

www.agronomie.asso.fr
juin 2012
volume n°2 / numéro n°1

Agronomie

environnement & sociétés



La revue de l'association française d'agronomie

Agriculture et écologie

tensions, synergies
et enjeux pour l'agronomie

Association Française
ACRONOMIE

Agronomie, Environnement & Sociétés

Revue éditée par l'Association française d'agronomie (Afa)

Siège : 16 rue Claude Bernard, 75231 Paris Cedex 05.

Secrétariat : 2 place Viala, 34060 Montpellier Cedex 2.

Contact : douhairs@supagro.inra.fr, T : (00-33)4 99 61 26 42, F : (00-33)4 99 61 29 45

Site Internet : <http://www.agronomie.asso.fr>

Objectif

AE&S est une revue en ligne à comité de lecture et en accès libre destinée à alimenter les débats sur des thèmes clefs pour l'agriculture et l'agronomie, qui publie différents types d'articles (scientifiques sur des états des connaissances, des lieux, des études de cas, etc.) mais aussi des contributions plus en prise avec un contexte immédiat (débats, entretiens, témoignages, points de vue, controverses) ainsi que des actualités sur la discipline agronomique.

ISSN 1775-4240

Contenu sous licence *Creative commons*



Les articles sont publiés sous la *licence Creative Commons 2.0*. La citation ou la reproduction de tout article doit mentionner son titre, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue AE&S et de son URL, ainsi que la date de publication.

Directeur de la publication

Thierry DORÉ, président de l'Afa, professeur d'agronomie AgroParisTech

Rédacteur en chef

Olivier RÉCHAUCHÈRE, chargé d'études Direction de l'Expertise, Prospective & Etudes, Inra

Membres du bureau éditorial

Guy TRÉBUIL, chercheur Cirad

Philippe PRÉVOST, Directeur de l'enseignement Montpellier SupAgro

Danielle LANQUETUIT, consultante Triog et webmaster Afa

Comité de rédaction

- Marc BENOÎT, Directeur de recherches Inra
- Bernard BLUM, Directeur d'Agrometrix
- Jean BOIFFIN, Directeur de recherches Inra
- Matthieu CALAME, Directeur de la Fondation pour le Progrès de l'Homme
- Jacques CANEILL, Directeur de recherches Inra
- Joël COTTART, Agriculteur
- Cécile COULON, Ingénieure Inra
- Thierry DORÉ, Professeur d'agronomie AgroParisTech
- Philippe ÉVEILLARD, Responsable du pôle agriculture, environnement et statistiques de l'Unifa
- Sarah FEUILLETTE, Chef du Service Prévision Evaluation et Prospective Agence de l'Eau Seine-Normandie
- Yves FRANCOIS, agriculteur
- Jean-Jacques GAILLETON, Inspecteur d'agronomie de l'enseignement technique agricole
- François KOCKMANN, Chef de service agriculture-environnement Chambre d'agriculture 71
- Nathalie LANDÉ, Ingénieure Cetiom
- François LAURENT, Chef du service Conduites et Systèmes de Culture à Arvalis-Institut du végétal
- Francis MACARY, Ingénieur de recherches Irstea
- Jean-Robert MORONVAL, Enseignant d'agronomie au lycée agricole de Chartres
- Christine LECLERCQ, Professeur d'agronomie Institut Lassalle-Beauvais
- Philippe POINTEREAU, Directeur du pôle agro-environnement à Solagro
- Philippe PRÉVOST, Directeur de l'enseignement et de la vie étudiante à Montpellier SupAgro
- Guy TRÉBUIL, Chercheur Cirad.

Secrétaire de rédaction

Philippe PREVOST

Assistantes éditoriales

Sophie DOUHAIRIE et Danielle LANQUETUIT

Conditions d'abonnement

Les numéros d'AE&S sont principalement diffusés en ligne. La diffusion papier n'est réalisée qu'en direction des adhérents de l'Afa ayant acquitté un supplément

(voir conditions à <http://www.agronomie.asso.fr/espace-adherent/devenir-adherent/>)

Périodicité

Semestrielle, numéros paraissant en juin et décembre

Archivage

Tous les numéros sont accessibles à l'adresse <http://www.agronomie.asso.fr/carrefour-inter-professionnel/evenements-de-lafa/revue-en-ligne/>

Soutien à la revue

- En adhérant à l'Afa via le site Internet de l'association (<http://www.agronomie.asso.fr/espace-adherent/devenir-adherent/>). Les adhérents peuvent être invités pour la relecture d'articles.
- En informant votre entourage au sujet de la revue AE&S, en disséminant son URL auprès de vos collègues et étudiants.
- En contactant la bibliothèque de votre institution pour vous assurer que la revue AE&S y est connue.
- Si vous avez produit un texte intéressant traitant de l'agronomie, en le soumettant à la revue. En pensant aussi à la revue AE&S pour la publication d'un numéro spécial suite à une conférence agronomique dans laquelle vous êtes impliqué.

Instructions aux auteurs

Si vous êtes intéressé(e) par la soumission d'un manuscrit à la revue AE&S, les recommandations aux auteurs sont disponibles à l'adresse suivante :

<http://www.agronomie.asso.fr/carrefour-inter-professionnel/evenements-de-lafa/revue-en-ligne/pour-les-auteurs/>

À propos de l'Afa

L'Afa a été créée pour faire en sorte que se constitue en France une véritable communauté scientifique et technique autour de cette discipline, par-delà la diversité des métiers et appartenances professionnelles des agronomes ou personnes s'intéressant à l'agronomie. Pour l'Afa, le terme agronomie désigne une discipline scientifique et technologique dont le champ est bien délimité, comme l'illustre cette définition courante : « *Etude scientifique des relations entre les plantes cultivées, le milieu [envisagé sous ses aspects physiques, chimiques et biologiques] et les techniques agricoles* ». Ainsi considérée, l'agronomie est l'une des disciplines concourant à l'étude des questions en rapport avec l'agriculture (dont l'ensemble correspond à l'agronomie au sens large). Plus qu'une société savante, l'Afa, veut être avant tout un carrefour interprofessionnel, lieu d'échanges et de débats. Elle se donne deux finalités principales : (i) développer le recours aux concepts, méthodes et techniques de l'agronomie pour appréhender et résoudre les problèmes d'alimentation, d'environnement et de développement durable, aux différentes échelles où ils se posent, de la parcelle à la planète ; (ii) contribuer à ce que l'agronomie évolue en prenant en compte les nouveaux enjeux sociétaux, en intégrant les acquis scientifiques et technologiques, et en s'adaptant à l'évolution des métiers d'agronomes.

Lisez et faites lire AE&S !

Chlordécone aux Antilles : évolution des systèmes de culture et leur incidence sur la dispersion de la pollution

Chlordecone in French West Indies: cropping system changes and their incidence on pollution dispersion

Lesueur Jannoyer Magalie^{1,2,*},
Cattan Philippe³, Monti Dominique⁴,
Saison Carine⁵, Voltz Marc⁶,
Woignier Thierry⁷, Cabidoche Yves-Marie⁸

1. Agronome, Unité HortSys, CIRAD, Bd de la Lironde, 34395 Montpellier, France, E-mail : jannoyer@cirad.fr
2. Agronome, Pôle de Recherche Agro environnementale de la Martinique, Petit Morne, 97295 Le Lamentin, Martinique,
3. Agronome, unité SCBPA, CIRAD, Station de Neufchâteau, Sainte Marie, 97130 Capesterre Belle Eau, Guadeloupe, E-mail : cattan@cirad.fr
4. Ecologue, EA 926- Dynecar, UAG, Fouillole, 97159 Pointe-à-Pitre, Guadeloupe, E-mail : dominique.monti@univ-ag.fr
5. Agronome, IRD, UMR LISAH 2 place Viala, 34060 Montpellier, France, E-mail : saison@ird.fr
6. Hydropédologue, INRA, UMR LISAH, 2 place Viala, 34060 Montpellier, France, E-mail : voltz@supagro.inra.fr
7. Physicien, UMR CNRS 7263 - IRD 237 - IMBE, Pôle de Recherche Agro environnementale de la Martinique, Petit Morne, 97295 Le Lamentin, Martinique, E-mail : thierry.woignier@univ-montp2.fr
8. Agropédologue, Unité 1321 ASTRO, INRA Duclos, 97120 Petit Bourg, Guadeloupe, E-mail : cabidoch@antilles.inra.fr

*Auteur correspondant

Résumé

La chlordécone, insecticide organochloré, était utilisée pour lutter contre le charançon du bananier (*Cosmopolites sordidus*) de 1971 à 1993. La chlordécone est peu mobile et se dégrade à une vitesse très lente, voire nulle dans les sols aérés. Sa persistance est donc longue, et la dépollution artificielle n'est pas opérationnelle actuellement. Cependant les sols restent fertiles même si ils constituent la principale réserve et source de pollution.

Il faut donc gérer cette pollution. Cela implique des changements au sein des agrosystèmes, tant sur le choix des productions possibles que sur certaines pratiques agronomiques pour réduire les impacts sanitaires. Pour les espèces cultivées sur les parcelles polluées, certains organes

sont très contaminés (tubercules), d'autres indemnes (fruits d'arbres, banane, ananas, tomate, etc.). Un outil de gestion est disponible pour les producteurs afin d'anticiper le choix des cultures et de réduire le risque d'exposition des consommateurs. Réciproquement, les systèmes de culture ont une incidence sur la dispersion de la molécule à l'échelle d'une parcelle et d'un bassin versant. La chlordécone contamine les ressources et les organismes aquatiques via les eaux de percolations issues des parcelles polluées.

Cet article fait le point sur les principaux résultats disponibles et les projets en cours sur la gestion des agrosystèmes et les processus de transferts de la chlordécone vers l'environnement ainsi que leurs impacts sur les écosystèmes aquatiques.

Mots-clés

Chlordécone, pollution chronique, organochlorés, transferts, outil de gestion, zone tropicale

Abstract

Chlordecone is an organochlorine insecticide and it was used to fight against the banana black weevil (*Cosmopolites sordidus*) from 1971 to 1993 in the French West Indies. Chlordecone is not a mobile molecule and is very slowly or almost not degradable in aerobic soils. Its persistence is a long term one and technical remediation is not operational at this time, but soils stay fertile, even if they remain the main pollution source.

Thus we have to face and manage this pollution. This leads to changes among agrosystems, whether on crop choice or on practices to reduce sanitary impact. Chlordecone crop uptake varies according to the type of plant and organ: roots and tubers are highly contaminated whether fruits (banana, pineapple, tomato, citrus, etc.) are chlordecone free. A management tool is now available for farmers to choose crops according to the field pollution level and to reduce the consumers' exposure risk.

Reciprocally, cropping systems have an influence on pollution dispersion at the field and watershed scales. Chlordecone pollutes water resources and aquatic organisms through leaching water from polluted fields.

This article present the existing situation and sums up the knowledge available based on results from past and in progress projects on cropping systems management and transfer processes to the environment, as well as on their impacts on aquatic ecosystems.

Keywords

Chlordecone, chronique pollution, organochlorine insecticides, transfert, management tool, tropics

Introduction

La chlordécone est un insecticide utilisé de 1971 à 1993 aux Antilles françaises pour lutter contre le charançon du bananier (*Cosmopolites sordidus*). Cette molécule organochlorée est classée comme Polluant organique persistant depuis 2007 par le Programme des Nations

Unies pour l'Environnement (Convention de Stockholm, UNEP, 2007). Les conditions de son utilisation aux Antilles (Fintz, 2009 ; Joly, 2010) et l'étendue des contaminations qu'elles ont entraînée, ont conduit à une situation de crise au début des années 2000. Cela s'est traduit, entre autres, par des mesures de restriction de la consommation de certains produits, d'interdiction de pêches ainsi que de certaines productions agricoles et une inquiétude croissante dans la population.

La contamination des écosystèmes par cette molécule ubiquiste conduit à l'exposition des populations antillaises au polluant *via* la consommation de denrées contaminées : eau, animaux ou végétaux (Dubuisson *et al.*, 2007 ; Guldner *et al.*, 2010). L'ingestion est la voie principale d'exposition alors que l'inhalation est une voie mineure. Mais, pas plus que l'impact environnemental, l'impact sanitaire de cette exposition chronique n'est pas encore bien caractérisé (Multigner *et al.*, 2007) même si elle contribue à un taux anormalement élevé des cancers de la prostate aux Antilles (Multigner *et al.*, 2010).

Aujourd'hui, les sols pollués restent le principal réservoir et la source de dispersion de la chlordécone dans l'environnement. De fait, l'agriculture détient une position centrale dans la crise de la chlordécone : à l'origine des contaminations, elle est profondément impactée par la pollution des sols mais est également l'acteur incontournable de la maîtrise de la dispersion de la molécule, voire de la dépollution des sols. Ce statut pèse sur les systèmes de culture en place et les oblige à une évolution rapide.

Actuellement, le peu d'information disponible dans la bibliographie sur le comportement de la molécule dans les différents compartiments de l'environnement, son transfert des sols vers les eaux, puis vers les plantes et les organismes aquatiques, empêche d'identifier les mesures appropriées pour réduire l'exposition et la contamination des chaînes alimentaires. En l'absence d'information bibliographique pré-existante sur la chlordécone en milieu tropical, diverses études récentes conduites aux Antilles permettent d'ores et déjà d'identifier les enjeux en matière de dispersion des polluants dans ce milieu, voire de proposer des premières actions, soit techniques soit réglementaires, pour réduire au minimum le risque d'exposition des populations.

Notre propos est, à travers le cas de la chlordécone aux Antilles, de présenter la façon dont les systèmes culturaux peuvent contribuer à la gestion d'une pollution agricole chronique et durable, d'une part à travers l'obtention d'une production agricole saine bien qu'obtenue sur des sols contaminés, d'autre part en agissant sur les déterminants de la dispersion du polluant via les pratiques agricoles. L'état des connaissances sur ces points sera exposé. Les exemples présentés sont riches d'enseignement sur la façon de faire évoluer des systèmes de culture en situation d'urgence et d'incertitude quant à l'efficacité des solutions. Ces conditions particulières obligent à emprunter ici une démarche heuristique basée sur l'exploitation des résultats produits sur les fronts de recherche par un continuum d'équipes pluridisciplinaires (écologie, hydrologie, pédologie, agronomie).

Qu'est-ce que la chlordécone ?

C'est une molécule organochlorée ($C_{10}Cl_{10}O$; CAS 143-50-0) très stable de par sa structure homocubane et le nombre d'atomes de chlore qu'elle possède (Figure 1).

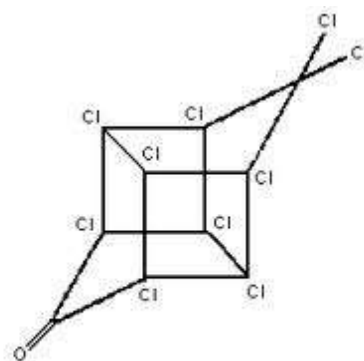


Figure 1. Structure de la chlordécone, $C_{10}Cl_{10}O$. Chemical structure of chlordecone, $C_{10}Cl_{10}O$

La chlordécone est peu soluble (solubilité, $S = 0.2$ g/L), très peu volatile (pression de vapeur de $0.225 \cdot 10^{-6}$ mm Hg à $25^{\circ}C$) et son affinité pour la matière organique des sols est très élevée (K_{oc}^1 de 2500 à 17500 L/kg selon le type de sol) (RAIS, 2006 ; Cabidoche *et al.* 2009). 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 (interactions hydrophobes de type Van der Waals). Cependant,

¹ K_{oc} : coefficient de partage entre le carbone organique du sol et l'eau

son affinité pour la matière organique 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 HAP² (Xing, 2001). Elle ne se dégrade pas facilement en conditions naturelles aérobies (Orndorff et Colwell, 1980 ; Macarie et Dolfin, 2011).

La chlordécone s'accumule dans les chaînes alimentaires à partir de concentrations dans l'eau aussi faibles que 0,023 µg/litre (Bahner *et al.*, 1977). Elle se concentre au sein de la chaîne alimentaire avec des facteurs de concentration (BCF) relativement élevés, de 2900 à 60000 pour différents poissons d'eau douce et de 3000 à 13000 pour des crustacés (ATSDR, 1995 ; RAIS, 2006).

La réduction du risque sanitaire via les productions végétales : évolution des systèmes de culture

La priorité, dans un premier temps, est la gestion sanitaire de cette pollution avec la mise en place de mesures pour réduire au minimum le risque d'exposition des populations au polluant. La principale voie d'exposition des populations est aujourd'hui l'ingestion de chlordécone, l'inhalation étant une voie mineure dans les conditions antillaises. Pour réduire ce risque, l'enjeu et la priorité sont de produire des denrées alimentaires conformes aux recommandations sanitaires (LMR³ < 20µg/kg matière fraîche de denrée).

Un diagnostic de la contamination des différentes cultures est réalisé depuis 2003 par le Cirad, l'Inra et les services de l'état. Seule la voie sol/plante est considérée pour le transfert de la chlordécone du sol vers les plantes, la voie sol/air/plante n'est probablement que très peu ou pas mobilisée car la molécule est peu volatile.

Cette démarche a été marquée par l'urgence de l'acquisition de références dans un contexte de « désert bibliographique » concernant la contamination des cultures par la chlordécone. Les premières analyses conduites en 2002 dans le cadre des contrôles par les services en charge de la consommation et de la répression des fraudes ont montré de fortes contaminations des organes

souterrains récoltés (légumes-racines). Très logiquement, dès 2003, les premières expérimentations ont été consacrées à l'établissement d'un référentiel de contamination relative sol - légume racine. Toutefois, des contaminations mesurées de fruits de cucurbitacées, toujours attribuables dans un premier temps au contact avec le sol, ont conduit aux premières analyses d'organes aériens. Les contaminations expérimentales de courgettes ont conduit l'Inra et le Cirad à s'orienter vers des diagnostics plus fins, analysant la distribution de la chlordécone dans les différents organes des plantes d'un grand nombre de familles cultivées (solanacées, cucurbitacées, graminées, crucifères, musacées, citrus, rosacées, etc.).

Compte tenu des enjeux sanitaires et sociétaux, l'établissement de référentiels de contamination d'organes végétaux récoltés a comporté trois étapes inhabituelles : (i) optimiser l'acquisition de données de contamination des plantes en combinant enquêtes agronomiques et expérimentations testant des processus globaux ; (ii) communiquer les résultats à tous les acteurs : producteurs agricoles, consommateurs, services de l'état pour la prise de mesures de gestion sans attendre la publication dans des revues scientifiques ; (iii) accéder ensuite au plus vite à la publication avec évaluation par les pairs, seule voie reconnue de validation scientifique des résultats.

Parmi les premiers résultats opérationnels, il a été clairement établi que la chlordécone du sol ne contamine pas de la même manière toutes les cultures. Le niveau de contamination dépend de l'espèce et de l'organe de la plante considérée, du niveau de pollution et du type de sol (Lesueur Jannoyer *et al.*, 2009). Les données collectées nous ont permis de construire un schéma hypothétique des modalités de transfert de la molécule au sein de la plante (Figure 2).

² HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

³ LMR : Limite Maximale de Résidu, exprimée en mg ou en µg/kg poids frais de la denrée

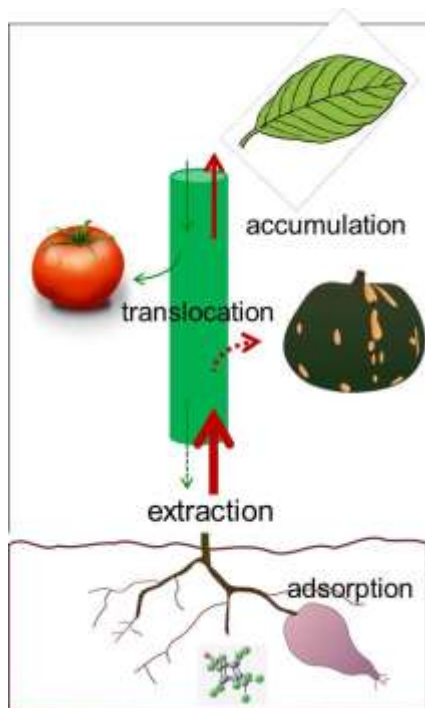


Figure 2. Schéma hypothétique des différentes voies de transfert de la chlordécone chez les plantes. En rouge : le flux de sève xylémique chargé en chlordécone (gradient du sol vers les feuilles traduit par l'épaisseur de la flèche), en vert : le flux de sève phloémique contenant très peu de chlordécone.

Theoretical scheme of chlordecone transfer pathways in plants. In red: xylem sap flow (the gradient from the soil to the leaves is featured by the thickness of the line), in green: phloem sap flow, with very little chlordecone.

Quel que soit l'organe considéré, les teneurs mesurées en chlordécone au sein de la plante sont toujours inférieures aux teneurs mesurées dans le sol : la voie de transport est donc probablement passive pour les espèces analysées. Pour les racines et tubercules, la contamination par contact est majoritaire. On observe ainsi une contamination différenciée entre les pulpes et les épidermes : la pulpe est 3 à 5 fois moins contaminée que la peau pour le tarot (dachine ou madère, *Colocasia antiquorum*), 5 fois moins pour la patate douce (*Ipomea batatas*) et 10 fois moins pour l'igname (*Dioscorea spp.*) (Cabidoche et al., 2006 ; Achard et al., 2008 ; Clostre et al., 2011). La contamination moyenne des racines ou tubercules entiers est proportionnelle au niveau de pollution du sol, et ce quelle que soit l'espèce (Figure 3). On définit une limite majorante (ligne noire épaisse sur la figure 3) au-delà de laquelle aucune donnée n'est observée.

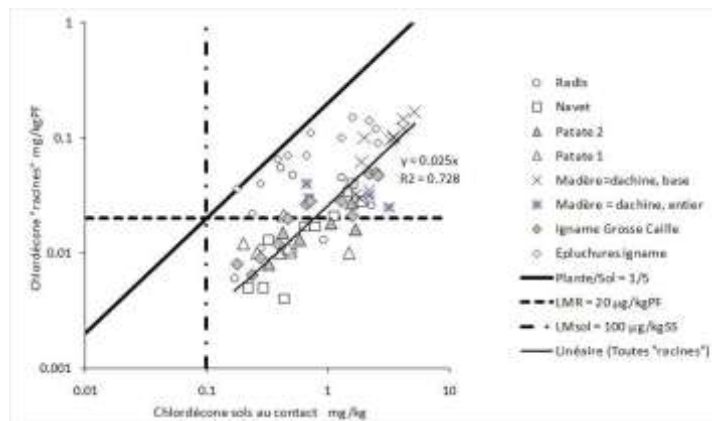


Figure 3. Relation de proportionnalité entre la contamination des organes souterrains récoltés et la teneur en chlordécone du sol à proximité : définition d'une relation majorante (ligne noire épaisse) permettant de convertir la limite maximale de résidu dans les aliments (LMR) en limite maximale de pollution du sol autorisant la mise en culture. *Proportional relationship between the contamination of below ground organs and soil pollution: definition of a maximal transfer rate (black line) to calculate a maximal limit for soil according to the food regulation (MLR).*

Elle correspond au coefficient de transfert maximal pour ces productions (rapport maximal observé entre la teneur de la matière fraîche de l'organe et celle du sol). La différence de réponse entre types de sol (Figure 4a) est expliquée par la fraction de chlordécone disponible en solution dans une unité de volume de sol (Figure 4b) (Cabidoche et Lesueur Jannoyer, accepté).

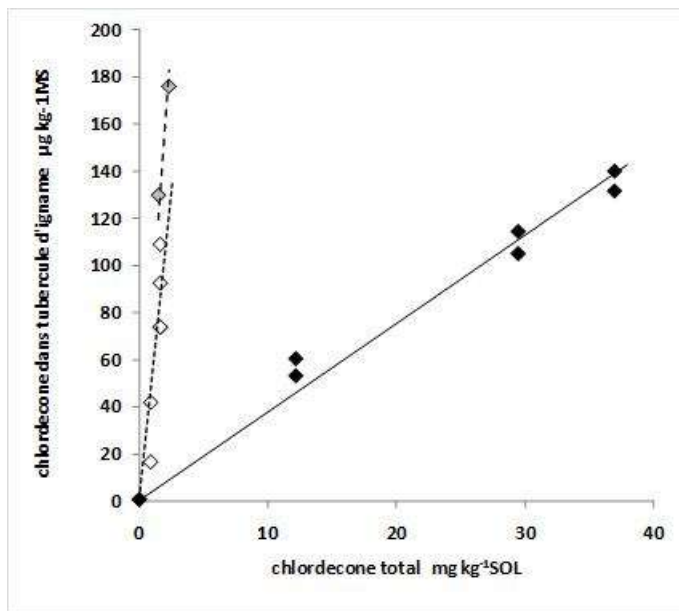


Figure 4a

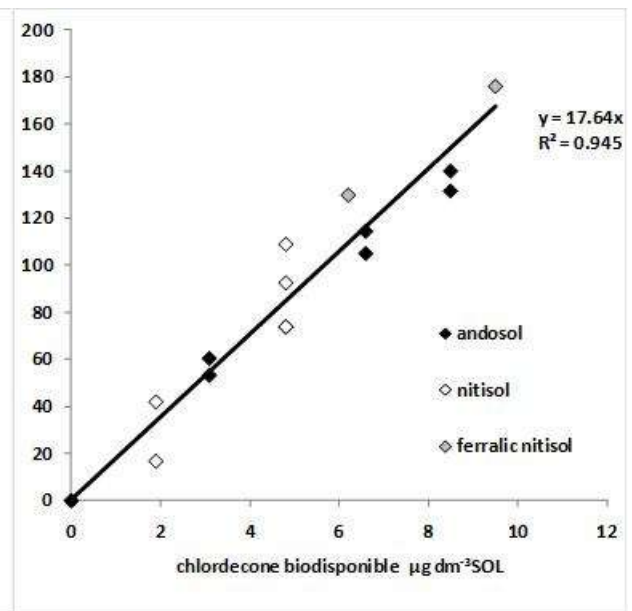


Figure 4b

Figure 4. Relation entre la teneur en chlordécone d'igname et celle de trois types de sols. a. teneur pondérale en chlordécone des sols ; b. teneur en chlordécone biodisponible (en solution dans un volume élémentaire de sol).

Relationship between chlordecone content in yam and 3 soil types. a. Soil chlordecone mass content (mg/kg dry soil); b. bioavailable chlordecone content (in the soil solution of an elementary soil volume) ($\mu\text{g}/\text{dm}^3$).

Contamination of sugar cane stalks. Data from 6 fields of 3 heavy polluted soil types, 20 repetitions.

Un gradient de contamination très net existe entre les organes souterrains et les organes aériens. Les niveaux de contamination des parties aériennes sont toujours plus faibles que ceux des parties souterraines. Le transfert s'effectue via le flux de sève brute ascendant (Figure 2), comme pour d'autres polluants organiques (Collins *et al.*, 2011). Le long de la tige, un gradient de dilution est mesuré. Les bas de tige sont beaucoup plus contaminés que les parties apicales (Figure 5. Contamination des tiges de canne à sucre. Les données ont été obtenues sur 6 parcelles de 3 types de sol très pollués et 20 répétitions par parcelle.).

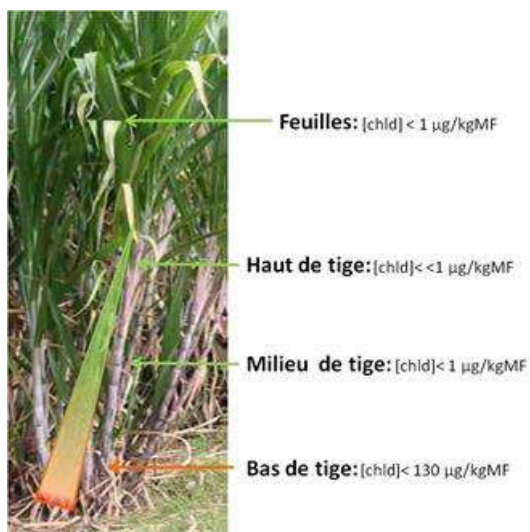


Figure 5. Contamination des tiges de canne à sucre. Les données ont été obtenues sur 6 parcelles de 3 types de sol très pollués et 20 répétitions par parcelle.

Ce gradient serait le résultat d'un flux ascendant de chlordécone couplé à une forte affinité de la chlordécone pour certains composants des tissus végétaux, les fibres en particuliers, qui agiraient comme filtre pour les organes se trouvant en aval de ce flux. Le niveau de contamination d'un organe dépendrait donc de sa position, de la composition des organes interposés et de son mode de remplissage. Les fruits dont le remplissage s'effectue majoritairement par des flux de sève phloémiques (sève élaborée) sont très faiblement contaminés (cas de la tomate, des bananes, des ananas et des arbres fruitiers : teneurs en chlordécone observées $< 5 \mu\text{g}/\text{kg}$ MF), alors que ceux dont une part importante du remplissage est liée aux flux xylémiques (sève brute) pourront être contaminés à des niveaux supérieurs à la LMR en vigueur ($20 \mu\text{g}/\text{kg}$ MF), comme dans le cas des cucurbitacées.

La variabilité de la contamination des organes récoltés est très importante. Pour comparer le comportement des différentes cultures et pour se placer dans une situation de risque de contamination maximale, les coefficients de transfert maximaux (rapport maximal observé entre la teneur de la matière fraîche de l'organe et celle du sol) ont été calculés. Trois classes de comportements ont été identifiées : les productions végétales dites sen-

sibles (dont le coefficient de transfert maximal est le plus élevé : racines et tubercules) ; les productions végétales intermédiaires (cucurbitacées, laitues, canne à sucre, etc.) (Clostre *et al.*, 2011 ; Lesueur Jannoyer *et al.*, 2010) et les productions végétales dont le transfert est très faible (solana-cées, banane, ananas, fruits, chou, etc.) (Lesueur Jannoyer *et al.*, 2009).

La traduction de la LMR en limite maximale pour le sol en utilisant la proportionnalité des coefficients de transfert maximaux des cultures permet de déterminer trois situations pour le choix des cultures possibles sur sol pollué (Figure 6).

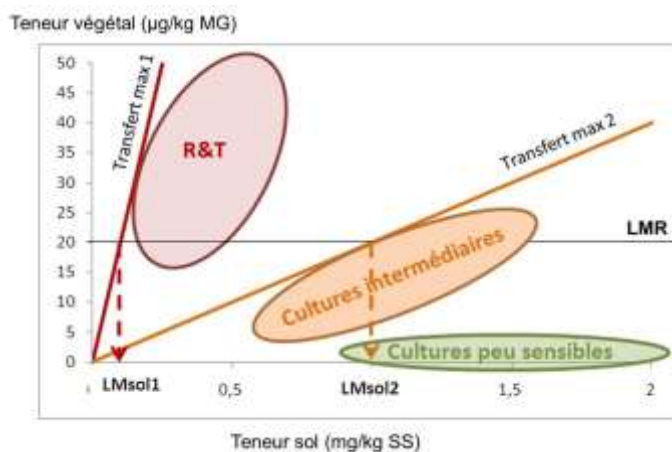


Figure 6. Traduction de la LMR en limite maximum pour le sol en fonction de la réponse des cultures au transfert de chlordécone. R&T : racines et tubercules.

MRL translation in a maximum limit for soil according to the response of crops to chlordecone transfer. R&T: roots and tubers.

Les parcelles polluées étant toujours potentiellement productives (la pollution n'affecte pas la croissance des productions végétales), cet outil permet d'assurer la conformité sanitaire des produits récoltés et préserve donc la santé des consommateurs, même si il est contraignant pour les agriculteurs, du fait des faibles valeurs des limites de contamination du sol liées à des calculs de risque de transfert maximisés et au fait que la réponse d'une culture sur une parcelle polluée peut être inférieure à ces maximums. Ces recommandations ne sont actuellement pas traduites en mesures réglementaires et ne sont pas obligatoires. Mais les producteurs sont tenus de commercialiser au sein de l'UE des produits conformes et sont contrôlés régulièrement par les services de l'état (règlements CE « paquet hygiène » 2004, 2005, applicables depuis le 1^{er} janvier 2006). Il permet

ainsi aux professionnels un choix pour les reconversions de parcelles et de productions de leur exploitation (Figure 7) et leur permet de garantir, par anticipation, la qualité de leurs produits. Des cultures de substitution sont possibles pour les racines et tubercules et concernent les productions amylacées aériennes (banane plantain, fruit à pain, igname *Dioscorea bulbifera*, etc.).

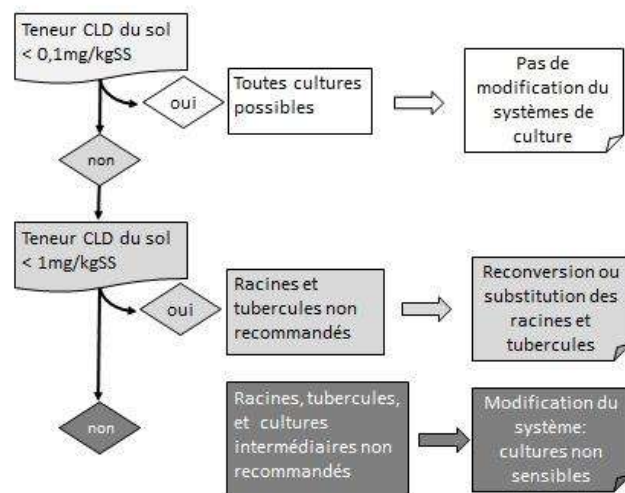


Figure 7. Schéma de l'outil d'aide à la décision à partir de l'analyse de sol pour le choix des cultures et impact sur le système de culture ou de production.

Decision tool to choose crops according to the chlordecone (CLD) soil content and the incidence on cropping systems.

Notons que toutes les parcelles ne sont pas contaminées et laissent de larges possibilités de mise en valeur, avec une nécessité de préserver les ressources et donc de privilégier des modes de production, plus économes en intrants de synthèse, voire sans pesticides.

Systèmes cultureux et pollution des sols

La chlordécone a été appliquée sous forme solide (poudre à 5% complétée par du talc) au pied de chaque bananier à la dose « moyenne » de 30g de produit commercial/pied/Ha/an (soit 3kg de matière active/Ha/an). Il en résulte une forte variabilité spatiale intra-parcellaire des teneurs en chlordécone, des échelles métrique à centimétrique. Des travaux du sol répétés, postérieurs aux applications, ont pu homogénéiser la couche travaillée, en même temps qu'ils diluaient la molécule sur une épaisseur dépendant des outils utilisés et de leur conduite. Au contraire, sur les parcelles non

labourées, l'essentiel de la charge polluante est concentrée dans les premiers décimètres (Figure 8).

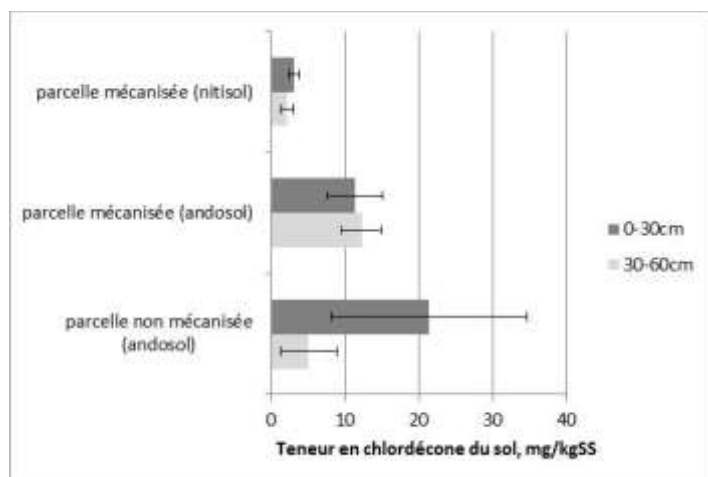


Figure 8. Teneurs moyennes en chlordécone (mg/kg Sol Sec) pour deux horizons (0-30cm et 30-60 cm) de systèmes de culture contrastés et de type de sol différents. Les parcelles mécanisées ont un travail du sol profond et fréquent (données Lesueur Jannoyer).

Mean chlordecone rate (mg/kg Dry Soil) of two soil horizons (0-30 cm and 30-60 cm) from contrasted cropping systems and soils. Mechanized fields have a deep and frequent tillage (data from Lesueur Jannoyer).

Une très forte hétérogénéité des niveaux de pollution est constatée entre les parcelles du fait d'applications variables selon la pression parasitaire et le niveau d'intensification de l'exploitation. Le stock de polluant dépend des doses cumulées appliquées (Cabidoche *et al.*, 2009) mais il est sous-estimé si l'on ne considère que l'horizon 0-30cm du profil.

Le modèle de lessivage WISORCH (Cabidoche *et al.*, 2009) est construit sur des hypothèses simples (rétention de la chlordécone du sol en fonction du coefficient K_{oc} de partage entre matière-organique du sol et eau, fraction lessivée proportionnelle à la quantité résiduelle adsorbée dans sol, absence de dégradation). Il simule de manière satisfaisante la pollution observée des sols en fonction d'estimations des quantités épandues et indique que la dissipation de la teneur en chlordécone dans les sols sera lente si aucun autre processus que le lessivage n'est impliqué. Ce modèle révèle également que pour des applications passées équivalentes, les nitisols sont pollués à des niveaux plus faibles que les andosols : la capacité de rétention des premiers apparaît plus faible que celle des seconds, à cause de K_{oc} plus faibles

(4000 contre 17500 L/kg). Cependant, à niveau de pollution équivalent, un nitisol sera plus contaminant pour l'environnement. Les durées de dépollution estimées par le modèle sont très longues (plusieurs décennies pour les nitisols, plusieurs siècles pour les andosols) et supposent une exposition chronique des ressources en eau et des écosystèmes (Cabidoche *et al.*, 2009). Si des travaux récents (Fernandez-Bayo *et al.*, soumis ; Fernandes *et al.*, 2010 ; Woignier *et al.*, 2009) confirment que la capacité d'un sol à retenir la chlordécone est liée à la teneur en matières organiques et à leur nature, les différences observées entre sols pourraient également s'expliquer par la nature des argiles qu'ils contiennent, les associations organominérales et les micro-organisations correspondantes : aluminosilicates en feuillets (kaolinite en plaquettes, halloysite en tubules) pour les nitisols, et gel organo-minéral amorphe (allophane en sphérules de structure fractale) pour les andosols (Woignier *et al.*, 2007) (Figure 9).

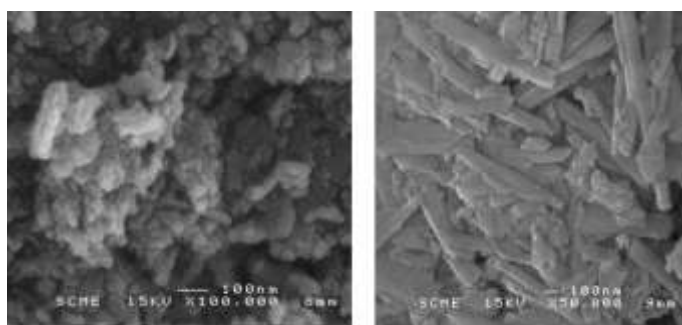


Figure 9. Photographie en microscopie électronique à balayage de deux types d'argiles (allophane en glomérules (a) et kaolinite en feuillets (b)) contenues respectivement dans les andosols et les nitisols (crédit photo T Woignier). Scanning electron microscopy (SEM) of two types of clay (allophanes (a) and kaolinite (b)) respectively contained in andosol and nitisol (photo from T Woignier).

L'ensemble de ces résultats, obtenus à l'échelle de la parcelle, expliquent la variabilité de la pollution à l'échelle de la région agricole. La cartographie des teneurs en chlordécone dans la couche 0-30 cm sur une petite zone de production (rivière Pérou, Capesterre, Belle Eau, Guadeloupe) rend bien compte de cette variabilité spatiale (de la non détection à près de 20mg/kg Sol Sec) selon l'intensification des systèmes de culture mais aussi le type de sol. Par exemple, le niveau de contamination moyen de la zone en petite agriculture familiale sur nitisols est de 1.4 mg/kg (min=0.031 max = 3.84) alors qu'elle est de 8.9 mg/kg (min=4.61 max=13.2) sur une exploitation intensive

sur andosols. À l'échelle territoriale, une cartographie du risque de présence de pollution a été établie à partir de cartes d'occupation du sol par les bananeraies et des types de sols. Elle aboutit à un risque de pollution sur 1/5^{ème} de la Surface Agricole Utile en Guadeloupe et sur les 2/5^{èmes} en Mar-

tinique (Figure 10) (Desprats *et al.*, 2004 ; Tillieut et Cabidoche, 2006). À l'échelle du territoire, ces cartographies du risque sont satisfaisantes, mais à l'échelle de la parcelle, l'analyse du sol est obligatoire pour connaître le niveau de pollution du sol.

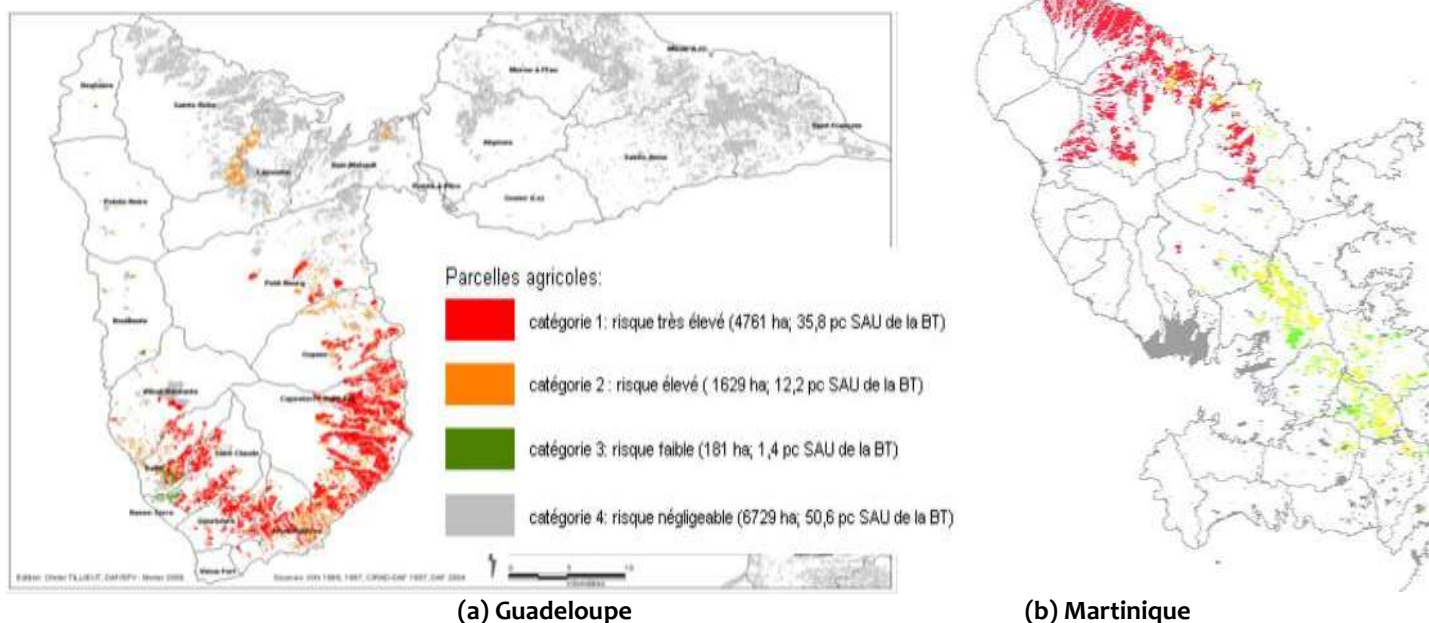


Figure 10. Carte de risque de pollution par la chlordécone en Guadeloupe (a) et en Martinique (b). Rouge risque élevé, vert risque faible (Tillieut et Cabidoche, 2006 et Desprats *et al.*, 2004).

*Risk map of chlordecone soil pollution in Guadeloupe (a) and Martinique (b). Red: elevated risk, green: low risk (Tillieut et Cabidoche, 2006 and Desprats *et al.*, 2004).*

Les éléments présentés permettent de situer les pratiques agricoles par rapport à la contamination des sols. En premier lieu, les pratiques de travail du sol apparaissent particulièrement néfastes et problématiques pour une maîtrise ultérieure de la pollution. En effet, la répartition de la molécule sur l'ensemble du profil travaillé (i) soustrait une partie de la chlordécone à toute possibilité de dégradation par voie biologique; (ii) obère également les possibilités de remédiation ultérieures du fait de l'augmentation des volumes de sols contaminés à traiter; (iii) favorise sans doute la dispersion de la molécule vers les nappes alors que la rétention de la molécule des horizons profonds diminue du fait de leur plus faible teneur en matières organiques. Deuxièmement, la gestion du taux de matière organique, semble être un point important à prendre en compte pour la proposition de pratiques culturales visant à éviter la dispersion de la chlordécone dans l'environnement (Woignier *et al.*, 2011). Des recherches engagées dans le projet CHLORDEXCO s'intéressent à la relation entre la chlordécone et les types de matières

organiques (Fernandez-Bayo *et al.*, soumis). Des travaux complémentaires sont en cours sur l'impact d'apports de différents types de matières organiques sur le transfert de la molécule vers les productions végétales (Fernandes *et al.*, 2010).

Systèmes de culture et transferts vers l'environnement

Les sols ayant été traités à la chlordécone sont le principal réservoir de pollution, le vecteur de contamination environnementale majeur est l'eau. Le niveau de pollution de chaque parcelle, sa nature (type de sol, pente), les pratiques appliquées (travail du sol et états de surface) et sa situation (proximité d'un cours d'eau et d'autres parcelles polluées) sont des facteurs qui peuvent influencer sur la dispersion de la pollution au sein du profil cultural mais également vers les écosystèmes aquatiques.

Les études menées en Guadeloupe dans le cas des bananeraies montrent que les systèmes de culture peuvent influencer à différents niveaux sur les trans-

ferts d'eau et de pesticide associés. Un des premiers éléments est la redistribution de la pluie par le couvert végétal. Sur bananier, les résultats ont montré un écoulement par le tronc de la pluie interceptée par le couvert considérable (stemflow), l'intensité pluviométrique au pied des bananiers se trouvant multipliée par un coefficient de 28 par rapport à la pluie incidente (Cattan *et al.*, 2007). À l'échelle de la parcelle, cette concentration favorise le ruissellement (Cattan *et al.*, 2006) et augmente le drainage au pied du bananier, là où sont épandus les intrants potentiellement polluants. De fait, les pertes par drainage sur ces sols volcaniques très infiltrants sont majoritaires par rapport au ruissellement. Dans le cas d'un nématicide, le cadusafos, elles se font à 67% par drainage au pied du bananier (Saison *et al.*, 2008). Ainsi ces conditions, reprises dans le modèle WISORCH présenté précédemment, accordent une importance particulière au transport par voies souterraines à l'échelle parcellaire. Les études menées à l'échelle d'un petit bassin du volcanisme récent (Haut Fédé versant sud, < 100 ha) vont dans le même sens. D'un point de vue hydrologique, elles montrent que les voies de circulation des eaux sont principalement souterraines (90% des précipitations s'infiltrent) dans des formations géologiques très hétérogènes (Charlier *et al.*, 2008 ; Charlier *et al.*, 2011). Un premier modèle spatialisé a été élaboré à partir du modèle MHYDAS (Moussa *et al.*, 2002), et permet de rendre compte de l'effet potentiel des systèmes culturaux (par exemple l'occupation du sol par des bananeraies) sur les écoulements à l'échelle du bassin versant (Charlier, 2007). Du point de vue de la dispersion des polluants, les études réalisées ont permis de mettre en évidence, sur ce petit bassin d'andosols, et pour le cadusafos, des contaminations de deux types : soit fugace et mineure associée au transport par ruissellement de surface, soit chronique et associée au drainage de la nappe superficielle contaminée, de loin la plus importante en quantité (Charlier *et al.*, 2009).

Ainsi les conditions particulières des milieux antillais à forte pluviométrie, dotés de sols filtrants, favorisent un transport par voie souterraine des polluants. Dans ces conditions des modifications des pratiques culturelles peuvent permettre de mieux gérer les exportations de produits polluants actuellement apportés en parcelle (délocalisation des épandages, cultures à plat évitant la

concentration des eaux, etc.). En revanche, il paraît difficile de réduire le transfert de la chlordécone, fixée dans le sol et donc essentiellement candidate au transport par percolation, car il faudrait favoriser un ruissellement intense non maîtrisable.

Les études en cours visent à caractériser plus spécifiquement le mode de dispersion de la chlordécone. Les suivis de transferts sont réalisés à l'échelle de la colonne de sol, de la parcelle et du bassin versant ressource. À cette dernière échelle, un des enjeux majeurs est de déterminer la contribution des eaux souterraines à la contamination de la rivière ainsi que leur relation avec le niveau de contamination des sols agricoles. Ceci pourrait permettre un traitement spécifique et ciblé des zones ou masses d'eau les plus contaminées.

L'analyse des processus de transfert à l'échelle du bassin versant sera complétée par de nouveaux projets et une analyse comparative entre des zones contrastées de Guadeloupe et de Martinique. L'instrumentation de nouvelles zones est actuellement initiée (projet OPA-C⁴ du Plan National d'Action Chlordécone 2011-2013) avec pour objectif la mise en place d'un système de suivi à long terme des processus de transfert de la chlordécone, notamment par les matières en suspension issues de l'érosion de sols lors des phénomènes pluvieux. Ce dispositif devrait également permettre, à moyen terme, de tester l'efficacité de techniques de remédiation.

Quels impacts sur les écosystèmes ?

La faune aquatique d'eau douce est la première impactée, à des teneurs très supérieures à celles des espèces marines. Les crevettes et poissons des eaux douces antillaises approchent les records mondiaux de contamination par la chlordécone avec des valeurs atteignant 3 000 à 5 000 µg/kg PF en moyenne dans la chair des crevettes tropicales (Atyidae 'cacadors' ou 'boucs' et Palaemonidae 'ouassous' ou 'z'habitants'), 5 000 à 10 000 µg/kg PF en moyenne dans la chair des poissons des rivières contaminées et jusqu'à près de 40 000 µg/kg PF dans le foie de poissons carnivores (Eleotridae) (Monti 2005, 2006, 2007). Les caractéristiques migratrices de la quasi-totalité des espèces d'eau douce antillaises (espèces

⁴ Projet OPA-C : Observatoire des pollutions aux Antilles : application à la Chlordécone.

diadromes⁵) jointes à une contamination massive ont conduit les services de l'état à interdire la pêche pour consommation et commercialisation sur tout leur linéaire de la majeure partie des rivières de Guadeloupe et de Martinique.

Pour les espèces de rivière, la distribution préférentielle entre muscle et viscères (hépatopancréas ou foie) montre une accumulation générale à tout l'organisme avec une préférence pour le tissu musculaire chez les crevettes *Atyidae*, le céphalothorax (hépatopancréas) chez les crevettes *Palaemonidae* et le foie chez les poissons. La mise en rapport de ces contaminations avec les données de concentration en chlordécone acquises dans les mêmes rivières, en Guadeloupe, révèle que les facteurs de bioconcentration (BCF_{eau}) observés aux Antilles atteignent la gamme des valeurs bibliographiques extrêmes, avec $\times 10\ 802$ et $\times 16\ 543$ la teneur chronique dans l'eau chez deux poissons d'eau douce (Monti, 2005).

Pour permettre la comparaison entre hydrosystèmes, une espèce-index, très largement répartie et abondante a été retenue : *Macrobrachium faustinum* (*Palaemonidae*, voir photo 1).



Photo 1. Espèce index *Macrobrachium faustinum* (photo de E Vigneux).

Index specie Macrobrachium faustinum (photo E Vigneux).

Le coefficient de bioconcentration, toutes rivières et situations confondues, s'échelonne chez cette espèce entre 500 fois et 5500 fois la quantité moyenne de chlordécone présente dans l'eau (Monti, 2008). Ces résultats montrent que la concentration du polluant est, chez *Macrobrachium faustinum*, plus qu'une caractéristique liée à l'espèce, une valeur très dépendante des conditions environnementales (teneurs dans l'eau, sédiments, contamination des aliments, etc.) ou encore physiologiques (âge, sexe, etc.). Ils révèlent aussi que les espèces d'eau douce aux Antilles peuvent être très chargées en polluant, dans des

eaux à teneurs chroniques très faibles voire inférieures au seuil analytique.

Coat *et al.* (2011) ont par ailleurs démontré que, dans une rivière très contaminée de Guadeloupe, le niveau de contamination des organismes dépend de la position des espèces au sein du réseau trophique et de leur habitat. Pour les adultes, après leur retour en rivière, le niveau de contamination augmente au sein des chaînes trophiques, avec des teneurs maximales mesurées pour les espèces carnivores n haut de réseau (anguille).

La mise en rapport de ces éléments avec ceux de la bibliographie acquis lors de l'accident du site de production d'Hopewell et les conséquences pour la James River et la Baie de Chesapeake (Virginie, USA) ont permis de proposer une valeur de «clean-up index», valeur de concentration en chlordécone dans l'eau pour laquelle la biocontamination serait en moyenne inférieure aux LMR (20 $\mu\text{g}/\text{kg}$ PF). Cette concentration est proposée (moyenne sur 24h) inférieure à 0.004 $\mu\text{g}/\text{l}$ (Monti, 2008), soit deux fois moins importante que celle fixée par l'USEPA (inférieure ou égale à 0.008 $\mu\text{g}/\text{l}$, USEPA 1978, révisé en 2009).

De nouvelles campagnes de mesures sont actuellement ciblées sur différents sites d'un bassin versant (rivière Pérou, Capesterre) afin de déterminer les niveaux d'accumulation sélective de la molécule par la carapace et de mener une analyse démographique des populations de *Macrobrachium faustinum*. L'approche biométrique est couplée à une évaluation des perturbations physiologiques, via la mesure de biomarqueurs par les équipes de l'Inra de Rennes et de l'Université du Havre. Quatre biomarqueurs enzymatiques et deux marqueurs hormonaux ont été choisis pour rendre compte d'une part de l'exposition des organismes mais également des effets induits par cette exposition.

La molécule a également été détectée à des niveaux très inférieurs sur des organismes marins (coraux, poissons, crustacés), les plus contaminés étant les crustacés et les espèces carnivores ou détritivores avec des variations importantes entre espèces (Coat *et al.* 2006). Les espèces herbivores semblent moins affectées. Les espèces marines élevées en cages ne sont, pour l'heure, pas concernées par la contamination.

En ce qui concerne la pédofaune, peu de données sont actuellement disponibles tant sur les niveaux de contamination des communautés et des diffé-

⁵ Qui exigent un passage en eau saumâtre ou en eau de mer pour effectuer leur cycle de vie.

rents maillons des chaînes trophiques que sur la modification globale des systèmes.

Vers une remédiation de la pollution ?

La solution la plus évidente pour traiter des sols pollués serait de décaper la partie la plus affectée. Dans certains cas de sols non labourés (bananeraies pérennes), on pourrait envisager de diminuer de 80% la charge polluante en décaperant les sols de 20 cm. Les surfaces concernées seraient faibles, probablement moins de 50 ha sur les deux îles, mais impliqueraient une baisse de fertilité agronomique importante et un accroissement du risque d'érosion. Dans toutes les autres situations de pollution, la diminution de la charge polluante de 80% supposerait de décaper au minimum 50 à 60 cm de terre correspondant à des volumes de terre impressionnants à traiter (des millions de m³). Elle s'accompagnerait d'une perte totale de fertilité des parcelles après décapage. Une telle solution est à l'évidence irréaliste, le traitement *in situ* des parcelles est donc privilégié.

Même si la chlordécone pénètre dans les végétaux, aucune espèce n'a encore été identifiée comme étant capable d'une capture active, suffisante pour envisager des solutions de phyto-extraction. Cependant cette capacité à extraire ou transformer la chlordécone du sol n'a pas été testée pour toute la diversité des espèces végétales. La réduction de la diffusion de la molécule dans l'environnement pourrait être envisagée *via* la gestion de la matière organique du sol, par l'utilisation de biochars⁶ ou de composts ligneux pour « intercepter » la molécule ou du moins prolonger son stockage dans le sol. En laboratoire, l'ajout de matières organiques au sol permet de réduire le transfert vers les cultures pour deux types de sol (nitisol et andosol) (Lesueur Jannoyer *et al.*, 2009) et de séquestrer plus fortement la molécule dans les sols (Woignier *et al.*, 2011). Ces dispositifs sont actuellement testés au champ. La diffusion de la molécule pourrait également être réduite *via* une couverture végétale continue (dans le temps et dans l'espace) des parcelles par l'introduction de plantes de services pour limiter le transport solide issu de zones vulnérables (zone nitisol, parcelle nue et pentue). Ces systèmes sont en cours de développement et ne sont

donc ni validés, ni engagés dans l'innovation à ce jour. Leur adoption devra s'accompagner d'une technicité élevée de la part des opérateurs.

Si la dégradation microbienne semble possible en conditions anaérobies (Macarie et Dolfing, 2011), ces conditions ne correspondent pas aux conditions physico-chimiques naturelles des sols cultivés. Des équipes de recherche sont mobilisées afin d'explorer les voies de dégradation à privilégier. Des techniques de création de conditions réductrices localisées autour de micro-particules de métaux de valence nulle sont en cours d'étude (Dictor *et al.*, 2011), et les résultats sont encourageants mais non encore opérationnels sur le terrain. Par ailleurs, la mobilisation de chlordécone ou de ses métabolites, dont on connaît mal les propriétés, pose question et pourrait avoir un impact environnemental mal évalué aujourd'hui.

Pour toutes ces raisons, la remédiation de cette pollution doit prioritairement passer par des solutions de gestion qui permettent d'en minimiser l'impact et la rendre compatible avec les questions de santé publique, et si possible celles de la santé des écosystèmes d'aval (Clostre *et al.*, 2010).

Conclusion

La pollution des sols pollués par la chlordécone aux Antilles est durable : la dépollution par lessivage est lente, les procédés de dégradation ne sont pas opérationnels, même s'ils font l'objet d'un gros effort de recherche pluri-organismes. Il faudra donc gérer cette pollution.

La connaissance des mécanismes de transfert de la molécule des sols vers les systèmes naturels et agricoles ainsi que celle des impacts sur la santé humaine et des écosystèmes sont des points clés de la gestion de cette pollution. Ces points sont actuellement développés par des équipes de recherche locales et métropolitaines.

Les modifications des agrosystèmes induites par la pollution des sols portent essentiellement sur le choix de cultures sans risque de contamination au-dessus de la LMR à l'aide d'un outil de gestion et les possibilités de substitution de certaines cultures. Un tel outil est plus complexe à mettre en œuvre pour les productions animales, mobiles et ayant la propriété de bioconcentrer la molécule.

Les recherches s'orientent vers des modifications plus profondes des agrosystèmes ou des pratiques, qui combinent productivité agricole, sécu-

⁶ Charbons sous forme granulés, ayant une structure et des propriétés physico-chimiques spécifiques selon le végétal d'origine.

rité sanitaire et services environnementaux. La gestion des matières organiques et de la couverture du sol sont des volets clés qui pourront être testés dans des systèmes innovants pour réduire la dispersion du polluant. Dans le contexte antillais, le processus de transfert de la molécule de chlordécone du sol vers les nappes est lui peu maîtrisable. Les enjeux sont alors de (i) déterminer les liens entre pollution des sols et pollution des nappes afin de cibler les zones prioritaires à traiter ; (ii) d'évaluer la contribution de ces nappes à la contamination des eaux de rivière et (iii) d'évaluer l'exposition et les conséquences sur les écosystèmes aquatiques.

Les études conduites aux Antilles apportent un éclairage nouveau sur cette molécule, les processus de transferts et plus globalement sur la gestion d'une pollution agricole chronique et durable : ses effets directs sur les systèmes de production et réciproquement l'influence des systèmes de culture sur sa dispersion environnementale et ses impacts sanitaires et écologiques (plantes et animaux). Connaître les mécanismes de transfert et le devenir de la molécule dans l'environnement et les chaînes alimentaires est un enjeu important d'une gestion sanitaire et environnementale intégrée.

Tant en Guadeloupe qu'en Martinique, la majorité de la SAU n'est cependant pas polluée. Sur ces surfaces indemnes de chlordécone, afin d'éviter les erreurs du passé, il convient de mettre en œuvre des systèmes de culture ou d'élevage favorisant les régulations physiques et biologiques, maîtrisant les niveaux d'intrants et leur devenir environnemental.

Remerciements

Les résultats présentés ont été obtenus dans le cadre de projets soutenus financièrement par le Ministère de l'Écologie et du Développement Durable (projet BANENVORCH), l'Agence Nationale de la Recherche (référence ANR-08-CES-004-01, projet CHLORDEXCO), le Conseil Régional de la Martinique (projet Balisier), le Ministère de l'Outre-Mer (projet IRD, Cirad, PRAM 2007-2009) et les contributions du Ministère de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur au Plan National Chlordécone 2008-2010 (actions 8 et 30). Nous remercions les laboratoires (LDA26, LDA972, Université de Liège) pour les très nombreuses analyses réalisées. Nous tenons à remercier tout particulièrement le personnel technique qui, sur le terrain ou au laboratoire, a réalisé les suivis d'expérimentations, les mesures et les préparations d'échantillons et nous a permis d'obtenir un ensemble de données cohérentes et uniques.

Bibliographie

- Achard, R., Cabidoche, Y.M., Caron, A., Nelson, R., Duféal, D., Lafont, A., Lesueur Jannoyer, M. 2008. Contamination des racines et tubercules cultivées sur sol pollué par la chlordécone aux Antilles, *Cahiers du PRAM n°7*, p 45-50
- Ahmad, R., Kookana, R.-S., Alston, A. M., Skiemstad, I. O. 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
- ATSDR. 1995. Toxicological profile for Mirex and Chlordécone. U.S. Department of Health and Human services, Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Georgia, Atlanta, updated 2009. <http://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp66.pdf>
- Bahner L.H., Wilson, A.J., Jr, Sheppard, J.M., Patrick, J.M., Jr, Goodman, L.R., Walsh, G.E. 1977. Kepone bioconcentration, accumulation, loss, and transfer through estuarine food chains. *Chesapeake Sci.*, 18: 299-308
- Cabidoche, Y.-M., Clermont-Dauphin, C., Lafont A., Cattan, P., Sansoulet, J., Achard, R., Caron, A., Chabrier, C. 2006. Stockage dans les sols à charges variables et dissipation dans les eaux de zoocides organochlorés autrefois appliqués en bananeraies aux Antilles : relation avec les systèmes de culture. Rapport final de contrat de recherche, AP « Pesticides » 2002, MEDDD. UR 1321 ASTRO, INRA, 99p
- Cabidoche, Y.-M., Achard, R., Cattan, P., Clermont-Dauphin, C., Massat, F., Sansoulet, J. 2009. Long term pollution by chlordécone of tropical volcanic soils in the French West Indies: a simple leaching model accounts for current residue contents. *Environmental Pollution*, 157: 1697-1705
- Cabidoche Y.-M., Lesueur Jannoyer M. Contamination of root crop harvested organs by soil chlordécone pollution. *Pédosphère* (accepté)
- Cattan, P., Bussiere, F., and Nouvellon, A., 2007. Evidence of large rainfall partitioning patterns by banana and impact on surface runoff generation. *Hydrological Processes*, 21(16): 2196-2205
- Cattan, P., Cabidoche, Y.-M., Lacas, J.-G., Voltz, M. 2006. Occurrence of runoff on high infiltrability andosol under two banana cropping systems. *Soil Tillage Research*, 86 (1) : 38-51
- Charlier, J.-B. 2007. *Fonctionnement et modélisation hydrologique d'un petit bassin versant cultivé en milieu volcanique tropical*. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier 2, 246p.
- Charlier, J.-B., Cattan, P., Voltz, M., Moussa, R. 2009. Transport of a nematicide in surface and ground waters in a tropical volcanic catchment. *Journal of Environmental Quality*, 38 :1031-1041
- Charlier, J.-B., Cattan, P., Moussa, R., Voltz, M. 2008. Hydrological behaviour and modelling of a volcanic tropical cultivated catchment. *Hydrological Processes*, 22(22) :4355-4370

- Charlier, J.-B., Lachassagne, P., Ladouche, B., Cattan, P., Moussa, R., and Voltz, M., 2011. Structure and hydrogeological functioning of an insular tropical humid andesitic volcanic watershed: A multi-disciplinary experimental approach. *Journal of Hydrology*, 398(3-4) : 155-170
- Clostre, F., Lesueur Jannoyer, M., Cabidoche, Y.M. 2010. *Conclusions de l'Atelier « Remédiation à la pollution par la chlordécone aux Antilles » 17-19 mai 2010, Martinique - 20-22 mai 2010, Guadeloupe*, Cirad, 36p + annexes
- Clostre, F., Lesueur Jannoyer, M., Turpin, B. 2011. *Impact des modes de préparation des aliments sur l'exposition des consommateurs à la chlordécone. Rapport final projet JAJFA*. Cirad, mars 2011, 147p + annexes
- Coat, S., Bocquené, G., Godard, E. 2006. Contamination of some aquatic species with the organochlorine pesticide chlordécone in Martinique. *Aquat. Living Resour.* 19 (2) : 181-187
- Coat S., Monti D., Legendre P., Bouchon C., Massat F., Le point G. 2011. Organochlorine pollution in tropical rivers (Guadeloupe): role of ecological factors in food web bioaccumulation. *Environmental Pollution* 159 : 1692-1701
- Collins, C.D., Martin, I., Doucette, W. 2011. Plant uptake of xenobiotics. In Schröder P. and Collins C.D. (eds). *Organic xenobiotics and plants: from mode of action to ecophysiology*, Plant ecophysiology 8. Springer Science : 3-16. DOI 10.1007/978-90-481-9852-8_1
- Desprats, J.F., Comte, J.P., Chabrier, C. 2004. *Cartographie du risque de pollution des sols de Martinique par les organochlorés. Rapport Phase 3*. BRGM RP 53262 FR, Orléans, 23 p, 10 ill., 6 cartes
- Dictor, M.C., Mercier, A., Lereau, L., Amalric, L., Bristeau, S., Mouvet, C. 2011. *Décontamination de sols pollués par la chlordécone. Validation de procédés de dépollution physico-chimique et biologique, étude des produits de dégradation et amélioration de la sensibilité analytique pour la chlordécone dans les sols*. Rapport final. BRGM/RP-59481-FR, 201p.
- Dubuisson, C., Héraud, F., Leblanc, J.-C., Gallotti, S., Flamand, C., Bateau, A., Quenel, P., Volatier, J.-L. 2007. Impact of subsistence production on the management options to reduce the food exposure of the Martinican population to chlordécone. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 49 : 5-16
- Fernandes, P., Jannoyer-Lesueur, M., Soler, A., Achard, R., Woignier, T. 2010. Effects of clay microstructure on chlordécone retention in volcanic tropical soils: consequences on pesticide lability and plant contamination. In: *19th World Congress on Soils Science*, Brisbane, Australia, 1-6 August 2010
- Fernandez-Bayo, J.D., Saison, C., Geniez, C., Voltz, M., Vereecken, H., and Berns, A.B., Sorption characteristics of chlordécone and cadusafos in tropical agricultural soils. *Journal of Environmental Quality*, (soumis)
- Fintz, M. 2009. L'autorisation du chlordécone en France 1968 - 1981. Article de synthèse. AFSSET, Maison Alfort. Décembre 2009. 21p.
- Guldner, L., Multigner, L., Héraud, F., Monfort, C., Thomé, J.P., Giusti, A., Kadhel, P., Cordier, S. 2010. Pesticide exposure of pregnant women in Guadeloupe: ability of a food frequency questionnaire to estimate blood concentration of chlordécone. *Environmental Research*, 110 : 146-151
- Joly, P.B., 2010. La saga du chlordécone aux Antilles françaises. Reconstruction chronologique 1968-2008. *Rapport du projet AFSSET action 39 du Plan National Chlordécone 2008-2010*. Inra Unité Sens en Sociétés, Paris. Juillet 2010. 82p.
- Lesueur Jannoyer, M., Carles, C. 2010. Evaluation de la contamination par la chlordécone et de son transfert dans les cultures sur l'habitation « Balisier » à Morne Rouge, *Rapport final Projet Conseil Régional – PRAM 2008-2009*, Cirad, Martinique, 48p.
- Lesueur Jannoyer, M., Carles, C., Michel, S. 2009. Évaluation de la contamination par la chlordécone et de son transfert dans les cultures sur différents sols des Antilles, *Rapport final Ministère de l'Outre-Mer* ; octobre 2009, Cirad, Martinique, 53p.
- Lesueur Jannoyer, M., Woignier, T., Achard, R., Calba, H. 2009. Pesticide transfer from soils to plants in tropical soils: influence of clay microstructure. In *Society of Environmental Toxicology and Chemistry*, 19-23 November 2009, New Orleans, USA
- Macarie, H. et Dolfig, J. 2011. La chlordécone est-elle véritablement réfractaire à une dégradation microbienne ? *Cahiers du PRAM*, 9/10 : 25-30
- Monti D. 2005. Évaluation du niveau de contamination des organismes aquatiques d'eau douce par les pesticides, en Guadeloupe. *Convention Direction Régionale de l'Environnement Guadeloupe*. 35 pages + annexes
- Monti D. 2006. Évaluation de la contamination des Crustacés et des Poissons d'eau douce en Guadeloupe : compléments d'étude. *Convention UAG/Direction Régionale de l'Environnement Guadeloupe*. 16 pages + annexes
- Monti D. 2007. Biocontamination en Chlordécone, β -Hexachlorocyclohexane et Cadusaphos des Crustacés et Poissons d'eau douce, en Guadeloupe. *Convention UAG/Direction Régionale de l'Environnement Guadeloupe*. 36 pages + annexes
- Monti, D. 2008. Évaluation de la bio-contamination en Chlordécone de crustacés et poissons de rivières du Nord-Ouest de la Basse-Terre, et synthèse à l'échelle de la Guadeloupe. *Convention UAG/Direction Régionale de l'Environnement Guadeloupe*. 31 pages + annexes
- Moussa, R., Voltz, M., and Andrieux, P. 2002. Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood events. *Hydrological Processes*, 16(2) : 393-412
- Multigner, L., Cordier, S., Kadhel, P., Huc-Terki, F., Blanchet, P., Bataille, H., Janky, E. 2007. Pollution par le chlordécone aux Antilles : Quel impact sur la santé de la population ? *Environnement Risques et Santé*, 6 : 405-407
- Multigner, L., Ndong, Giusti, A., Romana, M., Delacroix-Maillard, H., Cordier, S., Jégou, B., Thome J.P., Blanchet P.

2010. Chlordecone exposure and risk of prostate cancer. *Journal of Clinical Oncology*, 28(21) : 3457-3462
- Orndorff, S.A. et Colwell, R.R., 1980. Microbial transformation of Kepone. *Appl. environ. Microbiol.*, 39 : 398-406
- Risk Assessment Information System (RAIS). 2006. *Toxicity and Chemical-Specific Factors Data Base (Kepone)*. from http://risk.lsd.ornl.gov/cgi-bin/tox/TOX_9801.
- Saison, C., Cattan, P., Louchart, X., and Voltz, M. 2008. Effect of Spatial Heterogeneities of Water Fluxes and Application Pattern on Cadusafos Fate on Banana-Cultivated Andosols. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(24) : 11947-11955
- Tillieut, O., Cabidoche, Y.-M., 2006. *Cartographie de la pollution des sols de Guadeloupe par la chlordécone : Rapport technique*. DAAF-SA & INRA-ASTRO, Abymes, 23p.
- UNEP, Programme des Nations Unies pour l'Environnement. Persistent Organic Pollutants Review Committee, 2007. *Draft Risk Management Evaluation for Chlordecone*, UNEP/POPS/POPRC.3/20/Add.10 (2007)
- US EPA. 2009. *Toxicological review of chlordecone (kepone)* CAS No. 143-50-0. In Support of Summary Information on the Integrated Risk Information System (IRIS). EPA/635/R-07/004F, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, September 2009
- Xing, B. 2001. Sorption of naphthalene and phenanthrene by soil humic acids. *Environmental Pollution*, 111(2) : 303-309
- Wognier, T., Achard, R., Fernandes, P., Soler, A., Rangon, L., Lesueur Jannoyer, M. 2009. Impact des propriétés structurales et du statut organique des sols de Martinique sur les contaminations des eaux par les pesticides et leur transfert vers les cultures alimentaires. Cas du chlordécone sur andosol et sol brun rouille à halloysite en Martinique. *Rapport final Programme de Recherche financée par le Ministère de l'Outre-Mer*, novembre 2009, IRD-Cirad PRAM, 107 pages
- Wognier, T., Fernandes, P., Lesueur Jannoyer, M., Soler, A. 2011. Influence of clay microstructure and organic matter on chlordecone sequestration in volcanic soils. (ISMOM) *International Symposium of Interactions of Soil Minerals with Organic Components and Microorganisms*. Montpellier, France, 24-29 juin 2011
- Wognier, T., Pochet, G., Doumenc, H., Dieudonne, P., Duffours, L. 2007. Allophane: a natural gel in volcanic soils with interesting environmental properties. *Journal of Sol-Gel Science and Technology* 41 : 25-30