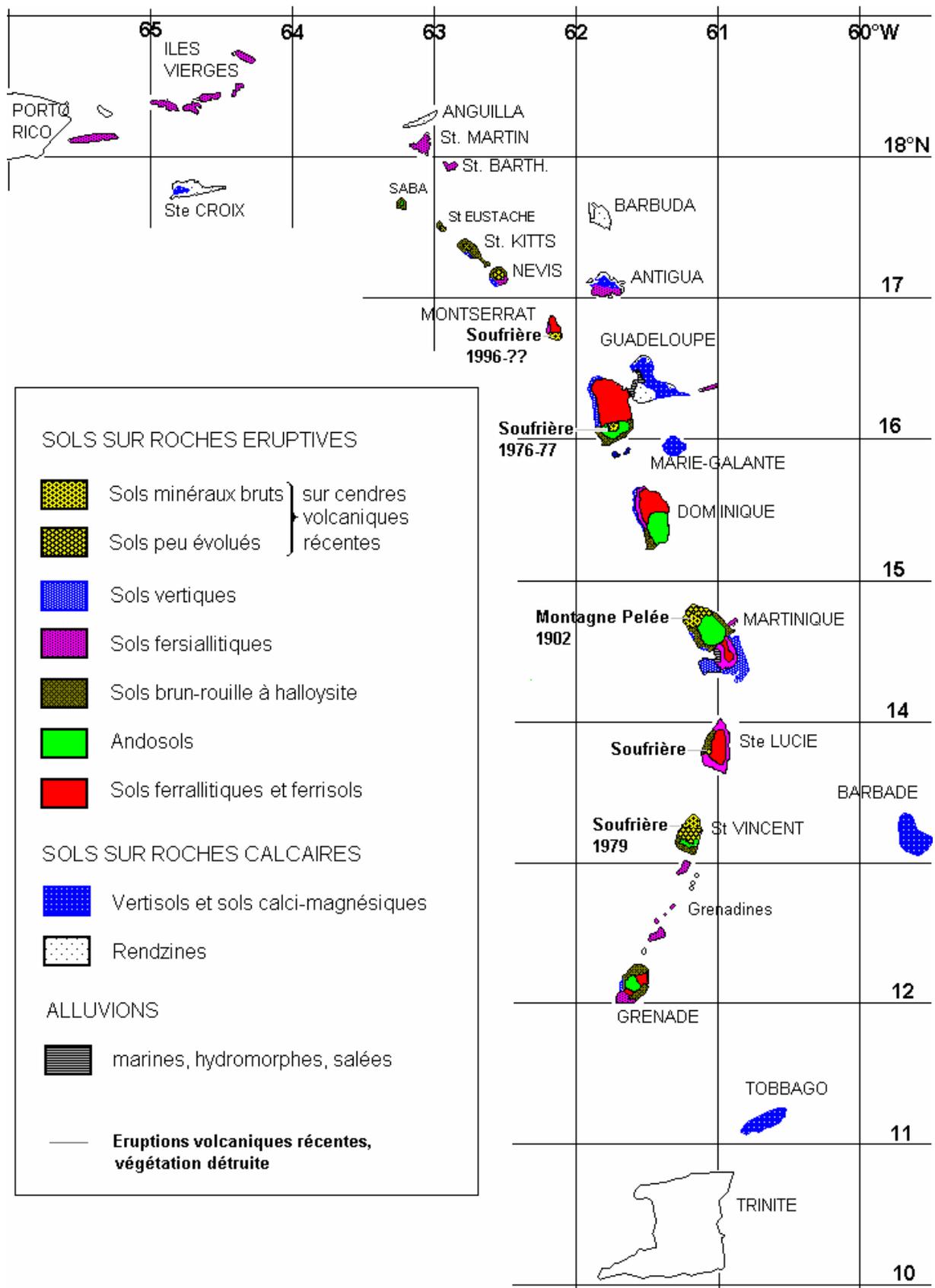
Cependant, aucune solution autorisant la culture de « racines » sans risque sur les sols fortement et profondément contaminés n'a été identifiée. Qui plus est, la contamination de feuilles de patates douces, sans contact avec le sol, a été avérée. Il existe donc bien une voie systémique, qui requiert que l'on évalue d'urgence la possibilité de contamination des organes aériens récoltés, des fourrages et des animaux qui les consomment.

Par ailleurs, les « racines » cultivées sur des sols relativement peu contaminés mais retenant faiblement la chlordécone peuvent être apparemment aussi contaminées que celles cultivées sur des andosols très contaminés. Il importe donc d'avancer dans la compréhension des mécanismes qui commandent la rétention de la chlordécone dans les différents sols des Antilles, notamment s'il s'agit :

- d'une intervention directe de la nature et de l'organisation de la matrice minérale (allophane, oxyhydroxydes, halloysite, smectite),
- de la plus ou moins grande disponibilité des sites hydrophobes de la matière organique des sols, en fonction des différentes relations organo-minérales,
- de l'occurrence de flushs de matières organiques hydrosolubles...

Dans l'attente, il serait vain d'imaginer que l'on puisse effectuer un zonage fin du risque de contamination des végétaux sur la seule base des teneurs mesurées dans les sols, au-delà de l'approche suggérée de « limites sol » globalement majorantes.

En aval, il convient d'avancer dans la connaissance et la modélisation des flux sortants de chlordécone dans les eaux de ruissellement et de drainage, de l'échelle locale à celle du bassin versant. Le couplage de cette modélisation avec celle d'autres pesticides, plus solubles ou dégradables, actuellement utilisés, peut être d'un grand intérêt, car, pour finir, la chlordécone est un remarquable traceur par sa non-dégradabilité. Enfin, elle permettra d'éclairer les contaminations des écosystèmes récepteurs d'aval, rivières et zones côtières et de leurs biocénoses.



Y.M. CABIDOCHÉ INRA-APC, 1997

Annexe 2 : Diversité des sols des Petites Antilles (« West Indies ») et représentativité de la Guadeloupe et de la Martinique

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

Coordonnateur : Yves-Marie Cabidoche (INRA Antilles-Guyane, Unité de Recherche Agropédologique)

Participants : Claridge Clermont-Dauphin, Antoine Lafont, Julie Sansoulet (INRA Antilles-Guyane, Unité de Recherche Agropédologique), Philippe Cattan (CIRAD-flhor Guadeloupe), Raphaël Achard, Audrey Caron, Christian Chabrier (PRAM/CIRAD-flhor)

Résumé

Des insecticides organochlorés (dieldrine, HCH, chlordécone) ont été appliqués dans les bananeraies des Antilles françaises des années 60 à 90. Les deux premiers sont rarement détectés dans les sols et les eaux. La **chlordécone**, très stable et hydrophobe, a été largement détectée depuis 1999 dans les eaux de source, puis dans les «racines» récoltées. L'analyse des sols de parcelles agricoles renseignées par des chroniques rétrospectives d'apports a permis de valider un modèle de dissipation de la chlordécone par les eaux de drainage, seul processus permettant la très lente décontamination des sols. Les coefficients de partage apparents, élevés, entre la fraction sorbée sur la matière organique des sols et la fraction en solution (K_{oc}), décroissent selon la nature minéralogique des sols : allophane, halloysite + oxyhydroxides, halloysite. Les concentrations des eaux de drainage confirment la réalité des différents K_{oc} . Des expérimentations au champ et en conditions contrôlées ont montré la prédominance d'une contamination des organes végétaux souterrains par contact, compliquée par une distribution de la chlordécone en «copeaux» dans les sols. Là où la chlordécone n'a pas été profondément incorporée par des labours, des décapages superficiels localisés en créneaux permettent d'obtenir des «racines» peu contaminées. Aucun indice de biodégradation ni solution de bio-remédiation n'ont été identifiés.

Storage in variable charge soils and dissipation by water flows of organochlorine zoocides formerly applied on banana crops of the French West Indies: relation with cropping systems

Co-ordination : Yves-Marie Cabidoche (INRA Antilles-Guyane, Unité de Recherche Agropédologique)

Participants : Claridge Clermont-Dauphin, Antoine Lafont, Julie Sansoulet (INRA Antilles-Guyane, Unité de Recherche Agropédologique), Philippe Cattan (CIRAD-flhor Guadeloupe), Raphaël Achard, Audrey Caron, Christian Chabrier (PRAM/CIRAD-flhor)

Summary

Between the 60' and the 90', organochlorides, i.e. dieldrin, HCH and chlordécone have been applied as insecticides on banana crops in the F.W.I. The firsts are rarely detected in water resources. Since 1999, **chlordecone** has been largely detected in sparkling waters, and then in harvested roots (yam, sweet potato, dasheen...). Soil analysis of a "space for time" parcel network, where different chlordecone input schedules have been established, allowed validating a model of chlordecone dissipation by drainage water. This process appeared to be the only one capable of reducing the soil contamination. The bulk partition coefficients between the sorbed fraction on the soil organic matter and the soluble fraction (K_{oc}) decreased according to the nature of the mineral fraction: allophane, halloysite +oxi-hydroxides, halloysite. The drainage water concentrations corroborated this gradation. Field and greenhouse experiments showed that the contamination of below ground plant organs results mainly from a contact with the surrounding soil, which was difficult to highlight because of the chip distribution of chlordécone. Where chlordecone has not been deeply incorporated by previous tillage, local scrapings allow to harvest few contaminated "roots". No biodegradation index or bio-remediation plant has been identified.