

# Rapport du Groupe Inter-Alliances (GIA) et du Groupe d'Observation et de Suivi Scientifique (GOSS)

## Connaissances sur les effets environnementaux du Chlordécone

La persistance de la contamination des écosystèmes et ses conséquences sur l'exposition des populations au chlordécone a justifié la mise en place d'actions de recherche ciblant les secteurs de la santé, de l'agriculture et de l'environnement dans le cadre des Plans Nationaux d'Actions Chlordécone (PNAC) mais également de projets de recherche hors plan. Les recherches sur le volet environnemental et agricole ont été lancées dès le PNAC I en 2008 pour :

- Approfondir l'état des connaissances sur la contamination des ressources (l'eau, les sols, les plantes et les animaux [dont la faune aquatique]) par le chlordécone et sur les processus de transferts au sein et entre les différents compartiments environnementaux ;
- Réduire l'exposition des populations en assurant la qualité de la production alimentaire locale et de l'eau distribuée et en sécurisant la chaîne alimentaire ;
- Rechercher et expérimenter des techniques de remédiation de la pollution ;
- Assurer une bonne information de la population ;
- Assurer une coordination des actions et la communication régulière des résultats de recherche pour la prise de décision et la gestion de la pollution.

Cette seconde partie du rapport vise à faire une synthèse des principaux travaux de recherche et à présenter les avancées et les connaissances utiles dès aujourd'hui ou dans un futur proche pour réduire l'exposition des populations et des milieux.

Ces travaux visant la connaissance du comportement, du devenir, des dangers et des risques du chlordécone dans les écosystèmes, aujourd'hui et sur le long terme, et des processus de remédiation de la contamination, sont des bases indispensables pour mettre en place des mesures pertinentes et efficaces de protection de la santé humaine et des écosystèmes, incluant les agro-écosystèmes.

### A. CONTAMINATION ET TRANSFERT DEPUIS LES SOLS VERS LE MILIEU AQUATIQUE

Les travaux sur la caractérisation de la pollution des sols et des cours d'eau ont permis d'améliorer l'échantillonnage, les techniques analytiques et la représentation de la pollution à différentes échelles (Desprats *et al.*, 2004 ; Brunet *et al.*, 2009 ; Clostre *et al.*, 2014 ; Soler *et al.*, 2014 ; Della Rossa *et al.*, 2017). Du fait de la persistance de la molécule de chlordécone, le sol est un réservoir de pollution qui diffuse lentement vers les autres compartiments (Lesueur Jannoyer *et al.*, 2012). Les principaux sols pollués par le chlordécone sont des nitisols et des andosols<sup>1</sup> formés sur des formations volcaniques (Cabidoche *et al.*, 2009 ; Woignier *et al.* 2012 ; Voltz *et al.*, 2013 ; Clostre *et al.*, 2014). Ces sols sont caractérisés par des teneurs élevées en matières organiques et en minéraux secondaires, allophanes dans les andosols et halloysite pour les nitisols qui leur confèrent des propriétés accrues de piégeage de la molécule (Woignier *et al.*, 2013). Dans les andosols, la mobilité est la plus réduite et la persistance la plus élevée (Fernandez-Bayo *et al.*, 2013a et b, Woignier *et al.*, 2017). En raison de cette persistance, les stocks de chlordécone dans les sols sont donc directement liés à la somme des apports (les traitements passés, dont l'intensité dépend du type d'exploitation ; Levillain *et al.*, 2012) et aux pratiques agricoles de l'exploitation (travail du sol en particulier ; Clostre *et al.*, 2014). Ainsi, la contamination des parcelles par le chlordécone peut être très variable d'une exploitation à l'autre. **L'hétérogénéité spatiale de la pollution, à l'échelle de la parcelle, des exploitations et du territoire, est une difficulté/complexité dont il faut tenir compte dans les mesures de gestion.** Une cartographie des parcelles potentiellement polluées a été établie dès 2004 (Desprats *et al.*, 2004), elle a depuis été

---

<sup>1</sup>Ces deux types de sols occupent la majeure partie de la sole agricole occupée par la culture de bananes

confortée par d'autres mesures et des méthodes innovantes d'identification issues des résultats obtenus sur les sols et les rivières à l'échelle de la parcelle et du bassin versant (projets ChlEauTerre et ALUR, 2016-2019).

La pollution des eaux de surface et des eaux souterraines est observée toute l'année mais à des concentrations inférieures d'un ordre de grandeur à celles des eaux de percolation. La mise en mouvement du chlordécone se produit par le biais de transport de subsurface plutôt que par le ruissellement superficiel, qui semble exceptionnel du fait des fortes capacités d'infiltration des sols(Charlier, 2007). **Compte tenu du rôle majeur des écoulements de subsurface dans le transfert depuis les sols contaminés, la mise en place de zones tampons en bordure de rivière ne serait pas efficace pour réduire la contamination des cours d'eau. Ceci implique également que la pollution des rivières n'est pas liée uniquement à celle des parcelles les plus proches : toutes les parcelles polluées du sous-bassin contribuent à la pollution de l'eau** (Crabit *et al.*, 2016 ; Della Rossa *et al.*, 2017).

La nécessité de mieux comprendre les mécanismes de contamination des eaux à partir de celle des sols, ainsi que l'état de contamination de la faune aquatique afin d'évaluer l'efficacité de mesures de remédiation pour limiter la pollution a conduit à la mise en place de deux sites observatoires<sup>2</sup>, l'un en Guadeloupe et l'autre en Martinique (projet OPALE démarré en 2014 ; suite du projet OPA-C -2012-2014 – Andrieux *et al.*, 2015 ; Charlier *et al.*, 2016). Ces sites permettent de caractériser et suivre la pollution de la ressource en eau par l'activité agricole, actuelle et passée, notamment la pollution par le chlordécone en contexte volcanique tropical aux Antilles. L'existence de ces observatoires a permis l'acquisition de nouvelles connaissances :

- sur les transferts de pesticides des sols vers les masses d'eaux superficielles et souterraines,
- sur les évolutions pluriannuelles de ces transferts en fonction de déterminants physiques et anthropiques, en différents points du bassin (suivi spatio-temporel),
- sur les pratiques agricoles, les pressions et les impacts générés sur les différents compartiments des agro- et hydro-systèmes.

Le projet OPALE (Andrieux *et al.*, 2015 ; Charlier *et al.*, 2016) a déjà permis de construire des bases solides en termes d'instrumentations de bassins versants sur les deux îles, de compréhension sur le fonctionnement hydrologique et le découpage en unités hydrogéologiques et de diagnostic sur les liens entre contamination par le chlordécone et d'autres pesticides, sur la distribution des sols et leurs usages actuels ou passés par l'agriculture. Le dispositif est opérationnel depuis 2016. Les premiers résultats ont révélé l'importance de caractériser les transferts entre les compartiments de surface et souterrains pour mieux comprendre la dynamique de dispersion des contaminants dans l'environnement, alors que les temps de résidence dans les eaux souterraines s'étagent de quelques années à plusieurs décennies (Charlier *et al.*, 2015). A l'échelle d'un échantillonnage moyen décadaire, dans les exutoires proches de la côte, la concentration en chlordécone diminue avec le débit des cours d'eau (Crabit *et al.*, 2016). Le résultat observé est en relation avec la distribution de la contamination des sols : les eaux issues des anciennes zones bananières se mélangent avec les eaux issues de l'amont forestier non contaminé. Ces dispositifs ont également permis de mieux identifier les zones contributrices à la pollution des rivières et de préciser les durées probables de pollution (Crabit *et al.*, 2016; Della Rossa *et al.*, 2016) confirmant les premières estimations (plusieurs dizaines d'années à plusieurs siècles selon les types de sols ; Cabidoche *et al.*, 2009). Les différents contextes agro-hydrologiques sur un même territoire engendrent une forte variabilité spatio-temporelle de la contamination : concentrations en chlordécone variant d'un ordre de grandeur sur le linéaire d'un même cours d'eau (DellaRossa *et al.*, 2016) ou dans le temps, en un même point de prélèvement (Crabit *et al.*, 2016, Mottes *et al.*, 2017). Ces variations interrogent sur le sens à donner aux concentrations mesurées ponctuellement en rivière et, de là, sur les outils et méthodes à mobiliser pour rendre compte de ce type de pollution chronique à long terme.

---

<sup>2</sup> Bassin Versant (BV) des Rivières des Pères et Pérou en Guadeloupe, BV du Gallion en Martinique

De telles observatoires permettent d'envisager d'expérimenter des possibilités de remédiation ou de confinement de la contamination par des pesticides persistants comme le chlordécone (Clostre *et al.*, 2014, Woignier *et al.*, 2016). Ils doivent également permettre d'initier des approches participatives et favoriser l'implication des acteurs des territoires pour la co-conception de solutions individuelles et collectives en vue de réduire les pollutions et valoriser les terres contaminées (projets FEDER RIVAGES 2015-2022 ; projet MEDDE Pesticides RESYST 2015-2019).

## B. EFFETS ENVIRONNEMENTAUX DU CHLORDECONE DANS LES MILIEUX AQUATIQUES

Le climat tropical de la Guadeloupe et de la Martinique, caractérisé par des pluies abondantes en saison d'hivernage, induit d'importants épisodes de ruissellement et d'infiltration ainsi qu'une contamination du milieu marin par le biais des rivières et des résurgences marines.

Alors que la contamination des systèmes dulçaquicoles par le chlordécone avait été démontrée depuis de nombreuses années (Kermarrec *et al.*, 1980), des études plus récentes (Bocquené *et al.*, 2002 ; Bouchon et Lemoine, 2003, 2007 ; Coat *et al.*, 2006 ; Bertrand *et al.*, 2009, 2010a, b, c, 2012, 2013) menées sur des poissons et des crustacés marins, ont confirmé leur contamination, avec des concentrations dépassant la limite maximale des résidus autorisée pour la commercialisation et la consommation des produits halieutiques établie à partir de 2008 à 20 µg.kg<sup>-1</sup> de poids frais. Entre 2003 et 2013, plusieurs rapports (Bouchon et Lemoine, 2003, 2007 ; Bertrand *et al.*, 2009, 2010a, b, c, 2012, 2013) ont identifié les espèces les plus contaminées, ainsi que les zones côtières les plus impactées par cette pollution, permettant l'établissement de zones d'interdiction totale ou partielle de la pêche, ainsi qu'une liste d'espèces, à fort risque de contamination, interdites à la pêche.

La pollution des milieux d'eaux douces par le chlordécone a également fait l'objet de travaux sur la contamination et les effets de l'exposition des crustacés, en laboratoire et directement sur le terrain, en Guadeloupe et Martinique. La contamination des rivières a en effet des conséquences sur les organismes autochtones qui y vivent ainsi que sur les productions et élevages qui en dépendent. Les travaux ont montré qu'il existait une contamination des espèces sauvages et d'élevage de crustacés, corrélée avec le niveau de contamination de leurs habitats, pouvant conduire à des contaminations dépassant très largement les seuils admissibles pour l'alimentation humaine. Les recherches ont aussi permis de mieux comprendre comment le chlordécone agissait sur les crustacés. Cette molécule peut, sans provoquer de mortalité aiguë, impacter les populations de crevettes tant sauvages que d'élevage, avec un mécanisme d'action de type perturbateur endocrinien.

Enfin des études récentes (projet CHLOHAL, « Consolidation des connaissances sur la contamination de la faune halieutique en Guadeloupe et en Martinique » ; Dromard *et al.*, 2015) ont permis une cartographie des zones côtières contaminées et une analyse de la dynamique de contamination des réseaux trophiques de deux sites sur la côté est de la Basse-Terre en Guadeloupe (Goyave et Petit-Bourg), présentant des caractéristiques hydrodynamiques semblables. Complémentaires des suivis sanitaires réalisés antérieurement (entre 2003 et 2014), ces travaux confirment **la localisation des zones polluées et ont permis de quantifier la contamination dans différentes espèces de poissons et d'invertébrés, dans des zones et sur des espèces non ou insuffisamment échantillonnées jusque-là.**

- Contamination, bioaccumulation, bioamplification, effets démographiques et physiologiques chez les organismes aquatiques dans les milieux dulçaquicoles.

Des premières études ont été réalisées sur l'impact du chlordécone sur la crevette endémique *Macrobrachium faustinum* 2009 et 2010 (ANR CHLODEXCO, 2009-2011) pour élucider quelques mécanismes d'actions biochimiques et analyser les effets sur cette espèce. Elles ont permis de mettre

en évidence des modifications des régulations hormonales, en particulier de l'hormone de mue, ainsi que des effets physiologiques notamment sur la croissance.

Parallèlement, des recherches ont été menées pour évaluer la contamination des crevettes par le chlordécone sur plusieurs sites de Guadeloupe (rivières Pérou et Grande Anse) (Coat *et al.*, 2011). Elles ont mis en évidence une contamination des organismes autochtones en lien avec les concentrations du milieu, associée à des effets démographiques (tels que la modification des ratios adultes / juvéniles). Sur Grande Anse, il a été montré **une contamination de toute la chaîne trophique, du plancton aux poissons, via l'eau et les matières en suspension.**

Les cinétiques d'accumulation, la répartition tissulaire du chlordécone et sa dépuration (Lafontaine *et al.*, 2016 a et b, 2017) ont été étudiées sur la crevette d'élevage *Macrobrachium rosenbergii* (ANR MACHLOMA, 2010-2012). Lors de ce projet, en 2012, des étangs d'élevage, contaminés ou non, ont été suivis durant 8 mois. Ces travaux ont confirmé la forte accumulation, très rapide, du chlordécone, même dans les milieux très faiblement contaminés, avec une distribution tissulaire différenciée ; le muscle étant l'organe le moins contaminé. Il faut souligner qu'avec l'arrêt de l'exposition, il a pu être observé après 6 semaines, une diminution significative de la concentration en chlordécone dans les individus contaminés. Enfin, les résultats de ces recherches ont confirmé un impact de type perturbateur endocrinien du chlordécone sur l'hormone de mue chez ce crustacé.

- **Contamination, bioaccumulation, bioamplification chez les organismes aquatiques dans les milieux marins**

Dans le cadre du projet CHLOHAL (2013-2014), il a été possible de préciser la cartographie de la contamination des écosystèmes marins du littoral de la Guadeloupe et de la Martinique, ainsi que des principales espèces halieutiques, à partir d'analyses réalisées sur de nombreux échantillons de poissons et d'invertébrés collectés dans différentes zones entre les deux îles. Des variations importantes des niveaux de contamination ont été observées selon les espèces, ainsi que l'existence d'une bioamplification du chlordécone dans la chaîne trophique, même si celle-ci reste modérée. Ces investigations ont également mis en évidence une forte contamination des gonades (partie consommée) de l'oursin blanc, et d'identifier cette espèce comme à risques pour le consommateur (Dromard *et al.*, 2015, 2016).

La compilation de l'ensemble des données de contamination disponibles a également permis de préciser la cartographie des niveaux de contamination par le chlordécone dans les zones côtières de la Guadeloupe et de la Martinique. Un gradient décroissant général a été observé depuis la côte jusqu'au large. En Guadeloupe, les cartes établies mettent en évidence un fort contraste entre les eaux entourant la Basse-Terre d'une part et l'ensemble des autres masses d'eau d'autre part ; les valeurs les plus élevées sont localisées essentiellement face au sud de la Basse-Terre, en bordure du Grand Cul-de-Sac Marin et dans les échantillons très côtiers de la pointe nord de Basse-Terre (Dromard *et al.*, 2015). En Martinique, les zones contaminées sont représentées schématiquement par les deux grandes zones géographiques de la côte atlantique et la baie de Fort de France et, dans une moindre mesure, par les deux petites zones localisées à l'embouchure de la Rivière Pilote (baie de Sainte-Luce) et la baie de Saint-Pierre. Certaines zones contaminées sont assez éloignées de la côte, notamment sur le plateau continental.

## C. SECURISER LA CHAÎNE ALIMENTAIRE

La pollution des sols par le chlordécone entraîne la contamination des chaînes alimentaires aux Antilles. Pour gérer les risques, des travaux ont été conduits sur les pratiques agronomiques pouvant réduire les transferts entre sols et plantes et sur la compréhension des mécanismes de transfert au sein des végétaux. Les campagnes de suivi et de contrôle montrent que pour les végétaux, les risques sont aujourd'hui très limités pour les circuits commerciaux (depuis 2009, tous les produits végétaux sont conformes en Martinique), mais qu'ils restent non négligeables pour les circuits informels (ANSES, Kannari, 2017).

### 1- Sécuriser les systèmes de production végétale dans les territoires contaminés

- **Mécanismes de transfert chez les végétaux**

La concentration dans les différents types de plantes cultivées, y compris dans leurs différents organes, est toujours inférieure à la concentration mesurée dans les sols : cela confirme donc un transfert passif vers les cultures. Cependant, les réponses diffèrent selon les espèces (Cabidoche et Lesueur Jannoyer, 2012 ; Clostre *et al.*, 2014). Du fait des caractéristiques de la molécule, la voie aérienne et foliaire a été exclue (faible volatilisation). Le compartiment « sol » joue un rôle capital dans le piégeage et le transfert de polluants vers les autres compartiments environnementaux : il se comporte comme un réservoir de pollution (Cabidoche et Lesueur Jannoyer, 2012 ; Clostre *et al.*, 2015, 2017).

Au cours du projet ANR CHLORDEXCO (2009-2011), un schéma conceptuel du transfert du chlordécone au sein de la plante a été élaboré (Lesueur Jannoyer *et al.*, 2012). Ce schéma explicite les différentes voies de transfert et rend compte de la variabilité des réponses observées selon les organes et leur positionnement sur les flux de sève (Lesueur *et al.*, 2014). Le chlordécone pénètre dans la plante via la solution du sol et les racines, la molécule est transférée vers les organes aériens via les flux de sève brute puis par une diffusion apoplasmique. Elle est très largement adsorbée sur les parois cellulaires des vaisseaux du xylème et au sein des tissus fibreux rencontrés. Le chlordécone est donc relativement peu mobile au sein de la plante. **Les organes contaminés sont ceux se trouvant sur les flux de sève brute (racine, tige, feuille). Les organes dont la croissance est majoritairement liée aux flux de sève élaborée et pour lesquels les distances de transfert sont élevées (fruits, organes de réserve, ...) accumulent très peu la molécule.**

Selon les espèces, le niveau de contamination des organes de la plante et donc de contribution à l'exposition des consommateurs, diffèrent. Les organes les plus contaminés sont les organes souterrains pour lesquels il existe un contact direct avec la matrice polluée (le sol), une diffusion à partir des vaisseaux du xylème ou/et une dilution par l'accumulation de réserves carbonées indemnes au sein de l'organe (tige, racine). Des familles de plantes sont peu concernées par la pollution par le chlordécone (organes très faiblement contaminés ou indemnes) et ne contribuent pas à l'exposition des populations : les solanacées, les fruits issus d'arbres, les bananes, l'ananas, la papaye, l'igname bulbifère, Pour l'ensemble des espèces étudiées (toutes cultivées), aucune n'a montré d'extraction de la molécule du sol très performante (pas de concentration efficace du polluant dans la biomasse). **Les perspectives de phytoremédiation semblent donc peu prometteuses ou du moins nécessiteront un grand nombre de cycles culturels pour dépolluer le sol. Cependant, toute la diversité végétale n'a pas été explorée. Ces productions sont possibles quel que soit le niveau de pollution de la parcelle. Elles pourront donc être substituées aux cultures plus sensibles.**

- **Stratégies de gestion du risque de contamination des végétaux**

La relation de proportionnalité existant entre teneur en chlordécone du sol et teneur en chlordécone des organes commercialisés et la limite maximale de résidus (LMR) autorisée dans les aliments (LMR fixée à 20µg.kg<sup>-1</sup>de matière fraîche) a permis de traduire cette LMR en limite maximale pour le sol (LMsol) pour chacune des familles de plantes définies par leur réponse vis-à-vis de l'accumulation de la molécule. Cet outil permet de classer les cultures en trois grands types de sensibilité au transfert de chlordécone :

- les productions sensibles (racines et tubercule),
- les productions moyennement sensibles (cucurbitacées, laitues, cives),
- les productions peu sensibles (ananas, bananes, fruitiers, chou, christophines, ...).

Sur la base de taux de transferts différents et de types de sols variables, des LMsol simples (*i.e* la LMsol minimale pour chacun des types) ont été proposées dans un objectif de réduction du risque sanitaire pour les populations (Clostre *et al.*, 2017).

En alternative à la décontamination des sols, la séquestration du chlordécone dans le sol a été testée. L'objectif est d'utiliser les interactions entre molécules, sols (en particulier les argiles allophanes des andosols) et matières organiques. L'ajout de matière organique mûrée réduit le transfert de chlordécone vers la solution du sol (Woignier *et al.*, 2012ab, 2013) et des plantes comme le concombre et le radis (Clostre *et al.*, 2014; Mouvet *et al.*, 2016a). Cette pratique, simple à mettre en œuvre, est efficace mais non pérenne dans le temps. Elle doit être répétée au cours du cycle de production selon les cultures envisagées. L'étude de la durabilité de la séquestration doit faire l'objet d'essais complémentaires dans des conditions de plein-champs. Le coût du procédé est de l'ordre de 95 à 190 k€/ha selon la dose de compost ajoutée et doit être pris en compte par rapport à la valeur des productions concernées.

Les différences de niveau de contamination mises en évidence entre la pulpe et la peau des racines et tubercules et des fruits de cucurbitacées ont conduit, dans le cadre du programme Jardins Familiaux (2009-2012), à prodiguer des recommandations sur la nécessité d'un lavage soigneux et d'un épluchage généreux lors des préparations alimentaires à partir de ces productions, sachant que la cuisson ne modifie pas la teneur en chlordécone de l'aliment.

## **2- Sécuriser les systèmes de production animale dans les territoires contaminés par le chlordécone**

Le rapport ANSES de 2017 sur « L'Exposition des consommateurs des Antilles au chlordécone, résultats de l'étude Kannari » a permis d'actualiser les données d'exposition au chlordécone des populations, mais aussi de présenter l'influence des modes d'approvisionnements sur les concentrations en chlordécone retrouvées dans les denrées alimentaires d'origine animale (DAOA) (Rapport ANSES, 2017). Ce rapport indique par exemple qu'une part significative des DAOA analysées, principalement issues des circuits informels, présentaient un dépassement des valeurs réglementaires autorisées. Cette situation préoccupante a incité les professionnels des filières ainsi que les acteurs de la recherche et du développement agricole à mettre en place des études visant à comprendre les processus de contamination et le devenir du chlordécone dans l'organisme afin de proposer des solutions pertinentes pour garantir la sécurité sanitaire des produits animaux terrestres.

### **• Stratégies visant à réduire l'exposition des animaux d'élevage**

Il est acquis que le chlordécone issu d'un sol contaminé (nitisol ou andosol) n'est pas retenu par les fractions organiques ou minérales du sol lors des processus digestifs des animaux (Bouveret *et al.*, 2013 ; Jurjanz *et al.*, 2014). Il s'agit donc d'identifier et de recommander les pratiques de pâturage qui permettent de limiter au maximum les quantités de sol ingérées involontairement. Les résultats de différentes études (Healy, 1968 ; Fries *et al.*, 1982 ; Jurjanz *et al.*, 2012) conduisent à recommander d'éviter les conditions d'offre fourragère faible dans les zones contaminées, afin de réduire les risques

liés à l'ingestion de sols contaminés. En effet, le chlordécone issu de l'ingestion involontaire de sol contaminé se retrouvera inévitablement dans l'organisme de l'animal. Une approche complémentaire visant à séquestrer le chlordécone par du charbon actif dans la lumière intestinale durant les processus digestifs a été envisagée, mais en raison de la durée relativement courte du transit digestif, le temps de contact limité entre le chlordécone libéré et le charbon actif ne favorise pas efficacement cette séquestration (Yehya, 2017).

- **Stratégies visant à décontaminer les animaux d'élevage afin d'obtenir des produits conformes pour le consommateur**

Dans le cadre des plans de contrôle et des mesures de terrain, les concentrations en chlordécone ont été déterminées dans les matrices cibles telles que le tissu adipeux péri-rénal (TAPR, matrice de référence en matière de contrôle), le foie, le muscle et le sang de bovins. Globalement, les résultats d'analyse ont révélé que les concentrations en chlordécone dans le foie étaient en moyenne 4 fois plus élevées que dans le TAPR et 8 fois plus que dans la hampe (Lastel, 2015). En juin 2017, le laboratoire de sécurité des aliments de l'Anses a transmis à la DGAL le rapport de l'étude dite « Triplet » réalisée à sa demande portant sur des mesures de chlordécone dans des échantillons de muscle, de foie et de graisse périrénale de bovins prélevés, en Martinique et en Guadeloupe, dans les mêmes animaux (ANSES, Triplet, 2017). Cette étude permet d'établir, pour les bovins uniquement et sur la base de données de mesures, des corrélations de concentrations entre ces trois matrices. Sur cette base, des rapports de concentration en chlordécone entre le muscle et la graisse peuvent être établis. Cette étude sera très prochainement complétée par l'analyse de cent échantillons de sang prélevés sur les mêmes animaux afin d'établir d'éventuels facteurs de corrélation entre la concentration en chlordécone dans le sang et celle dans la graisse, le foie et le muscle. Ces résultats ont mis en évidence un besoin urgent de définir les paramètres toxico-cinétiques du chlordécone chez les animaux d'élevage afin de préciser son devenir dans l'organisme et d'envisager des stratégies de décontamination adéquates.

Des travaux récents issus du programme INSSICCA (2016-2020) ont permis de caractériser le devenir de la molécule chez les ruminants (Lastel *et al.*, 2016, Fournier *et al.*, 2017). Dès lors qu'un animal contaminé (concentration sérique de chlordécone inférieure à 15 ng.g<sup>-1</sup>) est retiré d'une parcelle contaminée, les temps de demi-vie du chlordécone dans l'organisme sont relativement courts (entre 20 et 40 jours selon les espèces), et permettent d'envisager des périodes de décontamination des animaux sur des pas de temps compatibles avec les pratiques d'élevage, puisque une période de décontamination de 3,3 fois le temps de demi-vie permet d'éliminer 90% de la charge contaminante de l'organisme. Les travaux en cours ne concernent pas uniquement le chlordécone mais également ses métabolites. A cet effet, un développement analytique vient d'être réalisé par l'ANSES en vue de quantifier simultanément le chlordécone et le chlordécol (CLDOH) sous leurs formes libres et conjuguées (Saint Hilaire *et al.*, 2018).

Les stratégies de décontamination évoquées ci-dessus permettent d'obtenir des DAOA saines pour le consommateur, mais nécessitent l'usage de parcelles « non contaminantes » pour accueillir les animaux en phase de décontamination. Ces parcelles peuvent être soit des parcelles non contaminées soit des parcelles où le chlordécone n'est plus accessible, car séquestré.

Les stratégies visant à séquestrer durablement le chlordécone dans les parcelles contaminées sont actuellement basées sur l'usage de charbons actifs (matériaux ayant subi une pyrolyse et un traitement d'activation) ou de biochars (matériaux ayant subi une pyrolyse uniquement). Un premier verrou à lever consistait à tester un panel de matrices carbonées en faisant varier la nature des précurseurs (noix de coco, sargasses, chêne), et les techniques d'activation (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O). Les tests réalisés *in vitro* puis *in vivo* font apparaître des résultats prometteurs pour certains matériaux (charbons de chêne et de noix de coco, activés à l'acide phosphorique ; Yehya *et al.*, 2017), mais au regard du coût de production des charbons actifs, il paraît peu réaliste d'appliquer ces matrices



hautement carbonées sur des grandes surfaces agricoles. Par contre, il pourrait être envisageable, à terme, d'incorporer du charbon actif sur des parcelles spécifiques destinées par exemple à la décontamination des animaux.

De manière globale, les résultats présentés ci-dessus, constituent des bases scientifiques solides pour la mise en place de systèmes de production sécurisés. **Il apparaît clairement que l'offre fourragère doit être abondante pour limiter l'exposition des animaux. Les travaux sur la connaissance de devenir du chlordécone dans l'organisme (corrélation entre tissus, dynamique sanguine, métabolisme) permettent d'envisager, sur des durées compatibles avec l'élevage des animaux, des stratégies de décontamination pertinentes.** Un site internet dédié au programme de recherche INSSICCA a été également développé (INSSICCA.fr) avec pour objectifs la capitalisation et la vulgarisation des résultats scientifiques obtenus par les partenaires INSSICCA et l'information des acteurs professionnels et des consommateurs.

#### D. POSSIBILITES DE REMEDIATION ET DE DECONTAMINATION DES SOLS CONTAMINES.

Les mécanismes impliqués dans la contamination par le chlordécone de toutes les composantes des écosystèmes antillais restent insuffisamment connus. Tenter d'abord de supprimer ou de réduire les sources de la contamination est une des étapes à franchir pour optimiser la gestion de la situation. Des travaux de recherche ont donc été menés sur les sols (zones racinaires et non saturées sous-jacentes) et l'eau destinée à la consommation humaine visant à optimiser les procédés permettant d'en retirer le chlordécone. Pour simplifier, les procédés de décontamination des sols ou des eaux peuvent être classés en deux types d'approche, biologique (biodégradation ou phytoremédiation) ou physico-chimique (réduction ou décontamination). Jusqu'en 2012, aucune publication scientifique n'était disponible sur la remédiation/décontamination des matrices et milieux naturels contaminés par le chlordécone. Du fait de la complexité du sujet, la majorité des études de ces dix dernières années a été réalisée en conditions de laboratoire, avec des milieux synthétiques simplifiés, en particulier pour l'étude de la biodégradation. Un certain nombre de travaux ont permis d'établir d'une part la possibilité théorique d'une dégradation microbienne du chlordécone (Dolfing *et al.*, 2012), et d'autre part une transformation microbienne du chlordécone en métabolites chlorés dont certains n'ont plus la structure bishomocubane (Chaussonnerie *et al.*, 2016 ; Chevallier 2017), en conditions optimisées de laboratoire, avec des milieux liquides simplifiés. Des travaux en conditions réelles de terrain ont été menés pour l'approche physico-chimique d'*In Situ Chemical Reduction*, qui s'est avéré efficace pour diminuer les concentrations en chlordécone dans des sols de bananeraies et dans certains végétaux cultivés après-traitement du sol (Mouvet *et al.*, 2016 a).

#### Développements analytiques

La structure chimique très particulière du chlordécone lui confère des propriétés physico-chimiques spécifiques qui nécessitent des développements analytiques préalables à toute étude sur sa transformation/dégradation, en particulier dans les matrices sols. Dans ce but, des techniques de quantification basées sur la chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse (GC/MS) ont été développées et validées (Bristeau *et al.*, 2014) avec e. g. l'emploi de <sup>13</sup>C-chlordécone comme traceur (Martin-Laurent *et al.*, 2014). Une attention particulière a également été apportée à l'analyse dans des matrices aqueuses telles que eaux de surface et boues de stations d'épuration (STEP) par chromatographie liquide couplée à un spectromètre de masse (LC/MS) (Cimetiere *et al.*, 2014) ou par chromatographie gazeuse couplée à un spectromètre de masse (GC/MS) pour les matrices simples utilisées dans des études en laboratoire sur la désorption du chlordécone à partir de charbons actifs (Ranguinet *et al.*, 2017). Des travaux pour l'analyse du chlordécone en SPME-GC/MS (Solid-phase microextraction couplée à la GC-MS) ont montré le potentiel de cette méthode pour des matrices eau, sol et végétaux (Soler *et al.*, 2014). Tout récemment, une méthode analytique (*Compound Specific Isotope Analysis*) de suivi du fractionnement isotopique du carbone du chlordécone a été développée pour des milieux liquides. Elle montre des signatures de



fractionnement isotopique distinctes selon que la dégradation est microbiologique ou chimique (Chevallier *et al.*, 2018). Moyennant une adaptation aux sols, ce nouvel outil serait très utile dans le contexte environnemental où il pourrait mettre en lumière une dégradation difficile à prouver par les moyens actuels (Devault *et al.*, 2017) et donner des indices quant aux mécanismes impliqués.

**Les résultats acquis lors des recherches menées sur les différents procédés conduisent à des conclusions nuancées quant à leur efficacité pour disposer à terme de techniques de remédiation efficaces.**

- **La phytoremédiation**

Ce procédé ne paraît pas très efficace sur la base des données disponibles sur les espèces alimentaires cultivées aux Antilles (Clostre *et al.*, 2014, 2015, 2016) et sur le *Miscanthus* (Liber *et al.*, 2018). La mise au point de ce procédé nécessiterait des études approfondies (mécanismes d'extraction par les plantes, sélection d'espèces adaptées, efficaces et non invasives, validation en situation réelle, mise en place de filières de traitement).

- **La biodégradation**

La biodégradation du chlordécone a été abordée en laboratoire essentiellement sur milieux aqueux synthétiques, très peu avec des sols naturels. En conditions méthanogènes et en milieu liquide, un faible taux de déchloration par des *Archae* méthanogènes a été observé (0,2 % de la concentration molaire apportée) (Macarie *et al.*, 2014), suggérant la possibilité d'une certaine dégradation du chlordécone dans de telles conditions (par exemple sédiments de mangroves, de marais, ou marins). Les essais menés sur diverses souches fongiques en milieu synthétique liquide et en condition aérobie n'ont pas permis de montrer de dégradation significative du chlordécone (maximum : 1,2 % ; Merlin *et al.*, 2014).

En milieu anaérobie, de nombreuses expériences en cultures liquides ainsi qu'en microcosmes ont été menées en exploitant au maximum la diversité microbienne présente dans des sols de Guadeloupe contenant le chlordécone, des sols et sédiments contaminés par d'autres micropolluants organochlorés, ou encore des boues provenant des bassins aérobie et anaérobies de station d'épuration (Chaussonnerie *et al.*, 2016). Ces travaux ont visé l'identification des métabolites formés au cours de la disparition du chlordécone ainsi que des gènes codant les enzymes impliquées (deshalogénases). Des expériences de dégradation en présence de divers consortia bactériens, en cultures liquides ou en microcosmes, ont montré la disparition du chlordécone et permis l'identification des métabolites formés. Finalement, trois familles de métabolites ont été décrites puis synthétisées en quantité suffisante pour poursuivre les investigations (étude de toxicité, étude de minéralisation ; Chevallier 2017, Chevallier *et al.*, 2018). Très récemment, certains de ces produits de dégradation ont été détectés et quantifiés dans des échantillons de sols et d'eaux des Antilles françaises démontrant l'existence d'une dégradation naturelle du chlordécone (résultats non encore publiés). Bien qu'un bilan quantitatif de l'efficacité de cette dégradation soit actuellement impossible à fournir et que les modalités de sa stimulation éventuelle restent à prospecter, son existence pourrait modifier les solutions envisageables pour dépolluer les systèmes naturels antillais.

Si la biodégradation du chlordécone est possible en milieu contrôlé et en anaérobiose, elle reste néanmoins à démontrer sur des sols contaminés. Des études sont en cours sur des sols et sédiments contaminés de Guadeloupe, en microcosmes de laboratoire en conditions anaérobies. Elles montrent une diminution de la concentration en chlordécone et la formation de métabolites. En conditions aérobie, au maximum 4,4 % du chlordécone ajoutée à un andosol est biodégradé (Fernandez-Bayo *et al.*, 2013).

- **Les méthodes physico-chimiques**

Des approches physico-chimiques pour la transformation du chlordécone ont été testées et ont montré qu'il était possible d'améliorer l'efficacité d'élimination du chlordécone dans de l'eau déminéralisée ou ultra-pure, notamment par l'utilisation de filtres à charbon actif innovants (Durimel *et al.*, 2013 ; Rana *et al.*, 2016, 2017 ; Ranguin, 2015). Cette méthode est appliquée en routine pour le traitement de l'eau distribuée. Reste la question du traitement de ces charbons après usage.

Le procédé de réduction chimique *in situ* (*In situ Chemical Reduction-ISCR*), a été testé en laboratoire et *in situ*. Ce procédé a permis d'obtenir après 6 mois de traitement, en laboratoire, une diminution significative (70-74%) de la concentration en chlordécone dans un nitisol et un ferralsol, avec l'apparition de dérivés déchlorés (Dictor *et al.*, 2011 ; Mouvet *et al.*, 2017). Ces sols traités n'ont pas montré de différences d'écotoxicité avec des sols témoins non traités (Mouvet et Bristeau, 2012). Ces travaux ont également permis d'élucider certains des mécanismes en jeu, en particulier le rôle du fer zéro-valent. Ces résultats ont conduit à tester ce procédé en conditions réelles de plein-champ. Quatre types d'amendement destinés à provoquer la chute du potentiel redox du sol, principal moteur du procédé d'ISCR, ont été testés en bananeraies, sur un nitisol et sur un sol alluvial. Les concentrations en chlordécone et en métabolites ont été suivies dans les sols en place sur trois mois ainsi que dans des essais de cultures (radis, concombres et patates douces) après le traitement. Les résultats obtenus montrent que la mise en œuvre du procédé d'ISCR permet une diminution de 60 - 70 % des concentrations initiales en chlordécone, avec des effets positifs sur les concentrations mesurées dans les végétaux cultivés après le traitement. Néanmoins le coût du procédé est élevé, de l'ordre de 170k€/ha) et la productivité est diminuée pour une des trois cultures testées (Mouvet *et al.*, 2016 a,c).

- **Devenir des métabolites déhalogénés formés par ISCR**

Le devenir environnemental et les impacts des produits dérivés du chlordécone ont fait également l'objet d'études. Trois aspects ont été abordés, le potentiel d'entraînement par l'eau en lien avec les propriétés de sorption / désorption des métabolites formés, le transfert sol-plantes et enfin la toxicité *in vitro* (génotoxicité et mutagénicité) et *in vivo* (potentiel cancérigène). Des essais ont été menés sur sol contaminé traité et sol non traité. Même si les dérivés déchlorés du chlordécone ont montré une mobilité plus importante que la molécule mère (Mouvet *et al.*, 2016 b), et une potentialité de transfert du sol vers la plante (Mouvet *et al.*, 2016 c), les résultats sont en faveur des sols traités avec des flux polluants moins importants et une diminution des impacts sanitaires potentiels en lien avec la consommation des végétaux. De plus, les quatre dérivés étudiés n'ont pas montré de toxicité supérieure à celle de la chlordécone (Mouvet *et al.*, 2016 d, 2018), pour l'ensemble des tests *in vitro* ou *in vivo* utilisés. Au contraire, leur toxicité est le plus souvent inférieure à celle de la chlordécone avec des différences qui peuvent être statistiquement très significatives (Legeay *et al.*, 2018 ; Mouvet *et al.*, 2018).

## Perspectives / Besoins de recherche

Concernant la contamination des milieux terrestres et marins ainsi que ses incidences sur les réseaux trophiques et les produits destinés à la consommation humaine, des besoins de recherches demeurent sur différents volets, afin notamment d'envisager à terme des actions efficaces de protection des milieux jusqu'aux consommateurs.

Plusieurs perspectives sont ouvertes aujourd'hui. D'une part il s'agit d'arriver à mettre en relation de manière univoque les voies d'exposition et les sources de contamination dans les réseaux trophiques dulçaquicoles et marins (eaux, matières en suspension, nourriture) avec la gestion des sols et des eaux. La compréhension des transferts de pesticides, anciens (comme le chlordécone) et actuels, des sols vers les masses d'eaux superficielles et souterraines (au travers de toute la zone non saturée, pas seulement la zone racinaire), entre eaux souterraines et superficielles, et entre eaux souterraines et côtières doit être nettement améliorée. Il est également indispensable de suivre et modéliser les évolutions interannuelles des contaminants en fonction de déterminants physiques, biologiques et anthropiques. D'autre part il s'avère nécessaire de mieux comprendre les répartitions tissulaires du chlordécone dans différentes espèces marines ainsi que les cinétiques et les processus de décontamination des organismes, notamment les voies métaboliques impliquées, les métabolites produits et leur éventuelle toxicité.

Pour ce qui relève des systèmes de production animale terrestre, il convient de :

- Préciser les pratiques d'élevage à risque aussi bien pour ruminants que les monogastriques, afin de pouvoir recommander des pratiques qui minimisent l'ingestion de sol. Les méthodologies pour caractériser l'ingestion de sol ayant été validées, il faut à présent les mettre en œuvre pour les différentes espèces (seule l'ingestion de sol par les bovins est aujourd'hui caractérisée) ;
- Tester *in situ* les approches très prometteuses de la séquestration du chlordécone par l'application de charbon actif sur des sols contaminés. Ces approches permettront également de réduire l'exposition au chlordécone des animaux élevés en plein air ;
- Déterminer les paramètres toxicocinétiques pour les principales espèces d'élevage consommées aux Antilles, afin de caractériser précisément les processus de contamination et de décontamination. La définition de ces paramètres est indispensable pour l'établissement de lois de réponses et d'équations de prédiction permettant d'estimer les durées de décontamination. Des outils simples et rapides pour améliorer les mesures de gestion en élevage sont à développer.

Dans les domaines de la décontamination et/ou de la remédiation des systèmes naturels antillais contaminés par le chlordécone, une série de perspectives de recherche et développement peut être identifiée, notamment visant la mise à disposition de techniques de remédiation applicables à grande échelle pour décontaminer ou limiter les transferts de chlordécone dans les écosystèmes antillais :

- Phytoremédiation : une étude prospective étayée du potentiel de cette méthode, y compris la gestion des biomasses produites, reste à effectuer avant de passer à une éventuelle phase de test sur les plantes qui restent à sélectionner.
- Biodégradation : les résultats encourageants obtenus en conditions anaérobies dans des milieux de culture en laboratoire doivent être confrontés à la réalité des matrices naturelles à décontaminer, à savoir les sols. Une première phase de travaux en micro-/mésocosmes de laboratoire devra permettre d'apporter une preuve de faisabilité, à valider ensuite en conditions réelles de terrain.
- Elimination du chlordécone dans les eaux destinées à la consommation humaine : une analyse technico-économique des procédés ou substrats développés est à mener en concertation avec des opérateurs susceptibles de mettre en œuvre ces développements.

- Décontamination des sols par ISCR : en gardant le principe d'un procédé basé sur des couples d'oxydo-réduction, les possibilités de diminution du coût doivent être prospectées. L'emploi combiné de Fer Zéro Valent et de surfactant mérite d'être testé. Une expérimentation de terrain relative au transfert sol/plantes est à réaliser sur un andosol traité.
- Séquestration du chlordécone dans les sols par ajout de compost : il s'agira de tester la durabilité des effets positifs mesurés et vérifier l'absence d'effets négatifs suite à des apports répétés.

De manière générale l'identification des dérivés formés et la mise à disposition de plusieurs dizaines (voire centaines de mg) de chacun d'entre eux avec une pureté  $\geq 90\%$  est à réaliser. Des expérimentations avec du  $^{14}\text{C}$ -chlordécone sont à mener pour permettre l'établissement de bilans de masse. Les propriétés environnementales et toxicologiques des dérivés formés doivent également être déterminées. Ces dérivés, incluant les produits de métabolisation, doivent être étudiés dans tous les compartiments contribuant à l'exposition humaine y compris dans les denrées alimentaires.

La convergence des travaux sur les mêmes territoires permet les approches participatives et l'implication des acteurs pour la mise en place de solutions ou la valorisation des terres contaminées. L'ouverture vers les SHS réalisée dans le projet RIVAGES est sans aucun doute, dans ce domaine une perspective très prometteuse. Ce projet s'appuie largement sur l'observatoire OPALE et ses sites instrumentés, où sera capitalisée une connaissance approfondie du milieu et des hommes. L'objectif global du projet est d'améliorer la gestion de l'environnement par l'agriculture et de réduire l'exposition de la population aux polluants, pesticides en particulier. La problématique est abordée de manière intégrée, en s'intéressant à l'ensemble des compartiments de l'environnement et de ses ressources (biodiversité, eau, sol...). L'originalité du projet est de représenter de façon partagée (par tous les acteurs du territoire) les relations de causes à effet (déclinaison du modèle DPSIR-*Driving Forces-Pressures-States-Impacts-Responses*) et de construire un dispositif d'accompagnement de l'innovation en agriculture : changement de systèmes, de pratiques pour la réduction des impacts environnementaux liés aux usages anciens et actuels des pesticides. Le développement de partenariats avec des acteurs des territoires offre des pistes très nombreuses pour des innovations dans des directions aussi différentes que la valorisation des sols contaminés via des systèmes de cultures durables, la maîtrise des risques (éco)toxicologiques ou la mise en place de solutions de gestion de la contamination, mais aussi à terme pour des actions de recherche faisant le lien entre exposition environnementale et santé humaine.

Les actions d'accompagnement déjà menées ont permis de dresser un cadre d'interactions entre les différents acteurs (chercheurs, agriculteurs, services d'appui...). La mise en œuvre du modèle DPSIR révèle à la fois une grande homogénéité de la représentation des causes des pollutions par les acteurs et des divergences sur l'analyse de leurs conséquences et voies de remédiations possibles. S'appuyant sur le diagnostic agronomique, des prototypes de systèmes innovants et des scénarios d'évolution pouvant répondre à la fois aux enjeux locaux et territoriaux ont été construits. Un Système d'Information Environnemental participatif destiné à rendre disponible à un public large les informations produites par les projets comme RIVAGE a été construit, mis en ligne et est prêt à être alimenté.

Enfin, pour l'appui aux politiques publiques (MAA, MTES), sur la base des cartes maintenant disponibles, il serait nécessaire de poursuivre la surveillance spatio-temporelle de la contamination des écosystèmes côtiers sur des espèces sentinelles, telles que le poisson lion dans les zones de récifs, ou l'huître de palétuvier en mangrove, afin d'actualiser de manière pertinente les zones de restriction de la pêche ou d'interdiction de consommation pour certaines espèces. Traiter ces questions à l'échelle des territoires où l'on peut apporter des solutions semble la voie d'avenir.