



ACTES DU COLLOQUE CHLORDÉCONE, CONNAÎTRE POUR AGIR

ORGANISÉ PAR
LE CPSN ET LA CLORECA



AVEC LE SOUTIEN DE :



PRÉFET
DE LA RÉGION
GUADELOUPE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

➤ **Actes du colloque scientifique « Chlordécone, connaître pour agir »**

Recueil des résumés des communications présentées lors du colloque « Chlordécone, connaître pour agir » qui s'est tenu du 12 au 14 décembre 2022 au Gosier (Guadeloupe).

Pour citer ce document :

CPSN, CLoReCA, 2022. Actes du colloque scientifique « Chlordécone, connaître pour agir ». Le Gosier, Guadeloupe, 12-14 décembre 2022.

Mots-clés :

One Health ; Exposition ; Approche analytique ; Toxicité et écotoxicité ; Modélisation ; Sécurité des aliments ; Impacts en santé ; Sciences humaines et sociales ; Impacts sociétaux ; Représentation ; Processus participatifs ; Durabilité ; Remédiation ; Résilience des systèmes ; Impacts environnementaux ; Dynamique spatio-temporelle ; Gestion du bien commun.

En complément, sont également accessibles sur le site <https://www.chlordecone-infos.fr/> certains des exposés et des posters (.pdf) et les liens pour l'accès aux vidéos.



Sommaire

Préambule - contexte, objectifs et temps forts du colloque « Chlordécone, connaître pour agir »	7
Comité scientifique et comité local d'organisation	9
PARTIE 1 : CONFÉRENCES ET COMMUNICATIONS ORALES	10
CONFERENCE INTRODUCTIVE – L'APPROCHE ONE HEALTH : UNE APPROCHE INDISPENSABLE POUR ABORDER LES PROBLÉMATIQUES DE SANTÉ (G. Bornette).....	11
SESSION 1 : LES APPORTS DE LA RECHERCHE POUR CARACTÉRISER, MESURER ET RÉDUIRE L'EXPOSITION	13
CONFERENCE INTRODUCTIVE – CHLORDÉCONE : QUELS OUTILS ANALYTIQUES POUR UNE BONNE CARACTÉRISATION DE L'OCCURRENCE ET DU DEVENIR ? (H. Budzinski).....	13
DynPestSols : un modèle pour représenter les pressions agricoles dues aux pesticides sur le long terme à l'échelle des territoires (V. Dufleit et al.).....	14
Protocoles d'analyse pour le suivi des produits de transformation de la chlordécone dans des matrices environnementales et animales (D. Martin et al.).....	16
La chlordécone sous forme C ₁₀ Cl ₁₀ O existe-t-elle vraiment ? (P.L. Saaidi et al.).....	18
Reconnaissance spécifique et détection de la chlordécone par des hémicryptophanes dans l'eau (O. Della-Negra et al.).....	20
Pollution à long terme par la chlordécone des sols volcaniques tropicaux des Antilles françaises : nouvelles connaissances et réévaluation des prédictions (L.T. Pak et al.).....	22
Séquestration de la chlordécone par des biochars : une alternative à la décontamination (T. Woignier et al.)	24
OPALE : un Observatoire des Pollutions Agricoles aux Antilles le long du continuum terre-mer (A.L. Tailame, A. Richard, L.T. Pak et al.)	26
Les eaux souterraines, un vecteur invisible et pourtant essentiel pour comprendre l'exposition humaine et des écosystèmes à la chlordécone (J.B. Charlier et al.)	28
Utilisation des macroalgues du genre <i>Dictyota</i> comme espèces sentinelles de la contamination par la chlordécone (C.R. Dromard et al.).....	30
Exposition prénatale <i>in utero</i> au chlordécone et hormones thyroïdiennes, métaboliques et sexuelles stéroïdiennes à l'âge de sept ans : une étude de la cohorte mère-enfant TIMOUN (G. Ayhan et al.)	32
Exposition au chlordécone et mortalité par cause dans une cohorte de travailleurs d'exploitations bananières (J. Gambaretti et al.)	34
Exposition au chlordécone et hépatite chronique active d'origine alcoolique : un exemple de causalité inversée (M. Gelu-Siméon et al.).....	36
Réévaluation des risques sanitaires prenant en compte la mise à jour des valeurs sanitaires de référence (externe et interne) du chlordécone (J. Jean et al.).....	38
SESSION 2 : LES APPORTS DES SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES POUR LA CO-CONSTRUCTION DE DISPOSITIFS D'ACTION PUBLIQUE ET LEUR MISE EN ŒUVRE	41
CONFERENCE INTRODUCTIVE – PESTICIDES, SANTÉ ET ACTION PUBLIQUE AU PRISME DES SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES (N. Jas)	41

Comment la recherche scientifique a contribué à la gestion de la crise chlordécone aux Antilles de 2000 à 2020 et pour quels impacts ? (A. Tonoian et al.)	42
Légitimité et reconnaissance médiatique de la parole et des savoirs expérientiels sur la chlordécone (S. Labelle et C. Paganelli).....	44
Les lumières, les ombres et les absences de la constitution du chlordécone aux Antilles en problème public (1972-2022) (M. Ferdinand).....	46
Elaboration de messages de prévention sur le sujet chlordécone : mise en œuvre d'une démarche participative (L. Noiro et al.).....	48
La réparation de l'impact du chlordécone à l'aune de la responsabilité envers les générations futures (B. Facorat-Gaspard)	50
SESSION 3 : LES APPORTS DE LA RECHERCHE POUR CONTRIBUER À LA DURABILITÉ DES FILIÈRES ET DES TERRITOIRES.....	52
CONFERENCE INTRODUCTIVE –UNIFIER LA DIVERSITÉ DES PORTEURS D'ENJEUX VERS DES SOLUTIONS COMMUNES : LA SCIENCE DE LA DURABILITÉ AU SERVICE DE L'ACTION (J.L. Chotte)	52
Quantification des sources d'érosion dans un bassin versant antillais (bassin du Galion, Martinique, France) et lien avec les transferts de chlordécone associés (R. Bizeul et al.)	54
Sécuriser les filières de production face à la contamination des sols : développement de stratégies de séquestration adaptées au contexte Antillais (M. Delannoy et al.).....	56
La méthanisation thermophile permet de dégrader la chlordécone (P. Alnajjar et al.)	58
Pollution du sol, contamination animale et production de ressources alimentaires saines (P. Andres-Domenech et al.).....	60
Evaluation des conditions d'efficacité du programme « Jardins familiaux » (EVAJafa) (O. Aromatario et al.)	62
Validation <i>in situ</i> d'un Outil d'Aide à la Décision pour la maîtrise de la teneur en chlordécone des carcasses bovines issues de zones contaminées (C. Feidt et al.).....	64
CONFERENCE HISTORIQUE –_WORKER HEALTH AND THE KEPONE DISASTER IN VIRGINIA, USA (G. Wilson)	66
PARTIE 2 : COMMUNICATIONS AFFICHÉES.....	68
Dynamique de la chlordécone dans le profil du sol. Conséquences sur la gestion du risque d'exposition (A. Richard et J. Sierra).....	69
Mise en évidence de l'impact des traitements thermiques sur les teneurs en Chlordécone contenues dans les aliments et les sols (D. Martin et al.).....	71
L'ingestion de sol, un déterminant clé de l'exposition au chlordécone des porcs élevés en plein air aux Antilles (C. Collas et al.)	72
Modélisation toxicocinétique de la chlordécone basée sur la physiologie chez la poule pondeuse (J. Thiebaut et al.)	74
Modélisation PBPK du transfert de la chlordécone chez le ruminant adulte (A. Fournier et al.)	76
Modélisation toxicocinétique générique de la chlordécone chez les animaux d'élevage basée sur la physiologie (J. Thiebaut et al.)	78

Mise en place d'un outil analytique en Guadeloupe pour le dosage de la chlordécone dans le sérum humain (M. Saint-Hilaire et al.).....	80
Sécuriser l'élevage de poule pondeuse sur sol contaminé par des organochlorés : évaluation de stratégies d'amendement par du biochar et charbon actif (C. Feidt et al.).....	82
Impact de la taille des particules de biochar de Sargasse sur le potentiel de séquestration de la Chlordécone chez des sols Antillais (P. Stephan et al.).....	84
Impact du taux d'amendement de biochar de Sargasse sur la disponibilité environnementale de la chlordécone, du DDT et de ses métabolites (P. Stephan et al.).....	86
Les voies et dynamiques de contamination de la CLD dans les eaux de surface (A. Samouelian et al.).....	88
Etat de la contamination en chlordécone des milieux aquatiques de Guadeloupe (I. Nasso et al.).....	90
Un bioessai avec l'hydre d'eau douce pour évaluer la toxicité du chlordécone aux concentrations environnementales, seul ou en mélange complexe avec des sous-produits déchlorés : observations expérimentales et modélisation par plan d'expériences (X. Moreau et al.).....	92
Caractérisation physique (granulométrie, nature de la matrice minérale) de la formulation commerciale à 5% de chlordécone utilisée autrefois en bananeraie aux Antilles françaises et connue sous le nom de Curlone®(C. Rébufa et H. Macarie).....	94
Etude chez l'hydre des effets cocktail de concentrations environnementales de deux perturbateurs endocriniens pro-estrogéniques : le Chlordécone et le Propylparabène M. Domallain et al.).....	96
Découverte de différentes espèces bactériennes d'origine antillaise permettant de transformer la chlordécone (S. Chaussonnerie et al.).....	98
Modélisation moléculaire des interactions du HCH et de la chlordécone avec les groupements de surface basiques oxygénés des charbons actifs, en vue de l'optimisation du traitement des eaux contaminées (A. Duro et al.).....	100
Détection et identification de nouveaux produits de transformation de la molécule de chlordécone obtenus par électrolyse (R. Ranguin et al.).....	102
Evaluation de la charge polluante de trois espèces végétales dans une zone humide du Nord Grande - Terre en Guadeloupe : métaux lourds et chlordécone (M. Dulormne et al.).....	104
Effet de la remédiation de trois types de sols chlordéconés avec un charbon actif commercial sur l'absorption du contaminant, la morphologie et la croissance du Madère et du Mangle médaille (M. Dulormne et al.).....	106
ChlorExpo : intégration des habitudes et pratiques alimentaires de la population des Antilles dans l'évaluation de l'exposition alimentaire à la chlordécone (A. Dufour et al.).....	107
Lien entre exposition à la chlordécone et cancer de la prostate dans le contexte des Antilles (ChloECaPA) (S. Angeli-Aguiton et al.).....	109
Le pesticide chlordécone favorise la dégénérescence des neurones dopaminergiques vulnérables dans le Parkinson : évidence expérimentale dans un modèle cellulaire murin et chez le nématode <i>C. elegans</i> (V. Parrales et al.).....	111
Kannari 2, étude de l'imprégnation des populations guadeloupéenne et martiniquaise par la chlordécone et par d'autres polluants environnementaux d'intérêt (F. Assogba et al.).....	113

Caractérisation <i>in vitro</i> de la toxicité et du métabolisme hépatique du chlordécone alcool (chlordécol) sur un modèle cellulaire d'hépatocytes humains HepG2 (H. El Sheikh Saad et al.)	115
Analyse spatiale de l'incidence des cancers et lien avec l'exposition au chlordécone en Guadeloupe (B. Bhakkan et al.).....	117
Myélome multiple et autres lymphomes non hodgkiniens dans les Antilles françaises : rôle de l'exposition au Chlordécone. Etude cas-témoins en Guadeloupe et Martinique (J. Deloumeaux et al.)	119
Déterminants et leviers de la confiance dans les messages de santé publique (C. Delamaire et al.)	121
Etude de la dégradabilité anaérobie de la chlordécone par des cultures mixtes et en parcelles (G. Gruel et al.)	123
Efficacité et innocuité d'une stratégie de séquestration de la chlordécone sur sol Antillais (M. Delannoy et al.).....	125
Des ovins en bananeraies sur sol pollué par la chlordécone : une alternative agroécologique pour contrôler l'enherbement ? (N. Andrieu et al.).....	127
Réduction de l'ingestion de sol des animaux d'élevage pour limiter leur exposition à la chlordécone (S. Jurjanz et al.).....	129
Optimiser la réduction du chlordécone dans les sols des Antilles françaises par la biodégradation couplée à la réduction chimique <i>in situ</i> (J. Hellal et al.)	131
Devenir des hydrochlordécones, du mirex et du chlordécol en condition de (bio)dégradation réductive (O. Della-Negra et al.).....	133
Nanoparticules de fer pour la dépollution des sols contaminés par la chlordécone (M. Gil-Días et al.)	135
PARTIE 3 : TABLE RONDE ET ATELIERS	137
TABLE-RONDE « Enjeux et perspectives de la chlordéconémie ».....	138
LES ATELIERS	140
ATELIER 1 : "Exposome aux Antilles, spécificité versus généricité. Quels besoins de connaissances ? ».....	140
ATELIER 2 : « OPALE : Des bassins pilotes d'expérimentation et d'acquisition de données »	140
ATELIER 3 : « Remédier : pourquoi, quoi, comment ? – les besoins en recherche ».....	140
ATELIER 4 : « Mise à disposition, partage et utilisation des données sur la chlordécone : état des lieux et perspectives prioritaires ».....	141

Préambule - contexte, objectifs et temps forts du colloque « Chlordécone, connaître pour agir »

Les recherches menées sur la chlordécone au cours des vingt dernières années ont permis des avancées dans (i) la mesure et l'évaluation de la pollution par la chlordécone dans différents compartiments environnementaux, (ii) la compréhension des mécanismes de transformation et des voies de transfert de la chlordécone et de ses dérivés y compris le long de la chaîne alimentaire, (iii) l'exploration de différentes stratégies de remédiation des sols et (iv) l'identification des effets de l'exposition à la chlordécone sur la santé humaine.

Le colloque scientifique « Chlordécone, connaître pour agir » s'est tenu du 12 au 14 décembre 2022 en Guadeloupe. Il a été organisé par le **Comité de Pilotage Scientifique National (CPSN) et la Coordination Locale de la Recherche sur la Chlordécone aux Antilles (CLOReCA) du plan chlordécone IV**. L'organisation du colloque a bénéficié du soutien du ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche et des préfectures de Guadeloupe et de Martinique.

Il s'est inscrit dans le cadre des Rencontres chlordécone 2022 qui ont eu lieu du 12 au 16 décembre 2022 en Guadeloupe et Martinique.

Ce colloque scientifique a été l'occasion de :

- faire le point sur les **connaissances**, les **actions** concrètes menées sur le terrain, les **solutions** de gestion de la contamination envisagées et leur **acceptabilité**, et les **recherches encore à mener** ;
- **favoriser les approches transversales** au sein d'une communauté scientifique engagée dans une **approche « one-health »** (approche intégrative, systémique et unifiée de la santé humaine et environnementale) indispensable pour rendre compte des impacts de cette contamination et développer des solutions adaptées aux territoires ;
- présenter les **projets retenus dans le cadre du premier appel à projets de recherche du plan chlordécone IV**, élaboré à partir des priorités de recherche proposées par le CPSN en collaboration avec la CLOReCA, et coordonné par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) en partenariat avec la Région Guadeloupe et la Collectivité Territoriale de Martinique.

Ce colloque a été organisé autour de trois sessions complémentaires :

- **Les apports de la recherche pour caractériser, mesurer et réduire l'exposition** ;
- **Les apports des sciences humaines et sociales pour la co-construction de dispositifs d'action publique et leur mise en œuvre** ;
- **Les apports de la recherche pour contribuer à la durabilité des filières et des territoires.**

L'allocation de bienvenue a été suivie d'une conférence introductive de Gudrun Bornette (CNRS) sur l'approche « One health : une approche indispensable pour aborder les problématiques de santé », en visio conférence.

Chaque session a été introduite par une conférence introductive :

- Session 1 : « Chlordécone : quels outils analytiques pour une bonne caractérisation de l'occurrence et du devenir » - Hélène Budzinski (CNRS)
- Session 2 : « Pesticides, santé et action publique au prisme des sciences humaines et sociales » - Nathalie Jas (INRAE)
- Session 3 : « Unifier la diversité des porteurs d'enjeux vers des solutions communes : la science de la durabilité au service de l'action » - Jean-Luc Chotte (IRD)

D'autres temps forts ont permis de rythmer ce colloque scientifique :

- Une conférence historique « Health and the Kepone Disaster in Virginia », dispensée en visio-conférence par Gregory Wilson, historien américain à l'Université d'Akron ;
- Une table ronde sur la chlordéconémie « Enjeux, limites et perspectives de la chlordéconémie » ;
- Des visites de site : visites de laboratoires (Institut Pasteur de Guadeloupe, Laboratoire COVACHIM), visite chez un agriculteur ayant mis en place des pratiques innovantes (projet territoire durable INRAE/Cirad), visite de l'observation OPALE et visite des bananeraies du Cirad ;
- Des ateliers :
 - Atelier 1 : « Exposome aux Antilles, spécificité versus généricité – Quels besoins de connaissances ? »
 - Atelier 2 : « OPALE : des bassins pilotes d'expérimentation et d'acquisition de données »
 - Atelier 3 : « Remédier : pourquoi, quoi, comment ? – Les besoins en recherche »
 - Atelier 4 : « Mise à disposition, partage et utilisation des données sur la chlordécone : état des lieux et perspectives prioritaires ».

Le colloque « Chlordécone, connaître pour agir » a réuni 236 personnes en présentiel et environ 200 personnes en webinaire. En marge du colloque, des rencontres avec différents publics cibles (grand public, scolaires, professionnels...) ont eu lieu en Guadeloupe et en Martinique la semaine du 12 au 16 décembre 2022. Ces rencontres en marge du colloque ont été pilotées par les préfectures de Guadeloupe et de Martinique, en partenariat avec les agences régionales de santé (ARS) et la ville du Lorrain en Martinique.

Le présent ouvrage présente les résumés des communications présentées lors du colloque « Chlordécone, connaître pour agir ».

Comité scientifique et comité local d'organisation

Comité scientifique (par ordre alphabétique)	
Valérie ANGEON	INRAE (Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)
Magalie BAUDRIMONT	CNRS (Centre national de la recherche scientifique)
Pierre BENOIT	INRAE
Gérard BERNADAC	MSA (Mutualité sociale agricole)
Audrey BRUNEAU	IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER)
Xavier COUMOUL	INSERM
Justin DANIEL	Université des Antilles, Vice-président du CPSN
Jacqueline DELOUMEAUX	CHU (Centre Hospitalier Universitaire) de la Guadeloupe
Jérôme FOUCAUD	INCa (Institut National du Cancer)
Aurore FOURCOT	Chargée de mission CPSN / CLoReCA
Jeanne GARRIC	MESRI (Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation)
Sarra GASPARD	Université des Antilles
Magalie LESUEUR-JANNOYER	Cirad (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement)
Malcom FERDINAND	CNRS
Alain MAURIN	Université des Antilles
Catherine MOUNEYRAC	ANR (Agence Nationale de la Recherche)
Christophe MOUVET	Retraité, membre du CPSN
Guido RYCHEN	Université de lorraine, Président du CPSN
Michel SAMSON	INSERM, Vice-président du CPSN
Jean-Luc VOLATIER	Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail)

Comité local d'organisation (par ordre alphabétique)	
Edwige DUCLAY	Directrice de projet, chargée de la coordination interministérielle du plan chlอร์ดécone IV
Tiphaine DUVAL	Chargée de mission chlอร์ดécone Préfecture de Guadeloupe
Niels ENSLEN	Chargé de mission Plan chlอร์ดécone IV, Ministère chargé des Outre-mer
Aurore FOURCOT	Chargée de mission CPSN / CLoReCA
Sébastien JAKUBOWSKI	Chargé de mission chlอร์ดécone Préfecture de Martinique
Pierre LAPÈZE	Chargé de mission chlอร์ดécone adjoint Préfecture de Martinique
Nassim MEKKEDEM	Conseiller expert en santé publique et environnementale Ministère de la santé et de la prévention
Laurent MORILLON	Délégué Régional Académique à la Recherche et à l'Innovation (Martinique)
Philippe POGGI	Délégué Régional Académique à la Recherche et à l'Innovation (Guadeloupe)



PARTIE 1
CONFÉRENCES ET COMMUNICATIONS
ORALES

CONFERENCE INTRODUCTIVE – Gudrun Bornette

L'APPROCHE ONE HEALTH : UNE APPROCHE INDISPENSABLE POUR ABORDER LES PROBLÉMATIQUES DE SANTÉ

Le colloque a été introduit par la conférence de Gudrun Bornette « L'approche one health : une approche indispensable pour aborder les problématiques de santé ». Gudrun Bornette est directrice de recherche au CNRS et spécialiste du fonctionnement des zones humides. Dans ce cadre, elle a proposé des modèles de fonctionnement des zones humides alluviales des grands cours d'eau et des étangs agro-piscicoles, en intégrant explicitement les stratégies adaptatives des espèces végétales qui les colonisent, et les aspects géomorphologiques, hydrogéologiques, et anthropiques du fonctionnement de ces écosystèmes et de leur dynamique. Depuis quelques années, en collaboration avec des chercheurs en épidémiologie et des médecins français, haïtiens, congolais, elle s'intéresse aux zones humides comme réservoir potentiel de bactéries ou de nématodes à l'origine de maladies infectieuses et potentiellement véhiculés par les flux hydriques (choléra, bactéries potentiellement pathogènes et antibiorésistantes d'origine anthropique, angyostrongilose). Elle est actuellement chargée de mission auprès de l'institut écologie et environnement du CNRS, en charge de l'écologie de la santé.

Résumé :

La lutte contre les ravageurs des cultures est un enjeu récurrent pour l'agriculture industrielle, qui sollicite toujours de nouvelles armes pour lutter contre les ravageurs, face à la baisse d'efficacité des armes conventionnelles. La lutte chimique reste la base des programmes phytosanitaires, la recherche sur la lutte intégrée contre les ravageurs est souvent à la traîne, tend à être mal orientée et n'accorde pas suffisamment d'attention à l'écologie et au fonctionnement écologique des agroécosystèmes. Ces limitations ont des implications négatives pour les moyens de subsistance des agriculteurs, la conservation de la biodiversité et la santé animale et humaine. Par ailleurs, cette course aux armements est perdue d'avance, et ses conséquences pour la santé globale sont extrêmement élevées (phénomènes de résistance, toxicité pour la faune et la flore non cible, impacts multiples pour la santé humaine).

Dans un contexte de multiplication des risques sanitaires liés aux composés chimiques épandus dans l'environnement, d'effondrement de la biodiversité « non-cible » et souvent protectrice, d'augmentation exponentielle de la mobilité des organismes pathogènes liées au commerce global, et de changement climatique, l'approche « One Health » devient indispensable pour aborder les problématiques de santé.

Cette approche est une approche collaborative, multisectorielle et transdisciplinaire - travaillant aux niveaux local, régional, national et mondial - dans le but d'obtenir des résultats optimaux en matière de santé en reconnaissant l'interconnexion entre les personnes, les animaux, les plantes et leur environnement commun.

Cette approche passe par un dialogue renforcé entre les décideurs, les spécialistes du fonctionnement des écosystèmes et des organismes vivants (écologues), les sciences humaines et sociales, et les professions de santé. Ce dialogue impose d'oublier ses propres intérêts scientifiques et/ou institutionnels, d'avoir une vraie démarche interdisciplinaire et d'adopter une approche intégrative : co-construire les corpus d'hypothèses, les protocoles et les interprétations (et donc mettre en phase les échelles de perception des différentes disciplines), d'accepter

l'existence de combinaisons de facteurs explicatifs, et enfin d'accepter que la santé puisse reposer sur des déterminismes environnementaux.

Si ce travail évite l'écueil du « one Health washing », et conduit à un réel partage des compétences et des connaissances, elle peut aider les acteurs à mettre en place l'indispensable révolution des pratiques nécessaires pour faire face à ces enjeux sanitaires planétaires, particulièrement prégnants dans les climats les plus chauds, mais amenés à gagner les climats tempérés à brève échéance.

SESSION 1 : LES APPORTS DE LA RECHERCHE POUR CARACTÉRISER, MESURER ET RÉDUIRE L'EXPOSITION

Cette session avait pour objectif de présenter les travaux pluri et/ou interdisciplinaires visant à (i) prévenir l'exposition humaine, animale et végétale à la chlordécone et ses produits de transformation et, (ii) étudier les impacts sanitaires sur la population et les écosystèmes pour en réduire les causes et les facteurs de risque.

Mots-clés : Approche analytique, toxicité et écotoxicité, modélisation, sécurité des aliments et sécurisation de l'alimentation, impact en santé

CONFERENCE INTRODUCTIVE – Hélène Budzinski

CHLORDÉCONE : QUELS OUTILS ANALYTIQUES POUR UNE BONNE CARACTÉRISATION DE L'OCCURRENCE ET DU DEVENIR ?

Hélène Budzinski a introduit la session 1 par la conférence « Chlordécone : quels outils analytiques pour une bonne caractérisation de l'occurrence et du devenir ? ». Hélène Budzinski est directrice de recherche au CNRS et directrice de l'UMR EPOC (Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux, UMR 5805 Université Bordeaux / CNRS) de l'Université de Bordeaux. Chimiste analyticienne et chimiste de l'environnement ses recherches portent sur différentes classes de contaminants chimiques organiques (HAP, PCB, pesticides, substances pharmaceutiques, perturbateurs endocriniens, détergents, ...), étudiant leur présence, leur devenir et leurs impacts toxiques. Son activité de recherche est dédiée d'une part au développement d'outils analytiques pour la détermination des polluants chimiques à des niveaux ultra-traces (extraction, purification, quantification, méthodologies d'identification) avec un accent ces dernières années sur les échantillonneurs passifs. D'autre part, elle est impliquée dans l'étude des phénomènes biotiques et abiotiques affectant la présence des contaminants organiques dans l'environnement et leur transfert vers les organismes.

DynPestSols : un modèle pour représenter les pressions agricoles dues aux pesticides sur le long terme à l'échelle des territoires

Victor Dufleit^{1,2*}, Vincent Bonnal^{1,2}, Annelise Tran^{1,2}, Pascal Degenne^{1,2}, Philippe Cattan^{1,2*}

¹ Cirad, UMR TETIS, F-34398 Montpellier, France

² Univ Montpellier, F-34090 Montpellier, France

* victor.dufleit@cirad.fr ; philippe.cattan@cirad.fr

Mots-clés :

Pratiques culturales et cancers
Devenir des pesticides
Antilles
Modèle spatio-temporel
Ocelet

Messages-clés :

- Les expositions à long terme aux pesticides sont difficiles à déterminer.
- Le modèle DynPestSols permet, à l'échelle d'un territoire et sur le temps long, de rendre compte des applications de pesticides et de leur devenir dans l'environnement.
- Une représentation spatiale des apports, des quantités de pesticides dans le sol et des quantités lixiviées est produite.
- Elle permettra de proposer des indicateurs à intégrer aux facteurs explicatifs des cancers en Guadeloupe.

Si l'emploi des pesticides en agriculture représente aujourd'hui un risque avéré pour la santé des utilisateurs mais aussi des populations⁵, la caractérisation du risque reste difficile car les impacts des pesticides s'observent sur le long terme. Or les usages sont variables dans le temps, au gré de la mise sur le marché ou du retrait des substances actives, mais aussi dans l'espace selon les pratiques d'épandage qui déterminent les types, fréquences, doses et modes d'application. Notre article s'intéresse à la représentation spatio-temporelle de ces usages à l'échelle des territoires et aux indicateurs de pression afférents.

Le modèle DynPestSols a été développé sur la plateforme de modélisation OCELET³ dans le cadre du projet Gessica⁴. Ce projet cherche à identifier les facteurs de risque des cancers en Guadeloupe, et notamment les pratiques agricoles d'utilisation de pesticides. Le modèle propose une simulation des traitements pesticides réalisés chaque année sur la sole agricole guadeloupéenne. Pour cela, il se base sur une modélisation des dynamiques spatiales et repose sur 4

processus fondamentaux : la reconstitution des données historiques de l'occupation du sol année par année ; l'élaboration d'un catalogue d'itinéraires techniques (ITK) de référence par culture et par année qui détermine les calendriers de traitement ; la sélection des pesticides parmi ceux disponibles pour une culture et année donnée ; le devenir des pesticides dans l'environnement (rétention dans les sols, dégradation, lixiviation).

Les données de base utilisées sont : les différentes couches vectorielles d'occupation du sol qui sont automatiquement interpolées si nécessaire pour produire des cartes annuelles ; les ITK et leur évolution au cours du temps reconstitués par un travail bibliographique et d'enquêtes auprès des acteurs de l'agriculture guadeloupéenne ; la base de données nationale E-PHY¹ qui recense les substances actives autorisées pour une année et un type de traitement donnés ; les données du milieu physique (caractéristiques des sols, isohyètes) et des molécules.

Dans un premier temps, le modèle affecte les

itinéraires techniques de référence aux parcelles en fonction du type de culture et de l'année. Le modèle affecte ensuite les traitements effectués sur les parcelles sur un pas de temps déterminé. Il sélectionne alors les pesticides selon le type de traitement réalisé puis les applique sur les surfaces selon les doses recommandées. Il simule enfin le devenir des produits dans les parcelles selon le formalisme retenu pour le calcul des indicateurs de pression de l'état des lieux de la Directive Cadre sur L'Eau².

Le modèle produit des cartographies sous la forme d'un carroyage renseignant, pour chacune des substances actives utilisées dans les carreaux, les quantités apportées, retenues par le sol et lixiviées. Ces sorties serviront à la création d'indicateurs spatio-temporels de pollution à différentes échelles d'agrégation. Ces indicateurs seront ensuite utilisés par le registre des cancers de Pointe-à-Pitre afin d'identifier un lien potentiel entre des cas de cancers qui ont été spatialisés et la présence de pesticides dans l'environnement proche.

Références bibliographiques :

1. ANSES : Données ouvertes du catalogue E-Phy des produits phytopharmaceutiques, matières fertilisantes et supports de culture, adjuvants, produits mixtes et mélanges, 2022.
2. Cattan, P. and Lambert, M. : Guides méthodologiques pour le calcul des indicateurs pesticides et azote en Guadeloupe, CIRAD, ONEMA, Montpellier (France), 2018.
3. Degenne, P. and Lo Seen, D.: Ocelet : Simulating processes of landscape changes using interaction graphs, *SoftwareX*, 5, 89–95.
4. Deloumeaux, J. : Facteurs de risque associés aux Cancers en Guadeloupe : Environnement, contexte Socioéconomique : « GESSICa », 2019.
5. INSERM : Pesticides et effets sur la santé : Nouvelles données, Inserm, Montrouge : EDP Sciences, 2021.
6. Maxwell, S. K., Airola, M., and Nuckols, J. R.: Using Landsat satellite data to support pesticide

exposure assessment in California, *Int J Health Geogr*, 9, 46.

Protocoles d'analyse pour le suivi des produits de transformation de la chlordécone dans des matrices environnementales et animales

Déborah Martin¹, Delphine Muselet¹, Perla Alnajjar², Stéphane Pacaud³, Yves Le Roux^{2,3}, Sébastien Bristeau⁴, Jean-Baptiste Charlier⁵, Jennifer Hellal⁴, Cyril Feidt² et Pierre-Loïc Saaidi^{1*}

¹ UMR 8030 Génomique Métabolique, CEA, Institut de Biologie François Jacob, Genoscope, Université d'Evry Val d'Essonne, Université Paris-Saclay, Evry, France

² Université de Lorraine - INRAe (USC340), URAFPA, 2 Avenue de la Forêt de Haye, 54000 Nancy, France

³ Chaire Agrométhé, Université de Lorraine-ENSAIA, URAFPA, 2 Avenue de la Forêt de Haye, TSA 40602, 54500 Vandoeuvre-lès-Nancy

⁴ BRGM, F- 45060, Orléans, France

⁵ BRGM, Univ. Montpellier, Montpellier, France

* plsaaidi@genoscope.cns.fr

Mots-clés :

Chlordécone

Produits de transformation

SPME

QuEChERS

Messages-clés :

- Développement d'un protocole d'extraction simple par SPME pour le suivi des produits de transformation de la chlordécone dans l'eau

- Adaptation du protocole QuEChERS pour l'analyse rapide de la chlordécone et ses produits de transformation dans des matrices solides et liquides complexes

- Suivi de la dégradation de la chlordécone et de la formation de produits de transformation dans un processus de bioremédiation grâce à un protocole QuEChERS

La chlordécone (CLD, $C_{10}Cl_{10}O_2H_2$) est un pesticide organochloré massivement épandu aux Antilles entre 1972 et 1993 afin de lutter contre le charançon du bananier. Près de 30 ans après son interdiction, la CLD peut encore être retrouvée à des taux supérieurs au mg/kg dans le sol. L'imprégnation forte de la population due aux denrées locales contaminées a des conséquences dramatiques aux Antilles (sur-incidence du cancer de la prostate, interdiction de pêche). Au cours des dernières années, plusieurs équipes ont mis en évidence la possibilité de dégrader la CLD de manière chimique et/ou microbiologique^{1,2,3}. Ces résultats ont ouvert la voie à des stratégies de (bio)remédiation. Ils ont également mis en lumière le nombre et la diversité très élevée des produits de transformation (PTs) issus de la dégradation de la CLD. Un certain nombre de ces composés ont même pu être détectés dans

divers échantillons environnementaux de Martinique montrant qu'une dégradation naturelle de la CLD était déjà en cours¹. L'analyse et la quantification des produits de transformation de la CLD revêtent donc une importance capitale à la fois pour évaluer la contamination des différents compartiments environnementaux par les PTs mais également pour l'optimisation des procédés de remédiation pour étudier les conditions propices à la dégradation naturelle de la CLD.

Notre objectif a été de développer des protocoles simples, rapides et efficaces d'extraction des PTs de la CLD dans différentes matrices environnementales et/ou d'origine animale. Pour les matrices liquides telles que les eaux de rivière et souterraines, la méthode de micro-extraction sur phase solide (SPME) a été retenue. Cette méthode permet d'extraire

sans solvant et de concentrer par adsorption sur une fibre en silice recouverte d'un polymère les composés présents dans l'eau. Basée sur le protocole SPME décrit pour la CLD⁵, plusieurs paramètres ont été adaptés pour l'extraction des PTs (type de fibre, température et durée d'extraction, pH d'extraction). Le protocole a ensuite été appliqué à des eaux antillaises. Pour les matrices solides, la méthode d'extraction QuEChERS (de l'anglais *Quick, Easy, Cheap, Efficient, Rugged and Safe*) a été choisie. Deux matrices ont été étudiées : i) des sols natifs et aussi issus de procédés de remédiation de la CLD avec du Fer zéro valent et ii) des digestats provenant de la méthanisation de déchets végétaux et animaux contaminés à la CLD. Plusieurs paramètres ont été adaptés selon la matrice en se basant sur le protocole QuEChERS développé pour la CLD et le chlordécol⁴ (solvant d'extraction, pH et quantité de matrice extraite). Les protocoles QuEChERS ont permis de quantifier la dégradation de la CLD et l'apparition de divers PTs. Ces nouveaux protocoles d'analyse, adaptés à la CLD et ses PTs, permettent aujourd'hui d'envisager des campagnes d'échantillonnage environnementales à grande échelle pour étudier le devenir de la molécule mère et ses dérivés.

Références bibliographiques :

1. Chevallier M. L., Della-Negra O., Chaussonnerie S., Barbance A., Muselet D., Lagarde F., Darii E., Ugarte E., Lescop E., Fonknechten N., Weissenbach J., Woignier T., Gallard J-F., Vuilleumier S., Imfeld G., Le Paslier D., and Saaidi P-L., 2019. Natural Chlordecone Degradation Revealed by Numerous Transformation Products Characterized in Key French West Indies. *Environ. Sci. Technol*, 53, 11, 6133–6143
2. Lomheim L., Laquitaine L., Rambinaising S., Flick R., Starostine A., Jean-Marius C., Edwards E. A., Gaspard S., 2020. Evidence for extensive anaerobic dechlorination and transformation of the pesticide chlordecone (C₁₀Cl₁₀) by

indigenous microbes in microcosms from Guadeloupe soil. *PLOS ONE*, 15 (4) : e0231219

3. Mouvet, C., Dictor, M-C., Bristeau, S., Breeze D. and Merci A., 2017. Remediation by chemical reduction in laboratory mesocosms of three chlordecone-contaminated tropical soils. *Environ Sci Pollut Res*, 24, 25500–25512

4. Saint-Hilaire M., Inthavong C., Bertin T., Labison-Bompard G., Guérin T., Fournier A., Feidt C., Rychen G. and 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.

5. Soler, A., Lebrun, M., Labrousse, Y., and Woignier, T., 2014. Solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry for quantitative determination of chlordecone in water, plant and soil samples. *Fruits*, 69(4), 325-339

La chlordécone sous forme $C_{10}Cl_{10}O$ existe-t-elle vraiment ?

Pierre-Loïc Saaidi^{1*}, Oriane Della-Negra¹, Briec Le Cacher de Bonneville¹, Delphine Muselet¹,
Eddy Elisée¹, Déborah Martin¹, Nathalie Jarroux², Gilles Frison³

¹ UMR 8030 Génomique Métabolique, CEA, Institut de Biologie François Jacob, Genoscope, Université d'Evry Val d'Essonne, Université Paris-Saclay, Evry, France

² Université Paris-Saclay, Univ Evry, CNRS, LAMBE UMR 8587, 91025 Evry, France

³ Sorbonne Université, CNRS, Laboratoire de Chimie Théorique, Paris, France

* plsaaidi@genoscope.cns.fr

Mots-clés :

Chlordécone

Gem-diol

Equilibre d'hydratation

Hémiacétal

Messages-clés :

- La chlordécone sous forme cétone n'existe pas, la molécule se transforme spontanément en chlordec-gem-diol.

- Le chlordec-gem-diol réagit spontanément avec certains alcools conduisant à des dérivés en équilibre.

- Le chlordec-gem-diol possède un pKa de l'ordre de 9-10.

- L'ensemble des modélisations publiées avec la forme cétone de la chlordécone sont à adapter avec le chlordec-gem-diol pour refléter une réelle pertinence.

La chlordécone (CLD) est généralement représentée comme une cétone perchlorée de formule brute $C_{10}H_{10}O$. Elle est donc considérée comme très hydrophobe, avec un Kow supérieur à 4 et non ionisable. Cependant, quelques articles indiquent que la CLD est en équilibre avec sa forme hydratée et quelques-uns affirment que la CLD n'existe que sous forme hydratée, c'est-à-dire avec une fonction gem-diol en lieu et place de la fonction cétone^{1,2}. Après avoir évalué les arguments scientifiques évoqués, nous avons réalisé plusieurs expériences et modélisations : analyses par résonance magnétique nucléaire et par Infra-Rouge de la CLD commerciale, étude de la solubilité de la CLD en fonction du pH et étude de l'équilibre d'hydratation de la chlordécone par des calculs de chimie quantique (théorie de la fonctionnelle de la densité). Toutes les observations et les résultats des calculs confirment bien que la CLD sous forme cétone n'est pas stable et s'hydrate

spontanément même en présence de traces d'humidité. Il faut donc considérer le chlordec-gem-diol de formule $C_{10}Cl_{10}O_2H_2$ en lieu et place de la CLD. Mis à part quelques erreurs d'élucidation structurale de molécules organiques et inorganiques, une telle erreur de structure pour un pesticide produit et commercialisé dans le monde entier à l'échelle de plusieurs milliers de tonnes est, à notre connaissance, unique.

Fort de cette conclusion, nous avons effectué une analyse bibliométrique afin d'évaluer le pourcentage d'articles tenant compte de l'équilibre d'hydratation. Nous avons constaté qu'en moyenne moins de 10% des publications mentionnaient la forme gem-diol avec des disparités temporelles significatives. Nous avons cherché à savoir à quel(s) domaine(s) de recherche cela pouvait être le plus préjudiciable. En général, les protocoles de dosage utilisent les formules brutes de type $C_{10}Cl_{10}O.xH_2O$ ($x = 1, 2$ ou 3) données par les fournisseurs pour les calculs

des concentrations en CLD. La plupart des travaux qui incluent la quantification de la CLD (épidémiologie, exposition, pollution) n'est donc a priori pas impactée. Par contre, à chaque fois que des modélisations ont été effectuées en s'appuyant sur la structure cétone de la CLD, nous émettons de fortes réserves sur les conclusions tirées.

Au cours de notre étude, nous avons également pu estimer l'acidité du chlordec-gem-diol, qui est comprise entre 9 et 10. Cela signifie qu'environ 1% de du chlordec-gem-diol est sous forme ionisé vers pH 7-8. Nous avons également démontré que la présence d'alcools (méthanol ou éthanol par exemple), conduisait spontanément à des formes hémiacétales. Ceci a été rationalisé par des calculs de chimie quantique. Cette réactivité particulière se rapproche de celle observée pour certains dérivés polyfluorocarbonylés.

Ces résultats nous donnent de nouvelles clés de compréhension pour expliquer certaines observations mentionnées dans la littérature scientifique (notamment l'augmentation de la solubilité de la CLD à pH basique, l'ordre d'élution en chromatographie, les effets d'ajout de solvants dans la réponse de la CLD en GC-MS, la capacité des dispositifs d'échantillonneur passifs à fixer la CLD). Les éléments rassemblés nous permettent également de formuler un certain nombre de recommandations pour la conception de nouvelles expériences.

Références bibliographiques :

1. Wilson, N. K.; Zehr, R. D., Structures of some Kepone photoproducts and related chlorinated pentacyclodecanes by carbon-13 and proton nuclear magnetic resonance. *Journal of Organic Chemistry* 1979, 44, (8), 1278-1282
2. Bristeau, S. avec la collaboration de Amalric L., Mouvet C., (2012) – Validation de la méthode d'analyse de la chlordécone pour l'application au suivi des procédés de dépollution des sols Antillais. Rapport final. BRGM/RP-60469-FR, 64p., 25 fig., 26 tabl.

Reconnaissance spécifique et détection de la chlordécone par des hémicryptophanes dans l'eau

Oriane Della-Negra^{1*}, Jean-Pierre Dutasta², Sébastien Pecqueur³, Yannick Coffinier³, Pierre-Loïc Saaidi⁴, Alexandre Martinez¹

¹ Aix Marseille Univ., Centrale Marseille, CNRS, iSm2 UMR 7313, 13397, Marseille, France -

² Laboratoire de Chimie, École Normale Supérieure de Lyon, CNRS, 46 Allée d'Italie, F-69364 Lyon, France.

³ Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, Univ. Polytechnique Hauts-de-France, UMR 8520, IEMN, Lille F-59000, France

⁴ UMR 8030 Génomique métabolique / CEA / Institut de Biologie François Jacob / Genoscope / Université d'Evry Val d'Essonne / Université Paris-Saclay, France.

* oriane.della-negra@orange.fr

Mots-clés :

Hémicryptophane
Fluorimétrie
Chlordécone
Chimie supramoléculaire

Messages-clés :

- La chlordécone peut être encapsulée sélectivement dans une cage moléculaire.

- La concentration de la chlordécone peut être évaluée par fluorescence dans l'eau à des concentrations environnementales.

- La fonctionnalisation des hémicryptophanes permet de les utiliser pour d'autres dispositifs de détection de la chlordécone.

Plusieurs techniques analytiques, faisant appel à la spectrométrie de masse, ont été développées au fil des années pour quantifier et surveiller la présence de la chlordécone (CLD) dans l'eau et les denrées alimentaires¹⁻³. Ici, nous proposons une stratégie innovante pour la détection de la CLD dans l'eau via une reconnaissance spécifique supramoléculaire entre la CLD (l'invitée) par une cage moléculaire, l'hémicryptophane (l'hôte).

Les hémicryptophanes sont des molécules de symétrie C₃, constitués d'une unité cyclotrivératrylène et d'un groupement pouvant être de plusieurs natures : triamide, tris(2-aminoéthyl)amine (tren), trialkanolamine ou encore comprenant une plateforme benzénique tripodale. Ces « cages » peuvent servir à l'encapsulation ou la reconnaissance spécifique de plus petites molécules⁴. Nous avons ainsi criblé plusieurs hémicryptophanes de différentes tailles, comportant différentes fonctions chimiques afin de déterminer la(les) plus affine(s) pour

la CLD. Par des expériences de titration suivie par résonance magnétique nucléaire, nous avons été capables d'établir des constantes d'association, témoignant de l'affinité des hémicryptophanes pour la CLD. Nous avons pu estimer des constantes comprises entre 10³ et 10⁵ M⁻¹ pour certaines de ces cages ce qui démontre une très forte affinité pour la CLD par rapport à d'autres molécules. Des modélisations utilisant la théorie de la fonctionnelle de la densité ont permis de mieux comprendre les interactions expliquant l'affinité de la cage modèle pour la CLD, notamment la stabilisation par liaison hydrogène entre les amines secondaires de la cage et la fonction gem-diol de la CLD⁵.

Plus récemment, nous avons synthétisé des hémicryptophanes contenant des groupements fluorophores. Nous avons ensuite vérifié que l'incorporation chimique de ces motifs ne diminuait pas de manière rédhibitoire leur capacité à encapsuler la CLD (constantes d'association supérieures

ou égales à 103 M⁻¹). Nous avons étudié les modifications du spectre de fluorescence de ces hémicryptophanes lors d'ajouts successifs de CLD. Un hémicryptophane modèle a alors été sélectionné afin de démontrer qu'il était possible de relier l'intensité du signal de fluorescence à la concentration en CLD. Le système de reconnaissance a ensuite été adapté pour détecter la CLD dans l'eau à des niveaux de pollution environnementale (de l'ordre de 0,1 à 2 µg/L).

Nous avons également introduit une fonctionnalisation supplémentaire sur la structure hémicryptophane permettant de la brancher de manière covalente à d'autres entités chimiques. Cette nouveauté permet notamment le greffage sur des surfaces et ouvre la voie à d'autres applications pour permettre de détecter et mesurer la CLD dans des matrices aqueuses environnementales.

La découverte de la reconnaissance spécifique de la CLD par des cages moléculaires nous a donc permis de développer de nouvelles méthodes de détection dans l'eau, notamment par mesure de la fluorescence. De nouveaux hémicryptophanes pourraient être envisagés afin d'abaisser encore la limite de détection. Les méthodes présentées représenteraient donc des alternatives plus faciles à mettre en place et moins onéreuses que les analyses classiquement réalisées (GC-MS et LC-MS) pour le monitoring de la CLD dans l'environnement. Il restera enfin à déterminer les performances en termes de reproductibilité, sensibilité, et exactitude par rapport aux protocoles usuels.

Références bibliographiques :

1. Bristeau S., Amalric L., & Mouvet C. 2014. Validation of chlordecone analysis for native and remediated French West Indies soils with high

organic matter content. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 406 (4), 1073–1080.

2. Brunet D., Woignier T., Lesueur-Jannoyer M., Achard R., Rangon L., & Barthès, B. G. 2009. Determination of soil content in chlordecone (organochlorine pesticide) using near infrared reflectance spectroscopy (NIRS). *Environmental Pollution*, 157 (11), 3120–3125.

3. Martin-Laurent F., Sahnoun M. M., Merlin C., Vollmer G., & Lübke, M. 2014. Detection and quantification of chlordecone in contaminated soils from the French West Indies by GC-MS using the ¹³C₁₀-chlordecone stable isotope as a tracer. *Environmental Science and Pollution Research*, 21 (7), 4928–4933.

4. Zhang D., Martinez A., & Dutasta J.-P. (2017). Emergence of Hemicryptophanes: From Synthesis to Applications for Recognition, Molecular Machines, and Supramolecular Catalysis. *Chemical Reviews*, 117 (6), 4900–4942.

5. Long A., Lefevre S., Guy L., Robert V., Dutasta J.-P., Chevallier M. L., Della-Negra O., Saaidi P.-L., & Martinez A. (2019). Recognition of the persistent organic pollutant chlordecone by a hemicryptophane cage. *New Journal of Chemistry*, 43 (26), 10222–10226.

Pollution à long terme par la chlordécone des sols volcaniques tropicaux des Antilles françaises : nouvelles connaissances et réévaluation des prédictions

Lai Ting Pak^{1,2*}, Irina Comte^{2,3}, Alice Pradel⁴, Armand Crabit⁵, Charles Mottes^{2,6}, et Philippe Cattan^{2,7*}

¹ Cirad, UPR HortSys, F-97285, Le Lamentin, Martinique, France

² HortSys, GECO, TETIS, Université Montpellier, Cirad, Montpellier, France

³ Cirad, UPR GECO, F-97130, Capesterre-Belle-Eau, Guadeloupe, France

⁴ Université Rennes, CNRS, Geosciences Rennes, UMR 6118, F-35000, Rennes, France

⁵ Montpellier SupAgro, UMR G-EAU, Université Montpellier, INRAE, F-34000, Montpellier, France

⁶ Cirad, UPR HortSys, F-97455, Saint-Pierre, Réunion, France

⁷ Cirad, UMR TETIS, F-34398, Montpellier, France

* lai-ting.pak@cirad.fr ; philippe.cattan@cirad.fr

Mots-clés :

Chlordécone
Sol
Modélisation
Guadeloupe

Messages-clés :

- Les concentrations en chlordécone observées dans les sols ont diminué plus rapidement que prévu ces 20 dernières années.
- Si cette tendance se poursuit, les résultats de simulation ont révélé que la pollution par la chlordécone des sols serait réduite à 50 ans dans le sud de la Basse-Terre de la Guadeloupe.
- Les processus de dissipation au champ restent à déterminer et à hiérarchiser.
- Le statut de contamination des sols doit être réévalué.

La chlordécone a été largement appliquée dans les champs de bananes des Antilles françaises de 1972 à 1993 pour lutter contre le charançon du bananier. Une première évaluation de la dynamique de contamination des sols a été proposée (modèle WISORCH) à partir d'hypothèses de fréquence et dose d'applications de la chlordécone au champ et de paramètres physiques (précipitations, teneur en matière organique des sols, types de sol). Les projections du modèle ont conduit à des durées de contamination de 50 à 600 ans selon les types de sol, l'intensité du lessivage et en supposant l'absence de dégradation¹. Dix années après ces premières évaluations, de nouveaux résultats sont venus bousculer ces hypothèses : études attestant de la dégradation de la chlordécone dans l'environnement^{3,6,7}, évolution des concentrations en rivière^{2,5,8,9}. De là, une

réévaluation des durées de contamination des sols a été entreprise⁴.

Cette réévaluation s'est appuyée sur deux jeux de données. D'une part, des *observations in situ* réalisées dans près de 2545 parcelles entre 2001 et 2020 dans le cadre des plans de surveillance mis en place ; d'autre part, à partir d'analyses chlordécone sur 17 parcelles échantillonnées à deux dates. Dans un but prospectif, ces dernières analyses ont été utilisées 1) pour améliorer le modèle WISORCH qui n'avait pu être validé à l'époque sur des mesures à différents pas de temps et 2) discuter des processus en jeu dans la dissipation de la chlordécone.

Les résultats montrent une baisse des concentrations moyennes sur les parcelles analysées dans les plans de surveillance au cours des ans. Sur les 17 parcelles échantillonnées, une diminution inattendue des concentrations en chlordécone dans le

sol d'un facteur 4 a été observée en inadéquation avec les prédictions du modèle WISORCH. Ni l'érosion, ni le lessivage de la chlordécone ne sont apparus comme pouvant expliquer ces divergences.

Dans une approche de modélisation top-down, ces nouvelles observations nous ont conduits à introduire un processus de dissipation dans le modèle WISORCH qui correspond à une demi-vie de dissipation de 5 ans. Sur cette base la prédiction de la durée de contamination des sols approche la fourchette basse de prédiction de WISORCH, avec une décontamination des sols estimée pour l'horizon 2070.

Ces résultats appellent à une réévaluation de l'état de la pollution des sols. Les processus sous-jacents à la diminution inattendue des concentrations doivent être précisés. Une validation de la nouvelle version de WISORCH est nécessaire à plus grande échelle afin qu'elle puisse contribuer à la gestion des cultures sur les sols contaminés.

Références bibliographiques :

1. Cabidoche, Y.M., Achard, R., Cattan, P., Clermont-Dauphin, C., Massat, F., Sansoulet, J., 2009. Long-term pollution by chlordecone of tropical volcanic soils in the French West Indies: a simple leaching model accounts for current residue. *Environmental Pollution* 157, 1697–1705.
2. Cattan, P., Charlier, J.-B., Clostre, F., Letourmy, P., Arnaud, L., Gresser, J., Jannoyer, M., 2019. A conceptual model of organochlorine fate from a combined analysis of spatial and mid- to long-term trends of surface and ground water contamination in tropical areas (FWI). *Hydrology and Earth System Sciences* 23, 691–709.
3. Chevallier, M.L., Della-Negra, O., Chaussonnerie, S., Barbance, A., Muselet, D., Lagarde, F., Darii, E., Ugarte, E., Lescop, E., Fonknechten, N., Weissenbach, J., Woignier, T., Gallard, J.-F., Vuilleumier, S., Imfeld, G., Le Paslier, D., Saaidi, P.-L., 2019. Natural chlordecone degradation revealed by numerous transformation products characterized in key French West Indies environmental compartments. *Environmental Science & Technology* 53, 11, 6133-6143.
4. Comte, I., Pradel, A., Crabit, A., Mottes, C., Pak, L.T., Cattan, P., 2022. Long-term pollution by chlordecone of tropical volcanic soils in the French West Indies: New insights and improvement of previous predictions. *Environmental Pollution* 303, 119091.
5. Crabit, A., Cattan, P., Colin, F., Voltz, M., 2016. Soil and river contamination patterns of chlordecone in a tropical volcanic catchment in the French West Indies (Guadeloupe). *Environmental Pollution* 212, 615–626.
6. Devault, D.A., Laplanche, C., Pascaline, H., Bristeau, S., Mouvet, C., Macarie, H., 2016. Natural transformation of chlordecone into 5b-hydrochlordecone in French West Indies soils: statistical evidence for investigating long-term persistence of organic pollutants. *Environmental Science and Pollution Research* 23, 81–97.
7. Fernández-Bayo, J.D., Saison, C., Voltz, M., Disko, U., Hofmann, D., Berns, A.E., 2013. Chlordecone fate and mineralisation in a tropical soil (andosol) microcosm under aerobic conditions. *Science of The Total Environment* 463–464, 395–403.
8. Mottes, C., Deffontaines, L., Charlier, J.-B., Comte, I., Della Rossa, P., Lesueur-Jannoyer, M., Woignier, T., Adele, G., Tailame, A.-L., Arnaud, L., Plet, J., Rangon, L., Bricquet, J.-P., Cattan, P., 2020. Spatio-temporal variability of water pollution by chlordecone at the watershed scale: what insights for the management of polluted territories? *Environmental Science and Pollution Research* 27, 40999-41013.
9. Sabatier, P., Mottes, C., Cottin, N., Evrard, O., Comte, I., Piot, C., Gay, B., Arnaud, F., Lefevre, I., Develle, A.-L., Deffontaines, L., Plet, J., Lesueur-Jannoyer, M., Poulenard, J., 2021. Evidence of chlordecone resurrection by glyphosate in French West Indies. *Environmental Science & Technology* 55, 2296-2306.

Séquestration de la chlordécone par des biochars : une alternative à la décontamination

Thierry Woignier^{1,2*}, Luc Rangon^{1,2}, Stephann Cressan³, Dominique Regis³, Emy Njoh Ellong³, Maité Huron⁴

¹ CNRS, UMR IMBE, Campus Agro-Environnemental Caraïbe, Le Lamentin

² Aix Marseille Université, CNRS, IRD, Marseille, ³ Valecom, Martinique, ⁴ ETIA (groupe VOW), Compiègne

* thierry.woignier@imbe.fr

Mots-clés :

Décontamination des sols
Séquestration de la chlordécone
Biochars
Propriétés de porosité

Messages-clés :

- Nous démontrons que les biochars synthétisés séquestrent la chlordécone dans le sol.

- L'addition de biochars dans les sols contaminés réduit la contamination des légumes cultivés d'un facteur 6.

- L'efficacité du procédé de séquestration et de réduction du transfert de pesticides dépend des propriétés de porosité des biochars.

Dans le cas de certains pesticides, les méthodes de décontamination connues ne sont pas toujours réalisables techniquement ou envisageables financièrement et écologiquement^{1,2}. Nous proposons une alternative à la dépollution complète : le piégeage du pesticide dans les sols pour limiter le transfert du contaminant vers les écosystèmes.

Nos travaux précédents²⁻⁵, ont montré que l'incorporation de matière organique (compost) dans les sols permet d'accroître la capture dans le sol du chlordécone. Ainsi, bien que contaminé, le sol restitue plus faiblement le polluant dans les légumes cultivés et l'eau qui le traverse. Cependant, les matières organiques ne sont pas pérennes et le procédé doit être renouvelé à intervalle de 1 à 2 ans. Nous proposons d'utiliser du biochar, matière organique stabilisée sous forme solide, qui pourrait remplir le même rôle de séquestration que le compost avec une durée d'efficacité plus longue.

Ce procédé reposant sur l'utilisation de boues de STEP traitées par pyrolyses, nous

avons testé l'utilisation de plusieurs biochars synthétisés par pyrolyse entre 600- 900°C) afin de réduire la contamination de légumes (radis) cultivés dans des sols contaminés.

Nous montrons que 2 mois après l'incorporation et la maturation des biochars dans le sol, la contamination des plantes cultivées est entre 3 et 6 fois inférieure à celle de radis plantés dans le sol sans ajout de biochars. Nous montrons aussi que le rendement agronomique est 2 à 3 fois plus élevé. Nous avons caractérisé les propriétés physiques de porosité (distribution en taille de pores, surface spécifique) et nous avons étudié l'influence de ces propriétés sur l'efficacité du procédé de séquestration.

Ce mode de gestion agro écologique permet de proposer une méthode facile à mettre en œuvre car maîtrisée par les agriculteurs, dans l'attente de procédés de dépollution efficaces et durables.

Références bibliographiques :

1. Woignier, T., Clostre, F., Macarie, H., & Jannoyer, M. (2012). Chlordecone retention in the fractal

structure of volcanic clay. *Journal of hazardous materials*, 241, 224-230.

2. Woignier, T, Rangon, L., Clostre, F. *et al.* Physical limitation of pesticides (chlordecone) decontamination in volcanic soils: fractal approach and numerical simulation. *Environ Sci Pollut Res* (2019).

3. Woignier T, P. Fernandes, A. Soler, F. Clostre, C. Carles, L. Rangon, M. Lesueur-Jannoyer, 2013 Soil microstructure and organic matter: keys for chlordecone sequestration, *Journal of Hazardous Materials* (IF=4,55), 262 (2013) 357–364.

4. Woignier T, Clostre F, Fernandes P, Rangon L, Soler A, Lesueur Jannoyer M. 2015 Compost addition reduces porosity and pesticide transfer in soil microstructure, *Environ Sci Pollut Res* DOI 10.1007/s11356-015-5111-5, 23(1) 98-108 .

5. *Reduced pesticide bioavailability in soil by organic amendment.* Woignier T, Clostre F, Fernandes P, Soler A, Rangon L, Lesueur-Jannoyer M. 2016. Chapter 15 in *Crisis Management of Chronic Pollution: Contaminated Soil and Human Health*, M. Jannoyer, P. Cattan, T. Woignier (eds), CRC Press, Boca Raton, USA.

OPALE : un Observatoire des Pollutions Agricoles aux AntILes le long du continuum terre-mer

Anne-Lise Tailamé^{1*}, Antoine Richard^{2*}, Lai Ting Pak^{3*}, Benjamin Seux⁴, Charlotte R. Dromard⁵, Eric Abadie⁶, Laurie Lemaitre⁴, Enzo Civallero⁴, Jean-Baptiste Charlier^{7,8}, Olivier Grunberger⁹, Patrick Lachassagne¹⁰, Anatja Samouelian⁹, Marc Voltz⁹, Lise Ponchant²

¹ BRGM Martinique, F-97200, Fort-de-France, Martinique

² INRAE, UR 1321 ASTRO, F-97170, Petit-Bourg, Guadeloupe, France

³ Cirad, UPR HortSys, F-97285, Le Lamentin, Martinique, France

⁴ BRGM Guadeloupe, F-97170, Petit-Bourg, Guadeloupe

⁵ Unité Biologie des ORganismes et Ecosystèmes Aquatiques (BOREA), Université des Antilles, MNHN, Sorbonne Université, Université de Caen Normandie, CNRS, IRD, BP 592, 97157 Pointe-à-Pitre, Guadeloupe

⁶ IFREMER, Biodivenv, 79 route de Pointe Fort, F-97231, Le Robert, France

⁷ BRGM, Univ. Montpellier, Montpellier, France

⁸ G-eau, INRAE, CIRAD, IRD, AgroParisTech, Supagro, BRGM, Montpellier, France

⁹ Univ. Montpellier, UMR LISAH (INRAE, IRD, Supagro), Montpellier, France

¹⁰ HSM, Univ. Montpellier, CNRS, IRD, Montpellier, France

* a.tailame@brgm.fr ; antoine.richard@inrae.fr ; lai-ting.pak@cirad.fr

Mots-clés :

Pesticide
Continuum terre-mer
Bassins versants
Observatoire
Transfert

Messages-clés :

- OPALE offre une vision intégrée des dynamiques et bilans de masse à l'échelle de deux bassins versants pilotes complémentaires.

- L'étude des différents compartiments sol, eaux de surface et souterraines, littoral donne la possibilité de mieux comprendre les dynamiques de contamination des écosystèmes continentaux et côtiers antillais et ainsi d'aider à l'analyse de l'exposome des organismes.

- Les eaux sont le vecteur des transferts de contaminants d'origine agricole dans un contexte où le régime des pluies tropicales et les propriétés des sols et du sous-sol engendrent une contamination large de l'ensemble des compartiments, des sols, des cours d'eau, des aquifères, du littoral.

L'Observatoire sur la Pollution Agricole aux antILes (OPALE), mis en place en 2016, est un dispositif d'observation de la pollution environnementale en milieu tropical volcanique sur deux sites en Guadeloupe (bassin versant des rivières Pérou et Pères) et en Martinique (bassin versant de la rivière du Galion). Son objectif est de suivre le devenir des pesticides dans les sols ainsi que les eaux de surface et souterraines, avec un focus sur la chlordécone (CLD). Depuis 2022, OPALE s'ouvre aux milieux côtiers et couvre ainsi le continuum terre-mer. Un travail de

compréhension des processus inter-compartiments est mis en œuvre, en relation avec la contamination des sols et des pratiques agricoles passées, actuelles et futures.

Les deux bassins du Galion (Martinique) et de Pérou-Pères (Guadeloupe) présentent des caractéristiques physiographiques spécifiques du milieu insulaire tropical volcanique cultivé. Leur complémentarité en termes d'occupation du sol, pédologie, géologie, hydrologie et littoral apporte une plus-value pour étudier la variabilité du

fonctionnement agro-hydrologique et du devenir des contaminants en milieu antillais.

OPALE est le lieu d'acquisition de données nouvelles sur les pratiques agricoles et les pressions (occupations du sol, phytosanitaires, aménagements, assainissement, etc...), ainsi que sur les transferts de pesticides des sols vers les eaux de surface et souterraines. Cela permet d'améliorer les connaissances sur les processus et sur les impacts générés sur les différents compartiments des agro-hydrosystèmes, à travers une caractérisation i) spatiale : de la parcelle au bassin versant, et ii) temporelle : évolutions pluriannuelle et saisonnière des transferts en fonction de déterminants physiques et anthropiques. Les principaux résultats montrent l'intérêt d'une vision intégrée des dynamiques et bilans de masse à l'échelle du bassin versant.

La contamination des eaux de surface en CLD (jusqu'à quelques $\mu\text{g/l}$) varie fortement spatialement et temporellement, en lien avec les niveaux de contamination des sols (qui dépendent des pratiques agricoles passées et de la nature des sols), les conditions hydrologiques (ratio écoulements de surface et de base, saisonnalité, effets des épisodes majeurs) et le contexte hydrogéologique (lien entre surface et souterrain).

On observe dans les eaux souterraines des concentrations en CLD jusqu'à plusieurs dizaines de $\mu\text{g/l}$, illustrant la très forte vulnérabilité du compartiment souterrain aux contaminations d'origine agricole. Cela est à mettre en lien avec les propriétés infiltrantes des sols qui ne jouent qu'un rôle limité de barrière vers la profondeur. Le temps de résidence des eaux souterraines explique aussi une partie de la variabilité spatiale des concentrations des aquifères, ainsi que des cours d'eau qui les drainent en période de carême.

Cette année, l'observatoire s'enrichit de deux stations côtières, situées en mer, à

l'embouchure des rivières du Galion, Pérou et Pères. Ces stations marines auront pour objectif de suivre de façon trimestrielle la concentration en contaminants dans l'eau de mer à l'aide d'échantillonneurs intégratifs passifs (POCIS) et de suivre la contamination en CLD des premiers maillons de la chaîne alimentaire marine (plancton, algue et sédiment).

En plus de l'acquisition et de la production de données, l'observatoire a pour mission de diffuser et transmettre ses données à destination non seulement de la communauté scientifique mais aussi d'un public élargi. Le dispositif a également vocation à accueillir tout travail de recherche sur la CLD et plus largement sur les thématiques environnementales et agronomiques.

Les eaux souterraines, un vecteur invisible et pourtant essentiel pour comprendre l'exposition humaine et des écosystèmes à la chlordécone

Jean-Baptiste Charlier^{1,2*}, Anne-Lise Tailamé³, Luc Arnaud⁴, Benoît Dewandel^{1,2}, Enzo Civallero⁵, Bernard Ladouche^{1,2}, Virginie Vergnaud⁶, Marc Laurencelle⁴, Laurie Lemaitre⁵, C. Ranchoux^{1,2}, Benjamin Seux⁵

¹ BRGM, Univ. Montpellier, Montpellier, France

² G-eau, INRAE, CIRAD, IRD, AgroParisTech, Supagro, BRGM, Montpellier, France

³ BRGM Martinique, F-97200 Fort-de-France, Martinique

⁴ BRGM, F-45060 Orléans, France

⁵ BRGM Guadeloupe, F-97170 Petit-Bourg, Guadeloupe

⁶ Univ. Rennes, CNRS, Plateforme Condate Eau OSUR - UAR 3343, F-35000 Rennes, France

* j.charlier@brgm.fr

Mots-clés :

Eau souterraine
Chlordécone
Temps de résidence
Tendances
Exposition

Messages-clés :

- Les eaux souterraines sont un vecteur invisible de la dispersion de la chlordécone dans l'environnement.
- La contamination très élevée des eaux souterraines est liée au contexte fortement infiltrant des sols volcaniques tropicaux.
- Des temps de résidence de plusieurs décennies au sein des aquifères donnent accès à des eaux infiltrées lors des phases d'application de la chlordécone.
- Un nouveau schéma de la contamination des eaux souterraines et des hydrosystèmes qui en dépendent combine une baisse du stock du sol avec des temps de résidence pluriannuels dans les aquifères ; l'exposition humaine, supposée déjà très élevée dans les années 70-80, devrait perdurer encore sur des décennies dans de nombreux secteurs.

L'exposition humaine et des écosystèmes à la chlordécone (CLD) doit être évaluée à travers l'analyse des principaux vecteurs de dispersion et de transferts entre les compartiments environnementaux. Le contexte volcanique tropical des Antilles et le milieu souterrain fortement perméable favorisent des flux hydriques importants en profondeur faisant des Eaux Souterraines (ESO) un vecteur de dispersion clé « invisible », difficile à caractériser. Les ESO sont exploitées directement — ou indirectement au travers des Eaux de Surface (ESU) qui en dépendent — pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation.

L'objectif de cette communication est de présenter les avancées récentes sur la caractérisation de la contamination des ESO

par la CLD afin de donner un éclairage sur leur rôle primordial dans la contamination des hydrosystèmes qui en dépendent, information primordiale pour une cartographie des risques d'exposition humaine et des écosystèmes.

Les résultats présentés se basent sur des suivis de la CLD et de l'un de ses produits de transformation (5b-hydro-CLD notée 5b) dans les ESO et ESU de Martinique et Guadeloupe à différentes échelles spatiales (forage, source, île) et temporelles (saisonniers, pluriannuelles).

Une analyse à large échelle en zones bananières indique que les ESO sont très fortement contaminées, avec des valeurs atteignant plusieurs dizaines de µg/L de CLD (soit plus de 100 fois la norme de potabilité),

ce qui est en moyenne 10 fois supérieur à la gamme de contamination des ESU. Des analyses régulières de CLD ont été couplées avec des analyses des gaz dissous anthropiques (CFC/SF₆) qui informent sur la période de recharge des aquifères et le temps de résidence moyen des eaux. Les résultats montrent que les temps de résidence au sein des aquifères varient de quelques années à plusieurs décennies. Les eaux infiltrées dans les années 1970-90 ont déjà une concentration très élevée en CLD (de 5 à 25 µg/l) et un faible ratio 5b/CLD, comparable à celui du produit appliqué (Kepone®).

L'étude de séries temporelles des eaux souterraines révèle une variabilité saisonnière de CLD et 5b en lien avec les périodes sèches et humides. L'étude des tendances pluriannuelles (test statistique de Mann-Kendall) sur 17 forages montre l'absence de tendances significatives sur ¾ des sites quel que soit leur niveau de contamination. Des tendances à la baisse et à la hausse sont néanmoins observées sur 2 sites respectivement peu et fortement contaminés (CLD < ou > 0.2 µg/l). Ainsi, malgré la détection de tendances à la baisse, la contamination chronique perdure et s'aggrave même dans les régions les plus exposées.

L'ensemble des résultats permet de proposer un schéma de la contamination des eaux souterraines et des hydrosystèmes qui en dépendent combinant 2 processus : i) une baisse du stock de CLD dans les sols, et ii) des temps de résidences plus ou moins longs dans les aquifères. Ce schéma donne des pistes pour cartographier les risques d'exposition des écosystèmes et prioriser les zones où une remédiation des sols pourrait être initiée. Une hypothèse forte se dégage de ces résultats, en considérant que l'exposition humaine était déjà probablement élevée dès les années 70-80. L'exposition humaine demeurera forte encore pour des décennies dans de nombreux secteurs, malgré la

diminution du stock dans les sols.

Utilisation des macroalgues du genre *Dictyota* comme espèces sentinelles de la contamination par la chlordécone

Charlotte R. Dromard^{1*}, Nathan Schaal¹, Paul-Emile Contarini¹, Robert Chalu², Imma Eljout², Kieran Tarazona³, Muriel Sylvestre², Paulina De la Mata³, James Harynuk³, Gerardo Cebrian-Torrejon²

¹ Unité Biologie des ORganismes et Ecosystèmes Aquatiques (BOREA), Université des Antilles, MNHN, Sorbonne Université, Université de Caen Normandie, CNRS, IRD, BP 592, Campus de Fouillole, UFR SEN, Department of Biology, 97157 Pointe-à-Pitre, Guadeloupe

² Laboratory Covachim, M2E EA 3592, Université des Antilles, Campus de Fouillole, UFR SEN, Department of Chemistry, 97157 Pointe-à-Pitre, Guadeloupe

³ TMIC, University of Alberta, College of Natural and Applied Sciences, Department of Chemistry, 11227 Saskatchewan Drive, Edmonton, Canada

* charlotte.dromard@univ-antilles.fr

Mots-clés :

Cartographie
Bioaccumulation
Remédiation
Végétaux marins

Messages-clés :

- Les macroalgues du genre *Dictyota* sont présentes sur tous les récifs coralliens de la Guadeloupe
- Ces algues ont un potentiel d'accumulation de la chlordécone très élevé.
- Les *Dictyota* peuvent être utilisées comme espèces sentinelles pour suivre les niveaux de contamination des sites marins
- Ces algues sont susceptibles d'ouvrir des perspectives de bioremédiation.

Les macroalgues du genre *Dictyota* sont abondantes sur les récifs coralliens des Antilles et leur développement, amplifié par le réchauffement climatique et les pollutions organiques dans les eaux côtières, engendre une compétition pour l'espace avec les coraux¹.

Les macroalgues, producteurs primaires situés en bas des chaînes alimentaires marines, sont généralement faiblement contaminées par la chlordécone. Les *Dictyota* ne suivent pas cette tendance et accumulent fortement la chlordécone présente dans l'eau de mer, même à de faibles concentrations². La concentration maximale mesurée dans les *Dictyota* a été relevée dans la baie du Galion (1458 µg.kg⁻¹). Ainsi, ces algues affichent des concentrations en chlordécone jusqu'à 500 fois plus élevées que celles mesurées dans les autres genres de macroalgues. Les *Dictyota* ont été collectées sur différents sites de

Guadeloupe, et les concentrations mesurées permettent de mettre en évidence la cartographie de la contamination, ce qui amène la perspective d'utiliser cette algue en tant qu'espèce sentinelle.

Le potentiel de bioaccumulation des *Dictyota* a été testé *in situ* lors d'une expérience de transplantation. Cette expérience a montré que les algues se contaminent en quelques heures suivant leur exposition à la molécule³. Une expérience *in vivo* est actuellement en cours, ce qui permettra de confronter les résultats avec les données issues du milieu naturel.

Les capacités d'absorption de la chlordécone par ces macroalgues ouvrent des perspectives de bioremédiation, notamment en termes de décontamination de l'eau ou de la fabrication de filtres.

En parallèle, une comparaison des profils

métabolomiques a été effectuée entre les algues contaminées et non contaminées. Les échantillons présentaient environ 1350 pics de détection de composés. Cinq familles de métabolites ont été retrouvées : les acides gras, les glucides, les alcools, les acides aminés et les terpènes. La présence de nombreux types d'acides gras, capables d'accumuler la chlordécone, est un premier indice en faveur d'un stockage passif de la chlordécone. Les terpènes sont également présents en grande quantité. Ces analyses représentent un intérêt majeur dans la caractérisation biochimique des *Dictyota*, qui pourra être utilisées pour la valorisation de ces algues dans le cadre de perspectives de bioremédiation.

Références bibliographiques :

1. Box, S. J., & Mumby, P. J. (2007). Effect of macroalgal competition on growth and survival of juvenile Caribbean corals. *Marine Ecology Progress Series*, 342, 139-149.
2. Contarini, P. E., & Dromard, C. R. (2021). Biosorption capacity of genus *Dictyota* facing organochlorine pesticide pollutions in coastal areas of the Lesser Antilles. *Aquatic Botany*, 169, 103346.
3. Schaal, N. (2021). Cinétique d'accumulation de la chlordécone par les algues du genre *Dictyota*. Rapport de Master, Université des Antilles, 21p.

Exposition prénatale *in utero* au chlordécone et hormones thyroïdiennes, métaboliques et sexuelles stéroïdiennes à l'âge de sept ans : une étude de la cohorte mère-enfant TIMOUN

Gülen Ayhan^{1*}, Florence Rouget², Frank Giton³, Nathalie Costet⁴, Léah Michineau⁴, Christine Monfort⁴, Jean-Pierre Thomé⁵, Philippe Kadhel¹, Sylvaine Cordier⁴, Alejandro Oliva⁶, Luc Multigner⁴

¹ Centre Hospitalier Universitaire (CHU) de Guadeloupe, Univ Antilles, Inserm, École des Hautes Études en Santé Publique (EHESP), Irset (Institut de recherche en santé, environnement et travail) - UMR_S 1085, Rennes, France

² Centre Hospitalier Universitaire (CHU) de Rennes, Univ Rennes, Inserm, École des Hautes Études en Santé Publique (EHESP), Irset (Institut de recherche en santé, environnement et travail) - UMR_S 1085, Rennes, France

³ Assistance Publique - Hôpitaux de Paris (AP-HP) Hôpital Henri Mondor, Pôle Biologie-Pathologie, IMRB U955, Créteil, France

⁴ Univ Rennes, Inserm, École des Hautes Études en Santé Publique (EHESP), Irset (Institut de recherche en santé, environnement et travail) - UMR_S 1085, Pointe à Pitre, France

⁵ LEAE-CART (Laboratoire d'Ecologie Animale et d'Ecotoxicologie-Centre de Recherche Analytique et Technologique), Université de Liège, Liège, Belgique

⁶ Centro de Estudios Interdisciplinarios, Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentine

* gulen.ayhan@chu-guadeloupe.fr

Mots-clés :

Chlordécone
Exposition prénatale
Enfants
Hormones

Messages-clés :

- L'exposition prénatale *in utero* au chlordécone est associée à des augmentations en certaines hormones thyroïdiennes et sexuelles stéroïdiennes chez l'enfant à l'âge de 7 ans.

- L'exposition au chlordécone est associée à des modifications hormonales dans une relation dose-effet non monotone.

Le chlordécone est un perturbateur endocrinien reconnu qui possède des propriétés hormonales *in vitro* et *in vivo*, notamment oestrogéniques et progestagéniques. La période de développement *in utero* est une fenêtre temporelle de vulnérabilité reconnue au cours de laquelle les perturbateurs endocriniens sont susceptibles d'exercer des effets néfastes, parfois dimorphe, à des moments ultérieurs de la vie.

La cohorte mère-enfant TIMOUN a été mise en place en Guadeloupe pour étudier l'impact des expositions maternelles et foetales au chlordécone sur le déroulement de la grossesse et la santé des enfants.

L'objectif de la présente étude était celle d'étudier chez des enfants nés de la cohorte TIMOUN la relation entre l'exposition prénatale *in utero* au chlordécone et les niveaux circulants d'hormones thyroïdiennes, métaboliques et sexuelles stéroïdiennes à l'âge de sept ans.

Les concentrations de chlordécone ont été mesurées dans le sang de cordon à l'accouchement à l'aide de la chromatographie en phase gazeuse à haute résolution (HRGC) couplée à la détection par capture d'électrons. Les hormones thyroïdiennes (thyroïdostimuline ou TSH, triiodothyronine libre ou FT3, thyroxine libre ou FT4), métaboliques (insulin growth factor ou IGF1, leptine, adiponectine) et sexuelles stéroïdiennes

(déhydroépiandrostérone ou DHEA, testostérone totale ou TT, dihydrotestostérone ou DHT, estradiol ou E2) ont été déterminés dans le sang des mêmes enfants à l'âge de 7 ans à l'aide de méthodes immunométriques, radioimmunologiques et de HRGC couplée à la détection par spectrométrie de masse. Les associations entre l'exposition prénatale au chlordécone et les concentrations circulantes en hormones ont été estimées par régression linéaire ou logistique tout en prenant compte des facteurs de confusion.

Les mesures de chlordécone dans le sang de cordon et d'hormones à l'âge de 7 ans étaient disponibles simultanément chez 124 garçons et 161 filles. Le chlordécone était détectable ($> 0,06 \mu\text{g/L}$) chez 75 % des enfants avec une concentration médiane de $0,2 \mu\text{g/L}$. Les distributions des concentrations hormonales correspondaient à celles attendues tenant compte de l'âge des enfants. Le troisième quartile de l'exposition prénatale au chlordécone ($0,2$ à $0,4 \mu\text{g/L}$) comparé au quartile le plus bas (référence, $< 0,07 \mu\text{g/L}$) a été retrouvé associé à des concentrations plus élevées en TSH chez les filles et en DHEA, TT et DHT chez les garçons et chez les filles. Une analyse non linéaire des données par régression utilisant des fonctions splines a montré la présence d'une composante non linéaire significative pour la TSH chez les filles et la DHEA et la DHT chez les garçons. En conclusion, l'exposition prénatale *in utero* au chlordécone a été retrouvée associée à des taux augmentés de certaines hormones thyroïdiennes et sexuelles à l'âge de 7 ans selon une relation dose-réponse non monotone en U inversée. De telles relations ont déjà été observées dans des études expérimentales concernant des perturbateurs endocriniens mais rarement dans des études épidémiologiques. La signification comme les conséquences de ces observations à une étape ultérieure de la vie sont inconnues.

Références bibliographiques :

Ayhan G et coll. 2021. In Utero Chlordecone Exposure and Thyroid, Metabolic, and Sex-Steroid Hormones at the Age of Seven Years: A Study From the TIMOUN Mother-Child Cohort in Guadeloupe. *Front Endocrinol (Lausanne)*.12:771641

Costet N et coll. 2022. Prenatal and childhood exposure to chlordecone and adiposity of seven-year-old children in the Timoun mother-child cohort study in Guadeloupe (French West Indies). *Environ Health*. 21(1):42

Desrochers-Couture M et coll. 2022. Visuospatial processing and fine motor function among 7-years old Guadeloupe children pre- and postnatally exposed to the organochlorine pesticide chlordecone. *Neurotoxicology*.88:208-215

Legoff L, et coll.. 2021. In utero exposure to chlordecone affects histone modifications and activates LINE-1 in cord blood. *Life Sci Alliance*.4(6):e202000944

Saint-Amour D et coll. Visual contrast sensitivity in school-age Guadeloupean children exposed to chlordecone. *Neurotoxicology*. 2020 May;78:195-201

Exposition au chlordécone et mortalité par cause dans une cohorte de travailleurs d'exploitations bananières

Juliette Gambaretti¹, Christine Barul¹, Johan Spinosi², Léah Michineau¹, Luc Multigner¹, Danièle Luce^{1*}

¹ Inserm, Univ Rennes, EHESP, Irset (Institut de recherche en santé, environnement et travail) - UMR_S 1085, F-97110 Pointe-à-Pitre, France

² Santé Publique France, Lyon, France

* daniele.luce@inserm.fr

Mots-clés :

Mortalité
Cohorte
Travailleurs
Chlordécone
Pesticides

Messages-clés :

- Des associations entre exposition au chlordécone et mortalité par hémopathie maligne, cancer colorectal et maladie d'Alzheimer ont été mises en évidence, avec des relations dose-réponse.
- Les travailleurs de cette cohorte ont été exposés à un grand nombre de pesticides et les expositions sont fortement corrélées.
- Les associations observées ne doivent pas s'interpréter comme résultant exclusivement de l'exposition au chlordécone, mais plutôt comme les conséquences d'une exposition à un cocktail de pesticides, pendant la période d'utilisation du chlordécone.

Nous avons reconstitué une cohorte de travailleurs agricoles (chefs d'exploitations et salariés) ayant travaillé entre 1973 et 1993, période d'utilisation du chlordécone, dans une exploitation bananière en Martinique et en Guadeloupe. Une première analyse a montré que la mortalité par cause dans la cohorte était globalement proche de celle de la population générale¹. L'objectif est ici d'étudier la mortalité par cause de ces travailleurs en fonction des niveaux d'exposition au chlordécone.

Les expositions au chlordécone et aux autres pesticides (substances actives phytopharmaceutiques) ont été estimées à partir de la matrice culture-expositions de la banane développée par Santé Publique France². Cette matrice fournit pour chaque pesticide et pour chaque année une probabilité, une fréquence et une intensité d'utilisation. Le croisement de la matrice avec les données des sujets de la cohorte a permis de calculer pour le chlordécone et les autres pesticides un indice d'exposition cumulée. L'analyse de la mortalité porte sur

la période 1981-2017 et sur 11221 travailleurs. Les hazard-ratios (HR) et leurs intervalles de confiance à 95%, ajustés sur la région (Guadeloupe/Martinique), le sexe et le statut d'emploi (salarié/chef d'exploitation) ont été estimés à l'aide de modèles de Cox, avec l'âge comme variable de temps.

Des associations positives ont été observées entre exposition cumulée au chlordécone et mortalité par hémopathie maligne et par cancer colorectal, avec des HR significativement augmentés dans la catégorie d'exposition la plus élevée et une tendance linéaire significative. Un risque augmenté de décès par maladie d'Alzheimer a également été observé dans le dernier quartile d'exposition cumulée, avec une tendance linéaire à la limite de la significativité. L'association avec le cancer colorectal est limitée aux hommes, alors que l'association avec la maladie d'Alzheimer est plus marquée chez les femmes. Aucune association positive n'a été observée avec les autres causes de décès.

Entre 1973 et 1993, outre le chlordécone, 40 autres pesticides ont été utilisés dans la culture de la banane. Les expositions aux différents pesticides sont fortement corrélées. Ces fortes corrélations posent des problèmes pour évaluer l'effet propre du chlordécone avec les méthodes statistiques traditionnelles, en raison de problèmes de colinéarité. Les associations observées ne doivent donc pas s'interpréter comme résultant exclusivement de l'exposition au chlordécone, mais plutôt comme les conséquences d'une exposition à un mélange de pesticides. Des approches statistiques plus adaptées à la prise en compte d'expositions multiples fortement corrélées, notamment des modèles hiérarchiques bayésiens, pourraient permettre d'avancer dans la compréhension du rôle de chaque substance.

Références bibliographiques :

1. Luce D, Dugas J, Vaidie A, Michineau L, El-Yamani M, Multigner L. A cohort study of banana plantation workers in the French West Indies: first mortality analysis (2000-2015). *Environ Sci Pollut Res Int.* 2020 Nov;27(33):41014-41022
2. Gentil C, Spinosi J, Cahour L, Chaperon L, El Yamani M (2018). Document technique pour la construction de la matrice culture exposition de la Banane dessert aux Antilles. Projet Matphyto DOM. Saint-Maurice : Santé Publique France, 44 p

Exposition au chlordécone et hépatite chronique active d'origine alcoolique : un exemple de causalité inversée

Moana Gélou-Siméon^{1,2*}, Marie-Josée Lafrance¹, Leah Michineau³, Eric Saillard¹, Claude Emond^{4,5}, Michel Samson³, Luc Multigner³

¹ Service d'Hépatogastroentérologie, CHU de la Guadeloupe, Pointe à Pitre, Guadeloupe, France

² CHU de la Guadeloupe, Univ Antilles, Inserm, École des Hautes Études en Santé Publique (EHESP), Irset (Institut de recherche en santé, environnement et travail) -UMR_S 1085, Pointe à Pitre, Guadeloupe, France

³ Univ Rennes, Inserm, École des Hautes Études en Santé Publique (EHESP), Irset (Institut de recherche en santé, environnement et travail) -UMR_S 1085, Rennes, France

⁴ Département de Santé Environnementale et Santé au Travail, École de Santé publique, Université de Montréal, Montréal, Québec, Canada

⁵ PKSH Inc., Mascouche, Québec, Canada

* moana.simeon@chu-guadeloupe.fr

Mots-clés :

Chlordécone
Hépatite chronique active
Cirrhose
Alcool
Causalité inversée

Messages-clés :

- L'exposition au chlordécone, estimée par sa concentration dans le plasma, est associée à un moindre risque apparent de progression de l'hépatite chronique d'origine alcoolique.

- La maladie hépatique induit des profonds changements dans la pharmacocinétique du chlordécone, pouvant ainsi expliquer cette association par un biais de causalité inversée.

Une des caractéristiques du chlordécone (CD) est de s'accumuler principalement dans le foie. Chez le rongeur, l'exposition chronique au CD induit l'apparition de tumeurs hépatiques. De plus, le CD présente la propriété remarquable, à des doses non toxiques, de potentialiser fortement, jusqu'à 6700 %, l'action délétère d'agents hépatotoxiques chimiques. Dans un contexte de pollution environnementale au chlordécone, on ignore si la contamination des populations est de nature à favoriser la vitesse d'évolution des hépatites chroniques actives, induites par la consommation d'alcool, vers une cirrhose, voire un carcinome hépato-cellulaire.

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'influence de l'exposition au chlordécone sur la vitesse de progression de la fibrose hépatique chez des patients présentant une hépatite chronique active d'origine alcoolique.

182 patients présentant une hépatite chronique active d'origine alcoolique ont été inclus. La fibrose hépatique a été évaluée par des tests non invasifs (élastométrie et tests sanguins) éventuellement complétés par une biopsie hépatique en cas de discordance, puis classée selon le score METAVIR. L'exposition au chlordécone a été déterminée à l'inclusion des patients par dosage plasmatique à l'aide la chromatographie gazeuse à haute résolution couplée à la détection par capture d'électrons. Le délai entre la date de début de consommation d'alcool et la date du stade de fibrose le plus avancé a été calculé. Les données ont été analysées en utilisant un modèle de régression de Cox avec prise en compte de facteurs de confusion permettant le calcul du rapport de risque (Hazard Ratio ou HR) et son intervalle de confiance à 95% (IC95%). Tenant compte du rôle clé du foie dans le métabolisme du chlordécone, un modèle pharmacocinétique-pharmacodynamique

(PK/PD) humain a été employé pour simuler les concentrations plasmatiques en fonction des changements induits par la fibrose hépatique.

La moyenne géométrique ajusté en chlordécone plasmatique a été retrouvée significativement plus faible chez les patients présentant un stade avancé de fibrose (cirrhose ou stade F4) (0,25 µg/L) que chez les patients sans fibrose détectable (F0) (0,11 µg/L). Le risque de progression vers un stade avancé de fibrose a été retrouvé significativement diminué chez les patients présentant une concentration plasmatique en chlordécone élevée (HR = 0,57, IC 95% = 0,33-1,00 et 0,58, 0,35-0,99 pour le deuxième et troisième tertile comparé au premier tertile). La simulation PK/PD montre que les changements induits par la fibrose au stade cirrhose (diminution du taux de l'albumine plasmatique, diminution de la fonction biliaire...) sont de nature à modifier de manière importante les concentrations plasmatiques à l'équilibre du chlordécone.

En conclusion, bien que les résultats montrent un effet protecteur apparent du chlordécone dans la progression fibrosante de l'hépatite chronique d'origine alcoolique, les modifications pharmacocinétiques induites par la maladie hépatique suggèrent fortement que la direction des associations puisse être expliquée par un biais de causalité inversée.

Références bibliographiques :

Curtis Lr et coll. 1979. Potentiation of the hepatotoxicity of carbon tetrachloride following preexposure to chlordecone (kepone) in the male rat. *Toxicol Appl Pharmacol.* 51:283-93

Mehendale HM. 1989. Mechanism of the lethal interaction of chlordecone and CCl₄ at non-toxic doses. *Toxicol Lett.*;49: 215-41.

Tabet E et coll. 2018. Chlordecone potentiates auto-immune hepatitis and promotes brain entry

of MHV3 during viral hepatitis in mouse models. *Toxicol Lett.* 299:129-36.

Tabet E et coll. 2016. Chlordecone potentiates hepatic fibrosis in chronic liver injury induced by carbon tetrachloride in mice. *Toxicol Lett.* 255:1-10.

Emond C & Multigner L. 2022. Chlordecone: development of a physiologically based pharmacokinetic tool to support human health risks assessments. *Arch Toxicol.* 96:1009-19.

Réévaluation des risques sanitaires prenant en compte la mise à jour des valeurs sanitaires de référence (externe et interne) du chlordécone

Julien Jean^{1*}, Juliana De Oliveira Mota¹, Josselin Rety¹, Ngoc-Du Luong¹, Fernando Aguilar¹, Paule Vasseur², David Makowski³, Pierre-Marie Badot⁴, Erwan Engel⁵, Alain-Claude Roudot⁶, Jean-Luc Volatier¹, Bruno Le Bizec⁷

¹ Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses), Direction de l'évaluation des risques

² Université de Lorraine, UMR 7360 CNRS - UFR Sciences Fondamentales et Appliquées

³ Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE)

⁴ Université de Franche-Comté, UMR 6249 Chrono-environnement, CNRS

⁵ Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE), UR370 QuaPA, Equipe Micro-contaminants, Arômes et Sciences Séparatives (MASS)

⁶ Université de Bretagne Occidentale

⁷ Oniris, INRAE, LABERCA, 44300 Nantes, France

* julien.jean@anses.fr

Mots-clés :

Exposition alimentaire
Chlordéconémie
Risque sanitaire
Toxicologie
Antilles

Messages-clés :

De nouveaux éléments ont justifié la mise à jour de l'évaluation des risques liés à l'exposition au chlordécone de la population antillaise. Ce nouveau bilan atteste que pour une part non négligeable de la population, le risque sanitaire ne peut pas être écarté et qu'il est nécessaire de poursuivre les efforts de diminution des expositions au chlordécone, notamment par voie alimentaire. Le respect des trois recommandations de consommation établies par l'Anses en 2007 permet de limiter les dépassements de la VTR externe, tout comme une meilleure maîtrise de la contamination des œufs issus des circuits informels.

Contexte

En 2017, l'Anses a réalisé une évaluation des risques sanitaires (ERS) liés à l'exposition au chlordécone via la consommation alimentaire¹. En 2021, l'Anses a revu à la baisse la valeur toxicologique de référence pour l'exposition chronique externe (VTR externe² de 0,17 µg (kg pc)⁻¹j⁻¹ au regard des nouvelles données toxicologiques disponibles³. Elle a défini également la première VTR interne (0,4 µg L⁻¹ de plasma) sur la base du raccourcissement du temps de gestation chez la femme⁴. Ces nouvelles valeurs de référence impliquent de revoir les conclusions apportées à la caractérisation des risques telles que présentées en 2017 dans le rapport de l'étude Kannari¹. L'Anses a également évalué l'efficacité des

recommandations de consommation qu'elle avait établies en 2007 :

- Limiter à 4 fois par semaine la consommation de produits de la pêche en provenance du circuit court (pêche de loisir, de subsistance ou achat sur le bord des routes).
- Limiter à 2 fois par semaine la consommation de patates douces, ignames et dachines issus des jardins familiaux en zone réputée contaminée (ZC)
- Ne pas consommer de produits d'eau douce issus des zones d'interdiction de pêche définies par arrêté préfectoral.

Matériels et méthodes

Deux approches ont été suivies de manière indépendante pour caractériser les risques liés à l'exposition de la population antillaise au chlordécone.

D'une part, les concentrations sériques en chlordécone des 742 adultes du volet « imprégnation » de l'étude Kannari ont été interprétées vis-à-vis de la VTR interne.

D'autre part, les expositions alimentaires, estimées à partir des données de consommation de l'enquête Kannari (2209 adultes et enfants) et des données de contamination des aliments (plans de contrôle et de surveillance (PS/PC) et autres campagnes de prélèvements) ont été actualisées à partir de données supplémentaires issues des PS/PC des aliments réalisés de 2015 à 2020. Les spécificités de chaque île ont été prises en compte (consommation, approvisionnement, cartographie des zones terrestres, maritimes, dulcicoles, etc.). Pour tenir compte des incertitudes analytiques, des hypothèses de censure (basses et hautes) ont été considérées. Les expositions externes ainsi obtenues ont ensuite été comparées à la nouvelle VTR externe chronique. L'influence de plusieurs paramètres sur les taux de dépassement des VTR a été étudiée (âge, lieu de résidence, circuit d'approvisionnement, contribution alimentaire, etc.).

Résultats

Il est estimé que 25 % [18 - 32]^a de la population adulte martiniquaise et environ 14 % [9 - 20] de la population adulte guadeloupéenne présentent des teneurs sériques^b en chlordécone supérieures à la VTR chronique interne de 0,4 µg L⁻¹.

Du point de vue de l'exposition alimentaire, entre 2% et 12% (dépendant de l'île ou de

l'âge des individus) des expositions externes estimées sont supérieures à la VTR chronique externe de 0,17 µg (kg pc)⁻¹j⁻¹. Il apparait que le respect de l'ensemble des trois recommandations permet de diminuer efficacement, dans les deux îles, le pourcentage d'individus dépassant la VTR externe. Il en est de même avec une mesure entraînant une réduction importante de la contamination des œufs autoproduits en ZC.

Discussion

Si les données de contamination des aliments issus des circuits contrôlés ont été actualisées, celles relatives aux imprégnations et aux comportements alimentaires des personnes, tout comme celles associées à la contamination des aliments issus des circuits informels, sont celles de l'étude Kannari (2013-2014). Malgré des incertitudes qui limitent la portée de leur interprétation, les deux approches suivies pour évaluer les risques (soit à partir des données de chlordéconémie soit à partir des données d'exposition alimentaire) convergent et indiquent qu'il n'est pas possible d'écarter un risque sanitaire pour une part non négligeable de la population. Cette situation implique de poursuivre les efforts pour diminuer les expositions, notamment celles des personnes les plus exposées. Cela suppose de continuer à souligner auprès des populations l'importance de l'application effective de l'ensemble des trois recommandations de consommation établies par l'Anses en 2007. L'Anses recommande également aux populations élevant, à titre privé, des volailles et qui ne l'auraient pas encore fait de participer aux programmes jardins familiaux (JAFA) des Agences Régionales de Santé, lesquels permettent notamment de bénéficier d'analyses gratuites de sols et de conseils pratiques pour diminuer la

^a Intervalle de confiance à 95%

^b Dans cette expertise, les données de chlordéconémie plasmatique ou sérique sont considérées équivalentes

contamination des œufs, et réduire l'exposition associée. D'autres travaux déjà engagés (étude ChlorExpo) ou à venir (étude Kannari 2) permettront de mieux identifier d'autres leviers pour diminuer ces expositions.

Références bibliographiques :

1. Anses. 2017. « Exposition des consommateurs des Antilles au chlordécone, résultats de l'étude Kannari ». 202 p.
<https://www.anses.fr/fr/system/files/ERCA2014SA0029Ra.pdf>
2. Anses. 2021. Avis et rapport révisés relatifs aux « Valeurs sanitaires de références pour le chlordécone ». 158 p.,
<https://www.anses.fr/fr/system/files/ERCA2018SA0166Ra.pdf>
3. Legoff, L., O. Dali, S. C. D'Cruz, A. Suglia, A. Gely-Pernot, C. Hémerly, P. Y. Kernanec, A. Demmouche, C. Kervarrec, S. Tevosian, L. Multigner, and F. Smagulova. 2019. "Ovarian dysfunction following prenatal exposure to an insecticide, chlordecone, associates with altered epigenetic features." *Epigenetics and Chromatin* 12 (1).
4. Kadhel, P., C. Monfort, N. Costet, F. Rouget, J. P. Thomé, L. Multigner, and S. Cordier. 2014. "Chlordecone exposure, length of gestation, and risk of preterm birth." *American Journal of Epidemiology* 179 (5):536-544.

SESSION 2 : LES APPORTS DES SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES POUR LA CO-CONSTRUCTION DE DISPOSITIFS D'ACTION PUBLIQUE ET LEUR MISE EN ŒUVRE

Cette session visait à exposer comment, dans un contexte empreint d'incertitude (scientifique, controversé, moindre degré de maîtrise des systèmes écologiques et sociaux, etc.) et de complexité (emboîtement des échelles spatiales et temporelles de la pollution, multiplicité des acteurs concernés, etc.), l'action publique relative aux impacts économiques et sociaux de la contamination par la chlordécone peut être analysée et pensée. Dans ce complexe multi-acteurs, la définition et la mise en œuvre de l'action publique ne peuvent résulter que des seules orientations et initiatives de l'Etat. De plus, il apparaît nécessaire d'alimenter la réflexion sur les déterminants des pratiques (freins, leviers, ...), l'identification des leviers d'action et de dynamiser les innovations pour agir au quotidien.

Mots-clés : Impacts sociétaux, représentation, démocratie environnementale, processus participatifs

CONFERENCE INTRODUCTIVE – Nathalie Jas

PESTICIDES, SANTÉ ET ACTION PUBLIQUE AU PRISME DES SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES

Nathalie Jas a introduit la session 2 avec la conférence « Pesticides, santé et action publique au prisme des sciences humaines et sociales ». Nathalie Jas est chargée de recherche en histoire et sociologie des sciences et des techniques à l'INRAE, affectée à l'UMR MoISA (Montpellier Interdisciplinary Center on Sustainable Agri-Food Systems – Social and Nutritional Sciences). Elle développe des recherches socio-historiques sur les manières dont sont gouvernés les toxiques et leurs effets sanitaires et environnementaux. Elle réalise des travaux disciplinaires et pluridisciplinaires sur différentes catégories de toxiques (pesticides, perturbateurs endocriniens, additifs et contaminants alimentaires) dans des espaces français, européens et nord-américains.

Résumé :

Depuis les années 1970, les sciences humaines sociales (sciences politiques, histoire, sociologie, anthropologie, science and technology studies (STS)) ont produit à l'échelle internationale de nombreux travaux sur les manières dont l'action publique a pu, et prend en charge les effets des pesticides agricoles sur la santé humaine. Cette communication présente certains acquis de ces travaux multiples. Trois points sont développés. Premièrement, une partie de ces travaux pointent sur le fait que les effets sanitaires des pesticides sont des questions anciennes qui, dans certains pays, dont la France, ont fait l'objet d'interventions régulières de l'Etat depuis le XIX^e siècle. Deuxièmement, différents ensembles de travaux mettent en évidence que cette action publique repose sur des logiques d'accommodement qui affectent tous les niveaux d'intervention jusqu'à l'infra-réglementaire et qui ; malgré des ensembles de mesures visant à protéger la santé, conduisent structurellement à soutenir certaines formes de développement économique. Troisièmement, certains autres travaux éclairent les nombreuses difficultés rencontrées par les mobilisations pour obtenir la reconnaissance des atteintes et des réparations, le droit dans son contenu comme dans son fonctionnement se révélant particulièrement inadapté.

Comment la recherche scientifique a contribué à la gestion de la crise chlordécone aux Antilles de 2000 à 2020 et pour quels impacts ?

Anita Tonoian^{1,4}, Philippe Cattan^{1,4*}, Magalie Jannoyer², Genowefa Blundo-Canto^{3,4}

¹ Cirad, UMR TETIS, F-34398 Montpellier, France

² Cirad, DGDRD, F-97130 Capesterre-Belle-Eau, Guadeloupe, France

³ Cirad, UMR Innovation, F-34398 Montpellier, France

⁴ Univ Montpellier, F-34090 Montpellier, France

* philippe.cattan@cirad.fr

Mots-clés :

Impact
Chlordécone
Politique publique
Antilles
Crise environnementale

Messages-clés :

- Les crises environnementales entraînent des mutations sociétales profondes
- La recherche accompagne ces mutations notamment dans le champ de la prévention des contaminations, de la vulgarisation des résultats de la recherche, de l'action publique
- Au-delà de la production de connaissance, la collaboration entre parties prenantes, le renforcement de capacité, l'accessibilité des résultats scientifiques sont les principaux moteurs du changement.

Les crises environnementales représentent à la fois une préoccupation sociale et un enjeu politique, entraînant des mutations au sein des administrations et dans les rapports de force entre les diverses parties prenantes. Dans cet article, nous explorons le cas de l'adaptation de la société antillaise à la pollution par la chlordécone, un insecticide organochloré utilisé dans les bananeraies de Guadeloupe et Martinique entre 1972 et 1993. Depuis le début de la crise liée à la révélation de la pollution en l'an 2000, les scientifiques et experts ont apporté leur éclairage sur les caractéristiques et effets de la chlordécone afin d'alimenter la prise de décision des acteurs, en particulier ceux de la sphère publique. Nous abordons ici la question la contribution de la recherche à la gestion de cette crise environnementale et aux réponses des acteurs publics entre 2000 et 2020.

Cette question a été traitée en adaptant la méthode ImpresS d'évaluation rétrospective, développée par le CIRAD (Barret et al., 2017), et en analysant la contribution des projets et

produits de recherche. Dix-neuf entretiens ont été réalisés auprès d'acteurs concernés par la question du chlordécone complétés par une analyse bibliographique.

Nos résultats montrent comment la recherche a appuyé l'évolution des politiques publiques vers des visions systémiques des conséquences environnementales de la crise. En parallèle, la recherche a également vécu des changements de posture et interaction pour répondre à des enjeux et défis complexes. Trois chemins façonnent la contribution de la recherche aux politiques publiques en réponse à la crise environnementale étudiée : (1) le chemin de la prévention ; (2) le chemin de la vulgarisation ; et (3) le chemin de l'action publique. Ces trois chemins ont mené à des impacts dans les champs politiques, économiques-sanitaires et sociaux. La recherche a contribué à ces impacts en particulier en favorisant : (1) la collaboration entre différentes parties prenantes dans le processus de production de connaissances et réponses ; (2) la création ou le renforcement

de capacité techniques ; (3) l'accessibilité des résultats scientifiques à différents publics. Ces interactions ont permis de nombreuses innovations autant techniques que réglementaires ou organisationnelles. En revanche les réponses apportées par la science sont apparues moins ciblées, moins adaptées à une demande pour des solutions concrètes et applicables à court terme. Le caractère systémique de la crise chlordécone et sa complexité peut expliquer cela obligeant à des transformations plus globales, mais peut-être plus durables et profondes, compte tenu de la diversité des impacts observés.

Références bibliographiques :

Barret, D., Blundo Canto, G., Dabat, M.-H., Devaux-Spatarakis, A., Faure, G., Hainzelin, E., Mathé, S., Temple, L., Toillier, A., Triomphe, B., 2017. Guide méthodologique ImpresS. Évaluation ex post des impacts de la recherche agronomique dans les pays du Sud. CIRAD

Légitimité et reconnaissance médiatique de la parole et des savoirs expérientiels sur la chlordécone

Sarah LABELLE^{1*}, Céline PAGANELLI^{1*}

¹ Structure d'appartenance : LERASS, Université Paul Valéry Montpellier 3

* sarah.labelle@univ-montp3.fr, celine.paganelli@univ-montp3.fr

Mots-clés :

Information de santé
Circulation des savoirs
Médias
Public
Légitimité

Messages-clés :

- Les collectifs et associations militants sur le problème public de la chlordécone constituent un public qui produit des savoirs.
- Les modes de circulation de la parole et des discours des collectifs dans les médias posent la question de la reconnaissance des savoirs produits sur la chlordécone.
- Les relations entre les collectifs militants, les scientifiques et les pouvoirs publics soulignent les limites et les enjeux liés à la place des sciences et des savoirs dans les démocraties.

Nous nous intéresserons, dans cette communication en Sciences de l'Information et de la Communication, à la production, la circulation et l'appropriation des savoirs sur la chlordécone aux Antilles en situation critique. Pour ce faire nous adoptons le concept de « public »¹ afin d'éclairer la manière dont s'exerce la citoyenneté sur cette problématique. Le « public » est alors une communauté qui se saisit d'un problème dont elle est affectée. Ici, il est composé de ceux qui ont vécu et vivent la pollution au chlordécone et qui « font enquête » en mettant en exergue certains aspects d'une situation en transformation. L'enjeu démocratique est majeur puisqu'il s'agit de penser la circulation des savoirs dans des situations sanitaires qui sont caractérisées par leur incertitude, d'une part, et qui bousculent les principes républicains de liberté et d'égalité, d'autre part.

Le traitement médiatique de la santé a connu un mouvement de bascule à partir des années 50 contribuant à la transformation de l'information médicale⁴ et des modalités de circulation des savoirs, et donnant aux questions de santé une place centrale dans l'espace médiatique. Les médias traitent de

santé notamment en exposant des « affaires » ou « scandales » qui ont pour point commun de mettre en cause la capacité des pouvoirs publics à régler les problèmes de santé⁵.

La médiatisation de la chlordécone est relativement récente³ et le sujet a été assez peu mis à la une des médias métropolitains, confortant la « marginalisation des Outremer dans l'imaginaire national »². Pourtant, la possibilité d'un non-lieu dans l'affaire judiciaire de l'empoisonnement à la chlordécone remet la question à l'agenda médiatique et conduit des citoyens, des collectifs et associations à se mobiliser. C'est dans ce contexte en tension que nous nous intéressons aux acteurs qui militent pour la reconnaissance de la responsabilité de l'État et se mobilisent pour que « la justice soit rendue ».

Dans une approche compréhensive, notre terrain est constitué de trois médias locaux (RCI, France Antilles, Martinique la première) en tant qu'ils constituent des espaces de mise en visibilité de la parole, que ce soit celle de l'État, des experts scientifiques, des associations locales et des collectifs militants. Nous resserrons l'analyse

socio-discursive sur les productions médiatiques en lien avec le « risque de non-lieu » (à partir de février 2021) et mobilisant la parole de différents collectifs (Zéro chlordécone-Zéro poison, association VIVRE...). Cette recherche exploratoire pourra être poursuivie par un élargissement des médias considérés.

Dans cette communication, nous nous questionnons en premier lieu sur la manière dont la parole de ces acteurs circule et est représentée dans les espaces médiatiques. Nous nous intéressons également à la manière dont cette parole, qui traduit un savoir d'expérience, se constitue en « savoir reconnu » sur la chlordécone. Nous portons notamment une attention particulière aux formes de crédibilité et de légitimité que les médias accordent à la parole de ces acteurs. Cela nous conduira enfin à analyser leur reconnaissance en tant que public au travers des relations entretenues avec les experts médicaux et scientifiques comme avec les pouvoirs publics.

Les conclusions de ce travail sont susceptibles de participer à la co-construction de dispositifs de participation qui favorisent le dialogue et la reconnaissance des savoirs portés par les collectifs citoyens.

Références bibliographiques :

1. Dewey, John. *Le public et ses problèmes*, Gallimard, 1915-2010.
2. Ferdinand, Malcom, et Mélissa Manglou. « Penser l'écologie politique depuis les Outre-mer français », *Écologie & politique*, vol. 63, no. 2, 2021, pp. 11-26.
3. Ferdinand, Malcom, et Erwan Molinié. « Des pesticides dans les Outre-mer français. État des lieux et perspectives », *Écologie & politique*, vol. 63, no. 2, 2021, pp. 81-94.
4. Marchetti, Dominique. *Quand la santé devient médiatique, Les logiques de production de l'information dans la presse*, Presses

universitaires de Grenoble, 2010, 192p. (collection Communication, Médias et Société).

5. Ollivier-Yaniv, Caroline. « La communication publique sanitaire à l'épreuve des controverses », *Hermès, La Revue*, vol. 73, no. 3, 2015, pp. 69-80.

Les lumières, les ombres et les absences de la constitution du chlordécone aux Antilles en problème public (1972-2022)

Malcom FERDINAND^{1*}

¹ CNRS IRISSO Paris Dauphine UMR 7170

* malcom.ferdinand@dauphine.psl.eu

Mots-clés :

Antilles
Problème public
Chlordécone
Production scientifique
Etats
Associations

Messages-clés :

- Les manières dont les politiques publiques, les scientifiques et les associations et collectifs locaux se sont saisis de la contamination au chlordécone doivent être analysées afin de repérer leurs cibles, leurs biais, et leurs zones d'ignorance.

- Cela participe d'un processus réflexif rendu possible par la sociologie des problèmes publics et la discipline.

La contamination des Antilles par le chlordécone est aujourd'hui un problème public reconnu au niveau local, national et international à travers de nombreuses publications dans les médias, les quatre plan interministériels, les programmes de recherches et les nombreuses manifestations des collectifs locaux et nationaux. Toutefois, cette reconnaissance n'a pas toujours été présente, et n'a pas toujours pris cette forme actuelle⁶. Comme nous l'enseignent la sociologie pragmatiste et *les science and technology studies*, la constitution d'une pollution environnementale en problème public est loin d'être une évidence⁵. Au contraire celle-ci relève d'une constitution sociopolitique comportant ses biais, attirant l'attention sur certains aspects plutôt que d'autres. Quelle fut donc la constitution de la contamination au CLD problème public ? Comment celle-ci a-t-elle évoluée depuis la nationalisation du problème en 2006⁷? Quels sont les thèmes et enjeux qui sont mis en avant, et quels sont ceux qui demeurent peu visibles maintenant une certaine ignorance⁴?

À partir des enquêtes de terrain menées en Martinique et en Guadeloupe (2011, 2014, 2015, 2018 et 2021), d'une analyse des

politiques publiques, d'une analyse de la couverture médiatique et d'une analyse de la production scientifique nationale, je présenterai l'historique de la constitution de la contamination au chlordécone aux Antilles. Seront alors identifiés les thèmes majeurs ciblés par les politiques publiques locales et nationales, par les collectifs et associations, ainsi que par les chercheurs et institutions de recherche. En retour, je restituerai aussi les thèmes qui restent peu investis voir ignorés par ces différents acteurs. Cette présentation permettra alors de prendre du recul, d'interroger à nouveau le sens des actions publiques et citoyennes au sujet du chlordécone, et de susciter une réflexion sur l'avenir des sociétés antillaises.

Références bibliographiques :

1. M. Ferdinand & N. Jas « Habiter colonial, pollution et production d'ignorance » in E. Henry & S. Boudia (ed), *Politiques de l'ignorance*, Paris, PUF, p.69-80.
2. M. Ferdinand, "Bridging the divide to face the Plantationocene: The chlordecone contamination and the 2009 social events in Martinique and Guadeloupe", in Murdoch, Adlai (ed), *Neoliberalism in the Caribbean and the French Antillean Uprisings of 2009*, New Brunswick:

Rutgers University Press (Critical Caribbean Series), 2021, p. 53-79.

3. M. Ferdinand, 'De l'usage du Chlordécone aux Antilles : l'égalité en question.', in Augagneur, F. & Fagnani, J. (dir.), *Revue française des affaires sociales : Enjeux environnementaux, protection sociale et inégalités sociales* 2015/1 (n°1-2), Paris, La documentation française, 2015, pp. 163-183

4. Frickel, Scott, «Absences: Methodological Note about Nothing, in Particular », *Social epistemology*, vol. 28-1, 2014, pp.86-95

5. Gusfield, Joseph. (1984), *The culture of public problems: drinking-driving and the symbolic order*. Chicago: University of Chicago Press.

6. Joly, Pierre-Benoît, *La saga du chlordécone aux Antilles Françaises, Reconstruction chronologique 1968-2008*, INRA Sciences en société, 2010, disponible sur < <http://www.observatoire-eau-martinique.fr/les-outils/base-documentaire/la-saga-du-chlordecone-aux-antilles-francaises> >.

7. Torny, Didier, « De la découverte de la pollution à la construction de la crise sanitaire », in *Impacts sanitaires de l'utilisation de la chlordécone aux Antilles françaises, recommandations pour les recherches et actions de santé publique*, [en ligne], Saint-Maurice, INSERM et INVS, octobre 2009.

Elaboration de messages de prévention sur le sujet chlordécone : mise en œuvre d'une démarche participative

Laurence Noiro^{1*}, Corinne Delamaire¹ et Marie Barrau²

¹ Direction de la prévention et de la promotion de la santé / Santé publique France, France

² Direction des régions / Santé publique France

* laurence.noiro@santerpubliquefrance.fr

Mots-clés :

Chlordécone
Messages de prévention
Défiance
Etude qualitative
Changement de comportements

Messages-clés :

- Elaboration de recommandations en vue de permettre à la population de réduire son exposition alimentaire à la chlordécone.
- Identification des freins au changement de comportements de la population dans le cadre de l'exposition à la chlordécone
- Lever la défiance de la population vis-à-vis des messages portés par l'Etat

Dans le cadre du plan chlordécone IV¹, Santé publique France (SpF) est chargée d'élaborer des recommandations en vue de permettre à la population de réduire son exposition alimentaire à la chlordécone.

SpF réunit régulièrement depuis 2020 un groupe de travail (GT) composé des principales parties prenantes impliquées sur le sujet : préfetures, agences régionales de santé, services déconcentrés de l'état, instances régionales en éducation et promotion de la santé, chercheurs, association, représentants des pêcheurs.

Ce GT a notamment recensé les actions et messages de prévention existants, ainsi que des évaluations de ces actions². Il a également établi un état des lieux des freins au changement de comportements de la population dans le cadre de l'exposition à la chlordécone. Ces freins sont principalement : du déni, un fatalisme et une défiance vis-à-vis de la parole de l'Etat ; d'autres freins concernent un attachement culturel fort à la pêche locale et aux pratiques culturelles issues du jardin créole, une compréhension insuffisante de la problématique

chlordécone et du risque sanitaire spécifique et un surcoût économique lié à d'éventuels changements de pratiques et de consommations.

Le frein « défiance vis-à-vis des messages portés par l'Etat » étant transversal à plusieurs thématiques de santé publique, le GT a réfléchi à l'intérêt de pouvoir lever cette défiance ; l'un des moyens identifiés serait de s'appuyer sur des messagers de confiance et/ou de co-construire les messages.

Afin d'étudier si, et comment, des initiatives participatives peuvent permettre d'accroître la valeur perçue d'un message, SpF a fait appel au Behaviour Insights Team (BIT), spécialisé en sciences comportementales. Il lui a été demandé de réaliser une revue sur les déterminants de la confiance vouée à des messages de prévention et les mécanismes de co-création. Par ailleurs, l'institut d'études Kantar Public a été mandaté pour mener, avec un bureau d'études local, une étude qualitative auprès de la population générale. Ses objectifs étaient : de tester des messages existants, en termes de connaissance, compréhension et acceptabilité ; d'identifier

des messagers de confiance ; d'explorer la faisabilité et le potentiel de co-crédation de messages. L'étude a reposé sur quatre réunions de groupe par île et vingt entretiens individuels par île. Une centaine d'adultes au total, équitablement répartis entre la Martinique et la Guadeloupe ont ainsi été interrogés par une psychosociologue et une anthropologue du bureau d'étude local. Une méthode aléatoire a été utilisée pour constituer une partie de l'échantillon (60%). Les critères pris en compte pour segmenter l'échantillon étaient les suivants : le genre, l'âge, le lieu d'habitation (zones urbaines et isolées, zones peu ou fortement contaminées à la chlordécone), la catégorie socio-professionnelle, le niveau de diplôme et la présence d'enfants dans le foyer. Les résultats de cette étude pourront être produits à la fin août 2022.

Les enseignements tirés de ces deux études permettront d'orienter la suite des travaux du GT. Les recommandations issues de cette démarche participative devraient être présentées à la Direction générale de la santé ainsi qu'aux préfetures et aux ARS de Martinique et de Guadeloupe courant 2023.

Références bibliographiques :

1. <https://www.guadeloupe.gouv.fr/Politiques-publiques/Risques-naturels-technologiques-et-sanitaires/Infos-chlordecone/Le-plan-Chlordecone-IV/Le-plan-Chlordecone-IV>
2. https://orsag.fr/evaluation_qualitative_programme_jafa_2014/

La réparation de l'impact du chlordécone à l'aune de la responsabilité envers les générations futures

Brigitte Facorat-Gaspard^{1*}

¹ Université des Antilles, Pôle Guadeloupe, CREDDI

* brigitte.facorat.gaspard@gmail.com

Mots-clés :

Impacts environnementaux

Dynamique spatio-temporelle

Résilience des systèmes

Gestion du bien commun

Responsabilité envers les générations futures

L'impact de l'utilisation de la molécule chlordécone est à l'origine de crises multiples d'ordre sanitaire, écologique, économique et sociétal. Face à l'ampleur des dommages causés par l'utilisation de la chlordécone, se pose la question de l'effectivité du droit de l'environnement consubstantiel au droit à la santé.

La Charte de l'environnement de 2004 a consacré des droits fondamentaux centrés sur le "droit de vivre dans un environnement équilibré et respectueux de la santé". Dès lors, chacun doit participer à la préservation et à l'amélioration de l'environnement, prévenir ou limiter les conséquences des atteintes qu'il peut porter à l'environnement et contribuer à leur réparation. Dans cet esprit, le droit de la responsabilité sociétale des entreprises (RSE) a pris corps dans l'ordonnancement normatif, impliquant les opérateurs économiques dans la responsabilisation environnementale.

« *Comment concevoir le développement durable dans les territoires de la Guadeloupe et la Martinique durablement contaminés par la chlordécone ?* ». Cette question renvoie à un axe de réflexion commun : le rapport de l'Homme à son territoire, lequel fait partie intégrante de son identité. Quelle est alors la traduction juridique et sociétale du respect des droits fondamentaux des générations

actuelles ? Quelle ingénierie juridique adopter pour la sensibilisation, la conscientisation d'une responsabilité envers les générations futures ?

La présente communication propose d'appréhender le processus de réparation au prisme de la responsabilité envers les générations futures, fondée sur la « responsabilité-projet », laquelle est définie comme « *une mission assumée collectivement pour l'avenir et non une culpabilité pour un fait passé* » (François Ost, 1996). Fruit des travaux du Séminaire « Transition écologique, RSE et compétitivité des entreprises », cet axe de réflexion se situe au carrefour du droit des régions ultrapériphériques, du droit de la RSE, du droit de la santé, du droit de l'environnement et de la sociologie juridique. La mise en oeuvre des plans chlordécone s'inscrit dans ce cadre conceptuel y compris le plan IV, motivé par « une volonté de co-construction » inhérente à la démocratie environnementale.

Comment optimiser la prévention à l'égard de la population agricole impactée par le chlordécone ? Le dépistage peut-il contribuer à une réappropriation vertueuse du territoire, au-delà des controverses judiciaires héritées de l'histoire ? Peut-on adosser au dispositif de prévention un cadre juridique de la vigilance du producteur

agricole ? Peut-on y voir une redéfinition du rôle de l'entrepreneur agricole, en sa qualité de partie prenante impliquée dans la responsabilité envers les générations actuelles et futures ?

Cette proposition de communication est centrée sur « la compétitivité de l'entreprise agricole » particulièrement confrontée à la responsabilité alimentaire et à la durabilité environnementale. Guidée par une volonté de vulgarisation scientifique, elle a pour objet de mettre en évidence "l'opérationnalité juridique" de la responsabilité-projet, alors que se joue une autre partition de la responsabilité contentieuse fondée sur les demandes d'indemnisation financière demeurées infructueuses auprès des tribunaux français.

Références bibliographiques :

Mireille DELMAS-MARTY, « Résister, responsabiliser, anticiper : ou comment humaniser la mondialisation », Seuil, 2013, 196 p.

Gaëtan MARAIN, « la juridicisation de la responsabilité sociétale de l'entreprise », Presses universitaires d'Aix-Marseille, 2016, 554 p.

Jean-Paul Markus (dir.), *Quelle responsabilité juridique envers les générations futures ?*, Thèmes & commentaires, Dalloz, 2012, 320 p.

Bertrand ZUINDEAU, « Environnement, développement durable, territoire : enjeu d'équité, enjeu de régulation », mémoire HDR, Université de Lille, 2008, 237 p.

Malcom FERDINAND, *Une écologie décoloniale. Penser l'écologie depuis le monde caribéen*, Seuil, 2019, 464 p.

SESSION 3 : LES APPORTS DE LA RECHERCHE POUR CONTRIBUER À LA DURABILITÉ DES FILIÈRES ET DES TERRITOIRES

Cette session visait à analyser les facteurs favorisant la durabilité des filières et des territoires. Il s'agissait, en s'appuyant sur des approches inter ou transdisciplinaires, de présenter des résultats de recherche intégrateurs, avec les acteurs concernés, visant à court terme à limiter les impacts environnementaux et humains de la pollution à la chlordécone des milieux (eaux continentales, côtières et marines, sol, air) et des produits de consommation associés, dans différents contextes socio-économiques antillais, et à en prévoir et réduire les risques sur le long terme.

Mots-clés : [remédiation](#), [résilience des systèmes](#), [impacts environnementaux](#), [dynamique spatio-temporelle](#), [modélisation](#), [gestion du bien commun](#)

CONFERENCE INTRODUCTIVE - Jean-Luc Chotte

UNIFIER LA DIVERSITÉ DES PORTEURS D'ENJEUX VERS DES SOLUTIONS COMMUNES : LA SCIENCE DE LA DURABILITÉ AU SERVICE DE L'ACTION

Jean-Luc chotte a introduit la session 3 par la conférence « Unifier la diversité des porteurs d'enjeux vers des solutions communes : la science de la durabilité au service de l'action ».

Jean-Luc CHOTTE est directeur de recherche à l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement), France. Son sujet de recherche porte sur l'impact des changements climatiques et de l'affectation des sols sur la dynamique de la matière organique du sol (stocks et flux) tropicaux.

Résumé :

Après deux ans de négociations, la communauté internationale, sous l'égide des Nations Unies, s'est accordée, pour la période 2015-2030, autour d'un nouvel agenda : les Objectifs de Développement Durable déclinés en 17 objectifs, 169 cibles. Ces Objectifs de Développement Durable ont plusieurs ambitions : i) ils concernent tous les pays et pas uniquement les pays en voie de développement, ii) ils favorisent les approches intersectorielles. Ces ODD doivent être considérés comme un réseau d'interactions entre cibles. Le rapport mondial sur le développement durable (*Global Sustainable Development Report 2019: The Future is Now – Science for Achieving Sustainable Development*, 2019) met en évidence l'importance de documenter les liens entre cibles des ODD. Il met par ailleurs en lumière l'importance de la science de la durabilité (*Sustainability Science*) comme l'un des 4 leviers d'actions pour l'atteinte des ODD.

La science de la durabilité ambitionne de combler le déficit entre Concept, Application et décision Politique. La science de la durabilité se définit comme une science à fort impact sociétal, qui apporte des éléments pour répondre aux besoins des populations. Elle s'intéresse aux dynamiques temporelles et spatiales des systèmes complexes et se focalise sur les interactions entre sociétés et environnement. Elle incite les scientifiques à briser les silos disciplinaires (interdisciplinarité) et à rapprocher leurs savoirs de ceux des autres acteurs du développement (intersectorialité) pour répondre aux grands défis globaux.

Dans un monde en pleine évolution et soumis à de nombreuses pressions qui affectent son fonctionnement, la résolution de problèmes complexes (e.g. changement climatique, exposome,...) appelle à unir une large diversité d'acteurs pour l'émergence de solutions adaptées et adoptées par tous. Cette nécessité interroge les postures des chercheurs dans ce dialogue science-décideurs.

Interactions entre ODD, l'union d'une large diversité d'acteur et les rôles des scientifiques en sont les éléments structurants de cette présentation illustrée par un exemple.

En savoir plus

Independent Group of Scientists appointed by the Secretary-General (2019) *Global Sustainable Development Report 2019: The Future is Now – Science for Achieving Sustainable Development*. Independent Group of Scientist appointed by the Secretary-General. New York: United Nations.

Lilian Ricaud, Maxime Thibon, Laurent Marseault Jean-Luc Chotte (2021) « Pattern Languages as a Design Tool to Tackle “Wicked Problems” in Sustainability Science », *Gaia-Ecological Perspectives for Science and Society* 30, n° 4 (2021): 237-42, <https://doi.org/10.14512/gaia.30.4.6>.

<http://pattern-sustainability-science.org/?Pattern>

Quantification des sources d'érosion dans un bassin versant antillais (bassin du Galion, Martinique, France) et lien avec les transferts de chlordécone associés

Rémi Bizeul^{1*}, Olivier Cerdan², Lai Ting Pak³, Jérôme Poulenard⁴, Fabien Arnaud⁴, Pierre Sabatier⁴, Olivier Evrard¹

¹ Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE/IPSL) – Unité Mixte de Recherche 8212 (CEA, CNRS, UVSQ), Université Paris-Saclay, 91198 Gif-Sur-Yvette Cedex, France

² BRGM ARN, 3 av. Claude Guillemin, BP 6009, 45060 Orléans, France

³ Cirad, UPR HortSys, F-97285 Le Lamentin, Martinique, France

⁴ Environnement Dynamiques et Territoires de Montagne (EDYTEM), Université Savoie Mont Blanc, CNRS, 73000 Chambéry, France

* remi.bizeul@lsce.ipsl.fr

Mots-clés :

Erosion
Traçage sédimentaire
Pratiques agricoles
Bananaeraie

Messages-clés :

- Depuis la fin des années 1990, on observe une accélération de l'érosion du fait de l'intensification des pratiques agricoles.

- Cet accroissement des flux sédimentaires et de la contribution des zones cultivées est associé à un transfert accru de la chlordécone le long du continuum terre-mer.

Le traçage sédimentaire fournit une information spatiale et temporelle sur les processus érosifs et les transferts de chlordécone associés afin de mieux identifier les zones-source et guider la mise en place de mesures de contrôle efficaces.

Entre 1972 et 1993 aux Antilles françaises (Martinique et Guadeloupe), pour lutter contre le charançon du bananier, les agriculteurs ont appliqué au pied de leurs plants de la chlordécone, un insecticide organochloré toxique. A la fin des années 1990, l'intensification des pratiques agricoles aux Antilles a entraîné une accélération de l'érosion des sols et des transferts de sédiments vers les rivières et la mer (Sabatier et al., 2021). Les auteurs de cet article ont émis l'hypothèse que l'utilisation de glyphosate comme herbicide induisait une augmentation de l'érosion des sols conduisant à une libération de la chlordécone stockée dans les sols agricoles pollués. Ces processus entraînent une remobilisation des sols contaminés et une dispersion de la contamination à la chlordécone le long du continuum terre-mer, impactant les activités humaines et polluant

les écosystèmes continentaux et marins. Ces transferts latéraux de sédiments sont fortement contrôlés par l'occupation du sol et les pratiques agricoles. L'identification des sources d'érosion des sols est donc essentielle pour lutter efficacement contre les conséquences de l'érosion sur la résurgence de la chlordécone. A partir de l'utilisation des outils du traçage sédimentaire (Collins et al., 2020), appliqués à des archives sédimentaires marines côtières et adaptés au contexte antillais, l'objectif est de modéliser l'origine des sédiments au cours du temps en fonction des différentes occupations du sol que l'on retrouve sur les bassins versants antillais: parcelles de banane et de canne à sucre, forêts, berges et glissements de terrain. Nous avons appliqué ce modèle à deux carottes sédimentaires prélevées dans le cadre d'une précédente étude (Sabatier et al., 2021) : la

première dans la baie du Galion (Martinique) et la seconde au large de la rivière Pérou (Petit Cul de Sac Marin, Guadeloupe). Les premiers résultats du modèle appliqué à la carotte prélevée dans la baie du Galion montrent une augmentation de la contribution des terres cultivées (sols des bananeraies et des champs de canne à sucre) depuis les années 1970. Cette augmentation est associée à une hausse de la concentration en chlordécone enregistrée dans les sédiments depuis la fin des années 1990 (Sabatier et al., 2021). On observe également des augmentations ponctuelles de la contribution des berges. Grâce à la datation de la carotte sédimentaire, on voit que cette érosion accrue des berges se produit lors du passage de cyclones.

Par la suite, cette méthode va être appliquée à d'autres bassins versant (et d'autres types de matériaux-cibles comme les matières en suspension) afin d'accroître la représentativité spatiale et temporelle des résultats. En couplant cette méthode à une cartographie des chemins de l'eau à travers les bassins versants et des bilans d'érosion intra-parcellaire, l'objectif final est de modéliser les dynamiques sédimentaires dans ce contexte insulaire, tropical et volcanique ainsi que les transferts de chlordécone associés le long du transect terre-mer.

Références bibliographiques :

Sabatier, P., Mottes, C., Cottin, N., Evrard, O., Comte, I., Piot, C., Gay, B., Arnaud, F., Lefevre, I., Develle, A.-L., Deffontaines, L., Plet, J., Lesueur-Jannoyer, M., Poulenard, J., 2021. Evidence of Chlordecone Resurrection by Glyphosate in French West Indies. *Environ. Sci. Technol.* 55, 2296–2306.

Collins, A.L., Blackwell, M., Boeckx, P., Chivers, C.-A., Emelko, M., Evrard, O., Foster, I., Gellis, A., Gholami, H., Granger, S., Harris, P., Horowitz, A.J., Lacey, J.P., Martinez-Carreras, N., Minella, J., Mol, L., Nosrati, K., Pulley, S., Silins, U., da Silva, Y.J., Stone, M., Tiecher, T., Upadhayay, H.R., Zhang, Y., 2020. Sediment source fingerprinting:

benchmarking recent outputs, remaining challenges and emerging themes. *J Soils Sediments* 20, 4160–4193.

Sécuriser les filières de production face à la contamination des sols : développement de stratégies de séquestration adaptées au contexte Antillais

Matthieu Delannoy^{1*}, Yves Le Roux¹, Sarra Gaspard, Agnès Fournier¹, Paméla Hartmeyer¹, Marion Huguet¹, Claire Soligot¹, Stefan Jurjanz¹, Séverine Piutti³, Guido Rychen¹, Cyril Feidt¹

¹ Université de Lorraine, INRAE, URAFPA, F-54000 Nancy, France

² Université des Antilles, Laboratoire COVACHIM-M2E, Guadeloupe, France

³ Université de Lorraine, INRAE, LAE, F-54000 Nancy, France

* matthieu.delannoy@univ-lorraine.fr

Mots-clés :

Séquestration
Chlordécone
Transfert
Biochars
Disponibilité

Messages-clés :

- La stratégie de séquestration de la chlordécone apparaît être une voie prometteuse permettant de réduire significativement le transfert de la chlordécone aux denrées.
- Générique, cette stratégie peut être mise en œuvre sur des sols multi-contaminés mais dépend de l'adéquation entre la matrice contaminée, le sol et le polluant.
- Cette stratégie permettrait une mise en œuvre locale et des approches participatives et *in situ* seront menés prochainement.
- Cette stratégie serait particulièrement adaptée pour les circuits informels et d'autoproduction.

Parmi les services écosystémiques rendus par le sol, la fonction de production est essentielle pour assurer la sécurité alimentaire des populations. Dans le contexte insulaire Antillais, ce service supporte une agriculture locale diversifiée, tant par sa production que par la taille de ses acteurs. La Chlordécone, en mettant à mal la sûreté chimique des denrées produites localement, affecte la résilience et la confiance des consommateurs en ces filières de production. Afin de restaurer cette sûreté, une voie possible serait de prévenir le transfert de ces polluants du sol au biote, qu'il soit végétal ou animal.

L'amendement des sols contaminés par des matériaux carbonés hautement poreux est une voie qui a été particulièrement investiguée ces 10 dernières années, notamment pour la chlordécone. Deux projets ANR (INSSICCA et PYROSAR) et un projet ADEME (PIEGEACHLOR) ont pour objet d'utiliser des biochars et des charbons

actifs comme source d'amendement afin de développer, d'évaluer et d'affiner des stratégies de séquestration de polluants organiques. Une évaluation multicritère (indicateurs de transfert) a permis de démontrer l'efficacité de cette technique lorsque du charbon actif est employé, permettant de réduire de plus de 92% le transfert de la chlordécone à l'animal (porc : 96%, poule : 34%), la plante (courgette : 98%) et par d'autres cibles écologiques modélisés par des tests *in vitro* (disponibilité environnementale : 93%). Par ailleurs, cette approche a démontré également son efficacité sur des sols contaminés par des PCB et PCDD/F (poule : 69% - courgette : 98% base TEQ), faisant d'elle une méthode générique face aux pollutions organochlorées. De nettes corrélations entre des essais *in vitro* et *in vivo* ($R^2 > 0.8$), montrent l'intérêt de ces tests rapides dans l'évaluation de l'efficacité de séquestration de ces matrices. Globalement, une

importance particulière des caractéristiques des matériaux (nécessité d'une surface spécifique de plus de 700 m².g⁻¹, d'une microporosité et mésoporosité) et des molécules (lipophilicité, conformation) a été démontrée.

Afin d'adapter cette stratégie aux filières Antillaises, une relocalisation tant dans sa mise en œuvre que dans la production de ces matrices est envisagée. Elle ferait d'une autre problématique Antillaise, les Sargasses, une solution par la production locale et verte de biochars. Des essais prometteurs montrent l'efficacité de ce matériau pour limiter le transfert de la chlordécone (porc : 56% *in vitro* : 76%) quand amendé sur des sols historiquement contaminés. A ce stade, une optimisation de la stratégie de séquestration (granulométrie du biochar et taux d'amendement) ainsi qu'une étude d'industrialisation de leur production sont en cours. Des essais *in situ* sont d'ores et déjà programmés sur de petites parcelles. Mêlant des approches participatives, ces parcelles permettront d'assurer l'efficacité de cette stratégie au cours du temps et d'évaluer son innocuité.

Suivant ces résultats, une voie de gestion locale et intégrée, mise en œuvre par et pour les Antillais, permettra d'être un des outils de gestion des parcelles de jardins et des petites exploitations contaminées.

Références bibliographiques :

1. El Wannay N., Le Roux Y., Fournier A., Baroudi M., Woignier T., Feidt C., Delannoy M.* (2022). Organochlorine POPs sequestration strategy by carbonaceous amendments of contaminated soils: Toward a better understanding of the transfer reduction to laying hens. *Journal of Hazardous Materials*, 434:128871.

2. Piutti S., El Wannay N., Laflotte A., Baroudi M., Caria G., Perronnet K., Jurjanz S., Slezack S., Feidt C., Delannoy M.* (2022). Assessment of an NDL-PCBs Sequestration Strategy in Soil Using Contrasted Carbonaceous Materials through In Vitro and Cucurbita pepo Assays. *Applied Sciences*, 12(8):3921.

3. Feidt C., El Wannay N., Ranguin R., Gaspard S., Baroudi M., Yacou C., Rychen G., Delannoy M.* (2021). In vitro and in vivo assessment of a CLD sequestration strategy in Nitisol using contrasted carbonaceous materials. *Environmental Geochemistry and Health*.

4. Ranguin R., Delannoy M., Yacou C., Jean-Marius C., Feidt C., Rychen G., Gaspard S.* (2021). Biochar and activated carbons preparation from invasive algae Sargassum spp. for Chlordecone availability reduction in contaminated soils. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4):105280.

5. Ranguin R., Jean-Marius C., Yacou C., Gaspard S.*, Feidt C., Rychen G., Delannoy M.* (2020). Reduction of chlordecone environmental availability by soil amendment of biochars and activated carbons from lignocellulosic biomass. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(33):41093-41104.

6. Delannoy M.*, Yehya S., Techer D., Razafitianamaharavo A., Richard A., Caria G., Baroudi M., Montarges-Pelletier E., Rychen G., Feidt C. (2018). Amendment of soil by biochars and activated carbons to reduce chlordecone bioavailability in piglets. *Chemosphere*, 210:486-494.

7. 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)np.

La méthanisation thermophile permet de dégrader la chlordécone

Perla ALNAJJAR^{1*}, Déborah MARTIN², Delphine MUSELET², Claire SOLIGOT-HOGNON¹, Stéphane PACAUD³, Cyril FEIDT¹, Pierre-Loïc SAAIDI², Yves LE ROUX^{1,3*}

¹ URAFPA, Université de Lorraine, 2 Avenue de la Forêt de Haye, 54505 Vandœuvre-Lès-Nancy, France

² UMR 8030 Génomique Métabolique, CEA, Institut de Biologie François Jacob, Genoscope, Université d'Evry Val d'Essonne, Université Paris-Saclay, Evry, France

³ Agrométhéa, Chaire industrielle-ENSAIA, 54280 Champenoux, France

* perla.alnajar@univ-lorraine.fr ; yves.leroux@univ-lorraine.fr

Mots-clés :

Chlordécone
Produits de transformation
Méthanisation
Biodégradation
Biomasse

Messages-clés :

- Cette étude a fait la preuve de concept de l'intérêt de la méthanisation dans la dégradation de la chlordécone et le traitement de la biomasse contaminée.

- La concentration de chlordécone ajoutée n'a pas affectée la production de biogaz.

- Une dégradation plus importante a été observée en conditions thermophiles (55°C) avec un taux d'abattement entre 85 et 90%, qu'en conditions mésophiles (37,5°C) avec un taux d'abattement entre 30 et 40%.

- Plusieurs produits de transformation appartenant à différentes familles (A, B et C) sont apparus en conditions mésophiles et thermophiles.

La présence avérée de la chlordécone (CLD) dans la biomasse végétale et dans les déjections des animaux pose un problème supplémentaire dans la gestion de la pollution. Il faut en effet veiller à ne pas déplacer ces matrices contaminées sur des zones non polluées tout en les valorisant. Dans cet objectif, nous avons étudié une synergie potentielle entre la valorisation énergétique de ces biomasses, avec retour au sol de la matière organique, et la dégradation de la CLD.

Les études de dégradation de la CLD ont montré que la transformation biotique de la CLD est possible et se traduit par la production de plusieurs familles de produits de transformation (PTs). Ces études mettent en évidence l'importance des conditions particulières suivantes : conditions réductrices, absence d'oxygène, ainsi que présence de micro-organismes capables de dégrader la CLD, notamment ceux produisant des corrinoïdes¹ et/ou le

coenzyme F430². Ces observations nous ont amenés à supposer que le procédé de méthanisation, qui nécessite principalement un potentiel redox inférieur ou égal à -300 mV³, l'absence d'oxygène et la présence de consortia de microorganismes pourrait se révéler une stratégie efficace pour dégrader la CLD et traiter les déchets organiques contaminés.

Afin de valider notre hypothèse, des digestats d'origine animale et végétale issus de méthaniseurs ont été supplémentés à 20 mg.L⁻¹ de CLD et incubés en conditions mésophiles (37,5°C) et thermophiles (55°C), respectivement. Une approche sacrificielle avec différents temps d'incubation (T0, T5, T20 et T40 jours) a été mise en place pour suivre la dégradation de la CLD et l'apparition de ses PTs. Le suivi de la CLD et de ses principaux PTs dans les digestats a été réalisée via un protocole d'extraction QuEChERS optimisé pour ces matrices suivi d'une double analyse en GC-MS et LC-HRMS.

Les résultats obtenus ont montré que les concentrations en CLD introduites n'ont pas eu d'impact sur la production de biogaz, comme en témoigne une production similaire de méthane entre les digestats dopés en CLD et les témoins sans CLD. Après 40 jours d'incubation, des taux d'abattement de la CLD compris entre 30 et 40% en conditions mésophiles et entre 85 et 90% en conditions thermophiles ont été obtenus. En parallèle, différents PTs ont été détectés et/ou quantifiés, notamment la monohydrochlorodécone A1 et deux dihydrochlorodécones, appartenant à la famille des hydrochlorodécones ($C_{10}Cl_{10-n}O_2H_{2+n}$), le pentachloroindène B1 et les deux régio-isomères B3-B4, appartenant à la famille des polychloroindènes ($C_9Cl_{6-n}H_{2+n}$). Des polychloroindèncarboxyliques (famille C, $C_{10}Cl_{5-n}H_{3+n}O_2$) ont été également identifiés. Ce profil de PTs ressemble à celui observé dans le cadre des dégradations microbiologiques^{4,5}.

La présente étude montre qu'un digestat anaérobie produisant du biogaz peut simultanément induire une transformation efficace de la CLD en différentes familles de PTs. Une deuxième expérience est en cours pour étudier le devenir du chlordécol, également présent dans les déjections des animaux contaminés, et des principaux PTs obtenus (A1 et B1). Le traitement de la biomasse contaminée par un procédé de méthanisation émerge donc comme une solution possible aux problématiques environnementales et énergétiques des Antilles.

Références bibliographiques :

1. Barbance, A., Della-Negra, O., Chaussonnerie, S., Delmas, V., Muselet, D., Ugarte, E., Saaidi, P.-L., Weissenbach, J., Fischer, C., Le Paslier, D., & Fonknechten, N. (2020). Genetic Analysis of *Citrobacter* sp.86 Reveals Involvement of Corrinoids in Chlordecone and Lindane Biotransformations. *Frontiers in Microbiology*, 11.

2. Jablonski, P. E., Pheasant, D. J., & Ferry, J. G. (1996). Conversion of Kepone by *Methanosarcina thermophila*. *FEMS Microbiology Letters*, 139(2-3), 169-173.

3. Moletta, R. (1993) La digestion anaérobie : du plus petit au plus grand, *Biofutur*, janvier, pp. 16-25.

4. Chevallier, M. L., Della-Negra, O., Chaussonnerie, S., Barbance, A., Muselet, D., Lagarde, F., Darii, E., Ugarte, E., Lescop, E., Fonknechten, N., Weissenbach, J., Woignier, T., Gallard, J.-F., Vuilleumier, S., Imfeld, G., Le Paslier, D., & Saaidi, P.-L. (2019). Natural Chlordecone Degradation Revealed by Numerous Transformation Products Characterized in Key French West Indies Environmental Compartments. *Environmental Science & Technology*, 53(11), 6133-6143.

5. Lomheim, L., Laquitaine, L., Rambinaising, S., Flick, R., Starostine, A., Jean-Marius, C., Edwards, E. A., & Gaspard, S. (2020). Evidence for extensive anaerobic dechlorination and transformation of the pesticide chlordecone ($C_{10}Cl_{10}$) by indigenous microbes in microcosms from Guadeloupe soil. *PloS One*, 15(4), e0231219.

Pollution du sol, contamination animale et production de ressources alimentaires saines

Pablo Andres-Domenech¹, Valérie Angeon², [Samuel Bates](mailto:samuel.bates@univ-angers.fr)³, Colombine Lesage⁴

¹ AgroParisTech, BETA, Nancy, France

² INRAE, UR Ecodéveloppement, Avignon, France

³ Université des Antilles, LC2S ; Université d'Angers, GRANE, France

⁴ INRAE, UE PEYI, Guadeloupe, France

* samuel.bates@univ-angers.fr

Mots-clés :

Elevage
Viabilité
Règles de décision
Limite Maximales de Résidus
Sécurité sanitaire des denrées alimentaires

Messages-clés :

- Identification des conditions de viabilité des systèmes d'élevages antillais.
- Elaboration d'un modèle mathématique de viabilité intégrant deux dimensions : sanitaire (chaque animal abattu doit respecter la Limite Maximale de Résidus) et économique (l'éleveur doit dégager un revenu satisfaisant).
- Etude de la compatibilité des contraintes sanitaires et économiques par espèce et pratique d'élevage.
- Implications en termes de stratégies et d'actions pour les éleveurs et les institutions publiques.

La récurrence des crises alimentaires et sanitaires (maladies contagieuses, contamination des aliments, utilisation de pesticides etc.) invite à adopter une approche intégrée de la santé des écosystèmes, des animaux et des hommes (One Health³). Notre objectif est d'analyser les conditions de viabilité des exploitations dans le contexte de pollution des sols par la chlordécone (CLD). Il s'agit de s'interroger sur la capacité des systèmes de production existant à fournir une offre alimentaire saine. La prise de conscience sociétale et les exigences associées ainsi que les évolutions réglementaires s'imposent en effet aux chefs d'exploitations agricoles et modifient les conditions de production dans les territoires antillais.

Cette communication s'intéresse aux conséquences économiques et biotechniques des modifications de la LMR sur la production issue des élevages locaux. Il est possible d'initier un processus de décontamination des animaux^{4,5} avant la

mise en marché des produits dérivés. Cela passe par une réduction voire non-exposition à la CLD des espèces exploitées qui impliquent des coûts additionnels de gestion des animaux. La réalité observée de ces systèmes montre que le taux de contamination des zones de pâturage n'est pas nécessairement connu. De même, il existe des asymétries d'information entre les différents acteurs de la chaîne de production quant au taux de contamination initial des animaux¹.

Dans cette communication, nous proposons une modélisation de la viabilité² des systèmes d'élevage antillais. Le raisonnement se tient en deux temps : *(i)* une analyse comparative de la viabilité sanitaire par espèces (bovine, caprine, ovine, porcine) et par pratiques (pâturage libre, stabulation, stratégie mixte), *(ii)* une analyse comparative de la viabilité économique des stratégies d'élevage possibles.

Nos résultats sont de trois ordres :

- (1) Nous déterminons le temps et le coût de la décontamination par espèce et par pratique ;
- (2) Nous analysons s'il est possible de respecter à la fois la contrainte sanitaire et le calendrier actuel de gestion technico-économique des animaux ;
- (3) Nous calculons le coût d'adaptation des agriculteurs à des évolutions plus restrictives de LMR.

Les résultats obtenus permettent d'examiner la compatibilité du respect des contraintes et des calendriers biotechniques et économiques. Par ailleurs, ils permettent d'identifier le choix des espèces, ainsi que les stratégies d'élevage, qui peuvent rendre cette compatibilité possible. En l'occurrence, les résultats produits décrivent la manière dont l'exploitation est pilotée par l'éleveur (âge limite de début d'engraissement des animaux par espèce, âge d'abattage, date optimale de début du processus de décontamination) afin d'être assuré de mettre sur le marché une viande saine, tout en obtenant une valorisation économique suffisante. Ils définissent les pratiques à privilégier (pâturage, stabulation, mixte), les espèces à considérer et la gamme de coûts associés. En cela, les règles de décision édictées sont éclairantes pour l'action publique.

Références bibliographiques :

1. Andrés-Domenech P., Angeon V., Bates S., Lesage C. (2022): Soil Pollution, Animal Contamination and Safe Food Production: The Case of Chlordecone Pollution in the French West Indies, *working paper*.
2. Aubin J.-P., Bayen A., Saint-Pierre P. (2011): *Viability Theory. New Directions*, Springer-Verlag.
3. Espinosa R., Tago D., Treich N. (2020): Infectious Diseases and Meat Production. *Environmental & Resource Economics*, 76, 1019-1044.

4. Fourcot A. (2020) : *Distribution et élimination de la chlordécone chez les animaux d'élevage - modélisation des processus*, Thèse de doctorat en Sciences agronomiques. Université de Lorraine.

5. Lastel M.-L. (2015) : *Chlordécone et filières animales antillaises : de la distribution tissulaire aux stratégies de décontamination chez les ruminants*. Thèse de doctorat en Sciences agronomiques. Université de Lorraine

Evaluation des conditions d'efficacité du programme « Jardins familiaux » (EVAJafa)

Olivier AROMATARIO^{1*}, Laura COMA², Charles CROISIC², Emeline ANTOINE³, Marie BARRAU⁴, Pascal JEHANNIN⁴, Jacques ROSINE⁴, Linda CAMBON¹

¹ Université de Bordeaux, unité INSERM U1219, BPH, équipe PHARES

² Université des Antilles

³ CHU de Bordeaux

⁴ Santé publique France

* olivier.aromatario@u-bordeaux.fr

Mots-clés :

Chlordécone
Prévention
Contamination
Evaluation réaliste
Efficacité

Messages-clés :

- Mise en évidence des conditions d'efficacité du programme Jafa
- Implication de l'ensemble des parties prenantes (institutions, professionnels de terrain, population)
- Construction de recommandations en termes de réorientations, transférabilité et de mise à l'échelle

Contexte

Pour tenter de résoudre les problèmes causés par la pollution au chlordécone aux Antilles, les acteurs guadeloupéens et martiniquais ont mis un œuvre dès 2007 un programme appelé « Jardins familiaux » (Jafa) destiné à réduire les risques d'exposition au chlordécone des auto-consommateurs de produit animaux et végétaux issus de jardin familiaux pollués. Ce programme d'évaluation « EVAJafa » vise à étudier les conditions d'efficacité du programme Jafa.

Objectif: En 2022-2023, comprendre sur quoi, comment et dans quelles conditions fonctionne l'intervention Jafa. Cette analyse permettra de produire des recommandations en termes de transférabilité, de mise à l'échelle et de réorientation.

Méthode

Cette étude développe les méthodes de l'évaluation réaliste¹. Cette méthode d'évaluation est issue du courant des *theory-driven evaluations*^{2,3} permettant de

comprendre par une analyse contributive⁴ les conditions d'efficacité des interventions complexes⁵. Elle permet de mettre en évidence grâce à son caractère itératif les chaînes causales: Contexte-Mécanismes-Effets (CME) regroupées en théories de moyenne portée (TMPs).

4 étapes :

- Étape 1 : Élaboration des hypothèses : revue de portée « scoping-review » dans la littérature internationale, séminaire + focus group + entretiens (non et semi-directifs) avec les parties prenantes (professionnels et population).
- Étape 2 : 1^{er} recueil et analyse des données
- Étape 3 : Second recueil et analyse des données (Caractère itératif: Affinage des TMPs)
- Étape 4 : ajuster les TMPs et élaborer des recommandations

Résultats

Au cours de l'étape 2, nous pouvons d'ores et déjà présenter des résultats

préliminaires (qui seront précisés en décembre) à partir de la revue de la littérature internationale, des premiers séminaires + entretiens avec les professionnels et les focus groupes + entretiens avec la population dans les deux îles. Ainsi sont mis en évidence pour la population et les professionnels interrogés en Guadeloupe et en Martinique des contextes externes (Ce) à JAFA c'est-à-dire qui ne sont pas liés directement au programme ou internes (Ci) c'est à dire liés directement aux activités du programme. Ces contextes peuvent favoriser (+) ou réduire (-) son efficacité (ex. : Ci+ : organisation de discussions et activités de groupes « pour agir ensemble », Ce- : manque de sensibilisation des professionnels de santé, ...). Au total en cumulé sur les deux îles nous avons mis en évidence auprès de la population : 44 Ce-, 25 Ce+, 18 Ci- et 41 Ci+. Certains mécanismes ont également émergé et permettent de commencer à formuler des chaînes causales hypothétiques qui seront à préciser et valider dans les étapes suivantes. (Ex. : La mauvaise connaissance de la qualité des sources d'eau (« contexte ») entraîne une incertitude et une méfiance (« mécanisme ») qui freine l'application des recommandations du programme sur la consommation d'eau y compris du robinet (« effet »)). Lors de la présentation de décembre, l'étape 2 sera achevée et permettra de présenter les résultats en distinguant Guadeloupe et Martinique après un second tour (caractère itératif) de séminaires et focus groupes sur les deux îles.

Références bibliographiques :

1. Pawson R, Tilley N. Realistic evaluation. London ; Thousand Oaks, Calif: Sage; 1997. 235 p.
2. Chen HT. Theory-driven evaluations. Nachdr. Newbury Park, Calif.: Sage; 1996. 326 p.
3. Weiss CH. Theory-based evaluation: Past, present, and future. New Directions for Evaluation. sept 1997;1997(76):41-55.

4. Mayne J. Addressing Attribution Through Contribution Analysis: Using Performance Measures Sensibly. Canadian Journal of Program Evaluation. 1 janv 2001;16:1-24.

5. Moore GF, Audrey S, Barker M, Bond L, Bonell C, Hardeman W, et al. Process evaluation of complex interventions: Medical Research Council guidance. BMJ. 19 mars 2015;350(mar196):h1258-h1258.

Validation *in situ* d'un Outil d'Aide à la Décision pour la maîtrise de la teneur en chlordécone des carcasses bovines issues de zones contaminées

Cyril Feidt¹, [Agnes Fournier](mailto:agnes.fournier@univ-lorraine.fr)^{1*}, Carole Beugnet², Aurore Fourcot³, Stéphanie Jock⁴, Yves Le Roux¹, Philippe Pelonde², Manuel Pezeron⁴, Mailie Saint-Hilaire⁵, Thony Samut⁴, Luc Seguin⁶, Guido Rychen¹

¹ URAFPA, Université de Lorraine, INRAE, F-54000 Nancy

² Groupement de Défense Sanitaire de Martinique, F-97232 Le Lamentin

³ GIP-FCIP de l'académie de Martinique, F-97200 Fort-de-France

⁴ SANIGWA F-97122 Baie Mahault

⁵ Institut Pasteur de Guadeloupe, F-97139 Les Abymes

⁶ DAAF, F-97108 Basse-Terre

* agnes.fournier@univ-lorraine.fr

Mots-clés :

Outil d'aide à la décision
« Vers le zéro chlordécone »
Modélisation
Filière bovine

Messages-clés :

Un Outil d'Aide à la Décision :

- issu de la modélisation PBPK du devenir de la CLD chez le ruminant
- au service des filières animales pour évaluer *in vivo* la contamination des bovins en zones contaminées
- permettant de garantir une carcasse conforme lorsque les conditions de décontamination sont respectées
- porté par un collectif d'acteurs fédérés en Guadeloupe et en Martinique.

La contamination des sols par la chlordécone (CLD) affaiblit les filières antillaises d'élevage en zone contaminée. Le premier impact est subi par les éleveurs qui sont sous la menace d'une saisie des carcasses non conformes. Certains éleveurs ont fait le choix d'arrêter leur activité sans que des installations prennent le relais ce qui fragilise le volume de production et d'abattage local. Enfin, l'existence de carcasses contaminées affecte la confiance des consommateurs dans les produits locaux. Ces éléments vont à l'encontre d'objectifs sociétaux que sont le maintien des services écosystémiques fournis par l'élevage et le développement d'une alimentation locale et saine.

La contamination des animaux dépend de l'état de contamination de l'environnement et des pratiques d'élevage. Son déterminisme est donc complexe. Or il est essentiel que les

éleveurs puissent connaître le statut de contamination de leurs animaux avant de prendre la décision ou non de les envoyer à l'abattoir.

Il est donc nécessaire de disposer d'un Outil d'Aide à la Décision (OAD) permettant de garantir en amont cette conformité. Pour cela, un OAD a été développé par des chercheurs de l'université de Lorraine, à partir d'une modélisation PBPK du devenir de la CLD chez le bovin adulte. Cet OAD est basé sur deux principaux éléments :

- la capacité d'élimination de la CLD par le bovin,
- la prédictibilité des concentrations tissulaires d'intérêt à partir de la teneur sérique.

Ainsi, à partir d'une prise de sang initiale, un temps de décontamination peut être estimé

en fonction de la concentration finale souhaitée. Comme la conformité des carasses est évaluée à partir du Tissu Adipeux Péri Rénal (TAPR), c'est ce tissu qui a été retenu. L'objectif était donc de recruter des animaux contaminés en Guadeloupe et en Martinique, de réaliser une prise de sang initiale puis de mettre ces animaux en décontamination. Celle-ci s'est déroulée soit chez l'éleveur détenteur, soit en plaçant l'animal en pension dans une exploitation non contaminée. Lorsque la décontamination avait lieu chez le détenteur, trois options étaient possibles : sur une parcelle non contaminée de l'exploitation, en bâtiment en dur avec affouragement ou dans un box mobile avec affouragement.

Le dispositif de terrain s'est appuyé sur une collaboration étroite entre de nombreux acteurs : des éleveurs volontaires recrutés par le GDSM ou Sanigwa, les DAAF prenant notamment en charge les analyses de TAPR, l'Institut Pasteur pour les analyses sanguines. Un comité de pilotage incluant la DGAL et les deux préfectures a été mis en place.

Entre mai 2021 et juin 2022, près de 40 élevages ont participé à la démarche avec 70 bovins ayant suivi le processus complet. Tous les bovins abattus étaient conformes (teneur en CLD dans le TAPR $< 27 \mu\text{g.kg}^{-1}$) et environ la moitié avait une teneur en CLD non quantifiable, en adéquation avec une démarche vers le zéro chlordécone.

Les conclusions de cette étude serviront à la validation du modèle PBPK chez le bovin et à l'évaluation de la capacité opérationnelle de l'OAD amenant à discuter de sa potentielle mise en œuvre à grande échelle.

CONFERENCE HISTORIQUE – Gregory Wilson

WORKER HEALTH AND THE KEPONE DISASTER IN VIRGINIA, USA

Le mardi 12 décembre, Gregory Wilson, historien américain, a donné une conférence en visio-conférence intitulée « Health and the Kepone Disaster in Virginia ». Cette conférence a été sous-titrée en directe.

Dr. Gregory Wilson specializes in modern United States history, with interests including environmental history, politics, and public history. His scholarly work regularly utilizes oral history as a methodology. He is a principal investigator on the transnational research project “Deindustrialization and the Politics of Our Time” (DePOT). Funded through Canada’s Social Science and Humanities Research Council, the partnership of over 35 institutions and organizations across North America and Europe examines the historical roots and lived experience of deindustrialization and the political responses to it. His books include *Communities Left Behind*, which examined public policy related to poverty and deindustrialization, *Above the Shots*, an oral history of the shootings at Kent State University in 1970, and *Ohio: A History of the Buckeye State*. His latest book is *Poison Powder: The Kepone Disaster in Virginia and Its Legacy*, due in March 2023. The book analyzes the pesticide disaster in Virginia in 1975 that left workers ill and poisoned the environment from Kepone (chlordecone), and the responses to it. The book also highlights the international connections to the disaster, with an emphasis on the use of the pesticide in the Guadeloupe and Martinique.

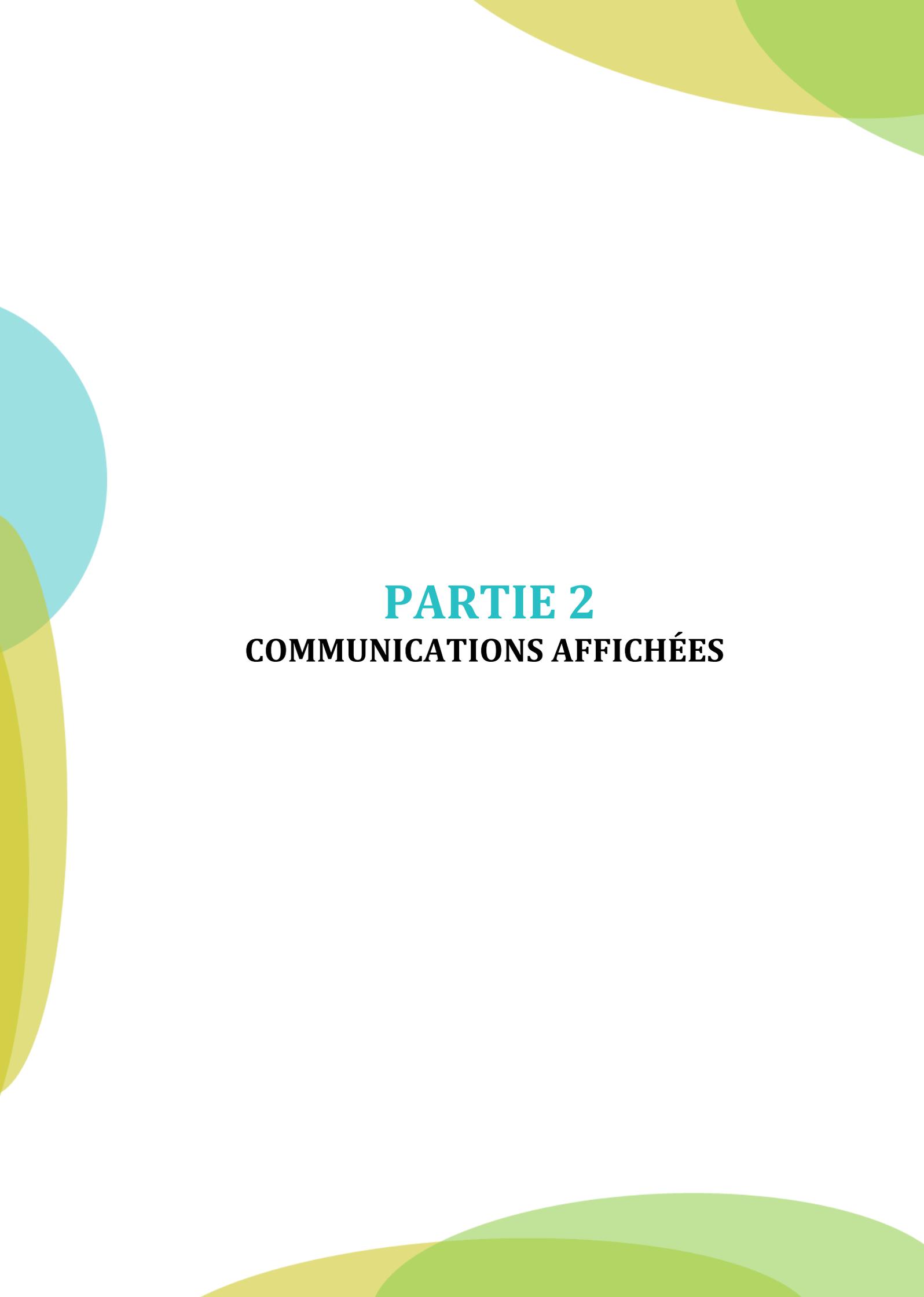
Résumé :

This talk is based on my upcoming book, *Book: Poison Powder: The Kepone Disaster in Virginia and its Legacy*, due out in March 2023. The talk will focus on the health aspects of the disaster in Virginia, with some connections to the current crisis in the Caribbean. In the summer of 1975, government officials diagnosed a number of male workers suffering from what turned out to be poisoning from the pesticide they made at Life Science Products in Hopewell, Virginia. Kepone was the pesticide, and workers suffered varying degrees of involuntary tremors and bodily pain after exposure. Following news of the poisoned workers, further investigations revealed Kepone contamination in the James River and other nearby tributaries. Life Science manufactured Kepone under contract with Allied Chemical, and investigations showed that Allied, too, had dumped Kepone waste in the waterways when they produced the pesticide from 1966 to 1974. For the Life Science workers, at the time, health authorities and the men themselves feared they would be sterile and develop cancer. Fortunately, with medical intervention, they were able to deplete all or virtually all of the Kepone. No study has yet been conducted to measure the incidence of cancers among Kepone workers. These workers were spared a worse fate because of another factor rarely present in many environmental histories, active state intervention. While some officials dragged their feet, several government authorities as well as doctors and scientists acted boldly to stop further Kepone poisoning, discover a way to treat the workers and address environmental contamination. While Kepone still shows up in some fish species, levels have dropped significantly since the 1970s. The crisis led to new state and federal laws regarding toxic substances. Lawsuits brought some relief to workers and the seafood industry, and they also resulted in an endowment that continues to make a positive impact on Virginia’s environment today. While Virginia avoided a worse fate, the same can’t be said elsewhere. There is a critical public health crisis on the islands of Guadeloupe and Martinique, where chlordecone’s heavy use against the banana root borer poi-

soned the land, drinking water, and fishing stocks. The events in Virginia and in the Caribbean led the United Nations to ban the pesticide in 2009 under the provisions of the Stockholm Convention on POPs, persistent organic pollutants. The islands shared some of the same experiences with Hopewell. There were negligent state officials and irresponsible corporate actions, as well as uncertainty and ignorance among regulators. Workers and residents both suffered from Kepone poisoning, and the compound damaged the environment. After the crisis, legal and regulatory measures ensued. Yet there are important differences as well. Hopewell's workers were white, working-class men who mostly got better, and for them some elements of the state mobilized to help. Hopewellians were spared widespread poisoning as well. Kepone remains in the James, but the river is healthier. In the Caribbean, chlordane reflected a long history of racism and colonialism, and the French government in Paris favored growers and ignored the islanders' pleas for help for some two decades. Tragically, the poison contaminated large swaths of soil and water that affected the wider population.

Pour en savoir plus :

G. Wilson, 2023. Kepone powder – The Kepone disaster in Virginia and its legacy. University of Georgia Press, 2023.



PARTIE 2

COMMUNICATIONS AFFICHÉES

Dynamique de la chlordécone dans le profil du sol. Conséquences sur la gestion du risque d'exposition

Antoine RICHARD¹, Jorge SIERRA¹

¹Unité Agrosystèmes Tropicaux, INRAE Antilles-Guyane

*antoine.richard@inrae.fr

Mots-clés :

Contamination des cultures
Modélisation
Rétention de CLD
Seuil de teneur maximale
Système de culture

Messages-clés :

- La teneur en CLD dans la zone explorée par les racines peut être relativement élevée quand la teneur en surface atteint les seuils de mise en culture du sol.
- Il y a une nécessité d'une caractérisation plus précise du profil des sols pollués.
- Il est urgent de déterminer le niveau de pollution des parcelles ayant subi une reconversion banane-maraîchage à partir des années 1990.

La plupart des recherches conduites sur la chlordécone (CLD) dans les sols antillais, ainsi que leurs livrables (carte de contamination, seuils de teneurs maximales pour leur mise en culture), considèrent uniquement la couche 0-30 cm sous l'hypothèse qu'elle concentre la majorité du système racinaire¹. Pourtant, les cultures qui pourraient être cultivées sous le seuil de 1 mg/kg en surface (p.ex. giraumon, courgette, concombre) possèdent 30-40% de leur biomasse racinaire au-dessous de 30 cm de profondeur², ce qui pourrait accroître le risque de contamination si les teneurs en CLD sont encore importantes dans la couche sous-superficielle.

L'objectif de cette étude a été d'analyser la dynamique de la CLD dans les couches 0-30 cm et 30-60 cm des nitisols et des andosols afin d'évaluer ce risque. Nous avons couplé les modèles WISORCH modifié (dynamique de la CLD incluant son lessivage et dégradation)^{3,4} et MorGwanik (dynamique de la matière organique du sol, MOS)⁵, pour simuler l'évolution des teneurs en CLD en fonction du temps et des pratiques des agriculteurs. Les résultats des simulations ont été comparés avec des mesures récentes de CLD réalisées dans les deux couches de dix

sols de Guadeloupe.

Les simulations ont montré que les teneurs en CLD de la couche 0-30 cm de nitisols (faible rétention de CLD) peuvent descendre sous le seuil de 1 mg/kg dans la période 2015-2030 (moyenne 0.96 mg/kg en 2022), tandis que les teneurs dans la couche 30-60 cm sont en moyenne 40% plus grandes (1.38 mg/kg en 2022)⁴. Cette situation s'accroît suite à un changement du système de culture incluant un travail du sol plus intensif, entraînant une diminution du stock de MOS⁵ et de la rétention de la CLD (p.ex. remplacement de la banane par le maraîchage au début des années 1990). Cela n'est pas le cas des andosols ayant une rétention plus forte, et un transfert de CLD plus faible dans le profil³. L'inclusion d'une dégradation de la CLD à un taux de 0.15% par an⁴ accélère légèrement la perte de CLD sans affecter sensiblement les relations décrites entre les sols et les couches.

Des mesures de CLD réalisées en 2022 confirment les résultats des simulations. Les teneurs en CLD dans le profil des andosols est actuellement bien plus grande que les seuils établis pour la mise en place des cultures les plus sensibles à la contamination (3.5 et 2.3 mg/kg pour les couches 0-30 cm

et 30-60 cm, respectivement). En revanche, une partie des nitisols présentent déjà des teneurs inférieures à 1 mg/kg dans la couche 0-30 cm (moyenne 0.89 mg/kg), alors que les teneurs dans la couche 30-60 cm sont 25% supérieures (1.10 mg/kg), et peuvent donc contribuer à la contamination des cultures sensibles.

Nos résultats indiquent que la réduction de l'exposition à la CLD nécessite d'une caractérisation plus précise des sols pollués, notamment des nitisols, incluant la couche 30-60 cm dans les campagnes de mesure. Aussi, il y a une urgence pour caractériser les parcelles des agriculteurs qui ont entamé une reconversion de la banane au maraîchage dans les années 1990, car la perte probable de MOS a pu accélérer le transfert de CLD vers la couche sous-superficielle.

Références bibliographiques :

1. Clostre F, Lesueur-Jannoyer M, Achard R, Letourmy P, Cabidoche YM, Cattan P, 2014. Decision support tool for soil sampling of heterogeneous pesticide (chlordecone) pollution. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 21: 1980-1992.
2. Lott DE, Hammond VE, 2013. Vegetable and fruit production. NebGuide No G2189. University of Nebraska. <https://extensionpublications.unl.edu/assets/pdf/g2189.pdf>
3. Cabidoche YM, Achard R, Cattan P, Clermont Dauphin C, Massat F, Sansoulet J, 2009. Long-term pollution by chlordecone of tropical volcanic soils in the French West Indies: a simple leaching model accounts for current residue. *Environ. Pollut.* 157: 1697-1705.
4. Sierra J, Richard A, 2021. Modeling the temporal dynamics of chlordecone in the profile of tropical polluted soils as affected by land use change. *AIMS Environ. Sci.* 8: 304-320.
5. Sierra J, Causeret J, Diman JL, Publicol M., Desfontaines L., Cavalier A., Chopin P, 2015. Observed and predicted changes in soil carbon stocks under export and diversified agriculture in the Caribbean. The case study of Guadeloupe. *Agric. Ecosyst. Environ.* 213: 252-264.

Mise en évidence de l'impact des traitements thermiques sur les teneurs en Chlordécone contenues dans les aliments et les sols

Déborah MARTIN¹, Yoann DEVRIENDT-RENAULT², Thierry GUERIN³, Alexandre BAYLET⁴, Felix MASSAT⁴, [Julien PARINET](mailto:julien.parinet@anses.fr)^{2*}

¹ Génomique Métabolique, Genoscope, Institut François Jacob, CEA, CNRS, Univ Evry, Université Paris-Saclay, Evry, France

² Unité Pesticides et Biotoxines Marines, Laboratoire Sécurité des Aliments, ANSES, 94 701 Maisons-Alfort

³ Direction Stratégie et Programmes, ANSES, 94 701 Maisons-Alfort

⁴ Laboratoire de la Drôme, 26 000 Valence

* julien.parinet@anses.fr

Mots-clés :

Chlordécone
Traitements thermiques
Aliments
Sols

Messages-clés :

Les traitements thermiques (four, micro-ondes) permettent de faire baisser les teneurs en Chlordécone, voire d'éliminer la molécule contenue dans diverses matrices alimentaires et les sols.

La Chlordécone (CLD) est un pesticide organochloré ($C_{10}Cl_{10}O/C_{10}Cl_{10}O_2H_2$) très employé aux Antilles Françaises jusque dans les années 1993. La CLD a contaminé les sols, les rivières, le milieu marin côtier et de ce fait des concentrations importantes ont été retrouvées dans divers organismes vivants (bovins, caprins...) qui sont consommés localement, notamment au travers de réseaux informels (ANR INSSICCA, www.inssicca.com). Face à cette situation, des solutions originales doivent être trouvées pour limiter autant que faire se peut la contamination des denrées alimentaires telles que consommées tout en préservant les us et coutumes locales. C'est ainsi qu'en 2020 un travail de recherche a été mené au sein de l'Anses pour évaluer si les traitements thermiques (four, poêle, micro-ondes) pouvaient permettre de diminuer les teneurs en CLD dans diverses matrices animales et donc l'exposition à cette molécule (Martin *et al.*, 2020). Dans ce travail ont été évalués les « processing factors » pour divers couples matrice/processus thermique. Il est apparu que le traitement par les micro-ondes appliqués à des matrices bovines « naturellement » contaminées en CLD permettait de faire baisser de façon

importante la teneur en CLD de la matrice. Une recherche des éventuels sous-produits de la CLD produits par l'impact des micro-ondes a été réalisée par spectrométrie de masse haute résolution et des approches dites « non-ciblées », sans pour autant en détecter. Par ailleurs, du fait du caractère très particulier de la contamination ubiquitaire de tout l'écosystème antillais par la CLD, une expérimentation sur l'impact du traitement par les micro-ondes de deux types de sols (nitisol et andosol) « naturellement » contaminés par la CLD a été menée de manière concluante.

Références bibliographiques :

Duvall, D.S., Rubey, W.A., 1976. Laboratory evaluation of high-temperature destruction of kepone and related pesticides. Environmental Protection Technology Series, US EPA report EPA-600/2-76

299. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=910168Y2.PDF>

Martin, D., Lobo, F., Lavison-Bompard, G., Guérin, T., Parinet, J., 2020. Effect of home cooking processes on chlordecone content in beef and investigation of its by-products and metabolites by HPLC-HRMS/MS. Environment International, 144, 106077.

L'ingestion de sol, un déterminant clé de l'exposition au chlordécone des porcs élevés en plein air aux Antilles

Claire COLLAS^{1*}, Jean-Luc GOURDINE², David BERAMICE³, Paméla HARTMEYER¹, Pierre-Marie BADOT⁴, Cyril FEIDT¹, Stefan JURJANZ¹

¹ URAFPA, Université de Lorraine, INRAE, 54000 Nancy

² UR-ASSET, INRAE Centre Antilles-Guyane, 97170 Petit-Bourg

³ UE-PTEA, INRAE Centre Antilles-Guyane, 97170 Petit-Bourg

⁴ Laboratoire Chrono-environnement, Université de Bourgogne Franche-Comté, CNRS, 25030 Besançon Cedex

* claire.collas@univ-lorraine.fr

Mots-clés :

Elevage
Ingestion de sol
Comportement alimentaire
Couvert végétal
Exposition

Messages-clés :

- Les porcs en plein air ingèrent en moyenne plus de 400 g de sol par 100 kg de poids corporel.
- Si le sol est fortement contaminé en chlordécone, une faible ingestion de sol peut résulter en des concentrations tissulaires des porcs supérieures à la limite maximale de résidus.
- Les pratiques d'élevage en plein air doivent être adaptées pour limiter l'exposition des animaux au chlordécone.

L'ingestion de sol peut exposer les animaux élevés en plein air à des polluants environnementaux comme le chlordécone. Des études récentes en conditions antillaises ont caractérisé l'exposition des bovins via la quantité de sol ingérée^{1,2,3}. Cependant, l'ingestion de sol est très peu décrite chez les porcs alors que leur comportement de fouissage suggère qu'elle pourrait être élevée. Bien que les porcs hautement productifs soient souvent élevés en intérieur, l'élevage en plein air constitue une pratique courante dans les systèmes d'agriculture de subsistance notamment aux Antilles. Ainsi, une évaluation de l'ingestion de sol par le porc en conditions antillaises est indispensable pour maîtriser leur exposition au chlordécone en zone contaminée. L'expérience a duré 8 semaines (2 d'adaptation, 6 de mesures) avec 40 porcs en croissance de race Créole de Guadeloupe ou Large White assignés à 5 traitements dont 3 traitements sur parcours en plein air : herbe haute HH (>60 jours de repousse), herbe courte HC (35 jours de repousse), patate

douce PD (champ de patate douce), et 2 traitements en bâtiment en loges individuelles : bâtiment herbe BH (régime identique au traitement HH) et bâtiment patates BP (régime identique au traitement PD sans les parties aériennes des patates et végétation herbacée du parcours). Les 24 porcs en plein air ont changé de parc à chaque nouvelle semaine de mesures. Les teneurs en titane (marqueur du sol) et en chrome (marqueur de production fécale) des échantillons de fèces, végétation et sol ont été utilisées pour estimer les ingestions de sol individuelles quotidiennes. En bâtiment, les ingestions de sol étaient très faibles, en moyenne 8,8 g de sol sec pour 100 kg de poids vif (PV) ce qui est cohérent avec les hypothèses. Pour les 3 traitements en plein air, la moyenne, le 10e et le 90e percentiles étaient respectivement de 440, 200 et 726 g de sol sec pour 100 kg PV, sans différence significative entre les 3 traitements ou les 2 races. Une analyse d'images a permis d'évaluer l'impact de l'activité des porcs sur le couvert végétal au cours du temps⁴. Des

observations des porcs ont montré un comportement de fouissage plus important sur le traitement PD vs HH et HC sans répercussion sur les ingestions de sol. Des simulations de contamination en chlordécone du tissu adipeux périrénal des porcs suite à l'ingestion de sol contaminé ont été réalisées et comparées à la limite maximale de résidus (LMR). Bien que les plus fortes contaminations du sol (>0,1 mg CLD/kg) résultent en des concentrations tissulaires supérieures à la LMR même pour des ingestions de sol relativement faibles (180 à 220 g/100 kg PV), des simulations considérant une plus faible contamination du sol (<0,02 mg CLD/kg) résultent en des carcasses conformes y compris avec des ingestions de sol assez élevées (660 à 790 g/100 kg PV). Ces résultats montrent qu'adapter la gestion du pâturage peut permettre de limiter efficacement l'ingestion de sol par les porcs et l'impact d'un environnement contaminé sur la durabilité des systèmes porcins.

Références bibliographiques :

1. Jurjanz S, Collas C, Lastel ML, 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, 1363-1371.
2. Collas C, Mahieu M, Tricheur A, Crini N, Badot P-M, Archimède H, Rychen G, Feidt C, Jurjanz S. 2019. Cattle exposure to chlordécone through soil intake. The case-study of tropical grazing practices in the French West Indies. *Science of The Total Environment* 668, 161-170.
3. Collas C, Mahieu M, Badot P-M, Crini N, Rychen G, Feidt C, Jurjanz S. 2020. Dynamics of soil ingestion by growing bulls during grazing on a high sward height in the French West Indies. *Scientific Reports* 10, 17231.
4. Mahieu M, Arquet R, Tricheur A, Collas C, Jurjanz S. 2019. Suivi du pâturage avec un appareil photo grand public et des logiciels libres : méthode et validation. *Fourrages* 240, 335-340.

Modélisation toxicocinétique de la chlordécone basée sur la physiologie chez la poule pondeuse

Joachim Thiebaut¹, Cyril Feidt¹, Paméla Hartmeyer¹, Agnès Fournier¹

¹ URAFPA, Université de Lorraine, INRAE, 2 avenue de la Forêt de Haye, 54500 Vandoeuvre-lès-Nancy, France
* joachim.thiebaut@univ-lorraine.fr

Mots-clés :

Modélisation
PBPK
Toxicocinétique
Prédiction
Œuf

La contamination durable des sols Antillais par la chlordécone (CLD), entraîne un risque d'exposition particulier pour les habitants produisant leur propre nourriture et pratiquant le don¹, ce qui concerne en particulier les petits détenteurs de volailles.

La consommation d'œufs, évaluée à 60 g par jour, représente un risque de transfert de contaminant de l'environnement vers l'homme important. La poule est en effet un animal géophage (ingurgitation de cailloux et de terre) ce qui l'expose à la CLD. Les mécanismes physiologiques d'élaboration de l'œuf expliquent une forte décharge de CLD vers le jaune. En effet, il existe une voie de transfert lipidique (médium de transport important des organochlorés dans l'organisme) directe entre le foie (organe le plus contaminé) et l'œuf. Ainsi, une étude menée par la FREDON Martinique sur l'entretien par des volailles d'un verger contaminé¹ à hauteur de 1,7 mg CLD.kg⁻¹ de sol relevait une contamination de 950 µg.kg⁻¹ des œufs, bien au-delà de la LMR.

Ces phénomènes peuvent être à l'origine de fortes expositions dans les élevages de particuliers¹ car la consommation d'œuf peut être plus élevée³ et les pratiques d'élevage peuvent augmenter la consommation de sol par les volailles⁴.

Maîtriser le risque de remontée des

contaminants vers le consommateur nécessite de comprendre le comportement et de pouvoir prédire le transfert de ces molécules vers l'œuf.

Cependant, la distribution de la chlordécone n'est pas uniforme dans l'organisme de la poule pondeuse, ainsi, le foie est en moyenne 13 fois plus contaminé que le muscle et 6 fois plus que le gras^{4,5}. Afin de maîtriser la contamination en CLD des différents tissus et organes, il est nécessaire de pouvoir prédire la concentration de CLD au cours du temps dans chaque organe en fonction du statut physiologique des animaux (taux de ponte, état d'engraissement...).

Il semble donc pertinent au vu de ces deux considérations de développer un modèle basé sur la physiologie ou *Physiologically Based Pharmacokinetic model (PBPK)*. Il s'agit d'un modèle dont les compartiments et les flux représentent respectivement des organes et des mécanismes physiologiques réels (ponte, croissance).

Ce modèle, permet notamment de déterminer, en fonction du stade physiologique de la poule, de son taux de ponte, de son état d'engraissement ou encore de son poids vif, la concentration maximale en contaminant du sol sur laquelle peut être élevée une poule sans risque de dépassement de la LMR. Couplé à un modèle d'ingestion de

sol développé par ailleurs ainsi qu'à une étude de l'impact de pratiques limitant le risque (nettoyage des mangeoires, poulailler surélevé par rapport au sol, enherbement, application d'un séquestrant à l'horizon de surface du sol), ce modèle pourrait conduire à un outil de pilotage de l'élevage de volaille en plein air en zone contaminée à destination du programme JAFA. Son domaine de validité pourrait par ailleurs être élargi à d'autres molécules organochlorées.

Références bibliographiques :

1. Anses, 2017. KANNARI, Exposition des consommateurs des Antilles au chlordécone, résultats de l'étude Kannari, 202p.
2. Clostre *et al.*, 2013. Cinétiques de contamination et de décontamination de canards par la chlordécone pendant le contrôle biologique des adventices dans un verger de goyaviers. Rapport technique, 37p.
3. Dubuisson *et al.*, 2007. Impact of subsistence production on the management options to reduce food exposure of the Martinican population to chlordecone. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 49 (1), 5-16.
4. Jurjanz *et al.*, 2020. Control of Poultry Contamination in Chlordecone-Contaminated Areas of the French West Indies, *Environmental Science and Pollution Research* 27, no 33 : 41117-21.
5. Jondreville *et al.*, 2014. Kinetic Study of Chlordecone Orally given to Laying Hens (*Gallus Domesticus*), *Chemosphere* 114 : 275-81.

Modélisation PBPK du transfert de la chlordécone chez le ruminant adulte

Agnès FOURNIER^{1*}, Aurore FOURCOT¹, Jean-Luc GOURDINE³, Guido RYCHEN¹, Cyril FEIDT¹

¹ URAFPA, Université de Lorraine, INRAE, F-54000 Nancy

² GIP-FCIP de l'académie de Martinique, F-97200 Fort-de-France

³ ASSET, INRAE, F-97170 Petit-Bourg

* agnes.fournier@univ-lorraine.fr

Mots-clés :

Transfert
Modèle PBPK
Ruminant

Messages-clés :

- Un modèle toxicocinétique basé sur la physiologie du ruminant (ovin et bovin) a été développé pour la chlordécone.
- Un modèle qui simule bien les concentrations de chlordécone au cours temps dans les compartiments utiles à la gestion du risque.
- Un modèle déjà appliqué dans un outil d'aide à la décision en cours de validation.

Faire pâturer des ruminants sur des parcelles contaminées à la chlordécone (CLD) n'est pas sans risque. En effet, selon les conditions de pâturage et le niveau de contamination du sol, l'animal peut se contaminer et la carcasse dépasser la limite maximale de résidus. Pouvoir anticiper le transfert de la CLD chez le ruminant est donc indispensable pour aider à la gestion de ce risque.

L'ovin a été choisi pour représenter les ruminants en raison de la richesse des données expérimentales disponibles, de sa proximité physiologique avec les bovins et de l'intérêt que représente l'ovin en tant qu'animal de service aux Antilles. Ainsi sur la base de données obtenues chez la brebis adulte, un modèle pharmacocinétique à base physiologique (PBPK) a été développé sur le logiciel Berkeley Madonna (version 10.1.3.).

Un sous module d'exposition caractérisant les entrées de la CLD dans l'animal a été placé en amont du module principal. Ce dernier est constitué de trois compartiments correspondant aux trois tissus principaux consommés (foie, muscle et tissu adipeux). Ce choix est justifié par les applications liées à la sécurité alimentaire.

De plus le foie, site majeur de métabolisme de la CLD et d'excrétion vers la bile, présente les teneurs en CLD les plus élevées. Le tissu adipeux quant à lui est un compartiment indispensable à représenter car le prélèvement effectué en abattoir dans le cadre des plans de surveillance et de contrôle pour évaluer la conformité des carcasses est réalisé sur cette matrice. Les compartiments sanguins permettent de décrire la circulation générale de la CLD dans l'organisme et un compartiment « rest of the body » permet de réaliser le bilan de masse de la molécule au niveau de l'organisme. Chaque compartiment est caractérisé par sa masse physiologique, son taux d'irrigation et le coefficient de partition de la CLD, défini comme étant le ratio à l'équilibre de la concentration de la CLD dans le compartiment avec celle présente dans le sang. La CLD peut ainsi être distribuée dans chacun de ces compartiments mais également être éliminée de l'organisme sous forme inchangée dans les fèces ou via le métabolisme. Un sous module excrétion, permet de quantifier la CLD excrétée dans les fèces quotidiennement ou sur une période donnée, ainsi que la concentration obtenue

dans les fèces.

Les paramètres physiologiques et toxicocinétiques du modèle ont été calibrés à l'aide de données de la bibliographie^{1, 2, 3, 4, 5}. Seuls quelques paramètres ont été ajustés sur un jeu de données⁵. Après avoir effectué une analyse de sensibilité, une analyse Monte Carlo a été réalisée sur les paramètres considérés sensibles afin de prendre en compte la variabilité des différents paramètres du modèle et intégrer une approche de population.

La structure du modèle PBPK a permis une extrapolation au bovin en modifiant les paramètres physiologiques¹ et en utilisant une relation allométrique pour définir la clairance d'élimination. Ce modèle est actuellement en cours de validation sur le terrain pour les deux espèces et pourra à terme servir de base pour un outil d'aide à la décision pour accompagner les filières en zones contaminées par la CLD.

chlordecone distribution and elimination in ewes during daily exposure and depuration, *Chemosphere*, 277, 130340.

Références bibliographiques :

1. Lautz L.S., Dorne J.L., Oldenkamp R., Hendriks A.J., Ragas A.M.J., 2020. Generic physiologically based kinetic modelling for farm animals: Part I. Data collection of physiological parameters in swine, cattle and sheep. *Toxicol. Lett.* 319, 95–101.
2. Fournier A., Feidt C., Lastel ML., Archimède H., Thomé JP., Mahieu M., Rychen G., 2017. Toxicokinetics of chlordecone in goats: implications for risk management in French West Indies. *Chemosphere*, 171, 564-570.
3. Saint-Hilaire M., Rychen G., Thomé JP., Joaquim-Justo C., Le Roux Y., Feidt C., Fournier A., 2019. Linear toxicokinetic of chlordecone in ewe's serum. *Environmental Science and Pollution Research*.
4. Saint-Hilaire M., Fourcot A., Bousquet-Mélou A., Rychen G., Thomé JP., Parinet J., Feidt C., Fournier A., 2021. Characterization and quantification of chlordecone elimination in ewes, *Environmental Science and Pollution Research*, 87, 103698.
5. Fourcot A., Feidt C., Le Roux Y., Thomé JP., Rychen G., Fournier A., 2021. Characterization of

Modélisation toxicocinétique générique de la chlordécone chez les animaux d'élevage basée sur la physiologie

Joachim Thiebaut^{1*}, Cyril Feidt¹, Agnès Fournier¹

¹ URAFPA, Université de Lorraine, USC 340 INRAE, 2 avenue de la Forêt de Haye, 54500 Vandoeuvre-lès-Nancy, France

* joachim.thiebaut@univ-lorraine.fr

Mots-clés :

Modélisation
PBPK
Toxicocinétique
Généricité

Messages-clés :

- La modélisation PBPK permet de représenter fidèlement les mécanismes physiologiques (ponte, croissance) et de suivre l'évolution de la concentration en CLD organe par organe.
- Le développement de ce modèle se fait en grande partie par des jeux de données issues de la littérature (data mining) valorisant ainsi des données existantes.
- Ce modèle générique permet à terme de modéliser différents types de molécules sur différents organismes.
- L'intégration de ce modèle à un outil d'aide à la décision (OAD) viendra en appui des filières afin de mieux gérer les stratégies de décontamination tout en protégeant le consommateur de manière plus fiable.

La contamination environnementale par la chlordécone impose la mise en œuvre de politiques publiques destinées à protéger le consommateur et à limiter les impacts sur le biote non humain. Plusieurs espèces ont été étudiées de manière approfondie : la poule, le mouton, le porc et la vache, (Lafontaine 2017, Jondreville et al. 2014, Saint-Hilaire et al., 2019, Fourcot et al. 2020, 2021) mais la quantité de travail et de moyens déployés pour ces espèces ne peut pas être appliquée de la même façon à toutes les espèces domestiques, sauvages, aquatiques ou terrestres. Or pour mieux appréhender les transferts trophiques, sélectionner des espèces sentinelles pour la mise en place de biomonitoring environnemental il est nécessaire de comprendre ou à défaut de représenter fidèlement le devenir de la molécule chez ces organismes d'intérêt.

Pour répondre à cet enjeu, nous proposons de développer des modèles toxicocinétiques basés sur la physiologie (ou *Physiologicaly*

Based Pharmacokinetic model (PBPK) sur les espèces les plus étudiées et de concevoir ces modèles avec une entrée générique permettant de passer d'une espèce à une autre et par ce biais d'éviter d'avoir à reproduire l'ensemble des expérimentations nécessaires. Ainsi, à partir du modèle développé chez une espèce paragon, le modèle pourrait être adapté aux espèces proches d'un point de vue physiologique. L'extrapolation d'une espèce à une autre pourra se faire par modification des paramètres physiologiques et toxicocinétiques. Cette adaptation peut se faire, par la modification des volumes des tissus et de leur rythme de croissance (ajustements allométriques) et par l'obtention *in vitro* de données ciblées sur un mécanisme permettant de calibrer certains paramètres du modèle (par exemple des données *in vitro* relatives au métabolisme hépatique). Un jeu de données externe pourra être utilisé pour valider a minima le

modèle étendu.

L'objectif de ces modèles est de représenter les compartiments les plus pertinents selon l'espèce parangon considérée. De même, pourront être représentés des processus physiologiques propres à chaque espèce d'intérêt, tels que la ponte, la mue. Les travaux en cours portent sur 4 espèces parangons et un passage de l'une d'entre elles vers une espèce proche a déjà été réalisé en passant de l'ovin au bovin.

Les modèles construits pourront permettre soit de prédire le transfert de l'environnement vers le biote répondant à des enjeux d'écotoxicologie ou d'évaluation de risque pour l'Homme lorsque le biote est inclus dans la chaîne alimentaire humaine, soit de mettre en place une stratégie de biomonitoring, en estimant à partir de la contamination du biote celle de sa niche trophique.

Références bibliographiques :

Fourcot A., Feidt C., Bousquet-Mélou A., Ferran A. A., Gourdine J.-L., Bructer M., Joaquim-Justo C., Rychen G., Fournier A., 2020. Modeling chlordecone toxicokinetics data in growing pigs using a nonlinear mixed-effects approach. *Chemosphere*, 11;250:126151.

Fourcot A., Feidt C., Le Roux Y., Thomé JP., Rychen G., Fournier A., 2021. Characterization of chlordecone distribution and elimination in ewes during daily exposure and depuration, *Chemosphere*, 277, 130340.

Jondreville C., Fournier A., Mahieu M., Feidt C., Archimède H., Rychen G., 2014. Kinetic study of chlordecone orally given to laying hens (*Gallus domesticus*). *Chemosphere*, 114 (0), pp. 275-281.

Lafontaine 2017, Effets du chlordécone chez *Macrobrachium rosenbergii* : Bioaccumulation, élimination et perturbation des processus biologiques liés au système endocrinien, thèse de l'Université de Liège, 281p.

Saint-Hilaire M., Rychen G., Thomé JP., Joaquim-Justo C., Le Roux Y., Feidt C., Fournier A., 2019. Linear toxicokinetic of chlordecone in ewe's

serum. *Environmental Science and Pollution Research*, doi: 10.1007/s11356-019-05800-z

Mise en place d'un outil analytique en Guadeloupe pour le dosage de la chlordécone dans le sérum humain

Maïlie Saint-Hilaire^{1*}, Didier Plumain¹, Catherine Adam², Célia Joaquim-Justo², Gauthier Eppe³,
Stéphanie Guyomard¹, Antoine Talarmin¹

¹ Institut Pasteur de Guadeloupe, F-97139 Les Abymes

² Université de Liège, LEAE-CART, Unité FOCUS, B6C, Allée Du 6 Août, 11, 4000, Liège, Belgique

³ Université de Liège, LEAE-CART, Unité MolSys, B6C, Allée Du 6 Août, 11, 4000, Liège, Belgique

* msaint-hilaire@pasteur-guadeloupe.fr

Mots-clés :

Méthode
QuEChERS-LC-MS/MS
sérum
Humain
Local

Messages-clés :

La mise en place d'une méthode de dosage de la CLD dans le sérum humain :

- Rapide, sensible et peu coûteuse de type QuEChERS-LC-MS/MS
- Validée selon la norme 15189 et comparée avec le LEAE-CART, laboratoire de référence de dosage de la CLD dans le sérum humain
- Utilisée en routine pour le dosage de la CLD dans le sang de la population guadeloupéenne

La majeure partie des analyses chlordécone (CLD) sont réalisées en France Hexagonale. Une des mesures du PNACIV (mesure R5) est la mise en place d'une plateforme analytique au niveau local permettant le suivi de la CLD et de ses métabolites dans différentes matrices d'intérêts. L'objectif étant de réduire les délais et coûts d'analyse mais aussi d'accroître la capacité, la sensibilité et la précision des analyses. L'Institut Pasteur de la Guadeloupe (IPG) dispose d'un parc analytique et d'un personnel compétent pour mettre en place des outils analytiques de mesure de la CLD. Un des objectifs de l'IPG était donc le développement et la validation d'une méthode d'analyse de la CLD dans le sérum humain. Ce développement a été financé par l'ARS de Guadeloupe. La mise en place de la méthode a été réalisée en partenariat avec le LEAE-CART qui dispose d'une forte expérience sur l'analyse de la CLD dans le sérum humain. L'IPG a donc développé une méthode de type QuEChERS-LC-MS/MS pour l'analyse de la CLD dans le sérum humain. Cette nouvelle méthode rapide, sensible et peu coûteuse a été comparée à la méthode du LEAE-CART

utilisée en routine. 50 échantillons de volontaires ont été analysés entre le LEAE-CART et l'IPG. A l'aide d'un test statistique d'appariement des séries, aucune différence significative n'a été observée entre les résultats des deux laboratoires. La méthode est en cours d'accréditation selon la norme NF EN 15189. La limite de quantification est de 0.06 µg/L et cette méthode est actuellement utilisée en routine pour le dosage de la CLD dans le sang de la population guadeloupéenne. Cet outil analytique pourra aussi servir à différents projets de recherche autour de la santé de la population guadeloupéenne.

Références bibliographiques :

Saint-Hilaire, M., Fourcot, A., Bousquet-Mélou, A., Rychen, G., Thomé, J. P., Parinet, J., ... & Fournier, A. (2021). Characterization and quantification of chlordecone elimination in ewes. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 87, 103698.

Fourcot, A., Feidt, C., Le Roux, Y., Thomé, J. P., Rychen, G., & Fournier, A. (2021). Characterization of chlordecone distribution and elimination in ewes during daily exposure and depuration. *Chemosphere*, 277, 130340.

Saint-Hilaire, M., Inthavong, C., Bertin, T., Lavison-Bompard, G., Gu erin, T., Fournier, A., ... & 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.

Sécuriser l'élevage de poule pondeuse sur sol contaminé par des organochlorés : évaluation de stratégies d'amendement par du biochar et charbon actif

Cyril Feidt¹, Yves Le Roux¹, Agnès Fournier¹, Nadine El Wannay^{1,2}, Thierry Woignier³, Matthieu Delannoy^{1*}

¹ Université de Lorraine, INRAE, URAFPA, F-54000 Nancy, France

² Lebanese University – Faculty of Public Health-Section III, L.S.E.E., BP 246, Tripoli, Liban

³ UMR IMBE - Aix Marseille Université, CNRS, IRD, Avignon Université Campus

* matthieu.delannoy@univ-lorraine.fr

Mots-clés :

Chlordécone
Organochlorés
Séquestration
Biochar
Poule pondeuse

Messages-clés :

- Efficace et générique, la stratégie de séquestration utilisée dépend toutefois des caractéristiques de matériaux amendés et des molécules cibles
- La distribution de porosité est un facteur d'explication majeur dans la réduction observée de concentration en polluants
- Cette stratégie apparaît efficace sur les contaminants lipophiles, son efficacité suit la hiérarchie : PCDD/F lourds > PCDD/F légers > PCB 77 > PCB-NDL = CLD

Les polluant organochlorés sont particulièrement reconnus pour leur persistance et le sol apparaît comme le réservoir pérenne de ces contaminations historiques. Si la chlordécone (CLD) en est un exemple évident aux Antilles françaises, les PCB, PCDD/F en sont le pendant pour la Métropole. Particulièrement biodisponibles, ces polluants mettent à mal les systèmes d'élevage en plein air en dégradant la sûreté chimique des denrées produites. Pour diminuer l'exposition des animaux, l'amendement des sols contaminés par des matrices poreuses, comme les biochars (BC) et les charbons actifs (CA), peut s'avérer être une stratégie efficace. Actuellement, peu de littérature permet toutefois de lier l'impact des caractéristiques des polluants et des biochars sur l'efficacité de cette stratégie de séquestration.

Dans cette étude, l'efficacité respective de 3 biochars et 3 charbons actifs a été évaluée en amendant à hauteur de 2% (en masse) des sols OCDE contaminés par soit (i) de la CLD, soit (ii) un mélange de PCB et PCDD/F. Les

profils et les concentrations appliqués sur ces sols ont été choisis pour qu'ils correspondent à des cas typiques retrouvés aux Antilles françaises (pour le CLD) ou sur un site pollué métropolitain (mélange PCB et PCDD/F). Après une maturation de 3 mois ces sols ont été introduits dans l'alimentation distribuée aux poules pondeuses (à hauteur de 10%) durant 21 jours. Les œufs collectés les trois derniers jours d'exposition ont ensuite été analysés (n = 3) pour déterminer les teneurs en CLD, PCB et PCDD/F. La porosité des matériaux carbonés et les caractéristiques physico-chimiques des molécules ont ensuite été mises en relation avec les résultats obtenus.

Aucune réduction significative du transfert n'a été observée lorsque les 3 biochars ou le CA sous forme de granulés ont été utilisés. Une réduction significative a été toutefois mise en évidence quand les deux charbons actifs sous forme de poudre ont été utilisés. Cela a été d'autant plus marqué pour les PCDD/F et PCB-DL qui présentaient une réduction de 79-82% (base TEQ) dans les

œufs. Pour la CLD et les PCB-NDL, seule une légère réduction des concentrations a été obtenue avec ces charbons actifs : 26-33% et 20-72% respectivement. En mettant en relation ces résultats avec les caractéristiques des matériaux poreux et celles des molécules, cette différence peut s'expliquer principalement par la distribution de porosité des matériaux. Ainsi une corrélation positive entre la surface relative des pores entre 0-3nm et 4,4 et 20nm et la réduction des concentrations a été observées. Plus modérément les résultats s'expliquent aussi par les caractéristiques des molécules, le log de K_{ow} , la conformation des molécules illustrant la hiérarchie d'efficacité de séquestration observée : PCDD/F lourds > PCDD/F légers > PCB 77 > PCB-NDL = CLD

En synthèse, (i) les biochars ne se sont pas avérés efficaces pour réduire le transfert de polluants halogénés vers les animaux, (ii) les amendements en poudre de CA ont permis de réduire la biodisponibilité des POP présents dans le sol, et (iii) l'efficacité d'une telle stratégie dépend donc à la fois des caractéristiques de la matrice et des polluants.

Références bibliographiques :

El Wanny N., Le Roux Y., Fournier A., Baroudi M., Woignier T., Feidt C., Delannoy M.* (2022). Organochlorine POPs sequestration strategy by carbonaceous amendments of contaminated soils: Toward a better understanding of the transfer reduction to laying hens. *Journal of Hazardous Materials*, 434:128871.

Impact de la taille des particules de biochar de Sargasse sur le potentiel de séquestration de la Chlordécone chez des sols Antillais

Perrine Stephan^{1*}, Yves Le Roux¹, Sarra Gaspard², Florentin Michaux³, Cyril Feidt¹, Marion Huguet¹, Pamela Hartmeyer¹, Claire Soligot¹, Guido Rychen¹, Matthieu Delannoy^{1*}

¹ Université de Lorraine, INRAE, URAFPA, F-54000 Nancy, France

² Laboratoire COVACHIM-M2E, EA 3592, Université des Antilles, Guadeloupe, France

³ Université de Lorraine, LIBio, F-54000 Nancy, France

* perrine.stephan@univ-lorraine.fr ; matthieu.delannoy@univ-lorraine.fr

Mots-clés :

Chlordécone
Disponibilité
environnementale
Biochars
Charbons actifs
Sargasses

Messages-clés :

- Parmi les matrices carbonées préparées à partir de Sargasse, le biochar de Sargasse apparaît comme la matrice la plus efficace.
- Une réduction importante de la disponibilité environnementale de la CLD, par l'emploi de ce biochar a été observée (jusqu'à 76%).
- Cette stratégie apparaît plus efficace sur du Nitisol contaminé que sur de l'Andosol. - La réduction de la taille des particules entraîne une meilleure réduction de la disponibilité environnementale de la CLD.

Un enjeu environnemental auquel les Antilles sont confrontées, depuis quelques années, est la gestion des arrivages massifs d'algues brunes invasives : *Sargassum spp.* Ces algues impactent l'environnement, la santé des populations et l'économie des Antilles¹. Des voies de valorisation de ces algues sont à l'étude via la production de biochars et de charbons actifs de Sargasse. En effet, depuis quelques années l'utilisation de biochars et de charbons actifs comme moyen pour séquestrer des polluants liés au sol, comme la Chlordécone (CLD), est de plus en plus étudiée^{2,3}.

Cette étude vise à évaluer l'impact de la taille des particules de biochar/charbons actifs de Sargasse sur la disponibilité environnementale de la CLD présent dans du nitisol et de l'andosol ([CLD]<2,5mg/kg MS). Quatre différents types de matrices carbonées ont été testés : un charbon de Sargasse activé par acide phosphorique (SargH3PO4), un charbon de Sargasse activé à la vapeur (SargH2O), un biochar de Sargasse (ChSarg) et un charbon actif du commerce (ORBO). Pour chaque matrice

carbonée, un andosol et un nitisol contaminés à la CLD ont été amendés à hauteur de 2% avec les quatre classes de particules suivantes : <50µm ; 50-150µm ; 150-200µm et >200µm. Après quatre mois de maturation à 4±1°C, des tests de disponibilité environnementale ont été réalisés en suivant une méthode adaptée de l'ISO/DIS 16751 partie A² puis analysés par GC-MS/MS. Les résultats chez le nitisol ont montré que des particules <50µm de ChSarg ont permis une réduction de la disponibilité environnementale la plus importante et de l'ordre de 80±0,9%. Pour la matrice SargH3PO4 ce sont les classes <150µm qui entraînent la meilleure réduction (69±2,5%). Pour les deux dernières matrices aucune différence statistique n'a été observée entre les quatre classes de particules. Chez l'andosol, des particules <200µm de biochar de sargasse ont montré une meilleure réduction de la disponibilité (réduction moyenne de 43±2,5%). Pour la matrice SargH2O ce sont les classes <150µm qui se trouvent être les plus performantes. Pour ce qui est des deux dernières matrices aucun

effet statistique des particules n'a été observé.

Dans le cas du biochar de sargasse une réduction de la taille des particules inférieurs 150µm conduit à une meilleure réduction de la disponibilité du chlordécone dans l'environnement de 76±2,2% pour le nitisol et de 41±2,1% pour l'andosol. Ces résultats peuvent s'expliquer par la corrélation entre la diminution de la taille des particules de biochars et l'augmentation de la surface spécifique⁴. En outre, la puissance de séquestration de biochars/charbons actifs est, entre autres, positivement liée à la surface spécifique des biochars/charbons actifs³. Par conséquent, une diminution de la taille des particules provoquerait une augmentation du nombre de liaisons entre la surface des biochars et la CLD entraînant une immobilisation accrue des polluant. Le broyage du biochar peut également permettre d'augmenter l'accès à la porosité et conduit ainsi à une meilleure réduction de la disponibilité de la CLD.

Références bibliographiques :

1. Maréchal J-P, Hellio C, Hu C (2017) A simple, fast, and reliable method to predict Sargassum washing ashore in the Lesser Antilles. *Remote Sens Appl Soc Environ* 5:54–63.
2. Delannoy M, Yehya S, Techer D, et al (2018) Amendment of soil by biochars and activated carbons to reduce chlordecone bioavailability in piglets. *Chemosphere* 210:486–494.
3. Ranguin R, Delannoy M, Yacou C, et al (2021) Biochar and activated carbons preparation from invasive algae *Sargassum* spp. for Chlordecone availability reduction in contaminated soils. *J Environ Chem Eng* 9:105280.
4. Zheng R, Li C, Sun G, et al (2017) The influence of particle size and feedstock of biochar on the accumulation of Cd, Zn, Pb, and As by *Brassica chinensis* L. *Environ Sci Pollut Res* 24:22340–22352.

Impact du taux d'amendement de biochar de Sargasse sur la disponibilité environnementale de la chlordécone, du DDT et de ses métabolites

Perrine STEPHAN^{1*}, Farida AMUTOVA¹, Yves LE ROUX¹, Sarra GASPARD², Cyril FEIDT¹, Marion HUGUET¹, Pamela HARTMEYER¹, Claire SOLIGOT¹, Stefan JURJANZ¹, Guido RYCHEN¹, Matthieu DELANNOY^{1*}

¹ Université de Lorraine, INRAE, URAFPA, F-54000 Nancy, France

² Laboratoire COVACHIM-M2E, EA 3592, Université des Antilles, Guadeloupe, France

* perrine.stephan@univ-lorraine.fr ; matthieu.delannoy@univ-lorraine.fr

Mots-clés :

Contaminants organochlorés
Disponibilité environnementale
Biochars
Taux d'amendement
Sargasses

Messages-clés :

- Il apparaît que l'efficacité de la séquestration est liée fortement au taux d'amendement.
- Un taux minimum d'amendement de 2% de biochars de Sargasse est nécessaire pour obtenir une réduction significative de la disponibilité environnementale du DDT et de ses métabolites.
- Pour la CLD cette stratégie est significativement efficace pour l'ensemble des taux testés mais la meilleure réduction est obtenue avec 2% d'amendement.

Les biochars (BC) sont des matériaux solides obtenus par pyrolyse et dotés de caractéristiques particulières (porosité, surface spécifique) qui leur confèrent un pouvoir de séquestration¹. L'efficacité de séquestration des BC dans les sols est fonction du type de sol, des caractéristiques physiques et chimiques des BC, des molécules cibles et des conditions d'utilisation des biochars². A ce jour l'effet du taux d'amendement en biochar a été peu étudié. Dans la plupart des articles relatifs à la réhabilitation des sols, ce taux variait généralement entre 0,25% et 10%. Cette grande variabilité peut s'expliquer par l'influence d'autres paramètres tels que le type de sol et les caractéristiques des molécules cibles. En effet, pour les organochlorés, il existe des différences de caractéristiques physico-chimiques qui peuvent avoir une influence sur la performance d'un même biochar³. Or aux Antilles, les pollutions à la chlordécone, au DDT et ses métabolites sont toujours

présentes et leurs gestions représentent des enjeux environnementaux et sanitaires.

Cette étude vise à évaluer l'impact du taux d'amendement de biochar de Sargasse sur l'adsorption d'une part de la chlordécone et d'autre part du DDT (et ses métabolites), sur des sols historiquement faiblement ou fortement contaminés. Dans cette étude, un biochar de Sargasse broyé et tamisé à moins de 150µm et quatre taux d'amendement différents (0.25%, 0.5%, 1% et 2%) ont été testés. Après quatre mois de maturation, des tests de disponibilité environnementale ont été réalisés en suivant une méthode adaptée de l'ISO/DIS 16751 partie A⁴ puis analysés par GC-MS/MS.

Concernant le cas de la pollution au DDT et ses métabolites, on constate que l'augmentation du taux d'amendement entraîne une diminution de la disponibilité environnementale de ses contaminants. Cependant, pour le sol faiblement contaminé aucune différence significative n'a pu être observée. Pour le sol fortement contaminé,

seul un taux d'amendement de 2% a permis des réductions significatives allant de 36 à 58% en fonction des molécules. Pour la chlordécone, les quatre taux d'amendements ont permis une réduction significative de la disponibilité environnementale, les meilleurs résultats étant obtenus pour des taux de 1 et 2%. Ces réductions sont de 49% à 67% et varient également en fonction du type de sol testé. Ainsi, l'augmentation du taux d'amendement permet une diminution de la disponibilité environnementale des deux pesticides testés. L'augmentation de la quantité de biochar dans les sols augmente logiquement les surfaces de contact avec le sol et entraîne un piégeage plus élevé des molécules. Les écarts de résultats obtenus pour les deux types de molécules pourraient être expliqués par les différences de caractéristiques physicochimiques (logKow, polarité, ...).

Ces résultats prometteurs permettraient une prochaine application in situ afin de vérifier les réductions obtenues en conditions réelles antillaises.

Références bibliographiques :

1. Caria G, Cheviron N, De Caldas T, et al PIEGEAGE des Composés Halogénés Lipophiles Organiques Rémanents. 144
2. Gonzaga MIS, Mackowiak C, de Almeida AQ, et al (2018) Positive and negative effects of biochar from coconut husks, orange bagasse and pine wood chips on maize (*Zea mays* L.) growth and nutrition. CATENA 162:414–420.
3. University of Tennessee. « RAIS Toxicity Values and Physical Parameters Search ». The risk Assessment Information System. Consulté le 15 janvier 2022. https://rais.ornl.gov/cgi-bin/tools/TOX_search.
4. Delannoy M, Yehya S, Techer D, et al (2018) Amendment of soil by biochars and activated carbons to reduce chlordécone bioavailability in piglets. Chemosphere 210:486–494.

Les voies et dynamiques de contamination de la CLD dans les eaux de surface

Anatja Samouelian^{1*}, Lise Ponchant², Patrick Andrieux^{1et2}, Olivier Grunberger³, Antoine Richard², Marc Voltz¹

¹ Univ. Montpellier, UMR Lisah, (IRD, INRAE, Institut d'Agro), Montpellier, France

² INRAE, UR 1321 ASTRO, F-97170, Petit-Bourg, Guadeloupe, France

* anatja.samouelian@inrae.fr

Mots-clés :

Contribution dissous et particulaire
Eaux de surface
Dynamique de contamination

Messages-clés :

- La dynamique de contamination des eaux de rivière par la CLD est complexe avec un comportement erratique à court terme.

- L'évolution des concentrations en CLD de l'eau de rivière est le résultat d'une contribution majeure d'écoulements de nappe fortement contaminés, mais aussi d'une influence forte des flux de ruissellement de surface lors des crues.

- Le ruissellement de surface lors des crues a des effets contraires selon l'intensité de crue : pour les crues faibles peu érosives le ruissellement a un effet de dilution et pour les crues intenses très érosives il a un effet d'augmentation de concentration par l'apport de CLD sous forme particulaire.

L'utilisation massive de chlordécone (CLD) dans les Antilles a produit une contamination chronique et durable des sols¹ et des eaux^{2,3}. Dans ce contexte une meilleure compréhension des voies de contamination constitue une étape clef pour identifier des mesures d'atténuation de la contamination, voire également pour adapter des protocoles de surveillance de la qualité de l'eau. L'observatoire OPALE, qui assure un monitoring hebdomadaire des contaminations dans les eaux surface associé à un suivi hydrologique, constitue un lieu privilégié pour l'étude des mécanismes de contamination. Les propriétés d'adsorption élevées du CLD sur le sol suggèrent la possibilité d'un transport important en phase particulaire. Néanmoins on recense peu d'études couplant la détermination conjointe sur la phase dissoute et particulaire. Ainsi en complément du dispositif OPALE, le bassin versant du Pérou (Guadeloupe) a fait l'objet d'un suivi spécifique dédié à l'analyse des contributions

des phases dissoutes et particulaire en CLD. Pour cela un protocole basé sur des prélèvements instantanés a été conduit pour capter la variabilité des situations hydrologiques. L'analyse conjointe des chroniques long terme (2016-2019) adossée à des suivis ciblés des contributions par voie dissoute et particulaire (226 échantillons ponctuels) a ainsi permis de revisiter les hypothèses de fonctionnement du bassin versant.

L'analyse hydrologique des écoulements montre une contribution majoritaire des écoulements de nappe au débit de rivière, suggérant une influence majeure de la contamination des nappes sur la contamination de rivière. Pourtant, à coté de tendances saisonnières des concentrations moyennes de CLD en rivière liée à l'état hydrique général du bassin versant, on observe une très forte variabilité des contaminations de rivière en CLD avec des concentrations pouvant varier très rapidement de plus d'un ordre de grandeur.

Cela suggère également l'influence de processus rapides de contamination ou de dilution qu'il convient d'identifier pour pouvoir mieux définir les protocoles de suivi de la contamination des eaux.

Les résultats de l'analyse des prélèvements ponctuels distinguant phase dissoute et particulaire permettent de proposer un schéma de fonctionnement expliquant l'origine du comportement erratique à court terme. Pour les situations de faible débit, la concentration en CLD est élevée et très majoritairement dissoute. Ce résultat est cohérent avec l'exfiltration d'eau souterraine, un compartiment fortement contaminé par la CLD. L'augmentation du débit en début et fin de crue entraîne une diminution des concentrations en CLD, que l'on associe à un processus de dilution progressif via une contribution d'eau de ruissellement faiblement contaminée en CLD. Dans le cas de situations de fort débit, les concentrations en CLD redeviennent comparable à celles de faible débit, du fait d'une contribution croissante de la phase particulaire qui devient équivalente à celle de la phase dissoute. On montre ici que la contribution des eaux de surface suivant son importance est à l'origine soit d'augmentation des concentrations via le processus érosif soit de dilution par l'apport d'eaux peu contaminées. Par conséquent le rôle des crues est à prendre en compte explicitement pour analyser et comprendre la dynamique de la contamination en CLD des eaux de surface et effectuer le suivi opérationnel de ces dynamiques.

Références bibliographiques :

1. Cabidoche, Y. M., Achard, R., Cattan, P., Clermont-Dauphin, C., Massat, F., & Sansoulet, J. (2009). Long-term pollution by chlordecone of tropical volcanic soils in the French West Indies: A simple leaching model accounts for current residue. *Environmental Pollution*, 157(5), 1697–1705.

2. Crabit, A., Cattan, P., Colin, F. and Voltz. M., 2016. Soil and River Contamination Patterns of Chlordecone in a Tropical Volcanic Catchment in the French West Indies (Guadeloupe). *Environmental Pollution* 212, 615–626.

3. Della Rosa P. Jannoyer M. mottes C. Plet J. Bazizi A. Arnaud L. Jestin A. Woignier T. Gaude M. et Cattan P., 2016. Linking current river pollution to historical pesticide use : insights for territorial management ? *Science of total environment* 574.

Etat de la contamination en chlordécone des milieux aquatiques de Guadeloupe

Romain Rochette¹, Marcus Agbekodo¹, Isabelle Nasso^{1*}

¹ Office de l'Eau Guadeloupe

* isabelle.nasso@oe971.fr

Mots-clés :

Milieux aquatiques

Contamination

Eau

Poissons

Crustacés

Messages-clés :

Amélioration de la connaissance de l'état de contamination des milieux aquatiques du territoire.

Dans une optique de connaissance et de préservation des milieux aquatiques, l'Office de l'Eau Guadeloupe met en œuvre le suivi de la qualité des milieux aquatiques (cours d'eau, plans d'eau, eaux souterraines, eaux côtières). Dans ce contexte sont analysés environ 200 micropolluants sur les matrices eaux, sédiments et biote (poissons et crustacés). Au rang de ces micropolluants se trouvent la chlordécone et ses produits de dégradation (chlordécone 5B hydro, chlordécol). Les résultats ainsi obtenus conduisent à une visibilité globale de l'état de contamination du territoire sur l'ensemble de ces milieux, étape préliminaire aux diverses études sur la santé humaine et sur l'environnement.

Ainsi, sur la période 2016 à 2021, les investigations menées sur 48 stations de type cours d'eau de la Basse-Terre indiquent que sur 1043 analyses, la chlordécone a été détectée 753 fois, avec une concentration moyenne de 0,29 µg/L (de 0,003 µg/L à 6,34 µg/L ; Norme de Qualité Environnementale = $5 \cdot 10^{-6}$ µg/L pour les cours d'eau). Les poissons et les crustacés ont été analysés sur 46 stations de la Basse-Terre. Sur les 102 analyses menées sur les poissons, la chlordécone a été détectée 94 fois, avec une concentration moyenne de 6520,92 µg/kg (de 1,7 µg/kg à 244 922 µg/kg ; Norme de Qualité = 3µg/kg pour les poissons et

crustacés). Les crustacés ont été analysés 82 fois, et la chlordécone a été détectée dans 79 cas avec une concentration moyenne de 6653,41 µg/kg.

Dans les eaux souterraines, la contamination en chlordécone est pour l'essentiel concentrée sur le sud Basse-Terre où les pratiques culturales de bananier sont plus abondantes (de 0,03 à 26,7 µg/L). Cette contamination constitue la pression la plus importante exercée par les produits phytosanitaires sur les eaux souterraines de Guadeloupe. Des détections ponctuelles de chlordécone dans le reste de l'île sont cependant à signaler (Grande-Terre, Nord Basse-Terre).

En plan d'eau, la présence récurrente de chlordécone dans les analyses d'eau, sédiments et biote de la retenue de Gaschet, soulève la question de l'origine de cette contamination. En effet, outre les eaux issues du ruissellement du bassin versant, cette retenue située sur la Grande-Terre est alimentée par deux prises d'eau situées sur la Basse-Terre. Une étude en cours de montage permettra de préciser si la contamination observée provient du transfert de contamination de la Basse-Terre vers la Grande-Terre et/ou de l'imprégnation du bassin versant. Cette étude vise également à identifier les moyens de gestion idoines pour

cette retenue.

Dans les eaux côtières, la sensibilité de la technique d'analyse par échantillonneurs passifs a permis d'affiner la connaissance liée à la présence de chlordécone dans ce milieu. Ainsi, les campagnes d'analyses menées en novembre-décembre 2017 et novembre-décembre 2018 ont révélé la présence de chlordécone respectivement sur 15 et 10 des 17 stations réparties autour de la Guadeloupe. Les concentrations pour l'année 2018 sont comprises entre 0,02 et 0,15 ng/L; en 2017 ces concentrations varient entre 0,01 et 0,41 ng/L, soit des concentrations particulièrement faibles mais toutefois supérieures à la Norme de Qualité Environnementale pour ce polluant ($NQE_{\text{chlordécone}} = 5.10^{-7} \mu\text{g/L}$ pour les eaux côtières).

Références bibliographiques :

Office de l'Eau, BRGM, 2020, Surveillance de l'état chimique des masses d'eau souterraine de la Guadeloupe et de Saint-Martin au titre de la DCE – Année 2019

Office de l'Eau, BRGM, 2021, Surveillance de l'état chimique des masses d'eau souterraine de la Guadeloupe et de Saint-Martin au titre de la DCE – Année 2020

Office de l'Eau, Créocéan, 2020, Programme de surveillance de la Retenue d'eau de Gaschet – années 2017-2020

Office de l'Eau, Créocéan, 2017, Suivi du réseau de surveillance des masses d'eau littorales de la Guadeloupe : Evaluation de la contamination chimique à l'aide d'échantillonneurs passifs – ANNEE 2017

Office de l'Eau, Créocéan, 2017, Suivi du réseau de surveillance des masses d'eau littorales de la Guadeloupe : Evaluation de la contamination chimique à l'aide d'échantillonneurs passifs – ANNEE 2018

Un bioessai avec l'hydre d'eau douce pour évaluer la toxicité du chlordécone aux concentrations environnementales, seul ou en mélange complexe avec des sous-produits déchlorés : observations expérimentales et modélisation par plan d'expériences

Xavier Moreau¹, [Hervé Macarie](#)¹, Magalie Claeys-Bruno¹, Jean-Pascal Andraud¹, Daniel E. Martínez², Stéphane Greff¹, Pierre Vanloot¹, Maxime Robin¹, Michelle Sergent¹, Laetitia De Jong¹

¹ Aix Marseille Univ, Avignon Univ, CNRS, IRD, IMBE, Marseille, France

² Department of Biology, Pomona College, Claremont CA 91711, USA

* xavier.moreau@imbe.fr

Mots-clés :

Bioessai
Ecotoxicité
Eaux douces
Organochloré
Modélisation
Plan d'expériences

Messages-clés :

- Évaluation écotoxicologique des concentrations environnementales de chlordécone.
- Évaluation de la capacité de régénération de *Hydra vulgaris*.
- Expositions à des mélanges de chlordécone avec des sous-produits déchlorés.
- Modèle mathématique pour prédire les effets des produits toxiques dans les mélanges.

Si une remédiation microbienne ou un processus de remédiation physico-chimique, par exemple une réduction chimique *in situ*², est mis en œuvre dans les sols contaminés à la chlordécone (CLD) des Antilles françaises, on s'attend à ce que les concentrations de sous-produits de dégradation, comme les hydrochlordécones, augmentent dans les écosystèmes. Pour étudier leur impact en mélange avec la CLD, des bioessais visant à évaluer la capacité de régénération de l'hydre d'eau douce, *Hydra vulgaris*, Pallas, 1766, ont été réalisés. Pour cela, des sections gastriques d'hydres ont été exposées pendant 96 h à la CLD seule ou à la CLD mélangée à des sous-produits déchlorés (CLD-BPs). L'analyse chromatographique a montré que le mélange CLD-BPs était composé de l'isomère 5-monohydrochlordécone (nomenclature CAS), de quatre isomères de dihydrochlordécone et d'un isomère de trihydrochlordécone représentant respectivement 50%, 47% et 3% de la surface chromatographique totale. Au total,

18 mélanges de CLD+CLD-BP ont été testés. Six concentrations environnementales de CLD (2.10^{-4} μM [soit 0,1 $\mu\text{g/L}$] à 4.10^{-2} μM [soit 20 $\mu\text{g/L}$]) et une gamme de concentrations similaires de CLD-BPs ont été utilisées. Les résultats des expositions à la CLD seule ont montré : (i) une diminution significative de la capacité de régénération de l'hydre, sauf à la plus faible concentration (2.10^{-4} μM), (ii) un effet délétère indépendant de la concentration. Les scores de régénération obtenus après l'exposition aux mélanges CLD+CLD-BPs n'étaient pas significativement différents de ceux obtenus après l'exposition à la CLD seule. À l'aide d'un plan d'expériences, une modélisation des scores de régénération des hydres exposées à des mélanges a été proposée. Interprétés avec précaution, car limités à un seul type de bioessai, ces résultats suggèrent que la situation des milieux aquatiques ne devrait pas s'aggraver en termes de toxicité, si des programmes de dépollution des sols entraînant la formation d'hydrochlordécones sont mis en place¹.

Références bibliographiques :

1. Moreau X, Claeys-Bruno M, Andraud JP, Macarie H, Martínez DE, Robin M, Sergent M, De Jong L (2022) Hydra bioassay for the evaluation of chlordecone toxicity at environmental concentrations, alone or in complex mixtures with dechlorinated byproducts: experimental observations and modeling by experimental design. *Environ Sci Pollut Res* (en révision).

2. Mouvet C, Collet B, Gaude JM, Rangon L, Bristeau S, Senergues M, Lesueur-Jannoyer M, Jestin A, Hellal J, Woignier T (2020) Physico-chemical and agronomic results of soil remediation by In Situ Chemical Reduction applied to a chlordecone-contaminated nitisol at plot scale in a French Caribbean banana plantation. *Environ Sci Pollut Res* 27:41063-41092

Caractérisation physique (granulométrie, nature de la matrice minérale) de la formulation commerciale à 5% de chlordécone utilisée autrefois en bananeraie aux Antilles françaises et connue sous le nom de Curlone®

Catherine Rébufa¹, [Hervé Macarie](mailto:herve.macarie@ird.fr)^{1*}

¹ Aix Marseille Univ, Avignon Univ, CNRS, IRD, IMBE, Marseille, France

* herve.macarie@ird.fr

Mots-clés :

Curlone
Granulométrie
Kaolin
Talc
CaCO₃

Messages-clés :

- La Curlone était constitué de particules de taille moyenne comprise entre 42 et 56 µm.
- A cette granulométrie les risques d'exposition des ouvriers appliquant le produit par voie respiratoire et cutanée étaient très élevés.
- La charge minérale de la Curlone semble être un mélange de CaCO₃ et de kaolin.

Très peu d'information est disponible dans la littérature sur la Curlone®. Une analyse de sa composition chimique serait pourtant bienvenue afin de savoir par exemple si des produits déchlorés détectés dans l'environnement antillais sont véritablement le fruit de processus de dégradation de la chlordécone (CLD) ou correspondent à des impuretés de synthèse l'accompagnant. De la même façon, toutes les études épidémiologiques se sont focalisées sur la seule CLD sans considérer les éventuels synergismes de toxicité dus à la présence d'impuretés. Afin de palier à ce manque d'information, en 2016, nous avons pu analyser la composition de 3 échantillons de Curlone® qui ont permis de mettre en évidence que pas moins de 23 composés organiques étaient présents dans le produit en plus de la CLD².

A côté de la composition chimique organique de la Curlone® d'autres paramètres comme la taille des particules qui la composent ou la nature du matériel minéral ayant été utilisé pour diluer la CLD manquent cruellement aux experts chargés d'évaluer à posteriori le risque d'exposition des ouvriers qui appliquaient le produit en vue d'une reconnaissance de maladie professionnelle.

Pour ce qui est de la charge minérale de la Curlone®, plusieurs informations contradictoires circulent. D'après l'ancien directeur du groupe Calliope qui la fabriquait, il s'agirait de CaCO₃ sous forme de Durcal® (broyat de marbre) produit par la société Omya, mais d'autres sources suggèrent qu'il pourrait s'agir de talc ou de kaolin^{1,3}.

Les mesures de granulométrie réalisées sur 6 échantillons de Curlone® provenant de sacs indépendants indiquent que ce matériel était constitué par de petites particules de taille moyenne comprise entre 42 et 56 µm, 50% des particules ayant même une taille inférieure à 14.6 µm et 10% à 1.35 µm. Avec cette granulométrie, il n'est donc pas étonnant que d'après un témoignage, les masques à 2 cartouches portés par les applicateurs se soient bouchés en moins d'une heure d'application du produit (Christian Chabrier, chercheur au CIRAD, communication personnelle). A noter que nombre de personnes qui l'appliquaient à l'époque ne disposaient pas d'un tel équipement de protection. D'après la même source, les particules de Curlone® volaient autour des applicateurs qui finissaient les chantiers couverts de poussière blanche,

laquelle réussissaient à s'immiscer sous les vêtements. Nos mesures et ce témoignage suggèrent donc que les applicateurs étaient largement exposés par inhalation comme par voie cutanée.

Les spectres infrarouges de ces mêmes échantillons de Curlone® se sont révélés très similaires avec de petites différences d'intensité probablement dues à des contenus en eau différents. Les 3 pics caractéristiques du CaCO₃ ont été retrouvés à 1387, 870 et 712 cm⁻¹ dans chacun des échantillons. Des pics caractéristiques du kaolin y ont toutefois aussi été retrouvés à 3693, 3620, 1166, 1154, 1108, 1030, 1005, 793 et 752 cm⁻¹. Les principaux pics caractéristiques du talc étaient par contre absents à 963, 666, 546 et 506 cm⁻¹. Ce résultat suggère que la charge minérale de la Curlone® correspondrait donc à un mélange de CaCO₃ et de kaolin.

908620, 4 pages.
https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=GB&NR=908620A&KC=A&FT=D&ND=3&date=19621024&DB=EP-ODOC&locale=fr_EP#

Références bibliographiques :

1. Letchimy S, Benin J (2019) Rapport n°2440 tome 1, Commission d'enquête sur l'impact économique, sanitaire et environnemental de l'utilisation du chlordécone et du paraquat comme insecticides agricoles dans les territoires de Guadeloupe et de Martinique, sur les responsabilités publiques et privées dans la prolongation de leur autorisation et évaluant la nécessité et les modalités d'une indemnisation des préjudices des victimes et de ces territoires. Page 234. http://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/rapports/cechlordec/115b2440-ti_rapport-enquete.pdf
2. Macarie H, Bristeau S, Woignier T, Sovocool GW, Mouvet C (2016) Analyse par GC-MS des formulations commerciales de chlordécone (Kepone® et Curlone®) épandues aux Antilles. Poster, 46ème congrès du Groupe Français des Pesticides, 17-19 mai 2016, Bordeaux, France. (http://www.gfpesticides.org/bdd_fichiers/169475818d6ccfd5c1c6036f1dc8d3b3aeac43f8521.pdf)
3. Wales HE (1962) Pesticidal wettable powder and dust composition. Brevet Britannique n°

Etude chez l'hydre des effets cocktail de concentrations environnementales de deux perturbateurs endocriniens pro-estrogéniques : le Chlordécone et le Propylparabène

Magali Domallain¹, Romain Colpaert², Xavier Moreau¹, Laeticia de Jong¹, Karim Benbrahim¹, Raphael Coatmeur¹, Valérie Pique¹, Maxime Robin¹, Pierre-Henri Villard^{1*}

¹ IMBE, Aix Marseille Université Avignon Université, CNRS, IRD, Marseille, France

² UMR CNRS 6249 Chrono-environnement, Université Bourgogne Franche-Comté, Besançon, France

* pierre.villard@univ-amu.fr

Mots-clés :

Chlordécone
Propylparabène
Hydre
Effets cocktails

Messages-clés :

- Les expositions chroniques à de faibles doses de PE ont des conséquences biologiques. Les relations concentrations effets sont non monotones.
- Les effets cocktails ne peuvent pas être évalués à partir de données issues d'expositions simples (à un composé unique).
- L'Hydre est une espèce de choix pour développer des méthodes alternatives, notamment en vue d'étudier les effets cocktail.

Le Chlordécone (CLD) et le Propylparabène (PP) sont deux perturbateurs endocriniens (PE) pro-estrogéniques présents dans l'eau douce. Le CLD a été utilisé aux Antilles françaises dans la lutte contre le charançon du bananier. Ses caractéristiques de Polluant Organique Persistant explique sa rémanence dans l'environnement. Le PP, bien que dégradé en partie dans les stations d'épuration des eaux usées, pollue fréquemment l'eau, de par sa très large utilisation industrielle en tant que conservateur.

Les êtres vivants sont ainsi exposés de façon chronique, à de faibles concentrations de ces deux PEs, dont les effets cocktail sont méconnus.

Nous avons étudié dans le modèle Hydre (*H. vulgaris*) par une approche multi-échelle (reproduction asexuée, atteintes morphologiques, expression de gènes cible), les conséquences d'une exposition chronique (14 jours) à des concentrations environnementales de CLD (0.5, 5 et 20 µg/L) et de PP (0.01, 0.05 et 0.4 µg/L), utilisés seuls ou en cocktail.

Nous avons observé des réponses avec des relations concentration-effet non monotones (en « U » ou en « U inversé »), typiques des PEs.

Utilisés seuls, le CLD et le PP ont des effets peu marqués sur la reproduction asexuée et l'apparition de dommages morphologiques. Nous avons observé des modifications au niveau de l'expression de certains gènes cibles. Concernant les gènes impliqués dans les voies androgénique (répression du CYP17) et œstrogénique (répression ou induction de la Vitellogénine et de LIV1), et dans la réponse au stress oxydatif (induction de la SOD), les effets du CLD et du PP étaient comparables. Seule la CLD modulait l'expression de l'acétylcholinestérase (induction).

Nos données montrent clairement que les effets cocktails ne peuvent pas être directement extrapolés à partir d'expositions uniques. Après exposition aux cocktails, les effets sur la reproduction asexuée demeuraient limités. Mais, nous avons observé l'apparition de forts dommages morphologiques non réversibles, qui étaient

associés à une potentialisation de l'induction de gènes participant à la régénération tissulaire (Hym346 et Thypedin). De même, les effets sur les gènes impliqués dans les voies androgénique et œstrogénique étaient beaucoup plus prononcés. Notamment une potentialisation de l'induction de LIV1, à faible et moyenne concentrations.

L'ensemble de nos données suggère que l'Hydre (*H. vulgaris*) est un modèle de choix qui offre la possibilité à moindre coût et de façon aisée, d'évaluer par une approche multi-échelle, les effets de concentrations environnementales de PEs et ainsi que leurs effets cocktail.

Références bibliographiques :

Colpaert R, Villard PH, de Jong L, Mambert M, Benbrahim K, Abraldes J, Cerini C, Pique V, Robin M, Moreau X. Multi-scale impact of chronic exposure to environmental concentrations of chlordecone in freshwater cnidarian, *Hydra circumcincta*. Environ Sci Pollut Res Int. 2020 27(33):41052-41062.

Découverte de différentes espèces bactériennes d'origine antillaise permettant de transformer la chlordécone

Sébastien Chaussonnerie^{1*}, Edgardo Ugarte¹, Déborah Marton¹, Delphine Muselet¹, Agnès Barbance¹, Denis Le Paslier¹, Cécile Fischer¹ et Pierre-Loïc Saaidi^{1*}

¹ UMR 8030 Génomique Métabolique, CEA, Institut de Biologie François Jacob, Genoscope, Université d'Evry Val d'Essonne, Université Paris-Saclay, 2 rue Gaston Crémieux Evry 91057, France

* chausson@genoscope.cns.fr ; plsaaidi@genoscope.cns.fr

Mots-clés :

Chlordécone
Produits de transformation
Dégradation bactérienne
Microbiologie

Messages-clés :

- Isolement des premières bactéries d'origine antillaise capables d'induire la dégradation de la chlordécone
- Découverte de nouveaux genres bactériens capables d'induire la dégradation de la chlordécone
- Mise au point de protocoles de détection/quantification des principaux produits de transformation de la chlordécone dans des expériences de dégradation microbiologiques en milieu liquide

Au cours des dernières années, plusieurs équipes de recherche ont démontré que la chlordécone (CLD, $C_{10}Cl_{10}O_2H_2$), reconnue comme étant l'un des pesticides organiques les plus persistants, pouvait être dégradée en présence de micro-organismes en anaérobiose en une multitude de produits de transformation (PTs) regroupés à ce jour en six grandes familles : hydrochlordécones (famille A), polychloroindènes (famille B), acides polychloroindènedicarboxyliques (famille C), esters méthyliques et éthyliques des acides polychloroindènedicarboxyliques (familles D et E) et dérivés soufrés (famille F)^{2,3,4,5}. Notre équipe et celle de S. Gaspard et E. Edwards ont retrouvé un certain nombre de ces composés dans des échantillons environnementaux antillais (sols, eaux, sédiments) démontrant qu'une dégradation naturelle de la CLD est déjà en cours aux Antilles^{3,4,5}. Ces résultats ont été confirmés avec l'enrichissement de consortia bactériens d'origine antillaise capables de transformer en laboratoire la CLD en plusieurs familles (A, B, C et F). Nous avons également démontré le rôle-clé dans ces

biotransformations des corrinoides, coenzymes ubiquitaires chez les organismes vivants, laissant penser qu'une multitude de micro-organismes placés dans des conditions adéquates pourraient induire la dégradation de la CLD¹.

En mettant à profit les spécificités métaboliques d'espèces bactériennes décrites précédemment^{2,4}, nous avons réussi à isoler par différentes stratégies (changement de conditions de culture, expériences de dilution limite, étalements sur boîte de Petri) trois nouvelles bactéries du genre *Desulfovibrio* ainsi qu'une bactérie du genre *Citrobacter* à partir de consortia de micro-organismes d'origine martiniquaise déjà caractérisés comme actifs contre la CLD³. Ces bactéries appartiennent donc aux mêmes genres bactériens que celles que nous avons déjà décrites et pour lesquelles l'origine était incomplètement connue. De plus, des bactéries appartenant à d'autres genres, elles aussi actives sur la CLD, ont également été isolées à partir de ces mêmes prélèvements antillais. Cette grande diversité biologique nous a amené à étudier les

capacités dégradatives de bactéries issues de souchothèques, n'ayant donc jamais été exposées à la CLD. Le suivi de toutes les biotransformations de notre étude nécessite la mise au point de nouveaux protocoles analytiques performants, permettant de quantifier simultanément la CLD et les principaux PTs connus (A1, B1, B3/B4, C1/C2, C3/C4 et F1) en utilisant des standards internes commerciaux et des PTs marqués au Deutérium. Le séquençage des génomes encore inconnus nous a permis de constituer une base de données d'une quinzaine de génomes de micro-organismes dégradant la CLD. Les résultats de l'étude de génomique comparative effectuée ont notamment confirmé la présence de la voie de biosynthèse des corrinoïdes dans toutes les bactéries.

Références bibliographiques :

1. Barbance A, Della-Negra O, Chaussonnerie S, Delmas V, Muselet D, Ugarte E, Saaidi PL, Weissenbach J, Fischer C, Le Paslier D, Fonknechten N. Genetic Analysis of *Citrobacter* sp.86 Reveals Involvement of Corrinoïdes in Chlordecone and Lindane Biotransformations. *Front Microbiol.* 2020 Nov 9;11:590061.
2. Chaussonnerie S, Saaidi PL, Ugarte E, Barbance A, Fossey A, Barbe V, Gyapay G, Brûls T, Chevallier M, Couturat L, Fouteau S, Muselet D, Pateau E, Cohen GN, Fonknechten N, Weissenbach J, Le Paslier D. Microbial Degradation of a Recalcitrant Pesticide: Chlordecone. *Front Microbiol.* 2016 Dec 20;7:2025.
3. Chevallier M. L., Della-Negra O., Chaussonnerie S., Barbance A., Muselet D., Lagarde F., Darii E., Ugarte E., Lescop E., Fonknechten N., Weissenbach J., Woignier T., Gallard J-F., Vuilleumier S., Imfeld G., Le Paslier D., and Saaidi P-L., 2019. Natural Chlordecone Degradation Revealed by Numerous Transformation Products Characterized in Key French West Indies. *Environ. Sci. Technol*, 53, 11, 6133–6143
4. Della-Negra, O., Chaussonnerie, S., Fonknechten, N., Barbance A., Muselet D., Martin D. E., Fouteau S., Fisher C., Saaidi P-L. and Le Paslier D., 2020. Transformation of the

recalcitrant pesticide chlordecone by *Desulfovibrio* sp.86 with a switch from ring-opening dechlorination to reductive sulfidation activity. *Sci Rep* 10, 13545

5. Lomheim L., Laquitaine L., Rambinaising S., Flick R., Starostine A., Jean-Marius C., Edwards E. A., Gaspard S., 2020. Evidence for extensive anaerobic dechlorination and transformation of the pesticide chlordecone (C10Cl10O) by indigenous microbes in microcosms from Guadeloupe soil. *PLOS ONE*, 15 (4): e023121

Modélisation moléculaire des interactions du HCH et de la chlordécone avec les groupements de surface basiques oxygénés des charbons actifs, en vue de l'optimisation du traitement des eaux contaminées

Allan Duro¹, Francesca Goudou¹, Chayan Carmenate-Rodriguez², Kenia Melchor-Rodriguez², Babak Minofar⁴, Ulises Jauregui-Haza³, Sarra Gaspard^{1*}

¹ Laboratoire COVACHIM M2E, EA 3592, Université des Antilles, 97110 Pointe-à-Pitre, Guadeloupe, France

² Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, University of Havana, Havana 10400, Cuba

³ Instituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC), Santo Domingo 10602, Dominican Republic

⁴ Laboratory of Structural Biology and Bioinformatics, Institute of Microbiology of the Czech Academy of Sciences, Zamek 136, 37333 Nove Hradky, Czech Republic

* sarra.gaspard@univ-antilles.fr

Mots-clés :

HCH

Chlordécone, Modélisation moléculaire

Dynamique moléculaire, Traitement des eaux

Messages-clés :

- Les groupements acides permettent une adsorption optimale des molécules de chlordécone et de HCH

- A pH neutre et basique l'adsorption de ces molécules sur un CA contenant des groupements basiques oxygénés implique un mécanisme de physiosorption

- Il existe une compétition entre le HCH et la CLD pour les sites d'adsorption du CA dans l'eau

- Des phénomènes d'agrégation de ces molécules sont décrits par dynamique moléculaire

Dans nos travaux antérieurs menés, la modélisation moléculaire a été utilisée par notre équipe pour étudier l'influence des groupes de surface (GS) oxygénés acides^{1,2} et basiques azotés³ de charbons actifs (CA) sur l'adsorption de la molécule de chlordécone (CLD) et du β -hexachlorocyclohexane (β -HCH)⁴, en considérant le pH et l'effet d'hydratation. Ces interactions utilisant des GS acides à pH neutre ont révélé une chimisorption de la CLD^{1,2} alors que les GS basiques azotés ont montré une physiosorption³. Ici, une étude théorique de l'interaction de ces pesticides avec les GS basiques oxygénés du CA est réalisée. Un modèle de surface du CA constitué d'une molécule de coronène comportant un groupe fonctionnel pyrone, chromène ou cétone,

respectivement, a été utilisée comme modèle simplifié de la surface du charbon actif. La méthodologie de l'hypersurface à minima multiples a été utilisée pour étudier les interactions de la CLD et du β -HCH avec les GS du CA en utilisant l'hamiltonien semi-empirique PM7. Une nouvelle ré-optimisation des structures obtenues a été effectuée pour les complexes pesticide-CA au moyen de la théorie de la fonction de densité. La théorie quantique des atomes dans les molécules a été utilisée pour caractériser les types d'interaction à l'aide des critères de Nakanishi. Aucune interaction n'a été montrée à un pH acide pour les deux polluants alors que des interactions dispersives ont été trouvées à des pH neutres et basiques, ce qui indique un processus de

physisorption. Des simulations de dynamique moléculaire ont été également utilisées pour illustrer ces résultats. En fin de compte, la dynamique moléculaire a permis de montrer le processus d'adsorption physique du CLD ou β -HCH sur les CA basiques. De plus, une compétition entre les molécules de HCH et de chlordécone, pour les sites d'adsorption peut être observée.

Références bibliographiques :

1. Gamboa-Carballo, J.J.; Melchor-Rodríguez, K.; Hernández-Valdés, D.; Enriquez-Victorero, C.; Montero-Alejo, A.L.; Gaspard, S.; Jáuregui-Haza, U.J. Theoretical Study of Chlordecone and Surface Groups Interaction in an Activated Carbon Model under Acidic and Neutral Conditions. *J. Mol. Graph. Model.* 2016, *65*, 83–93.
2. Melchor-Rodríguez, K.; Gamboa-Carballo, J.J.; Ferino-Pérez, A.; Passé-Coutrin, N.; Gaspard, S.; Jáuregui-Haza, U.J. Theoretical Study on the Interactions between Chlordecone Hydrate and Acidic Surface Groups of Activated Carbon under Basic PH Conditions. *J. Mol. Graph. Model.* 2018, *81*, 146–154.
3. Melchor-Rodríguez, K.; Carmenate-Rodríguez, C.; Ferino-Pérez, A.; Gaspard, S.; Jáuregui-Haza, U.J. Role of Basic Surface Groups of Activated Carbon in Chlordecone and β -Hexachlorocyclohexane Adsorption: A Molecular Modelling Study. *Molecules* 2021, *26*, 6969.
4. Enriquez-Victorero, C.; Hernández-Valdés, D.; Montero-Alejo, A.L.; Durimel, A.; Gaspard, S.; Jáuregui-Haza, U. Theoretical Study of γ -Hexachlorocyclohexane and β -Hexachlorocyclohexane Isomers Interaction with Surface Groups of Activated Carbon Model. *J. Mol. Graph. Model.* 2014, *51*, 137–148.

Détection et identification de nouveaux produits de transformation de la molécule de chlordécone obtenus par électrolyse

Ronald Ranguin¹, Elodie Longfort¹, Line Lomheim², Robert Flick², Imma Eljout¹, Naomi Desiree¹, Corine Jean-Marius¹, Murielle Sylvestre¹, Elizabeth A. Edwards², Antonio Doménech-Carbó³, Gerardo Cebrián-Torrejón¹, Sarra Gaspard^{1*}

¹ Laboratoire COVACHIMM2E, EA 3592, Université des Antilles, , Guadeloupe, France

² Biozone Laboratory, Université de Toronto

³ Departament de Química Analítica, Facultat de Química, Universitat de València, Valencia, Spain

* sarra.gaspard@univ-antilles.fr

Mots-clés :

Electrochimie
REDOX
Produits de transformation
Détection
Caractérisation
LC-MS
GC-MS

Messages-clés :

- Des composés de transformations de la chlordécone sont produits par électrolyse.
- Les dérivés de la chlordécone et de la chlordécone alcool ayant perdus jusqu'à 3 atomes de chlore sont caractérisés.

La chlordécone (CLD) ou Kepone® est un pesticide organochloré persistant et toxique. La contamination des sols et des eaux de surface par cette molécule dans les zones de production de bananes des Antilles françaises est liée notamment à sa forte affinité pour la matière organique. La recherche d'une voie de dépollution des sols contaminés est une priorité afin de réduire l'exposition à cette molécule. Cependant, la mise en oeuvre de telles études nécessite d'être en mesure de détecter et de quantifier les métabolites de la chlordécone. Différents travaux ont montrés la production de produits de transformation de la chlordécone soit par l'action de la vitamine B12^{1,2} ou de microorganismes⁴⁻⁶. Dans ce travail, la dégradation électrochimique de la CLD est étudiée en conditions aérobies, en utilisant un potentiel constant de -10 V pour la réduction et +10 V pour l'oxydation. Des produits et intermédiaires de transformation sont caractérisés par des méthodes de chromatographie en phase gazeuse couplées à la spectrométrie de masse (PCI-GC-MS) et par chromatographie en phase liquid couplée à la spectroscopie de masse (LC-MS).

Les composés hydro-CLD ont été détectés aux temps de rétention suivants : 9,09, 8,8 et 8,06 min et des rapports masse/charge $m/z=468,7257$, $m/z=434,7647$ et $m/z=400,8036$ respectivement, ont été attribués aux formes hydrates de MHCLD [C10Cl9O2H2]-, DHCLD [C10Cl8O2H3]- et THCLD [C10Cl7O2H4]- obtenues par la perte de 1, 2 et 3 atomes de chlore de la CLD. Les composés Hydro-CLD-OH ont aussi été détectés aux temps de rétention suivants : 9,10, 8,86 et 8,69 min et les rapports masse/charge $m/z=452,7308$, $m/z=418,7698$ et $m/z=384,8087$ respectivement, ont été attribués aux formes hydrates de MHCLD-OH [C10Cl9O3H2]-, DHCLD-OH [C10Cl8O3H3]- et THCLD-OH [C10Cl7O3H4]- obtenues par la perte de 1, 2 et 3 atomes de chlore de la CLD-OH. Ainsi pour la première fois des composés issus de l'oxydation et de la réduction électrochimique de la chlordécone sont produits et caractérisés.

Références bibliographiques :

1. R. Ronald Ranguin, Axelle Durimel, Reeka Karioua, S. Gaspard, *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, (24) 25488-25499.
2. R. Ranguin, M.C. Ncibi, T. Cesaire, S. Lavoie, C. Jean-Marius, H. Grutzmacher, S. Gaspard, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 27 (2020) 41122–41131.
3. L. Lomheim, L. Laquitaine, S. Rambinaising, R. Flick, A. Starostine, C. Jean-Marius, E.A. Edwards, S. Gaspard, *PLoS One.* 15 (2020) e0231219.
4. L. Lomheim, R. Flick, S. Rambinaising, S. Gaspard, E.A. Edwards, Identification of a fully dechlorinated product of chlordecone in soil microcosms and enrichment cultures. *Environmental Science and Technology Letters*, 2021.
5. M.L. Chevallier, O. Della-Negra, S. Chaussonnerie, A. Barbance, D. Muselet, F. Lagarde, E. Darii, E. Ugarte, E. Lescop, N. Fonknechten, J. Weissenbach, T. Woignier, J.F. Gallard, S. Vuilleumier, G. Imfeld, D. Le Paslier, P.L. Saaidi, *Environ. Sci. Technol.* 53 (2019) 6133–6143.
6. S. Chaussonnerie, P. Saaidi, E. Ugarte, Microbial Degradation of a Recalcitrant Pesticide : Chlordecone, *Front. Microbiol.* 7 (2016) 1–12

Evaluation de la charge polluante de trois espèces végétales dans une zone humide du Nord Grande – Terre en Guadeloupe : métaux lourds et chlrodécone

Maguy Dulormne^{1*}, Constance Laccours¹, Théodore Bien-Aimé¹, Rose-May Cantobion¹, Vanessa Virapin¹

¹ Université des Antilles, UMR EcoFoG (Agroparistech, CNRS, CIRAD, Université des Antilles, Université de la Guyane), Campus de fouillole, Pointe à Pitre, Guadeloupe

* maguy.dulormne@wanadoo.fr

Mots-clés :

Bio-indicateur
Phytoaccumulation
Zone humide
Métaux lourds
Pesticides
Zone humide

Messages-clés :

- La détection de la contamination du milieu peut être améliorée en utilisant des plantes bio-indicatrices.
- Des espèces indigènes et exotiques accumulent la chlrodécone et permettraient la caractérisation d'une pollution en deçà ou en limite de détection dans l'eau.

La pollution des milieux est diffuse et variable dans le temps, ce qui rend parfois difficile une détection ponctuelle de contaminants tels que les métaux lourds et les pesticides. Via l'entrée d'eau au niveau des racines, les plantes absorbent des minéraux essentiels à leur croissance, mais aussi les polluants du milieu. Certaines espèces deviennent ainsi des bioindicateurs de la pollution d'un site après une absorption sur plusieurs mois ou sur plusieurs années.

Le site de l'étang Gaschet dans le nord grand terre en Guadeloupe est un modèle d'étude intéressant, car situé dans un bassin agricole cannier et maraîcher, où le chlrodécone (CLD) a été historiquement très peu utilisé. Seuls 5 points de contamination CLD ont été détectés sur 198 prélèvements en Grande-Terre à des taux relativement faibles (Rochette et al 2017). Les analyses régulièrement réalisées par l'office de l'eau montrent la qualité médiocre des eaux de l'étang avec 29 micropolluants détectés et quantifiés sur les 290 analysés (ex : Arsenic, Cuivre, Cobalt, Zinc et CLD). Le CLD a été dosé une seule fois sur 7 séries de mesures en limite de détection à 0.01µg/L (OEG, 2020).

La jacinthe d'eau, *Eichhornia crassipes*, est une plante aquatique exotique, décrite comme une espèce phytoaccumulatrice de certains métaux lourds (ML) tels que le mercure, le plomb, le zinc, le cadmium, le cuivre ou encore le chrome (Odjegba et al. 2007 ; Saha et al. 2017), mais rien n'est dit sur sa capacité à accumuler des organochlorés tels que le CLD. La capacité d'espèces végétales de milieu naturel de la Caraïbe a été très peu étudiée. C'est le cas de la Girofle d'eau *Ludwigia octovalvis* et de Queue à rat *Hymenachne amplexicaulis*. L'objectif de cette étude était de déterminer les polluants (métaux lourds et pesticides) accumulés par la jacinthe d'eau, la girofle d'eau et la graminée Queue à rat, et d'évaluer la répartition des polluants dans les différents organes (racine/partie aérienne). Cette étude devait évaluer si certaines de ces espèces pouvaient être des bio-indicateurs pertinents de la pollution de l'étang, et la capacité phytoaccumulatrice de ces espèces.

Nos résultats ont permis de mettre en évidence de nombreux polluants dans les espèces étudiées et une absorption privilégiée dans le système racinaire par rapport aux parties aériennes. L'aluminium,

l'arsenic, le barym, le Cadmium, le chrome, le cobalt, le cuivre, le lithium, manganèse, le nickel, le plomb, le titane et le zinc sont dosés à des concentrations importantes dans les racines. En ce qui concerne l'analyse des pesticides, le CLD a été détecté dans les espèces étudiées autant dans les parties aériennes que racinaires bien que les taux aient été supérieurs dans les racines (7 µg/Kg pour la girofle, 10 µg/Kg pour la graminée, 33 µg/Kg pour la jacinthe de CLD par Kg de matière sèche). Le facteur d'accumulation a pu dépasser 12 000 pour certains échantillons. Alors que le CLD est présent dans l'environnement en dessous ou en limite de détection, la jacinthe, la girofle et la graminée sont des plantes d'intérêt bio-indicatrices de la pollution de zones humides.

Références bibliographiques :

Rochette Romain, Andrieux Patrick, Bonnal Vincent, Cattan Philippe, Nannette J.B., Onapin Germain, Robin N. 2017. Contamination des bassins versants de la Guadeloupe continentale par la chlordécone. Actualisation des connaissances et cartographie des zones à risque de contamination. s.l. : INRA-CIRAD, 89 p.

OEG 2020 Programme de surveillance de la Retenue d'eau de Gaschet – années 2017-2020 Lot n°1 : Prélèvements et analyses physico-chimiques et hydrobiologiques, rapport de l'Office de l'Eau Guadeloupe, 177p

Saha P, Shinde O, Sarkar S. 2017. Phytoremediation of industrial mines wastewater using water hyacinthe. Int J Phytoremediat. 19(1):87-96.

Odjegba VJ, Fasidi IO. 2007 Phytoremediation of heavy metals by *Eichhornia crassipes*. Environmentalist 27(3), 349-355 (2007).

Effet de la remédiation de trois types de sols chlordéconés avec un charbon actif commercial sur l'absorption du contaminant, la morphologie et la croissance du Madère et du Mangle médaille

Maguy Dulormne^{1*}, Celia Toi¹, Oriane Devarieux¹, Freddy Ameleau², Laurent Laquitaine¹, Gaëlle Gruel¹, Vanessa Virapin¹, Stacy Narayanin², Sarra Gaspard²

¹ Université des Antilles, UMR EcoFoG (Agroparistech, CNRS, CIRAD, Université des Antilles, Université de la Guyane), Campus de fouillole, Pointe à Pitre, Guadeloupe

² COVACHIMM, EA 3592 Université des Antilles et de la Guyane, BP 250, 97157 Pointe à Pitre Cedex, Guadeloupe

* maguy.dulormne@wanadoo.fr

Mots-clés :

Rémédiation

Madère

Charbon actif DARCO

Messages-clés :

Le charbon activé réduit la disponibilité en chlordécone aux plantes.

L'adsorption de polluants organiques sur du charbon actif (CA) peut limiter la biodisponibilité des polluants du sol pour les plantes et entraver leur dispersion vers des environnements non contaminés. Il a été montré que du CA ajouté dans un sol contaminé par du DDT, de la dieldrine, du fluorure ou du TNT réduisait significativement les contaminants dans les plantes (Tomaszewski et al. 2007). Des investigations supplémentaires sont nécessaires pour évaluer l'efficacité des CA dans des sols chlordéconés. Le type de sol influence l'absorption du polluant par la culture. Clostre et al (2014) ont ainsi démontré que les sols non-allophanes (nitisols et ferralsols) favorisaient davantage la contamination des plantes que les sols allophanes (andosols). Le madère a une forte capacité à absorber de grandes quantités de chlordécone du sol, et à l'accumuler dans les racines, puis dans les parties aériennes.

Les objectifs de cette étude étaient (i) d'étudier l'efficacité du piégeage du chlordécone par un CA commercial DARCO appliqué à 2% au sol, en quantifiant la réduction du transfert de chlordécone vers le madère (*Colocassia esculenta*) dans 3 sols contaminés (nitisol, andosol ferralsol), et (ii)

d'étudier l'effet de l'ajout de CA sur la morphologie et la croissance des plantes.

Les résultats préliminaires montrent un effet du type de sol sur la croissance des espèces étudiées (diminution de la biomasse sèche - BS- du madère sur andosol et du mangle médaille sur nitisol), un effet différent de l'ajout de CA sur BS selon l'espèce considérée, et une réduction du taux de contamination en chlordécone des racines de madère lorsque 2% de charbon activé a été ajoutée au sol.

Références bibliographiques :

Tomaszewski, J.E et al. 2007. Environmental Toxicology and Chemistry 26, 2143-2150

Clostre, F, Letourmy, P, Turpin, B., et al. (2014). Water, Air, & Soil Pollution, 225(10), 2153.

ChlorExpo : intégration des habitudes et pratiques alimentaires de la population des Antilles dans l'évaluation de l'exposition alimentaire à la chlordécone

Ariane Dufour^{1*}, Sonia Poisson^{1*}, Maurizio Ali², Agnès Fournier³, Soazig Lemoine⁴, Caroline Mejean⁵, Chris Roth¹, Jean-Luc Volatier¹, Magalie Jannoyer⁶

¹ Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses), Direction de l'évaluation des risques

² Université des Antilles–Institut national supérieur du professorat et de l'éducation de Martinique (INSPE) de la Martinique, Centre de Recherches et de Ressources en Education et Formation (CRREF - EA4538)

³ Université de Lorraine-Ecole nationale supérieure d'agronomie et des industries agroalimentaires de Nancy (ENSAIA), Unité de recherche Animal et Fonctionnalités des Produits Animaux (UR AFPA)

⁴ Université des Antilles–Laboratoire de biologie marine

⁵ MOISA, Université de Montpellier, CIRAD, CIHEAM-IAMM, INRAE, IRD, Institut Agro, Montpellier, France

⁶ Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD), Direction régionale Antilles-Guyane

* ariane.dufour@anses.fr ; sonia.poisson@anses.fr

Mots-clés :

Exposition alimentaire
Approvisionnements
alimentaires
Habitudes alimentaires
Modes de cuisson

Messages-clés :

Les pratiques d'approvisionnement, de préparation et de cuisson des aliments sont spécifiques à chaque territoire. Leur prise en compte dans l'étude ChlorExpo, permettra d'obtenir une évaluation plus réaliste de l'exposition de la population. Ainsi, il sera possible de déterminer dans quelle mesure elles pourraient représenter un levier utile pour réduire l'exposition alimentaire de la population à la chlordécone.

Contexte

Jusqu'à présent, l'évaluation de l'exposition alimentaire de la population des Antilles à la chlordécone était basée sur des aliments non préparés et non cuisinés (Anses, 2017). Si certains travaux (Clostre et al, 2014) suggèrent que le mode de cuisson n'a pas d'impact sur la teneur en chlordécone pour quelques végétaux, un autre (Martin et al, 2020) semble indiquer le contraire pour la viande bovine. Il apparaît donc important de tenir compte des habitudes alimentaires et culinaires locales dans une nouvelle évaluation de l'exposition de la population des Antilles à la chlordécone.

Matériels et méthodes

L'étude ChlorExpo (2021-2023)³ vise à affiner l'évaluation de l'exposition en recueillant et y intégrant explicitement les pratiques des Antillais en termes d'approvisionnement (types de commerces, origine des produits), de préparation et de cuisson des aliments contributeurs à l'exposition à la chlordécone. Afin de collecter ces informations, une enquête a été réalisée en 2021 auprès de 750 ménages représentatifs de la Martinique et 750 de la Guadeloupe. L'échantillonnage a été fait selon la méthode des quotas sur les critères sociodémographiques de la personne de référence ainsi que sur le type et lieu d'habitation. Les personnes du foyer effectuant les achats et/ou préparant les

³ <https://www.anses.fr/fr/content/chlorexpone-une-tude-affine-de>

[l'exposition-alimentaire-a-la-chlordecone-de-la-population-des](https://www.anses.fr/fr/content/chlorexpone-une-tude-affine-de)

repas ont été interrogées à leur domicile sur leurs habitudes alimentaires.

Résultats

L'enquête a confirmé l'importance de prendre en compte les pratiques spécifiques à chaque île, en termes d'approvisionnement et de cuisson des aliments. Par exemple, les Guadeloupéens achètent davantage leurs aliments dans des commerces de proximité. De même, ils pratiquent davantage les cuissons mijotées pour les viandes et au court-bouillon pour les crustacés/mollusques, tandis que la cuisson grillée ou boucanée des viandes et la cuisson sautée des crustacés et mollusques sont plus fréquentes en Martinique. Certaines pratiques sont néanmoins similaires entre les deux îles : par exemple, environ 20% des fruits, légumes et tubercules consommés sont issus de l'autoproduction ou des dons et moins de 10% pour les viandes, poissons et fruits de mer sur chaque territoire. Les pratiques d'épluchage des légumes sont homogènes sur les deux îles, tout comme la quasi-absence d'utilisation d'un micro-onde pour faire cuire des aliments.

Discussion

L'enquête a permis d'actualiser et d'enrichir les connaissances sur les pratiques alimentaires de la population antillaise par rapport à l'étude Kannari. Cependant, comme pour toute enquête basée sur des déclarations, les réponses peuvent contenir des biais. D'une part, la formulation des questions laisse une certaine part d'interprétation, d'autre part, la compréhension de certains termes n'est pas forcément la même pour tous. Des incohérences ont été observées par confrontation avec des données externes, notamment sur l'origine des aliments, importés ou issus de la production locale, reflétant parfois une méconnaissance de la réalité de cette origine par les répondants.

Les résultats de l'enquête, après validation et éventuellement ajustement par des données externes et/ou d'expertise de terrain, seront intégrés dans l'étude ChlorExpo pour affiner le calcul de l'exposition des Antillais à la chlordécone et ensuite formuler, si possible, des recommandations pratiques, notamment sur l'approvisionnement, et les modes de cuisson des aliments, pour réduire les expositions.

Références bibliographiques :

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

Clostre F, Letourmy P, Thuriès L, Lesueur-Jannoyer M. 2014. Effect of home food processing on chlordecone (organochlorine) content in vegetables. *Science of the Total Environment*. 490:1044-1050.

Martin D et al, (2020), *Effect of home cooking processes on chlordecone content in beef and investigation of its by-products and metabolites by HPLC-HRMS/MS*, *Environment International* 114 (2020) 106077.

Lien entre exposition à la chlordécone et cancer de la prostate dans le contexte des Antilles (ChloECaPA)

Consortium de recherche ChloECaPA : Sara Angeli-Aguiton¹, Malcom Ferdinand², Gaëlle Fromont-Hankard³, Clarisse Joachim-Contaret⁴, [Florence Menegaux](mailto:florence.menegaux@inserm.fr)^{5*}

¹ CNRS-EHESS U8560

² CNRS-Dauphine U170

³ Inserm U1069, Service d'anatomie et cytologie pathologiques, CHRU de Tours

⁴ CHU de Martinique, UF1441 Registre des cancers de la Martinique, Pôle de Cancérologie Hématologie Urologie, Fort-de-France, France

⁵ Inserm U1018, CESP (Centre de recherche en Epidémiologie et Santé des Populations), équipe « Exposome et Hérité », Université Paris-Saclay, UVSQ

* florence.menegaux@inserm.fr

Mots-clés :

Antilles
Cancer
Prostate
Chlordécone,
Environnement

Messages-clés :

- Le projet permettra de disposer d'indicateurs épidémiologiques sur les deux territoires (Guadeloupe et Martinique) pour identifier le profil des patients atteints de cancer de la prostate aux Antilles.

- Le lien entre chlordécone et cancer de la prostate est supposé différent au sein de la population antillaise et nécessite donc d'identifier les hommes qui pourraient être plus à risque.

- La nature du lien entre chlordécone et cancer de la prostate peut induire des cancers significatifs et/ou agressifs, être influencée par des facteurs connus et/ou suspectés, modifier la sensibilité du dépistage par le PSA ou provoquer des effets moléculaires sur les cellules prostatiques.

- Différents processus politiques et sociaux contribuent à renforcer ou à amoindrir les liens entre pesticides et pathologies en santé-environnement.

Aux Antilles françaises, l'incidence du cancer de la prostate (CaP) est deux fois élevée qu'en France métropolitaine (Defossez 2021). En effet, les hommes originaires d'Afrique subsaharienne ont un risque plus élevé de CaP et les raisons de ce risque élevé restent encore à élucider (Conti 2021).

En dehors des facteurs de risque bien établis que sont l'âge, l'origine ethnique et les antécédents familiaux de CaP, des facteurs génétiques et environnementaux, dont l'exposition à des polluants organiques persistants (POPs) comme le chlordécone (CD), sont fortement suspectés. Le CD est persistant dans l'environnement et il a été détecté dans plus de 90 % de la population antillaise (Dereumeaux 2018). A ce jour, une seule étude épidémiologique a mis en

évidence une association entre l'exposition au CD et la survenue du CaP (Multigner 2010).

Dans ce contexte, l'objectif général du projet ChloECaPA est d'aller plus loin dans la compréhension du rôle du CD dans le risque de CaP ainsi que ses dimensions politiques et sociales. Plus spécifiquement, ce projet de recherche pluridisciplinaire s'appuiera sur 4 work-packages (WP).

Le **WP1** utilisera des données des registres des cancers de Guadeloupe, de Martinique et de France métropolitaine sur la période 2010-2019 et des données de cartographie de sols potentiellement contaminés.

Le **WP2** consistera en la mise en place d'une nouvelle étude épidémiologique de type cas-

témoins en Martinique, qui inclura 1200 cas et 2400 témoins en 3 ans. Les données recueillies comprendront un questionnaire général détaillé, des mesures anthropométriques et des prélèvements sanguins afin de mesurer les taux de CD et autres POPs et ses marqueurs génétiques associés au risque de CaP.

Le **WP3** étudiera en Martinique et en Guadeloupe les expériences et mobilisations au sujet de la contamination par les pesticides à l'aide d'entretiens et d'un questionnaire en ligne. Afin d'étudier l'expérience de la maladie dans un environnement contaminé et les mobilisations collectives qui peuvent en émerger, des entretiens qualitatifs semi-directifs seront réalisés, chez des patients atteints de CaP et d'autres maladies potentiellement associées à une contamination par le CD.

Le **WP4** évaluera la distribution du CD dans le sang, la graisse et la prostate. Les effets de l'exposition au CD sur les marqueurs d'agressivité du CaP seront évalués en utilisant des cultures de CaP de diverses origines ethniques et des cultures organotypiques de CaP humains. La signature moléculaire liée à l'exposition au CD sera validée sur des patients atteints de CaP.

Les résultats attendus permettront d'étudier le lien entre l'exposition au CD et le CaP ainsi que ses effets mécanistiques sur les cellules cancéreuses. Enfin, les conséquences sociales et politiques de cette contamination seront mieux comprises, ainsi que la perception de la maladie, de l'environnement et des soins dans ce contexte particulier.

Références bibliographiques :

Conti DV, Darst BF, Moss LC, Saunders EJ, Sheng X, Chou A et al. Trans-ancestry genome-wide association meta-analysis of prostate cancer identifies new susceptibility loci and informs genetic risk prediction. *Nat Genet.* 2021 53, 65–75.

Defossez G, Uhry Z, Delafosse P, et al; French Network of Cancer Registries (FRANCIM). Cancer incidence and mortality trends in France over 1990-2018 for solid tumors: the sex gap is narrowing. *BMC Cancer.* 2021 Jun 24;21(1):726.

Dereumeaux C, Saoudi A. S Imprégnation de la population antillaise par la chlordécone et certains composés organochlorés en 2013/2014. Étude Kannari ; Saint-Maurice : Santé publique France, 2018. 86 p. Disponible à partir de l'URL : <https://www.santepubliquefrance.fr/regions/antilles/documents/rapport-synthese/2018/impregnation-de-la-population-antillaise-par-la-chlordecone-et-certains-composes-organochlores-en-2013-2014-etude-kannari>

Multigner L, Ndong JR, Giusti A, Romana M, Delacroix-Maillard H, Cordier S, et al. Chlordecone exposure and risk of prostate cancer. *J Clin Oncol.* 2010 Jul 20;28(21):3457-62.

Le pesticide chlordécone favorise la dégénérescence des neurones dopaminergiques vulnérables dans le Parkinson : évidence expérimentale dans un modèle cellulaire murin et chez le nématode *C. elegans*

Valeria Parrales¹, Patrick P Michel¹, Rita Raisman¹, Nicolas Bizat^{1,2}, Annie Lannuzel^{1,3*}

¹ Faculté de Médecine de Sorbonne Université, Institut du Cerveau-ICM, INSERM, CNRS, Paris, France

² Faculté de Pharmacie de Paris, Paris Cité, Paris F-75006, France.

³ Centre Hospitalier Universitaire de la Guadeloupe, Service de Neurologie, Faculté de Médecine de l'université des Antilles, Centre d'investigation clinique (CIC) 1424, Pointe-à-Pitre, France

* annie.lannuzel@chu-guadeloupe.fr

Mots-clés :

Chlordécone
Maladie de Parkinson
Neurones dopaminergiques
C. elegans
Protéinopathies

Messages-clés :

- Le CLD a un fort potentiel neurotoxique pour les neurones dopaminergiques
- L'atteinte du système neuronal dopaminergique induite par le CLD se traduit chez le nématode *C. elegans* par une altération d'un réflexe comportemental qui peut être restaurée par la L-dopa.
- Le CLD induit une phosphorylation anormale de la protéine tau, une caractéristique des formes atypiques de Parkinson.
- L'exposition au CLD pourrait jouer un rôle dans la survenue de syndromes parkinsoniens atypiques, anormalement fréquents aux Antilles.

Le chlordécone (CLD) appartient à la famille des pesticides organochlorés. Malgré son interdiction dans les Antilles Françaises depuis 1993, ce pesticide reste présent comme contaminant des écosystèmes antillais. Des symptômes neurologiques invalidants ont été initialement décrits chez des travailleurs exposés de manière chronique au CLD, aux États-Unis. Cependant, peu de travaux ont été effectués par la suite pour étudier l'impact du CLD sur le système nerveux central, notamment lors d'une exposition chronique à bas bruit. Or, il est bien établi que les personnes exposées aux pesticides organochlorés ont un risque accru de développer le Parkinson.

Nous avons donc évalué dans ce travail, le potentiel du CLD à reproduire une dégénérescence parkinsonienne, caractérisée, notamment, par une perte

progressive des neurones dopaminergiques. Pour cela, nous avons évalué le potentiel toxique du CLD sur des neurones dopaminergiques de souris en culture et sur le système dopaminergique d'un animal modèle, le nématode *Caenorhabditis elegans* (*C. elegans*).

Nos résultats montrent que le CLD a un fort potentiel neurotoxique pour les neurones dopaminergiques en culture. Ses effets sont dépendants de la concentration et du temps d'exposition. Ils s'accompagnent d'une perte de fonction de ces neurones. Chez *C. elegans* une dégénérescence progressive des neurones dopaminergiques est également observée. Elle se traduit par une altération du comportement moteur sensible à la prise de nourriture du nématode qui est restauré par un apport exogène en L-dopa, une molécule utilisée dans le traitement du

Parkinson. A noter que d'autres systèmes neuronaux non-dopaminergiques sont aussi affectés par le CLD. La perte neuronale induite par le CLD apparaît être la conséquence d'un dysfonctionnement progressif de la mitochondrie, causant un stress oxydatif radicalaire délétère. Le CLD semble aussi particulièrement toxique pour les cellules microgliales [les macrophages cérébraux] sans pour autant les activer. Nous montrons que le CLD a également la capacité de promouvoir la phosphorylation de la protéine tau dans certaines sous-populations de neurones dopaminergiques et non-dopaminergiques aussi bien dans le modèle cellulaire que chez le nématode exprimant la protéine tau humaine. Cette dernière observation est à mettre en rapport avec le fait que la protéine tau est aussi anormalement phosphorylée dans les syndromes parkinsoniens atypiques, notamment ceux décrits dans les Antilles. Cependant, nous n'avons pas observé d'effet similaire avec l' α -Synucléine, une protéine impliquée dans les formes classiques de Parkinson.

Au total, nos données expérimentales suggèrent qu'une exposition chronique, de faible intensité au CLD, pourrait jouer un rôle dans la survenue de syndromes parkinsoniens atypiques, anormalement fréquents aux Antilles.

Références bibliographiques :

Dardiotis E, Aloizou AM, Sakalakis E, Siokas V, Koureas M, Xiromerisiou G, Petinaki E, Wilks M, Tsatsakis A, Hadjichristodoulou C, Stefanis L, Hadjigeorgiou GM. Organochlorine pesticide levels in Greek patients with Parkinson's disease. *Toxicol Rep.* 2020; 7: 596–601.

Elbaz A, Clavel J, Rathouz PJ, Moisan F, Galanaud JP, Delemotte B, et al. Professional exposure to pesticides and Parkinson's disease. *Ann Neurol.* 2009;66(4):494–504.

Jayaraj R, Megha P, Sreedev P. Organochlorine pesticides, their toxic effects on living organisms

and their fate in the environment. *Interdiscip Toxicol.* 2016 Dec;9(3-4):90-100.

Lannuzel A, Ruberg M, Michel PP. Atypical parkinsonism in the Caribbean island of Guadeloupe: Etiological role of the mitochondrial complex I inhibitor annonacin. *Mov Disord* 2008, 23(15): 2122–2128.

Lannuzel A, Edragas R, Lackmy A, Tressières B, Pelonde V, Kaptué MEN, Mécharles S, Demas A, François B, McGovern E, Vidailhet M, Gaymard B, Roze E. Further evidence for a distinctive atypical degenerative parkinsonism in the Caribbean: A new cluster in the French West Indian Island of Martinique. *J Neurol Sci.* 2018, 388:214-219 .

Michel PP, Hirsch EC, Hunot S. Understanding Dopaminergic Cell Death Pathways in Parkinson Disease. *Neuron.* 2016 May 18;90:675-91.

Moisan F, Spinosi J, Delabre L, Gourlet V, Mazurie JL, Bénatru I, Goldberg M, Weisskopf MG, Imbernon E, Tzourio C, Elbaz A. Association of Parkinson's Disease and Its Subtypes with Agricultural Pesticide Exposures in Men: A Case-Control Study in France. *Environ Health Perspect.* 2015; 123(11):1123-9.

Richardson JR, Fitsanakis V, Westerink RHS, Kanthasamy AG. Neurotoxicity of pesticides. *Acta Neuropathol.* 2019;138:343-362.

Taylor JR, et al. Chlordecone intoxication in man. I. Clinical observations. *Neurology.* 1978 Jul;28(7):626-30.

Kannari 2, étude de l'imprégnation des populations guadeloupéenne et martiniquaise par la chlordécone et par d'autres polluants environnementaux d'intérêt

Frank Assogba A.G.^{1*}, Anne Teissier¹, Marie Barran¹, Pascal Jehannin¹, Équipe projet Kannari2¹ⁱ, Jacques Rosine¹

¹ Santé publique France

ⁱ Équipe projet Kannari 2 : BENEZET Laetitia, BIDONDO Marie-Laure, CANABADY Saraniya, DE CROUY CHANEL Perrine, DELAMAIRE Corinne, DEREUMEUX Clémentine, POZUELOS Jérôme, ROBION Anne, RUELLO Marc, SAOUDI Abdessattar, SZEGO Emmanuelle, THERRE Hélène, VANDENTORREN Stephanie ; Appui administratif et financier : COIVOUS Aude, HACHIN Clothilde, KILINC Asli, LECHAUVE Carole, LEGOND Sophie, MEREAU Anne-Laure, THELISE Cindy

* frank.assogba@santepubliquefrance.fr

Mots-clés :

Chlordécone
Polluants
environnementaux
Imprégnation
Martinique
Guadeloupe

Messages-clés :

- Evolution du niveau d'imprégnation par la chlordécone des populations martiniquaise et guadeloupéenne
- Identification de profils d'exposition à la chlordécone
- Description et identification des déterminants de l'imprégnation par plusieurs polluants environnementaux aux Antilles

Contexte et objectifs

La contamination de l'environnement par la chlordécone aux Antilles françaises expose de façon continue et durable la population, principalement par voie alimentaire. La première mesure d'imprégnation en population générale, menée en 2013-2014, a permis de montrer que plus de neuf personnes sur dix en Guadeloupe et en Martinique avaient des concentrations sériques de chlordécone supérieures à la limite de détection¹. La seconde édition (Kannari 2) vise à (i) décrire les niveaux d'imprégnation par la chlordécone et par d'autres polluants d'intérêt de la population générale guadeloupéenne et martiniquaise ainsi que des sous-groupes de population d'intérêt (pêcheurs, travailleurs agricoles, femmes en âge de procréer, enfants), (ii) étudier les évolutions depuis 2013, (iii) rechercher les déterminants associés. Cette étude a pour objectifs secondaires d'étudier les connaissances, attitudes pratiques (CAP)

des personnes au regard des recommandations alimentaires visant à réduire l'exposition à la chlordécone, et l'association potentielle avec la situation socio-économique individuelle sur le niveau d'imprégnation par la chlordécone des participants.

Méthodologie

Il s'agit d'une enquête transversale en population générale (âge de 3 ans et plus), résidant depuis au moins 6 mois en Martinique et en Guadeloupe continentale au moment de l'enquête. L'enquête se déroulera en deux phases : une phase pilote (fin mars 2023) et une phase de terrain (septembre à décembre 2023). Les adultes (n=1150 par territoire) seront tirés au sort parmi les bénéficiaires de trois régimes d'assurance maladie (Caisse maritime, CGSS de Martinique, CGSS et Mutualité Sociale Agricole de Guadeloupe). Les enfants de 3 à 17 ans (n=350 par territoire, un par

domicile) seront tirés au sort selon la méthode Kish parmi l'ensemble des enfants résidant au domicile des adultes tirés au sort.

Les données socio-économiques, démographiques, l'état de santé, les CAP, le mode de vie et les loisirs, les données d'exposition alimentaire, professionnelle par la chlordécone et par d'autres polluants environnementaux seront recueillis au travers de questionnaires administrés au domicile des participants. En plus de la chlordécone, des mesures biologiques individuelles d'autres polluants seront réalisées. Ces polluants ont été sélectionnés selon la méthode de priorisation par consensus Delphi à partir des critères d'exposition, de toxicité, et de comparabilité avec des résultats d'études historiques et de faisabilité analytique. Des paramètres anthropométriques et la pression artérielle seront mesurés au domicile des participants par des infirmiers, et des prélèvements d'échantillons biologiques (sang, urines) seront effectués.

Les distributions des concentrations biologiques des différents biomarqueurs ainsi que les CAP seront décrites pour les populations de manière globale et par sous-groupe d'intérêt, notamment par classe d'âge, genre, profession et secteurs d'activité. Les déterminants de l'imprégnation par un biomarqueur seront étudiés en utilisant un modèle linéaire généralisé. L'association avec le niveau socio-économique individuel sera étudiée par un modèle multiniveaux.

Conclusion :

Cette étude permettra de fournir une estimation actualisée du niveau d'imprégnation des populations antillaises par la chlordécone et d'évaluer son évolution depuis 2013. Elle fournira également des connaissances sur le profil des personnes imprégnées par la chlordécone et apportera pour la première fois une estimation du

niveau d'imprégnation en population générale par d'autres polluants.

Références bibliographiques :

1. Dereumeaux C, Saoudi A. Imprégnation de la population antillaise par la chlordécone et certains composés organochlorés en 2013/2014. Étude kannari ; Saint-Maurice : Santé publique France, 2018 86 p. Disponible à partir de l'URL : www.santepubliquefrance.fr

Caractérisation *in vitro* de la toxicité et du métabolisme hépatique du chlordécone alcool (chlordécol) sur un modèle cellulaire d'hépatocytes humains HepG2

Hanan El Sheikh Saad¹, Gulminyam Baratzhanova^{1,2,4}, Marion Huguet¹, Arnaud Paul¹, Olivier Joubert³, Leyla Djansugurova^{2,4}, Agnès Fournier¹, Céline Cakir-Kieffer^{1*}

¹ UR AFPA, Université de Lorraine-INRAE (USC340), F-54000 Nancy

² Al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Biology and Biotechnology, 050040 Almaty

³ Institut Jean Lamour, UMR CNRS 7198, Université de Lorraine, F-54000 Nancy

⁴ Institute of General Genetics and Physiology, 050060 Almaty, Kazakhstan

* celine.cakir-kieffer@univ-lorraine.fr

Mots-clés :

Métabolisme

Toxicité

Détoxification

Modèle cellulaire hépatique

HepG2

Messages-clés :

- Niveau de toxicité hépatique du chlordécol versus la chlordécone

- Métabolisme et voie de détoxification du chlordécol versus la chlordécone

La chlordécone (CLD) est métabolisée dans le foie par une aldo-céto réductase (AKR1C4) en chlordécol (CLD-OH)⁴, conférant à la molécule des propriétés structurales différentes. La CLD s'accumule dans le foie et le métabolite CLD-OH est retrouvé dans la bile, liquide transportant le cholestérol *via* les lipoprotéines ainsi que des molécules éliminées par le foie. Nous avons récemment démontré en mesurant des interactions moléculaires, que la CLD se fixe sur les lipoprotéines humaines de basse densité (LDL), et que le CLD-OH se fixe sur les lipoprotéines humaines de haute densité (HDL) alors qu'aucune affinité n'est mesurée entre CLD et HDL et CLD-OH et LDL³, suggérant un comportement physiologique différent des deux molécules.

Le CLD-OH est fréquemment retrouvé dans les eaux de surface de Basse-Terre⁵, dans les sols de Martinique et de Guadeloupe^{1,2}. Dans ce contexte, il est nécessaire de mieux comprendre le niveau de toxicité de ce métabolite comparé à la toxicité de la CLD ainsi que son devenir dans l'organisme.

L'objectif de ce travail est d'étudier *in vitro* l'impact de la CLD et de son métabolite le CLD-OH sur le métabolisme hépatique. Dans cet objectif, la lignée cellulaire d'hépatocarcinome humaine HepG2 est traitée avec la CLD et le CLD-OH, dilués à des concentrations hautes (μM) et basses (nM) dans le milieu de culture des cellules (DMEM supplémenté avec 10% de sérum de veau fœtal). Le suivi de la viabilité cellulaire en utilisant le test MTT permet de déterminer le niveau de toxicité des molécules en calculant une IC₅₀. En parallèle, le niveau de production des ROS sera estimé en mesurant différents marqueurs du stress oxydant au niveau cellulaire (superoxyde dismutase, catalase, glutathion peroxydase, GSH...).

Par ailleurs, une étude de toxicogénomique (par RT-qPCR) des cellules traitées à la CLD et au CLD-OH permettra de déterminer l'impact des traitements sur l'expression de différents gènes de détoxification ou impliqués dans le métabolisme des xénobiotiques. Une recherche bibliographique ainsi que l'utilisation de banques de données comme <http://ctdbase.org>, nous a permis de

sélectionner des gènes clés potentiellement impliqués. Nous allons ainsi étudier, dans un premier temps, le niveau d'expression des gènes codant les récepteurs aux œstrogènes (ESR1, ESR2), les cytochromes P450 (CYP2B6), le récepteur de la progestérone (PGR) ainsi que l'aldo-céto réductase AKR1C4. Cette étude pourra être complétée par une étude du niveau d'expression des protéines par Western-blot.

Références bibliographiques :

1. Chevallier *et al.*, 2019. Natural chlordecone degradation revealed by numerous transformation products characterized in key French West Indies environmental compartments. *Environmental Science and Technology*, 53, 11, 6133-6143
2. Comte *et al.*, 2022. Long-term pollution by chlordecone of tropical volcanic soils in the French West Indies: New insights and improvement of previous predictions. *Environmental Pollution*,
3. Delannoy *et al.*, 2020. Affinity of chlordecone and chlordecol for human serum lipoproteins. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 80:103486.
4. Molowa *et al.*, 1986. Purification and Characterization of Chlordecone Reductase from Human Liver. *The Journal of Biological Chemistry* 261 (27): 12624-27.
5. Rochette *et al.*, 2017. Projet CleauTerre - Contamination des bassins versants de la Guadeloupe continentale par la chlordécone, 89p.

Analyse spatiale de l'incidence des cancers et lien avec l'exposition au chlordécone en Guadeloupe

Bernard Bhakkan^{1*}, Victor Dufleit^{2,3}, Danièle Luce⁴, Jacqueline Deloumeaux¹

¹ Registre général des cancers de Guadeloupe, CHU de la Guadeloupe

² Cirad, UMR TETIS, F-34398 Montpellier, France

³ Univ Montpellier, F-34090 Montpellier, France

⁴ Irset - Inserm UMR_S 1085, Faculté de Médecine, Campus de Fouillole, Guadeloupe

* bernard.bhakkan-mambir@chu-guadeloupe.fr

Mots-clés :

Cancer
Incidence
Analyse spatiale
Indice de contamination
Chlordécone

Messages-clés :

- On observe une augmentation non significative des SIR pour le cancer de la prostate dans les zones contaminées.
- On observe une augmentation significative des SIR pour le cancer de l'estomac dans les zones contaminées nécessitant des explorations complémentaires.
- Des indices pour de nombreux autres pesticides sont nécessaires pour améliorer la compréhension de leur impact en santé humaine, notamment sur l'incidence des cancers.

Les variations de l'incidence des cancers sont observées à différentes échelles et les analyses spatiales menées à des niveaux géographiques fins permettent d'identifier des zones à risque et de potentiels facteurs étiologiques. Le projet FEDER « GESSICa » utilise une approche multidisciplinaire liant géographie, épidémiologie, recherche clinique et sciences sociales pour étudier l'incidence des cancers sur le territoire guadeloupéen en lien avec l'utilisation des pesticides.

Des indices de contamination des sols sur une période longue sont élaborés à partir d'un modèle dynamique (modèle DynPestSols) basé sur de nombreux paramètres évoluant dans le temps : occupation des sols, pluviométrie, caractéristiques physico-chimiques des substances actives, produits pesticides utilisés et leurs recommandations d'utilisations, pratiques agricoles. Dans un premier temps, nous avons utilisé un indice simplifié de contamination des sols par le chlordécone élaboré par le CIRAD. Nous

avons effectué une analyse spatiale de l'incidence des cancers en Guadeloupe à l'aide d'un modèle hiérarchique bayésien (méthode de Besag York et Molié¹). Le paramètre étudié était le ratio d'incidence standardisé (SIR) avec un découpage géographique infra-communal au niveau de l'IRIS. Nous avons utilisé les données du registre des cancers de Guadeloupe sur la période 2008 - 2017 pour les 17 localisations cancéreuses les plus fréquentes correspondant à 18 997 tumeurs.

Afin de tenir compte du lien connu entre niveau social et incidence des cancers^{2,3}, nous avons ajusté le modèle sur un indice de défavorisation sociale spécifique des Antilles⁴. Pour chaque localisation cancéreuse, nous avons estimé les risques relatifs ainsi que leurs intervalles de crédibilité à 80% pour les zones modérément contaminées et les zones les plus contaminées en référence aux zones non contaminées.

Dans les zones les plus contaminées par le chlordécone, nous observons des RR

significatifs pour le cancer de l'estomac pour les deux sexes (RR=1,29 [1,12 ; 1,92]) ainsi que chez les hommes (RR=1,59 [1,28 ; 2,7]) et pour le myélome multiple chez les femmes (RR=1,25 [1,07 ; 1,94]. Nous observons également une augmentation non significative du risque de cancer de la prostate avec la contamination des sols (RR=1,03 et RR=1,09 pour les zones modérément contaminées et fortement contaminées respectivement).

Ces résultats préliminaires utilisant un indice de contamination simplifié pour le chlordécone, sont cohérents avec les hypothèses étiologiques. En effet, l'augmentation modérée du risque de cancer de la prostate avec l'exposition au chlordécone déjà observée⁵ est retrouvée. L'hypothèse d'un lien entre exposition au chlordécone et cancer digestif (estomac) via une contamination alimentaire nécessite des explorations complémentaires. Pour les hémopathies malignes, dont le lien avec l'exposition aux pesticides fait l'objet de plusieurs études^{6,7}, l'étude cas-témoins Myélodom/Lymphodom en cours aux Antilles permettra de préciser les résultats. L'indice définitif de contamination des sols par le chlordécone et des indices similaires pour de nombreux autres pesticides sont en cours de finalisation. Il est également prévu de créer des indices de contamination des eaux et de l'air. L'analyse de la répartition géographique des cancers avec l'ensemble de ces indices permettra d'avancer dans la compréhension du rôle des pesticides dans leur survenue.

Références bibliographiques :

1. Besag J, York J, Mollie A. Bayesian image restoration, with two applications in spatial statistics. *Ann Inst Stat Math.* 1991;43:1-20.
2. Faggiano F, Partanen T, Kogevinas M, Boffetta P (1997). Socioeconomic differences in cancer incidence and mortality. *IARC Sci Publ, Lyon*, pp 65-176

3. Merletti F, Galassi C, Spadea T (2011) The socioeconomic determinants of cancer. *Environ Health Glob Access Sci Source*, 10(Suppl 1):S7
4. Luce, D., Michel, S., Dugas, J., Bhakkan, B., Menvielle, G., Joachim, C., Deloumeaux, J. Disparities in cancer incidence by area-level socioeconomic status in the French West Indies (2017) *Cancer Causes and Control*, 28 (11), pp. 1305-1312
5. Multigner L, Ndong JR, Giusti A, Romana M, Delacroix-Maillard H, Cordier S, et al. Chlordecone exposure and risk of prostate cancer. *J Clin Oncol.* 2010;28(21):3457-62.
6. Eriksson M, Hardell L, Carlberg M, Åkerman M. Pesticide exposure as risk factor for non-Hodgkin lymphoma including histopathological subgroup analysis. *International Journal of Cancer.* 2008;123(7):1657-63.
7. Fabbro-Peray P, Daures JP, Rossi JF. Environmental risk factors for non-Hodgkin's lymphoma: A population-based case-control study in Languedoc-Roussillon, France. *Cancer Causes and Control.* 2001;12(3):201-12.

Myélome multiple et autres lymphomes non hodgkiniens dans les Antilles françaises : rôle de l'exposition au Chlordécone. Etude cas-témoins en Guadeloupe et Martinique

Jacqueline Deloumeaux^{1*}, Philippe Helias², Philippe Renaudier³, Martial Boisseau³, Amandine Marquina⁴, Olivia Jerier², Weber Lafrance², Ludovic Janaud⁴, Laurent Benoist⁴, Jacqueline Veronique-Baudin⁵, Danièle Luce⁶, Clarisse Joachim⁷

¹ Registre général des cancers de Guadeloupe, CRB Karubiotec™, CHU de la Guadeloupe

² Service d'oncologie, CHU de la Guadeloupe

³ Service d'oncologie, CHU de Martinique

⁴ CRB Karubiotec™, CHU de la Guadeloupe

⁴ Oncologie médicale, CH de Basse-Terre, Guadeloupe

⁵ Unité Recherche en Cancérologie, CHU de Martinique

⁶ Irset - Inserm UMR_S 1085, Faculté de Médecine, Campus de Fouillole, Guadeloupe

⁷ Registre général des cancers de la Martinique, pôle de Cancérologie Hématologie Urologie CHU de Martinique

* jacqueline.deloumeaux@chu-guadeloupe.fr

Mots-clés :

Myélome
Lymphome
Chlordécone
Etude cas-témoins

Messages-clés :

- Une présomption forte existe entre exposition aux pesticides et hémopathies malignes.
- L'incidence plus élevée des myélomes aux Antilles nécessite des explorations complémentaires.
- L'étude cas-témoins Myélodom/lymphodom en Guadeloupe et en Martinique fournira des données pour préciser un lien éventuel entre exposition au CLD et MM et LNH aux Antilles.

Les lymphomes non hodgkiniens (LNH) sont divisés en différents sous-types de lymphomes à cellules B ou T d'origine multifactorielle impliquant des facteurs génétiques, viraux (hépatites C et B, virus Epstein-Barr, HTLV-1) et environnementaux. Le myélome multiple (MM) est un lymphome à cellules B matures caractérisé par la prolifération monoclonale de plasmocytes tumoraux envahissant la moelle osseuse. C'est la seconde hémopathie maligne parmi les LNH. Son incidence plus élevée chez les sujets noirs suggère l'existence de facteurs génétiques¹. Néanmoins, l'expertise collective Inserm « Pesticides et Santé » a établi une présomption forte entre l'exposition aux pesticides et le risque de survenue de MM². L'existence d'un lien entre l'exposition professionnelle aux pesticides et des sous-types de LNH a été confirmé dans une méta-analyse³.

En Guadeloupe et en Martinique, l'incidence du MM est sensiblement plus élevée que dans l'Hexagone, et en Martinique, une étude de corrélation géographique a mis en évidence une incidence élevée de MM chez les individus résidant sur des sols pollués par le chlordécone⁴.

Le projet GESSICa, qui explore la distribution de l'incidence des cancers en Guadeloupe par des approches multidisciplinaires, inclut une étude cas-témoins en population générale visant à mesurer le lien entre MM et exposition au chlordécone et à d'autres pesticides (hexachlorocyclohexane, DDE, DDT, PCB). L'étude, élargie à l'ensemble des LNH en Guadeloupe et en Martinique dans le cadre du plan chlordécone IV, permettra d'estimer les odds-ratios ajustés associés aux différents facteurs de risque et la proportion de cas attribuables dans la population.

Un questionnaire administré en face-à-face, reconstitue l'histoire résidentielle et professionnelle, recueille des données sociodémographiques, les antécédents ainsi que des données cliniques en lien avec la pathologie étudiée pour les cas. Des prélèvements sanguins pour le dosage des pesticides sont effectués pour tous les sujets et des échantillons conservés pour une collection biologique.

Le nombre de sujets prévus est de 350 cas et de 700 témoins. Les témoins sont issus d'un échantillon aléatoire de la population générale du département de résidence des cas. Ils sont sélectionnés par une procédure d'appels téléphoniques au hasard par un institut de sondage. Le recrutement est stratifié sur le département de résidence, le sexe et l'âge des cas. Une stratification supplémentaire est utilisée pour obtenir une répartition par catégorie socioprofessionnelle (CSP) comparable à celle de la population afin de contrôler les biais de sélection potentiels résultant de taux de participation différentiels selon la CSP.

L'état d'avancement de l'étude débutée en Guadeloupe fin 2019 a été fortement impacté par les 2 ans de pandémie COVID. La participation du centre de la Martinique a débuté fin 2021 pour l'inclusion des cas et en juin 2022 pour l'inclusion des témoins. Près de 200 cas et témoins sont actuellement inclus dans l'étude et plus de 1800 échantillons biologiques sont gérés par le centre de ressources biologiques Karubiotec™. Le transfert d'échantillons pour dosage des pesticides au laboratoire CART a été effectué pour les 100 premiers patients. Les 1ers résultats de ces dosages seront disponibles en septembre 2022 et présentés lors du colloque.

Références bibliographiques :

1. Flowers CR, Glover R, Lonial S, Brawley OW. Racial differences in the incidence and outcomes

for patients with hematological malignancies. *Curr Probl Cancer* 2007;31(3):182-201.

2. Collection Expertise Collective Inserm. Pesticides – Effets sur la santé. Éditions Inserm, Juillet 2013

3. Merhi, M., et al., Occupational exposure to pesticides and risk of hematopoietic cancers: meta-analysis of case-control studies. *Cancer Causes Control*, 2007. 18(10): p. 1209-26.

4. Numéro thématique - Chlordécone aux Antilles : bilan actualisé des risques sanitaires. BEH 2011; Saint-Maurice (Fra) : Institut de veille sanitaire (3-4-5):37-40.

Déterminants et leviers de la confiance dans les messages de santé publique

Corinne Delamaire^{1*}, Marie Barran¹, Tom McMinigal², Alice Escande², Laurence Noirot^{1*}

¹ Santé publique France

² Behavioural Insights Team (BIT)

* corinne.delamaire@santepubliquefrance.fr ; laurence.noirot@santepubliquefrance.fr

Mots-clés :

Chlordécone
Messages de prévention
Sciences comportementales
Confiance
Approches de communication

Messages-clés :

- Forte défiance de la population dans les messages de prévention des pouvoirs publics
- L'effet des messages de santé publique sur le comportement d'une personne dépend en partie de sa confiance dans les compétences et les motivations du messager.
- Trois leviers de communication peuvent permettre d'augmenter la confiance envers les messagers : une communication unidirectionnelle et descendante, une communication participative et des approches de santé communautaire
- Sur le sujet de la pollution à la chlordécone, importance de combiner des mesures micro (comme la diffusion de messages de prévention), mais aussi macro pour restaurer la confiance

Dans le cadre du plan chlordécone IV, Santé publique France (SpF) est chargée d'élaborer des messages visant à permettre à la population de réduire son exposition alimentaire à la chlordécone. Cependant, l'autorisation prolongée de cette molécule aux Antilles françaises a engendré une méfiance de la population vis-à-vis de l'État et représente un frein majeur à la confiance dans les messages de prévention des autorités.

SpF a ainsi mandaté un institut spécialisé en sciences comportementales, le Behavioural Insights Team, pour identifier à partir de la littérature les déterminants de la confiance dans les messages de santé publique et les leviers possibles pour accroître cette confiance.

Les recherches ont été effectuées sur *Google Scholar* et dans des revues spécialisées en *santé publique, prévention des risques, gestion des crises, psychologie* et en *design appliqué aux politiques publiques*. Un filtre a été

appliqué pour isoler les études à inclure (méta-analyses, revues systématiques, revues de littérature et études individuelles influentes).

Deux déterminants ont été identifiés en s'inspirant du modèle de Siegrist et coll.¹ ; l'effet des messages de santé sur le comportement d'une personne dépendrait de sa confiance dans :

- les compétences du messager (dépendent de la qualité des conseils reçus du messager par le passé et des perceptions de son expertise) ;
- les motivations du messager (dépendent du degré de similitude entre les valeurs du messager et du destinataire, de la perception de son impartialité et de son implication dans la situation).

Trois leviers de communication permettraient d'augmenter la confiance dans les compétences ou motivations des messagers :

- Une communication unidirectionnelle et descendante² de messages élaborés par des institutions, avec une possibilité limitée de dialogue entre le messenger et les destinataires, mais utilisant des connaissances issues des sciences comportementales et de la communication des risques (tester les messages pour un impact maximal ; s'appuyer sur un messenger local de confiance). Cette approche, la plus simple, implique peu de participation du groupe cible et peut s'avérer insuffisante pour réduire la défiance envers les institutions.

- Une communication participative³ impliquant plusieurs acteurs locaux (journalistes, acteurs et représentants du groupe cible...), ainsi qu'une approche pédagogique (ateliers, activités) afin d'aider à l'appropriation des messages institutionnels. Cette communication implique davantage la population mais surtout pour le processus de diffusion des messages.

- Une approche de santé communautaire impliquant le groupe cible⁴ dans l'élaboration, la mise en œuvre et la diffusion de messages et mesures de santé publique. Cette approche, la plus participative, est aussi la plus compliquée à appliquer et peut limiter le périmètre de diffusion des messages à l'environnement proche du groupe cible.

Pour chacune des approches et en utilisant l'échelle de participation citoyenne d'Arnstein⁵, des études de cas montrent comment elles pourraient être applicables au contexte de la pollution environnementale liée à la chlordécone.

En conclusion, ce panorama de la littérature souligne l'importance de combiner des mesures micro (comme les messages de prévention) et macro (par exemple réglementaires) pour pouvoir restaurer significativement la confiance dans les

messages de santé publique et les messagers institutionnels.

Références bibliographiques :

1. Siegrist M, Gutscher H. and Earle TC. "Perception of risk: the influence of general trust, and general confidence". *Journal of Risk Research*. 2005; Vol. 8 No. 2, pp. 145-56.
2. Sharp EA, Thwaites R, Curtis A, Millar J. Factors affecting community-agency trust before, during and after a wildfire: an Australian case study. *J Environ Manage*. 2013;130:10-9.
3. Harvard Humanitarian Initiative. *Disaster Relief 2.0: The Future of Information Sharing in Humanitarian Emergencies*, United Nations Foundation and The Vodafone Foundation, Washington, DC and Berkshire. 2011.
4. Venkataramanan V, Crocker J, Karon A, Bartram J. Community-Led Total Sanitation: A Mixed-Methods Systematic Review of Evidence and Its Quality. *Environmental Health Perspectives*. 2018;126(2):026001. <https://doi.org/10.1289/EHP1965>
5. Arnstein SR. A ladder of citizen participation. *Journal of the American Institute of Planners*. 1969;35(4): 216-224.

Etude de la dégradabilité anaérobie de la chlordécone par des cultures mixtes et en parcelles

Gaëlle Gruel¹, Line Lomheim², Laurent Laquittaine¹, Suly Rambinaising¹, Naomy Duhamel¹, Ronald Ranguin¹, Corine Jean-Marius¹, Andrei Starostine², Robert Flick², Amy Li², Luz A. Puentes Jácome², Elizabeth A. Edwards², Sarra Gaspard^{1*}

¹ Département de Chimie, Laboratoire COVACHIMM2E, pôle Guadeloupe, Université des Antilles

² Département de génie chimique et de chimie appliquée, BioZone, Université de Toronto

* sarra.gaspard@univ-antilles.fr

Mots-clés :

Culture mixte
Dégradation
Pentachloro-indène
Parcelle

Messages-clés :

- Des cultures mixtes connues pour déchlorurer les composés organochlorés sont capable de dégrader la chlordécone.
- Le produit de déchloruration majoritaire est le pentachloroindène.
- Des trichloro-indène et pentachloro-indènes parboxylés sont produits.
- L'abondance de *Desulfovibrio* et *Acetobacterium* est observée.

Aux Antilles françaises, l'usage massif de la chlordécone, en tant que matière active entrant dans la composition de pesticides organochlorés récalcitrants, pour la lutte contre le charançon noir du bananier, a entraîné une pollution à long terme des compartiments environnementaux (sols, ressources en eau, zones côtières) et par la suite de certaines productions alimentaires locales (légumes, animaux d'élevage et fruits de mer), engendrant ainsi des problèmes de santé humaine et des difficultés sociales.

Bien que son utilisation soit interdite depuis 1993, des concentrations importantes de chlordécone peuvent être mesurées dans certains sols, notamment dans les zones de production de bananes. En effet, la molécule est fortement adsorbée du fait de sa grande hydrophobicité liée à sa structure complexe en bis-homocubane lui conférant ainsi une forte persistance environnementale. Toutefois, malgré l'urgence sanitaire et sociale, aucune stratégie de remédiation ne s'est avérée satisfaisante jusqu'à présent. La capacité de certaines communautés

microbiennes à dégrader la chlordécone pourrait fournir une alternative de bioremédiation efficace et écologique. Une étude préliminaire de la biodégradabilité de la chlordécone a été réalisée sur des petites parcelles de sols contaminées (1m²) couverte d'un compost et d'une bâche ou bien immergées. La dégradation de la chlordécone a été étudiée pour deux cultures bactériennes mixtes, l'une développée par le laboratoire Biozone (MC1) et bien connue pour ses capacités à dégrader des composés organochlorés¹ et l'autre (MC2) issue de microcosmes préparés en conditions anaérobies à partir de sols contaminés de Guadeloupe et capables de dégrader le lindane^{2,3}. Les cultures mixtes ont été incubées avec de la chlordécone et des donneurs d'électrons (éthanol et acétone). La chlordécone et les produits de dégradation potentiels ont été analysés et quantifiés régulièrement par LC-MS. Les concentrations en méthane ont été déterminées pour MC1 et MC2 par GC-FID. L'ADN a été extrait pour les cultures, et les

communautés microbiennes ont été analysées par séquençage de l'ARN ribosomique 16S (Illumina MiSeq).

Une diminution de la concentration en chlordécone a été observée à la fois pour les cultures mixtes et dans les parcelles. Pour les cultures mixtes MC1 et MC2, les produits de dégradation de la chlordécone, déjà identifiés lors de travaux précédents^{4,5} sont détectés. Le produit de dégradation majoritaire est le pentachloroindène. Ce composé est aussi détecté dans les parcelles de sols. Le trichloro- et le pentachloro-indène carboxylés issus de l'ouverture de la structure en cage de la chlordécone sont détectés en quantité importante pour MC1, mais en faible quantité pour MC2. Les résultats de l'analyse des communautés microbiennes montrent, pour les cultures mixtes, l'abondance de *Desulfovibrio* et *Acetobacterium*.

Références bibliographiques :

1. Shujun Yi, Nadia Morson, Elizabeth A. Edwards, Diwen Yang, Runzeng Liu, Lingyan Zhu, and Scott A. Mabury. Anaerobic Microbial Dechlorination of 6:2 Chlorinated Polyfluorooctane Ether Sulfonate and the Underlying Mechanisms, Environ. Sci. Technol. 2022, 56, 907–916.
2. Jacome, L.A.P., Lomheim, L., Gaspard, S., Edwards, E.A. Biodegradation of Lindane (Hexachlorocyclohexane) to Nontoxic End Products by Sequential Treatment with Three Mixed Anaerobic Microbial Cultures. Environmental Science and Technology, 2021, 55(5), pp. 2968–2979.
3. Qiao, W., Puentes Jácome, L.A., Tang, X., Lomheim, L., Yang, M.I., Gaspard, S., Avanzi, I.R., Wu, J., Ye, S., Edwards, E.A. Microbial Communities Associated with Sustained Anaerobic Reductive Dechlorination of α -, β -, γ -, and δ -Hexachlorocyclohexane Isomers to Monochlorobenzene and Benzene (2020) Environmental Science and Technology.
4. L. Lomheim, L. Laquitaine, S. Rambinaising, R. Flick, A. Starostine, C. Jean-Marius, E.A. Edwards, S. Gaspard, PLoS One. 15 (2020) e0231219.
5. M.L. Chevallier, O. Della-Negra, S. Chaussonnerie, A. Barbance, D. Muselet, F. Lagarde, E. Darii, E. Ugarte, E. Lescop, N. Fonknechten, J. Weissenbach, T. Woignier, J.F. Gallard, [S. Vuilleumier; G. Imfeld, D. Le Paslier, P.L. Saaidi, Environ. Sci. Technol. 53 (2019) 6133–6143.

Efficacité et innocuité d'une stratégie de séquestration de la chlordécone sur sol Antillais

Matthieu Delannoy^{1*}, Séverine Piutti², Sophie Slezak², Yves Le Roux¹, Cyril Feidt¹

¹ Université de Lorraine, INRAE, URAFPA, F-54000 Nancy, France

² Université de Lorraine, INRAE, LAE, F-54000 Nancy, France

* matthieu.delannoy@univ-lorraine.fr

Mots-clés :

Chlordécone
Séquestration
Biochar
Poule pondeuse
Courgette

Messages-clés :

- La stratégie par amendement de charbon actif sur du sol contaminé à la CLD permet une nette réduction du transfert.
- Cette réduction est visible pour toutes les espèces sensible et importante (plus de 85%) sauf pour la poule pondeuse (29%).
- Si cette stratégie est impactante pour la microflore du sol dès l'application, cet impact serait limité dans le temps.

Dans le contexte insulaire Antillais, la production de denrées alimentaires est mise à mal par la contamination à la chlordécone non seulement en termes de sûreté chimique mais aussi en termes de sécurité. En effet l'étendue des surfaces agricoles contaminées (20-25% de la surface agricole utiles) et les mesures actuelles limitant leur emploi diminuent les capacités de production freinant, de ce fait, l'autonomie alimentaire des Antilles. Afin de restaurer la sûreté et la sécurité des productions antillaises, limiter le transfert de la chlordécone au biote, qu'il soit végétal ou animal est une option intéressante. Dans le cadre du projet PIEGEACHLOR financé par l'ADEME, cette piste a été évaluée.

Dans cette étude, l'efficacité respective de 2 charbons actifs, préalablement sélectionnés à l'aune de pré-essais sur sol artificiel, a été évaluée en amendant 2% de ces matrices (en masse) sur deux sols prélevés aux Antilles françaises (un Andosol et un Nitisol) sur des sites contaminés. Les concentrations en CLD sur ces sols sont représentatifs de sols fréquemment rencontré sur des parcelles agricoles contaminés (1 à 3 mg/kg). Après une maturation de 3 mois une évaluation multicritère concernant (i) le transfert au

biote et (ii) l'innocuité de cette stratégie sur la microflore du sol a été opérée. Les espèces utilisées comme biotes cibles sont la poule pondeuse (*Gallus gallus*) et la courgette (*Cucurbita pepo spp pepo*) (n=1-4) car elles sont reconnues pour extraire et transférer efficacement les polluants halogénés du sol vers leurs parties consommables par l'Homme. Un test *in vitro* supplémentaire visant à évaluer génériquement le transfert à des cibles écologiques a de même été employé (test de disponibilité environnementale ISO/DIS 16751 partie A). Enfin, l'impact de cet amendement sur la dynamique des populations microbiennes inoculées à un sol OCDE a été évaluée comme indicateur d'innocuité.

Quel que soit le sol et l'indicateur de transfert étudié une nette et significative réduction du transfert au biote a été obtenue. La poule pondeuse reste l'espèce la plus sensible à cette contamination malgré cet amendement, une réduction entre 29%, IC 95% [19-40%] et 31% [49-16%] a été obtenu dans le Nitisol, des taux similaires ont été de même obtenus pour l'Andosol. Pour la courgette une très nette réduction a été constaté de plus de 96% dans les deux sols. Cette réduction a également été confirmée

pour les cibles écologiques, une réduction de plus de 85% de la disponibilité environnementale ayant été constatée. Concernant l'innocuité de ces matériaux, des effets immédiats et très significatifs sur la structure de la communauté bactérienne ont été montrés. Toutefois, l'apport de matrices carbonée influence peu l'abondance et la structure des communautés après 28 jours d'incubation.

En synthèse, (i) les amendements de CA en poudre ont permis de réduire l'ensemble des transferts évalués, et (ii) si cette stratégie est impactante sur la structure des communautés microbiennes présentes dès leur application, cet impact semblerait limité dans le temps. Une évaluation plus approfondie en condition réaliste serait à envisager avant application de cette stratégie à l'échelle des parcelles agronomiques.

Références bibliographiques :

El Wanny N., Le Roux Y., Fournier A., Baroudi M., Woignier T., Feidt C., Delannoy M.* (2022). Organochlorine POPs sequestration strategy by carbonaceous amendments of contaminated soils: Toward a better understanding of the transfer reduction to laying hens. *Journal of Hazardous Materials*, 434:128871.

Piutti S., El Wanny N., Laflotte A., Baroudi M., Caria G., Perronnet K., Jurjanz S., Slezack S., Feidt C., Delannoy M.* (2022). Assessment of an NDL-PCBs Sequestration Strategy in Soil Using Contrasted Carbonaceous Materials through In Vitro and Cucurbita pepo Assays. *Applied Sciences*, 12(8):3921.

Giovanni Caria, Nathalie Cheviron, Thérèse de Caldas, Matthieu Delannoy, Nathalie Demont-Calet, et al. PIEGEAGE des Composés Halogénés Lipophiles Organiques Rémanents (PIEGEACHLOR). [Rapport de recherche] ENSAIA. 2021.

Des ovins en bananeraies sur sol pollué par la chlordécone : une alternative agroécologique pour contrôler l'enherbement ?

Elodie Dorey^{1*}, Nadine Andrieu², Steewy Lakhia¹, Paul Meynard¹, Hatil Esther³, Normand Loïc³, Jean-Luc Gourdine⁴, Jean-Christophe Bambou⁴

¹ CIRAD, UPR GECO, F-97130 Capesterre-Belle-Eau, Guadeloupe, France. GECO, Univ Montpellier, CIRAD, Montpellier, France

² CIRAD, UMR Innovation, F-97130 Capesterre-Belle-Eau, Guadeloupe, France. UMR Innovation, Univ Montpellier, CIRAD, Montpellier, France

³ Institut Technique Tropical, F-97130 Capesterre-Belle-Eau, Guadeloupe, France.

⁴ INRAE, UR ASSET, Centre Antilles Guyane, Petit-Bourg, Guadeloupe, France

* elodie.dorey@cirad.fr

Mots-clés :

Ovin
Banane
Co-conception
Agroécologie
Chlordécone

Messages-clés :

- Les ovins constituent une alternative prometteuse pour limiter l'enherbement dans les bananeraies.
- Les animaux se contaminent très rapidement.
- La traçabilité des animaux introduits doit être assurée pour limiter l'exposition des consommateurs potentiels à la chlordécone.

Depuis une dizaine d'années, les exploitations productrices de bananes de Guadeloupe ont fortement fait évoluer leurs pratiques pour répondre à la pression sociétale sur les enjeux environnementaux et de santé publique induits par les utilisations massives de pesticides, dans le passé (ex : chlordécone) et les usages actuels (ex : glyphosate). Ainsi la mise en place des jachères et l'utilisation de vitroplants a joué un rôle déterminant dans la lutte non chimique contre le parasitisme inféodé au bananier tel que le charançon - *Cosmopolites sordidus*, ou les nématodes - *Radopholus similis*. Aussi le maintien d'un couvert végétal, semé ou spontané sous bananeraie a permis d'assurer divers services : lutte contre l'érosion, amélioration de la fertilité des sols, contrôle des adventices. Ainsi, l'usage de la débroussailluse pour contrôler l'enherbement s'est rapidement répandu mais la pratique multiplie par près de cinq les coûts de désherbage (main d'œuvre et carburant) et ne supprime donc pas totalement l'usage d'herbicide. L'animal constitue une alternative intéressante aux

pratiques visant à réduire l'usage des herbicides. Néanmoins, il présente le risque de se contaminer à la chlordécone.

L'objectif de cette étude était d'analyser avec les producteurs, techniciens et la Recherche les services et disservices associés à l'introduction d'ovins dans les bananeraies comme alternative pour contrôler l'enherbement.

L'étude a articulé ateliers de co-conception et expérimentation chez 4 producteurs ayant introduit 5 ovins sur 0,4 hectares. Trois services ont été analysés (contrôle de l'enherbement, restitution de fertilité via les déjections, performance animale) ainsi que trois disservices (contamination à la chlordécone, tassement du sol, parasitisme des animaux).

Les résultats préliminaires montrent que les ovins permettent de réduire de près de 60 % la biomasse herbacée dans les bananeraies. Le couvert herbacé permet un gain de poids chez les animaux. On estime que les animaux restituent 12 kg d'azote par hectare. Un léger

tassement du sol est observé. En revanche les animaux se contaminent dès deux mois de pâturage pour certains au-dessus de la LMR. Pour les producteurs ayant expérimenté la pratique, l'animal n'est pas destiné à la consommation. Mais introduire ces animaux dans les bananeraies pourrait à moyen terme augmenter les risques d'arriver sur le marché d'animaux contaminés sur les circuits non contrôlés. Il importe donc de s'assurer de la décontamination de ces animaux via des coopérations possibles entre agriculteurs et éleveurs ou entre agriculteurs et bouchers.

Réduction de l'ingestion de sol des animaux d'élevage pour limiter leur exposition à la chlordécone

Stefan Jurjanz^{1*}, Claire Collas¹, Harry Archimède², Jean-Luc Gourdine², Cyril Feidt¹

¹ URAFPA, Université de Lorraine-INRAE, 54000 Nancy, France

² UR ASSET, INRAE, 97170 Petit-Bourg, Guadeloupe, France

* stefan.jurjanz@univ-lorraine.fr

Mots-clés :

Ingestion de sol
Animaux
Evaluation de risques
Exposition à la CLD

Messages-clés :

- Les animaux d'élevage en plein air ingèrent du sol
- Le sol est le principal vecteur d'exposition à la CLD dont la maîtrise de l'ingestion est un élément clé de la réduction du risque de contamination
- Les facteurs aggravant l'ingestion de sol sont un couvert végétal détérioré, des aliments posés à même le sol ou de l'abreuvement avec de l'eau de surface
- Adapter les pratiques d'élevage permet de réduire l'exposition à la CLD et de maintenir l'élevage dans beaucoup de zones faiblement contaminées

Le consommateur antillais est principalement exposé à la chlordécone (CLD) par l'ingestion de denrées contaminées. Concernant l'élevage, dans certains systèmes antillais les animaux ingèrent des quantités variables de sol, réservoir principal de CLD dans l'environnement. Ainsi il est primordial de réduire son ingestion par les animaux à un minimum incompressible pour limiter leur exposition à la CLD dans des zones contaminées.

Différents travaux principalement menés en conditions antillaises, permettent aujourd'hui de quantifier l'ingestion de sol par différents animaux d'élevage ainsi que leurs facteurs de variation. Leur synthèse montre une ingestion minimale de sol de 2 g/kg de poids métabolique (PM) chez les bovins en croissance¹ et 11 g/kg PM chez le porc Créole². Chez la volaille, les valeurs journalières minimales peuvent être estimées à 0,5 et 3 g/kg PM respectivement pour le poulet et la poule^{3,4}. Ces valeurs doivent être intégrées dans les évaluations de risques pour calculer l'exposition des animaux via la concentration de la CLD dans

le sol de la parcelle.

Cependant, ces minimums peuvent rapidement augmenter quand les conditions d'élevage se détériorent. Chez les ruminants, l'offre fourragère, donc la couverture du sol par la végétation, est un bon indicateur du risque accru d'ingestion de sol. Une herbe rase incite les animaux à pâturer près du sol augmentant son ingestion. Des conditions très humides ou un fort piétinement par les animaux favorisent également la souillure d'herbe et l'ingestion de sol peut atteindre 5 g/kg PM chez le bovin en croissance⁵. Chez les porcs, les ingestions quotidiennes de sol peuvent dépasser 25 g/kg PM, notamment pour les animaux de race Large White dont le fort potentiel de croissance les incite probablement à explorer d'avantage le sol². Finalement chez les volailles, des mauvaises conditions de parcours (sol nu, déficit alimentaire) peuvent entraîner des ingestions de sol jusqu'à 3 et même 16 g/kg PM respectivement chez le poulet et la poule pondeuse^{3,4}. Le risque d'ingestion de sol en conditions défavorables est alors plus sensible chez la poule sauf si le poulet est élevé très longtemps⁶. En plus de la gestion

de la qualité du couvert végétal sur la surface pâturée, il est déconseillé pour tous les animaux de disposer de l'aliment à même le sol ou de les abreuver par de l'eau de surface qui peut contenir des sédiments⁶.

Ces bonnes pratiques d'élevage permettent de contenir efficacement l'ingestion de ce vecteur majeur de la CLD. Il est primordial de contrôler les denrées avant leur mise sur le marché. La limitation du sol ingéré à sa proportion incompressible devrait permettre de maintenir l'élevage dans des zones faiblement contaminées, notamment pour les bovins. Ce sera plus difficile pour des espèces qui fouissent le sol. Néanmoins, la mise sur le marché d'une viande saine semble difficile à assurer quand la contamination du sol atteint des concentrations intermédiaires (0,5 ppm) même avec une excellente maîtrise de l'ingestion de sol. Ainsi, la maîtrise de l'ingestion du sol est un élément clé pour assurer la durabilité des élevages antillais.

contaminants through soil intake. The case-study of tropical grazing practices in French West Indies. *Science of the Total Environment* 668, 161-170.

6. Jurjanz S, Fournier A., Clostre F, Godard E, Feidt C. 2020. Control of poultry contamination in chlordecone contaminated areas of the French West Indies *Environmental Science and Pollution Research* 26(3).

Références bibliographiques :

1. Jurjanz S, Collas C, Lastel ML, Godard X, Archimède H, Rychen G, Mahieu M, Feidt C. 2017. Evaluation of soil intake by growing creole steers in common grazing systems in the French West Indies. *Animal* 11, 1363-1371
2. Collas C, Gourdine JL, Beramice D, Badot PM, Feidt C, Jurjanz S. 2022. Exposure of free-range pigs to environmental contaminants via soil ingestion. 73rd Annual Meeting of EAAP, 5-9 September, Porto, Portugal.
3. Jurjanz S, Germain K, Juin H, Jondreville C. 2015. Intake of plants and soil of free ranged chicken reared outside in plots under trees or covered with grass. *Animal* 9, 888-898
4. Jondreville C, Travel A, Besnard J, Feidt C 2010. Intake of herbage and soil by free-range laying hens offered a complete diet compared to a whole-wheat diet. XIIIth European Poultry Conference, 23-27 August 2010, Tours, France.
5. Collas C, Mahieu M, Tricheur A, Crini N, Badot PM, Archimède H, Rychen G, Feidt C, Jurjanz S. 2019. Cattle exposure to environmental

Optimiser la réduction du chlordécone dans les sols des Antilles françaises par la biodégradation couplée à la réduction chimique *in situ*

Jennifer Hellal^{1*}, Catherine Joulian¹, Sébastien Bristeau¹, Jason Perez¹, Pierre-Loïc Saaidi², Déborah Martin², Mickaël Charron¹, Laurent Thannberger³

¹ BRGM, 3 Av Claude Guillemin 45060 Orléans Cedex, France

² UMR 8030 Génomique Métabolique, CEA, Institut de Biologie François Jacob, Genoscope, Université d'Evry Val d'Essonne, Université Paris-Saclay, Evry, France

³ Valgo, 72 rue Aristide Briand, 76650 PETIT-COURONNE, France

* j.hellal@brgm.fr

Mots-clés :

Chlordécone
Sols
Dépollution
Diversité bactérienne
Réduction du fer

Messages-clés :

- L'approche de biodégradation dynamisée-ISCR est encourageante en laboratoire.
- Les produits de transformation doivent être identifiés et quantifiés.
- Des essais à plus grande échelle qui prennent en compte les attentes des parties prenantes, dont la population, sont requises.

Les sols, les eaux de surface et les eaux souterraines de Martinique et de Guadeloupe (Antilles françaises) sont contaminés par la chlordécone (CLD ; C₁₀Cl₁₀₀ ou C₁₀Cl₁₀H₂₀O₂ sous forme hydratée ; numéro CAS 143-50-0 - décachlorooctahydro-1,3,2-méthéno-2Hcyclobuta [c, d] pentalen-2 - one). La persistance de ce pesticide organochloré dans les sols des Antilles a été estimée à plusieurs décennies dans les nitisols, des siècles dans les ferralsols et un demimillénaire dans les andosols. La CLD s'accumule dans les chaînes alimentaires. Une exposition chronique à long terme à la CLD par le biais de la nourriture et de l'eau de boisson peut avoir de graves conséquences sur la santé humaine.

En dépit des enjeux environnementaux, socio-économiques et sanitaires majeurs, il n'y a pas, actuellement, de méthode économiquement réaliste connue qui puisse être appliquée, en conditions réelles et à grande échelle, pour dépolluer les sols antillais. Cependant, ces dernières années, plusieurs méthodes de remédiation ont été testées en laboratoire et parfois *in situ*, tels que le procédé ISCR « *in situ* chemical

reduction »², la phytoremédiation et la biodégradation microbienne¹. Ces approches ont toutes leurs avantages et inconvénients et c'est dans l'objectif de trouver une méthode intermédiaire de biodégradation dynamisée-ISCR que s'est positionné ce travail.

En laboratoire, des essais sur des sols antillais contaminés par la CLD (~1 mg/kg) ont été réalisés avec différents teneurs en fer zéro valent (FZV), équivalentes ou inférieures aux quantités utilisées pour l'ISCR. Ce fer a été appliqué en conditions de saturation en eau et avec 2% de bagasse pour un apport de matière organique. Ici nous montrons qu'avec ¼ de la quantité de FZV nous atteignons des taux d'abattement de la CLD d'environ 50 %. L'analyse des communautés microbiennes dans les essais a montré un impact des traitements au FZV sur la biodiversité bactérienne, en particulier en augmentant et en diversifiant les genres et familles connus pour des activités de ferri-réduction, ce qui était l'un des objectifs du projet et est donc encourageant pour de futurs travaux sur le terrain.

Les résultats ont par ailleurs identifié la présence de deux autres organochlorés classés parmi les polluants organiques persistants (hexachlorobenzène et mirex) ainsi que du chlordécol dans les sols antillais prélevés pour l'expérience. Il faudrait employer une méthodologie analytique élargie afin de pouvoir les quantifier et déterminer s'ils sont eux aussi dégradés par l'application de traitements à base d'ISCR. Il serait intéressant de savoir dans quelle mesure un tel traitement pourrait dépolluer l'ensemble des composés hautement chlorés présents dans les sols.

Références bibliographiques :

1. Hellal J, Saaidi P-L, Bristeau S, Crampon M, Muselet D, Della-Negra O, Mauffret A, Mouvet C, Joulian C (2021) Microbial Transformation of Chlordecone and Two Transformation Products Formed During in situ Chemical Reduction. *Front. Microbiol.* 12: 3210.
2. Mouvet C, Collet B, Gaude J-M, Rangon L, Bristeau S, Senegues M, Lesueur-Jannoyer M, Jestin A, Hellal J, Woignier T (2020) Physico-chemical and agronomic results of soil remediation by In situ Chemical Reduction applied to a chlordecone-contaminated nitisol at plot scale in a French Caribbean banana plantation. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 27:41063-41092.

Devenir des hydrochlorodécones, du mirex et du chlordécol en condition de (bio)dégradation réductive

Oriane Della-Negra^{1*}, Marion Chevallier², Sébastien Chaussonnerie³, Agnès Barbance³, Delphine Muselet³, Eddy Elisée³, Denis Le Paslier³, Gilles Frison⁴, Pierre-Loïc Saaidi³

¹ Aix Marseille Univ., CNRS, Centrale Marseille, iSm2, Marseille, France

² Univ. Grenoble Alpes, CEA, Liten, DTNM, 38000 Grenoble

³ UMR 8030 Génomique métabolique/CEA/Institut de Biologie François Jacob/Genoscope/Université d'Evry Val d'Essonne/Université Paris-Saclay, France

⁴ Sorbonne Université, CNRS, Laboratoire de Chimie Théorique, Paris, France

* oriane.della-negra@orange.fr

Mots-clés :

Cage-bishomocubane
Hydrochlorodécone
Mirex
Dégradation
Mécanisme

Messages-clés :

- Les hydrochlorodécones qui possèdent un atome d'Hydrogène sur le carbone 10 sont réfractaires aux conditions de dégradation microbiologiques efficaces sur la chlordécone et pourraient être plus persistants que la molécule mère dans l'environnement.
- Pour la première fois, nous apportons la preuve que le mirex et le chlordécol peuvent être biodégradés en conditions réductrices.
- En utilisant les résultats expérimentaux et des calculs de chimie quantique DFT, nous proposons un mécanisme de dégradation générique de toutes les cages bishomocubanes.

Parmi les Polluants Organiques Persistants, le mirex ($C_{10}Cl_{12}$) et la chlordécone ($C_{10}Cl_{10}O_2H_2$) partagent la même structure en forme de cage bishomocubane. Jusqu'à présent très peu d'études font état d'une biodégradation du mirex et seul le 10-monohydromirex a été identifié comme produit de transformation (PT)¹. Concernant la chlordécone, plusieurs équipes ont mis en évidence sa dégradabilité par voie chimique, microbiologique ou encore directement dans les sols²⁻⁵. Il a même été possible de dégrader la chlordécone en conditions réelles grâce à un procédé de réduction chimique ISCR. Dans ce cas, les analyses ont montré la formation d'une multitude d'hydrochlorodécones ($C_{10}Cl_{10-n}O_2H_{2+n}$; $n= 1-5$). En laboratoire, des bactéries, comme *Citrobacter* sp.86, ont également été identifiées comme transformant cette molécule en hydrochlorodécones, polychloroindènes, acides polychloroindénecarboxyliques ou encore

chlordecthiol²⁻³. Ces PTs ont été retrouvés dans l'environnement et s'ajoutent aux impuretés contenues dans les formulations commerciales utilisées historiquement qui contaminent encore les sols (chlordécol et 8-monohydrochlorodécone=A2). Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés à la biodégradabilité de tous les dérivés de la chlordécone comportant la cage bishomocubane, ainsi qu'au mirex.

Différentes stratégies de synthèse chimique nous ont permis d'obtenir cinq hydrochlorodécones ($C_{10}Cl_{10-n}O_2H_{2+n}$; $n= 1,2$ et 5). Nous avons ensuite suivi leur biodégradation en les plaçant en présence de *Citrobacter* sp.86, bactérie connue pour dégrader la chlordécone en condition réductrice. Des dégradations chimiques biomimétiques ont également été effectuées afin de faciliter les identifications des produits.

Les hydrochlorodécones A2 et A3 (2,8-

dihydrochlorodécone) se transforment de façon similaire à la chlordécone et conduisaient à la formation d'autres hydrochlorodécones, de polychloroindènes et d'acides polychloroindèncarboxyliques. Par contre pour les hydrochlorodécones A1, A4 et A5 (10-monohydrochlorodécone, 8,10-dihydrochlorodécone, 2,3,6,7,10-pentahydrochlorodécone respectivement) aucune dégradation n'a pu être observée : la présence d'un atome d'Hydrogène en position 10 bloquant l'ouverture de la cage bishomocubane. Ce résultat est d'importance car le procédé ISCR conduit majoritairement à ce type d'hydrochlorodécones. Ces dérivés apparaîtraient donc plus réfractaires à une dégradation microbiologique naturelle.

Concernant le chlordécol, une biodégradation partielle a été observée au bout d'un temps d'incubation nettement plus long que pour la chlordécone. Des produits partiellement déchlorés et possédant une structure « ouverte » ont notamment été identifiés. A l'issue de 35 semaines, une biodégradation partielle du mirex a pu être constatée, aboutissant à la présence de plusieurs hydromirex et de plusieurs composés inconnus. De manière inattendue, le 2,4,5,6,7-pentachlorobenzène B1 connu pour être l'un des PTs principaux de la chlordécone a également été formé au cours de la biodégradation du mirex. La formation possible de B1 dans l'environnement via la dégradation du mirex accentue la nécessité de développer des méthodes de monitoring adaptée à ce composé.

Enfin, des calculs de chimie quantique DFT ont permis de rationaliser les observations expérimentales. Un mécanisme général de dégradation de toutes les cages bishomocubanes chlorés a été proposé ; il peut servir à prédire le devenir de composés de structure similaire.

Références bibliographiques :

1. Andrade P, Wheeler W. B., & Carlson D. A. 1975. Identification of a Mirex metabolite. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 14 (4), 473–479.
2. Chevallier M. L., Della-Negra O., Chaussonnerie S., Barbance A., Muselet D., Lagarde F., Darii E., Ugarte E., Lescop E., Fonknechten N., Weissenbach J., Woignier T., Gallard J.-F., Vuilleumier S., Imfeld G., Le Paslier D., & Saaidi P.-L. 2019. Natural Chlordecone Degradation Revealed by Numerous Transformation Products Characterized in Key French West Indies Environmental Compartments. *Environmental Science & Technology*, 53 (11), 6133–6143.
3. Della-Negra O., Chaussonnerie S., Fonknechten N., Barbance A., Muselet D., Martin D. E., Fouteau S., Fischer C., Saaidi P.-L., & Le Paslier D. 2020. Transformation of the recalcitrant pesticide chlordecone by *Desulfovibrio* sp.86 with a switch from ring-opening dechlorination to reductive sulfidation activity. *Scientific Reports*, 10 (1), 13545.
4. Lomheim L., Flick R., Rambinaising S., Gaspard S., & Edwards E. A. 2021. Identification of a Fully Dechlorinated Product of Chlordecone in Soil Microcosms and Enrichment Cultures. *Environmental Science & Technology Letters*, 8 (8), 662–667.
5. Lomheim L., Laquitaine L., Rambinaising S., Flick R., Starostine A., Jean-Marius C., Edwards E. A., & Gaspard S. 2020. Evidence for extensive anaerobic dechlorination and transformation of the pesticide chlordecone (C10Cl100) by indigenous microbes in microcosms from Guadeloupe soil. *PLOS ONE*, 15 (4), e0231219.

Nanoparticules de fer pour la dépollution des sols contaminés par la chlordécone

Mar Gil-Díaz¹, Sergio Diez-Pascual¹, Isabel Sastre-Conde^{2*}, Hervé Macarie³, Sébastien Bristeau⁴,
Maria Carmen Lobo¹

¹ IMIDRA, Finca El Encín, Alcalá de Henares (Madrid, Espagne).

² IRFAP, Calle Babiéca no. 2, 07198 Palma, Baléares (Espagne) (isabelsastre2003@yahoo.com)

³ IRD, Aix Marseille Univ, Avignon Université, CNRS, IMBE, Marseille (France)

⁴ BRGM, Division Laboratoires, Orléans (France)

* isabelsastre2003@yahoo.com

Mots-clés :

Nanoremediation
nFZV
nFZV-Pd
nFeS
Insecticide

Messages-clés :

Le traitement des sols antillais au moyen de particules de nFZV-Pd permet une augmentation significative de l'abattement de CLD par rapport à un traitement avec du μ FZV, qui est particulièrement importante dans le cas des andosols.

La chlordécone (CLD) est un insecticide organochloré utilisé aux Antilles françaises de 1972 à 1993 contre le charançon du bananier. En raison de sa toxicité, de son rôle potentiel dans certains cancers et de sa capacité de bioaccumulation, elle a été classée en 2009, comme polluants organiques persistants par la convention de Stockholm et son utilisation interdite dans le monde entier. Malgré cela, elle continue à être détectée dans les sols, les eaux et les ressources alimentaires des Antilles, ce qui rend prioritaire l'élaboration de stratégies de décontamination.

Au cours de la dernière décennie, des essais menés jusqu'à la parcelle ont montré que l'apport de particules de fer zéro valent micrométrique (μ FZV) au sol permettait un abattement significatif de CLD mais que le procédé était moins efficace sur l'un des trois types de sols testés (andosol)^{2,3} probablement dû au piégeage de la CLD dans la nano-porosité des argiles de ce sol auxquelles les particules micrométriques, n'ont pas accès⁵. Cette limitation pourrait éventuellement être levée par l'utilisation de nanoparticules de fer dont l'efficacité pour la dégradation des composés organochlorés dans l'eau est établie^{1,4} mais reste à

démontrer pour les sols. Le but de ce travail était d'évaluer l'efficacité de trois types de nanoparticules à base de sulfure de fer (nFeS), de fer zéro valent (nFZV) et d'un mélange de fer zéro valent et palladium (nFZV-Pd), pour la dégradation de la CLD sur deux sols (A et N) de Guadeloupe utilisés précédemment pour les études avec le μ FZV.

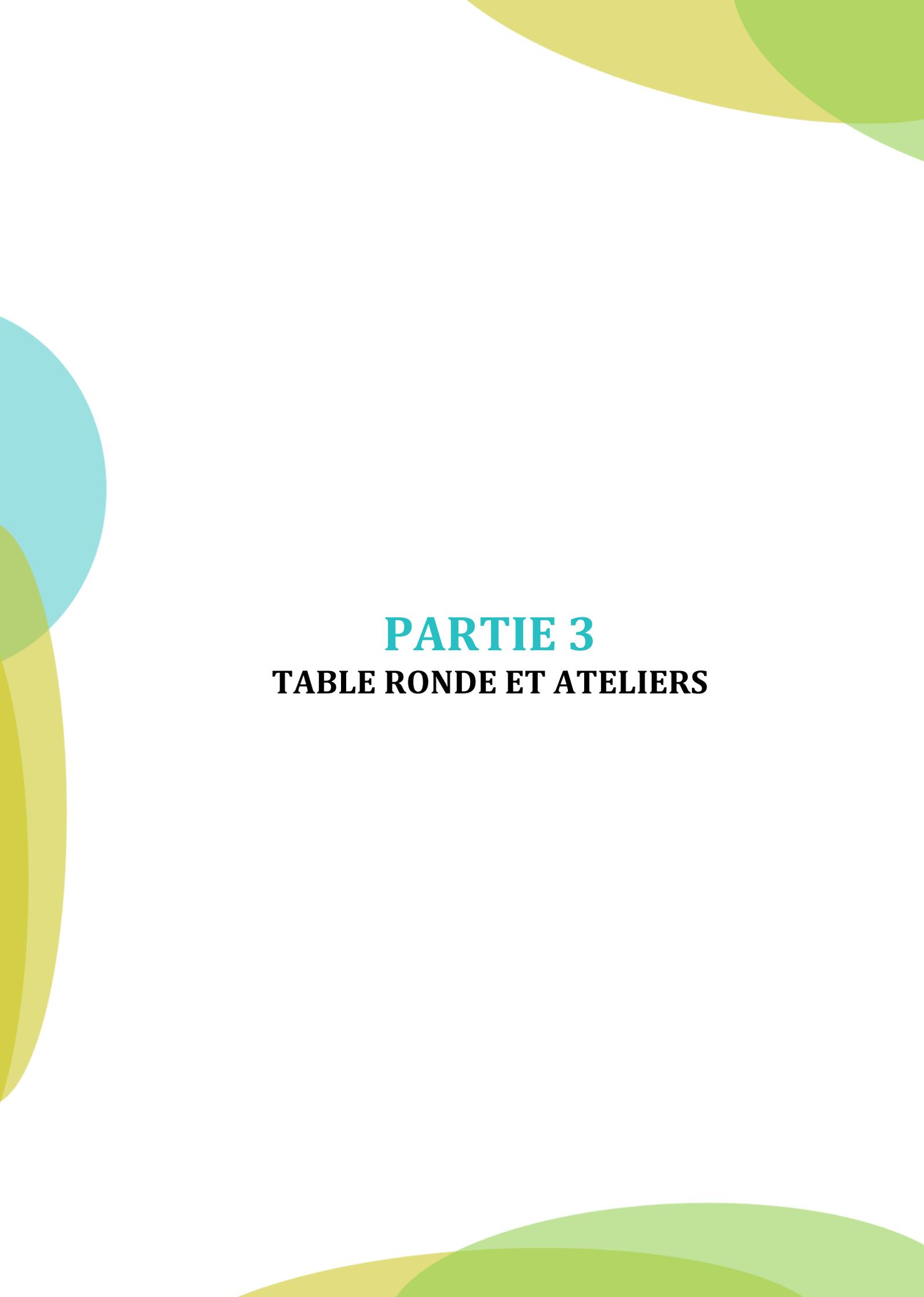
Le sol A était un andosol avec un pH acide (5,3), une teneur élevée en matière organique (13,4 %) et une concentration de CLD de 14 mg/kg. Le sol N était un nitisol, avec un pH légèrement acide (6,1), 3,7 % de matière organique et une teneur en CLD de 1,1 mg/kg. Les échantillons de sol ont été traités avec les trois types de nanoparticules : i) nFeS (Nanoshel) à 5% ; ii) nFZV (NanoIron) à 10% ; iii) nFZV-Pd (NanoIron) à 10% puis ont été incubés à 28°C pendant 30 jours. La concentration de CLD a été quantifiée par chromatographie en phase gazeuse avec détecteur MS/MS.

Les échantillons de sol traités avec le nFZV et le nFeS n'ont montré aucune réduction significative ($p > 0,05$) de la concentration de CLD. Au contraire, les sols traités avec le nFZV-Pd ont montré une diminution significative, atteignant des pourcentages de

74 et 96% pour les sols A et N, respectivement bien supérieurs à ceux obtenues avec le μ FZV. La moindre efficacité des nFeS peut être due au fait que ces nanoparticules n'étaient pas stabilisées, de sorte que des phénomènes d'agrégation peuvent se produire entre elles, diminuant leur réactivité. En conclusion, l'utilisation de nFZV-Pd semble être une stratégie prometteuse pour la remédiation des sols contaminés par la CLD, bien que des études supplémentaires soient nécessaires pour déterminer le mécanisme de dégradation et l'innocuité des produits formés ainsi que des particules elles-mêmes.

Références bibliographiques :

1. Gong YY, Tang JC, Zhao DY (2016) Application of iron sulfide particles for groundwater and soil remediation: A review. *Wat Res* 89:309-320.
2. Mouvet C, Collet B, Gaude JM, Rangon L, Bristeau S, Senergues M, Lesueur-Jannoyer M, Jestin A, Hellal J, Woignier T (2020) Physico-chemical and agronomic results of soil remediation by In Situ Chemical Reduction applied to a chlordecone-contaminated nitisol at plot scale in a French Caribbean banana plantation. *Environ Sci Pollut Res* 27:41063-41092.
3. Mouvet C, Dictor MC, Bristeau S, Breeze D, Mercier A (2017) Remediation by chemical reduction in laboratory mesocosms of three chlordecone-contaminated tropical soils. *Environ Sci Pollut Res* 24:25500-25512.
4. O' Carroll D, Sleep B, Krol M, Boparai H, Kocur C (2013). Nanoscale zero valent iron and bimetallic particles for contaminated site remediation. *Adv Water Res* 51:104-122.
5. Woignier T, Rangon L, Clostre F, Mottes C, Cattan P, Primera J, Jannoyer M (2020) Physical limitation of pesticides (chlordecone) decontamination in volcanic soils: fractal approach and numerical simulation. *Environ Sci Pollut Res* 27:40980-40991



PARTIE 3
TABLE RONDE ET ATELIERS

TABLE-RONDE « Enjeux et perspectives de la chlordéconémie »

La chlordéconémie est la concentration de chlordécone dans le sang. Il est en effet possible de mesurer le taux de chlordécone d'une personne au moment d'une prise de sang. Après des mesures réalisées à des fins de recherche depuis plus de 20 ans soit dans le cadre de campagne de biosurveillance (étude Kannari par Santé Publique France), soit dans des projets de recherche (projet Karuprostate ou projet Timoun menés par l'Inserm [Institut national de la santé et de la recherche médicale]), il est dorénavant possible pour tout à chacun, habitant aux Antilles, de réaliser cette mesure.

Les objectifs de cette table ronde étaient de répondre à plusieurs questions que la population et les acteurs de la recherche se posent en décembre 2022 et d'en débattre collectivement. Qui peut demander le dosage de sa chlordéconémie ? Comment ces dosages sont-ils réalisés ? Y a-t-il des valeurs à ne pas dépasser et si oui pourquoi ? Peuvent-ils être utiles pour comprendre l'imprégnation de la population à la chlordécone ? Comment de personnes ont demandé à se faire doser la chlordéconémie ? Est-on accompagné pour comprendre sa valeur de chlordéconémie et pour mettre en œuvre les mesures pour réduire son exposition ? Autant de questions qui grâce aux intervenantes et intervenants de cette table ronde ont trouvé des réponses concrètes.

Cette table ronde a été animée par Michel Samson, directeur de recherche à l'INSERM, directeur de l'Irset (Institut de recherche en santé, environnement et travail) et vice-président santé du CPSN. Elle était composée d'une série de témoignages puis d'un échange avec la salle. La vidéo et la retranscription de cette table-ronde sont disponibles sur le site <https://www.chlordecone-infos.fr/>. Le déroulé de la table ronde est détaillé ci-dessous :

1. Jacques Rosine, responsable de la cellule Régionale Antilles de Santé Publique France

Expérience grande échelle de mesure d'exposition populationnelle : Kannari 1 et projet Kannari 2.

2. Luc Multigner, directeur de recherche à l'Inserm, épidémiologiste

Expérience du dosage de la chlordécone dans le sang dans les sujets et patients des cohortes (Karuprostate et Timoun). Point de vue d'un épidémiologiste sur l'exploitation des données.

3. Matthieu Schuller, directeur général délégué de l'Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail), au pôle Sciences pour l'expertise

Sur la base des valeurs obtenues en population générale et des événements de santé, quelle valeur sanitaire de référence, qu'est-ce que cela veut dire ? Comment construit-on cette valeur seuil ?

4. Florelle Bradamantis, directrice générale adjointe de l'ARS (Agence Régionale de Santé) de Guadeloupe

Contexte du dosage de chlordéconémie demandé par la population et mise en œuvre.

5. Jacqueline Deloumeaux, Professeure associée de santé publique, vice-présidente recherche du directoire au CHU (Centre hospitalier universitaire) de la Guadeloupe et responsable du centre de ressources biologiques du CHU Guadeloupe – 5 min

Quelle utilisation possible de ces données toutes venantes – limites

6. Maureen Galou, médecin généraliste libérale co-gérante de la Maison de Santé Pluridisciplinaire « Le Souffle du Nord » à Port-Louis en Guadeloupe, et secrétaire adjointe de l'Union Régionale des Professionnels de Santé, pour les médecins libéraux

Qui demande un dosage sanguin de la chlordécone ? Quelle population de patients ? Quel niveau d'information ? Quelle attitude ? Quelle pratique ?

7. Valery Chassol, sage-femme territoriale au Service de Protection Maternelle et Infantile (P.M.I.) à la Collectivité Territoriale de Martinique

Témoignage d'une population particulière : les femmes ayant un projet de grossesse.

8. Caroline Corlier, chargée de mission chlordéconémie à l'ARS de Guadeloupe

Quelle attitude adoptée ou quelle recommandation donner à l'annonce de sa valeur de chlordéconémie ?

LES ATELIERS

Le mercredi 14 décembre après-midi, 4 ateliers d'environ 1h30 ont été organisés. Les vidéos et supports de certains de ces ateliers sont disponibles sur le site <https://www.chlordecone-infos.fr/>. Les intervenants et le déroulé des ateliers sont présentés ci-dessous. Chaque atelier donnera lieu à une fiche action qui sera valorisée auprès des parties prenantes.

ATELIER 1 : "Exposome aux Antilles, spécificité versus généricité. Quels besoins de connaissances ? »

L'exposome correspond à l'ensemble des expositions environnementales auxquelles un être vivant (végétal, animal ou humain) et par extension un écosystème est soumis tout au long de sa vie. Ce concept très englobant des relations environnement – santé est apparu il y a moins de 20 ans et est devenu un véritable enjeu de recherche. Le but de cet atelier était de faire le point sur le concept d'exposome et comment il s'applique aux territoires antillais, en abordant les notions d'exposome humain et d'éco-exposome et de définir la singularité d'un exposome antillais.

L'atelier a été coordonné par Michel Samson. Il s'est déroulé autour de 5 séquences :

- Présentation du concept d'Exposome et sa mise en œuvre opérationnelle : Xavier Coumoul (Univ. Paris cité)
- Infrastructure nationale de recherche - MESR : France Exposome: Michel Samson (Inserm)
- Exposome appliqué à la santé humaine : Ronan Garlantezec (CHU Rennes et Univ. Rennes)
- Exposome appliqué à l'environnement – Eco-exposome : Elena Gomez (Univ. Montpellier)
- Présentation des « exposomes antillais » : Magalie Jannoyer (Cirad [Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement]) et Michel Samson (Inserm)

ATELIER 2 : « OPALE : Des bassins pilotes d'expérimentation et d'acquisition de données »

L'atelier a été préparé par Antoine RICHARD (INRAE [Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement]), Lai-Ting Pak (CIRAD), Eric Abadie (IFREMER [Institut Français de recherche pour l'exploitation de la mer]), Jean-Baptiste Charlier (BRGM [Bureau des recherches géologiques et minières]), Charlotte Dromard (Univ. Antilles). Il s'est déroulé en 3 séquences :

- 1- Un bref rappel historique d'OPALE (Observatoire de la Pollution Agricole aux antillEs) avec une présentation des données acquises et un temps plus important a été donné pour la présentation du suivi du milieu marin qui se met tout juste en route. Les questions spécifiquement abordées étaient :
 - a. Faut-il compléter les données acquises ?
 - b. Quel pourrait être l'apport d'OPALE au-delà des questions de recherche portées par l'observatoire ?
- 2- La seconde séquence a porté sur l'enjeu important pour OPALE : sa visibilité. Les questions abordées étaient :
 - a. La structuration, le partage et la diffusion de la donnée
 - b. L'intérêt d'une intégration dans un réseau national d'observatoires
- 3- La dernière séquence a traité des perspectives et des ouvertures pour OPALE et notamment :
 - a. L'ouverture à d'autres champs disciplinaires

- b. L'accessibilité et/ou le support d'OPALE aux projets de recherche

ATELIER 3 : « Remédier : pourquoi, quoi, comment ? – les besoins en recherche »

L'atelier a été préparé par Magalie Lesueur Jannoyer (Cirad), Josselin Thuilliez (CNRS [Centre national de la recherche scientifique]), Sarra Gaspard (Univ. Des Antilles), Hervé Macarie (IRD [Institut de recherche pour le développement]), Christophe Mouvet (retraité, expert CPSN) et Pierre-Loïc Saaidi (Univ. Evry). Il s'est déroulé en 5 séquences :

- Un rappel des conclusions de l'atelier remédiation de 2010
- un bilan des résultats et des équipes impliquées sur les différentes options de remédiation
- un éclairage par les sciences humaines et sociales des politiques de gestion d'une pollution
- une analyse des attentes de la population (enquête Carbet des Sciences en Martinique)
- une séquence interactive avec la salle (post-it) et le panel pour dégager les priorités en recherche sur les questions de remédiation

ATELIER 4 : « Mise à disposition, partage et utilisation des données sur la chlordécone : état des lieux et perspectives prioritaires »

Cet atelier a été coordonné par Pierre Benoît (INRAE) et Edwige Duclay (Directrice de projet, chargée de la coordination interministérielle du plan chlordécone IV). Cet atelier a été organisé en deux parties :

Partie 1 – Introduction et exposés flashes

- Données Chlordécone : la situation aujourd'hui - Pierre Benoît (INRAE)
- Projets et Initiatives en cours pour partager les données
- Etude de la Cohorte des Travailleurs : un travail rétrospectif sur les données exposition santé – Danièle Luce (Inserm)
- GD4H - Dispositif national pour la mobilisation et valorisation, par les acteurs de la recherche et expertise, des données environnementales au service de la santé environnement – Paul Grignon, Marie Ramon-Dare (CGDD [Commissariat général au développement durable] /Ecolab, GD4H [Green Data For Health])
- Le Projet KMS (Knowledge Management System) - Présentation du premier prototype appliqué sur les données environnementales sur les pesticides aux Antilles - Philippe Hunel (Univ. Antilles – Projet KMS)

Partie 2 – Partie interactive

- Quels sont vos besoins/attentes prioritaires en matière d'accès aux données sur la chlordécone ?
- Quelles actions prioritaires souhaiteriez-vous voir mener dès à présent ? Aux Antilles comme au niveau national
- Quels moyens faudrait-il mettre en œuvre ?