



Achard Raphaël(1),
Cabidoche
Yves-Marie(2),
Caron Audrey (1),
Nelson Romuald(3),
Duféal Denise (3),
Lafont Antoine(2),
Lesueur-Jannoyer
Magalie(1)

(1)Cirad PRAM,
Petit Morne 97285
Le Lamenin,
achard@cirad.fr

(2)INRA, URAPC,
Domaine de Duclos,
97170 Petit Bourg,
cabidoch@antilles.inra.fr

(3)FREDON,
Pointe des Grives,
972 Fort-de-France

Contamination des racines et tubercules cultivés sur sol pollué par la chlordécone aux Antilles

Résumé :

Les racines et tubercules sont les productions les plus sensibles à la contamination par les organochlorés présents dans les sols des anciennes bananeraies aux Antilles. La contamination est principalement due à un contact direct entre la molécule de chlordécone et l'organe souterrain. La contamination dépend du type de sol, et de l'état hydrique de la parcelle. Elle est proportionnelle au niveau de contamination du sol. Les racines et tubercules analysés se comportent de manière comparable, leur sensibilité au transfert est équivalente. La contamination de la peau est très supérieure à celle de la pulpe. Des modèles simples indiquent que le niveau de contamination de la peau dépend de la surface de l'organe en contact avec le sol (forme de l'organe souterrain) et de la durée de la période de croissance dans le sol (temps de contact organe/sol). La diffusion au sein de la racine ou du tubercule est hétérogène.

La gestion de la pollution ne peut s'envisager, dans un premier temps et à court terme, qu'en prenant en compte le réservoir principal de la pollution, c'est-à-dire le sol, et en utilisant l'analyse de sol comme indicateur de son niveau de pollution. La relation linéaire existant entre contamination des racines et tubercules et niveau de pollution du sol et la fixation des Limites Maximales de Résidus (LMR) autorisées pour les aliments nous permettent de construire un outil d'anticipation du risque pour ces productions végétales. Grâce à cet outil, le producteur pourra évaluer quelles productions sont autorisées sur sa parcelle et choisir celles qui sont les moins à risque pour son exploitation.

Introduction :

En 2002, un lot de patate douce en provenance de la Martinique est saisi lors d'un contrôle à son arrivée à Dunkerque car il présentait une contamination par la chlordécone. Depuis lors, en collaboration avec les producteurs de la filière igname en Guadeloupe et ceux des filières dachine et patate douce en Martinique avec l'appui du Conseil Régional, des études ont été conduites afin de mieux comprendre le mode de contamination des racines et tubercules par la chlordécone.

Ces cultures vivrières sont parfois installées sur d'anciennes bananeraies dont les sols sont pollués. Un arrêté préfectoral (2003) a réglementé

leur production et rendu obligatoire l'analyse de sol avant plantation [1]. Lorsque l'analyse est négative, la production est sans risque. Lorsque l'analyse est positive, le risque existe jusqu'à un certain seuil, les producteurs qui prennent ce risque se voient dans l'obligation de contrôler leur produit à la récolte et si l'analyse du produit dépasse la limite maximale de résidu (fixée à l'époque à 50µg/kg MF) le produit ne peut être commercialisé. Les producteurs vivriers ont fortement collaborés, ce qui a rendu cet arrêté efficace et a permis d'offrir des produits conformes sur les marchés. En effet en 2007 à la Martinique, aucun contrôle de la DRCCRF n'a relevé de non conformité.

MODE DE CONTAMINATION DES RACINES ET TUBERCULES : LE CONTACT DIRECT AVEC LE SOL EST LA PRINCIPALE VOIE

Les recherches ont été conduites sous différentes formes sur les deux îles :

- des essais en conditions contrôlées, sur sol présumé homogénéisé (mélangé et tamisé), permettant de préciser la validité de l'hypothèse de contamination des racines et tubercules par contact direct avec le sol
- des essais et suivis en parcelles agricoles, de type enquête agronomique, permettant de préciser, via des échantillonnages adaptés, l'existence de relations entre contamination des sols et contamination des organes souterrains en conditions réelles de culture.

Les cultures analysées sont complémentaires d'une île à l'autre selon les habitudes de consommation, les pratiques agronomiques et la demande des producteurs (données igname obtenues en Guadeloupe, données dachine-madère obtenues en Martinique).

L'ensemble des résultats sont présentés dans les rapports finaux d'exécution du projet «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» soutenu par le MEDD [2] et du projet «Contamination des tubercules cultivés sur sols pollués par les organochlorés à la Martinique» soutenu par le Conseil Régional [3].

La contamination des racines et tubercules par la chlordécone est proportionnelle à celle du sol
Le niveau de contamination observé pour les ra-

cines et tubercules dépend directement du niveau de chlordécone qui est mesuré dans le sol à proximité de l'organe souterrain. Globalement cette relation est vérifiée pour l'ensemble des racines et tubercules : igname, dachine, patate douce, radis, navet, lorsque l'on regroupe l'ensemble des données acquises pour les différents essais (figure 1, tableau 1). Une relation linéaire rend compte de cette proportionnalité. Le niveau de pollution du sol par la chlordécone explique près de 75% de la variance de la contamination des racines et tubercules. Cependant, les paramètres de cette relation peuvent être modifiés si on considère un type de sol particulier et son état hydrique. L'ensemble des données obtenues sur racines et tubercules ne dépasse cependant jamais un certain niveau de transfert, calculé à 1/5 de la teneur du sol.

des surfaces cultivées et contaminées à la Martinique. Une corrélation existe entre la teneur en chlordécone du sol et celle des bulbes récoltés, mais la variable 'teneur en chlordécone du sol' n'explique pas toute la variabilité de la contamination des dachines (figure 2). La relation est plus étroite lorsque l'on considère le type de sol, mais la forte dispersion des points indique que le transfert de la molécule de chlordécone vers les cultures bien que dépendant de la teneur du sol est soumis à d'autres facteurs (cultureaux, pédologiques, climatiques, ...). Sur nitisols (sols brun rouille à halloysite et ferrisols), le nombre de points est insuffisant pour mettre en évidence une relation linéaire, cependant pour une même teneur en chlordécone dans le sol, une plus forte contamination de la plante est observée sur nitisol que sur andosol (figure 2).

Tableau 1 : Proportionnalité entre la teneur en chlordécone du sol et la contamination des produits récoltés suivant les types de culture et les types de sol (cas de racines et tubercules).

Culture ensemble des données racines et tubercules	type de sol tous	relation plante(y)/sol(x) $y = 0,026x$	r ² 0.73	Données
Patate douce	Andosol	$y = 0.015x$	0.723	Achard
Patate douce	Nitisol	$y = 0.031x$	0.896	Achard
Patate douce	Ferrallitique	$y = 0.037x$		Cabidoche
Dachine	Andosol	$y = 0.017x$	0.42	Achard
Dachine	Nitisol	Trop peu de données		Achard
Radis	Ferrallitique	$y = 0.025x$	0.728	Cabidoche
Navet	Ferrallitique	$y = 0.02x$	0.761	Cabidoche
Igname	Ferrallitique	$y = 0.025x \cdot 0.703$	0.869	Cabidoche

Figure 1 : proportionnalité entre la contamination observée pour les racines et tubercules (mg/kg Matière Fraîche) et la teneur en chlordécone du sol (mg/kg Sol Sec).

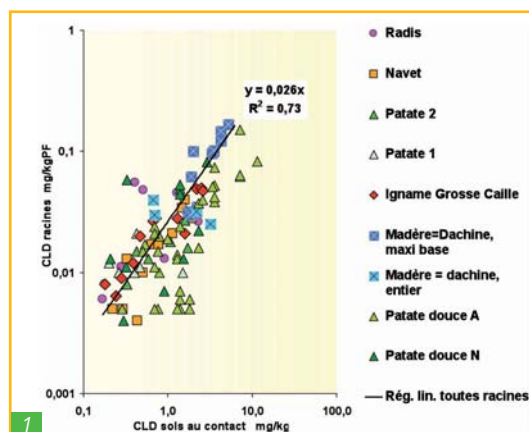
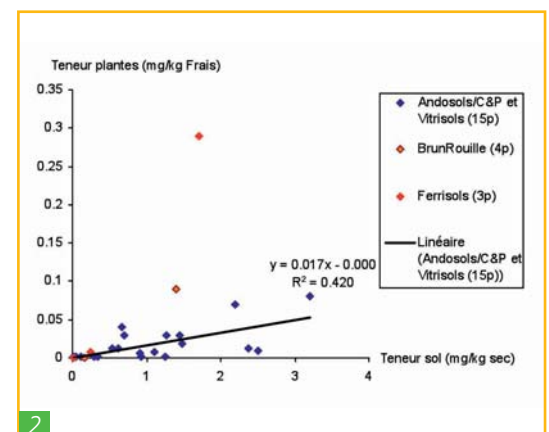


Figure 2 : relation entre le niveau de contamination du sol et celui des dachines selon le type de sol sur lequel les dachines sont cultivés (Enquête régionale, Martinique) (R Achard).

Effet du type de sol

Sensibilité des dachines (ou taro ou madères) (*Colocasia esculenta*) sur andosol et nitisol

Les résultats sont issus d'un dispositif d'enquête diagnostic effectué en collaboration avec les producteurs martiniquais (Cirad PRAM, UR26). 25 parcelles ont été analysées, la majorité (20 parcelles) sont situées sur des andosols, zone classique de culture du dachine, représentative



Sensibilité des patates douces (*Ipomea batatas*) sur nitisol et sur andosol

Cet essai a été couplé à une enquête régionale et conduit en conditions contrôlées (essai en pots sous serre) afin de réduire la variabilité spatiale de la teneur en chlordécone du sol et de tester l'effet du type de sol dans des conditions climatiques et agronomiques identiques (Cirad PRAM, UR26). Les patates douces ont été confron-



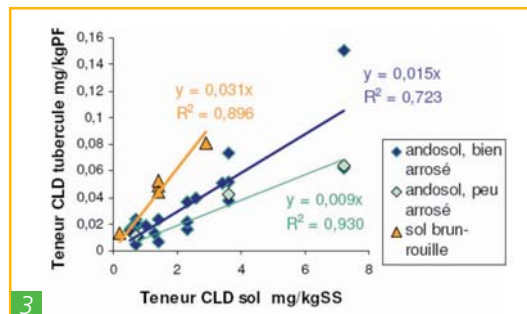
Figure 3 : Incidence de la teneur en chlordécone du sol, du type de sol et du régime hydrique sur la contamination de patates douces (R. Achard).

Figure 4 : Comparaison des contaminations des tubercules d'ignames "D cayenensis" développés dans un sol sain ou contaminé, avec un système racinaire initial développé en sol contaminé (dispositif split root) (YM Cabidoche).

Figure 5 : Comparaison des contaminations de patates douces en pot et en champ (enquête régionale) pour des sols brun rouille (nitisol) (R. Achard).

tées à des teneurs variables en chlordécone selon le type de sol. Pour les andosols sur cendres et ponces les teneurs variaient de 0.5 à 11.5 mg/kg sol sec ; pour les sols brun rouille à halloysite (nitisol) elles variaient de 0.5 à 2.9 mg/kg sol sec. Les patates douces ont été récoltées trois mois et demi après plantation des lianes.

Le premier résultat est que la variabilité de la contamination des patates douces est très élevée : pour chaque traitement, on observe un coefficient de variation des teneurs en chlordécone des organes souterrains de 50 à 70%. Cependant, la contamination de la patate douce est très fortement corrélée à la teneur du sol sur lequel elle est cultivée. Quel que soit le type de sol, la contamination des organes souterrains est proportionnelle à la teneur en chlordécone du sol (figure 3). Sur sol brun rouille, le transfert est plus efficace que sur andosol (figure 3), mais le nombre de points reste trop faible pour conclure.



Sensibilité des ignames (*Dioscorea cayenensis* cv *Grosse Caille*) sur sol ferrallitique

Deux expérimentations ont été conduites en Guadeloupe (INRA, Unité APC).

La première a utilisé des semenceaux contaminés (0.065mg/kg MF en moyenne) cultivés ensuite en pot sur sol sain. Après huit mois de développement, les ignames récoltées ne sont que très faiblement contaminées : les valeurs relevées sont très proches du seuil de détection (0.001 mg/kg MF soit 1µg/kg MF). Le sol en contact avec les tubercules montre également une contamination en fin d'expérience variable mais proche du seuil de détection (10 à 20µg/kg sol sec).

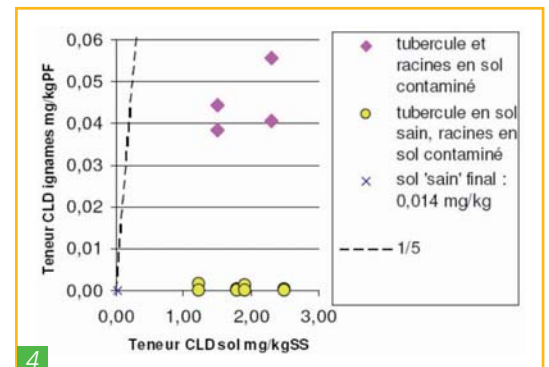
Le deuxième dispositif a utilisé des semenceaux sains cultivés ensuite en pot sur sol contaminé. La teneur moyenne du sol contaminé est de 1.68 mg/kg sol sec. Un premier lot d'ignames s'est développé entièrement au contact du sol contaminé, un deuxième lot n'a permis que le développement des racines en sol contaminé (dispositif split root, le tubercule lui-même s'est

développé dans du sol sain). Seuls les tubercules cultivés en sol contaminé montrent une contamination élevée (figure 4). L'hypothèse d'une contamination des tubercules par contact direct est ainsi confortée, car le transfert et l'accumulation au sein du tubercule via les racines sont trop faibles pour être mesurés.

Effet de l'irrigation

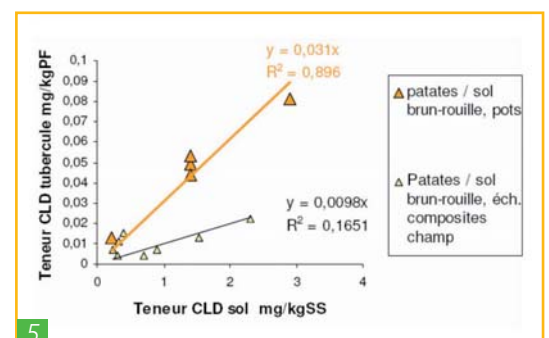
Quelques pots de l'expérimentation sur patate douce ont été conduits en conditions hydriques limitantes. Le déficit hydrique a été appliqué à partir du deuxième mois de culture et est resté modéré.

Sans que la démonstration soit formelle car le nombre de parcelles prélevées est très insuffisant, la tendance générale est que des conditions hydriques plus sèches limitent le transfert de la molécule entre le sol et la plante (figure 3). Des conditions humides semblent plus favorables au transfert de la molécule. Cette hypothèse devra être confortée par un essai spécifique comportant un nombre suffisant de répétitions.



Effet expérimentation

Les résultats obtenus en milieu contrôlé ont été confrontés à ceux obtenus lors de l'enquête régionale (Martinique). Les résultats de contamination des patates douces sont équivalents pour des faibles teneurs du sol en chlordécone mais ils sont plus faibles pour les sols en place les plus contaminés (figure 5). Cette différence pourrait



s'expliquer par le fait que les patates douces ont été récoltées en période sèche lors de l'enquête agronomique.

HÉTÉROGÉNÉITÉ DE LA CONTAMINATION AU SEIN DE LA PLANTE

Répartition pulpe/peau :

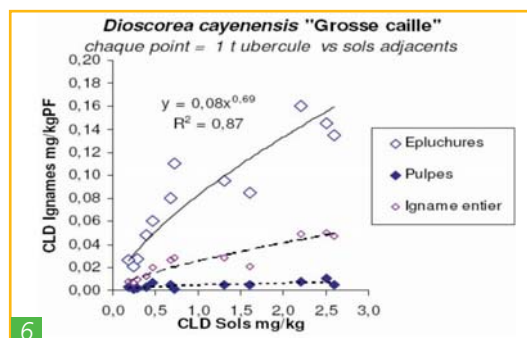
Deux expérimentations ont été conduites, sur igname en Guadeloupe (Inra, unité APC) et sur dachine à la Martinique (PRAM Cirad), afin d'explorer l'accumulation et la répartition de la molécule au sein du tubercule ou du bulbe. Pour ces deux expérimentations, les sols directement en contact avec les tubercules ou bulbes ont été analysés.

Dans le cas de l'igname cultivé sur un sol ferrallitique pollué (2,4 mg/kg sol sec), la contamination de la peau (2 mm d'épaisseur) est beaucoup plus élevée que celle de l'igname analysé entier et encore plus que celle de la pulpe du tubercule (figure 6). La contamination s'opère donc essentiellement par diffusion de la molécule du sol au contact direct vers le tubercule lors de sa formation. La diffusion radiale de la molécule reste très faible, seule la surface de contact est fortement contaminée. Ces résultats sont confirmés pour d'autres racines (navet, patate douce).

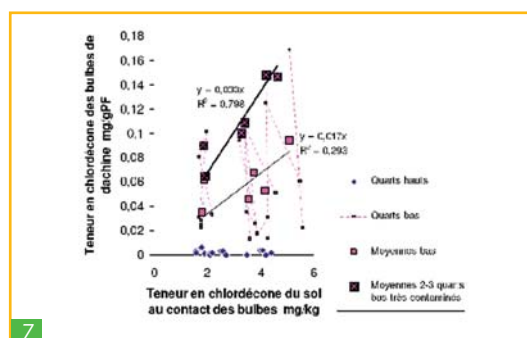
Figure 6 : Différence de la contamination des ignames cultivés sur sol contaminé entre la zone corticale (épluchure), la pulpe et l'igname entier (Y.M. Cabidoche).

Figure 7 : Contamination des différentes zones du bulbe de dachine en fonction de la teneur en chlrodécone du sol prélevé au contact sur 5 cm d'épaisseur (R. Achard).

Figure 8 : Efficacité de la contamination des racines et tubercules sur sol ferrallitique en fonction de la surface et du temps de contact de l'organe souterrain (Y.M. Cabidoche).



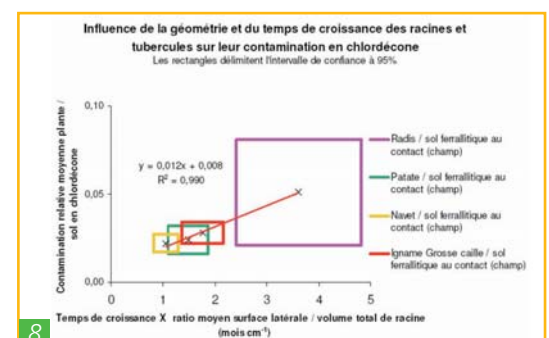
Dans le cas des dachines, mis en culture sur une parcelle d'andosol sur cendres et ponces, conta-



minée à 3.6 mg/kg sol sec, un gradient de la contamination est observé du bas vers le haut du bulbe, sans qu'un lien réel existe entre deux parties adjacentes (figure 7). La molécule diffuse peu au sein du bulbe mais la teneur du quartier considéré est proportionnelle à celle du sol en contact avec ce quartier de bulbe. Les parties les plus fortement contaminées sont les parties basses, les plus anciennes et en contact avec le sol sur une période plus longue.

Effet de la taille de l'organe d'accumulation et du temps de contact

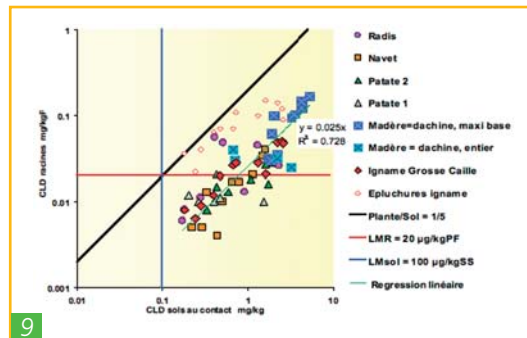
Deux variables élémentaires ont été retenues pour tester l'hypothèse d'une contamination plus intense pour une culture dont le temps et la surface relative de contact de l'organe souterrain avec le sol sont plus importants. Le rapport Surface du tubercule (S) / son Volume moyen au cours du remplissage ($V_{1/2}$), qui dépend de la forme et de la taille de la racine ou du tubercule et la durée (t) entre la formation et la récolte de cet organe. Leur produit $t \times S/V_{1/2}$ explique le niveau de contamination des différentes espèces (radis, navet, patate douce, igname) sur sol ferrallitique (figure 8). Les rectangles, représentant le degré d'incertitude sont d'autant plus grands que les formes et les volumes des organes sont hétérogènes et que l'épaisseur du sol prélevé est importante relativement à la taille de l'organe. Ce modèle est confirmé pour les dachines et les patates douces cultivées sur un andosol contaminé.



GESTION DES PARCELLES POLLUÉES ET ANTICIPATION DU RISQUE DE CONTAMINATION DES RACINES ET TUBERCULES

Intégration des données disponibles : une capacité de transfert maximale est observée

L'intégration de l'ensemble des données acquises dans le cadre d'expérimentations ou d'en-



quêtes agronomiques sur la contamination par la chlordécone des racines et tubercules montre un comportement et une sensibilité au transfert similaires (figure 8). Une courbe enveloppe du transfert maximal de la chlordécone vers les cultures est mise en évidence : aucune donnée ne montre une teneur en chlordécone des racines et tubercules au delà de 1/5 de celle du sol (figure 8). **Au-dessus de cette courbe, le risque de contamination est donc nul** (aucun point observé). Tous les points respectent l'inégalité :

$$y \leq 0.2 x \quad (1)$$

avec y : teneur en chlordécone de la plante (mg/kg MF) et x : teneur en chlordécone du sol (mg/kg sol sec)

Cette relation montre accessoirement qu'aucune des plantes testées ne peut être utilisée pour une dépollution par «phytoremédiation» (capture de la chlordécone par les plantes) : aucune n'a été capable d'extraire ne serait-ce que la chlordécone du volume de sol occupé par son organe souterrain récolté.

Mise au point d'un outil de gestion : traduction de la LMR denrée en LMR sol

Le sol est le réservoir principal de pollution, la gestion de la pollution passe par la prise en compte le plus en amont possible de cette variable. De plus, la teneur du sol en chlordécone explique la majorité de la contamination des racines et tubercules, cette variable est donc un indicateur de premier ordre du risque de contamination des cultures.

Un outil de gestion de la pollution des sols est proposé pour les producteurs, en utilisant, d'une part, la relation existant sur la capacité maximale de transfert entre la teneur du sol et celle des racines et tubercules et d'autre part la valeur de la LMR pour les denrées alimentaires. La relation du transfert sol/plante permet de traduire la LMR denrée en «LMR sol». D'après la relation (1), pour $y = 0.02$; $x \leq 0.1$. Ainsi, pour une

LMR fixée à 0.02 mg/kg MF (soit 20µg/kg MF), il n'y a pas de contamination des racines et tubercules pour des teneurs en chlordécone du sol en deçà de 0.1 mg/kg sol sec (figure 9).

Cet outil permet ainsi aux producteurs, à partir de l'analyse de sol sur leur parcelle, d'évaluer et d'anticiper le risque de contamination des productions telles que les racines et tubercules.

Recommandations aux producteurs et aux consommateurs

La confirmation d'une contamination majoritaire par contact direct entre le sol et le produit incite à une attention particulière lors de la récolte quels que soient les produits maraîchers et fruitiers. En effet, pour éviter toute contamination post récolte, il est recommandé de ne pas poser les fruits et légumes sur le sol et de les disposer dans des contenants propres, non souillés par des résidus de sol contaminé. L'utilisation de la «LMR sol» par les agriculteurs leur permet de se conformer à la réglementation en évitant une sanction à la récolte et donc limite la prise de risque à la plantation/mise en culture de la parcelle. A l'échelle de l'exploitation, la réorganisation des assolements est ainsi renseignée.

La chlordécone ne peut être nettoyée d'un légume-racine par un simple lavage, ou par la cuisson, même avec une longue ébullition. En revanche, la différence de teneur entre la pulpe et la peau des racines et tubercules contaminés milite pour la recommandation d'un **épluchage large et soigneux** des produits issus des jardins familiaux ou des circuits informels. Le simple fait de peler largement (épluchure d'au moins 2mm d'épaisseur) les racines et tubercules permet de réduire de manière très importante (10 à 100 fois selon les produits) l'exposition des consommateurs.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La contamination par **contact direct** entre le sol pollué et les organes souterrains est la voie de contamination privilégiée pour les racines et tubercules cultivés sur ce sol. La teneur en chlordécone du sol, la forme et la durée de contact des organes souterrains expliquent l'essentiel de la contamination des organes souterrains. Une efficacité maximale du transfert est observée pour les racines et tubercules, elle correspond au transfert de 1/5 de la teneur du sol. Cette relation indique qu'il **n'y a pas de phénomène de bioconcentration pour ces cultures**. Cette relation, en utilisant la valeur fixée pour la LMR, permet une anticipation du risque de contamination des cultures.

Figure 9 : Efficacité maximale du transfert de molécule entre le sol et les racines et tubercules. Au-dessus de la droite oblique noire, le risque de contamination est nul. Traduction de la LMR denrée (en rouge) en LMR sol (en bleu) (Y.M. Cabidoche).

Concernant les modalités de transfert et les facteurs qui l'influencent, des expérimentations complémentaires devront tester le rôle de l'état hydrique des sols. Un sol humide favoriserait plus le transfert qu'un sol sec.

L'outil de gestion devrait être élargi à l'ensemble des cultures. L'élaboration d'un tel outil nécessite plusieurs étapes : un grand nombre d'analyses pour vérifier l'existence d'une relation simple entre teneur en chlordécone du sol et teneur dans la plante (référentiels) selon le type de culture et le type de sol, la traduction de la LMR en limite de teneur du sol pour chaque culture et la formalisation de ces référentiels pour une utilisation simple par les acteurs agricoles.

REMERCIEMENTS :

Nous remercions particulièrement J. André, F. Burner, A. Mulciba, C. Palmier et F. Razan pour

leur précieuse contribution dans le suivi et les échantillonnages des essais conduits en Guadeloupe.

Ces résultats ont été obtenus grâce à la collaboration avec le Laboratoire Départemental de la Drôme (LDA26); grâce au partenariat avec les services de la Protection des Végétaux de la DAF Guadeloupe, et de la DAF Martinique, de l'Union des Producteurs de la Filière Igname de Guadeloupe (UPROFIG), des producteurs de racines et tubercules de la Martinique, de la Chambre d'Agriculture de la Martinique et grâce au soutien financier du Conseil Régional de la Martinique et du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (projet Banenvorch INRA-CIRAD dans le cadre du programme «réduction des pesticides» : «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»).



Une manière d'amoindrir la contamination des légumes-racines par la chlordécone : la culture en créneaux

Prototypage : Y.-M. Cabidoche et A. Lafont

Principes :

- Ecarter latéralement la couche de surface la plus contaminée, pour que les tubercules ne soient pas en contact du sol le plus contaminé.
- Laisser le système racinaire aller chercher l'eau et les nutriments dans la couche fertile, repoussée sur les côtés.

Réalisation technique :

- Faire un sillonnage en accolant deux socs de versoirs opposés.
- Passer un outil à dent pour ameublir la couche profonde au centre du créneau et créer une saignée.
- Appliquer 4 à 5 kg de compost par mètre sur la saignée (+ chaulage sur sol trop acide).
- Isoler hydrauliquement la parcelle par un fossé de tête, pour éviter l'érosion.

Résultats pour l'igname :

- Rendement linéaire dans les créneaux et sur les billons voisins équivalents mais
- Plus d'attaques de vers blancs dans les créneaux.
- Rendement surfacique moindre, à cause d'une distance entre rangs d'au moins 2m (igname à associer avec une culture non contaminable, comme l'aubergine, menée sur les billons de déblais entre les créneaux).