



HAL
open science

”Pollution par les organochlorés aux Antilles”. Conclusions du Groupe d’Etude et de Prospective

Yves-Marie Cabidoche, Magalie Lesueur Jannoyer, Henri Vannières

► To cite this version:

Yves-Marie Cabidoche, Magalie Lesueur Jannoyer, Henri Vannières. ”Pollution par les organochlorés aux Antilles”. Conclusions du Groupe d’Etude et de Prospective. [Rapport de recherche] INRA ; CIRAD. 2006, 55 p. hal-03578904

HAL Id: hal-03578904

<https://hal.inrae.fr/hal-03578904v1>

Submitted on 17 Feb 2022

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License



**Centre de coopération Internationale
en Recherche Agronomique pour le
Développement**

Département des Productions
Fruitières et Horticoles, FLHOR
TA 50 / PS 4 – Boulevard de la Lironde
34398 MONTPELLIER Cedex 5 – France



**Institut National
de la Recherche Agronomique**

Centre Antilles-Guyane
UR Agropédoclimatique de la Zone caraïbe
Domaine Duclos
97170 PETIT-BOURG - France

Conclusions du Groupe d'Etude et de Prospective

« Pollution par les organochlorés aux Antilles »

Aspects agronomiques

Contributions CIRAD INRA

Y-M. Cabidoche

M. Jannoyer

H. Vannière

Juin 2006

Table des matières

<i>Contexte de la commande et objectifs du Groupe d'Etude et de Prospective</i>	4
A. Caractérisation de la situation : évaluation de la contamination par les organochlorés aux Antilles	6
1. Pollution	6
a) Par la dieldrine, le β HCH et le mirex	6
b) Par la chlordécone	7
• Bilan des connaissances	7
• Pollution du sol	9
• Transfert et relation sol / organe souterrain récolté pour la molécule de chlordécone	17
• Contamination de parties aériennes de plantes	19
• Interprétation des résultats analytiques	23
2. Enjeu santé suivant la pollution	24
a) Sol	24
b) Eau	24
c) Denrées	24
• Jardins familiaux, agriculture informelle	24
• Utilisation des limites maximales (LM) provisoires définies par l'AFSSA	25
B. Connaissances restant à acquérir	29
1. Chimie de la molécule	29
2. Dynamique dans les différents sols	29
3. Dynamique du transfert sol/plante	29
4. Dynamique dans la plante	30
5. Phytoremédiation des sols pollués par des molécules persistantes	30
6. Dégradation microbiologique	32
7. Techniques analytiques	33
8. Contamination des produits transformés	33
9. Contamination des produits animaux	34
10. Risques d'exposition	34
C. Propositions pour l'action des pouvoirs publics	35
1. Niveau de protection environnementale	35
a) Remarques	35
b) Impact sur les produits de l'environnement	35
• Produits de la pêche	35
• Herbe pour affouragement des animaux de case	36
• Eau	36
2. Niveau de protection sanitaire	38
a) Productions végétales	38
• Dispositif local d'analyses indispensable	38
• Implications par systèmes de culture existant actuellement	39
• Conditions	41
b) Impact sur les productions animales	42

D. Autres valorisations : pistes de reconversion	43
1. Remarques	43
2. Pistes de reconversions possibles	44
a) Cultures alimentaires	44
b) Cultures non alimentaires	44
• Bois d'œuvre.....	44
• Bioénergies	45
• Cultures ornementales	46
c) Conditions.....	47
d) Abandon agriculture.....	47
• Urbanisation	47
• Espaces naturels de protection.....	47
E. Programmation scientifique.....	48
1. Actions entreprises : bilan des projets en cours	48
2. Nouvelles activités à conduire.....	49
a) Expertise	49
• Evaluation de la contamination pour les productions conduites sur sols contaminés	49
• Impact des modes de préparation et du mode de consommation sur l'exposition des consommateurs	49
• Rôle, place et impact des productions informelles dans le risque d'exposition	50
• Pré-faisabilité et faisabilité agronomique, technologique des filières biomasse-énergie.....	50
• Veille scientifique sur la décontamination et/ou les voies de blocage de la molécule dans les sols	50
b) Recherches ciblées	50
• Dynamique de la molécule de chlordécone dans le sol.....	50
• Comportement des différentes molécules de pesticides dans les sols tropicaux.....	51
• Relations sol/plantes	51
• Dynamique dans la plante : modèle cucurbitacées.....	51
• Méthodologie analytique	51
• Contamination des produits animaux	51
• Contamination des produits transformés	52
c) Recherches d'accompagnement.....	52
• Impact du niveau de pollution des sols pour les filières de production aux Antilles	52
• Accompagnement des filières existantes pour la gestion des risques liés aux pesticides.....	52
• Appui au changement et à l'évolution de l'agriculture aux Antilles	52
Bibliographie :	53
Annexes	56
Annexe 1 : Lettre de commande des Ministères	57
Annexe 2 : Carte du risque de contamination en chlordécone à la Martinique	60
Annexe 3 : A titre d'exemple : Premiers calculs de simulation économique pour une reconversion par des systèmes sylvicoles	61
Annexe 4 : Bilan partenarial et financier des activités de recherche déjà engagées	65
Annexe 5 : Coûts prévisionnels pour les actions de recherche à envisager	66

Contexte de la commande et objectifs du Groupe d'Etude et de Prospective

A la demande de cinq ministères en charge de l'Agriculture, de l'Ecologie, des DOM-TOM, de la Santé et de l'Economie, des Finances et de l'Industrie, concernés par la gestion de la contamination des ressources naturelles et des aliments par les organochlorés aux Antilles, un Groupe d'Etude et de Prospective (GEP) a été créé en avril 2005 sur le dossier « Pollution par les organochlorés aux Antilles ». Ce groupe, constitué par des membres de l'AFSSA, du CIRAD et de l'INRA, a pour mandat de faire un état de la pollution des Antilles françaises par les organochlorés et de ses conséquences, et de proposer des scénarios d'évolution de l'agriculture face à cette contrainte, en les situant dans leur impact économique et social (cf. lettre des ministères du 14 avril 2005).

Les aspects santé, qui sont au cœur de ce dossier (risque d'exposition des travailleurs agricoles, risque d'exposition des consommateurs), sont traités par les organismes compétents (INSERM, INVS, AFSSA, ...). Des études médicales sont en cours. L'ensemble de ces travaux fait l'objet d'autres rapports.

Les conclusions de la partie « Première évaluation de l'exposition de la population martiniquaise à la chlordécone – propositions de limites maximales provisoires (LMP) de contamination des principaux aliments par la chlordécone » ayant été rendues publiques par l'AFSSA dans son rapport d'octobre 2005, notre contribution examine et rend compte des aspects plus agronomiques concernant l'état des lieux de la contamination, les besoins en recherche et en expertise ainsi que des propositions de gestion de cette contamination.

A la date de la commande, les termes de référence du Groupe d'Etude et de Prospective étaient très larges, alors que les indications sur l'état de la contamination étaient très pauvres et les hypothèses relativement limitées. Les analyses réalisées entre juillet 2005 et février 2006 ont permis de consolider certaines interrogations et d'élargir les questionnements sur l'ampleur de la contamination par les organochlorés aux Antilles.

Du fait de très nombreuses incertitudes, tant sur le plan scientifique que sur le plan réglementaire, ce rapport ne répondra pas à l'ensemble des termes de la commande mais ciblera ses conclusions sur les recommandations en termes de plan d'action pour la caractérisation plus fine de la situation (nécessité d'analyses complémentaires) et en termes d'outil possible de gestion des surfaces contaminées, outil qui reste conditionné à la validation et l'harmonisation réglementaire.

Les conclusions et les propositions que nous formulons ne sont pas totalement abouties ou définitives, tous les moyens (en particulier analytiques) n'ayant pas été obtenus pour appréhender certains questionnements. Elles sont donc à reconsidérer et réévaluer en fonction des résultats qui seront obtenus dans le cadre des recommandations de ce rapport et des études en cours (aspects santé et agronomiques) et de l'évolution du contexte réglementaire.

Remerciements

Nous tenons à préciser que ce rapport est une œuvre collective et à remercier tous les collègues sans la disponibilité, la réactivité et l'énergie desquels ce rapport n'aurait probablement pas abouti. Leur implication et leurs questionnements ont largement contribué à intégrer les connaissances, à structurer les résultats et à faire émerger des propositions de recherche ou des voies de valorisation. Il s'agit, en particulier, de nos collègues de Martinique et de Guadeloupe ; du CEMAGREF, du CIRAD, de l'INRA, de l'IRD ; des services déconcentrés de l'Etat (DAF-SPV, DIREN, DSDS) ; du Laboratoire Départemental de la Drôme, qui ont participé activement aux échanges et à l'atelier d'octobre 2005, en Martinique. Enfin, les premiers résultats de recherche, apportant chaque semaine des informations pertinentes, n'auraient pu être rapidement obtenus sans la coopération de la profession agricole.

Nous remercions également nos collègues de l'AFSSA, avec qui nous avons partagé de nombreuses réflexions, et qui nous ont permis de mieux appréhender les questions de santé des consommateurs.

Avertissement 1 :

Les données de contamination des sols et végétaux des Antilles par la chlordécone, présentées sous forme de tableaux et graphiques dans ce rapport, ont été obtenues principalement par le Laboratoire Départemental d'Analyses de la Drôme (LDA26) dans le cadre des opérations de recherche de l'INRA et du CIRAD. Des collections de données obtenues par le GIRPA d'Angers, dans le cadre des plans de surveillance des SPV de Guadeloupe et Martinique, ont été intégrées, après validation croisée entre les deux laboratoires. Des données erratiques, obtenues dans d'autres laboratoires, ont été écartées.

Avertissement 2 :

Les données de contamination des sols et végétaux des Antilles par la chlordécone, présentées sous forme de tableaux et graphiques dans ce rapport, ont été obtenues dans le cadre de programmes de recherche en cours INRA-CIRAD, co-financés par le MEDD, et bénéficiant du concours du MAP via les plans de surveillance mis en œuvre par les SPV de Guadeloupe et Martinique. Ces données ont fait l'objet d'une validation dans le cadre des modes opératoires d'assurance qualité mis en œuvre par les deux organismes de recherche, et n'ont pas soulevé d'objection lors du colloque « Pesticides » d'Avignon (nov. 2005), dans lequel le MEDD a rassemblé les chercheurs français concernés par le sujet. Pour autant, compte tenu du délai très bref imposé par les cinq ministères commanditaires du rapport, ces résultats n'ont pas encore été validés par une évaluation paritaire, dans le cadre de publications internationales.

A. Caractérisation de la situation : évaluation de la contamination par les organochlorés aux Antilles

1. Pollution

a) Par la dieldrine, le β HCH et le mirex

Pour lutter contre le charançon du bananier aux Antilles, le HCH a été utilisé à partir de 1951. Des insecticides à base d'aldrine et de dieldrine ont été également utilisés à la fin des années 1950. Mais après cinq à six années d'usage et en raison d'une accoutumance des larves de charançon, ils ont été abandonnés. L'emploi du lindane et du HCH se généralisera du milieu des années 1960 à 1972 pour être substitué par des produits à base de chlordécone de 1972 à 1993. Aujourd'hui, il est rare que les teneurs enregistrées s'éloignent du seuil de détection pour le HCH et la dieldrine. Ses caractéristiques physico-chimiques (tableau 1) et biologiques (tableau 2) par rapport aux autres molécules organochlorées identifiées aux Antilles, expliquent que nos efforts de recherche se concentrent sur la molécule de chlordécone.

Le mirex (parfois orthographié myrex) a été utilisé à la Guadeloupe pour tenter de lutter contre la fourmi manioc (*Acromyrmex octospinosus*) à la fois sur les parcelles en production mais aussi dans les jardins. La dégradation du mirex en chlordécone peut expliquer des détections de contamination hors zone bananière. Il s'agit alors d'une pollution des sols très ponctuelle (à l'échelle du m²). De plus la quantité totale de matière active importée (120kg, données douanes) correspondrait à la quantité épandue sur 2 ha de bananeraie ayant reçu les apports recommandés de Képone® puis Curlone® entre 1970 et 1993.

Tableau 1 : Caractéristiques physico-chimiques des molécules organochlorées utilisées aux Antilles

	K_{oc} (L kg ⁻¹) Coefficient de partage carbone organique du sol / eau	Log K_{ow} Coefficient de partage octanol/eau	S (mg L ⁻¹) Solubilité dans l'eau	V P (mm Hg) Pression de vapeur	Température de fusion (°C)
β HCH	3 380	4.14	8.00	35.2 10 ⁻⁶	112.5
dieldrine	10 600	5.20	0.25	3.0 10 ⁻⁶	226.0
chlordécone	17 500	5.41	2.70	0.225 10 ⁻⁶	350.0
mirex	473 000	7.18	0.085 (quasi insoluble)	0.8 10 ⁻⁶	485.0

Risk Assessment Information System, février 2006 (<http://rais.oml.gov/cgi-bin/tox/>)

Tableau 2 : Caractéristiques biologiques des molécules organochlorées utilisées aux Antilles

	Bv_{dry} Transfert sol/plante MS (g/g)	Bv_{wet} Transfert sol/plante MF (g/g)	BF Facteur de bioaccumulation pour le poisson (L/kg)	Fb Coefficient de transfert pour la viande bovine (j/kg)	Fm Coefficient de transfert pour le lait (j/kg)
βHCH	18.0 10 ⁻²	3.70 10 ⁻²	310	0.25 10 ⁻³	0.79 10 ⁻⁴
dieldrine	8.2 10 ⁻²	1.70 10 ⁻²	2 000	1.00 10 ⁻³	3.10 10 ⁻⁴
chlordécone	-	-	2 900	-	-
mirex	3.3 10 ⁻²	0.67 10 ⁻²	37 000	4.80 10 ⁻³	15.00 10 ⁻⁴

Risk Assessment Information System, février 2006 (<http://rais.onrl.gov/cgi-bin/tox/>)

b) Par la chlordécone

- **Bilan des connaissances**

- *Caractéristiques de la chlordécone*

- **Identité de la molécule : famille chimique, activité biologique**

La chlordécone (nom : 1,1α,3,3α,4,5,5,5α,5β,6-décachloro-octahydro-1,3,4-méthéno-2H-cyclo-buta[cd]pentalen-2-one) est un insecticide de la famille des organochlorés (figure 1). Cette molécule synthétisée pour la première fois en 1952 a été commercialisée dès 1966 aux Etats-Unis sous le nom de Képone®. Elle est considérée comme un insecticide efficace contre les insectes défoliateurs, et peut par ailleurs servir de larvicide contre la mouche, de fongicide contre la tavelure et l'oïdium du pommier, et d'insecticide contre le doryphore, les acariens de la rouille sur les plantes du genre *Citrus* non productives, le ver fil de fer de la pomme de terre et du tabac,... (OMS, 1984).

La chlordécone a été utilisée aux Antilles pour lutter contre le charançon du bananier (*Cosmopolites sordidus*). De 1972 à 1977, la molécule était vendue sous le nom commercial de Kepone®, puis de 1981 à 1993 sous le nom de Curlone®. La dose d'application recommandée était de 30 g de produit par pied, soit 3 kg.ha⁻¹ de matière active, à disposer en couronne sur 10 cm autour du "pseudotronc", tous les 6 à 18 mois en fonction du niveau d'infestation de la parcelle (Cabidoche *et al.*, 2004).

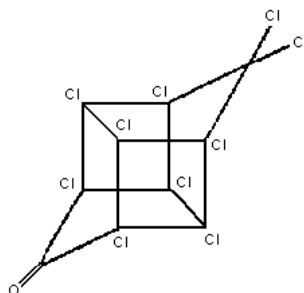


Figure 1 : Structure moléculaire de la chlordécone (C₁₀Cl₁₀O, PM : 490,7 g.mol⁻¹)

▪ **Propriétés physiques et chimiques**

La chlordécone a pour particularité d'être peu soluble dans l'eau à faible pH (1-2 mg.l⁻¹ à 20°C). D'après Dawson *et al.* (1979), sa solubilité augmenterait rapidement dans des gammes de pH supérieures à 9 (tableau 3). Cette molécule est par ailleurs très lipophile avec un coefficient de partage octanol/eau élevé (log K_{ow} : 5,41) ; elle est soluble dans les solvants organiques (hexane et benzène) sous forme anhydre. Comme les autres organochlorés, elle se classe parmi les pesticides non ionisables.

Malgré sa faible solubilité dans l'eau, la chlordécone est susceptible d'évoluer vers une forme plus soluble en fonction des conditions du milieu. En effet, comme les autres cétones, elle subit en milieu acide et en milieu basique une réaction d'hydratation à l'issue de laquelle se forme un "gem-diol" appelé chlordécone-hydrate soluble en phase aqueuse et qualifié d'instable (figure 2). On peut toutefois douter de la formation d'un tel composé dans les conditions de sols acides des Antilles.

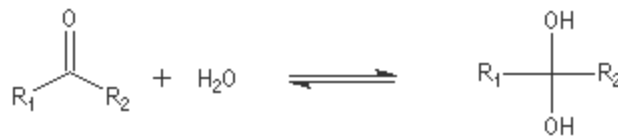


Figure 2 : Hydratation d'un composé carbonylé et formation d'un gem-diol (Dupuis, 2005)

pH	Kepone (mg.l ⁻¹)
4	1.75
7	2.22
8	2.37
8.5	2.44
9	3.96
9.4	4.79
9.4 (NaHCO ₃)	15.8
9.6	24.8
9.8	46.8
10	68.8
10.9	176

Tableau 3 : Solubilité du Kepone en fonction du pH en solution (Dawson *et al.*, 1979)

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.

- Comportement dans l'environnement

- **Rétention dans le sol et les sédiments**

Alors qu'elle est relativement peu soluble dans l'eau, la chlordécone présente une forte affinité pour la **matière organique** (MO) des sols et des sédiments. Ainsi, dans des systèmes sol/eau à l'équilibre, la molécule s'associe préférentiellement avec la matière particulaire (MP) de sorte que les teneurs en résidus observées sont 10^4 - 10^5 fois plus élevées que les teneurs enregistrées dans l'eau environnante (Dawson *et al.*, 1979). Ainsi, les sédiments servent de puits pour la chlordécone des eaux contaminées, tandis que les sols jouent le même rôle pour la contamination atmosphérique. Les concentrations de chlordécone s'élevaient jusqu'à 10 mg.kg^{-1} dans les sédiments de la baie de Bailey (rivière James), et variaient dans les sols de 1000 - 2000 mg.kg^{-1} aux abords de l'usine de production à 2 - 6 mg.kg^{-1} à une distance de 1 km (données de l'US EPA (1976) citées dans le rapport de l'OMS (1984)). Snegaroff (1977) signalait des concentrations de résidus de $9,5 \text{ mg.kg}^{-1}$ dans le sol et de $0,135 \text{ mg.kg}^{-1}$ dans les sédiments au voisinage d'une plantation de bananes en Guadeloupe.

La chlordécone, du fait de sa structure et de sa taille moléculaire, serait majoritairement adsorbée sur les matières organiques par des liaisons de faible énergie (type van der Waals). Cependant, son affinité pour la MO dépendrait de la composition de cette dernière et notamment de son contenu en composés aromatiques, comme cela a été rapporté dans le cas d'un organophosphoré (Ahmad *et al.*, 2001) et de deux HAP (Xing, 2001). Selon Dawson *et al.* (1979), l'affinité de la molécule pour un sol exprimée par un ratio "concentration de chlordécone dans l'eau/concentration sur la matière particulaire" (**coefficient de partage**), atteindrait des valeurs allant de 1 à 5.10^{-4} (K_d : $2\ 000$ à $10\ 000 \text{ L.kg}^{-1}$). Ce ratio diminue avec l'augmentation de la teneur en Carbone Organique du sol et/ou une baisse de la taille des particules. Une valeur de K_{oc} de $17\ 500 \text{ L.kg}^{-1}$ est rapportée par ailleurs dans la littérature (Risk Assessment Information System, 2005).

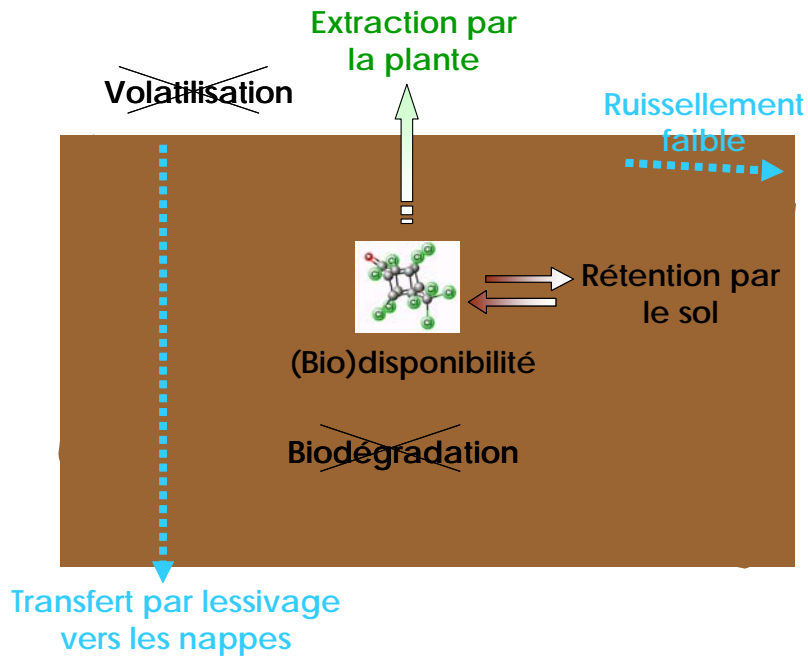
La teneur en eau et la température sont deux facteurs du milieu pouvant influencer la rétention d'un pesticide sur un sol. Ainsi, la teneur en eau affecte le processus d'adsorption par modification de l'accessibilité des sites d'adsorption et des propriétés de surface du sol. Quant aux changements de température, ils ont un effet direct sur la distribution de phase du pesticide de même qu'ils peuvent entraîner un changement de solubilité du pesticide. La question de l'influence de ces facteurs sur la rétention de la chlordécone dans les sols antillais, en conditions climatiques tropicales (chaud et humide) se pose.

- **Pollution du sol**

La présence de chlordécone dans le sol est principalement liée aux pratiques agronomiques dans les bananeraies entre 1971 et 1993. L'application d'un modèle simple d'évolution de la teneur en chlordécone du sol rend compte du lien direct entre apport en chlordécone et teneur observée. Ce modèle (Cabidoche *et al.*, 2004) prend en compte (figures 3 et 4) :

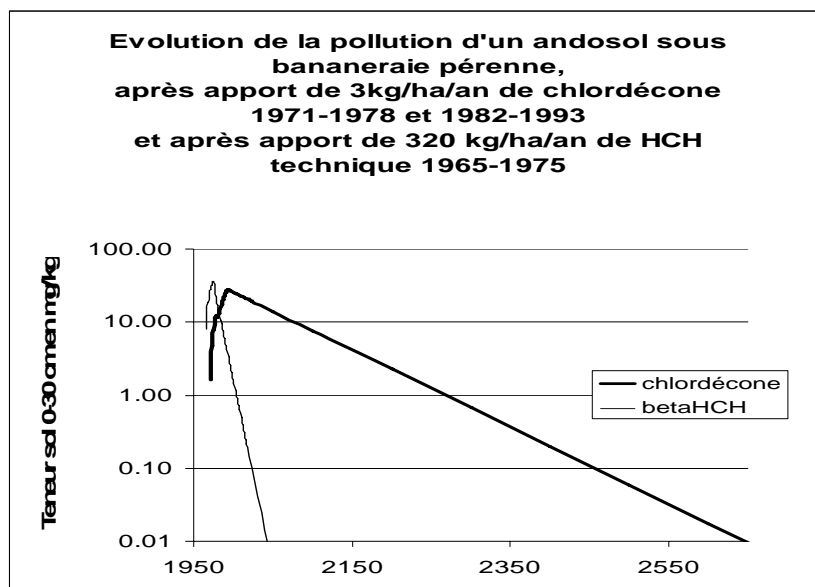
- Chronique des apports de chlordécone.
- Stock de matières organiques du sol (S_{oc}).
- Lent lessivage du chlordécone par les eaux de drainage, forcé par l'écoulement le long des troncs de bananiers 3 à 5 ans après apports aux pieds.
- Dilution éventuelle par un travail du sol profond
- Coefficient de partage K_{oc} entre la chlordécone en solution et celle adsorbée sur le carbone de la matière organique des sols

Figure 3 : Modèle et hypothèses retenues sur les transferts de la molécule à partir du sol :



Le modèle rend bien compte des teneurs observées pour les andosols, avec le coefficient de partage maximal extrait de la littérature scientifique (17500 L/kg) (figure 4). Il rend compte également de la contamination différenciée suivant le type de sol, se traduisant par une aptitude de fixation plus faible et un ralongage plus rapide.

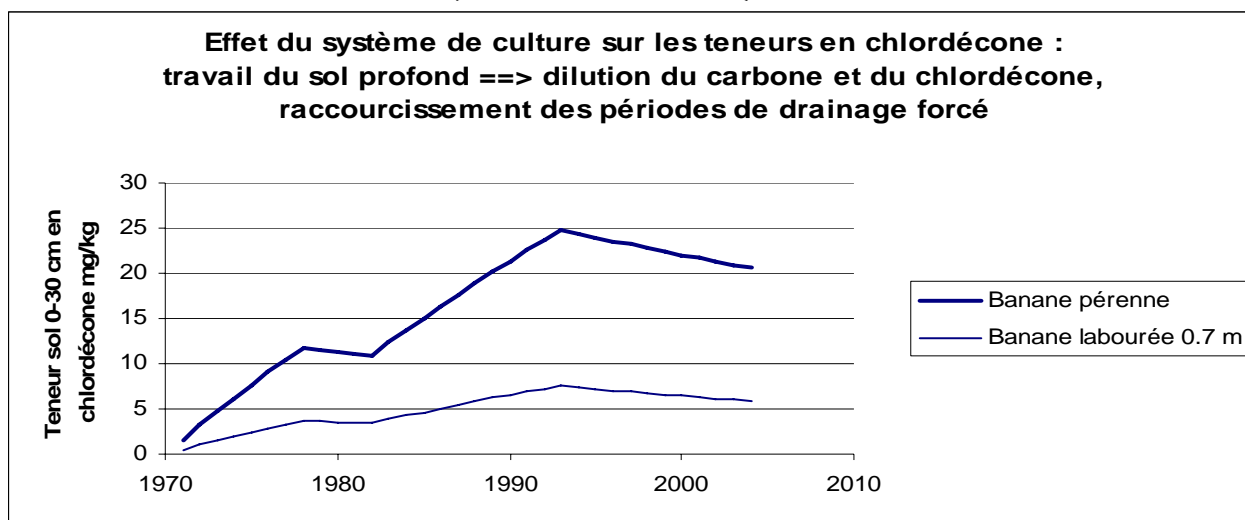
Figure 4 : Illustration de la différence de comportement des molécules de HCH et de chlordécone (modèle d'éluion Cabidoche *et al.* (2004), *cf infra*).



Quoiqu'il en soit, la contamination est durable du fait que l'on n'observe pas de dégradation apparente et que le lessivage est faible. La teneur des eaux de drainage est en cohérence avec la teneur mesurée dans le sol. La teneur en chlordécone des eaux de ruissellement est faible (transfert interparcellaire négligeable si le ruissellement ne transporte pas de particules terreuses). Le seul cas repéré de contamination d'une parcelle n'ayant jamais reçu d'apport de chlordécone concerne une parcelle d'arrière-mangrove, imprégnée par les eaux d'émergence d'une nappe située sous des sols cultivés en banane à l'époque des apports de chlordécone. La chlordécone se retrouve dans les sols exactement là où elle a été autrefois appliquée.

La question du travail mécanique du sol est bien illustrée par ce modèle (figure 5): on a pu s'étonner que les contaminations des sols de Guadeloupe apparaissent supérieures à celles de la Martinique, en raisonnant sur des teneurs dans les 30 premiers centimètres de sol. En réalité, cela est dû à un échantillonnage important de sols de bananeraies pérennes, jamais labourées depuis plusieurs décennies, sous lesquelles la chlordécone apportée est quasi intégralement restée dans la couche superficielle. A l'inverse, la totalité des analyses issues de la Martinique ont porté sur des sols autrefois profondément travaillés, jusqu'à 60 voire 70 cm. Les mêmes stocks de chlordécone ont donc été dilués bien au-delà des 30 premiers centimètres.

**Figure 5 : Effet du système de culture sur les teneurs en chlordécone
(Cabidoche et al, 2004)**



Ce fait n'est pas innocent à plusieurs titres :

- La dilution profonde interdit d'envisager des solutions de décontamination des sols par décapage.
- L'obtention d'une teneur plus faible en surface minimise les risques de contamination des organes souterrains par contact, mais ne change pas le risque de capture par les enracinements.
- Le faible nombre de labours depuis la fin de la période « Curlone » entraîne une distribution extrêmement hétérogène de la chlordécone adsorbée dans le sol, qui se présenterait actuellement sous forme de « copeaux et cloisons ».
- La véritable évaluation des stocks résiduels de chlordécone demanderait une analyse de deux couches aux profondeurs 0 à 30 cm, et 30 à 60 cm, pour toutes les terres mécanisables.

Pour l'ensemble des expérimentations, il faut noter la très forte hétérogénéité de la teneur en chlordécone du sol pour une parcelle (figure 6). La variabilité spatiale a été vérifiée à l'échelle métrique (indépendance des mesures pour des points éloignés de 10 m) mais devra être analysée à l'échelle centimétrique.

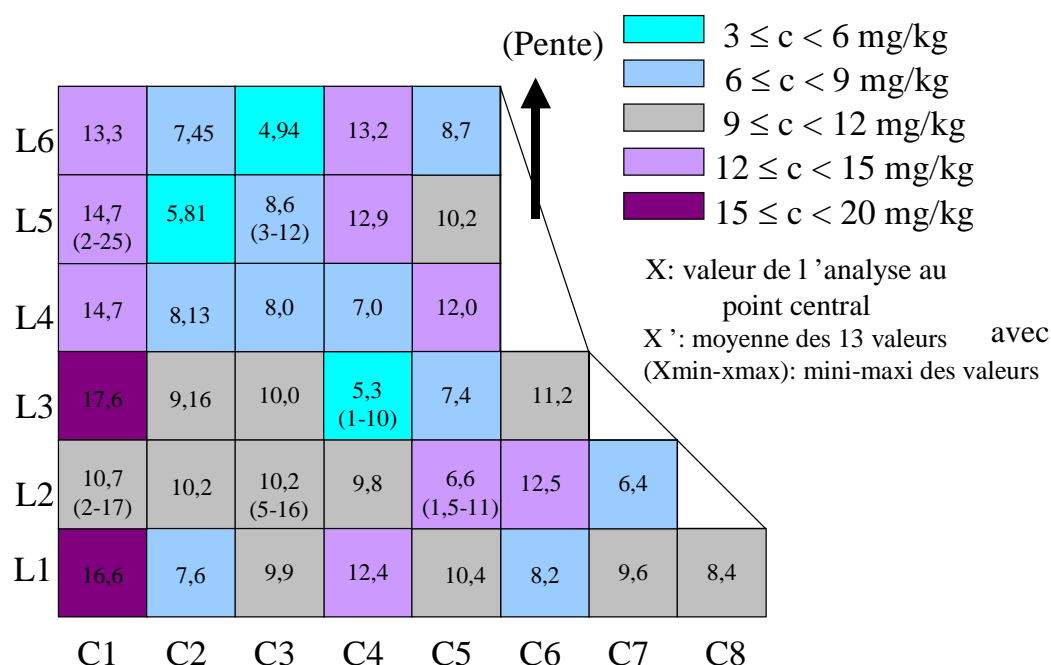


Figure 6 : Exemple de répartition spatiale des teneurs en chlordécone sur le site 2 (Martinique) (R Achard, 2005).

Cette variabilité s'explique par l'extrême affinité de la chlordécone pour la matière organique du sol et la pratique d'apport du produit (application de la poudre au pied du bananier = concentration par point d'application) puis par les pratiques de travail du sol :

- bananeraie pérenne (le sol n'est pas travaillé): la teneur en chlordécone de la couche superficielle du sol est très élevée, puis très faible sur le profil cultural (profondeur >30cm) ;
- bananeraie avec travail du sol régulier: la teneur en chlordécone est diluée sur l'horizon du labour ;
- bananeraie avec labour retourné sporadique: chlordécone plus abondante en profondeur ;
- bananeraie avec labour dressé: chlordécone en minces cloisons.

Cette hétérogénéité pose le problème de la représentativité d'une mesure pour une parcelle. Cela implique un nombre de points de prélèvements suffisants par parcelle: pour les terres mécanisables, ayant fait l'objet de labours dans le passé, il est fixé à 20 pour des expérimentations avec une méthodologie spécifique (figure 7 et BRGM/RP-53262-FR Achard et al, 2003), et l'emploi d'une tarière de prélèvement d'un diamètre intégrateur suffisant (min 6 cm).

Relation teneur moyenne du sol et variabilité intraparcelle de la teneur

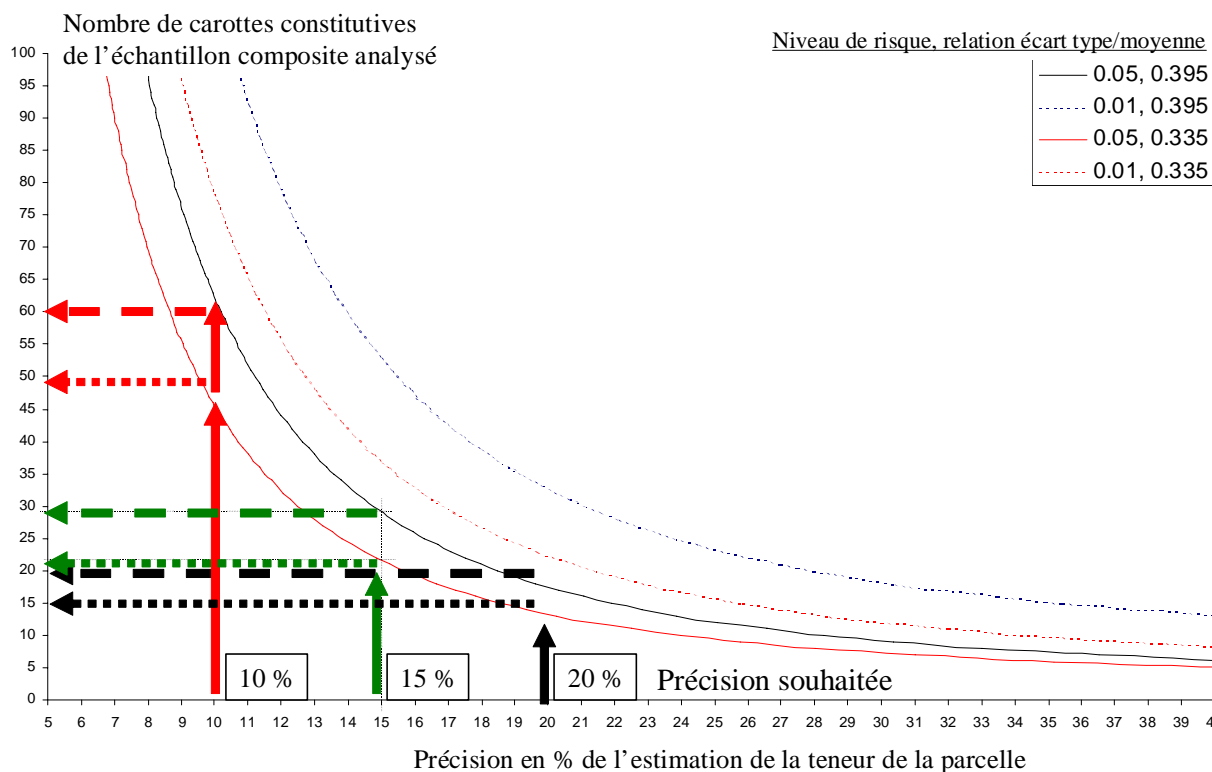


Figure 7 : Relation entre la teneur moyenne du sol et la variabilité intraparcelle de la teneur en chlordécone sur une parcelle ayant subi 3 labours depuis 1993 ; nombre d'échantillons nécessaires pour une bonne représentativité de la mesure (R Achard, 2005).

Ce nombre de prélèvements élevé semble difficile à mettre en œuvre pour des campagnes de suivi et de contrôle par les organismes consulaires et les différents services déconcentrés de l'Etat.

Les eaux des grands périmètres irrigués alimentés par les retenues de Letaye et Gaschet en Guadeloupe, et par la Manzo en Martinique, n'ont pas montré de pollution à ce jour (des analyses ponctuelles de l'eau du barrage de la Manzo n'ont pas montré de résidu de chlordécone ; analyses Achard 2004). Les eaux d'irrigation issues de captages locaux en rivières devraient cependant faire l'objet d'analyses pour s'assurer de leur caractère non contaminant.

En marge du dossier « pollution par les organochlorés aux Antilles », l'IRD développe en Martinique des travaux sur la caractérisation des propriétés physiques des sols tropicaux déformables et leur géo-référencement (E Braudeau, 2005). Une méthodologie originale a été mise au point et peut être utilisée pour rendre compte de certaines propriétés du sol vis-à-vis de molécules de pesticides, en particulier selon l'état hydrique initial du sol avant réhumectation.

- **Pollution à l'échelle du territoire**

La cartographie du risque de contamination a été établie pour les deux îles.

A la Martinique (étude BRGM/RP53262-FR, septembre 2004), la cartographie a été établie selon les critères croisés suivants :

- Absence, ou présence de bananeraies avant 1970, entre 1970 et 1995 moins de 10 ans, 10 à 20 ans ou plus de 20 ans dans cette période (soient 12 400 Ha pour la présence durant la période de disponibilité de Képone et Curlone).
- Teneurs en matières organiques associées aux types de sols.
- Risque d'infestation par le charançon, et donc probabilité d'intensité de traitement, fonction croissante de la pluviométrie.

D'une manière plus pragmatique, après validation par 1 400 analyses obtenues dans le cadre de l'arrêté préfectoral sur les cultures de « racines », deux zones peuvent être définies pour la Martinique :

- Zone "indemne" sans passé bananier dans la période chlordécone :
 - 80% de chance que la teneur en chlordécone du sol soit nulle.
- Zone "contaminée" à cause d'un passé bananier dans la période chlordécone:
 - 80% de risque que la teneur en chlordécone du sol soit non nulle.

A la Guadeloupe, la cartographie du risque de contamination vient d'être achevée par la DAF-SPV, en collaboration avec l'INRA.

Le zonage du risque a découlé d'un recoupement des parcelles cadastrales avec les bananeraies identifiées sur les cartes IGN de 1969 (1/ 20 000^e) et de 1987 (1/ 25 000^e), à partir de photos aériennes de 1968 et 1985 respectivement, et cartographiées au GPS par la DAF en 1997.

Quatre catégories de risque de contamination ont été distinguées :

- Très fort Bananeraies en 1968 et 85, ou 1985 et 97, ou aux 3 dates (périodes Képone et Curlone)
- Fort Bananeraies en 1985 ou 97 (période Curlone partielle)
- Faible Bananeraies en 1969 (ont pu connaître le début du Képone)
- Négligeable Bananeraie à aucune des dates

La modulation des apports en fonction du risque d'infestation n'a pas été envisagée. L'analyse des « incursions bananières » dans le nord-est de la Basse-Terre a confirmé le bien fondé de cette approche : malgré la nouveauté et la faible durée des cultures bananières (1982 à 1986), les apports à la parcelle ont été immédiats et systématiques (Perrault, 2005). Sur l'ensemble de la Guadeloupe, une seule grande exploitation a, semble t'il, modulé les apports en fonction du degré d'infestation des bananiers par les larves de charançon, mais insuffisamment pour que les teneurs les plus faibles ne soient déjà notables. Sur cette exploitation, les maximums enregistrés sur les andosols sont conformes au modèle d'éluvion après des apports réguliers, et le maximum enregistré sur les sols brun-rouille, à faible distance des andosols, confirme la moindre capacité de ces derniers à retenir la chlordécone.

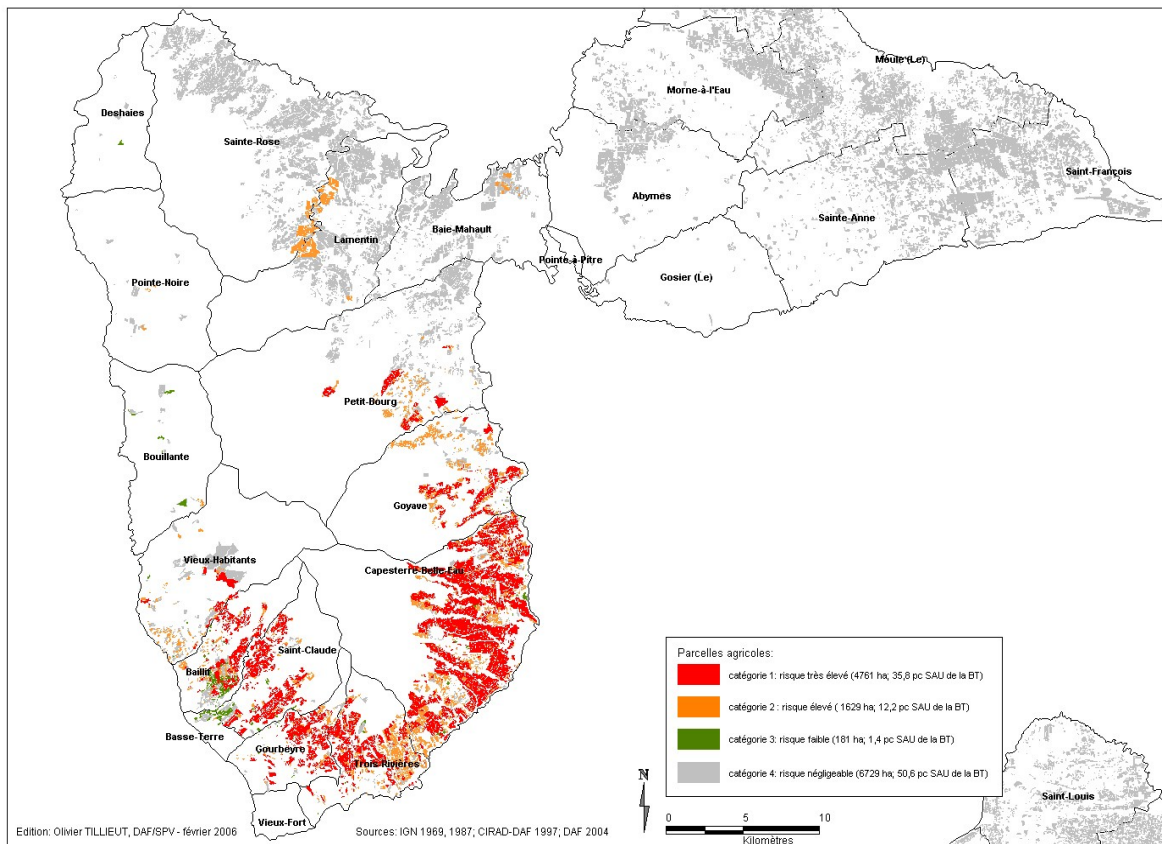


Figure 8 : Carte du risque de contamination des sols par la chlordécone à la Guadeloupe (DAF-SPV – INRA 2006)

Les analyses (couche 0-30 cm) réalisées dans le cadre des plans de surveillance SPV de l'arrêté préfectoral de 2003 et des opérations de recherche valident cette approche pour la Basse-Terre de Guadeloupe.

Il ressort que 85% des parcelles analysées montrent une contamination moyenne à forte dans la zone de risque très fort, et qu'à l'opposé 99% des parcelles sont non ou très peu contaminées dans la zone à risque « négligeable ». Ces pourcentages concernent plus de 1600 analyses de parcelles dont 1000 effectuées sur la Basse-Terre. La Grande-Terre peut être considérée globalement comme indemne, les quelques traces détectées étant imputables à la dégradation en chlordécone de Mirex, utilisé alors contre la « fourmi manioc ».

Les données d'analyses obtenues par les chambres d'agriculture, suite aux déclarations d'intentions de culture vivrière peuvent difficilement servir à une estimation des surfaces réellement contaminées. Il est impossible d'extrapoler les distributions des valeurs de contaminations obtenues à celle des surfaces en bananeraies depuis la période « chlordécone ». On ne connaît pas la proportion des parcelles actuellement candidates aux cultures vivrières qui étaient en bananeraies à l'époque « chlordécone », ni celle des parcelles qui n'ont jamais été en bananeraie. Depuis la mise en œuvre des arrêtés préfectoraux jusqu'à ce jour, la proportion d'analyses négatives a augmenté, traduisant une prise de risque décroissante. Seule une approche grossière est possible : on peut raisonnablement considérer qu'une parcelle analysée comme contaminée a connu un passé bananier avec application de chlordécone. Dès lors, la proportion des parcelles

contaminées au dessus d'un seuil donné sur le total des parcelles contaminées peut approcher la proportion des surfaces contaminées dans les zones à risque non nul. Les valeurs ainsi obtenues (tableau 4) sont des majorants, car elles ont été calculées en supposant que toutes les bananeraies présentes à l'époque où la chlordécone était disponible en ont reçu.

Tableau 4 : Estimation de majorants des surfaces contaminées par la chlordécone (CLD) dans les deux départements

	Surface agricole utile (ha)	Surfaces en bananeraies pendant les années 1970 à 1993 (ha)	% d'analyses >0.25mgCLD/kg* /analyses positives	Majorant de la surface moyennement à fortement contaminée (ha) <i>%SAU</i>	% d'analyses >1mgCLD/kg** /analyses positives	Majorant de la surface fortement contaminée (ha) <i>%SAU</i>
Guadeloupe continentale Analyses CDA >0 03/2006 (n = 600)	34500	6570	79	5200 15%	47	3100 9%
Martinique Analyses CDA > 0 03/2006 (n = 800)	32000	12400	50	6200 19%	20	2510 8%

* Limite « sol » garantissant une teneur dans les végétaux < 0.05 mg/kg pf, LMP AFSSA (2005) basse.

** Limite « sol » garantissant une teneur dans les végétaux < 0.20 mg/kg pf, LMP AFSSA (2005) haute.

Les pourcentages, plus faibles à la Martinique, de sols contaminés dépassant chacun des seuils peuvent s'expliquer par une plus forte dilution de la chlordécone par des labours profonds.

Il existe une forte disparité entre les communes : dans les croissants bananiers du sud-est de la Basse-Terre de Guadeloupe et du nord-est de la Martinique, on pourra dépasser 50% de surfaces agricoles moyennement à fortement contaminées.

Seule une cartographie directe, incluant les parcelles bananières, permettra d'obtenir une image exacte des surfaces contaminées, et une bonne estimation des surfaces en référence aux seuils. Elle impliquera un inventaire analytique de la contamination des sols forcément très onéreux. Des pistes de diagnostic rapide par détection indirecte pourraient être explorées, si une cartographie précise de la contamination des sols était nécessaire.

Pour les deux départements, le croisement des cartes de risque et des données d'analyses de sol obtenues dans l'application des arrêtés préfectoraux permet d'estimer des majorants des surfaces moyennement et fortement contaminées par la chlordécone (> 0.25 mg/kg sol sec) à 5 200 ha (15% de la SAU de 34 500 ha pour la Guadeloupe « continentale », 11% de la SAU de l'archipel guadeloupéen) et à 6200 ha (19 % de la SAU de 32 000 ha) pour la Martinique.

- **Transfert et relation sol / organe souterrain récolté pour la molécule de chlordécone**

Du fait des contaminations des productions de racines et tubercules, et d'une première hypothèse d'une contamination par contact, les expérimentations et les contrôles mis en place se sont concentrés sur les cultures de dachine (=madère), d'igname et de patate douce (65 % des analyses réalisées, toutes denrées alimentaires confondues en juillet 2005).

Un des objectifs des expérimentations récentes a été de prédire, à partir de l'analyse de la teneur en chlordécone du sol, la teneur dans la plante (racine ou tubercule en l'occurrence). Les premiers résultats montrent une grande variabilité de la réponse de la plante expliquée probablement par la grande hétérogénéité de la contamination du sol. Un sol indemne permet d'obtenir des productions indemnes. Les productions végétales étudiées ne montrent pas de bioconcentration du pesticide dans la plante, et en général pour les racines et tubercules, le taux de contamination des organes récoltés (en matière fraîche) n'est pas supérieur à 1/5 de la teneur en chlordécone du sol au contact des racines (figure 9). La contamination maximale observée pour les tubercules correspond à une substitution massive sol/organe souterrain (en matière sèche). Cela signifie qu'aucune des plantes mentionnées ne peut permettre une phyto-remédiation efficace.

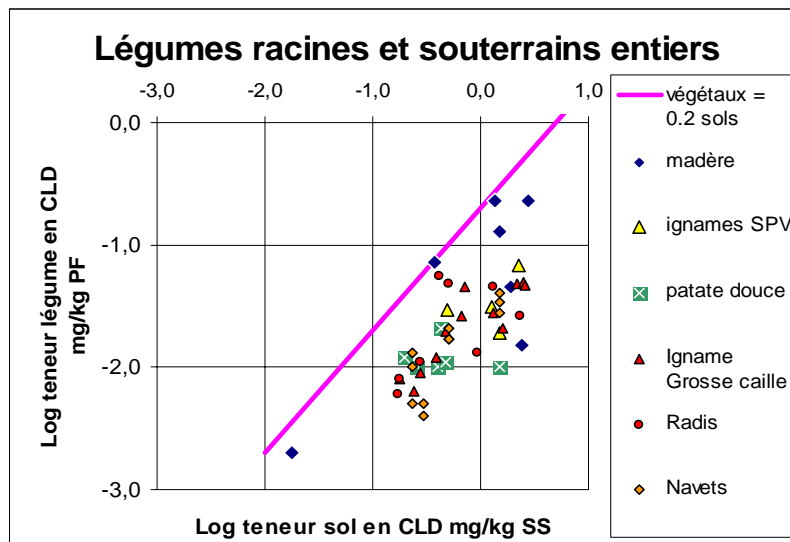


Figure 9 : Relation entre la teneur du sol en chlordécone et la teneur dans les racines et tubercules (Guadeloupe) (YM Cabidoche, 2005)

Les relations entre contamination des sols et contamination des « légumes racines » sont meilleures lorsqu'on analyse la terre au contact immédiat (épaisseur 2 à 4 cm) des organes souterrains récoltés. Ceci renforce l'hypothèse d'une contamination des « légumes racines » principalement par contact (figure 10).

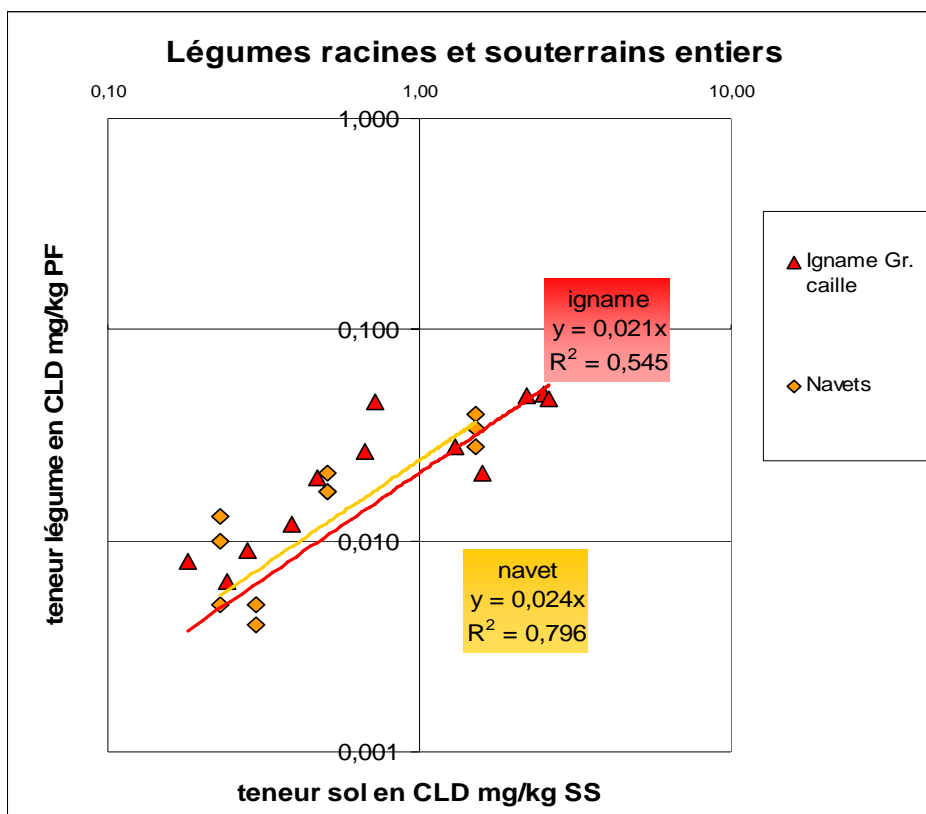


Figure 10 : Relation entre niveau de contamination du sol et niveau de contamination dans la plante pour les ignames et les navets

Cette hypothèse de contamination par contact a été vérifiée expérimentalement sur l'igname *Dioscorea cayenensis* c.v. « Grosse Caille » : si le tubercule se développe dans du sol sain alors que son enracinement explore un sol contaminé, il n'est que très faiblement contaminé (figure 11).

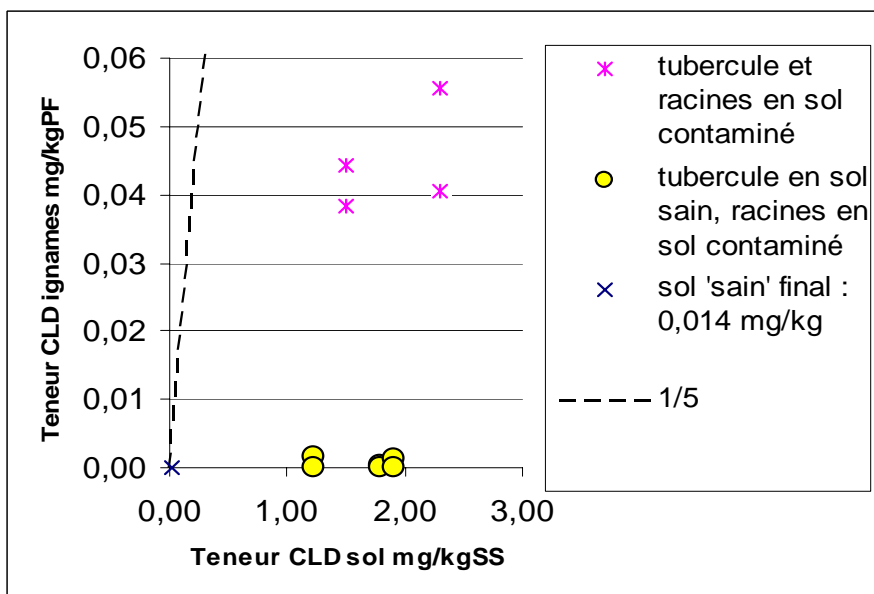


Figure 11 : Essai «split-root» sous serre, test de l'hypothèse de contamination par contact de l'igname

On a pu noter une convergence des contaminations relatives plante/sol pour des « légumes racines » aussi différents que le radis, le navet, la patate et l'igname « Grosse Caille ». L'hypothèse d'une contamination, d'autant plus forte que le rapport surface latérale/volume et le temps de contact (durée de croissance) sont élevés, permet de proposer un modèle

unique de contamination relative sol-«racine» (figure 12). Ceci permet de comprendre pourquoi les madères (dachines) sont souvent les plus contaminés : leur taille est moyenne, mais leur forme biconique offre une importante surface d'échange, et le temps de croissance des bulbes est long. La cive se comporte de manière analogue, par sa petite taille et sa forme tronconique à section étroite.

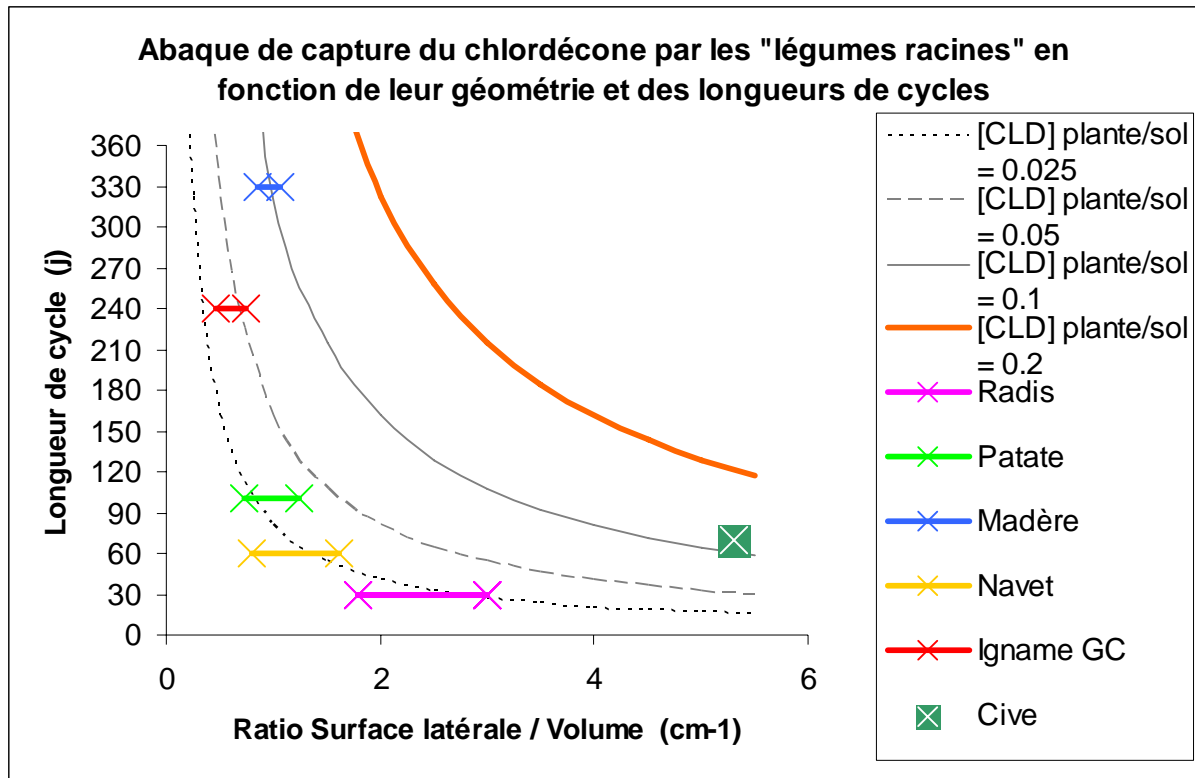


Figure 12 : Abaque de capture de la chlordécone par les racines

- Contamination de parties aériennes de plantes

D'après les quelques références existant dans la bibliographie (S. Guimont, 2006), 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) a été étudié dans un système de laboratoire fermé (Topp *et al.*, 1986). 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}).

Canne et ananas

Pour autant, des contaminations significatives des organes aériens ont été mises en évidence en Guadeloupe sur des sols fortement contaminés (cas de la base de la canne à sucre et des fruits d'ananas).

Pour les parties aériennes, la contamination via le système racinaire n'est donc pas à exclure, ne serait-ce que par diffusion passive. Elle concerne des organes :

- soit très proches des racines (premiers entre-nœuds de canne, apparemment plus contaminés sur les rejetons, nourris par un système racinaire pré-installé),
- soit comportant une longue phase de formation et remplissage à faible distance du

sol (ananas).

Plantes rampantes

Dans le cas de la patate douce, plante à stolons rampants émettant à chaque nœud un bouquet foliaire et un bouquet racinaire contenant le tubercule, des contaminations de feuilles ont été observées (figure 13).

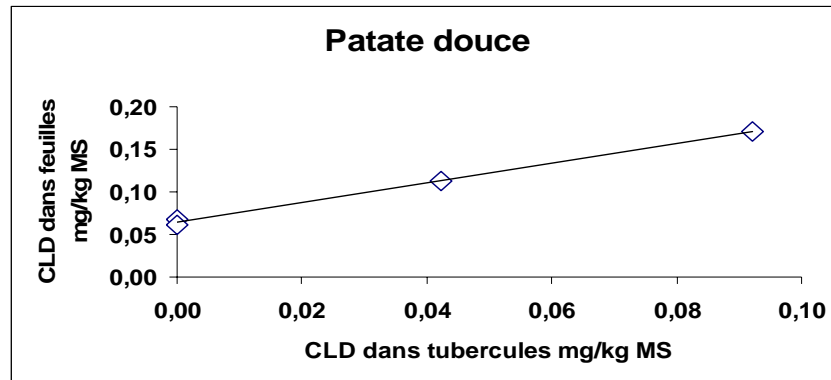


Figure 13 : Relation entre la contamination des organes souterrains et la contamination des organes aériens pour la patate douce.

Cette contamination des feuilles de plantes rampantes (notamment *Ipomea* sp.) alerte sur le risque de voir contaminés les animaux des basse-cours, souvent nourris avec ces feuillages.

Fruits aériens

Une première prospection a concerné les fruits éloignés de plusieurs mètres du sol sur le trajet de sève développé : un pamplemousse de branches basses et deux premières mains de banane ont montré des teneurs légèrement au-dessus du seuil de quantification (0.012, 0.017 et 0.012 mg/kg respectivement). Pour le reste, sur un andosol fortement contaminé de jardin créole arboré (6.5 à 12.2 mg/kg), aucune contamination quantifiable n'a été notée dans les fruits, comme le montre le tableau 5.

Divers fruits analysés : n=5, étages les plus bas

Espèce	Organe	Chlordécone mg/kg	HCH Beta mg/kg
AVOCAT	pulpe	<0,001	<0,001
AVOCAT	peau	<0,001	<0,001
CARAMBOLE	entier	<0,001	<0,001
CHRISTOPHINE	pulpe	<0,001	<0,001
CHRISTOPHINE	peau	<0,001	<0,001
CITRON	pulpe	<0,001	<0,001
CITRON	peau	<0,001	<0,001
PRUNE DE CYTHERE	pulpe	<0,001	<0,001
PRUNE DE CYTHERE	peau	<0,001	<0,001
GOYAVE	pulpe	<0,001	<0,001
GOYAVE	peau	<0,001	<0,001
NONI	entier	<0,001	<0,001
ORANGE	pulpe	<0,001	<0,001
ORANGE	peau	<0,001	<0,001
POMME CANNELLE	pulpe	<0,001	<0,001
POMME CANNELLE	peau	<0,001	<0,001
CACAO	pulpe	<0,001	Présence
PAPAYE	pulpe	<0,001	<0,001
PAPAYE	peau	<0,001	<0,001
CERISE PAYS (ACEROLA)	entier	<0,001	<0,001
MANGUE	pulpe	<0,001	<0,001
MANGUE	peau	<0,001	<0,001

**Tableau 5 : Bilan des analyses réalisées dans les fruits d'un jardin créole
Andosol, chlordécone = 9,4 mg/kg de sol sec (décembre 2005)**

La voie de contact n'est donc pas l'unique voie de contamination des végétaux par la molécule de chlordécone. La diffusion peut s'exercer via les systèmes racinaires, et contaminer des organes aériens, apparemment d'autant plus fortement que ceux-ci seront proches du sol et longs à se former.

Contaminations maximales d'organes végétaux commercialisés enregistrées (tableau 6)

Produits non pelés (analysés entiers)	Contamination maximale observée (janvier 2006) mg/kgPF	Contamination sol mg/kg SS
Racines et tubercules		
o Igname	0.069	2.25
o Madère	0.230	1.40
o Patate douce	0.300	2.25
o Navet	0.040	1.51
o Radis	0.055	0.41
Fruits		
o Ananas	0.160	1.88
o Banane (première main)	0.017	3.40
o Goyave	Présence, < 0.01	9.30
o Pamplemousse	0.012	13.90
Légumes		
o Concombre	0.012	?
o Cive	0.120	1.43
Canne à sucre (2 premiers entre-nœuds)	0.690	7.70
Fourrages		
o <i>Axonopus</i> sp. (« gazon »)	< 0.001	3.50
o <i>Pennisetum purpureum</i> (« Merker »)	0.006 (feuilles), 0.070 (tige)	5.60
o <i>Ipomea</i> sp. (« manjé lapin »)	0.014	0.43

Tableau 6 : Contamination maximale observée pour différentes productions en lien avec la contamination du sol (données disponibles en décembre 2005)

La gamme réduite des productions analysées (plus de 65 % des analyses réalisées sur racines et tubercules, cf rapport Afssa 2005) limite les interprétations et la généralisation de la compréhension des transferts sol/plante pour cette molécule. Cela implique un élargissement de cette gamme, en donnant la priorité :

- ▶ aux productions fortement consommées localement (entraînant un risque d'exposition le plus élevé) à savoir :
 - les bananes, y compris la banane plantain
 - les cucurbitacées (concombre, giraumon, melon, pastèque, courgette),
 - les solanées (tomate, aubergine, piment)

- ▶ aux productions ayant un fort impact socio-économique :
 - la banane dessert
 - l'ananas
 - la canne à sucre

- ▶ aux productions envisageables pour une reconversion agricole :
 - les arbres fruitiers en général
 - les fourrages

- **Interprétation des résultats analytiques**

Les échantillons analysés ne représentent pas l'ensemble des productions antillaises sur sols contaminés : en premier lieu, les moyens ont été ciblés sur des prélèvements de racines et de tubercules (plus de 65 % des analyses, justifiées par les contaminations détectées), alors que d'autres productions (légumes et fruits) ont été très largement sous-échantillonnées (moins de 15 % toutes productions confondues). Certaines formes de productions, les productions informelles ou familiales, échappent à ces prélèvements. L'ensemble des résultats analytiques disponibles n'est actuellement pas suffisant pour évaluer la contamination possible par type de production agricole des zones contaminées.

La seconde difficulté pour comparer les résultats analytiques porte sur l'hétérogénéité dans la méthodologie utilisée pour prélever et préparer les échantillons. Pour les différents services, ces méthodes diffèrent en fonction de leurs objectifs (recherche, surveillance et évaluation du risque, contrôle), de leurs références réglementaires et du choix du laboratoire. Dans le cas des racines et tubercules, on observe donc des analyses réalisées sur du matériel végétal brut, lavé ou non, épluché ou non, avec différents types de conditionnement (expédition en frais du lot prélevé, ou broyage et congélation d'un composite).

Il faut cependant souligner que le référentiel de teneurs de végétaux exploité par l'AFSSA pour définir les LMP a concerné des organes récoltés entiers, non épluchés (correspondant aux règles de fixation des LM de pesticides). Cela offre une sécurité supplémentaire, car dans le cas des « racines », les pulpes consommées après épluchage apparaissent moins contaminées que les épluchures (épaisseur 1 à 3 mm). Dans le cas de l'igname, les pulpes sont dix fois moins contaminées que les épluchures (figure 14).

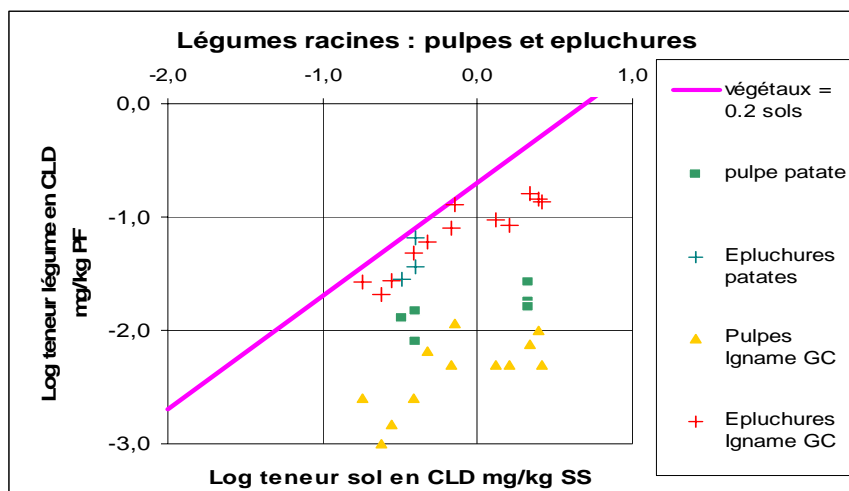


Figure 14 : Contamination différenciée (pulpe, partie épluchée) pour l'igname en fonction de la contamination du sol en chlordécone.

Enfin des difficultés d'identification de l'échantillon par les laboratoires sont à noter. Un minimum d'informations devrait accompagner l'échantillon :

- contexte,
- objectif,
- nature,
- gamme de teneurs attendue lorsque cela est possible.

La fiabilité du résultat de l'analyse est également un facteur important dans la comparaison des résultats. Elle dépend directement de :

- la qualité du prélèvement,
- la répétabilité des résultats obtenus par le laboratoire,
- la sensibilité de la méthode utilisée,
- la cohérence des résultats entre lots pour un même laboratoire, et entre laboratoires pour un même lot.

Toutes les analyses n'ayant pas été réalisées par le même laboratoire, ni même avec les mêmes techniques (extraction, identification, quantification), il est difficile de pouvoir comparer toutes les données. En accord avec l'ensemble des participants, un protocole commun d'échantillonnage et de préparation des échantillons a été validé lors de l'atelier d'octobre 2005.

De nouvelles techniques analytiques innovantes sont actuellement testées (Solid Phase Micro Extraction) sur l'eau et les plantes contaminées (M. Lebrun et H. Calba, 2005). Cette technique permettrait de faciliter la manipulation des échantillons et de diminuer les temps d'extraction (analyse sur l'échantillon brut broyé) et de mesure. Les premiers résultats sont prometteurs (bonne sensibilité, fiabilité de la détection), mais la méthode est à affiner et valider pour différentes matrices analysées (test de répétabilité, standardisation des conditions de mesure, ...).

2. Enjeu santé suivant la pollution

a) Sol

L'enjeu santé direct porte sur les populations manipulant les sols contaminés, en particulier les producteurs et les ouvriers agricoles. Ces aspects sont traités par les études Inserm en cours.

L'essentiel de l'enjeu est ensuite indirect : le sol pouvant contaminer l'eau et les denrées. Un point particulier est à noter en ce qui concerne l'ingestion de particules de sol par les animaux (pâture, basse-cour, ...).

b) Eau

La pollution des eaux de consommation peut être résolue techniquement (filtres à charbons, dilution ou fermeture des captages). Ces solutions sont mises en œuvre depuis 2000 sur les deux îles. L'eau est donc conforme aux standards sanitaires et sa consommation est sans impact sur la santé depuis cette date. La DSDS de Guadeloupe annoncent 99 % de non-détection sur les eaux potabilisées, les rares quantifications ayant concerné des filtres à charbon saturés, immédiatement remplacés.

c) Denrées

- **Jardins familiaux, agriculture informelle**

Ce secteur est propice aux faux-semblants : selon une image tenace, on a tendance à le réduire au « jardin créole », avec une destination immédiate d'autoconsommation. S'il est vrai qu'il aboutit à une autoconsommation partielle, il comporte une grande part d'échanges de proximité et de commercialisation dans le circuit des boutiques et des marchandes de bord de route, sans aucune traçabilité (Sautereau, 1995). La contamination des produits de l'agriculture informelle, à ce jour très peu connue, est donc difficile à préciser, à moins de réaliser des prélèvements sur sites de production.

Deux secteurs particuliers d'agriculture informelle sont à surveiller de près :

- Les petites exploitations vivrières-maraîchères : de dimensions trop petites pour être identifiées dans le cadre des RGA, non inscrites à l'AMEXA, elles peuvent localement représenter des potentiels de commercialisation spécialisée non négligeables en produits maraîchers ou condiments. A titre d'exemple, les zones de production maraîchères spécialisées de Matouba-Papaye en Guadeloupe et Morne Vert en Martinique ont été « cernées » par les bananeraies recevant la chlordécone, assortie d'une réputation d'efficacité anti-insectes. Les contrôles effectués sur la zone maraîchère de Matouba-Papaye, dans le cadre d'une étude financée par la Région Guadeloupe, sont encourageants : sur 20 parcelles analysées, aucune n'a montré une contamination par la chlordécone (Carduner et Cabidoche, 2005) ;
- les cultures maraîchères interstitielles des bananeraies : les producteurs bananiers de Guadeloupe semblent autoriser, en échange d'une flexibilité de main d'œuvre, des travailleurs étrangers à exploiter des cultures maraîchères en inter-rang des bananiers. Ces cultures ont une vocation commerciale diffuse et volatile, dans la tradition de ces populations immigrées. Réalisées sur des sols fortement contaminés, elles comportent probablement des organes végétaux commercialisés dépassant les LMR.

D'une manière générale, l'approche des risques de contamination des végétaux issus de l'agriculture informelle gagnera à être renseignée sur l'historique de la tenure foncière : les jardins créoles de subsistance post-abolition de l'esclavage, les « concessions » attribuées lors de la seconde guerre mondiale (« temps Saurin » et « temps Robert »), ne sont *a priori* pas suspects d'une contamination autre que sporadique. Ces terres ont toujours fait l'objet d'une exploitation traditionnelle, fondée sur des transferts internes de fertilité et des régulations biologiques.

La donne est toute autre concernant la cession du foncier ou l'autorisation d'exploitation récente, pour de petits agriculteurs, sur des terres marginales (difficilement mécanisables) des bananeraies intensives des années 1971-1993. La reconversion de ces terres vers des cultures vivrières aboutit à des organes souterrains récoltés contaminés, les sols étant implacablement contaminés. Il est probable que la Martinique soit plus concernée par cette trajectoire que la Guadeloupe.

- **Utilisation des limites maximales (LM) provisoires définies par l'AFSSA**

- *Remarques sur les calculs et l'utilisation des LM*

Les LM ont été calculées avec des données de la consommation de la population martiniquaise, elles devront être vérifiées pour la population guadeloupéenne (résultats disponibles mi 2006) et précisées ultérieurement en intégrant les modes d'approvisionnement des produits (étude RESO). Les LMP seront, si nécessaire, affinées à partir des nouvelles données de contamination actuellement en cours de recueil dans le cadre d'une enquête CIRE/AFSSA, assurant une meilleure représentativité des analyses (étude RESO).

La LMP restrictive sur le melon pose peut-être le problème de la consommation saisonnière de certains produits (dans ce cas précis, forte consommation de melon lors de l'enquête de consommation). Cependant, une attention particulière devrait être portée sur la **consommation de cucurbitacées** qui peut être élevée, les cucurbitacées ayant par ailleurs des propriétés de bioconcentration pour certains pesticides (voir chap B 5.).

L'interaction entre plusieurs molécules n'a pas été prise en compte (difficultés méthodologiques sur la prise en compte des effets d'exposition cumulée à plusieurs pesticides à faible dose) et en particulier l'interaction chlordécone – β HCH, résidus que l'on

peut retrouver dans différentes proportions pour certaines plantes, même si la détection de β HCH est rare.

- o *Aspects réglementaires au niveau national et européen*

- **Situation antérieure au mois d'octobre 2005**

Les pesticides à base de chlordécone n'étant plus commercialisés en France et dans l'U.E. depuis longtemps, il n'existait aucune valeur de référence communautaire définissant des limites maximales de résidus dans les produits alimentaires. Dans ce cas, la règle en vigueur est la tolérance zéro et l'application du principe de précaution. La limite de détection analytique est utilisée pour juger de la présence ou non de chlordécone dans les produits alimentaires solides (0,01 mg/kg). La mise en œuvre s'est traduite par deux arrêtés préfectoraux (20 mars 2003 en Martinique et 20 octobre 2003 en Guadeloupe).

- **Situation depuis le mois d'octobre 2005**

En août 2005, l'Afssa a proposé deux limites maximales provisoires (LMp) de contamination en chlordécone dans les principaux aliments vecteurs :

- 50 μ g/kg pour les dachines (madères), ignames, patates douces, carottes, melons, concombres, tomates et les viandes de volaille,
- 200 μ g/kg pour tous les autres aliments.

En France, ces références ont été reprises dans deux projets d'arrêté ministériel concernant respectivement les productions d'origine animale et végétale.

En septembre 2005 et conformément à la directive 98/34/CE, les autorités françaises ont notifié à la Commission les projets d'arrêtés susmentionnés suivant une procédure d'urgence, risque lié à une pollution résiduelle des sols, prévue au paragraphe 7 de l'article 9.

La Commission a considéré que l'invocation de l'urgence était fondée. Cette acceptation de l'urgence ne préjuge pas de son appréciation sur la compatibilité des arrêtés français avec le droit communautaire. Le dossier Chlordécone a été présenté au groupe de travail du Comité Permanent de la Chaîne Alimentaire et de la Santé Animale (CPCASA) pour une inscription de ce pesticide à l'Annexe III du règlement (CE) 396/2005 (catégorie polluant). Au préalable, les LM proposées par l'AFSSA devront être validées par l'EFSA.

Il ne peut être préjugé des conclusions définitives du Comité sur ce dossier.

D'après les informations fournies par les services juridiques du Ministère de l'Agriculture, en l'absence de leur rejet formel par la Commission Européenne, les arrêtés ministériels :

- s'appliquent à l'ensemble du territoire français,
- ne s'appliquent pas aux autres pays de la Communauté européenne, ni aux pays tiers qui conservent leurs références nationales spécifiques : 10 μ g/kg pour l'Allemagne et tolérance zéro (seuil de détection analytique fixé également à 10 μ g/kg) pour les autres Etats membres.

La présentation officielle du dossier auprès du CPCASA par la France le 21 octobre 2005 initie la procédure. Avec la remise des conclusions du CPCASA, une procédure d'harmonisation s'appliquera à tous les pays européens. Selon l'acceptation ou non des LM proposées par

l'AFSSA, cela se traduirait par l'adoption au niveau communautaire des valeurs de références suivantes :

- en cas de rejet par la Commission, le chlordécone et les LM ne figureraient pas à l'Annexe III de la directive (CE) 396/2005. La référence tolérance zéro deviendrait la règle unique dans tout l'espace économique européen.
- en cas de validation par la Commission, la chlordécone et les LM figureraient à l'Annexe III de la Directive (CE) 396/2005. Ces LM seraient la référence commune.

o *Les LMsol comme outil de gestion du risque pour les produits mis en marché*

Les Limites Maximales provisoires dans les denrées peuvent être traduites en Limites Maximales dans les sols (lien existant entre teneur en chlordécone du sol et teneur en chlordécone de la plante). Les LMsol pourraient, à moyen terme, être utilisées comme outil de gestion du risque de contamination des produits agricoles et d'exposition des populations (évaluation et conseil). Cet outil permettrait d'**anticiper le risque de contamination avant la mise en culture**.

Les LMsol ne pourront être utilisées comme outil de gestion du risque qu'à la condition de la reconnaissance et l'acceptation, au niveau européen et international, des limites proposées par l'AFSSA sur les denrées alimentaires. Cela ne préjuge en rien de la politique commerciale de certains importateurs.

Une **première traduction** proposée pour l'utilisation des LM en mesures d'accompagnement réglementaires (évaluation et contrôle de la contamination) conduit à mettre en place le dispositif suivant :

- L'analyse de sol est obligatoire pour une zone de culture contaminée :
 - En Guadeloupe : zone banane et plantain entre 1971-1993.
 - En Martinique : zone de bananeraies présentes entre 1971 et 1993, et zone (à cartographier) de présence de vergers d'agrumes (environ 500 ha) dans les mêmes années, car des détournements d'usage ont été avérés sur certains de ces vergers.
- Théoriquement et avec les données actuelles, on n'observe pas dans la plante des teneurs supérieures aux LM de 0,2 mg/kg de MF et 0,05 mg/kg de MF pour des teneurs sols inférieures à respectivement 1 mg/kg et 0,25 mg/kg (figure 15).
- L'analyse finale de la production est obligatoire pour des teneurs du sol > 0,25 mg/kg.

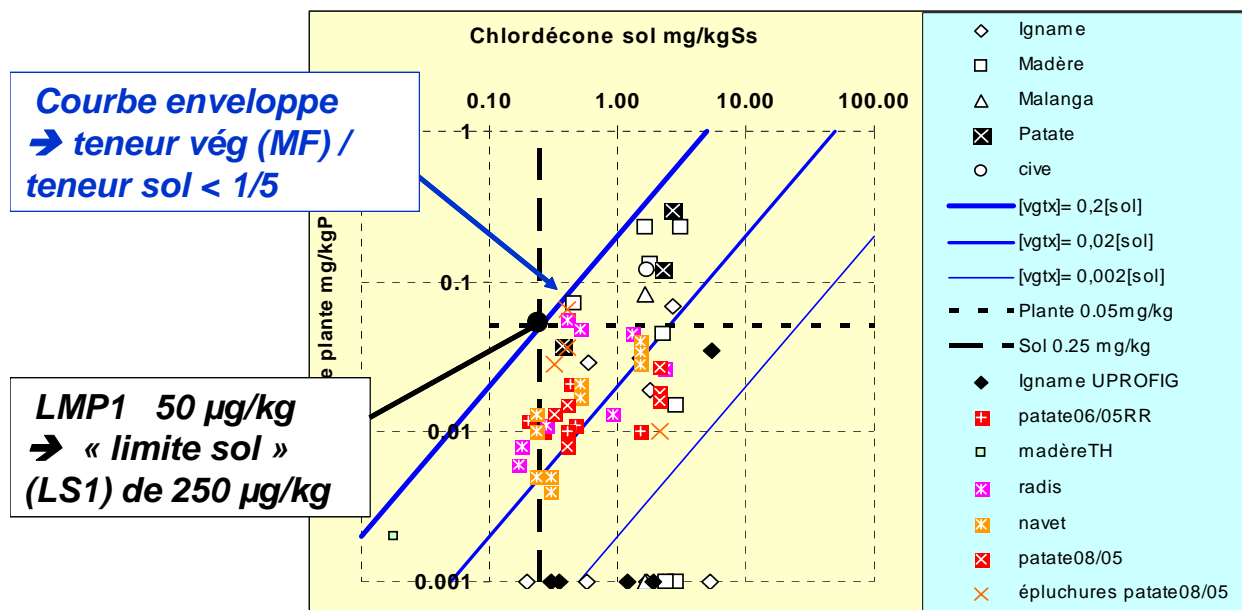


Figure 15 : Evaluation de la contamination des cultures et utilisation des LM (YM Cabidoche)

Ce dispositif, fondé sur une meilleure connaissance du risque suite à la production des LM provisoires par l'AFSSA, permettrait une meilleure gestion, tout en étant moins contraignant pour les agriculteurs que le dispositif actuel, sans en entamer l'efficacité reconnue pour le contrôle de la contamination des racines et des tubercules.

La traduction en mesure de conseil aux producteurs est plus délicate, elle suppose l'élaboration de référentiels locaux par culture de la probabilité de contamination de la plante.

B. Connaissances restant à acquérir

1. Chimie de la molécule

La chlordécone, molécule ancienne qui n'est aujourd'hui plus utilisée, n'a pas fait l'objet de travaux spécifiques en conditions tropicales (travaux de chimie et de toxicité réalisés essentiellement par les Etats-Unis détenteurs du brevet). Globalement, peu de littérature est disponible sur le comportement de la molécule de chlordécone, or les données biochimiques et physico-chimiques sont essentielles pour la compréhension des phénomènes de transformation, de liaison et d'affinité de la molécule et de leurs complexations possibles. Les paramètres disponibles ne suffisent pas à expliquer le comportement observé *in situ* de la molécule. Des questions se posent donc sur les différentes formes de la chlordécone, sur leurs affinités respectives, sur les conditions de leur formation, sur leur réactivité, afin d'expliquer les différences de rétention et de relargage observées dans les sols, les fortes teneurs mesurées dans l'eau et les plantes, ...

Des informations plus fines, en particulier sur la forme hydratée de la molécule de chlordécone, sont nécessaires : conditions physico-chimiques d'hydratation, stabilité de la forme hydratée, affinité pour l'eau, les molécules lipidiques, ...

2. Dynamique dans les différents sols

Les résultats hétérogènes obtenus sur les teneurs moyennes en chlordécone du sol et leur distribution à l'échelle de la parcelle, pour les différents types de sols rencontrés en Guadeloupe et en Martinique, obligent à :

- préciser les paramètres physiques et chimiques de chaque sol, notamment la nature des relations organo-minérale et les phases de production de matières organiques hydrosolubles, et à les mettre en relation avec les propriétés de la molécule ;
- vérifier l'influence de l'état hydrique du sol sur la mobilisation de la molécule ;
- formaliser les mécanismes de sorption et désorption de la molécule de chlordécone sur les différents complexes du sol ;
- analyser la distribution centimétrique de la teneur en chlordécone dans le sol ;
- vérifier que la contamination par les eaux d'irrigation issues de bassin versant contaminé est circonscrite.

3. Dynamique du transfert sol/plante

Sur ce volet, là encore peu de références sont disponibles. Les premiers résultats indiquent qu'il faut vérifier l'influence du type de sol et de son état hydrique, ainsi que l'influence du type de plante (hypothèse de comportement différencié selon les espèces mais également selon les variétés, notamment chez les cucurbitacées pour leur affinité à d'autres pesticides).

De nombreuses interrogations subsistent sur la physiologie du prélèvement par la racine, et en particulier :

- Quel type d'interactions existe-t-il entre la racine et la molécule de chlordécone ?
- Sous quelle(s) forme(s) et sous quels facteurs la molécule est-elle plus ou moins biodisponible pour la plante ?
- Quelle est la voie de pénétration de la molécule dans la racine ?

4. Dynamique dans la plante

La contamination dans la plante est vérifiée pour les racines et tubercules, mais l'hypothèse initiale de contamination par simple contact avec un sol contaminé n'est plus la seule plausible car des organes aériens révèlent également dans certains cas une teneur en chlordécone non nulle.

Une tendance semble se dégager : dans les organes d'accumulation glucidique récoltés, les premières parties formées et remplies sont les plus contaminées, les dernières formées demeurant indemnes (identifié sur igname, ananas, canne).

Actuellement, la voie de contamination des organes aériens doit être identifiée. Des interrogations subsistent sur le mode de transport de la chlordécone dans la plante. S'agit-il d'une translocation par la voie apoplasmique (espaces intercellulaires) ou par la voie symplasmique (communication(s) entre cytoplasme des cellules) ? Existe-t-il des voies de circulation privilégiées dans l'arbre (phloème/xylème/...) ?

La synthèse bibliographique réalisée à propos de la chlordécone (Guimont, 2006) et divers échanges lors du colloque national « pesticides » du MEDD (Avignon, nov. 2005) montrent la vacuité du champ de connaissances sur le sujet des relations pesticides/plante, y compris pour des pesticides actuellement utilisés en Europe.

Les données actuelles ne peuvent nous renseigner sur :

- la répartition/l'allocation de la molécule entre les différents organes,
- la cinétique d'accumulation dans des organes de stockage qui, pour certaines plantes, peuvent être spécifiques,
- les effets sur certaines fonctions physiologiques de la plante (exsudation racinaire, transpiration) contribuant au transport de la molécule.

La variabilité intraparcelle de la teneur en chlordécone et la distribution de la molécule dans les plantes doivent être approfondies. La gamme des plantes analysées doit être élargie.

5. Phytoremédiation des sols pollués par des molécules persistantes

Plusieurs techniques ont été mises au point en vue de décontaminer les sols ayant accumulé des polluants d'origines diverses. Malheureusement, ces techniques (extractions par solvant, incinération, ...) sont souvent coûteuses et destructrices. En parallèle, une autre technique peu coûteuse, présentant des avantages esthétiques et une applicabilité à long terme a fait son apparition dans les années 1990, il s'agit de la **phytoremédiation**. Le principe est l'utilisation de la végétation pour le traitement *in situ* de sols, de sédiments, d'eau contaminés et s'applique aux sites contenant des polluants organiques ou inorganiques (métaux, nutriments) qui peuvent être atteints par les racines des plantes et séquestrés, dégradés, immobilisés ou métabolisés sur place. Parmi les limites de cette technologie, on relève

l'introduction potentielle du contaminant ou de ses métabolites dans la chaîne alimentaire, les temps longs nécessaires pour atteindre des niveaux de pollution "acceptables", et la toxicité encourue par le maintien de la végétation sur les sites pollués. La technique de prélèvement/translocation par les plantes est l'une des voies de phytoremédiation des sols contaminés par des molécules organiques. Elle est illustrée dans la figure 16 par l'exemple du trichloéthylène. La figure détaille comment une molécule organique (soluble dans l'eau) peut être transportée du sol vers les racines puis être transloquée par la plante vers les différents organes de la plante via le xylème, et finalement être transformée dans les tissus végétaux ou volatilisée dans l'atmosphère (Schnoor, 2002).

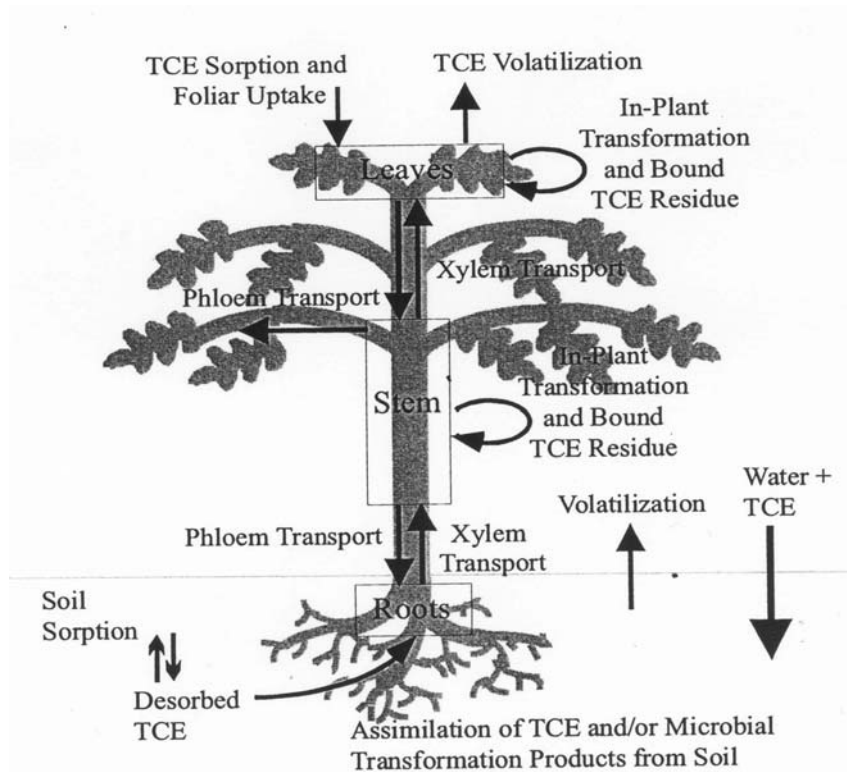


Figure 16 : Voies potentielles de prélèvement et de transformation du trichloéthylène (TCE) dans un système sol-plante (Schnoor, 2002)

Bien que les propriétés physico-chimiques du trichloéthylène soient très éloignées de celles des molécules hydrophobes persistantes qui nous intéressent ici, la figure 4 permet de représenter de façon synthétique le prélèvement et le transport d'une molécule organique dans un système sol/plante.

Comme nous l'avons vu précédemment, le prélèvement/translocation de contaminants organiques dans le sol varie en fonction de l'espèce végétale. Plusieurs travaux ont ainsi mis en évidence un certain potentiel de la famille des cucurbitacées et plus spécifiquement les genres *Cucurbita* et *Cucumis* (Hülster *et al.*, 1994 ; Campanella et Paul, 2000 ; Mattina *et al.*, 2000 ; White, 2001 ; Lunney *et al.*, 2004) à extraire et transloquer des molécules hydrophobes persistantes (PCDD/Fs, chlordane, DDE, DDT) à partir du sol, suggérant un certain potentiel pour leur utilisation en phytoremédiation.

Le modèle "Cucurbitacées "

"Comment les cucurbitacées sont capables d'absorber des molécules hydrophobes ?" voici la question que se sont posés plusieurs scientifiques après avoir mesuré des concentrations exceptionnellement élevées dans les tissus de certaines plantes de cette famille (courgette, citrouille, melon). Il semblerait que la particularité de cette famille de plantes réside dans son aptitude à augmenter la disponibilité et la mobilité du polluant retenu dans le sol.

Hülster *et al.* (1994) en conclusion de leur étude sur le transfert sol/plante de dioxines et furanes ont fait l'hypothèse d'un relargage d'exudats racinaires qui auraient des propriétés "mobilisantes" pouvant désorber les molécules persistantes des particules de sol dans la rhizosphère des espèces de *Cucurbita pepo*. Cela permettrait ainsi d'augmenter la disponibilité au prélèvement racinaire. Campanella et Paul (2000) ont approfondi cette hypothèse en établissant que certaines molécules produites par la plante et relarguées dans la rhizosphère pourraient se lier au polluant (2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-*p*-dioxine ou 2,3,7,8-TCDD). Le complexe alors formé deviendrait assez hydrophile pour être absorbé par les racines et être transloqué vers les différentes parties de la plante. Ces auteurs ont réussi à isoler *in situ* différentes molécules se liant avec le 2,3,7,8-TCDD dans la rhizosphère du melon (*Cucumis melo* L.). Ces molécules présentaient des propriétés identiques à celles isolées dans la rhizosphère de courgette (*Cucurbita pepo* L.). Enfin, les résultats suggéraient qu'au moins l'une de ces molécules serait de nature protéique. White *et al.* (2003) ont, quant à eux, testé l'influence de l'apport de différents acides organiques potentiellement présents dans la rhizosphère sur la désorption de *p,p'*-DDE (un organochloré, métabolite du DDT). Les données ont indiqué que l'ajout d'acides organiques augmentait significativement la désorption du contaminant à une concentration de 0,05M. Par ailleurs, l'ajout d'acides organiques de faibles poids moléculaires entraînerait une désagrégation partielle de la structure du sol par chélation de certains ions structuraux inorganiques. Enfin, d'autres auteurs (Lunney *et al.*, 2004) ont également suggéré que la distinction des espèces végétales du genre *Cucurbita pepo* (courgette et citrouille) par rapport à d'autres espèces végétales pourrait venir de leur importante biomasse aérienne qui contribuerait à accumuler des niveaux de DDT supérieurs à ceux d'autres plantes (ray-grass, luzerne, fétuque). L'hypothèse formulée porte sur le fort taux de transpiration des feuilles de courgette qui expliquerait une grande capacité à transloquer le DDT.

Un premier essai sous serre est en cours (coll. INRA-APC/SPV-Gpe), pour comparer les prélèvements de chlordécone réalisés par une solanée (tomate) et une cucurbitacée (courgette) sur des sols fortement contaminés, et sous deux régimes hydriques contrastés.

Rappelons ici qu'aucune des plantes analysées à ce jour n'a montré un prélèvement supérieur à celui réalisé dans le cadre d'une substitution massive entre le sol et le végétal, correspondant à une force de puits de la matière sèche des plantes égale à la force de puits du sol sec encaissant. Concrètement, le madère (dachine), bien que présentant la contamination relative la plus élevée, ne pourrait permettre une extraction de la chlordécone des sols qu'en plusieurs siècles, dans les mêmes ordres de grandeur que l'extraction par lessivage.

6. Dégradation microbiologique

Seule une très maigre littérature rapporte une biodégradation de la chlordécone :

- en milieu anaérobie, difficile à appliquer pour une décontamination de sols très poreux comme les andosols et sols ferrallitiques des Antilles ;
- en milieu aérobie par *Pseudomonas aeruginosa* souche KO3 (Orndorff et Colwell, 1980) ; la lecture attentive de la publication la relatant ne laisse aucun espoir de remédiation plausible : les sous-produits sont le mono-hydro (15 % de la dégradation) ou di-hydrochlordécone (5 % de la dégradation), dont rien n'indique si leur toxicité ou leur mobilité sont différentes de celles de la molécule parentale. Par ailleurs, ces deux sous-produits présumés sont présents dans la chlordécone de synthèse industrielle, dans les mêmes proportions, suite à des chlorations incomplètes du carbone.

On peut ajouter à ces objections que la bonne pertinence du modèle de simple élution de la chlordécone sur les andosols des Antilles, n'incorporant pas d'hypothèse de biodégradation, laisse penser qu'aucune sélection de micro-organisme capable de dégrader la chlordécone n'est spontanément apparue dans ces sols, malgré plusieurs décennies « d'accoutumance ».

Une recherche a été entamée par l'Université des Antilles et de la Guyane (Sarah Gaspard, Equipe COVACHIM), en collaboration avec l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse), qui en relation avec des chercheurs indiens a déjà sélectionné des bactéries capables de dégrader le HCH. Des synergies pourraient être cherchées avec l'activité « bioréacteur du sol » des vers de terre, utilisés en Inde en couplage avec des bactéries pour la décontamination de plantations de thé (collaboration IRD Bondy).

7. Techniques analytiques

La question de la représentativité de la mesure de la teneur en chlordécone du sol et des plantes est souvent discutée. Elle est directement liée à celle du **rendement d'extraction de la molécule** de chlordécone obtenu par les différentes méthodes utilisées. Le laboratoire LDA26 se propose de réaliser des extractions au solvant successives, afin de vérifier le rendement initial du protocole utilisé.

Pour les analyses sur plante, un étalon interne de mono-hydro-chlordécone est utilisé. Le protocole d'extraction permet de faire passer, par addition de soude, l'ensemble de la chlordécone sous forme d'hydrate, puis par adjonction d'acide sulfurique l'ensemble de l'hydrate sous forme de chlordécone, dosé par CPG/MS/MS. Ce protocole semble efficient, car, par l'absurde, il a été vérifié que l'absence d'acidification donnait *in fine* de faux négatifs. Il ne permet cependant pas de dissocier les deux formes possibles de la molécule présentes dans l'échantillon (forme chlordécone quasi-insoluble dans l'eau et forme hydrate de chlordécone, plus soluble). La seule voie permettant d'identifier les deux formes chimiques est **l'introduction d'un étalon marqué** (étalon radioactif ^{14}C ou massique ^{13}C). La synthèse ou l'isolation d'un tel marqueur, indispensable pour des expérimentations déterministes collectives, est à prévoir pour 2006.

La création d'une **base de données inter-institutionnelle** est nécessaire pour l'ensemble des analyses disponibles, spécifiant la méthode utilisée.

8. Contamination des produits transformés

Un premier test a été réalisé sur le passage de la molécule de produits végétaux fortement contaminés dans les produits transformés (sucre, alcool). Le transfert s'est révélé positif pour le sucre mais négatif pour le rhum dans ce test. Cette évaluation mériterait d'être confirmée.

Cependant, l'impact d'une contamination sur les produits transformés pour l'exposition des consommateurs semble plus faible que pour des produits frais. En effet, les phénomènes de dilution des lots et les technologies de transformation limitent la contamination totale. Une attention particulière pourrait être accordée à la qualité des eaux de source participant aux procédés de transformation.

9. Contamination des produits animaux

Un plus fort investissement des services vétérinaires est attendu pour disposer d'une vision plus réaliste de la situation.

Même si la contamination des produits animaux (viande, lait, œufs, ...) reste marginale à ce jour dans les exploitations agricoles, la question des pratiques se pose pour les productions familiales. Le **transfert des fourrages** (ou des animaux) pendant les périodes sèches (graminées de bordure de parcelles issues des zones où le sol peut être contaminé) doit également être étudié.

En Guadeloupe, il semble que des producteurs désorientés optent pour la jachère pâturée des parcelles polluées. Il est nécessaire de quantifier ce phénomène et de caractériser les risques qui pourraient lui être associés (contamination des organes végétaux ingérés, absorption directe de terre contaminée, qualité de l'eau de boisson fournie...).

10. Risques d'exposition

Actuellement l'essentiel des travaux porte sur la contamination du milieu et des cultures. Peu de mesures ont été effectuées sur les produits prêts à consommer. **L'effet de leur mode de consommation et de préparation (cuisson, ...) sur l'exposition potentielle du consommateur n'a pas été envisagé.**

Les données concernant les **productions informelles** ne sont pas disponibles. Cependant, une **première enquête**, conduite par les services de la direction régionale de la Santé et complétée par un volet agroéconomique, devrait permettre de répondre globalement aux questions de la place de ces productions dans la consommation et l'économie locale, ainsi que leurs fonctions pour les ménages.

C. Propositions pour l'action des pouvoirs publics

1. Niveau de protection environnementale

a) Remarques

La contamination des eaux de rivière est malheureusement présente pour plusieurs siècles. La capacité d'accumulation de chlordécone des poissons et mollusques littoraux et de rivière, et surtout des crustacés de rivière, est très élevée, atteignant l'ordre de grandeur du mg/kgPF (S. Lemoine & D. Monti, UAG, communication personnelle). Par ailleurs, cette contamination touche les élevages de *Macrobrachium rozenbergi* (« ouassous d'élevage ») alors même que leur nourriture solide est indemne de chlordécone : l'entrée métabolique de chlordécone, via la respiration branchiale de l'oxygène dissout dans de l'eau contaminée suffit à contaminer ces crustacés (même si les contaminations restent dans ce cas inférieures à la LMR 50 µg/kg PF selon les résultats DCCRF).

Les arrêtés préfectoraux de 2005, interdisant la pêche en rivière dans le sud de la Basse-Terre (Guadeloupe) et sur les rivières de Martinique, notamment le Bassin de la Lézarde et son exutoire marin en Baie de Fort de France, ont répondu à cette capacité de concentration par les animaux consommateurs ou prédateurs en bout des chaînes alimentaires aquatiques. L'avancée du diagnostic de contamination conduit à élargir les zones d'interdiction.

Aucune solution de remédiation n'est envisageable par rapport à cette situation. Outre le choc emblématique lié à cette interdiction d'accès à des ressources alimentaires traditionnelles, de valeur gastronomique, les dynamiques de populations de crustacés contaminés sont susceptibles de contaminer des espaces protégés : des *Macrobrachium* sp. contaminés ont été capturés dans le Parc National de la Guadeloupe.

b) Impact sur les produits de l'environnement

- **Produits de la pêche**

Les concentrations record en chlordécone sont observées sur les produits de la pêche, elles sont parfois supérieures au mg/kg/pf, voire dépassant 20 mg/kg/pf, soit plus de 100 fois la LMP (Monti, 2005 et Brugneaux, et al 2004). Ces contaminations concernent les poissons d'eau douce, les crustacés et les poissons d'estuaire. Elles ont conduit à la publication d'arrêtés préfectoraux interdisant la pêche dans les sites pollués, mais pourraient faire l'objet de communications sur des précautions alimentaires (pas de consommation plus de x fois par semaine, par mois, ...) si un allègement des arrêtés d'interdiction était envisagé.

- **Herbe pour affouragement des animaux de case**



Photo de A Cavasino

L'important cheptel, notamment bovin, non enregistré, et conduit dans un double but d'épargne et d'entretien des abords, est partiellement nourri par des fourrages collectés sur les bords de route et délaissés. Cet affouragement est essentiel en cas de sécheresse sévère, avec des transferts d'herbes ou de cannes éventuellement contaminées depuis les zones humides vers les zones sèches. Une communication sera à faire sur ce risque, seulement après une meilleure identification des risques de contamination du bétail et en cas de sécheresse sévère.

- **Eau**

- *Etat de la ressource*

La pollution chronique des eaux de surface et des nappes d'andosol est avérée (cf travaux de thèse en cours de JB. Charlier en Guadeloupe). Actuellement, la pollution des nappes des roches volcaniques profondes par la chlordécone n'est pas confirmée. Des analyses sont en cours. Les nappes des îles calcaires (Grande-Terre, Marie Galante) sont indemnes.

- *Consommation*

Suite au constat de la contamination des eaux potables, des mesures ont été prises pour garantir la conformité de l'eau distribuée (pose de filtres, procédure de dilution, fermeture de certains captages). Sous réserve du bon suivi technique des installations, la consommation d'eau est sans impact sur la santé.

L'inventaire des contaminations de sources des massifs volcaniques est en cours. D'une manière implacable, les sources en aval de zones bananières à l'époque chlordécone sont contaminées. L'information du public de cet état de fait est bien sûr obligatoire.

- *Irrigation*

Même si les surfaces anciennement en bananeraies sont minimes sur les bassins versants en amont des grandes prises d'eau de la Gde Rivière à Goyave en Guadeloupe et de la Rivière Lézarde en Martinique, il conviendrait de mesurer les contaminations en débits d'étiage, en dehors des effets de chasse issus des hauts bassins montagneux : c'est en période sèche que ces ressources captées sont les plus sollicitées. La précaution est importante en Guadeloupe où la conduite « mixte » alimente le réseau AEP du sud-est de la Grande-Terre.

Les prélèvements autorisés en rivière doivent être dans bien des cas ceux d'une eau contaminée. Dans les cas où cette eau sert à l'irrigation de bananeraies, il n'y a rien de particulièrement alarmant s'il s'agit de goutte-à-goutte ou d'irrigation sous frondaison, les sols étant en général fortement contaminés. En revanche, il conviendra de mesurer l'éventuelle contamination de fruits dans le cas d'irrigation par aspersion sur canopée. Enfin il n'est pas exclu que ces prélèvements servent à l'irrigation par aspersion de cultures maraîchères. On pourrait alors craindre des contaminations par dépôt ou imprégnation : les rares situations sont sûrement aisées à délimiter et à surveiller.

- o *Aval des rivières et estuaires*

Le suivi régulier de la qualité des eaux réalisé par les services de la DIREN constitue la source d'information la plus complète. A chaque fois que le bassin versant d'une rivière correspond totalement ou partiellement à d'anciennes zones de production bananières il est possible de détecter une pollution régulière des eaux par des pesticides organochlorés, dont la chlordécone. Le réseau de surveillance de la DIREN ne prend en compte que la qualité des eaux et ne nous renseigne pas sur les matières solides en suspension.

- **Détection des pesticides dans l'eau et les sédiments marins**

Une étude, publiée en 2004 par l'Observatoire du Milieu Marin Martiniquais, cite les travaux réalisés par l'IFREMER en collaboration avec la DSDS de Martinique pour dresser un bilan ponctuel de la présence et des effets des pesticides sur le littoral martiniquais (Brugneaux et al, 2004). Les prélèvements avaient été réalisés en mer dans le panache des six principales rivières de l'île. Contrairement aux résultats obtenus à partir des lits des rivières, les analyses réalisées sur de l'eau de l'embouchure filtrée n'ont pas permis de détecter la présence de chlordécone. Par contre, celles réalisées sur les matières en suspension et les sédiments ont été positives.

Molécule	Phase observée	Concentration (µg/kg)	Lieux de prélèvement
Chlordécone	Sédiment	31 - 44	Riv. du Lorrain, du François, Lézarde
	Matière en suspension	22 - 57	Riv. du Gallion, Cacao, du François

- **Détection des pesticides dans les organismes marins**

L'étude menée en Martinique par l'IFREMER en 2002 a mis en évidence la contamination de plusieurs organismes marins (bivalves, crustacés, poissons) du littoral. Les plus fortes concentrations ont été observées chez des Tilapias (*Oreochromis* sp.) de l'embouchure de la rivière Lézarde. Les teneurs en chlordécone étaient comprises entre 196 et 386 µg/kg de PF.

Plus récemment, une étude publiée par D. Monti en juillet 2005 a fait état des niveaux de contamination par les pesticides chez les organismes aquatiques d'eau douce en Guadeloupe. La contamination des poissons et crustacés par la chlordécone est importante à l'aval des six rivières échantillonnées, 92 % de résultats positifs. La chlordécone s'accumule préférentiellement dans les muscles et les viscères, le niveau de contamination des organismes est étroitement corrélé avec celui de l'eau. Des différences notables de contamination existent entre espèces et pour une même espèce entre les organes. Des valeurs extrêmes ont été observées chez un poisson « petit dormeur » dont les concentrations en chlordécone dans le foie ont atteint 39 400 µg/kg de poids frais.

Avec une faible contamination des eaux en chlordécone, cas de la Grande Rivière à Goyaves (0,04 µg/litre), les teneurs relevées dans les tissus des organismes vivants s'échelonnaient de 30µg à 290 µg/kg de poids frais. Ces résultats illustrent parfaitement les

risques de biocontamination des organismes aquatiques avec de faibles taux de contamination de l'eau et confirment les phénomènes de bioconcentration précédemment observés en cas de forte contamination.

2. Niveau de protection sanitaire

a) Productions végétales

Quelle que soit l'utilisation des terrains, la gestion des sols contaminés par la chlordécone implique un dispositif d'analyses des sols et des productions.

- **Dispositif local d'analyses indispensable**

Le schéma de gestion par les analyses de sol (ex. pour les racines et tubercules, figure 17) résume les différentes situations de production et de gestion possibles pour les sols contaminés.

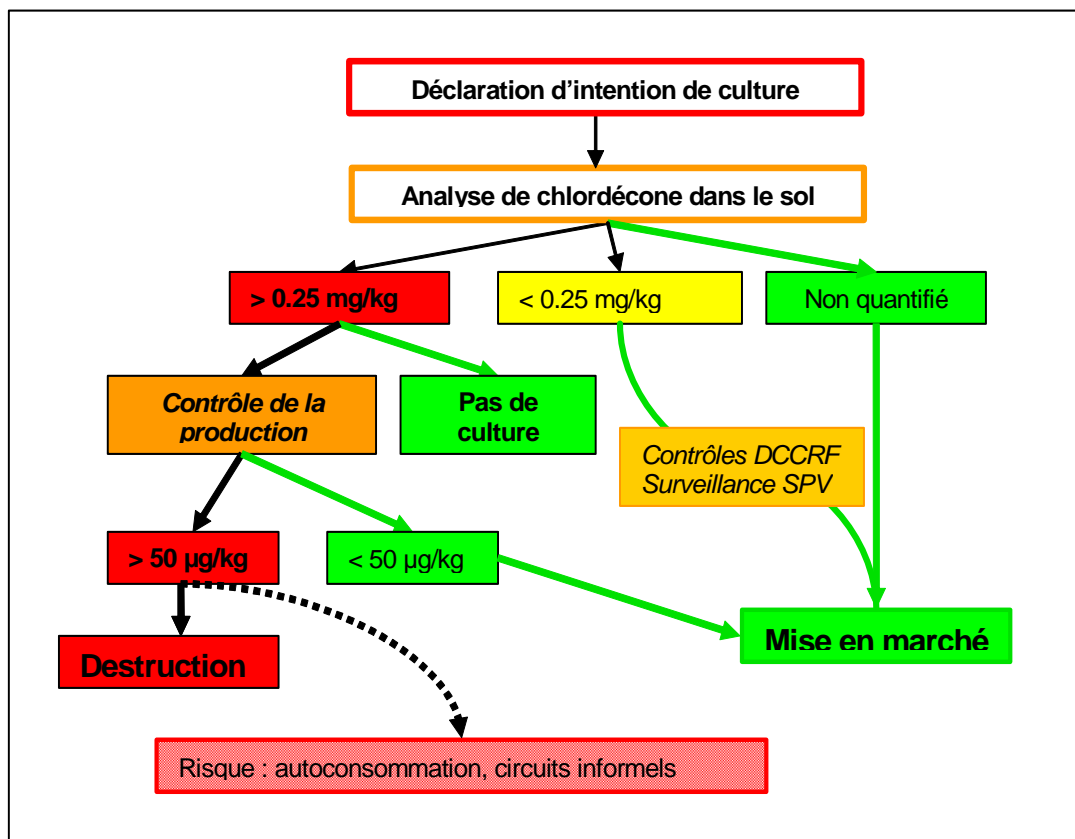


Figure 17 : Arbre de décision pour la gestion du risque sanitaire par l'analyse de sol, exemple des racines et tubercules

- *Analyse négative*

Une analyse de sol négative autorise la mise en culture et la mise en marché des produits issus de la parcelle.

Elle peut être utilisée pour la valorisation des systèmes de production existants qui sont engagés dans des démarches de labellisation, soit pour l'origine (produit péyi, IGP Melon en Guadeloupe, ...), soit pour le respect de cahiers des charges définis (agriculture raisonnée type FARRE et agriculture biologique). Cette valorisation peut être effective à la fois pour le marché local et pour l'exportation.

- *Analyse positive*

Le mode de gestion par l'analyse de sol implique la détermination d'une relation entre la teneur du sol en chlordécone et la teneur de la plante cultivée sur ce sol contaminé et, en particulier, des valeurs limites de la contamination du sol (LM sol) en deçà desquelles la contamination de la plante reste inférieure aux LMP proposées par l'AFSSA.

Ces LM sol sont liées aux LMP et à la plante considérée.

- **Teneur sol < LMsol = sol faiblement contaminé mais non contaminant**

Lorsque la teneur du sol en chlordécone est inférieure à la LMsol, il n'y a pas de risque de dépassement des LMP dans les produits issus de ces parcelles. La contrainte réglementaire est donc levée pour cette situation, tout en assurant la sécurité des consommateurs. Il n'y a donc pas, théoriquement, de problème de marchés. Cependant, pour éviter des problèmes de commercialisation, liés à la réticence des acheteurs et des consommateurs, la règle de transparence sur la qualité sanitaire des produits concernés devra être de rigueur. Cette règle concernera dans le même temps l'import/substitution, ce qui implique une vigilance dans le contrôle sanitaire des produits importés ou entrants (cas des importations de racines et tubercules).

Un plan de surveillance classique et un renforcement du plan de contrôle de la DRCCRF peuvent être mis en place.

- **Teneur sol > LMsol = sol contaminant**

Le risque de dépassement de la LMP 200 µg/kg MF est peu probable pour la plupart des productions végétales aériennes, en particulier pour des fruits d'arbres, et exception faite de la canne. Cependant des analyses complémentaires sont nécessaires concernant les productions sur sols très contaminés, pour tester l'effet d'accumulation dans la plante sur plusieurs mois ou années, l'éventualité d'un transfert rapide et pour préciser la répartition dans la plante (cartographie de l'accumulation de la molécule dans la touffe pour la canne à sucre notamment).

Le risque de dépassement de la LMP 50 µg/kg est possible pour les racines et tubercules, les ananas et les cucurbitacées. A ce jour, aucune alerte par le système de contrôle standard n'a été signalée sur banane et productions de légumes aériens, mais ces productions devraient faire l'objet d'analyses complémentaires ciblées sur sols très contaminés. Dans ce cas précis, les productions devront être contrôlées à la récolte si le producteur a pris le risque de mettre la parcelle en culture.

- **Implications par systèmes de culture existant actuellement**

- *Canne à sucre*

Pour ces systèmes de culture le plus souvent mécanisés, la contamination par la chlordécone reste faible : les analyses actuelles signalent une contamination circonscrite aux unités basales de tiges. La contamination du produit transformé (sucre extrait) à partir des bases de tiges contaminées est faible également (test sur un pilote). Le risque santé est donc très limité, d'autant qu'au niveau industriel, le mélange des lots de canne à sucre dilue la contamination. En revanche, le risque commercial existe car actuellement, pour l'Union européenne, la règle pour cette contamination reste au seuil de détection de la molécule (10 µg/kg MF).

Lors d'un premier test en pilote, la distillation de jus de canne à sucre contaminée n'aboutit pas à la production de rhum contaminé.

En termes de recommandations agronomiques et selon la teneur du sol, la rotation canne/ananas est à éviter ainsi que les rotations avec des cultures alimentaires à cycle court (cultures maraîchères, cultures vivrières racines et tubercules).

- o *Banane*

A ce jour, aucune détection n'a été signalée par le système de contrôle classique (DGCCRF). Cependant, un premier diagnostic ciblant des sols fortement contaminés et les premières « mains » de régimes (premières bananes formées et remplies), fait par le SPV-Guadeloupe, montre deux détections mesurables. Cette contamination reste proche du seuil de quantification, et bien en deçà des LMP de 200 µg/kg MF (et des 50 µg/kg MF), et proche du seuil de quantification. Une campagne d'analyses ciblée sur les zones les plus fortement contaminées devrait permettre d'affiner l'évaluation du risque de contamination (maximum de la contamination possible dans les fruits, répartition du pesticide dans la plante). Le risque commercial n'est cependant pas à négliger. Comme pour la canne à sucre, la réglementation européenne fixe au seuil de détection de la molécule (10 µg/kg MF) le niveau acceptable pour les produits mis sur le marché.

- o *Cultures alimentaires à cycle court*

Les cultures alimentaires à cycle court sont à proscrire lorsque les teneurs du sol en chlordécone sont supérieures à la LMSol. La prise de risque, par la mise en culture des parcelles contaminées, devra être gérée/modulée par un système de contrôle des productions rendu obligatoire (cf mode de gestion suggéré pour les racines et tubercules). Ce contrôle est déjà difficilement plausible pour les cultures d'organes de réserve amyliques souterrains : même s'ils peuvent supporter un délai de commercialisation, le délai d'analyse en métropole est passé de 45 à 75 jours, à cause de l'engorgement des laboratoires. Il serait impossible à mettre en œuvre immédiatement pour les cultures maraîchères, dont les fruits ne supportent pas un délai de commercialisation supérieur à quelques jours.

Il convient donc, et de manière urgente :

- de mettre en oeuvre des moyens d'analyse à réponse rapide sur les deux départements
- d'établir la possibilité de contamination ou non des légumes aériens ; cette question a déjà été soulevée pour la définition des légumes aériens soumis à la LMP 50 µg/kg par l'AFSSA (certains se sont interrogés sur la réalité de la contamination de la tomate par exemple, légume fortement consommé, pour laquelle un seul résultat positif était disponible) : peu de gens ont compris qu'il s'agit d'une précaution, car ces légumes sont fortement consommés, alors même qu'aucune contamination de l'ingéré n'avait été sérieusement établie sur la base des données disponibles.

Il est évident que les petits planteurs agriculteurs spécialisés en diversification vivrière ou maraîchère attendent avec impatience ces nouveaux dispositifs, certains se trouvant déjà dans une extrême difficulté. Tout retard pris se traduira inévitablement par un accroissement de la commercialisation sans auto-contrôle, et donc frauduleuse, que les DCCRF auront du mal à cadrer.

- *Gestion des jachères*

La non prise de risque par les producteurs conduit parfois à l'abandon de l'intention de culture et à la mise en jachère. Lorsque la jachère est utilisée comme source d'alimentation du bétail, il faut noter un risque de contamination de la base des tiges (ex. sur *Pennisetum purpureum*) alors que les limbes restent indemnes.

Le risque de concentration sur la chaîne alimentaire existe pour le bétail pâturant sur ces surfaces ou consommant ce type de fourrage.

La pression de l'urbanisation et la spéculation foncière pourraient pousser à l'abandon et au lotissement de ces parcelles. La population devrait alors être sensibilisée sur les potagers, qui seraient à éviter sur ces zones.

- *Gestion de l'autoconsommation*

Avant toute chose, l'impact de l'autoconsommation et de l'échange de proximité sur le risque de contamination devrait être objectivé. Pour cela, une première enquête de la CIRE et de la DSDS Martinique est en cours, afin de caractériser les produits autoconsommés, leur volume et les flux qui pourraient exister (échanges familiaux, voisinage, commerce informel, ...). Les résultats sont attendus fin 2006.

- **Conditions**

- Les **LMP** proposées par l'AFSSA doivent être **consolidées** avec les données de la Guadeloupe (étude AFSSA en cours, résultats attendus pour la fin juin 2006) et les données de l'étude RESO (étude CIRE/AFSSA en cours).
- Les LM doivent être **acceptées** et reconnues comme normes **au niveau européen** pour clarifier les échanges économiques.
- Des expérimentations sont nécessaires pour la **détermination des LMsol** pour les différents types de plantes. Une première valeur est validée pour les racines et tubercules (pour une LMsol de 0,25 mg/kg, les productions de racines et tubercules ont des teneurs en chlordécone inférieures à 50 µg/kg MF). Pour les cucurbitacées, les bananes, les ananas, l'exploration de la contamination des cultures sur sols fortement contaminés permettra de fixer cette valeur.
- La mise au point d'un **système de détection performant** est impératif (analyse rapide et fiable) pour ne pas pénaliser les producteurs et permettre la mise en marché des produits le cas échéant. Les délais analytiques actuels (deux mois environ) sont incompatibles avec la mise en place d'un tel système. Cela implique la mise au point, la validation et le transfert technologique local de la technique de SPME, si sa performance est confirmée (résultat possible en moins de 24 heures).
- La mise en place d'un tel système de gestion implique une **communication précise sur les risques**, et en particulier sur l'impact réel sur la santé des niveaux de contamination observés pour les produits végétaux, les LMP ayant été calculées avec les précautions d'usage (marge de risque, robustesse).

b) Impact sur les productions animales

Une très faible contamination des produits d'élevage (bovins, porcins, ovins, caprins, poulets, lait et oeufs) est observée. On constate également qu'ils sont produits hors des zones de contamination, ou que les animaux reçoivent une alimentation conditionnée importée. Mais aucune donnée n'est disponible en ce qui concerne les productions informelles familiales (bovins, caprins, porcins, poulets, oeufs).

Les contaminations du lait restent à suivre de plus près : si aucune production significative n'est présente en Guadeloupe, il n'en est pas de même à la Martinique.

D. Autres valorisations : pistes de reconversion

1. Remarques

Beaucoup trop d'incertitudes subsistent pour se prononcer sur des recommandations de modification du système de culture ou du système de production.

Dans un premier temps, des solutions mécaniques, telles que le décapage localisé des sols pour minimiser la capture par les cultures, ne sont envisageables que sur des sols mécanisables, mais n'ayant pas connu antérieurement de labour profond. Cette assertion est à la limite de l'absurde : si les terres sont mécanisables, elles ont subi des labours, généralement profonds depuis longtemps. Ainsi les situations d'application de décapages localisés (cultures en créneaux) ne seront applicables que de manière très marginale, et permettront seulement de diminuer, sans l'annuler, la teneur en chlordécone des sols recevant les cultures de tubercules ou bulbes (« racines »).

Ni le décapage, ni le traitement physique des sols n'apparaissent envisageables vu les épaisseurs de sols et les surfaces concernées à l'échelle des deux îles. La phyto-extraction, ou la dégradation biologique ne semblent pas être non plus des solutions plausibles à court terme.

Les alternatives aux productions actuelles ne sont à envisager qu'après une évaluation exhaustive de la contamination, et en particulier du risque de contamination possible des cultures dans les zones de forte contamination des sols. Pour cela une campagne d'analyses complémentaire est nécessaire pour affiner les relations de transfert existant entre le sol et la plante, comme nous l'avions proposé dès juillet 2005.

Dans un premier temps donc, nous n'émettrons que des remarques préliminaires sur les différentes filières.

Différentes voies de reconversion agricole des parcelles contaminées sont analysées :

- la mise en culture avec des productions alimentaires dont les organes récoltés ne sont pas contaminés (cf faible affinité de la plante pour la molécule), ces cultures restent à identifier... ;
- la mise en culture avec des productions non alimentaires. Il s'agirait de nouvelles filières pour les deux îles : biocarburant, bois énergie, bois de construction, bois d'œuvre ou précieux, cultures ornementales, fibres... ;
- la modification des systèmes de culture en utilisant des systèmes hors sol par exemple pour les cultures maraîchères et certaines cultures fruitières, à condition de vérifier la qualité de l'eau d'irrigation ;
- les systèmes de culture et les pratiques des systèmes de production existants.

Un travail spécifique, sur les aspects agronomiques et socio-économiques, est nécessaire afin de hiérarchiser les propositions ci-dessus. Ce travail devrait analyser la faisabilité technique et les conditions nécessaires pour la structuration de ces nouvelles filières agricoles (infrastructures, marchés, prix, besoin en main d'œuvre, ...), ainsi que la capacité des exploitations à intégrer ces innovations dans leur système de production (dynamique de la reconversion). Un premier travail sera bientôt achevé sur les déterminants de la modification des systèmes de culture bananiers en Guadeloupe (T Frescu, 2006).

2. Pistes de reconversions possibles

En l'absence d'analyse complémentaire et de connaissance précise sur le transfert de la molécule entre le sol et la plante, de sa répartition dans la plante et de l'évolution de la réglementation, nous ciblerons nos propositions principalement sur les cultures non alimentaires.

Les préalables à toute recommandation sont :

- une analyse de la demande et des marchés tant au niveau local, régional qu'international
- un calcul de la rentabilité de telles filières
- une analyse de la capacité de reconversion des exploitations agricoles (technique, financière, sociale)
- une analyse de la rapidité des opportunités de structuration des filières (organisation, contractualisation, négociations, ...)
- une analyse de l'impact et du bilan environnemental global de la filière.

a) Cultures alimentaires

La non contamination de certaines cultures alimentaires est à identifier ou à confirmer (cas de l'arboriculture fruitière). Au stade actuel de nos connaissances, nous privilégierons les cultures non alimentaires pour la reconversion.

Une possibilité subsiste, celle du maraîchage hors sol, mais son extension reste limitée : saturation des marchés au delà d'une certaine surface, problèmes phytosanitaires, investissements couteux, utilisation impérative d'eau non contaminée, très forte technicité.

b) Cultures non alimentaires

- **Bois d'œuvre**

- *Bois précieux*

Pratiquement aucune tentative privée de sylviculture de bois d'ébénisterie n'a pu être notée au 20^e siècle. Les filières de bois d'ébénisterie ont disparu, tant en Guadeloupe qu'en Martinique. Les plantations de Mahogany réalisées il y a plus de trente ans par l'ONF ne sont valorisées qu'à 50 €/m³, en plateaux proposés en bord de piste. La totalité du bois d'œuvre de charpente et construction est importée d'Europe (résineux traités) ou d'Amazonie.

Avant d'engager toute réflexion pour reconstruire cette filière, il faut :

- analyser et projeter dans le temps la demande (type, volume),
- analyser la capacité d'investissement des exploitations agricoles, dans la perspective d'un retour sur investissement à 25-35 ans
- analyser la viabilité de cette production (retour sur investissement très long, risque cyclonique).

- *Etais de bâtiment*

Cette activité existe déjà aux Antilles, mais de manière plutôt informelle. Il y a donc un potentiel qu'il faut avant tout évaluer. Une telle activité contribuerait également à la protection de l'environnement, en limitant l'exploitation de la forêt primaire. Le retour sur investissement est beaucoup plus rapide que pour l'exploitation de bois précieux (7 à 8 ans).

- **Bioénergies**

- *Biocarburant*

Les Antilles sont sous forte dépendance énergétique, et dans le même temps la filière classique canne/sucre traverse des difficultés économiques. Le contexte actuel semble donc *a priori* assez favorable au développement d'une filière canne/éthanol et à l'investissement des pétroliers.

Le principal atout est que c'est une filière « quasi existante » avec un savoir-faire culturel, qu'il faudra certes adapter en fonction des nouvelles variétés de canne à sucre, et une organisation de la profession. Des modifications des infrastructures sont cependant à prévoir. Ce choix politique implique également un investissement de l'ensemble de la population des deux îles (adhésion et changement de mentalité, modification des véhicules). Cette option semble possible à moyen terme.

Cependant, la réglementation française sur l'obligation évolutive d'incorporer des biocarburants ne comporte pas de composante favorisant le développement local. Les proportions de biocarburants à incorporer progressivement seront imposées aux grandes entités distributrices, sur la globalité de leur distribution. L'étroitesse des marchés antillais, et le contexte tropical, n'encouragent pas les grands groupes pétroliers à s'investir localement : le coût des additifs pour contenir la volatilité du bio-éthanol en conditions de températures élevées pourrait être notamment un obstacle.

Une deuxième objection concerne la structure financière de la filière, au moins à la Guadeloupe : la sucrerie qui fournit la mélasse, la distillerie et la centrale thermique qui valorise la biomasse résiduelle n'ont aucune participation croisée de capital. La filière peut paraître presque prête au plan industriel, elle ne l'est pas au plan des entreprises.

Enfin, il ne faudra pas négliger l'analyse de la compétitivité d'une telle filière avec en particulier la proximité d'un gros producteur de bioéthanol comme le Brésil, qui entend très vite introduire ce produit dans la même liberté de marché que celle du marché pétrolier.

Quant à une filière diester, elle n'a pas été approfondie par manque de références. On peut signaler que le ricin semble avoir quelques potentialités, mais tout est à construire pour une telle filière : analyse des contraintes agronomiques et techniques, analyse économique, infrastructures (structures de raffinage, ...). La récolte du ricin est difficile.

- *Biomasse énergie*

- **Canne fibre**

Le système de culture et l'organisation de la récolte sont déjà en place, il suffirait de remonter le processus de sélection des cannes à sucre pour retrouver des variétés riches en fibres.



Photo MT Fresu

La seule contrainte dans une telle filière serait le broyage : pour l'instant réalisé par les sucreries, il perd pour elles de l'intérêt si le produit « sucre » est absent. La filière n'est pour l'instant pas intégrée, ce qui constituerait inévitablement une difficulté. Des solutions de broyeurs mobiles, ou la substitution des tronçonneurs de cannes installés directement sur les machines à récolter par des broyeurs pourraient contourner cette difficulté.

- **Bois / énergie**

La substitution du charbon par de la biomasse dans le système bagasse/charbon est aisée à mettre en œuvre sur le plan technologique et ne nécessite pas d'investissement lourd particulier (utilisation et adaptation des structures existantes). L'objectif de substitution relève d'un choix politique, sur l'accroissement de l'autonomie énergétique des deux îles. Des systèmes décentralisés peuvent également être envisagés : petites structures dont le coût est relativement peu élevé, pour la fourniture plus locale d'énergie. Une analyse de pré faisabilité pour cette filière permettra d'éclairer les choix possibles : concentration sur une grosse unité, décentralisation sur de nouvelles petites centrales et aménagement des unités de production (rhumeries en particulier), en fonction de l'analyse des coûts de l'énergie produite.

Pour la production d'une telle biomasse, issue de canne fibre ou de taillis, nous n'avons pas relevé de contraintes agronomiques et techniques rédhibitoires (apprécier tout de même des possibilités de mécanisation des parcelles). Les surfaces à mettre en culture devront être calculées pour satisfaire les objectifs énergétiques. Une telle filière est à structurer localement (dimensionnement, contractualisation, rentabilité, ...).

Des systèmes mixtes sont envisageables, avec un couplage possible entre la production de gaules, et de biomasse pour l'énergie (bois et canne fibre).

- **Cultures ornementales**

Cette filière, déjà existante aux Antilles, ne peut absorber une reconversion massive des exploitations. L'analyse de la demande sur les marchés internationaux devrait permettre de mieux calibrer l'offre potentielle, et donc de la traduire en surfaces cultivées.



Photo MT Fresu

Les intérêts de cette filière sont que la production a une forte valeur ajoutée (revenu 5 à 10 fois supérieur par ha par rapport à la banane, C. Amar comm. pers.) et que la qualité des fleurs est reconnue à la fois sur le marché local mais également à l'exportation. Les freins essentiels sont les marchés (à explorer et à calibrer), l'approvisionnement en plants sains qui semble problématique ainsi que les coûts de transport (fret aérien) qui restent relativement élevés.

c) Conditions

Ces filières de reconversion impliquent un changement culturel pour les producteurs :

- proposer de nouveaux produits pour de nouveaux services (énergie),
- intégrer la dimension environnementale et adopter de nouveaux modes de production.

Si des options de reconversion sont favorisées, l'opposition sociale "gros"/"petits" planteurs devra être évitée.

Les calculs économiques sur les différents scénarios de reconversion n'ont pu être menés, faute de temps et de références, pour orienter la décision publique sur tel ou tel choix.

Un début de simulation a été fait sur une reconversion par des systèmes sylvicoles multifonctionnels, en comparaison avec la canne biomasse combustible. Cette simulation intègre des scénarios de systèmes forestiers multi-espèces, adaptés aux sols mécanisables très contaminés, satisfaisant à une demande de biomasse combustible, au marché existant d'étais de construction et de charbon de bois, et à la production de bois précieux (voir annexe 3).

On retiendra que des scénarios forestiers multi-fonctions, incluant la production d'étais de construction, puis de charbon de bois, sont plausibles. Bien sûr, ils ne sont pas généralisables sur des centaines d'hectares, car ils répondent à des marchés limités, à évaluer. Ils ont cependant un grand intérêt patrimonial, car aujourd'hui les productions d'étais, voire de charbon, se font en partie par l'usage illicite de la forêt départementalo-domaniale, et même du Parc National de la Guadeloupe. L'ONF apparaît motivé pour tester la faisabilité de telles configurations sylvicoles multifonctionnelles.

d) Abandon agriculture

- **Urbanisation**

Face au problème de contamination des sols agricoles, aux problèmes de durabilité des systèmes agricoles et à la pression d'urbanisation, la tentation de spéculation foncière pourrait être forte. Les problèmes de pollution et d'exposition des populations ne sont pour autant pas résolus, d'autant que des jardins familiaux pourraient être installés sur ces surfaces loties.

- **Espaces naturels de protection**

L'Etat pourrait s'impliquer directement en investissant sur les surfaces les plus contaminées et les plus difficiles à valoriser, qui seraient alors mises en défens. Un « périmètre vert » pourrait être recréé.

E. Programmation scientifique

Les activités scientifiques du CIRAD et de l'INRA ont intégré la problématique « impact environnemental des systèmes de cultures intensifs en zone tropicale » et de la pollution par les pesticides depuis la fin des années 90.

1. Actions entreprises : bilan des projets en cours

- Transferts sol/plante (Région Martinique – CIRAD, prolongé mi 2006) : Relation niveau de contamination du sol/niveau de contamination des cultures (dachine).
- « Banenvorch » (programme évaluation et réduction des risques liés à l'utilisation des pesticides MEDD- INRA/CIRAD- fin 2005): Stockage dans les sols à charges variables et dissipation dans les eaux de zoocides organochlorés autrefois appliqués en bananeraies aux Antilles: relation avec les systèmes de culture.
- Projet « Cultures en créneaux » (INRA–DAF Gpe–UPROFIG, fin 2005): Faisabilité d'un décapage localisé, incidence sur la contamination de cultures de « racines ».
- Thèse de JB. Charlier : Étude des transferts hydriques et de pesticides au sein d'un petit bassin versant cultivé sur des sols volcaniques en zone tropicale. Le bassin expérimental de Féfé, Guadeloupe (CIRAD)
- Stages INRA/CIRAD (INRA et CIRAD, fin 2005) :
 - *Déterminants des épisodes bananiers dans la contamination des exploitations diversifiées par la chlordécone en Guadeloupe zone Nord Basse Terre (INRA)*
 - *Déterminants de la diversification dans les exploitations bananières contaminées par la chlordécone en Guadeloupe zone Capesterre (CIRAD)*
- Projet fédérateur GRENAT (Mtp–CIRAD, fin 2005) : Dynamique de la chlordécone entre le sol et la plante en milieu contrôlé (modèle carotte) et mesure rapide par SPME.
- Projet SIRS sol Martinique (MOM-IRD/CIRAD/UAG, fin 2006) : Absorption et désorption de la chlordécone dans les différents types de sols à l'échelle de l'agrégat.
- Plan de surveillance SPV Martinique/Guadeloupe (fin 2005 à mi 2006): Élargissement des denrées prélevées.
- Proposition Projet ADAR PARAGE (Spot Image IRD CIRAD, mi 2007) : Pression Agricole dans les Régions Antilles Guyane : Un support spatialisé pour l'évaluation de son impact Environnemental.

Un bilan partenarial et financier de ces activités est donné dans le tableau de l'annexe 3.

2. Nouvelles activités à conduire

Il est nécessaire, pour ce dossier, que les travaux soient conduits dans un cadre harmonisé, avec un interlocuteur centralisant les différentes démarches et les demandes auprès des ministères impliqués et/ou leurs services décentralisés. Nous ne traiterons ici que des aspects agronomiques.

Les propositions qui suivent s'adressent à l'ensemble de la communauté scientifique, qui devra se positionner selon ses compétences. Les pas de temps de réalisation de ces projets seront détaillés pour chacun lors de sa mise en œuvre. Certaines actions nous semblent prioritaires ou préalables par rapport à d'autres, avec un certain caractère d'urgence pour les deux premières:

- Evaluation de la contamination pour les productions conduites sur sols contaminés ;
- Rôle, place et impact des productions informelles dans le risque d'exposition ;
- Relations sol/plantes ;
- Dynamique dans la plante : modèle cucurbitacées.

a) Expertise

- **Evaluation de la contamination pour les productions conduites sur sols contaminés**

L'objectif est d'évaluer, dans des conditions de forte contamination des sols, la contamination éventuelle des cultures et les teneurs maximales des produits consommés. Cette information minimum permettra aux producteurs, aux consommateurs et aux décideurs de situer les risques, de les objectiver et de prendre les mesures qui s'imposent tant au niveau de l'exposition des consommateurs et de leur santé (niveau de contamination maximale par rapport aux LMp) qu'au niveau commercial (niveau de contamination par rapport à la réglementation).

Cette expertise est constituée essentiellement de l'échantillonnage de produits (couplage des analyses sol/plante) et de l'analyse de données de résidus, ce qui explique son coût élevé. Les priorités sont données aux plantes sensibles (cucurbitacées), aux plantes à fort impact social et économique (ananas, banane, canne à sucre) et aux cultures de reconversion potentielle (fruits, arbre, ...). Un plan d'échantillonnage a été établi avec les services déconcentrés de l'Etat, une partie des échantillonnages est en cours dans le cadre des plans de surveillance des services de la protection des végétaux de la DAF des deux départements.

- **Impact des modes de préparation et du mode de consommation sur l'exposition des consommateurs**

Afin d'affiner l'évaluation de l'exposition des consommateurs, l'impact des modes de préparation et de consommation des produits alimentaires est intégré. Il s'agit de rendre compte du niveau réel d'exposition des consommateurs : quantification de la diminution de l'exposition par le lavage, l'épluchage ; influence du mode de cuisson, ... Ces données pourraient déboucher sur des recommandations auprès de la population.

- **Rôle, place et impact des productions informelles dans le risque d'exposition**

L'objectif de cette expertise est de coupler une analyse agronomique et socio-économique à l'enquête santé qui sera réalisée par la DSDS. Cette analyse déterminera, dans les conditions de l'enquête, les volumes, les types de productions et les flux issus d'une agriculture informelle. Elle en établira les rôles et les fonctions pour les sociétés antillaises.

- **Pré-faisabilité et faisabilité agronomique, technologique des filières biomasse-énergie**

L'objectif de cette étude est de déterminer les conditions et les choix possibles pour la mise en place d'une filière biomasse énergie aux Antilles. Les contraintes agronomiques, technologiques, économiques et organisationnelles seront identifiées. Des options seront proposées, qui ne seront pas exclusives mais pourront coupler plusieurs productions (canne à sucre, bois, ...).

- **Veille scientifique sur la décontamination et/ou les voies de blocage de la molécule dans les sols**

Suivant les avancées technologiques, des solutions sont peut-être à envisager pour dépolluer les sols contaminés. Une activité de veille sur le sujet est à développer.

En matière de bioremédiation, il pourrait être envisagé de tester des plantes au métabolisme particulier se développant dans des environnements hostiles (milieux salins, contamination par des métaux lourds,...) pour tenter d'identifier des espèces végétales présentant des aptitudes à la décontamination des sols pollués par la chlordécone.

b) Recherches ciblées

- **Dynamique de la molécule de chlordécone dans le sol**

Même si une première modélisation inter-annuelle du devenir de la chlordécone dans les sols, sous l'effet du lessivage par les eaux de drainage, rend compte des stocks résiduels de chlordécone dans les andosols, une approche mécaniste est nécessaire à deux échelles :

- comprendre et modéliser les vitesses de désorption dans deux ou trois types de sols (andosols, sols ferrallitiques, sols argileux à halloysite et smectite) ; cette approche pourrait être mise en œuvre par des expérimentations sur colonnes non remaniées de sols contaminés et l'utilisation de modèles existants, en testant notamment le rôle de l'état hydrique initial, mais aussi les phases d'émission de composés organiques hydrosolubles susceptibles de jouer le rôle de transporteurs ;
- intégrer ces résultats à l'échelle d'un bassin versant, dont le fonctionnement hydrologique sensu stricto est déjà connu (surfaces contributives au ruissellement, rôle des états de surface, dynamique des nappes), déjà instrumenté en préleveurs, qui permettrait d'avoir une véritable connaissance des mécanismes et une modélisation des voies de pollution des différentes ressources en eau.

A ces deux échelles, il serait du reste très efficace de coupler la dynamique de la chlordécone, dont le comportement physico-chimique est extrême par son hydrophobicité, et qui ne se dégrade pas, avec celle de pesticides actuellement utilisés, comme le cadusafos, plus polaire, et biodégradable à échéance de quelques semaines, et le glyphosate, encore plus polaire. Ce couplage permettrait de mieux repérer les transferts précoces, avant sorption, et les comportements de désorption des différentes molécules, et de quantifier et modéliser leur impact sur les ressources en eau.

- **Comportement des différentes molécules de pesticides dans les sols tropicaux**

L'étude comparative du comportement de différentes molécules de pesticides en milieu tropical humide, permettra d'établir un modèle intégrant la stabilité de la molécule, sa capacité de fixation dans les sols et sa disponibilité dans le milieu pour l'évaluation de leur impact environnemental. Des indicateurs d'impact des pesticides pourront alors être choisis avec plus de pertinence pour les milieux tropicaux. La molécule de chlordécone est à considérer comme une référence dans cette étude (stabilité de la molécule, forte affinité avec la matière organique des sols, faible solubilité dans l'eau, ...).

- **Relations sol/plantes**

Les résultats obtenus dans la rubrique précédente, révélant les concentrations dans les solutions du sol et la continuité de ces dernières, permettront d'approcher la compréhension des niveaux de contamination obtenus par contact, ou par prélèvements racinaires, d'organes souterrains et aériens de plantes, en fonction :

- de la dynamique hydrique des sols,
- des types de sols.

La compréhension du rôle de ces deux facteurs permettrait alors de réfléchir à des systèmes de culture dont la conformation et la localisation seraient définies dans le but de minimiser les transferts sols → plantes.

- **Dynamique dans la plante : modèle cucurbitacées**

Pour la chlordécone, comme pour la plupart des molécules pesticides, il s'agit d'un champ de recherche très peu renseigné. Une cucurbitacée pourrait être choisie comme modèle, pour éclairer la question de contamination des parties aériennes après entrée racinaire : mobilisation via exsudats, ligands de transport, voie apoplasmique ou symplasmique, relation avec la transpiration, remobilisation du système foliaire aux organes récoltés...

S'agissant des légumes racines (Discoreacées, Aracées, ...), la contamination par contact est manifeste, même si ce n'est probablement pas la seule voie. Aller plus loin dans la connaissance des cinétiques et géométries de contamination des organes souterrains risque de se heurter à un obstacle majeur : l'écophysiologie et la physiologie de ces plantes sont très peu renseignées. Les ignames, sur lesquels l'INRA et le CIRAD font un effort de recherche, pourraient être retenus comme modèle.

- **Méthodologie analytique**

Cette activité concerne la mise au point et le transfert d'une méthodologie analytique plus adaptée à la gestion du risque de contamination par la chlordécone (SPME). Il s'agit d'établir et de tester tous les paramètres du processus analytique (effet des matrices, effet de la fibre, analyse de la sensibilité de la mesure, qualité de la répétabilité, mode préparatoire de l'échantillon, ...). Cette activité sera conduite conjointement par une équipe du CIRAD de Montpellier et du PRAM à la Martinique.

- **Contamination des produits animaux**

Les analyses sur les produits animaux sont peu nombreuses et pour la plupart négatives, mais ne concernent pas des productions dont l'exposition peut être forte. Ce projet est lié à l'analyse des productions informelles (cf proposition expertise 3) et à l'hypothèse d'une consommation élevée de produits animaux provenant de ce type de production. Aucune

information n'existe sur l'accumulation de la molécule de chlordécone le long de la chaîne alimentaire. Une première étape consiste à évaluer la contamination des produits.

- **Contamination des produits transformés**

Un premier test a été effectué sur des lots de canne à sucre pour le sucre et le rhum. Ces premiers résultats doivent être confirmés et consolidés. Il s'agira ensuite, selon les résultats des contaminations observées dans les produits frais (expertise 1), d'évaluer l'impact des procédés de transformation sur d'autres produits (jus, confiture, ...).

c) Recherches d'accompagnement

- **Impact du niveau de pollution des sols pour les filières de production aux Antilles**

Cette activité complète l'état des lieux pour affiner le diagnostic de la contamination par la chlordécone aux Antilles. Il s'agit dans ce projet d'évaluer, par filière de production, quelles surfaces, type de producteurs, volumes de produits sont concernés par la contamination et de déterminer les impacts agronomiques, économiques et environnementaux des niveaux de contamination des sols. Cette analyse permettra d'engager, de manière objective, un accompagnement des producteurs les plus concernés.

- **Accompagnement des filières existantes pour la gestion des risques liés aux pesticides**

Dans un premier temps, ce projet, lié à la contamination des sols par la chlordécone, permettra la mise en place d'un outil de gestion du risque phytosanitaire et son transfert auprès des utilisateurs. La mise en place d'un tel système implique la cohérence des moyens sur le terrain et, en particulier, l'adéquation des moyens analytiques (mise au point d'un systèmes de détection rapide, laboratoire, ...).

Dans un deuxième temps, ce projet intégrera les résultats agronomiques issus des programmes de recherche conduits par les différentes équipes scientifiques en terme de système de cultures innovants, prenant en compte les contraintes environnementales.

- **Appui au changement et à l'évolution de l'agriculture aux Antilles**

Ce projet n'est pas uniquement centré sur la problématique « pesticide », mais a pour objectif l'intégration de cette problématique dans les questions de dynamiques agricoles, de l'impact environnemental de l'agriculture aux Antilles. La co-construction de critères avec les acteurs et l'élaboration d'indicateurs sur la durabilité des systèmes de production permettront également l'élargissement de la réflexion au devenir de l'agriculture dans les DOM (zones insulaires tropicales, RUP, ...) et à la proposition de scénarios de politique agricole.

Bibliographie :

- Achard R., Caron A., Chabrier C., (2004) Etat d'avancement du projet à la Martinique. « Evaluation et réduction des risques liés à l'utilisation des pesticides » projet MEDD, 14p.
- Achard R., Chabrier C. (2004) Cartographie du risque de pollution des sols par les organochlorés. Fiche technique de mode opératoire : prélèvement d'un échantillon de sol, CIRAD, 2p.
- Achard R. Calba H. et Lebrun M. et, (2005) Etude du transfert de la chlordécone entre le sol et la plante. in Atelier du 3 au 7 octobre 2005 Dossier « pollution par les organochlorés aux Antilles »
- AFSSA, (2005), Première évaluation de l'exposition alimentaire de la population martiniquaise au chlordécone. Propositions de limites maximales provisoires de contamination dans les principaux aliments vecteurs, 34p
- Ahmad, R., R.-S. Kookana, A. M. Alston et I. O. Skiemstad (2001). "The nature of soil organic matter affects sorption of pesticides. 1. Relationships with carbon chemistry as determined by ¹³C CPMAS NMR spectroscopy." *Environmental Science and Technology* 35(5): 878-884.
- Braudeau E. (2005) Biofonctionnement des sols tropicaux in Atelier du 3 au 7 octobre 2005 Dossier « pollution par les organochlorés aux Antilles »
- BRGM/RP-53262-FR,
- Achard R. Perrier X., Chabrier C. et Lassoudière A., (2003) Cartographie du risque de pollution des sols de Martinique par les organochlorés Rapport Phase1 Méthodologie d'échantillonnage à la parcelle, BRGM, 28p.
 - Desprat JF., Comte JP., Perian G. (2003) Cartographie du risque de pollution des sols de Martinique par les organochlorés Rapport Phase2, BRGM, 26p
 - Desprat JF., Comte JP., Chabrier C. (2004) Cartographie du risque de pollution des sols de Martinique par les organochlorés Rapport Phase3, BRGM, 25p
- Brugneaux S., Pierret L., et Mazataud V., (2004) Les agressions d'origine anthropique sur le milieu marin côtier et leurs effets sur les écosystèmes coralliens et associés de la Martinique, Les cahiers de l'Observatoire N°1, Observatoire du Milieu Marin Martiniquais, 90p.
- Cabidoche, Y.-M. (2005). Etat des connaissances sur la contamination des sols et des végétaux par le chlordécone aux Antilles françaises. Groupe d'Etude et de Prospective Chlordécone, Martinique.
- Cabidoche, Y.-M., C. Clermont-Dauphin, P. Cattan, R. Achard, A. Caron et C. Chabrier (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 culture, Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) - CIRAD, Département Fihor: 52 p.
- Cabidoche Y.-M., Achard R., Caron A., Cattan P., Chabrier C., Clermont-Dauphin C., Lafont A., 2005. Stockage dans les sols à charges variables et dissipation dans les eaux de zoocides organochlorés autrefois appliqués en bananeraies aux Antilles : relation avec les systèmes de culture. Colloque « Pesticides » MEDD, Avignon, 14-16 décembre 2005. (Poster et Résumé)
- Cabidoche YM., Jannoyer M. et Vannièrre H. (2005), Atelier du 3 au 7 octobre ; Dossier « pollution par les organochlorés aux Antilles », CIRAD -INRA, 19p
- Campanella, B. F. et R. Paul (2000). "Presence, in the Rhizosphere and Leaf Extracts of Zucchini (*Cucurbita pepo* L.) and Melon (*Cucumis melo* L.), of Molecules Capable of increasing the Apparent Aqueous Solubility of Hydrophobic Pollutants." *International Journal of Phytoremediation* 2: 145-158.
- Carduner S., Cabidoche Y.-M., (2005). Etat de dégradation des sols des hauts de Matouba (Saint Claude, Guadeloupe). Perspectives de pérennisation de l'agriculture. Rapport interne, INRA-APC, 75 p)

- 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.
- Dupuis, G. (2005). "Cours de chimie organique." from <http://www.faidherbe.org/site/cours/dupuis/carbon.htm>.
- Guimont, S., (2006), Synthèse bibliographique sur la pollution des sols par la chlordécone aux Antilles françaises, CIRAD, 33p.
- Hülster, A., J. F. Müller et H. Marschner (1994). "Soil-Plant Transfer of Polychlorinated Dibenzo-*p*-dioxins and Dibenzofurans to Vegetables of the Cucumber Family (*Cucurbitaceae*)." *Environmental Science and Technology* 28: 1110-1115.
- Lunney, A. I., B. A. Zeeb et K. J. Reimer (2004). "Uptake of Weathered DDT in Vascular Plants: Potential for Phytoremediation." *Environmental Science and Technology* 38: 6147-6154.
- Mattina, M. I., W. Iannucci-Berger et L. Dykas (2000). "Chlordane Uptake and its translocation in Food Crops." *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 48: 1909-1915.
- Monti D.,(2005) Etude du niveau de contamination des organismes aquatiques d'eau douce par les pesticides, en Guadeloupe, Etude DIREN 35p.
- OMS (1984). Chlordécone. Critères d'hygiène de l'environnement 43. Genève, Programme des Nations Unies pour l'Environnement, Organisation Internationale du Travail, Organisation Mondiale de la Santé: 62 p.
- Orndorff, S. A. et R. R. Colwell (1980). "Microbial Transformation of Kepone." *Applied and Environmental Microbiology* 39(2): 398-406.
- ONF, (1998). Mesures d'accroissement du Poirier pays sur différentes placettes. Bulletin technique ONF n°36 décembre 1998.
- 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, INAPG, MNHN, Univ. Paris VII, 51 p.)
- Risk Assessment Information System. (2005). "Toxicity and Chemical-Specific Factors Data Base (Kepone)." from http://risk.lsd.ornl.gov/cgi-bin/tox/TOX_9801.
- Sautereau N., (1995). Etude de l'importance des cultures associées dans les systèmes de production créoles. Exemple d'une petite région agricole : le Nord de la Basse Terre (Guadeloupe). Rapport d'étude, INRA-APC, Guadeloupe, 26p. + annexes
- Schnoor, J. L. (2002). Phytoremediation of Soil and Groundwater Technology Evaluation Report TE-02-01, Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center: 45 p.
- 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.
- Varlet-Grancher C., (1982). Analyse du rendement de la conversion de l'énergie solaire par un couvert végétal. Thèse de Doctorat, Univ. Paris Sud Orsay, 144p.
- White, J. C. (2001). "Plant-facilitated mobilization and translocation of weathered 2,2-bis(*p*-chlorophenyl)-1,1-dichloro-ethylene (*p,p'*-DDE) from an agricultural soil." *Environmental Toxicology and Chemistry* 20: 2047-2052.
- White, J. C., M. I. Mattina, W.-Y. Lee, B. D. Eitzer et W. Iannucci-Berger (2003). "Role of organic acids in enhancing the desorption and uptake of weathered *p,p'*-DDE by *Cucurbita pepo*." *Environmental Pollution* 124(1): 71-80.
- Xing, B. (2001). "Sorption of naphthalene and phenanthrene by soil humic acids." *Environmental Pollution* 111(2): 303-309.
- Zébus M.F., Diman J.L., Darie E., Causeret F., Jock S., (2002). Diversité des pratiques de production de canne à sucre en Guadeloupe (Antilles Françaises). Conséquences pour la recherche et le Développement. In « Perspectives de développement de la canne à sucre en milieu insulaire : approches technico-économiques, sociales, culturelles », Acte des Rencontres Internationales, 2-5 octobre 2002, Piton Saint-Leu, La Réunion.

Sites web à consulter :

- AFSSA : www.afssa.fr

et <http://www.afssa.fr/ftp/afssa/31965-32028.pdf>

- DAF –SPV
- DIREN : www.martinique.ecologie.gouv.fr et www.guadeloupe.ecologie.gouv.fr

Et http://www.martinique.ecologie.gouv.fr/telecharge/Qualite/SEQeau_pesticides_bilan.pdf

http://www.guadeloupe.ecologie.gouv.fr/page_semad/production_service/pesticides.pdf

Documents complémentaires :

Notes

GEP : Cabidoche YM., Jannoyer M. et Vannière H. (2005), Atelier du 3 au 7 octobre ; Dossier « pollution par les organochlorés aux Antilles », CIRAD –INRA, 19p

GEP : Note de communication du GEP au GREPHY et GREPP, INRA-CIRAD, octobre 2005, 2p

GEP : Point sur l'avancement des travaux relatifs à la problématique « pollution par les organochlorés aux Antilles », Note INRA-CIRAD janvier 2006, 19p

Propositions de projets

Pouzet D. (2006), Projet de recherches sur les potentialités et les modalités de production de canne à sucre pour la biomasse, CIRAD UPR5 Systèmes canniers, 6p.

Pouzet D., (2006) Appel à projet Biocarburants ADEME Guadeloupe, CIRAD UPR5 Systèmes canniers, 3p.

Rapports :

Fresu MT. (2006). Déterminants de la diversification dans les exploitations bananières contaminées au chlordécone en Guadeloupe. Rapport de stage Faculté d'agronomie de Milan (  paraître).

Charlier JB.  tude des transferts hydriques et de pesticides au sein d'un petit bassin versant cultivé sur des sols volcaniques en zone tropicale. Le bassin expérimental de F f , Guadeloupe, CIRAD UPR26 Systèmes de production bananiers, plantain et ananas, Thèse d'hydrologie tropicale à l'Ecole doctorale Sciences de la terre et de l'eau, Université de Montpellier II (2004-2006)

Annexes

Annexe 1 : Lettre de commande des Ministères

République Française

*Le Ministre des Solidarités,
de la Santé et de la Famille*

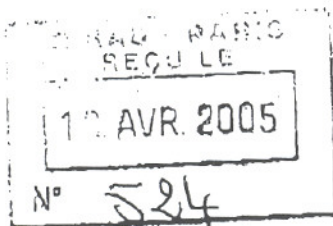
*Le Ministre de l'Agriculture,
de l'Alimentation, de la Pêche
et de la Ruralité*

*Le Ministre de l'Ecologie
et du Développement Durable*

*Le Ministre des Petites et Moyennes
Entreprises, du Commerce, de l'Artisanat
des Professions Libérales et de la Consommation*

Le Ministre de l'Outre-Mer

Paris, le 14 AVR. 2005



à

Madame la Présidente de l'Institut
national de la recherche agronomique,

Monsieur le Directeur général du Centre
de coopération internationale en recherche
agronomique pour le développement,

Monsieur le Directeur général de l'Agence
française de sécurité sanitaire des aliments.

Objet : présence de chlordécone et d'autres pesticides organochlorés en Martinique et en Guadeloupe

La détection de résidus de chlordécone, ainsi que d'autres pesticides organochlorés, dans les sols, les eaux et certains produits alimentaires en Guadeloupe et en Martinique a conduit les pouvoirs publics à mettre en place un plan d'évaluation et de gestion des risques.

Pour évaluer les mesures prises et proposer, le cas échéant, leur renforcement, voire des actions complémentaires, les corps d'inspection de nos ministères ont été saisis. Une mission s'est ainsi rendue sur place en février 2005 et doit rendre prochainement ses conclusions. Celles-ci seront portées à votre connaissance.

De plus, le Directeur général de l'alimentation, le Directeur général de la santé et le Directeur général de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes ont, en octobre 2003, saisi le Directeur général de l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments pour estimer une dose journalière maximale tolérable provisoire pour ces pesticides, examiner la proposition d'une limite maximale temporaire de résidus et apporter un appui à l'Institut national de veille sanitaire en vue d'estimer, selon plusieurs scénarios, l'exposition des populations des Antilles aux pesticides organochlorés.

Pour compléter ce dispositif, nous souhaitons mobiliser sans délai les instances de recherche publique que vous représentez afin qu'elles contribuent aux travaux déjà engagés et à la mise en place des programmes de recherche nécessaires à l'amélioration des actions publiques.

Afin de disposer de l'ensemble des éléments permettant une gestion optimale des risques sanitaires, dans un contexte socio-économique complexe, il s'avère indispensable d'élaborer et d'analyser les différents scénarios d'évolution possibles et les orientations que doit promouvoir l'Etat, à court, moyen et long terme, dans ces zones géographiques, afin de préserver la santé des populations, contribuer à restaurer un environnement sain et promouvoir une agriculture locale compétitive et dynamique.

C'est la raison pour laquelle nous souhaitons que vous constituiez un groupe d'étude et de prospective pour travailler dans les directions décrites ci-après.

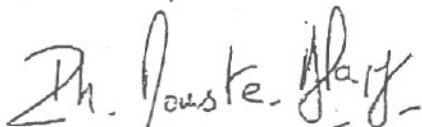
En premier lieu le groupe caractérisera avec précision la situation actuelle en Martinique et Guadeloupe en termes de pollution par le chlordécone et les autres organochlorés, en termes de structure et de fonctionnement des exploitations agricoles et en termes de filières de productions, en portant son attention sur tous les secteurs d'activité affectés par cette pollution. Il identifiera ainsi les surfaces concernées prioritairement (en fonctions d'hypothèses qu'il précisera) par un enjeu de santé publique en raison d'une pollution du sol, de l'eau ou des denrées alimentaires produites. Une attention particulière sera apportée aux jardins familiaux.

Le groupe étudiera ensuite les solutions alternatives pour l'exploitation de ces surfaces et les analysera selon trois axes : (1) l'existence d'une filière économique adéquate, (2) leur faisabilité socio-économique pour les différents types d'exploitations, en identifiant les mesures d'accompagnement possibles et (3) leur impact environnemental et sanitaire.

Sur la base de ces solutions, le groupe formulera différents scénarios pour l'action des pouvoirs publics. Il caractérisera, pour chacun de ces scénarios, le niveau de protection environnementale et sanitaire qu'ils permettent d'atteindre ainsi que les implications techniques et socio-économiques (recomposition des exploitations, importation massive de certaines denrées, impact sur l'emploi...).

Enfin, le groupe d'étude fixera un échéancier, décrira les actions éventuellement déjà entreprises pour lever les incertitudes qui subsistent et les nouveaux programmes de recherche envisagés, en indiquant les autres partenaires engagés avec vos organismes.

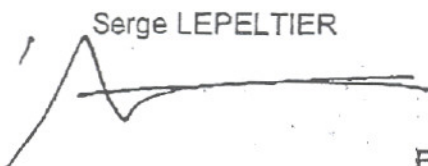
Le 8 septembre 2004, à la demande du Ministre chargé de l'agriculture, vous avez désigné M. BONHOMME, M. GANRY et Mme LOULERGUE comme étant les personnes les plus qualifiées pour constituer ce groupe d'étude à qui nous demandons de rendre ses conclusions dans un délai de six mois. Leur travail pourra s'appuyer sur les services de nos ministères, déconcentrés aussi bien que centraux, afin de disposer de l'ensemble des éléments qui leur seront nécessaires.



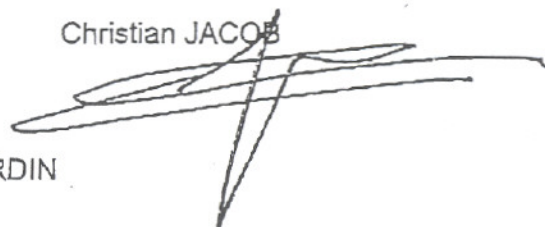
Philippe DOUSTE-BLAZY



Dominique BUSSEREAU

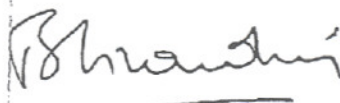


Serge LEPELTIER



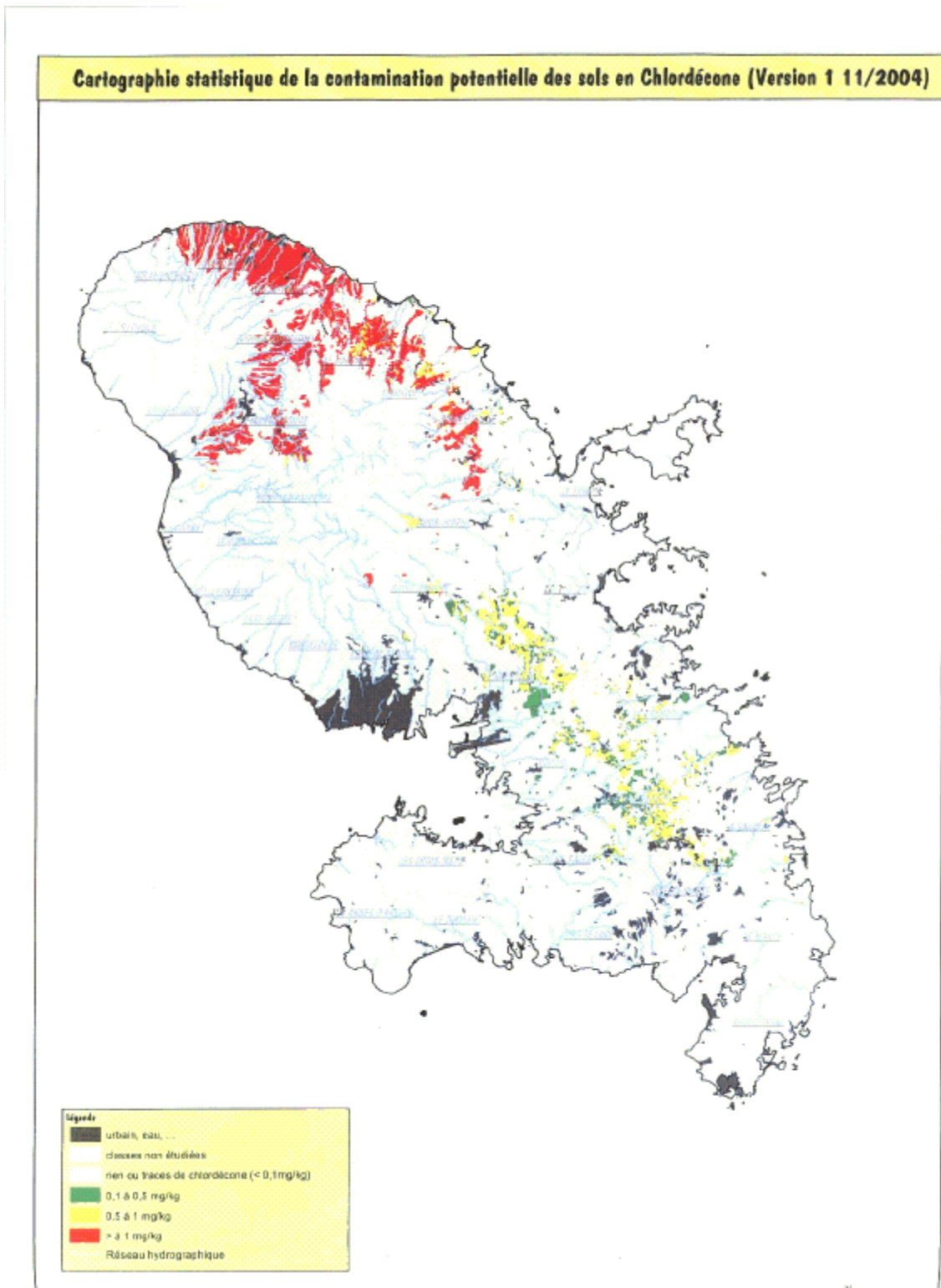
Christian JACOB

Brigitte GIRARDIN



Annexe 2 :

Carte du risque de contamination en chlordécone à la Martinique (BRGM/ RP53262-FR, 2004)



Annexe 3 :

A titre d'exemple : Premiers calculs de simulation économique pour une reconversion par des systèmes sylvicoles

Un début de simulation économique a été fait pour une reconversion par des systèmes sylvicoles multifonctionnels, en comparaison avec la canne biomasse combustible. Cette simulation intègre des scénarios de systèmes forestiers multi-espèces, adaptés aux sols mécanisables très contaminés, satisfaisant à une demande de biomasse combustible, au marché existant d'étais de construction et de charbon de bois, et à la production de bois précieux.

Les principes :

- Plusieurs espèces sont notoirement adaptées au contexte pédoclimatique des andosols, les sols les plus fortement contaminés dans les deux îles.
- Les fonctions attendues peuvent être assurées par au moins une espèce :

Bois d'ébénisterie : Bois de rose (*Cordia alliodora*)

- o Charbon de bois : Mauricif (*Byrsonima trinitensis*)
 - o Etais : Bois côtelette (*Miconia mirabilis*)
 - o Biomasse : Bois côtelette (*Miconia mirabilis*)
- L'implantation de ces espèces peut être rapidement opérationnelle : l'ONF produit en pépinière la première (5 €/plant), les deux dernières se reproduisent aisément par graines, dont on connaît les coûts de collecte et semis (16h /ha = 160 €/ha)
 - Les prix de vente sont connus pour les étais (2,5 €/pièce) et le charbon de bois (2 €/kg) ; la marge nette sur le bois précieux a été minorée à 25 €/m³ dans un contexte de filière à reconstruire, la vente de biomasse a été estimée à 50 €/tMS.

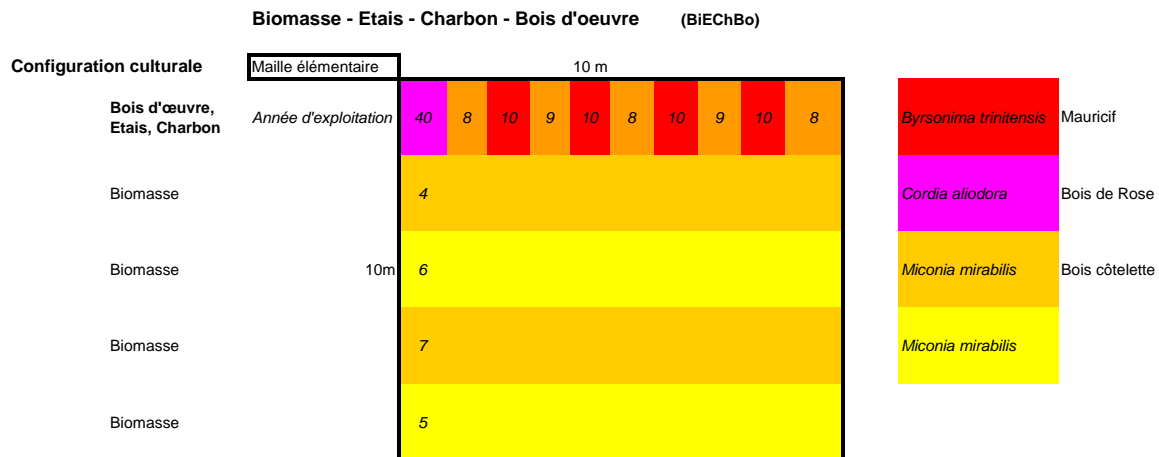
La production de bois fort sur les andosols de la Martinique a été estimée par l'ONF (1998) à 20 m³/ha/an (hors houppiers), ce qui pourrait correspondre à au moins 20 t/ha/an de biomasse totale dans la phase de croissance rapide. Si cette valeur est inférieure aux 35 t/ha/an que l'on peut obtenir avec les tiges de canne à sucre (Varlet-Grancher, 1982), il est à noter que cette productivité est obtenue sans fertilisation et bénéficiera des reliquats de fertilisation, notamment de la capacité des andosols à sorber les nitrates.

Sur ces hypothèses ont été construits plusieurs scénarios multi-fonctions, dont l'avantage est de présenter une couverture précoce, puis permanente, minimisant les besoins d'entretien (désherbage au sens large).

Les configurations :

Plantations ou semis sont faits en rangs de 2 mètres d'écartement au départ, autorisant un désherbage mécanique. La figure 1 illustre une configuration possible, avec un écartement initial sur rang de 1 m, mais pourrait être resserré pour *Miconia*.

Figure 1 : Une configuration possible de peuplements forestiers multifonctions



Dans l'exemple de la figure 1, les densités sont de 25 000 plantes/ha, dont 20 000 tiges de *Miconia*, 400 de *Byrsonima* et 100 de *Cordia*.

Les coûts

Les coûts de récolte mécanisée de la biomasse (bois tendres tronçonnés) ont été extrapolés de ceux de la canne à sucre. Les coûts de récolte de gaules sont basés sur un SMIG environné de 10 €/heure, avec collecte de 30 gaules par heure pour les états et 50 gaules tronçonnées en 8 heures pour le charbon de bois. Le coût de transformation, emballage et livraison, a été estimé à 3 fois le coût de récolte pour le charbon. Le détail de la simulation est proposé dans le tableau XX1, qui présente celle d'un système forestier biomasse-états-charbon de bois-bois précieux.

Tableau 1 : table de simulation de la rentabilité économique d'un système forestier biomasse-étais-charbon de bois-bois précieux.

Éléments technico-économiques	Année	Biomasse combustion							Etais		Charbon	Bois d'œuvre
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	40
Production												
Productivité tMS/ha/an	20											
Biomasse totale tMS/ha					80	100	120	140	160	180	200	800
Coûts d'implantation												
Pulvérisage		800										
Récolte graines + semis (bois côtelette+mauricif)		1500										
Plantation (bois de rose)		5040										
Désherbage puis gyrobroyage		340	136	136	136	136	136	136	136	136	136	
Exploitation												
Taillis => biomasse combustible												
Récolte					200	200	200	200	50	50	50	
Biomasse Cor tMS/ha/an					16	20	24	28	3	2	5	
Vente €/tMS					800	1000	1200	1400	158	119	264	
Marge €/ha					600	800	1000	1200	108	69	214	
Etais de construction												
Gaules/ha/an									1500	1000		
Biomasse tMS/ha/an									6	5		
Récolte 10 €/h 30 gaules/h									500	333		
Vente 2,5 €/étai									3750	2500		
Marge €/ha									3250	2167		
Charbon												
Gaules/ha/an										400		
Biomasse tMS/ha/an										11		19
Récolte 10 €/h 50 en 8h										140		0
Transformation										420		764
Charbon tMS/ha										2		4
Vente 2 €/kg 20% ch / kg MS										4224		7680
Marge €/ha										3664		6916
Bois d'œuvre												
Récolte m3/ha densité 0,8												384
Marge nette/m3												25
Marge €/ha												9600
Marge résultante												
€/an		-7680	-136	-136	464	664	864	1064	3222	2099	3742	9600
			<i>Moyenne /9 ans</i>	<i>47</i>								
			<i>Moyenne /10 ans</i>	<i>417</i>								
			<i>Moyenne /40 ans</i>	<i>344</i>								

Les nombres en italique représentent les coûts ou gains en euros

Sur les mêmes bases de calcul, plusieurs autres scénarios ont été évalués :

- o biomasse (années 4-7) – étais (années 8-9) – charbon de bois (année 10)
- o biomasse – charbon de bois (années 9-10)
- o biomasse (année 8)

Tableau 2 : Comparaison des marges nettes moyennes annuelles simulées de plusieurs scénarios de systèmes forestiers multifonctions sur toute la durée de l'exploitation, avec subvention de reconversion de 2 000 €/ha.

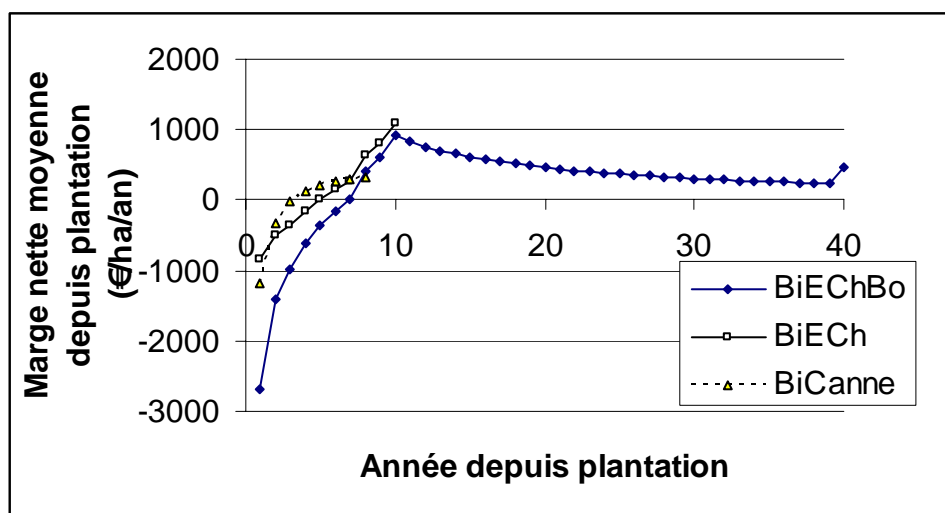
Système (subvention de reconversion de 2000 €/ha)	Durée totale (ans)	Marge nette moyenne (€/ha/an)	Année de 1ere marge positive depuis plantation
biomasse – étais – charbon de bois – bois précieux.	40	469	7
biomasse – étais – charbon de bois	10	1101	5
biomasse – charbon de bois	10	1006	6
biomasse bois	8	744	8
biomasse canne à sucre	8	334	4

Le tableau 2 présente les marges nettes moyennes annuelles par hectare des différents scénarios, comparés en supposant que chacun bénéficie d'une **subvention à la reconversion de 2 000 €/ha**.

Il ressort de ces simulations comparées que les solutions les plus attractives seraient la combinaison des fonctions correspondant aux besoins du marché (charbon, étais), avec une occupation interstitielle par de la biomasse, minimisant les coûts d'entretien. On remarquera que la simulation de marge moyenne en biomasse pure (744 €/ha), malgré une plus faible productivité (20 tMS/ha/an) apparaît plus attractive que la production de biomasse de canne (35 t/ha/an), qui sur la même base de coûts et de prix d'achat (50 €/t) aurait dégagé une marge nette de 334 €/ha. Cette dernière marge serait inférieure à celle du système multifonctions complet, incluant in fine la production de bois précieux, à ceci près qu'elle est positive dès la deuxième année, alors que le système complet présente une marge nulle entre les années 11 et 39. Les coûts de production de la canne ont été tirés de ceux de la canne à sucre selon Zébus et al. (2002), en rabaisant les coûts d'entretien des rejets de 1 467 à 1 200 €/ha grâce à des plantations en rangs resserrés.

La figure 2 illustre la progression des marges moyennes annuelles par hectare de trois scénarios contrastés : biomasse – étais – charbon de bois – bois précieux, biomasse – étais – charbon, biomasse de canne.

Figure 2 : Evolution des marges moyennes annuelles depuis plantation sur trois scénarios : biomasse–étais–charbon de bois–bois précieux (BiEChBo), biomasse–étais–charbon (BiECh), biomasse de canne (BiCanne)



On retiendra que des scénarios forestiers multifonctions, incluant la production d'étais de construction, puis de charbon de bois, sont plausibles. Bien sûr, ils ne sont pas généralisables sur des centaines d'hectares, car ils répondent à des marchés limités, à évaluer. Ils ont cependant un grand intérêt patrimonial, car aujourd'hui les productions d'étais, voire de charbon, se font en partie par l'usage illicite de la forêt départementalo-domaniale, et même du Parc National de la Guadeloupe. L'ONF apparaît motivé pour tester la faisabilité de telles configurations sylvicoles multifonctions.

Annexe 4 :

Bilan partenarial et financier des activités de recherche déjà engagées

	durée	Coût total, €	Financements obtenus, €	origine des financements	partenariat
TRAVAUX DE RECHERCHE EN COURS					
Relation niveau de contamination du sol niveau de contamination des cultures	janv 2003-mai 2004	61 600	22 500	Feoga	Cirad
			39 000	Région Martinique	
Banenvorch: stockage dans les sols à charges variables et dissipation dans les eaux de zoocides organochlorés autrefois appliqués en bananeraie aux Antilles	sept 2003 - déc 2005	37 000	24 900	MEDD	Inra - Cirad
		280 000	155 000		
Cultures en créneaux				DAF Gpe - UPROFIG	Inra
Déterminants de la diversification dans les exploitations bananières	juin 2005 - déc. 2005	5 500	3 025	Docup Banane Gpe	Cirad
Hétérogénéité de la contamination des parcelles	janv 2004-dec 2005	18 400	10 120	Docup Banane Mtq	Cirad
Appui méthodologique à la mesure de chlordécone dans les plantes (SPME) et dynamique de la chlordécone entre le sol et la plante en milieu contrôlé	avril 2005 - déc. 2005	25 000	9 050	CIRAD (PF GRENAT + dép FLHOR)	Cirad
SIRS sol Martinique Adsorption et désorption de la chlordécone dans les différents types de sols	jan 2004-déc 2006	149 600	38 000	MOM	IRD UAG Cirad
TOTAL		577 100	301 595		

Annexe 5 :

Coûts prévisionnels pour les actions de recherche à envisager

	coût minimum prévisible (€)
Volet expertise	
Campagne d'analyses complémentaires	680 000
Mode de consommation et exposition	150 000
Enquête impact des productions informelles	16 000
Faisabilité reconversion biomasse énergie	25 000
Veille décontamination	25 000
Volet recherche	
Recherche ciblée	
Couplage transfert chlordécone/carbone hydrosoluble	150 000
Transfert sol/plante : modèle cucurbitacées	150 000
Méthodologie analytique innovante	90 000
Contamination des produits animaux	A déterminer
Contamination des produits transformés	A déterminer