

SECURISER LA CHAÎNE ALIMENTAIRE

Contexte général :

La pollution des sols par la chlordécone entraîne la contamination des chaînes alimentaires aux Antilles. Dès 2002, suite au contrôle d'un lot de patates douces à Dunkerque, des travaux ont été entrepris sur les racines et tubercules et des mesures ont été prises pour ces productions (arrêtés préfectoraux 2003). Elles se sont révélées être également des contributeurs de l'exposition des populations (AFSSA, 2007). Ces travaux ont été poursuivis en élargissant la gamme de cultures, afin de déterminer et de gérer les risques de contamination. Pour gérer les risques, des travaux complémentaires 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 suivis et de contrôles 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 par ex), mais restent non négligeables pour les circuits informels (ANSES, Kannari, 2017). En parallèle, des travaux sur la caractérisation de la pollution des sols et des cours d'eau ont permis d'améliorer l'échantillonnage, les techniques de mesures et la représentation de la pollution à différentes échelles.

Pour les productions animales, les études ont été plus tardives avec d'une part des recommandations et des expérimentations auprès des éleveurs et d'autre part des études sur la compréhension des dynamiques de contamination afin de modéliser, pour différents types d'animaux, la contamination des organes et tissus d'intérêt. Il a été mis en évidence, de forts taux de bioconcentration avec une contamination rapide avec des niveaux très élevés dès exposition des animaux mais également une capacité d'excrétion de la chlordécone ouvrant des possibilités de gestion. Aujourd'hui la conformité sur les produits d'élevage n'est pas assurée lorsqu'ils sont conduits sur des terrains pollués.

Quid aquaculture ? intégrer les travaux de l'UA ?

Les travaux réalisés

- pour le volet végétal : les études ont été conduites d'une part sur le terrain et en collaboration étroite avec les professionnels par les équipes du Cirad (UPR HortSys et Géco), de l'Inra (UR Astro) et de l'IRD (UMR IMBE) et d'autre part en laboratoire par l'équipe Inra de l'UMR Ecotox. Les travaux ont été soutenus par le PNAC1, PNAC2, l'ANR, Le ministère de l'Outre-Mer, la DRAAF Martinique, les fonds FEDER Martinique.
- pour le volet animal : Les résultats présentés ci-dessous sont le fruit d'un travail collaboratif récent (2014-2017) entre les laboratoires de recherche suivants : Unité de Recherches Zootechniques, INRA Petit Bourg ; LEAE CART, Université de Liège ; Unité Pesticides et Biotoxines Marines, ANSES, Maisons-Alfort, Paris ; UR AFPA-ENSAIA, Université de Lorraine, et de rencontres régulières avec la profession (avril 2016, avril 2017). Ces travaux sont financés par le PNAC2 et 3, l'ANR, les crédits PITE, le MENESR et la DGAL.

Sécuriser les systèmes de production animale dans les territoires contaminés par la chlordécone

Contexte

Les données cartographiques récentes indiquent que près d'1/4 de la superficie agricole utile des deux départements d'outre-mer français (Guadeloupe, Martinique) sont considérés comme modérément ou fortement pollués par la chlordécone (CLD, DAAF Guadeloupe et Martinique). L'élevage de ruminants au pâturage y est pratiqué selon deux modalités qui dépendent essentiellement de sa taille et de ses débouchés. Les troupeaux de taille importante (quelques dizaines à plus d'une centaine d'animaux) sont conduits au pâturage en parcelles clôturées. Les éleveurs concernés sont généralement des exploitants agricoles qui commercialisent leur production via les circuits officiels (coopératives). À l'opposé l'élevage au piquet est couramment pratiqué par des détenteurs d'un petit nombre d'animaux (de 1 à 20) qui ne possèdent pas de surface herbagère justifiant l'investissement que représentent des clôtures. La plupart sont pluriactifs et exploitent des surfaces restreintes et marginales, souvent de façon précaire (bordures de parcelles cultivées, jachères des assolements bananiers, alentours des habitations, parcelles non cultivées etc.). À titre d'exemple, ce type d'élevage concerne plus de 60% du cheptel du "croissant bananier" en Guadeloupe. Une enquête nationale menée depuis 2008 dans les abattoirs antillais a révélé une contamination significative des produits d'origine animale. Entre 2008 et 2010, les contrôles réalisés à l'abattoir départemental du Moule en Guadeloupe ont mis en évidence la présence de bovins contaminés, voire fortement contaminés, dans l'île (concentration de CLD dans les tissus adipeux péri-rénaux comprise entre 3 et 650 $\mu\text{g CLD.kg}^{-1}$ MG ; Lastel, 2015) et en 2011, près de 12 % des carcasses examinées présentaient des valeurs supérieures au seuil réglementaire (LMR), de 100 $\mu\text{g CLD.kg}^{-1}$ de matière grasse, fixé par l'Union européenne. Dans la récente étude réalisée par l'Anses à la demande de la DGAL, 200 triplets (soit 600 analyses), dont 120 en provenance de Martinique, et 80 en provenance de Guadeloupe ont été analysés entre 2016 et 2017 (Anses, Triplet, 2017). Les résultats ont mis en évidence que 1 % des carcasses examinées excédaient cette LMR de 100 $\mu\text{g CLD.kg}^{-1}$ de matière grasse (soit 2 échantillons sur 200 analysés avec un maximum de 125 $\mu\text{g CLD.kg}^{-1}$ de matière grasse). Le rapport ANSES de 2017 sur « L'Exposition des consommateurs des Antilles à la chlordécone, résultats de l'étude Kannari » a permis d'actualiser les données d'exposition à la chlordécone des populations mais aussi de présenter l'influence des modes d'approvisionnements sur les concentrations en CLD 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 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 de la CLD dans l'organisme afin de proposer des solutions pertinentes pour garantir la sécurité sanitaire des produits animaux terrestres. La stratégie mise en œuvre comprend à la fois des approches biotechniques et socio-économiques. Le but des approches biotechniques est de proposer des stratégies visant à réduire l'exposition des animaux d'élevage dans les zones contaminées et, en fonction du niveau de contamination résiduel, d'assurer la décontamination des animaux afin d'obtenir des produits conformes (teneurs en CLD < LMR) pour l'alimentation humaine. La finalité des approches socio-économiques consiste à évaluer l'acceptabilité des solutions proposées et leur efficacité économique, dans une optique de résilience des systèmes de production animale. Ces approches qui viennent de débiter en 2018 ne sont pas présentées dans ce document.

Stratégies visant à réduire l'exposition des animaux d'élevage

Il est acquis que la chlordécone issue d'un sol contaminé (nitisol ou andosol) n'est pas retenue par les fractions organiques ou minérales du sol lors des processus digestifs. Ainsi, les travaux de Bouveret et al. (2013) et de Jurjanz et al. (2014) ont montré que la CLD du sol est totalement libérée dans la lumière intestinale et assimilable aussi bien par les ruminants que par l'espèce porcine. 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. Plusieurs études (Fries et al., 1982 ; Healy, 1968 ; Jurjanz et al., 2012) ont mis en évidence l'effet du chargement au pâturage sur l'ingestion de sol : d'autant plus faible est l'offre fourragère, d'autant plus élevée est la proportion de sol dans l'ingéré total. Ainsi, une offre fourragère limitée oblige les animaux à brouter de plus en plus près du sol, et augmente le risque d'ingestion de sol de surface ou d'herbe souillée. Néanmoins cette généralité se décline assez différemment d'un système d'élevage à un autre ce qui rend difficile une extrapolation des systèmes de pâturage en conditions tempérées au système antillais au piquet. Une série d'expérimentations a été mise en place pour évaluer l'ingestion de sol par des bovins créoles au piquet disposant d'une large gamme d'offres fourragères. Il convient aussi de rappeler que les conditions antillaises sont caractérisées par des variations importantes de l'humidité du sol. Cette humidité à la surface du sol pâturé détermine l'ampleur des conséquences du piétinement de l'animal et du glissement de la chaîne d'attache sur la salissure de l'herbe.

La détermination de l'ingestion de sol au pâturage fait appel à des méthodologies complexes qui reposent sur la détermination de l'ingestion totale de matière sèche quotidienne, la connaissance de l'ingestion de matière organique, sa digestibilité ainsi que l'usage de marqueurs indigestibles adéquats afin de pouvoir distinguer les apports de sol des apports de végétaux ingérés (Jurjanz et al, 2012). Afin d'être appliquées au contexte antillais, il a été nécessaire d'adapter les approches méthodologiques utilisées en métropole. Dans les expérimentations menées *in situ* chez le bovin en 2016 et 2017 le titane s'est révélé pertinent comme marqueur de l'ingestion de sol en conditions antillaises. Les premiers résultats ont confirmé l'hypothèse selon laquelle les pratiques d'élevage au piquet conduisent à des ingestions quotidiennes de sol significatives : lorsque l'offre fourragère était limitée, les ingestions de sol représentaient 10% de la matière sèche totale ingérée, soit 100 g de sol pour 100 kg de poids vif. Une relation inverse a été établie entre l'offre fourragère et l'ingestion de sol. De manière concrète il s'agira de proposer des pratiques d'élevage qui ne limitent pas l'offre fourragère : ainsi lorsque l'offre fourragère est abondante, l'ingestion de sol représentait moins environ 2% de la matière sèche ingérée quotidiennement (Collas et al, en préparation). Ces études menées chez l'espèce bovine devront être étendues aux petits ruminants et chez l'espèce porcine.

Ainsi, dans les zones contaminées, une première recommandation consiste à éviter de conditions de restriction significative de l'offre fourragère afin de réduire les risques liés à l'ingestion de sol contaminé. En effet, la CLD issue de l'ingestion involontaire de sol contaminé se retrouvera inévitablement dans l'organisme animal et le contaminera.

Une approche complémentaire visant à séquestrer la chlordécone dans la lumière intestinale durant les processus digestifs a également été envisagée. L'étude a consisté à compléter un aliment concentré avec des charbons actifs (CA) commerciaux (Yehya, 2017), et de l'administrer parallèlement à un aliment contenant du sol contaminé. L'hypothèse scientifique était basée sur une possible séquestration de la CLD par les CA dans la lumière intestinale, empêchant ainsi son absorption. Les premiers résultats ont montré l'absence d'effet de cette administration sur l'absorption de la chlordécone. Ceci pourrait être expliqué par la durée relativement courte du transit digestif, limitant le temps de contact de la chlordécone libérée avec le CA, et donc sa séquestration.

Stratégies visant à décontamination 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 CLD 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 de CLD dans le foie était en moyenne 4 fois plus élevées que celles du TAPR et 8 fois plus que celles dans la hampe (Lastel, 2015) ce qui témoigne de la forte affinité de ce polluant dans cet organe. Les TAPR étaient en moyenne 2 fois plus concentrés en CLD que le muscle. Une forte corrélation a été établie entre les tissus « foie », « muscle » et « TAPR » (R^2 entre 0,7-0,9). Les corrélations entre les concentrations sanguines et celles dans les autres tissus ont été sensiblement moins bonnes (R^2 entre 0,4 - 0,7). Cependant il est clairement ressorti des calculs de corrélations qu'une concentration sérique de CLD inférieure à 15 ng.g^{-1} était synonyme de concentrations inférieures à la LMR dans le TAPR. Par ailleurs, ces résultats ont mis en évidence un besoin urgent de définir les paramètres toxicocinétiques de la CLD chez les animaux d'élevage afin de préciser le devenir de la CLD dans l'organisme et d'envisager des stratégies de décontamination adéquates. Cette étude a depuis été complétée à la demande de la DGAL par l'étude Triplet (Anses, triplet, 2017). Une forte corrélation a également été établie entre les tissus « foie », « muscle » et « TAPR » (R^2 entre 0,90 et 0,94). Les corrélations entre les 3 différents tissus confirment globalement celles établies lors de l'étude précédente (Lastel, 2015). Les données pour établir d'éventuelles corrélations entre les concentrations sanguines et celles dans les autres tissus sont, elles, en cours d'exploitation.

Des études de toxicocinétique aux stratégies de décontamination

Des travaux récents issus du programme INSSICCA (Lastel et al., 2016, Fournier et al. 2017) ont permis de caractériser le devenir de la molécule dans l'organisme des ruminants. Dès lors que l'animal est retiré d'une parcelle contaminée, les demi-vies de la CLD dans l'organisme sont relativement courtes (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. Il faut rappeler que l'application d'une période de décontamination de 3,3 fois le temps de demi-vie permet d'éliminer 90% de la charge contaminante de l'organisme des animaux. La construction d'abaque et d'équations par espèce est en cours et elle permettra de déterminer les temps de décontamination nécessaires en fonction de la concentration sanguine initiale et de la valeur finale visée. Pour l'espèce bovine, les tests de validation sont envisagés pour 2018. Un groupe de bovins présentant des concentrations sanguines de CLD supérieures à 15 ng.g^{-1} de sérums sont extraits de parcelles contaminées pour une période qui sera fonction de la teneur sanguine initiale et des temps de demi-vies chez le bovin. A l'abattage, les niveaux de CLD seront déterminés dans les différentes matrices d'intérêt et permettront de démontrer la pertinence du modèle.

Les travaux en cours ne concernent pas uniquement la chlordécone mais également ses métabolites. Un développement analytique vient d'être réalisé par l'Anses en vue de quantifier simultanément la CLD et le chlordécol (CLDOH) sous leurs formes libres et conjuguées. Les méthodes ont été validées sur trois matrices animales (foies, fèces et urines). L'analyse s'est effectuée par chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse en tandem (LC-MS/MS) et l'extraction par des méthodes de type QuEChERS. (Quick, Easy, Cheap, Efficient, Rugged and Safe) (Saint Hilaire et al., 2018). Ces approches analytiques sont pleinement intégrées aux études visant à mieux comprendre les mécanismes de détoxification de la CLD chez les animaux de rente.

Les stratégies de décontamination évoquées ci-dessous 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 des parcelles non contaminées ou des parcelles où la CLD n'est plus accessible, car séquestrée.

Stratégies visant à séquestrer durablement la CLD dans les parcelles contaminées

L'objectif global est d'évaluer l'efficacité de stratégies de séquestration de la CLD dans des sols contaminés par l'usage de charbons actifs (matériaux ayant subi une pyrolyse et un traitement d'activation) ou de biochars (matériaux ayant subi une pyrolyse uniquement). Pour répondre à cet objectif plusieurs verrous ont été levés. Tout d'abord il était nécessaire d'obtenir un panel de biochars et de charbons actifs aux caractéristiques variées. Un panel de matrices carbonées a été construit en faisant varier la nature des précurseurs (noix de coco, sargasses, chêne), et les techniques d'activation (H_3PO_4 , CO_2 , H_2O). Cette étape de production a permis d'obtenir des charbons actifs et biochars possédant des propriétés physiques diverses. Ce traitement d'activation permet d'améliorer le réseau poreux déjà amorcé durant la pyrolyse, mais également d'en améliorer les qualités (taille de pores).

Pour tester l'effet de séquestration de chaque matrice, des sols artificiels ont été fabriqués conformément au protocole défini par l'OCDE (OECD, 1984). L'ensemble de ces sols ont été contaminés à hauteur de $5\mu g$ de CLD par g de sol sec. Cette concentration a été choisie pour représenter le niveau d'un sol hautement contaminé dans le contexte antillais. Sept sols contenant de la tourbe ont été amendés par 5% (masse sèche) de biochars et charbons actifs, 1 sol contenant de la tourbe n'a pas été amendé. Aucune différence significative n'a pu être mise en évidence entre les 3 sols amendés par les biochars produits à $700^\circ C$ et les sols dépourvus d'amendement (Yehya et al., 2018). Les sols amendés avec chaque charbon actif présentent, quant à eux, des niveaux de bioaccessibilité bien plus faibles (0 à 30% de bioaccessibilité). Les charbons actifs de chêne et de noix de coco, activés à l'acide phosphorique, représentent à ce jour les meilleurs candidats pour la séquestration de la CLD (Delannoy et al., 2018). Les premières approches *in vivo* ont permis de conforter les résultats de bioaccessibilité. Ainsi, des essais réalisés chez de jeunes ruminants ont montré qu'il est possible de séquestrer fortement la CLD avec des matrices hautement carbonées. Ces essais ont été réalisés dans des conditions optimales de séquestration, notamment en utilisant des sols artificiels, et doivent donc être confirmés (Yehya et al., 2017).

Au regard des coûts 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 de la CLD 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. Enfin, les stratégies de séquestration de la CLD dans les sols antillais par des CA sont prometteuses mais du fait des coûts de production des CA ne pourront être appliquées que sur des parcelles choisies et de taille raisonnable.

Un site internet dédié au programme de recherche INSSICCA a été également développé (INSSICCA.fr). Cet outil de communication a pour objectifs (i) de capitaliser les résultats scientifiques obtenus par les partenaires INSSICCA et (ii) d'informer les acteurs professionnels ainsi que les consommateurs en termes de vulgarisation des résultats.

Références bibliographiques

Bouveret C., Rychen G., Lerch S., Jondreville C., Feidt C., 2013. Relative bioavailability of tropical volcanic soil-bound Chlordecone in piglets. *J. Agric. Food Chem.*, 61 (38), 9269-9274.

Delannoy M., Yehya S., Techer D., Razafitianamaharavo A., Richard A., Caria G., Baroudi M., Montargès-Pelletier E., Rychen G., Feidt C., 2018. Amendment of soil by biochars and activated carbons to reduce chlordecone bioavailability in piglets, *Chemosphere* (*in press*)

Fournier A., Feidt C., Lastel M.-L., Archimède H., Thome J.-P., Mahieu M., Rychen G., 2017. Toxicokinetics of chlordecone in goats: Implications for risk management in French West Indies. *Chemosphere*, 171, 564-570.

Fries G. F., Marrow G. S., Snow P. A., 1982. Soil ingestion by dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 65 (4), 611-618.

Healy W. B., 1968. Ingestion of soil by dairy cows. *N. Z. J. Agric. Res.*, 11, 487-499.

Jurjanz S., Feidt C., Pérez-Prieto L. A., Ribeiro Filho H. M. N., Rychen G., Delagarde R., 2012. Soil intake of lactating dairy cows in intensive strip grazing systems. *Animal*, 6, 1350-1359.

Jurjanz S., Jondreville C., Mahieu M., Fournier A., Archimède H., Rychen G., Feidt C., 2014. Relative bioavailability of soil-bound chlordecone in growing lambs. *Environ. Geochem. Health*, 36, 911-917.

Jurjanz, S., Collas, C., Lastel, M.-L., Godard, X., Archimède, H., Rychen, G., Mahieu, M., Feidt, C., 2017. Evaluation of soil intake by growing Creole young bulls in common grazing systems in humid tropical conditions. *Animal*, 11 (8), 1363-1371.

Lastel, M.-L., 2015. Chlordécone et filières animales antillaises – De la distribution tissulaire aux stratégies de décontamination chez les ruminants. Thèse de Doctorat, Université de Lorraine.

Lastel, M.-L., Lerch, S., Fournier, A., Jurjanz, S., Mahieu, M., Archimède, H., Feidt, C., Rychen, G., 2016. Chlordecone disappearance in tissues of growing goats after a one month decontamination period - effect of body fatness on chlordecone retention. *Environmental Science and Pollution Research*, 23 (4), 3176-3183.

Rapport ANSES 2017. Exposition des consommateurs des Antilles au chlordécone, résultats de l'étude Kannari.

Rapport ANSES 2017. Rapport de synthèse PBM / 2017 / 03 : « Recherche de chlordécone dans la graisse périrénale, le foie et le muscle de bovins en Martinique et Guadeloupe (triplet) ». Laboratoire de sécurité des aliments, ANSES.

Saint-Hilaire, M., Inthavong, C., Bertin, T., Lavison-Bompard, G., Guérin, T., Fournier, A., Feidt, C., Rychen, G., Parinet, J., 2018. Development and validation of an HPLC-MS/MS method with QuEChERS extraction using isotopic dilution to simultaneously analyze chlordecone and chlordecol in animal livers *Food Chemistry*, 252 (-), 147-153.

Yehya S, 2017. Modulation de l'absorption intestinale de la chlordécone (CLD) par l'utilisation de substances séquestrantes. Application à l'élevage en zones contaminées. Thèse de Doctorat, Université de Lorraine.

Yehya, S., Bakkour, H., Eter, D., Baroudi, M., Feidt, C., 2017. Adsorption isotherm and kinetic modeling of chlordecone on activated carbon derived from dates stones. *Journal of Applied Sciences Research*, 13 (2), 20-28.

Yehya, S., Delannoy, M., Fournier, A., Baroudi, M., Rychen, G., Feidt, C., 2017. Activated carbon, a useful medium to bind chlordecone in soil and limit its transfer to growing goat kids. PLOS ONE, 12 (7), e0179548.

Sécuriser les systèmes de production végétale dans les territoires contaminés par la chlordécone

Contexte :

Les mécanismes de transfert chez les végétaux

La concentration dans les différents organes et les différents types de plantes cultivées 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 polluant vers les autres compartiments environnementaux, il se comporte comme réservoir de pollution.

Deux voies de transfert co-existent : le contact direct des plantes avec le sol, le **transfert via la solution du sol et les flux hydriques au sein de la plante**. Le type de sol explique aussi en partie la variabilité des résultats de transfert observés chez les plantes (Clostre et al, 2014) : un transfert plus faible est observé pour l'andosol. Un andosol est en général plus pollué qu'un nitisol, mais est également « moins contaminant » pour les plantes et le milieu.

Selon les espèces, le niveau de contamination des organes de la plante, et donc de contribution à l'exposition des populations consommatrices, diffèrent. Les organes les plus contaminés sont les organes souterrains (Cabidoche et Lesueur Jannoyer, 2012 ; Clostre et al, 2015) 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)(Clostre et al, 2017). Les cucurbitacées ont une réponse marquée, avec des niveaux de contamination bien moindres mais au-delà de la Limite Maximale de Résidus autorisée (20µg/kg MF). Cette famille est connue pour la production d'exsudats racinaires favorisant le transfert de polluants et par une contribution significative des flux xylémiques au remplissage du fruit. Les taux de transfert varient également d'une espèce à l'autre : le concombre et le giraumon (*Cucurbita maxima*), qui sont également des contributeurs majeurs de l'exposition, sont plus fortement contaminés alors que le fruit de la christophine (*Sechium edulis*) est indemne de pollution (Clostre et al, 2014).

Un gradient de contamination est mesuré le long de la tige et du circuit de sève brute, qui confirme le transport passif et la fixation préférentielle de la molécule sur des tissus pour lesquels elle a une plus forte affinité. Nous avons trouvé une corrélation positive entre teneur en chlordécone (molécule hydrophobe) et teneur en lipides ou en fibres (Clostre et al, 2014), cette corrélation n'est pas vérifiée pour la subérine et la cutine. Ainsi, le bas des tiges est plus pollué que le haut des tiges. Un modèle écophysiologique global de type « bigleaf » pour calculer le transfert et l'accumulation de la chlordécone dans la plante (couplage du module de biodisponibilité de la chlordécone dans le sol, Cabidoche et Lesueur Jannoyer, 2012 et du module Probe de bilan hydrique, Chopard et al, 2007 ; Lebourgeois et al 2010) a été construit à l'échelle de la parcelle en collaboration avec JL Chopard (Cirad, UPR Aida) dans le cadre du projet Cannelec/Rebeca. Les simulations du modèle sont en accord avec un transfert passif de la chlordécone via la solution du sol, les flux de sève xylémiques et la transpiration du couvert végétal.

Des familles de plantes sont peu concernées par la pollution par la chlordécone (organes très faiblement contaminés ou indemnes) et ne contribuent pas à l'exposition des populations : les solanacées, les fruits issus d'arbre, 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 culturaux 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.

Nous avons élaboré un schéma conceptuel du transfert de la chlordécone au sein de la plante (ANR Chlordexco; 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). La 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 une diffusion apoplasmique, et très largement adsorbée sur les parois cellulaires des vaisseaux du xylème et au sein des tissus fibreux rencontrés. La 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.

Les stratégies de gestion du risque de contamination des végétaux

Des solutions existent pour assurer la sécurité sanitaire des productions végétales :

- **Un outil de choix des cultures en situation de sol pollué**

La relation de proportionnalité existant entre teneur en chlordécone du sol et teneur en chlordécone des organes commercialisés et la définition d'une Limite Maximale de Résidus autorisée dans les aliments (LMR fixée à 20µg/kg MF) nous a permis de traduire cette LMR en Limite maximale sol (LMsol) pour chacune des familles de comportements de plantes. Nous avons classés les cultures en 3 grands types de comportement vis-à-vis de la sensibilité au transfert de chlordécone : les productions sensibles (racines et tubercule), les productions moyennement sensibles (cucurbitacées, laitues, cives) et les productions peu sensibles (ananas, bananes, fruitiers, chou, christophines, ...). Des taux de transferts différents et des types de sols variables, nous ont conduits à proposer des LMsol simples (la LMsol minimale pour chacun des types) dans un contexte de réduction du risque sanitaire pour les populations (Clostre et al, 2017).

Cette traduction de la LMR en LMsol permet pour le producteur d'anticiper le risque de non-conformité de ses produits dès la plantation (et non plus de subir le contrôle à la récolte): il choisit alors ses productions végétales en fonction du niveau moyen de pollution de sa parcelle (Lesueur Jannoyer et al, 2012). Selon ce niveau, il substitue certaines productions non sensibles aux productions sensibles.

Les filières vivrières ne sont pas recommandées sur des parcelles polluées, car le risque de non-conformité lors de la commercialisation est très élevé. Ce changement de localisation des productions dans l'exploitation, ou pour la filière, n'a cependant pas affecté de manière significative leur durabilité ou leur reconversion (Lesueur Jannoyer et al, 2016). En effet, une enquête structurée a montré que la réglementation liée à la chlordécone n'arrive qu'en 5^e position dans les facteurs ayant engendré des changements au sein de l'exploitation, derrière le foncier, la maîtrise des ravageurs et maladies, la structuration de la filière et la disponibilité en main d'œuvre.

Peu de producteurs vivriers sont spécialisés et aucune disparition d'exploitation n'a été constatée du seul fait de la chlordécone. Ces producteurs, majoritairement diversifiés donc, maîtrisent d'autres cultures et ont pu se reconvertir et/ou relocaliser leurs productions sensibles au transfert de chlordécone sur leurs parcelles non polluées.

- **Des pratiques agronomiques réduisant les transferts sol/plante**

Les techniques de remédiation n'étant toujours pas opérationnelles à ce jour, et du fait des propriétés physico-chimiques des sols, nous avons testé la séquestration de la molécule dans le sol. L'objectif est d'utiliser les propriétés des argiles du sol, en particulier celle des allophanes des andosols, et les interactions entre molécule, sol et matières organiques.

L'ajout de matière organique mûrée réduit le transfert de chlordecone vers la solution du sol (Woigier et al, 2012) et les plantes (Clostre et al, 2014; Mouvet et al, 2016). Ce résultat est expliqué à la fois par des mécanismes physiques et chimiques. La matière organique modifie la structure et les propriétés physiques des andosols : l'ajout de matières organiques entraîne l'effondrement de la structure fractale des allophanes et la fermeture de la porosité des sols ce qui a pour conséquence de piéger la molécule dans les plus petites dimensions du sol. Pour les sols contenant des phyllosilicates, la molécule est retenue sur la matière organique (Woignier et al, 2013). Cette pratique d'ajout de matières organiques est plus efficace pour les cultures à cycle court (radis, concombre) avec un taux de transfert sol/plante 4 fois moins élevé pour le radis et 3 fois moins élevé pour le concombre. L'effet est moindre pour la patate douce, avec une variabilité observée plus importante (Gaude et Lesueur Jannoyer, 2014). L'apport de matières organiques est à privilégier pour des cultures maraîchères.

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 dynamique de séquestration doit faire l'objet d'essais complémentaires.

- **Des pratiques des consommateurs pour réduire leur exposition**

Des différences de niveau de contamination ont également été mises en évidence entre la pulpe et la peau des racines et tubercules et des fruits de cucurbitacées (Clostre et al, 2014) : la peau est généralement plus contaminée, car en contact direct avec le sol pollué. Ce qui nous a conduits à prodiguer des recommandations, dans le cadre du programme Jardins Familiaux (2009-2012), d'un lavage soigneux et d'un épluchage généreux lors des préparations alimentaires de ces productions, alors que la cuisson ne modifie pas la teneur en chlordécone de l'aliment.

Les résultats sur la conformité des produits végétaux commercialisés:

Aujourd'hui, les productions végétales des circuits conventionnels sont conformes à la réglementation, et ce depuis 2009 en Martinique. Cependant, l'étude Kannari de l'ANSES (2017) met en évidence des teneurs au-delà des LMR pour les produits issus de circuits informels, en particulier les ventes bord de route en zone contaminée. Les valeurs les plus élevées concernent essentiellement les légumes aériens et les racines et tubercules (3% en Martinique, 7 à 18% en Guadeloupe).

Références bibliographiques

- Cabidoche YM, Lesueur Jannoyer M, 2012**, Contamination of Harvested Organs in Root Crops Grown on Chlordecone-Polluted Soils *Pedosphere* 22(4): 562–571 (IF=1.16)
- Cabidoche YM, Lesueur Jannoyer M., 2011**, Pollution durable des sols par la chlordécone aux Antilles : comment la gérer ? *Innovations Agronomiques*, vol 16, 117-133
- Clostre, F., Letourmy P, Lesueur-Jannoyer M., 2017**. Soil thresholds and decision tool to manage food safety of crops grown in chlordecone polluted soil. *Environmental Pollution*, doi : 10.1016/j.envpol.2017.01.032
- Clostre F, Lesueur Jannoyer M, Gaudé JM, Carles C, Meylan L, Letourmy P.** 2016. Chlordecone contamination at the farm scale: management tools for cropping system and impact on farm sustainability. In : *LesueurJannoyerMagalie (ed.), Cattan Philippe (ed.), Woignier Thierry (ed.), Clostre Florence (ed.). Crisis Management of Chronic Pollution: Contaminated Soil and Human Health*. Boca Raton : CRC Press, Urbanization, Industrialization and the Environment Series, Chap 17: 239-247
- Clostre Lesueur Jannoyer M, Gaudé JM, Carles C, Cattan P, Letourmy P.** 2016. From soil to plants: crop contamination by chlordecone In : *LesueurJannoyerMagalie (ed.), Cattan Philippe (ed.), Woignier Thierry (ed.), Clostre Florence (ed.). Crisis Management of Chronic Pollution: Contaminated Soil and Human Health*. Boca Raton : CRC Press, Urbanization, Industrialization and the Environment Series, Chap10: 131-142
- Clostre, F., Letourmy P, Lesueur-Jannoyer M, 2015**. Organochlorine (chlordecone) uptake by root vegetables. *Chemosphere* 118, 96-102 (IF= 3.5)
- Clostre, F., Cattan, P. ; Gaudé J.M.; Carles C., Letourmy, P. and LesueurJannoyer M.** 2015 Comparative fate of an organochlorine, chlordecone, and a related compound, chlordecone-5b-hydro, in soils and plants. *Science of the Total Environment* 532: 292-300. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.026>
- Clostre, F., Woignier, T., Rangon, L., Fernandes P., Soler A. and Lesueur-Jannoyer, M.** 2014. Field validation of chlordecone soil sequestration by organic matter addition. *J Soils Sediments* 14 (1) : 23–33. (IF= 2.11)
DOI 10.1007/s11368-013-0790-3
- Clostre F., Letourmy P., Turpin B., Carles C., Lesueur Jannoyer M.** 2014. Soil type and growing conditions influence uptake and translocation of organochlorine (chlordecone) by cucurbitaceae species. *Water, Air and Soil Pollution*, 225 (ID 2153) : 11 p. (IF= 1.68)
- Clostre, F., Letourmy, P., Thuriès, L. and LesueurJannoyer, M.** 2014. Effect of home food processing on chlordecone (organochlorine) content in vegetables. *Sci. of the Total Env.* 490 : 1044-1050. (IF= 3.16) DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.05.082
- Clostre F., Lesueur Jannoyer M., Achard R., Letourmy P., Cabidoche Y.M., Cattan P.** 2014. Decision support tool for soil sampling of heterogeneous pesticide (chlordecone) pollution. *Environmental Science and Pollution Research*, 21 (3) : 1980-1992. (IF = 2.76)
DOI : 10.1007/s11356-013-2095-x
- Lesueur Jannoyer M, Cattan P, Woignier T, F Clostre.** 2016 *Crisis Management of Chronic Pollution: Contaminated Soil and Human Health* (K26557) CRC Press. 290p. ISBN 9781498737838 <https://www.crcpress.com/Crisis-Management-of-Chronic-Pollution-Contaminated-Soil-and-Human-Health/Jannoyer-Cattan-Woignier-Clostre/p/book/9781498737838>
- Lesueur Jannoyer M., Cattan P., Monti D., Saison C., Voltz M., Woignier T., Cabidoche Y.M., 2012**. Chlordécone aux Antilles : évolution des systèmes de culture et leur incidence sur la dispersion de la pollution. *Agronomie, Environnement et Société*, vol 2 (n°1), 45-58
- Mottes C., Lesueur Jannoyer M., Le Bail M., Malézieux E.** 2014. Pesticide transfer models in crop and watershed systems: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34 (1) : 229-250. (IF= 2.84)
DOI : 10.1007/s13593-013-0176-3
- Woignier T., Clostre F., Fernandes P., Rangon L., Soler A., LesueurJannoyer M.** 2016. Compost addition reduces porosity and chlordecone transfer in soil microstructure. *Environmental Science and Pollution Research*, 23 (1) : p. 98-108. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-015-5111-5>
- Woignier T, Clostre F, Fernandes P, Soler A, Rangon L, Lesueur Jannoyer M,** 2016. Reduced pesticide bioavailability in soil by organic amendement. In : *LesueurJannoyerMagalie (ed.), Cattan Philippe (ed.), Woignier Thierry (ed.), Clostre Florence (ed.). Crisis Management of Chronic Pollution: Contaminated Soil and Human Health*. Boca Raton : CRC Press, Urbanization, Industrialization and the Environment Series, Chap15: 211-222.
- Woignier T, Clostre C, Cattan P, Levillain J, Cabidoche YM, Lesueur-Jannoyer M.** 2014. Diagnosis and Management of Field Pollution in the Case of an Organochlorine Pesticide, the Chlordecone. In *Tech Environmental Risk Assessment of Soil Contamination* chap21: 615-636. <http://dx.doi.org/10.5772/57263>
- Woignier T, Fernandes P, Soler A, Clostre F, Carles C, Rangon L, LesueurJannoyer M.** 2013 Soil microstructure and organic matter: Keys for chlordecone sequestration. *Journal of Hazardous Material*. 262: 357-364 (IF= 4.33)
- Woignier T., Clostre F., Macarie H., Jannoyer M., 2012**, Chlordecone retention in the fractal structure of volcanic clay, *Journal of Hazardous Materials*, 241-242: 224-230, DOI : 10.1016/j.jhazmat.2012.09.034, (IF= 4.33)
- Woignier T., Fernandes P., Jannoyer-Lesueur M., Soler A., 2012**, Sequestration of chlordecone in the porous structure of an andosol and effects of added organic matter: an alternative to decontamination, *European journal of soil science*, 63 (5), 717-723, DOI : 10.1111/j.1365-2389.2012.01471.x, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.2012.01471.x>, (IF= 2.65)

Woignier T, Soler A, Fernandes P, Lesueur Jannoyer M. 2012. Chlordecone sequestration: an alternative way to soil decontamination. *European Journal of Soil Science*, October 2012, (63):717-723 [doi: 10.1111/j.1365-2389.2012.01471.X] (IF 2,34)