

Université de POITIERS

Faculté de Médecine et de Pharmacie

ANNEE 2023

THESE
POUR LE DIPLOME D'ETAT
DE DOCTEUR EN PHARMACIE
(arrêté du 8 avril 2013)

présentée et soutenue publiquement
le 17 mars 2023 à POITIERS
par Monsieur SCHAEFER James

**Chlordécone aux Antilles : état des lieux et
perspectives**

Composition du jury :

Président : Monsieur le Professeur FAUCONNEAU Bernard

Membres : Madame le Docteur THEVENOT Sarah, MCU-PH
Madame le Docteur BOISSON Cécile, Docteur en pharmacie
Monsieur le Docteur PRADOUX Nicolas, Docteur en pharmacie

Directeur de thèse : Madame le Docteur THEVENOT Sarah, MCU-PH

LISTE DES ENSEIGNANTS

Année universitaire 2022 – 2023

SECTION PHARMACIE

Professeurs des universités-praticiens hospitaliers

- COUET William, pharmacie clinique
- DUPUIS Antoine, pharmacie clinique – **Assesseur pédagogique pharmacie**
- FOUCHER Yohann, santé publique, biostatistiques et épidémiologie
- MARCHAND Sandrine, pharmacologie, pharmacocinétique
- RAGOT Stéphanie, santé publique

Professeurs des universités

- BODET Charles, microbiologie
- CARATO Pascal, chimie thérapeutique
- FAUCONNEAU Bernard, toxicologie
- GUILLARD Jérôme, pharmacochimie
- IMBERT Christine, parasitologie et mycologie médicale
- OLIVIER Jean-Christophe, pharmacie galénique, biopharmacie et pharmacie industrielle
- PAGE Guylène, biologie cellulaire, biothérapeutiques
- RABOUAN Sylvie, chimie physique, chimie analytique
- SARROUILHE Denis, physiologie humaine – **Directeur de la section pharmacie**

Maîtres de conférences des universités-praticiens hospitaliers

- BARRA Anne, immuno-hématologie
- BINSON Guillaume, pharmacie clinique
- THEVENOT Sarah, hygiène, hydrologie et environnement

Maîtres de conférences

- BARRIER Laurence, biochimie générale et clinique
- BON Delphine, biophysique
- BRILLAULT Julien, pharmacocinétique, biopharmacie
- BUYCK Julien, microbiologie



- CHAUZY Alexia, pharmacologie fondamentale et thérapeutique
- DEBORDE-DELAGE Marie, chimie analytique
- DELAGE jacques, biomathématiques, biophysique
- FAVOT-LAFORGE Laure, biologie cellulaire et moléculaire (HDR)
- GIRARDOT Marion, biologie végétale et pharmacognosie
- GREGOIRE Nicolas, pharmacologie et pharmacométrie (HDR)
- HUSSAIN Didja, pharmacie galénique (HDR)
- INGRAND Sabrina, toxicologie
- MARIVINGT-MOUNIR Cécile, pharmacochimie
- PAIN Stéphanie, toxicologie (HDR)
- PINET Caroline, physiologie, anatomie humaine
- RIOUX-BILAN Agnès, biochimie – **Référente CNAES – Responsable du dispositif COME'in**
- TEWES Frédéric, chimie et pharmacotechnie
- THOREAU Vincent, biologie cellulaire et moléculaire
- WAHL Anne, phytothérapie, herborisation, aromathérapie

Maîtres de conférences associés - officine

- DELOFFRE Clément, pharmacien
- ELIOT Guillaume, pharmacien
- HOUNKANLIN Lydwin, pharmacien

ENSEIGNEMENT DE L'ANGLAIS

- DEBAIL Didier, professeur certifié

Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier les membres du jury.

Merci à Monsieur le Professeur **Bernard FAUCONNEAU**, de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury.

Merci à Madame le Maître de Conférences et Praticien Hospitalier **Sarah THEVENOT**, d'avoir accepté d'être mon maître de thèse. Je vous remercie pour votre accompagnement au cours de cette dernière année, pour vos conseils et vos encouragements, qui ont été essentiels à la rédaction de ma thèse. Merci encore pour votre disponibilité et votre rigueur.

Merci à Madame le Docteur en Pharmacie **Cécile BOISSON**, d'avoir accepté d'être membre de mon jury.

Merci à Monsieur le Docteur en Pharmacie **Nicolas PRADOUX**, d'avoir accepté d'être membre de mon jury. Merci de m'avoir accueilli au sein de votre officine et de m'avoir accompagné tout au long de mon stage.

Merci à toute l'équipe pédagogique de la **Faculté de Médecine et de Pharmacie de Poitiers**. Je vous remercie pour vos enseignements de qualité au cours de ces six dernières années qui m'ont permis d'acquérir les compétences et connaissances nécessaires pour exercer pleinement et sereinement ma vocation.

Merci à toute l'équipe de la **Pharmacie des Rochereaux**. Je vous remercie pour votre accueil, pour votre soutien et votre bienveillance. Je n'oublierai jamais ce moment et vous serai à jamais reconnaissant.

Je souhaite aussi remercier mes parents, **Jocelyne et Patrick SCHAEFER**. Je sais que cela n'a pas toujours été facile, et que vous avez dû faire énormément de sacrifices, mais si je suis là aujourd'hui, c'est avant tout grâce vous. Je ne peux pas vous remercier assez pour votre soutien et votre amour au cours de ces dernières six années. Merci maman, pour m'avoir fait découvrir le monde de la pharmacie. Merci de m'avoir toujours poussé à viser l'excellence et à être la meilleure version de moi-même. Merci d'avoir toujours été à mes côtés malgré la

distance. Merci pour ton amour inconditionnel. Thank you Dad, for being the best father and friend I could ever wish for. Thank you for always being one call away.

À ma grand-mère, **Maminou**, un très grand merci. Merci d'avoir accepté de m'accompagner mes deux premières années. Je dois ma réussite à ton soutien et à ton amour infaillible. Je n'oublierai jamais les moments intenses que l'on a passés ensemble.

À mon frère, **Jonathan**. Merci de m'avoir toujours soutenu et d'avoir toujours été un ami sur lequel je peux compter. Je suis très heureux que tu aies fait le déplacement pour assister à ma soutenance, et j'ai hâte d'assister à la tienne.

Sommaire

Liste des abréviations	9
Liste des figures	11
Liste des tableaux	12
Introduction	13
I. La banane aux Antilles	14
a. La place de l'agriculture	14
b. Botanique.....	15
c. Le charançon du bananier.....	16
II. La chlordécone	17
a. Histoire	17
b. Généralités.....	18
c. Propriétés :.....	18
1. Solubilité :	18
2. Bioaccumulation :	19
3. Bioamplification :	19
4. Volatilité :	20
d. Toxicocinétique	20
1. Absorption :.....	20
2. Distribution :	20
3. Métabolisme :	20
4. Élimination :	21
e. Toxicité.....	21
1. Toxicité subchronique	21
2. Toxicité chronique	22
f. Action antiparasitaire	22
III. La contamination en Martinique	23

a.	La contamination des sols.....	23
b.	Persistence de la chlordécone dans les sols.....	25
c.	La contamination des eaux	27
1.	Eaux de surface :	27
2.	Eaux souterraines :.....	28
3.	Eau potable :	28
d.	La contamination des aliments :	29
1.	Fruits et légumes :.....	30
2.	Animaux terrestres :.....	33
3.	Faune marine :	34
e.	La contamination de la population	36
IV.	Les conséquences sur la santé	42
a.	Effets sur la gestation et le développement des nourrissons : l'étude TIMOUN	42
b.	Cancer de la prostate : l'étude Karuprostate	44
c.	Effets sur la fertilité	46
d.	Effets sur l'hépatite chronique active : étude HEPATOCHLOR	47
V.	Mesures mises en œuvre	48
a.	Les premières mesures	48
b.	Le Plan d'action Chlordécone I : 2008-2010 (97,98)	49
1.	Présentation du plan	49
2.	Bilan du premier plan d'action	50
c.	Le Plan d'action Chlordécone II : 2011-2013 (99)	51
1.	Présentation du plan	51
d.	Le Plan d'action Chlordécone III : 2014-2020 (100,101)	51
1.	Présentation du plan	51
2.	Bilan du troisième plan	52
e.	Le plan d'action Chlordécone IV : 2021-2027	53
1.	Présentation du plan (103,104).....	53
2.	État d'avancement (105)	55
f.	La culture de jardins familiaux : le programme Jafa	56
VI.	Les perspectives de remédiation	58

a.	La réduction chimique <i>in situ</i> (ISCR)	58
b.	Le charbon actif et le biochar	60
c.	La Biosorption	61
d.	La dégradation enzymatique.....	62
e.	La dégradation microbiologique	62
VII.	Les alternatives à la chlordécone	63
a.	Les pièges à phéromones.....	63
b.	La prévention	63
VIII.	Le rôle du pharmacien	65
a.	Qu'est-ce que la chlordécone ?	65
b.	Quelles sont les zones les plus contaminées ?.....	65
c.	Comment se contamine-t-on ?.....	66
d.	Quelles sont les conséquences sur la santé ?	66
e.	Comment savoir si je suis contaminé ?.....	67
f.	Comment réduire mon exposition ?.....	67
g.	Rumeurs et fausses idées.....	68
	CONCLUSION	70
	Annexe	71
	BIBLIOGRAPHIE	72
	Résumé et mots clés	83
	Abstract and key words	84
	Serment de Galien	85

Liste des abréviations

AMM : Autorisation de mise sur le marché

ANSES : l'Agence nationale de sécurité sanitaire, de l'alimentation, de l'environnement et du travail

ARS : Agence Régionale de santé

CIRAD : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

CMA : Concentration maximale acceptable

DCE : Directive cadre sur eau

DGAL : Direction générale de l'alimentation

DSDS : Direction de la santé et du développement social

FREDON : Fédération Régionale de Défense contre les Organismes Nuisibles

FZV : Fer zéro valent

IFREMER : L'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer

IMC : Indice de masse corporelle

INRA : Institut national de recherche agroalimentaire

IREPS : l'Instance d'éducation et de promotion de la santé

ISCR: *In situ* chemical reduction

Jafa : Jardins familiaux

LDD : Limite de détection

LMR : Limite maximale pour les résidus

MAA : Ministère de l'Agriculture et de l'alimentation

ODE : Office de l'eau

OMS : Organisation mondiale de la santé

PNSE : Plan national santé environnement

POP : Polluant organique persistant

PSPC : Plans de surveillance et plans de contrôle

SAU : Surface agricole utile

VTR : Valeurs toxicologiques de référence

WISORCH: West-Indies ORganoCHlorides

Liste des figures

Figure 1: Situation de la Martinique	14
Figure 2: Carte de la Martinique.	14
Figure 3: La banane Cavendish.....	15
Figure 4: Bulbe de bananier parasité par <i>Cosmopolites sordidus</i>	16
Figure 5: Structure tridimensionnelle de la Chlordécone.....	18
Figure 6: Synthèse de la chlordécone	18
Figure 7: Schéma récapitulatif des phénomènes de bioaccumulation et de bioamplification	19
Figure 8: Carte des sols potentiellement contaminés par la chlordécone en Martinique 2007	24
Figure 9: Représentation régionale du niveau de contamination des sols par la chlordécone	25
Figure 10: Extrapolation de la contamination des cours d'eau par la chlordécone.....	27
Figure 11: Schéma synthétique des mécanismes de contamination des plantes par la chlordécone.....	30
Figure 12: Concentrations moyennes de chlordécone dans les animaux marins échantillonnés	35
Figure 13: Résultats des tests de chlordéconémie réalisés entre novembre 2020 et Décembre 2021 en Martinique	41
Figure 14: Rapports standardisés d'incidence (SIR) et de mortalité (SMR) par cancer de la prostate en France	44
Figure 15: Présentation générale du plan chlordécone IV.....	55
Figure 16: Une plage en Martinique envahie par les algues sargasses.....	61
Figure 17: Un exemple de piège à phéromone utilisé dans une bananeraie	63

Liste des tableaux

Tableau 1: Niveau d'imprégnation des individus ayant participés au volet "imprégnation" de l'enquête KANNARI	39
Tableau 2: Concentrations médianes et maximales de chlordécone dans le sang obtenues par quatre enquêtes réalisées en Guadeloupe.....	40

Introduction

Le 5 Janvier 2023, après plus de quinze ans d'enquête, la justice a prononcé un non-lieu définitif dans l'affaire de la chlordécone, suscitant des réactions d'incompréhension et de colère chez les populations antillaises. Ce pesticide utilisé pendant plus de 20 ans dans les bananeraies de Martinique et de Guadeloupe pour lutter contre le charançon du bananier, est en effet responsable d'une pollution massive et durable des sols antillais, et d'effets néfastes sur la santé humaine.

Perturbateur endocrinien et cancérigène possible pour l'Homme, ce pesticide est interdit en France en 1990 mais son utilisation aux Antilles françaises est poursuivie jusqu'en 1993. Suite à cette interdiction définitive, l'étendue de la pollution des sols et des eaux a commencé à être mise en évidence. Il en est de même pour les effets sur la santé des populations exposées : la Martinique et la Guadeloupe détiennent notamment les plus hauts taux de cancer de la prostate au monde. La pollution massive des sols, la persistance du pesticide, et les conséquences néfastes sur la santé font du scandale de la chlordécone une problématique majeure de santé publique.

Ce sujet extrêmement polarisant est à l'origine d'un profond mal-être aux Antilles, témoigné par les nombreuses manifestations qui ont eu lieu ces dernières années en Martinique et en Guadeloupe, mais aussi en France hexagonale. Étant originaire de la Martinique, ce sujet m'a toujours fortement intéressé, et en tant que futur pharmacien, je souhaitais en connaître davantage sur cette problématique, afin de pouvoir porter un regard critique sur la question et accompagner au mieux ma future patientèle antillaise.

L'objectif de ce travail est donc de dresser un état des lieux des connaissances actuelles concernant la pollution par la chlordécone aux Antilles françaises et ses effets sur la santé, et de présenter des perspectives en matière de prévention.

I. La banane aux Antilles

a. La place de l'agriculture

La Martinique est une collectivité territoriale française ayant le statut de Département et Région d'outre-mer (DROM). Cette île d'origine volcanique est située dans l'archipel des Petites Antilles, à 6789 kilomètres de la France hexagonale. Avec une superficie de 1128 km², elle se place au troisième rang parmi les îles des Petites Antilles (derrière Trinidad et la Guadeloupe). Elle est bordée à l'Est par l'Océan Atlantique, et à l'Ouest par la Mer des Caraïbes (figures 1 et 2). En 2019, selon l'INSEE, la Martinique comptait 364 508 habitants.

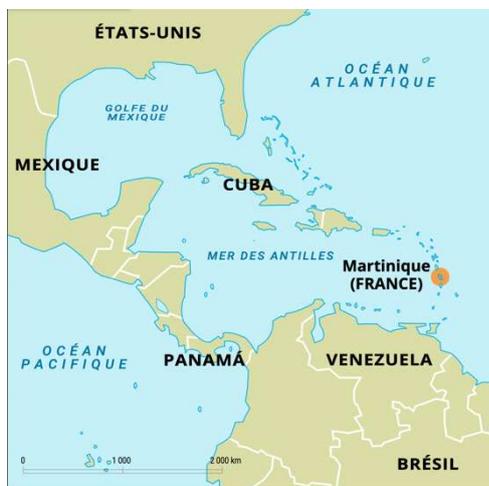


Figure 1: Situation de la Martinique.
Source: universalis.fr



Figure 2: Carte de la Martinique. Source: universalis.fr

Le climat est tropical, et on distingue deux saisons principales : la saison sèche, ou « carême », de fin décembre à avril, et la saison des pluies, ou « hivernage », de mai à novembre. Lors de cette dernière, l'île peut être frappée par des phénomènes cycloniques.

L'agriculture a une place importante en Martinique. La surface agricole utile (SAU) totale représente 22 000 hectares (220km²) (1), soit près de 20% de l'île. En 2019, ce secteur générait 4427 emplois (2), ce qui représente 3,6% de l'emploi total (1,5% au niveau national). Avec un chiffre d'affaire de 165 millions d'euros en 2016, l'agriculture était responsable de 3,1% du PIB de l'île (3).

Les principales cultures en Martinique sont la banane et la canne à sucre. La culture de la banane occupe à elle seule 5982 hectares en 2014, soit 27% de la SAU (4). De 2008 à 2018, 200 000 tonnes de bananes en moyenne étaient récoltées chaque année (5). Il s'agit du

premier produit d'exportation de l'île. Les bananes de Martinique et de Guadeloupe représentent près du tiers des bananes consommées en France.

b. Botanique

Le bananier est une plante herbacée de la famille des *Musaceae*. Cette famille, originaire des régions tropicales d'Afrique et d'Asie, regroupe 91 espèces connues réparties en 3 genres : *Musella*, *Ensete* et *Musa*. C'est dans ce dernier que l'on retrouve le bananier. Ce genre est caractérisé par des plantes à fleurs vivaces pouvant atteindre 9 mètres de hauteur. De nombreuses espèces sont cultivées pour la production de la banane, le fruit du bananier. Il s'agit d'une baie, constituée d'une partie interne charnue (mésocarpe et épicarpe), et d'une partie externe coriace (épicarpe), correspondant à la « peau de banane ».

Il existe plus de 1000 variétés de bananes comestibles, parmi lesquelles on peut retrouver des variétés douces ou « dessert », consommées crues, et des variétés à cuire telles que la banane plantain.

La variété de banane la plus cultivée est la banane Cavendish, sous-groupe de cultivars de l'espèce *Musa acuminata* (figure3). Cette banane dessert originaire de Chine et du Viêt-Nam, est entrée dans la production commerciale au début du XX^{ème} siècle, mais n'est devenue la variété dominante que dans les années 1950, quand la maladie de Panama II, due à un champignon vivant dans le sol, décima la variété « Gros Michel » (6). La banane Cavendish représente 47% de la production mondiale de bananes (7).

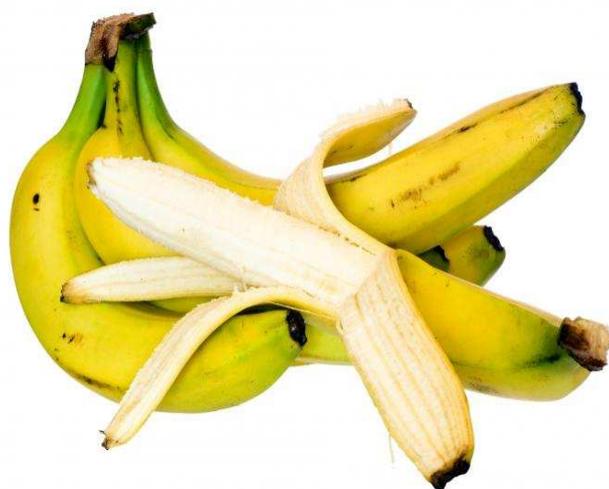


Figure 3: La banane Cavendish

Source : <https://www.stockvault.net/photo/118704/bananas>

c. Le charançon du bananier

Les bananiers peuvent être victimes de diverses maladies et parasites. En effet, la monoculture ininterrompue de la banane entraîne une pression parasitaire élevée (8). Parmi ces parasites, on retrouve le charançon du bananier (*Cosmopolites sordidus*). Il s'agit de l'insecte ravageur le plus important des cultures de bananiers (9). Originnaire d'Asie du Sud-Est, ce coléoptère désormais cosmopolite se nourrit de bananiers et pond ses œufs au niveau du bulbe de la plante. Les larves vont alors creuser des galeries dans le bulbe et endommager les racines et le système vasculaire, ce qui affaiblit le bananier qui finit par chuter (figure 4). Plusieurs moyens peuvent être mis en œuvre pour lutter contre ce parasite, tels que l'utilisation de pièges à phéromones, ou encore d'un pesticide : la chlordécone.



Figure 4: bulbe de bananier parasité par Cosmopolites sordidus. Source : Scot Nelson

II. La chlordécone

a. Histoire

La chlordécone est un insecticide organochloré toxique. Cette molécule a été synthétisée pour la première fois aux États-Unis en 1951, et en 1958, elle est mise sur le marché sous le nom de marque Kepone[®]. Ce produit est alors principalement utilisé pour lutter contre les fourmis et les cafards. Dans les années 1960, les producteurs de bananes cherchent un moyen de lutte efficace contre le charançon du bananier. Des essais réalisés à partir de 1964 au Cameroun montrent l'efficacité de la chlordécone contre ce parasite. Des demandes d'homologation de cet insecticide sont présentées en 1968 et 1969 en Martinique, mais celles-ci sont rejetées par la Commission des Toxiques. Il faudra attendre 1972 pour que la chlordécone reçoive une Autorisation de Mise sur le Marché (AMM) provisoire. Le pesticide commence alors à être utilisé dans les bananeraies de Martinique et de Guadeloupe.

La toxicité de la chlordécone est décrite pour la première fois chez la souris de laboratoire en 1963 par J.J Huber (10), et en 1965, sa reprotoxicité est mise en évidence chez la souris de laboratoire (11). En 1974-1975, près de la moitié des employés travaillant dans l'usine de production du Kepone[®] à Hopewell en Virginie ont été victimes d'intoxication liée à ce produit. L'usine ferme définitivement en 1975, et en 1976, la commercialisation de produits contenant cette molécule est interdite aux États-Unis. En 1979, l'OMS classe la chlordécone comme cancérogène possible pour l'Homme. Ce pesticide continue pourtant d'être utilisé en France et dans les Antilles françaises, commercialisé sous le nom Curlone[®]. Il faudra attendre 1990 pour que ce produit soit interdit en France. Cependant, des dérogations ont permis aux producteurs de bananes de Martinique et de Guadeloupe de continuer à utiliser la chlordécone jusqu'en septembre 1993. Au total, près de 300 tonnes de chlordécone ont été répandues sur ces deux îles (12).

b. Généralités

- **Nom IUPAC:** 1,2,3,4,6,7,8,9,10,10-decachloropentacyclo[5.3.0.0^{2,6}.0^{3,9}.0^{4,8}] decan-5-one
- **Formule brute:** C₁₀Cl₁₀O
- **Structure :**

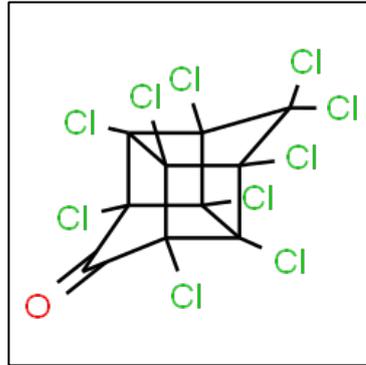


Figure 5: Structure tridimensionnelle de la Chlordécone. Source : chemspider.com

- **Synthèse :** La chlordécone est obtenue par dimérisation de l'hexachlorocyclopentadiène et hydrolisation en cétone (13).

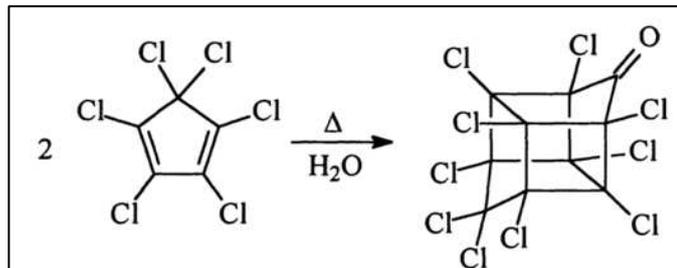


Figure 6: Synthèse de la chlordécone. Source: Survey of industrial chemistry, Philip J. Chenier

c. Propriétés :

1. Solubilité :

De par sa structure riche en chlore et carbone (pesticide organochloré), la chlordécone a une faible solubilité dans l'eau (1 à 2 mg/L à pH acide et neutre). À l'inverse elle est fortement soluble dans les solutés organiques. Elle possède en effet un coefficient de partage octanol-eau élevé (logP = 5,41) (14). Elle s'adsorbe donc facilement aux composés organiques dans les sols. Les sols antillais, en raison de leur origine volcanique, sont particulièrement riches en matières organiques, notamment en argiles. La chlordécone est donc adsorbée par ces argiles et facilement retenue par les sols antillais.

2. Bioaccumulation :

La bioaccumulation correspond à l'accumulation d'une substance toxique dans un organisme (figure 7). La chlordécone étant fortement lipophile, elle a une forte affinité pour les tissus adipeux des organismes, rendant son élimination plus difficile. Il va ainsi avoir une accumulation de cette substance suite aux expositions répétées. Cette bioaccumulation a été étudiée chez différentes espèces comme la courbine (*Argyrosomus regius*), une espèce de poisson marin. Il a été montré que l'administration répétée de chlordécone à ces poissons pendant 28 jours entraînait une augmentation cumulative de la charge corporelle en chlordécone, sans atteindre d'équilibre (15).

3. Bioamplification :

La bioamplification correspond à la concentration d'une substance toxique au cours de la chaîne alimentaire (figure 7). Ainsi, plus le niveau trophique d'un animal (c'est-à-dire son rang dans la chaîne alimentaire) est élevé, plus son niveau de contamination est important. Une étude réalisée en 1977 (Bahner et al., 1977) a confirmé que ce phénomène s'appliquait à la chlordécone. Cette étude a mis en évidence un transfert des crevettes aux mysides, et des mysides aux courbines.

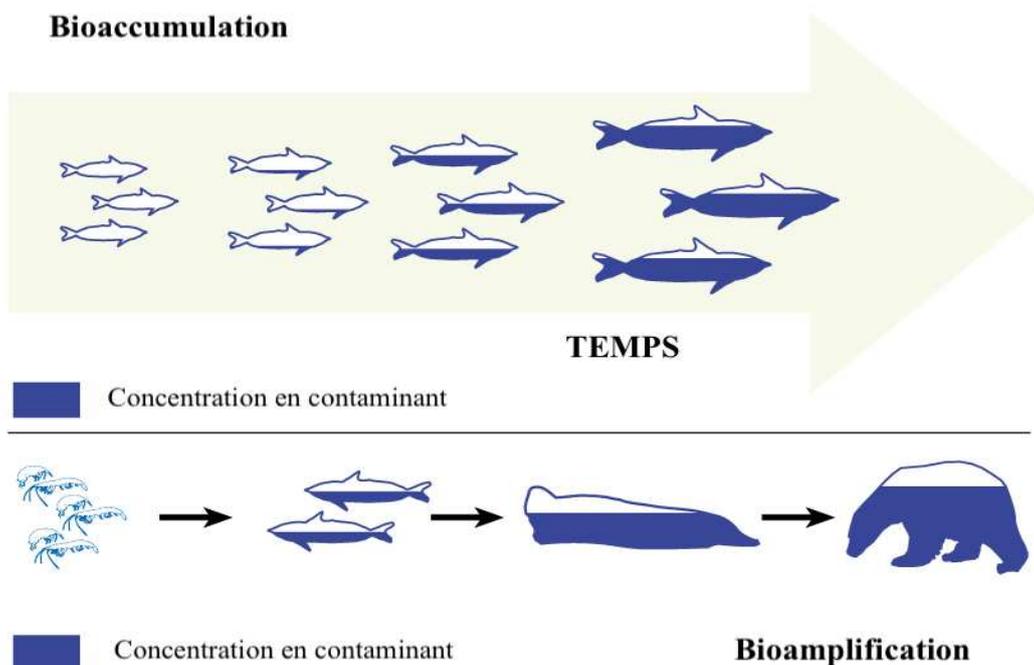


Figure 7: schéma récapitulatif des phénomènes de bioaccumulation et de bioamplification.

Adapté du schéma disponible sur http://mercurypolicy.scripts.mit.edu/blog/wp-content/uploads/2013/01/bioaccumulation_graphic.jpg

4. Volatilité :

La chlordécone est peu volatile (16). Il y a donc peu de transfert vers l'air, et la chlordécone reste dans le sol jusqu'à sa dégradation.

d. Toxicocinétique

1. Absorption :

L'absorption se fait principalement par voie orale, via l'ingestion d'aliments contaminés. La Chlordécone est en effet facilement absorbée au niveau intestinal. Des études réalisées chez les rongeurs montrent que 90% de la chlordécone administrée par voie orale est absorbée (17). D'autres voies d'absorption sont possibles telle que l'absorption cutanée.

2. Distribution :

Du fait de sa structure organochlorée hautement lipophile, la chlordécone a une forte affinité pour les tissus adipeux et va donc s'accumuler dans ces tissus. Cependant, le rapport entre la concentration de chlordécone dans le tissu adipeux par rapport à celle dans le sang est de 7 (18), ce qui est beaucoup plus bas que ce qui est observé pour d'autres molécules organochlorées. Ceci peut s'expliquer par la forte fixation de la Chlordécone à l'albumine et aux lipoprotéines de haute densité (HDL). Ces dernières favorisent le transport de la chlordécone vers le foie, où elle va s'accumuler. Le foie est donc le lieu d'accumulation privilégié du pesticide, et est l'organe où les concentrations sont les plus importantes (19).

3. Métabolisme :

Le métabolisme consiste à rendre la molécule plus hydrophile par des réactions de phase I (réactions de fonctionnalisation) et de phase II (réactions de conjugaison) afin de faciliter son élimination. La métabolisation de la chlordécone a lieu dans le foie. Elle est transformée en Chlordécol par réduction en présence de la Chlordécone réductase, une enzyme de la famille des acido-céto-réductases (réaction de phase I) (20). La Chlordécone et le Chlordécol subissent alors une glucuronoconjugaison ou une sulfoconjugaison (réactions de phase II). Ces réactions sont catalysées par l'UDP-glucuronosyl transférase et la sulfo-transférase (21).

4. Élimination :

Les conjugués obtenus sont plus hydrophiles et plus polaires que la Chlordécone initiale et sont plus facilement excrétés par la bile et éliminés dans les selles (22). La demi-vie de la chlordécone dans le sang est d'environ 165 jours chez l'Homme (23).

e. Toxicité

1. Toxicité subchronique

La toxicité subchronique correspond aux effets toxiques observés suite à l'exposition répétée à une substance, pendant plusieurs jours ou plusieurs mois. Les effets de la toxicité subchronique de la Chlordécone ont été mis en évidence grâce à des études réalisées chez 133 ouvriers de l'usine de production du Kepone® à Hopewell aux États-Unis. Ces ouvriers ont été exposés en moyenne pendant 5 à 6 mois. Les principaux effets observés chez ses ouvriers ont été regroupés sous le nom de « syndrome du Kepone® » :

- des symptômes neurologiques tels que l'anxiété, des céphalées et des tremblements chez 76 des 133 ouvriers exposés à de fortes doses (24).
- des effets sur la spermatogenèse : certains ouvriers ont présenté une oligospermie et une baisse de motilité des spermatozoïdes.
- des symptômes cutanés : certains ouvriers exposés à de fortes doses de Chlordécone ont développées des réactions cutanées.
- des symptômes hépatiques : une hépatomégalie a été observée chez 20 ouvriers.
- des symptômes articulaires : douleurs articulaires.

Ces effets ont été observés chez les ouvriers ayant un taux de chlordécone dans le sang supérieur à 1mg/mL, et ont disparu avec la diminution du taux de chlordécone dans le sang (25).

Ces études ont donc permis de mettre en évidence que les principaux organes cibles de la toxicité de la chlordécone sont le système nerveux, le foie, la peau et les organes reproducteurs.

2. Toxicité chronique

La toxicité chronique correspond aux effets toxiques observées à la suite d'une exposition chronique à une substance, pendant plusieurs années. La chlordécone est un perturbateur endocrinien et a été classée comme cancérogène possible pour l'Homme par l'OMS. Elle possède une activité œstrogénique, ce qui interfère avec le fonctionnement normal du système hormonal (26). Parmi les effets pouvant être observés chez les sujets ayant été exposés de façon chronique à la chlordécone, on peut retrouver des cancers, notamment le cancer de la prostate, des anomalies de croissance, et une hépatotoxicité (27).

f. Action antiparasitaire

L'action antiparasitaire de la chlordécone est commune à celle des pesticides organochlorés. Ces composés sont neurotoxiques, et agissent sur les canaux sodiques dans les cellules nerveuses des insectes, en les empêchant de se refermer. Les canaux sodiques restent donc plus longtemps ouverts, ce qui augmente la probabilité de génération de potentiels d'action. Ceci est responsable d'une hyperexcitabilité, et entraîne des spasmes, puis la mort de l'insecte (28).

III. La contamination en Martinique

La chlordécone a été utilisée pendant plus de 20 ans dans les bananeraies de Martinique. Sur cette période, des centaines de tonnes de chlordécone ont été utilisées (29), entraînant une contamination importante des sols martiniquais, des eaux et des denrées alimentaires. L'Homme se contamine essentiellement par consommation de boissons et d'aliments contaminés par la chlordécone.

a. La contamination des sols

Le niveau de contamination des sols dépend de différents facteurs :

- les apports de chlordécone : plus l'apport de chlordécone a été important, plus le niveau de contamination des sols est élevé.
- la composition des sols : comme dit précédemment, de par sa structure riche en chlore et en carbone, la chlordécone se fixe facilement aux composés organiques présents dans les sols antillais. Cependant, en fonction de la composition du sol, la chlordécone va s'y fixer plus ou moins facilement. Les sols martiniquais sont essentiellement d'origine volcanique, et on peut distinguer différents types de sols en Martinique selon leur composition. Parmi ceux-ci, on retrouve les andosols, les nitisols et les ferralsols. Les andosols sont constitués d'une argile à « allophane », qui dispose d'une microstructure poreuse, qui piège la chlordécone. De plus, ces sols sont particulièrement riches en matière organiques. Les andosols peuvent ainsi piéger et retenir de façon plus durable la chlordécone que les nitisols et les ferralsols.
- la pression parasitaire : celle-ci est liée à la pluviométrie. En effet, plus il pleut, plus il y a de charançons et donc plus la chlordécone a été utilisée.

À partir de ses paramètres, on peut déterminer le risque de contamination du sol par la chlordécone (figure 8).

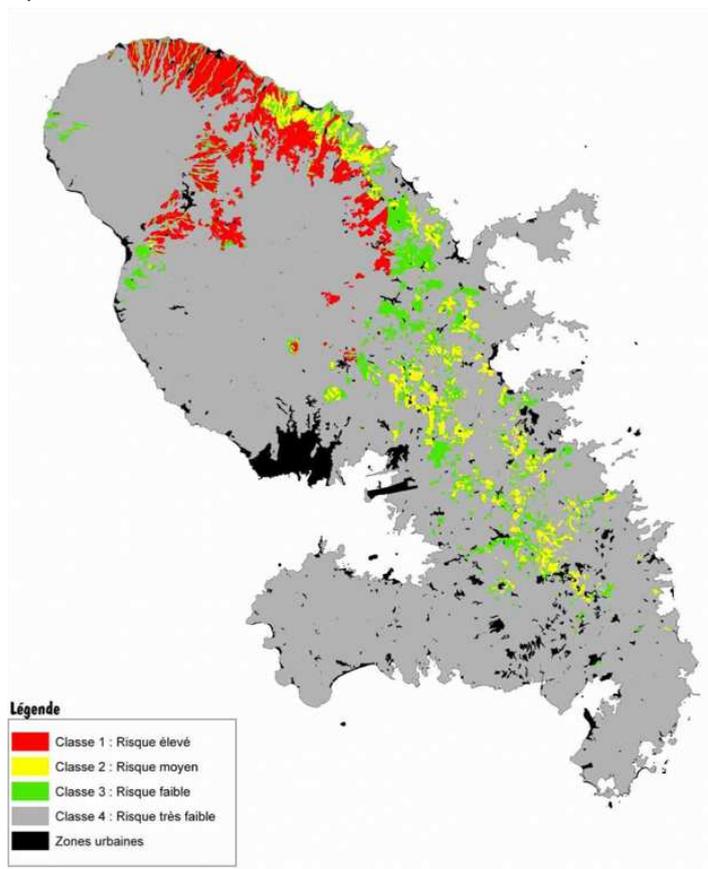


Figure 8: Carte des sols potentiellement contaminés par la chlordécone en Martinique 2007. Source : SIG DIREN Martinique

Cette carte a été réalisée en 2007 par la direction régionale de l'environnement de la Martinique. Elle se base sur des cartographies relatives aux trois critères cités précédemment :

- la cartographie de l'historique des plantations de bananes.
- la cartographie pédologique de la Martinique.
- la carte de la pluviométrie annuelle moyenne de Météo France.

Il est possible de confirmer ce modèle en faisant une analyse de la contamination réelle des sols martiniquais par la chlordécone. La direction de l'alimentation, de l'agriculture et des forêts (DAAF) de Martinique réalise depuis 2009 un projet de cartographie de la contamination des sols martiniquais par la chlordécone (figure 9). Celle-ci se base sur une analyse de prélèvements de sols. La dernière mise à jour de cette carte date de 2016 (30).

D'après ces analyses, 10 000 hectares de sols martiniquais seraient contaminés par la chlordécone, soit environ 40% de la surface agricole utile (31). On observe comme pour la

carte des sols potentiellement contaminés par la chlordécone, que les sols du Nord-Atlantique sont particulièrement contaminés. Cette région est effectivement un lieu historique de la culture de la banane. De plus, on y retrouve essentiellement des andosols, riches en allophane (32). La chlordécone rependue sur ces sols a donc pu être facilement piégée. Enfin, le Nord de la Martinique est la région qui connaît le plus de précipitations (33), ce qui se traduit par une pression parasitaire plus importante et donc un usage plus important de la chlordécone.

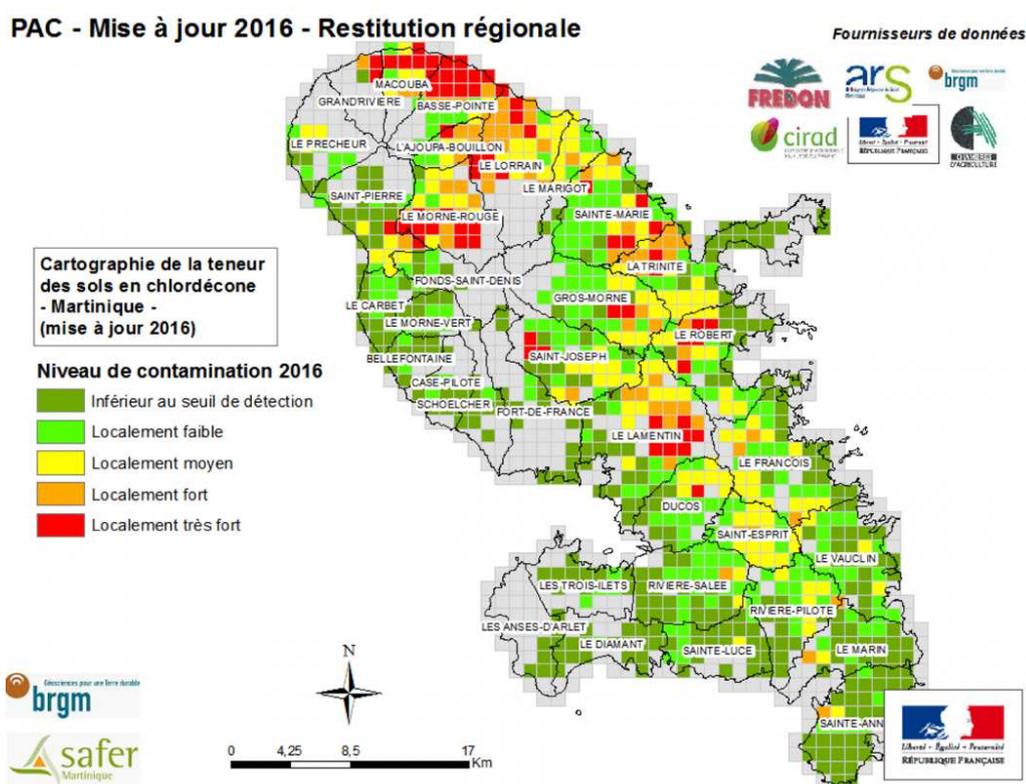


Figure 9: Représentation régionale du niveau de contamination des sols par la chlordécone.
Source : DAAF Martinique

Une cartographie régulièrement mise à jour permet de visualiser l'ensemble des analyses de sols réalisées en Martinique par différentes institutions depuis 2003 (34).

b. Persistance de la chlordécone dans les sols

La chlordécone est un Polluant Organique Persistant (POP). Ces molécules, surtout d'origine humaine, sont dites persistantes car elles se dégradent lentement et peuvent donc rester très longtemps dans l'environnement (de quelques années à plusieurs siècles).

La chlordécone est toujours fortement présente dans les sols martiniquais, des décennies après la fin de son utilisation. La persistance de la chlordécone est due à ses

propriétés physico-chimiques, présentées précédemment. Tout d'abord, sa structure en forme de cage rend difficile la rupture des liaisons atomiques. De plus, étant peu soluble dans l'eau et ayant une forte affinité pour la matière organique, elle est difficilement entraînée par l'eau et a une forte capacité à rester dans les sols riches en matières organiques de la Martinique.

Un premier modèle a été utilisé pour estimer la durée de pollution des sols antillais : le modèle WISORCH (West-Indies ORganoCHlorides) (35). Celui-ci part du principe que la chlordécone ne subit pas de dégradation physico-chimique ou biologique, et est éliminée uniquement par lessivage, c'est-à-dire par entraînement par les eaux de surface. D'après ce modèle, la durée de persistance de la chlordécone dépend de la composition du sol. Plus le sol est riche en matière organique, plus la chlordécone est fixée, et moins elle est éliminée par lessivage. Ainsi, ce modèle estimait qu'il faudrait de quelques décennies à 1 siècle pour éliminer la chlordécone des nitisols, et jusqu'à 600 ans pour celle présente dans les andosols.

Il a cependant été observé que les concentrations en chlordécone dans les sols antillais ont diminué 4 fois plus rapidement que ce qui était prédit par le modèle WISORCH (36). Il a été déterminé que le lessivage seul ne pouvait pas expliquer les diminutions observées. En effet, l'analyse de sols contaminés en Guadeloupe a révélé la présence de métabolites de la chlordécone, témoignant une dégradation in-situ du pesticide (36).

Une nouvelle version du modèle WISORCH a donc été établie. Celle-ci prend en compte une nouvelle donnée : la demi-vie de dissipation DT50. La dissipation décrit l'ensemble des phénomènes qui contribuent à l'élimination d'une molécule d'un milieu. Elle prend donc en compte le transport et la transformation de la molécule (37). Pour la chlordécone, la demi-vie de dissipation a été estimée à 5 ans (36). Il semblerait ainsi que la durée de persistance de la chlordécone dans les sols antillais serait plus courte que précédemment pensé. Ce dernier modèle estime que les taux de chlordécone dans les sols de Guadeloupe seraient indétectables à partir des années 2050.

Cependant, les effets toxiques *in vivo* des produits de dégradation de la chlordécone sont à ce jour peu connus.

c. La contamination des eaux

La contamination des eaux est principalement due au phénomène de lessivage : de par sa grande lipophilie, la chlordécone se lie aux matières organiques présentes dans les sols contaminés ; celles-ci sont ensuite entraînées par les eaux de pluies, emportant ainsi la chlordécone. On observe ainsi une contamination des eaux par la chlordécone à plusieurs niveaux.

1. Eaux de surface :

Dans le cadre du Plan d'Action Chlordécone 2008-2010, l'Office de l'eau Martinique (ODE) réalise depuis 2008 un suivi de la contamination de différents cours d'eau (figure 10). Les prélèvements ont été réalisés au niveau de 44 bassins versants (38). Il s'agit d'une zone géographique recevant toutes les eaux de pluie alimentant un même cours d'eau. Les analyses montrent que 56% des eaux de surface sont contaminées par la chlordécone (39), et que les zones les plus touchées se situent dans la partie aval des bassins versants occupés par l'agriculture, et en particulier par les bananeraies.

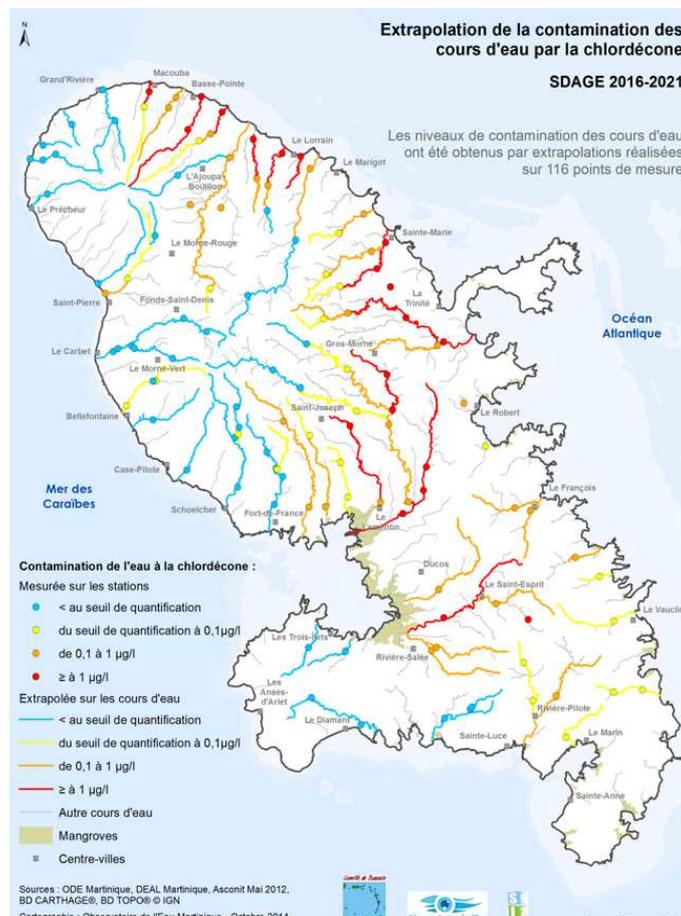


Figure 10: Extrapolation de la contamination des cours d'eau par la chlordécone. Source : SDAGE 2016-2021

2. Eaux souterraines :

Dans le cadre de la directive européenne Directive Cadre sur Eau (DCE), l'ODE réalise depuis 2008 une surveillance de la qualité des eaux souterraines de Martinique (40). Cette surveillance a permis d'établir en 2019 un état des lieux de l'état quantitatif et qualitatif des eaux souterraines. Dans cet état des lieux, les eaux souterraines sont regroupées en 8 masses d'eau. Les analyses ont montré que 3 des 8 masses sont en mauvais état qualitatif en raison d'une contamination par des pesticides dont la chlordécone et certains de ses produits de dégradation. Les masses contaminées se situent dans le Nord Atlantique et le Centre, et correspondent aux zones de culture de la banane.

La contamination de ces eaux souterraines (nappes phréatiques), se fait par infiltration d'eau de pluie contaminée. Il existe aussi des échanges entre ces nappes phréatiques et les eaux de rivières. En effet, il semblerait qu'il puisse avoir un transfert de la chlordécone présente dans les nappes vers les eaux de surface, en particulier pendant la saison sèche (41).

3. Eau potable :

En Martinique, l'eau potable provient essentiellement de rivières, majoritairement situées dans le Nord de l'île. Il s'agit effectivement de la zone la plus humide et recevant le plus de pluie. Seulement 6% de l'eau potable provient des nappes phréatiques (42). La recherche de la chlordécone dans les eaux potables de Martinique a été réalisée pour la première fois en 1999 par la Direction de la santé et du développement social (DSDS) de Martinique (43).

Les normes de potabilité de l'eau ont été établies en 1998 par la Commission Européenne par la directive 98/83/CE (44). Cette directive établie pour chaque paramètre une concentration maximale acceptable (CMA). Pour les pesticides, la concentration maximale acceptable est de 0,1µg/L par pesticide, et 0,50µg/L pour la quantité totale de pesticides retrouvés dans l'eau.

Depuis le début de la recherche de chlordécone dans les points de captage de l'eau potable, 5 de ces points ont été fermés car contaminés. Aujourd'hui, le contrôle de la qualité de l'eau potable est réalisé par les producteurs et par l'ARS. Sur les 35 points de captage d'eau brute utilisés, 33 sont exempts de chlordécone, 1 présente des traces de chlordécone

inférieure à la CMA, et 1 présente une concentration permanente supérieure à la CMA (45).

Concernant les eaux en bouteille, le contrôle de leur qualité est aussi réalisé par les producteurs et par l'ARS, au moins une fois par an. Depuis le début du contrôle des eaux potables en 1999, aucun pesticide y compris la chlordécone n'a été détecté dans les eaux en bouteille martiniquaises (45).

d. La contamination des aliments :

Aujourd'hui, la principale voie de contamination à la chlordécone est la consommation d'aliments contaminés. Il est donc important de connaître les moyens et les niveaux de contamination des aliments afin de pouvoir mettre en œuvre des mesures destinées à limiter l'exposition de la population.

En Europe, la Commission Européenne fixe pour toutes les denrées alimentaires destinées à la consommation humaine ou animale, une limite maximale pour les résidus (LMR). Il s'agit des « niveaux supérieurs de concentration de résidus de pesticides autorisés légalement dans ou sur les denrées alimentaires et les aliments pour animaux » (46). Une denrée alimentaire contaminée au-delà de la LMR est non-conforme et est donc interdite à la vente. Les premières valeurs de LMR pour la chlordécone ont été établies en 2008 par les règlements (CE) n° 396/2005 et (CE) n° 149/2008 (47). Cependant, en 2021, des valeurs inférieures à celles-ci ont été fixées par le règlement (UE) 2021/663 (48) :

- pour les denrées cultivables sous climat tropical ou tempéré tels que les agrumes, les fruits tropicaux, le maïs..., la LMR est fixée à 0,02 mg/kg de matière fraîche.
- pour certains produits spécifiques aux régions de climat tempéré tels que le blé, les fruits à pépins, les fruits à noyau..., la LMR est fixée à 0,01 mg/kg de matière fraîche.
- pour les produits d'origine animale (porcins, bovins, ovins, caprins, équidés, volailles), la LMR est fixée à 0,02 mg/kg de matière fraîche. Cependant, elle est de 0,03 mg/kg pour la graisse de bovin.

Des plans de surveillance et plans de contrôle (PSPC) ont été mis en place par la Direction générale de l'alimentation (DGAL) et le Ministère de l'Agriculture et de l'alimentation (MAA) afin de suivre les niveaux de contamination des denrées végétales, des denrées issues

d'animaux d'élevage et des produits de pêche. L'objectif est de contrôler le taux de conformité de ces denrées aux LMR. Ces plans s'inscrivent dans le Plan national d'action chlordécone III, et le bilan a été publié en 2019.

1. Fruits et légumes :

La chlordécone étant faiblement volatile (16), la contamination de végétaux cultivés sur des sols contaminés a lieu surtout par contact entre les végétaux et le sol. Deux mécanismes de contamination sont décrits : l'absorption par le système racinaire et l'adsorption suivie d'une diffusion de la chlordécone au sein de la plante. Il a été montré que l'adsorption suivie de la diffusion (figure 11) était le principal mécanisme en cause de la contamination des végétaux par la chlordécone (49). En effet, de par sa forte affinité pour les matières organiques, la chlordécone contamine facilement les organes des plantes en contact avec le sol, en particulier le système racinaire et les organes de réserve. Une fois adsorbée à la surface de ces structures, elle diffuse et pénètre le système racinaire.

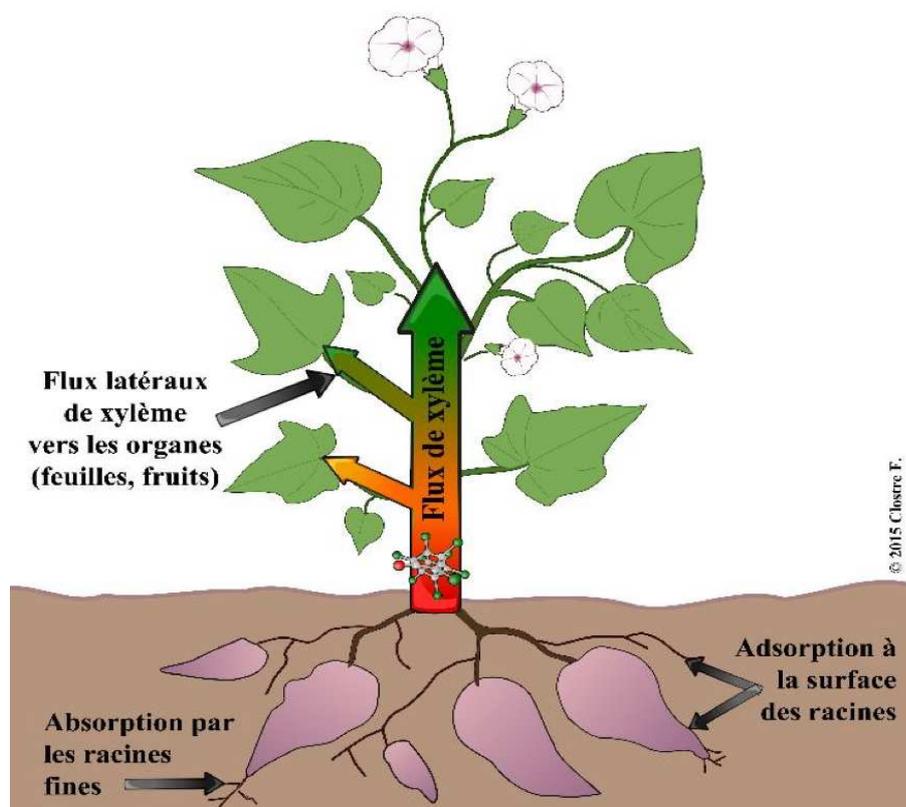


Figure 11: schéma synthétique des mécanismes de contamination des plantes par la chlordécone.

Source: <https://www.martinique.gouv.fr/content/download/11554/87715/file/Mode%20de%20contamination%20des%20plantes.pdf>

La chlordécone peut ensuite être transportée vers les organes aériens par la sève brute montante empruntant les vaisseaux du xylème. Au cours de cette diffusion, la chlordécone se fixe sur la paroi de ces vaisseaux, riche en lignine, qui a une forte affinité pour les molécules hydrophobes comme la chlordécone (49). Ainsi, la teneur en chlordécone dans la plante dépend de l'organe : les racines et les tubercules, en contact direct avec le sol contaminé, sont fortement contaminés, et plus on s'éloigne du sol, moins les organes sont contaminés.

Le niveau de contamination des végétaux dépend de trois facteurs :

- le taux de chlordécone présente dans le sol : la contamination des végétaux dépend du niveau de contamination du sol. Le Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD) et l'Institut national de recherche agronomique (INRA) ont réalisé une étude sur la contamination des végétaux cultivés sur des sols pollués. Il a été mis en évidence que le niveau de contamination était proportionnel au niveau de pollution du sol (50).
- la nature du sol : comme vu précédemment, la composition des sols a une influence sur la fixation de la chlordécone. Elle a donc aussi une influence sur la contamination des végétaux. En effet, plus un sol est capable de fixer la chlordécone, moins il y a de chlordécone libre pouvant contaminer les végétaux. Ainsi, il a été observé que les andosols, riches en allophane et donc piégeant plus facilement la chlordécone, ont un pouvoir contaminant moindre que les nitisols et les ferrasols (51).
- le végétal cultivé et l'organe cultivé : tous les végétaux n'ont pas le même risque de contamination à la chlordécone. Comme vu précédemment, plus la partie végétale est éloignée du sol, moins elle sera contaminée. La position de l'organe cultivé a donc beaucoup d'importance sur le risque de contamination. Dans le cadre du Plan National d'Action chlordécone 2008-2010, le CIRAD a mené en coopération avec l'INRA, des études concernant le transfert de la chlordécone aux végétaux. Celles-ci ont permis de distinguer trois grandes catégories de cultures en fonction de leur risque de contamination (52):
 - les cultures sensibles : celles-ci regroupent les racines et les tubercules : l'igname, la patate douce, la dachine, la carotte, le radis, le gingembre... Ces aliments poussent dans le sol et sont donc en contact permanent avec

le sol pollué, et peuvent ainsi avoir des taux de chlordécone supérieurs à la LMR.

- les cultures intermédiaires : il s'agit des cultures qui poussent à proximité des sols. On retrouve les cucurbitacées (giraumon, concombre...), la laitue, la cive, la canne à sucre... Ces cultures peuvent être contaminées à la chlordécone.
- les cultures peu sensibles : il s'agit des cultures qui poussent à distance du sol. La chlordécone n'est pas transférée jusqu'aux parties cultivées. On retrouve la goyave, le citron, l'ananas, la papaye, la tomate, le poivron, le piment... mais aussi la banane. Ces végétaux peuvent être cultivés sur des terres contaminées à la chlordécone, sans risque de contamination de la culture. On retrouve en effet dans ces fruits des teneurs en chlordécone bien inférieures à la LMR.

Les bananes peuvent donc être cultivées sur des parcelles contaminées, puisqu'il y a peu de risque de transfert de la chlordécone au fruit. Cependant, la reconversion d'une parcelle autrefois utilisée pour la culture de la banane, et donc potentiellement contaminée à la chlordécone, nécessite une vigilance particulière.

Plan de contrôle : le plan de contrôle des denrées végétales concerne les exploitations professionnelles ayant les sols les plus contaminés. Des prélèvements ont été réalisés au moment de la récolte des végétaux les plus à risque (c'est-à-dire, les cultures sensibles décrites précédemment). Sur 1391 prélèvements réalisés dans le cadre de ce plan de contrôle de 2003 à 2018, seuls 46 étaient non conformes, soit une conformité des denrées végétales de 97% (53).

Plan de surveillance : ce plan concerne les denrées végétales cultivées sur des exploitations agricoles pour lesquelles aucune information sur la contamination des sols n'était disponible. Sur 1193 prélèvements réalisés de 2011 à 2018, seuls 4 étaient non conformes (53).

2. Animaux terrestres :

En plus des denrées végétales, les animaux d'élevage terrestres peuvent aussi être contaminés. Les animaux se contaminent par ingestion d'aliments contaminés, en particulier de fourrages, ou par consommation d'eau contaminée. Cependant, il existe un autre mode de contamination : l'ingestion involontaire de sol pollué. Il s'agit du mode de contamination le plus important, responsable à lui seul de 20 à 75% de l'exposition totale (54). Comme vu précédemment, la chlordécone a une forte affinité pour les matières organiques présentes dans les sols. Ainsi, lorsqu'un animal ingère involontairement du sol pollué, il peut se contaminer. Il a été en effet observé dans une étude réalisée en 2015 par l'INRA dans le cadre du Plan national d'action chlordécone 3, que les bovins peuvent ingérer une quantité non négligeable de terre, pouvant atteindre 9,3%, soit 93 grammes de sol pour 1 kilogramme de matière sèche ingérée (55). La quantité de sol ingérée est d'autant plus importante que la quantité de fourrage est faible. En effet, plus celle-ci est faible, plus l'animal broute proche du sol, et plus il ingère involontairement du sol.

Une fois ingérée, la chlordécone est absorbée jusqu'à 90% au niveau digestif (15), et distribuée dans l'organisme de l'animal, en particulier au niveau du foie, des muscles, et pour les volailles, le jaune d'œuf. Ainsi, il est possible de retrouver des quantités de chlordécone supérieures aux LMR dans les aliments d'origine animale.

Il a été observé que la décontamination des animaux peut avoir lieu en l'espace de quelques mois, suite à l'arrêt de leur exposition au pesticide. Une étude réalisée dans le cadre du projet CHLORDEPAN (dont l'objectif était d'étudier la contamination des légumes et des animaux d'élevage terrestres) a permis de déterminer pour chaque animal d'élevage terrestre la demi-vie de la chlordécone et donc la durée nécessaire pour la décontamination (56).

Pour les animaux d'élevage, les plans de contrôle et de surveillances sont basés sur un échantillonnage réalisé à l'abattoir du Lamentin :

Plan de contrôle : le plan de contrôle ne concerne que les bovins. Deux composantes ont été définies : le plan de contrôle orienté, pour les animaux issus d'élevages ayant déjà eu un animal confirmé contaminé mais à un niveau inférieur aux LMR, et le plan de contrôle renforcé, pour les animaux d'élevages ayant déjà eu des animaux contaminés au-delà des LMR. Le bilan 2011-2018 montre que 98% des prélèvements réalisés dans le cadre du plan de contrôle orienté étaient conformes, et 95% pour le plan de contrôle renforcé (57).

Plan de surveillance : ce plan concerne les bovins, les ovins et caprins, les porcins et les volailles. Les prélèvements ont été réalisés de façon aléatoire à l'abattoir, sauf pour les œufs de volailles, pour lesquels les prélèvements ont été réalisés à la distribution. Les taux de conformité de 2010 à 2018 étaient de (57):

- bovins : 97%
- ovins/Coprins : 100%
- porcins : 98%
- œufs de volailles : 92%
- muscles de volailles : 99%

3. Faune marine :

Les poissons et les fruits de mer constituent une part non négligeable de l'alimentation en Martinique. Cette faune marine peut elle aussi être contaminée par la chlordécone et être vecteur de contamination pour l'Homme. Le pesticide peut effectivement être transféré du sol à l'environnement marin, par ruissellement : la chlordécone est entraînée par les rivières, soit sous forme dissoute, soit liée aux particules organiques en suspension.

L'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (IFREMER) réalise depuis 2002 des études sur la contamination des milieux marins par la chlordécone. Ces études ont mis en évidence deux mécanismes de contamination de la faune marine (58) :

- une contamination par « bain », c'est-à-dire par exposition à de l'eau contaminée.
- une contamination par voie trophique, qui s'explique notamment par le phénomène de bioamplification décrit plus haut.

L'IFREMER a réalisé entre 2008 et 2015, des prélèvements de poissons, de coquillages et de crustacées dans les eaux de Martinique. L'analyse de ses prélèvements a permis d'établir une cartographie de la contamination de la faune marine le long du littoral (59) (figure 12).

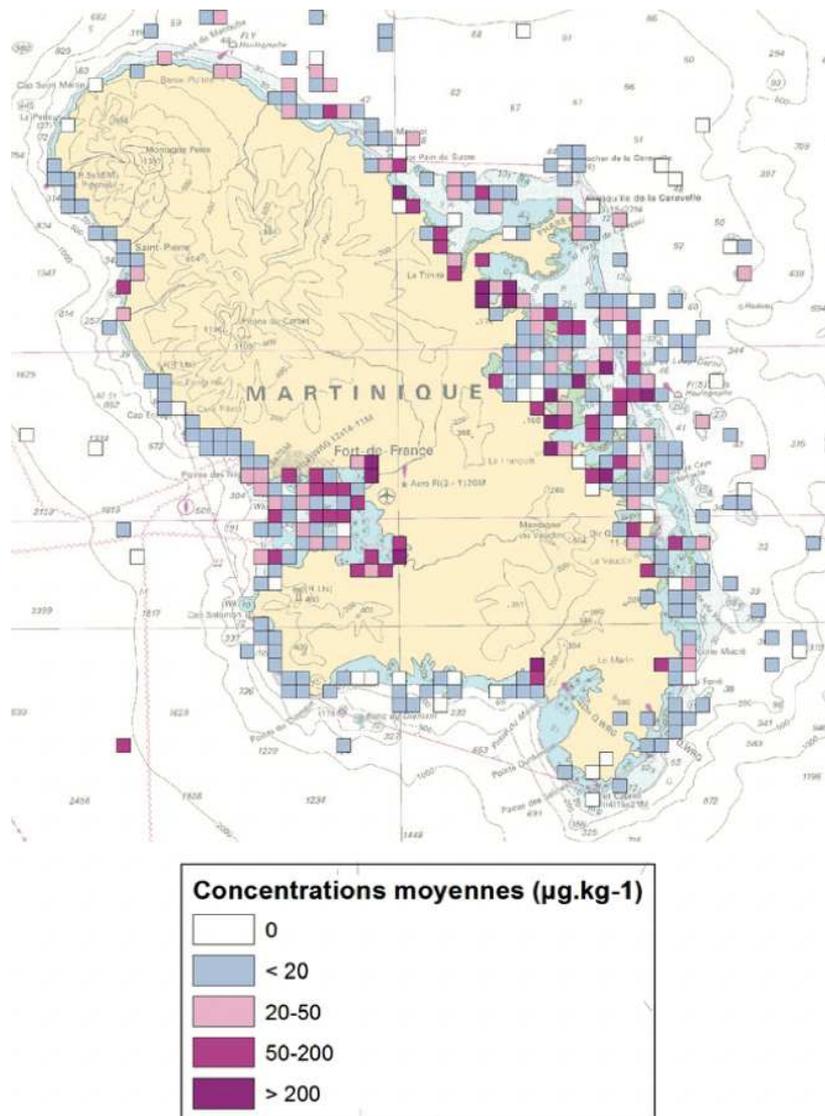


Figure 12: Concentrations moyennes de chlordécone dans les animaux marins échantillonnés. Source : Ifremer Martinique

On remarque sur cette carte que les animaux les plus contaminés sont surtout situés au niveau de la côte Atlantique et de la baie de Fort-de-France.

Le niveau de contamination d'un animal marin dépend non seulement de son habitat (les zones proches de la côte sont plus contaminées), mais aussi de ses habitudes alimentaires : une espèce sédentaire sera contaminée uniquement dans des zones polluées, tandis qu'une espèce mobile pourra se contaminer dans une zone polluée mais être pêchée dans une zone saine. Les prélèvements réalisés par l'IFREMER ont en effet permis de mettre en évidence une contamination variable non seulement entre les espèces, mais aussi selon le lieu de pêche. L'analyse de ses prélèvements a donc permis de définir pour chaque espèce, le risque de contamination en fonction de différentes zones maritimes, et donc de déterminer les zones à risque et les espèces les plus à risque (60). Les zones les plus à risque sont la baie de Fort-de-

France, et le littoral de la côte Atlantique. Parmi les espèces les plus contaminées, on retrouve les poissons détritivores (dont le Tilapia et le mullet blanc), les crustacés détritivores et carnivores (dont les langoustes), les poissons piscivores (dont les thazards et les carangues), les poissons carnivores de premier ordre (les gorettes et les marigans) et de deuxième ordre (dont le brochet de mer), et les suspensivores (la palourde blanche).

Des espèces à risque ont été identifiées pour la réalisation des plans de contrôle et de sécurité : les petits pélagiques, les espèces benthiques et les espèces démersales (61).

Plan de contrôle : il est basé sur un échantillonnage de produits de la pêche considérés comme à risque présents sur les étals et provenant de pêcheurs en activité dans les zones identifiées comme contaminées. Sur 108 prélèvements réalisés de 2013 à 2018, 101 étaient conformes, soit 94% (62).

Plan de surveillance : ce plan concerne l'ensemble des produits de la pêche considérées à risque issus de l'ensemble du territoire, mais aussi les produits de pêche importés provenant de pays ayant potentiellement utilisé la Chlordécone (Amérique latine, Afrique tropicale...). Concernant les produits pêchés en Martinique, sur 3300 prélèvements réalisés de 2011 à 2018, 3026 étaient conformes, soit 92%. Pour les produits importés, 377 prélèvements ont été réalisés de 2011 à 2018, tous étaient conformes (62).

e. La contamination de la population

Comme nous l'avons vu précédemment, des années après la fin de l'utilisation de la chlordécone dans les Antilles françaises, celle-ci est toujours présente dans les sols et est à l'origine d'une contamination des eaux et des aliments. Il est donc important de s'intéresser à l'exposition et au niveau de contamination de la population.

Il existe trois principales voies de contamination à la chlordécone : par contact cutané, par inhalation, et par ingestion. Aujourd'hui, le principal moyen de contamination de la population générale est *via* l'alimentation. L'exposition alimentaire à la chlordécone a été estimée pour la première fois en 2005, en se basant sur des données sur les habitudes alimentaires en Martinique obtenues par l'enquête ESCAL (2003-2004), et des données sur la contamination des aliments, obtenues par les enquêtes RESO (Résidus organochlorés),

réalisées en Martinique et en Guadeloupe entre 2005 et 2007 (63). Ainsi, en connaissant les consommations d'un individu, on peut calculer son exposition moyenne journalière, et la comparer aux Valeurs toxicologiques de référence (VTR). Les VTR permettent de décrire le lien entre l'exposition à une substance toxique et les effets nocifs sur la santé. Les premières valeurs de VTR pour la chlordécone ont été proposées en 2003 par l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments (Afssa, maintenant l'ANSES) (64) :

- une limite tolérable d'exposition chronique de 0,5 µg/kg de poids corporel par jour (cette valeur a été abaissée en 2021 à 0,17 µg/Kg de poids corporel par jour (65)).
- une limite d'exposition aiguë de 10 µg/kg de poids corporel par jour.

Les individus dont l'exposition moyenne journalière est supérieure à ces VTR sont donc plus exposés et plus à risque d'être contaminés. Ces études ont permis d'identifier des populations plus exposées que le reste de la population : les enfants entre 3 et 6 ans, les individus résidant en zone contaminée, et les auto-consommateurs de poisson (66). Il a aussi été mis en évidence par ces études, l'existence de circuits informels, présentant potentiellement des niveaux élevés de contamination, pouvant ainsi être à l'origine d'une exposition importante pour le consommateur : l'auto-production, la vente en bord de route...

De plus, diverses études épidémiologiques ont été réalisées en Guadeloupe afin de déterminer l'imprégnation de la chlordécone dans le sérum de patients appartenant à différents sous-groupes de la population : les femmes enceintes (étude Hibiscus), les travailleurs agricoles ayant utilisé le produit, les hommes de plus de 45 ans (étude Karuprostate), et les enfants (étude TIMOUN) (67). Les résultats ont montré que ces sous-populations présentaient effectivement une imprégnation par la chlordécone.

Dans le cadre du Plan national d'action chlordécone II (2011-2013) et III, l'étude « KANNARI : santé, nutrition et exposition à la chlordécone aux Antilles » a été élaborée pour compléter les données issues de ces études précédentes, d'étudier l'imprégnation de la population antillaise générale par la Chlordécone, et de mieux comprendre les circuits de distribution informels. Cette étude a été pilotée par les ARS de Martinique et de Guadeloupe, Santé Publique France, l'Agence nationale de sécurité sanitaire, de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES), et les Observatoires régionaux de santé de Martinique et de Guadeloupe. Elle a été réalisée de 2011 à 2018 sur la population générale (68). Ses

objectifs étaient (69):

- de suivre l'état de santé de la population antillaise, à travers le volet « Santé », piloté par les observatoires de santé de Martinique et de Guadeloupe.
- de suivre l'état nutritionnel de la population antillaise, à travers le volet « Nutrition », piloté par Santé Publique France.
- de suivre l'exposition à la chlordécone de la population antillaise, à travers le volet « Exposition alimentaire », piloté par l'ANSES.
- de décrire l'imprégnation par la chlordécone au sein de la population antillaise, à travers le volet « Imprégnation », piloté par Santé Publique France.

Les individus qui ont participé à l'étude ont été sélectionnés par tirage au sort. Au total, entre la Martinique et la Guadeloupe, 1725 adultes de plus de 16 ans, et 483 enfants entre 3 et 15 ans ont participé à cette enquête (66). Celle-ci s'est déroulée en 3 étapes :

- une étape de visite à domicile, pendant lequel différents questionnaires ont été distribués aux individus participant à l'étude, permettant de recueillir des informations concernant les caractéristiques socio-démographiques du foyer, les habitudes alimentaires, et les habitudes d'approvisionnement.
- une étape téléphonique, au cours de laquelle ont lieu deux entretiens téléphoniques concernant les consommations alimentaires au cours des 24 heures précédentes.
- une étape (non obligatoire) de prélèvements biologiques (sang, urine, cheveux...), pour le volet « imprégnation ». Cette étape ne concernait que les adultes volontaires de plus de 18 ans résidant en Martinique ou en Guadeloupe depuis au moins 6 mois au moment de l'enquête : 742 adultes ont participé à ce volet (tableau 1).

La chlordécone a été détectée dans plus de 90% des échantillons analysés (le seuil de détection de la chlordécone étant de 0,02 µg/L) (69), à des niveaux comparables entre la Martinique et la Guadeloupe. Les individus les plus contaminés présentaient une concentration sérique en Chlordécone 10 fois plus élevée que la moyenne.

	Nombre d'individus prélevés	Chlordéconémie moyenne (µg/L) [IC95%]	95 ^{ème} percentile	Chlordéconémie maximale
Martinique	450	0,14 µg/L [0,11-0,18]	1,87 µg/L	15,41 µg/L
Guadeloupe	292	0,13 µg/L [0,10-16]	1,24 µg/L	18,53 µg/L

Tableau 1: Niveau d'imprégnation des individus ayant participé au volet "imprégnation" de l'enquête KANNARI.
Source : <https://www.chlordecone-infos.fr/sites/default/files/documents/impregnation-chlordecone-kannari.pdf>

L'enquête KANNARI a aussi mis en évidence des facteurs de risque de l'imprégnation par la chlordécone (70):

- la consommation de poissons (+43% en Martinique), en particulier provenant de circuits informels (pêche amateur, vente au bord de routes, dons...).
- le fait de résider dans une zone contaminée par la chlordécone, terrestre (+43% en Martinique) ou maritime (+45% en Martinique). Ce niveau d'imprégnation plus élevé est probablement lié à la consommation de denrées issues de ces zones contaminées.
- en Guadeloupe, la consommation de viande blanche a aussi été identifiée comme facteur de risque (+26%).
- en Guadeloupe, la consommation d'alcool a été un facteur de risque (+43%).

Les résultats d'imprégnation obtenus lors de cette enquête ont pu être comparés à ceux obtenus précédemment en Guadeloupe (aucune étude sur l'imprégnation n'avait été réalisé en Martinique avant l'enquête KANNARI) (tableau 2). Les résultats montrent une diminution de l'imprégnation pour la majorité de la population, mais pas pour les sujets les plus exposés (71).

Étude	Hibiscus	Karuprostate	TIMOUN	KANNARI
Population cible	Femmes enceintes et nouveau-nés	Hommes de plus de 45 ans	Femmes enceintes et nouveau-nés	Hommes et femmes de plus de 18 ans
Année	2003	2004-2007	2004-2007	2013-2017
Concentration médiane (µg/L) [p25 ; p75]	2,20 [1,2 ; 3,9]	0,60 [0,3 ; 1,4]	0,39 [<LDD ; 0,9]	0,12 [<LDD ; 0,26]
Concentration maximale (µg/L)	16,6	49,1	19,7	18,5
Pourcentage des valeurs supérieures à la limite de détection (LDD)	61%	67%	62%	> 90%

Tableau 2: Concentrations médianes et maximales de chlordécone dans le sang obtenues par quatre enquêtes réalisées en Guadeloupe.

Source : https://www.chlordecone-infos.fr/sites/default/files/documents/2018_Synthese_Chlordecone.PDF

L'alimentation est donc une source majeure de contamination des populations antillaises à la chlordécone. L'étude KANNARI a montré que l'exposition à la chlordécone commence très tôt, la chlordécone étant aussi détectée dans le sang des individus les plus jeunes. Cependant, l'exposition à la chlordécone peut débuter encore plus tôt : en effet, le pesticide est capable de traverser la barrière placentaire, ce qui peut ainsi entraîner une exposition prénatale par passage transplacentaire. Dans l'enquête TIMOUN réalisée en Guadeloupe entre 2004 et 2007, 56% des prélèvements de sang du cordon ombilical présentaient de la chlordécone (72). De plus, il a été montré dans l'étude HIBISCUS réalisée entre 2003 et 2004 en Guadeloupe que la chlordécone peut être retrouvée dans le lait maternel : la chlordécone a été détectée dans le lait de 40% des femmes allaitantes ayant participé cette l'étude (73).

Depuis Novembre 2020, des tests de chlordéconémie en laboratoire sont accessibles à l'ensemble de la population antillaise. Initialement payants (gratuits pour les ouvriers agricoles), ces tests sont désormais gratuits et accessibles à l'ensemble de la population sans

ordonnance. Les échantillons sont analysés au CHU de Limoges, mais les CHU de Martinique et de Point-à-Pitre devraient bientôt être équipés d'appareils permettant de réaliser ces analyses sur place. Entre Novembre 2020 et Décembre 2021 en Martinique, 3702 prélèvements ont été analysés (74) (figure 13). La chlordécone n'a pas été détectée dans 39% des prélèvements (chlordéconémie inférieure au seuil de détection de 0,05 µg/L). De plus, 16% des prélèvements avaient un taux supérieur à la VTR interne (celle-ci a été fixée en 2021 par l'ANSES et est égale à 0,4 µg/L (65)).

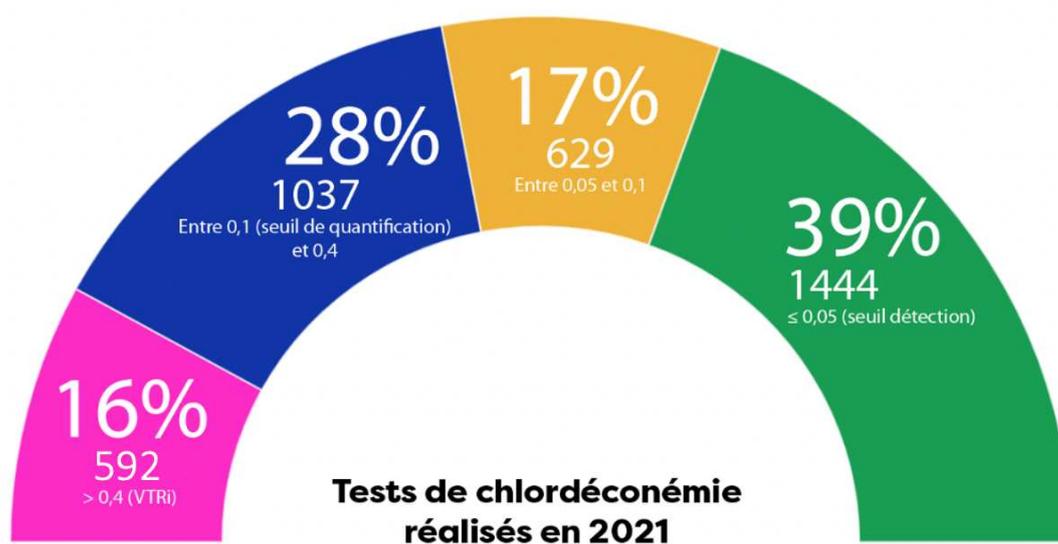


Figure 13: Résultats des tests de chlordéconémie réalisés entre novembre 2020 et Décembre 2021 en Martinique. Adapté du schéma disponible sur: <https://www.jafamatinik.mq/tests-de-chlordeconemie>

On remarque ainsi une différence avec les résultats obtenus lors de l'étude KANNARI. Cependant, il faut noter que les seuils de détection diffèrent : il était de 0,02 µg/L pour l'étude KANNARI, et est de 0,05 µg/L pour les dosages réalisés aujourd'hui. De plus, un certain nombre d'actions ont été mis en place pour diminuer l'exposition de la population antillaise à la Chlordécone. Ces résultats pourraient donc témoigner de l'efficacité de ces mesures.

Pour approfondir les connaissances apportées par l'étude KANNARI, l'étude ChlorExpo a été élaborée dans le cadre du Plan national chlordécone IV (2021-2027). Cette étude va notamment s'intéresser aux moyens d'approvisionnement de préparation et de cuisson des aliments (75).

IV. Les conséquences sur la santé

Les populations antillaises sont donc exposées à la chlordécone au quotidien, en particulier via l'alimentation, et les études d'imprégnation de la population générale montrent que ce pesticide peut être retrouvé dans le sang de la majorité des Antillais. Du fait de sa persistance dans les sols antillais, l'exposition à la chlordécone se poursuivra de nombreuses années. Il est donc nécessaire d'étudier les différents effets néfastes que la chlordécone peut avoir sur la santé, afin d'élaborer des politiques de santé publique visant à préserver la santé des populations.

Les effets néfastes de la chlordécone sur la santé ont été observés pour la première fois chez les ouvriers de l'usine de Hopewell en Virginie. C'est à ce moment qu'est décrit le « syndrome du Képone® », dont les symptômes ont déjà été décrits. Ces ouvriers ont cependant été directement exposés au pesticide et présentaient donc des taux de chlordécone dans le sang beaucoup plus élevés que ceux observés dans les populations antillaises. En effet, aux Antilles, l'exposition à la chlordécone est chronique : les Antillais sont exposés à des doses plus faibles que les ouvriers de l'usine de Hopewell, mais sur une durée beaucoup plus longue. De nombreuses études ont donc été réalisées afin de comprendre les effets de cette exposition chronique sur la santé.

a. Effets sur la gestation et le développement des nourrissons : l'étude TIMOUN

Cette étude a été mise en place afin d'évaluer les effets d'une imprégnation par la chlordécone sur le déroulement de la grossesse et sur le développement des nourrissons et des jeunes enfants. Il s'agit d'une étude de cohorte longitudinale mère-enfant, pilotée par l'INSERM, qui a débuté en 2004 en Guadeloupe.

Afin de déterminer les effets sur le déroulement de la grossesse, 1068 femmes enceintes ont été suivies au cours de leur troisième trimestre de grossesse entre 2004 et 2007. Des questionnaires ont été distribués afin de recueillir des données socio-démographique, médicales et sur leur alimentation. De plus, des dosages de la chlordécone dans le sang maternel ont été réalisés. Au cours de l'étude, 144 accouchements prématurés ont été observés. L'exposition à la chlordécone (évaluée par les concentrations plasmatiques) a été significativement associée à une diminution de la durée de gestation (76). Cette diminution de

la durée de gestation pourrait être expliquée par les effets de la chlordécone sur les récepteurs aux œstrogènes et à la progestérone, qui ont été observés *in vivo* et *in vitro* (26).

Pour déterminer les effets d'une exposition prénatale et postnatale à la chlordécone sur le développement des enfants, plus de 400 enfants ont été suivis à différents stades : à 3 mois, 7 mois, 18 mois et à 7 ans. L'exposition prénatale à la chlordécone a été estimée par le dosage de la chlordécone dans le sang du cordon. L'exposition postnatale a été estimée par les habitudes alimentaires et par des dosages de la chlordécone dans le sang. Plusieurs liens ont ainsi pu être établis :

- l'exposition prénatale à la chlordécone était associée à une altération du développement de la motricité fine chez les garçons : plus l'exposition était importante, plus les scores du test de motricité fine étaient faibles à 7 et à 18 mois (77)
- l'exposition prénatale était associée à des tremblements réguliers des deux mains à l'âge de 7 ans (78).
- les expositions pré et postnatales étaient associées à des anomalies de la fonction thyroïdienne. La présence de sang dans le cordon était associée à une augmentation des taux de TSH (hormone thyrostimuline) chez les garçons, et l'exposition postnatale était associée à une diminution des taux de T3 libre (triiodothyronine) chez les garçons et les filles, et une diminution de T4 libre (thyroxine), uniquement chez les filles. Cependant, ni la TSH, ni la T3 libre, ni la T4 libre n'étaient associées aux scores de motricité fine (79).
- l'exposition postnatale était associée à une diminution de la préférence visuelle à la nouveauté et à un allongement du temps d'acquisition de la mémoire visuelle (80).
- l'exposition prénatale était associée à une diminution de la sensibilité aux contrastes visuels (81).
- l'exposition postnatale était associée à des scores de traitement de l'information visuelle plus faibles (77).
- les expositions pré et postnatales étaient associées à des anomalies du développement staturo-pondéral. En effet, l'exposition prénatale était associée à un indice de masse corporelle (IMC) supérieur à 3 mois pour les garçons, et à 8 et 18 mois pour les filles. Cet IMC plus élevé était dû à une taille plus faible. À

l'inverse, l'exposition postnatale était associée à un IMC plus faible, dû à une taille et un poids plus faibles, à 3, 8 et 18 mois, en particulier pour les filles (82).

Cependant, aucun lien entre l'exposition prénatale et l'apparition de malformations congénitales et de cryptorchidie n'a été observé (83).

Ainsi, l'exposition à la chlordécone serait responsable d'une diminution de la durée de gestation, et d'anomalies de développement des jeunes enfants.

Le suivi des enfants inclus dans l'étude TIMOUN est encore en cours. Un suivi à l'âge péri-pubertaire était prévu pour 2022 (84).

b. Cancer de la prostate : l'étude Karuprostate

Les Antilles françaises détiennent le « record du monde » de cas de cancers de la prostate. En janvier 2019, Santé publique France a publié un rapport sur l'incidence et la mortalité par cancers en France, de 2007 à 2016 (85). À l'échelle nationale, le taux d'incidence annuel était de 88,8 nouveaux cas pour 100 000 habitants. En Martinique, il était de 164,5 nouveaux cas pour 100 000 habitants, et en Guadeloupe, 173,0 nouveaux cas pour 100 000 (figure 14).

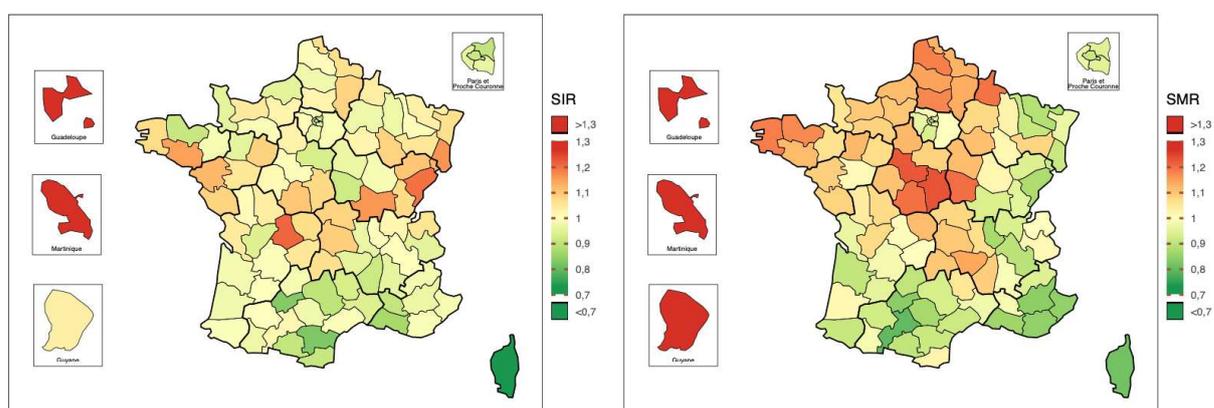


Figure 14: Rapports standardisés d'incidence (SIR) et de mortalité (SMR) par cancer de la prostate en France. Source: Estimations régionales et départementales d'incidence et de mortalité par cancers en France, 2007-2016, Santé publique France, Janvier 2019

Ainsi, le taux d'incidence est presque deux fois plus élevé aux Antilles. Comme en France hexagonale, le cancer de la prostate est le cancer le plus fréquent chez l'homme aux Antilles. Il représente environ un tiers de tous les cancers, et plus de la moitié des cancers chez l'homme. L'âge médian au diagnostic est légèrement inférieur aux Antilles (68 ans contre 70

ans) (86). La mortalité par cancer de la prostate est aussi plus élevée aux Antilles qu'en France hexagonale : 23,0 décès annuels pour 100 000 habitants en Martinique et en Guadeloupe, contre 10,0 dans l'hexagone.

La chlordécone a été classée en 1979 comme cancérogène possible pour l'Homme par l'OMS. Afin d'étudier le lien entre l'exposition à la chlordécone et le risque de survenue du cancer de la prostate, l'étude Karuprostate a été élaborée. Il s'agissait d'une étude cas-témoin réalisée de 2004 à 2007, par le CHU de Point-à-Pitre en coopération avec l'INSERM. Au cours de cette étude, 709 hommes atteints de cancer de la prostate et 723 hommes témoins ont été investigués (87). L'exposition à la chlordécone a été estimée par sa concentration plasmatique pour 623 cas et 671 témoins. La chlordécone a été détectée dans le plasma de 68,7% des patients cas, et 66,8% des témoins. Les concentrations sériques moyennes en chlordécone étaient de 0,44 µg/L chez les cas, et 0,40 µg/L chez les témoins. L'étude Karuprostate a mis en évidence un lien statistiquement significatif entre l'exposition à la chlordécone et la survenue de cancer de la prostate. Le risque de survenue de cancer de la prostate était d'autant plus élevé que la concentration sérique de la chlordécone était importante (en particulier quand celle-ci était supérieure à 1 µg/L). D'autres facteurs de risque ont été identifiés par cette étude :

- le fait d'avoir des antécédents familiaux de cancer de la prostate.
- le fait d'avoir résidé temporairement dans un pays industrialisé (France hexagonale) avant la survenue de la maladie.
- le fait d'avoir un polymorphisme au niveau du gène codant pour la chlordécone réductase, ainsi pouvant diminuer la capacité du sujet à éliminer la chlordécone (cependant, ce résultat n'était pas statistiquement significatif).

Néanmoins, il est important de noter qu'il existait des différences entre les deux groupes, pouvant rendre difficile leur comparaison. En effet, l'âge médian des cas était de 66,2 ans, contre 60,6 ans pour les témoins. De plus, il y avait plus d'antécédents familiaux de cancer de la prostate chez les cas (24,4%) que chez les témoins (10,2%). Cette étude présente donc un biais pouvant impacter les résultats. Ainsi, cette étude a des limites, et une nouvelle étude a été proposée en 2013 afin de confirmer ces résultats, cette fois en Martinique : l'étude Madiprostate. Mais malheureusement, celle-ci ne verra jamais le jour.

Il est aussi important de noter, que les taux d'incidence du cancer de la prostate observés aux Antilles françaises sont comparables à ceux observés dans les populations afro-américaines, très proches ethniquement de la population antillaise. En effet, entre 2003 et 2007, l'incidence du cancer de la prostate dans l'état de Georgie aux États-Unis était de 179 cas pour 100 000 habitants (86).

Ainsi, l'étude Karuprostate a montré qu'il était probable que l'exposition à la chlordécone entraîne une augmentation du risque de survenue du cancer de la prostate. En 2021, l'ANSES a publié un rapport d'expertise collective, et a conclu qu'il y avait une relation causale probable entre l'exposition à la chlordécone et la survenue de cancer de la prostate (88). Cependant, il s'agit à ce jour de la seule étude réalisée, et des études supplémentaires semblent nécessaires pour confirmer ce lien. Dans le cadre du plan chlordécone III (2014-2020), une nouvelle étude de cohorte a été initiée en Guadeloupe et en Martinique : la cohorte KP-Caraïbes. Celle-ci vise à évaluer l'impact de l'exposition à la chlordécone sur l'évolution du cancer de la prostate en fonction des parcours thérapeutiques (89). Cette étude sera poursuivie dans le cadre du plan chlordécone IV (2021-2027).

c. Effets sur la fertilité

Des effets néfastes sur la fertilité masculine avaient été observés chez les ouvriers de l'usine de Hopewell. En effet, certains ouvriers présentaient une oligospermie, et une baisse de motilité des spermatozoïdes. Une étude a donc été réalisée en Guadeloupe entre 1999 et 2001 pour étudier les effets de la chlordécone sur la fertilité masculine chez les populations antillaises (90). Au cours de cette étude transversale, la qualité du sperme et les taux d'hormones reproductives ont été observés chez des travailleurs agricoles du secteur de la banane (donc potentiellement exposés à la chlordécone) et chez des salariés de secteurs non agricoles. Aucune différence significative n'a été observée entre les deux groupes. Il semblerait ainsi que le niveau de contamination des populations antillaises n'entraîne pas d'effets sur la fertilité masculine, y compris chez les ouvriers ayant été directement exposés au produit.

Concernant la fertilité féminine, aucune donnée n'est disponible à ce jour, cependant, une étude intitulée KARU-FERTIL sera réalisée en Guadeloupe, dans le cadre du Plan d'action chlordécone IV. Elle a pour objectif d'établir un éventuel lien entre l'exposition au pesticide et l'infertilité féminine. Il s'agira d'une étude épidémiologique et concernera les femmes de 18

à 39 ans consultant pour infertilité (91).

d. Effets sur l'hépatite chronique active : étude HEPATOCHLOR

La chlordécone n'est pas une molécule hépatotoxique. Cependant, il a été observé chez le rongeur que la chlordécone à de faible dose pouvait potentialiser les effets de certains composés hépatotoxiques (92). La chlordécone s'accumulant en grande partie au niveau du foie, il est intéressant d'évaluer l'effet d'une exposition à ce pesticide sur la survenue de pathologies hépatiques. Une étude de cohorte rétrospective intitulée HEPATOCHLOR a ainsi été mise en place en Guadeloupe afin d'évaluer le rôle de la chlordécone dans le développement et l'évolution des hépatites chroniques actives (93). Des patients porteurs d'hépatopathie chronique active (virale B ou C, ou alcoolique) ont été recrutés au niveau du CHU de Guadeloupe entre 2012 et 2015. L'exposition à la chlordécone était estimée par son dosage sérique. Les résultats de cette étude sont en cours d'analyse.

V. Mesures mises en œuvre

Nous avons donc pu voir que la chlordécone représentait un problème majeur de santé publique aux Antilles françaises. Les populations sont largement exposées à ce pesticide, qui peut avoir des conséquences néfastes sur la santé. Il est donc nécessaire de mettre en place des mesures visant à limiter l'exposition de la population à la chlordécone. La nécessité de mettre en place de telles mesures a été mise en évidence en 1998, suite à la publication du rapport intitulé « Rapport d'évaluation des risques liés à l'utilisation des produits phytosanitaires en Guadeloupe et en Martinique », dit rapport Balland-Mestres-Fagot. Suite à la publication de ce rapport, les préfets des deux départements sont chargés d'élaborer un premier plan d'action. Depuis, trois plans d'action ont été réalisés, et un quatrième a débuté en février 2021, et devrait se poursuivre jusqu'en 2027. Le suivi de ces plans sont assurés au niveau local par deux groupes créés en 2001 : le Groupe régional phytosanitaire (GREPHY) en Martinique, et le Groupe régional d'étude des pollutions par les produits phytosanitaires (GREPP) en Guadeloupe. Ces groupes sont placés sous la présidence des Préfets des régions respectives.

a. Les premières mesures

Les premières mesures mises en place ont concerné la qualité de l'eau en Martinique en 1999. L'analyse des eaux a mis en évidence la contamination par la chlordécone de certains captages d'eau potable, ce qui a entraîné la fermeture du captage de Gradis dès 1999. Trois autres sources ont depuis été fermées en Martinique.

À partir de 2003, un traitement par charbon actif est réalisé sur les eaux de la rivière Capot (94), afin de respecter les normes de potabilité. En effet, du fait de sa porosité importante, le charbon actif est capable de retenir à sa surface des substances : c'est l'adsorption. L'emploi de ce produit permet donc de retenir et d'éliminer les micropolluants organiques comme la chlordécone de l'eau, sans réaliser de traitements chimiques.

La contamination des sols et de certains aliments a été mise en évidence en 2002 par un rapport publié par la DSDS. Suite à la publication de ce rapport, et suite à la saisie à Dunkerque de patates douces contaminées à la chlordécone en provenance de la Martinique, des arrêtés préfectoraux ont été pris en Martinique et en Guadeloupe en 2003, afin de limiter

l'exposition alimentaire à la Chlordécone. Ces arrêtés ont imposé aux agriculteurs cultivant 11 plantes qualifiées de sensibles (en particulier les légumes racines), de réaliser avant leur mise en culture, une analyse des sols (95). La culture de ces plantes sensibles est fortement déconseillée sur les sols contaminés, et les agriculteurs souhaitant cultiver un sol contaminé devaient réaliser une analyse de leur culture avant sa commercialisation. Les récoltes contaminées devaient être détruites.

La contamination de la faune d'eau douce et marine a été mise en évidence par une étude réalisée par la DSD en collaboration avec l'Ifremer en 2002. Cette découverte conduit à la fermeture la même année d'une pisciculture dans la commune du Lorrain (Nord Atlantique).

En 2004, l'enjeu de la contamination par la chlordécone aux Antilles a été inscrit dans le premier Plan national santé environnement (PNSE 2004-2008) (96). Dans le cadre de ce plan, les enquêtes ESCAL et CALBAS sur les habitudes alimentaires ont été réalisées en Martinique et en Guadeloupe. De plus, le premier Plan d'action chlordécone a été élaboré.

b. Le Plan d'action Chlordécone I : 2008-2010 (97,98)

1. Présentation du plan

Des moyens importants ont été mobilisés pour la réalisation de ce premier plan d'action : 33 millions d'euros. Les objectifs de ce plan étaient :

- d'identifier les actions à renforcer ou à mettre en œuvre.
- d'améliorer la coordination de l'ensemble des acteurs et la communication sur les actions menées.

Le plan a été organisé autour de 40 actions réparties en quatre axes :

- axe 1 : renforcer la connaissance des milieux (actions 1 à 10).
- axe 2 : diminuer l'exposition et mieux connaître les effets sur la santé (actions 11 à 24).
- axe 3 : assurer une alimentation saine et gérer les milieux contaminés (actions 25 à 36).
- axe 4 : améliorer la communication et piloter le plan (actions 37 à 40).

2. Bilan du premier plan d'action

Parmi les actions qui ont été mises en œuvre, on peut citer :

- la création d'un outil cartographique de la contamination des sols antillais par la chlordécone. Un système d'information géo-référencé (SIG) a été créé afin d'y intégrer les analyses de sols et de végétaux réalisés. En Martinique, 6300 analyses de sols ont pu y être intégrées, ainsi que 580 analyses de végétaux.
- la surveillance des eaux de surface, des eaux souterraines et des eaux littorales.
- la réalisation d'études sur transfert sol-eau qui ont permis de mieux comprendre les mécanismes de contamination des milieux aquatiques.
- le renforcement de la surveillance des denrées alimentaires. Les LMR de chlordécone dans les aliments ont été abaissées en 2008, et des plans de contrôle ont été élaborés pour contrôler les aliments mis sur le marché. Les plans de contrôle des produits de la mer ont permis de mettre en évidence une contamination importante de certaines espèces dans des secteurs particulièrement contaminés. Cette découverte a été à l'origine d'une interdiction de pêche dans ces zones en Martinique en 2009-2010. De plus, des élevages aquacoles en eau douce ont été fermés suite à des contrôles de qualité de l'eau de distribution. Concernant les végétaux, il a été décidé que la culture de végétaux sensibles décrits précédemment, ne se ferait désormais que sur des sols non contaminés, ou ayant un niveau de contamination compatible avec leur culture.
- la mise en action un programme destiné à réduire l'exposition à la chlordécone des personnes consommant des produits de leur jardin et vivant en zone contaminée : il s'agit du programme Jardin Familiaux, intitulé JAFA. Ce programme a démarré en Martinique en 2008, et en Guadeloupe en 2009. Dans ce premier plan d'action, il a permis d'identifier les foyers à risque, et de leur proposer un accompagnement afin de limiter leur exposition au pesticide.
- le développement des capacités d'analyse et de dosage de la chlordécone des laboratoires d'analyse de Martinique et de Guadeloupe.
- le renforcement du registre du cancer de Martinique, et la création d'un registre en Guadeloupe.

Le premier plan d'action a permis de réelles avancées. Cependant, le rapport d'évaluation de ce plan a mis en lumière deux éléments qui ont limité ces avancées : d'une part l'absence de véritable stratégie sur le long terme, et d'autre part un pilotage inefficace.

c. Le Plan d'action Chlordécone II : 2011-2013 (99)

1. Présentation du plan

Ce plan s'inscrit dans la continuité du premier. Des forums ont été organisés en Guadeloupe et en Martinique en 2010 afin de réaliser un bilan du premier plan d'action et d'élaborer ce deuxième plan. Le financement était de 31 millions d'euros. Il est constitué de 36 actions regroupées en 4 axes :

- axe 1 : approfondir la connaissance de l'état de l'environnement et développer des techniques de remédiation de la pollution (actions 1 à 13).
- axe 2 : surveiller l'état de santé des populations et améliorer la connaissance des effets sur la santé (actions 14 à 21).
- axe 3 : poursuivre la réduction de l'exposition des populations, assurer la qualité de la production alimentaire locale, et soutenir les agriculteurs, pêcheurs et aquaculteurs (actions 22 à 30).
- axe 4 : gérer les milieux contaminés et assurer une bonne information de la population (actions 31 à 36).

Un volet marin a été intégré dans les axes 1 et 3. Il s'inscrit dans le cadre de la loi n°2010-874 du 27 Juillet 2010, concernant la modernisation de l'agriculture et de la pêche. L'objectif de ce volet marin était de mettre en place un plan de lutte contre la pollution marine par la chlordécone.

d. Le Plan d'action Chlordécone III : 2014-2020 (100,101)

1. Présentation du plan

Les deux premiers Plans d'action ont permis de mieux comprendre la situation des territoires de la Martinique et de la Guadeloupe face. Cependant, ils s'inscrivaient essentiellement dans une logique de gestion de court terme. Le troisième Plan d'action

chlordécone, élaboré en 2014, visait donc à passer à une logique de long terme dans la gestion de la problématique de la chlordécone.

Ce Plan était composé de 21 actions organisées autour de 4 axes :

- axe 1 : élaborer localement une stratégie de développement durable dans l'objectif d'améliorer la qualité de vie des populations dans un contexte de pollution (actions 1 à 6).
- axe 2 : favoriser une approche de prévention du risque sanitaire et de protection des populations dans une stratégie de réduction de l'exposition (actions 7 à 14).
- axe 3 : poursuivre les actions de recherche (actions 15 à 18).
- axe 4 : enjeux socio-économiques (actions 19 à 21).

2. Bilan du troisième plan

L'évaluation du troisième plan d'action publié en février 2020 dresse un bilan assez mitigé. Parmi les avancées de ce plan on peut citer :

- la mise en place entre 2014 et 2015 du centre de toxicovigilance antillais.
- la réalisation des études KANNARI 1 et 2 vues précédemment qui ont permis d'apporter des informations sur l'exposition alimentaire de la population à la chlordécone et de son imprégnation.
- la réalisation d'une étude par Santé publique France sur l'exposition des travailleurs agricoles à la chlordécone. Celle-ci a permis de mettre en évidence que 77% des travailleurs agricoles en activité en 1989 avaient été exposés au pesticide. Cette étude a aussi mis en lumière l'exposition de ces professions à d'autres pesticides potentiellement cancérigènes, encore utilisés dans la culture de la banane.
- la mise en place d'une cohorte de travailleurs agricoles potentiellement exposés au pesticide.
- l'organisation d'un colloque scientifique en octobre 2018, qui a permis de présenter au grand public l'ensemble des résultats obtenus.
- la mise en place d'un site internet géré par l'ANSES (102) et dédié à la chlordécone qui a permis d'augmenter le partage d'informations et d'améliorer la transparence

par la publication régulière de bilans.

Malgré ces avancées, le pilotage de ce troisième plan est toujours estimé peu efficace. En effet, les ministères de l'agriculture, du développement durable et de la recherche n'étaient pas impliqués dans le pilotage. Il a donc été ainsi constaté un avancement inégal des différentes actions.

e. Le plan d'action Chlordécone IV : 2021-2027

1. Présentation du plan (103,104)

Le quatrième plan d'action chlordécone a été élaboré entre 2019 et 2020 par des groupes de travail composés des services de l'État, des collectivités, des représentants de la société civile, et des organisations professionnelles. De plus, des consultations publiques ont été organisées en Guadeloupe et en Martinique en Novembre et Décembre 2020, et un site internet a été mis en place permettant aux populations antillaises de s'exprimer sur le sujet de la chlordécone et d'apporter des propositions d'amélioration pour l'élaboration du quatrième plan d'action. Ce dernier plan a été présenté le 5 février 2021, avec un budget prévisionnel beaucoup plus conséquent que les précédents : 92 millions d'euros. Le pilotage qui était une critique majeur des trois premiers plans, a aussi été revu. Le plan est piloté au niveau national par le comité de pilotage national, composé d'un représentant du Ministère de la Santé et de la Prévention et du Ministère chargé des Outre-mer, et au niveau local par les comités de pilotage locaux composés des préfets de Martinique et de Guadeloupe et des présidents des collectivités territoriales.

Une directrice de projet a été nommée. Celle-ci est chargée de la coordination interministérielle et travaille en collaboration étroite avec les préfets de Martinique et de Guadeloupe et les présidents des collectivités territoriales. Ses rôles sont :

- d'assurer la bonne mise en œuvre des stratégies.
- d'assurer la cohérence des mesures du plan.
- d'organiser le nouveau comité de pilotage stratégique national.
- de suivre la mise en œuvre des mesures du plan et leur exécution budgétaire.

Le quatrième plan d'action chlordécone est composé de 47 mesures organisées autour de 6 stratégies :

- trois stratégies transversales :
 - la stratégie « communication » ayant pour objectif d'informer et de sensibiliser le grand public, mais aussi les travailleurs et les professionnels de santé afin de mieux protéger la population (mesures C1 à C4).
 - la stratégie « recherche » ayant pour objectif de renforcer les connaissances sur la chlordécone (mesures R1 à R12).
 - la stratégie « formation et éducation » ayant pour objectif de former le grand public et les professionnels de santé (mesures FE1 à FE7).
- trois stratégies thématiques :
 - la stratégie « santé-environnement-alimentation » ayant pour objectif de protéger la santé, l'environnement, et de promouvoir une alimentation « zéro chlordécone » (mesures SEA1 à SEA16).
 - la stratégie « santé-travail » ayant pour objectif d'améliorer la prévention des risques professionnels, et d'accompagner les professionnels de santé (mesures ST1 à ST4).
 - la stratégie « socio-économique » ayant pour objectif d'accompagner les professionnels impactés par la pollution par la chlordécone (mesures SE1 à SE4).

Chacune de ces stratégies est pilotée par un comité spécifique (figure 15):

- le comité de pilotage pour la stratégie « communication ».
- le nouveau comité scientifique pour la stratégie « recherche ».
- le comité technique pour les stratégies thématiques et la stratégie « formation et éducation ».

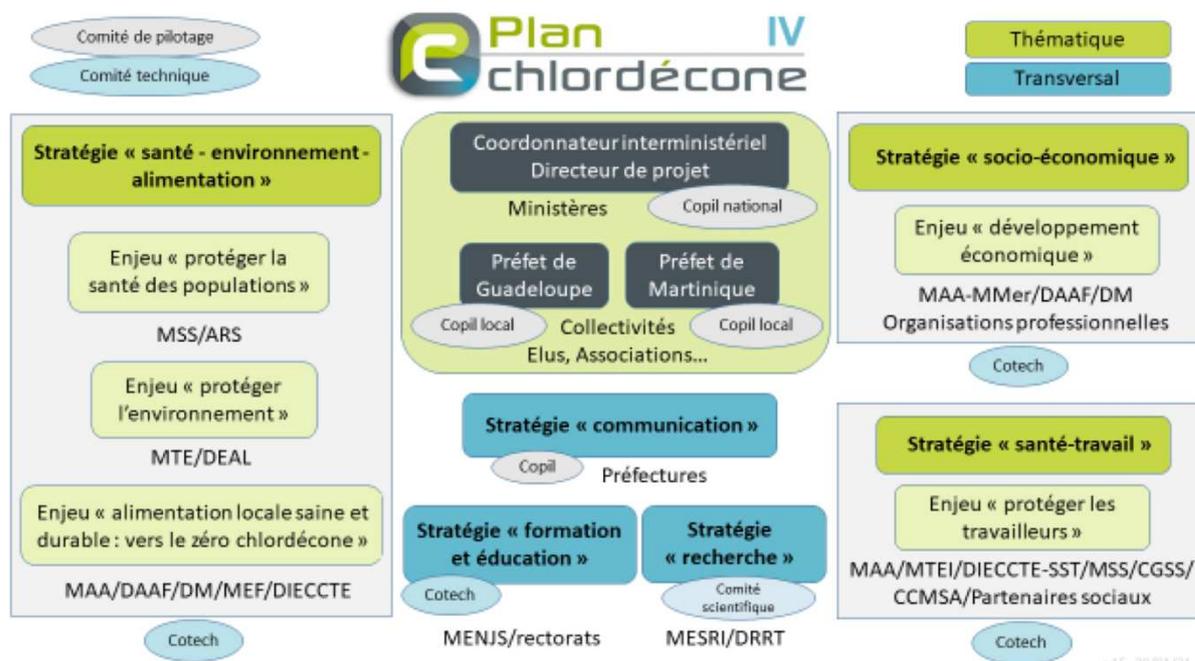


Figure 15: Présentation générale du plan chlordécone IV
 Source : https://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/plan_chlordecone_iv_fevrier_2021-2.pdf

De plus, lors des consultations publiques, la population a exprimé le besoin d'être mieux informée sur le déroulement du plan. Des bilans sont donc publiés régulièrement sur le site internet des préfectures dédié à la chlordécone.

2. État d'avancement (105)

Le premier bilan annuel du plan d'action chlordécone IV a été publié le 31 mars 2022. Le bilan dressé est positif : le nouveau pilotage a bien été mis en place et facilite la mise en place du plan d'action. De plus, la majorité des mesures ont déjà été initiées. Parmi celles-ci on peut citer :

- la reconnaissance en tant que maladie professionnelle du cancer de la prostate pour les agriculteurs exposés au pesticide.
- la mise en place de la gratuité des dosages de chlordéconémie. En Martinique et en Guadeloupe, 3800 dosages ont été réalisés en 2021. Un accompagnement est aussi proposé afin de limiter leur exposition.
- la mise en place d'une aide pour les professionnels du domaine de la pêche.
- la mise en œuvre de mesures ayant pour objectif de limiter la contamination par l'alimentation et de tendre vers l'objectif « zéro chlordécone » dans l'alimentation. On peut notamment citer la réalisation d'analyses gratuites de sols, des eaux et

des fourrages pour les agriculteurs, ainsi que les plans de contrôle et de surveillance des denrées et de l'eau destinés à la consommation humaine.

- la mise à jour de la cartographie des sols à partir des données d'analyses de sols réalisées pour les agriculteurs et les propriétaires de jardins familiaux.
- la réalisation d'actions pédagogiques auprès des élèves et des professeurs d'école, de collège et de lycée : en 2021 en Martinique, 450 personnes ont été formées lors de deux séminaires.

De plus, le premier appel à projets a été lancé le 10 Mars 2022, et 6 projets ont été retenus (106). Ces projets de recherche ont pour objectif de renforcer les connaissances sur les risques de la chlordécone et de proposer des solutions permettant de les réduire.

f. La culture de jardins familiaux : le programme Jafa

Comme nous l'avons évoqué précédemment, les circuits d'approvisionnement en nourriture informels représentent une source majeure et non contrôlée d'exposition à la chlordécone. Il est donc fondamental d'agir sur ces circuits afin de limiter l'exposition de la population. C'est dans ce but qu'a été créé le programme Jafa (Jardins familiaux). Ce programme a été lancé en 2008 en Martinique, et en 2009 en Guadeloupe, dans le but de réduire l'exposition à la chlordécone des populations vivant en zone contaminée, et consommant des produits issus de jardins ou d'élevages familiaux. Il est piloté en Martinique par l'ARS, l'Instance d'éducation et de promotion de la santé (IREPS) et la Fédération Régionale de Défense contre les Organismes Nuisibles (FREDON). Ses objectifs sont, d'une part d'identifier les foyers potentiellement surexposés à la chlordécone par la consommation d'aliments cultivés dans un jardin familial, et d'autre part d'informer et d'accompagner ces foyers afin qu'ils puissent réduire leur exposition (107). Une première phase d'enquête a été réalisée entre 2008 et 2010. Deux valeurs seuils ont été fixées pour la concentration de chlordécone dans les sols (108):

- 100 µg/kg de sol sec : au-dessus de cette concentration, il y a un risque que la LMR dans les légumes racines soit dépassée.
- 250 µg/kg de sol sec : au-dessus de cette concentration, la LMR dans les légumes racines est dépassée, et il y a un risque de surexposition.

Au cours de cette première phase, 1400 analyses de sol ont été réalisées : 205 foyers dont les sols présentaient une contamination supérieure à 100µg/kg ont été identifiés, dont 99 pour lesquels elle était supérieure à 250µg/kg (108). Pour ces foyers, des mesures spécifiques ont été mises en place. Un accompagnement personnalisé par des conseillers du programme a notamment été proposé. Pour les foyers dont l'analyse des sols a révélé une contamination supérieure à 250 µg/kg, il est recommandé de réduire leur consommation de légumes racine à 2 fois par semaine, de bien les laver et les éplucher.

Ce programme s'est poursuivi et est toujours en cours aujourd'hui. Un « pack Jafa » est proposé gratuitement à tous les martiniquais. Celui-ci permet aux foyers de bénéficier d'un diagnostic de sol, d'un dosage de chlordéconémie, et d'un accompagnement par des conseillers du programme avec des ateliers portant sur des thèmes variés tels que la nutrition, le jardinage et l'agronomie (109). Les diagnostics de sol, réalisés par la FREDON, permettent de compléter la cartographie de contamination des sols (34).

VI. Les perspectives de remédiation

À travers les différents plans d'action, de nombreuses mesures ont été mises en œuvre. Celles-ci ont permis de mieux comprendre la pollution par la chlordécone aux Antilles françaises, de renforcer les connaissances sur ce pesticide et ses effets sur la santé, et de réduire l'exposition des population. Cependant, la molécule est toujours présente dans les sols antillais, et le sera encore probablement pendant plusieurs décennies. L'utilisation de techniques de dépollution efficaces et sûres pourrait donc être une solution intéressante pour réduire l'exposition des population et donc ses effets néfastes sur la santé.

a. La réduction chimique *in situ* (ISCR)

La réduction chimique *in situ* (*In situ* chemical reduction) est une technique de remédiation de sols développée à la fin des années 1990. Elle consiste à introduire dans un sol contaminé un agent chimique réducteur (donneur d'électrons), afin d'éliminer le contaminant (accepteur d'électrons), ou de le transformer en substances moins dangereuses (110). Cette technique s'est montrée efficace pour la remédiation de sols pollués par d'autres pesticides organochlorés, et en particulier ceux présentant un grand nombre d'atomes de chlore (111). Le principal agent réducteur utilisé pour l'ISCR est le Fer zéro valent (FZV).

Les premiers essais d'ISCR pour la remédiation des sols pollués par la chlordécone ont été réalisés en Martinique en 2013 (112). Une parcelle de terre polluée a été traitée avec du FZV selon différentes modalités, pendant 3 mois. Après le traitement, les concentrations de chlordécone ont été mesurées et comparées au taux initial : pour toutes les modalités, la concentration avait diminué. Les traitements par FZV de granulométrie « fine » (98%<50um) et « grossière » (30%<98%) ont été les plus efficaces, avec des diminutions de la teneur en chlordécone allant jusqu'à 69% et 74% respectivement. Ces premiers essais ont aussi permis de mettre en évidence des produits de transformation de la chlordécone obtenus suite à l'ISCR. Ces produits témoignent de réactions de déchloration. Le principal produit retrouvé était la 5a-hydrochlordécone, et celui-ci ne s'est pas accumulé dans le sol.

Une étude publiée en 2020 a confirmé l'efficacité du FZV (113). Dans celle-ci, 74% de la chlordécone initialement présente dans un nitisol pollué a été éliminé en 37 jours, suite à l'utilisation de 2,8% de FZV. Comme pour l'étude précédente, des produits de transformation

déchlorés ont été retrouvés dans le sol, mais ils ne se sont pas accumulés. Cette étude s'est aussi intéressée aux effets qualitatifs et quantitatifs de l'ISCR sur la culture. Il a été noté une diminution du rendement pour les radis et la patate douce, et une diminution de la taille et de la qualité visuelle des radis. De plus, les quantités de chlordécone dans des radis cultivés sur les sols traités par ISCR ont été mesurées et comparées à celles des radis cultivés sur des parcelles témoins contaminées non traités. Les résultats ont montré que les radis issus de sols traités présentaient une concentration significativement plus basse que les radis témoins, et qui était largement inférieure aux LMR (la LMR était dépassée pour les radis témoins).

Cette technique semblerait donc être une solution efficace pour éliminer la chlordécone présente dans les sols pollués. Cependant, il est essentiel de s'assurer de l'innocuité des produits de transformation obtenus par la technique d'ISCR. Les effets *in vitro* de deux des produits de transformation (la 5a-hydrochlordécone et la tri-hydrochlordécone) ont été étudiés en 2017 (114). Cette étude a montré une absence d'effets mutagènes et génotoxiques, et des effets pro-angiogéniques significativement inférieurs à ceux observés pour la chlordécone. Une étude publiée en 2020 a comparé les effets pro-angiogéniques cette fois *in vivo* de trois dérivés déchlorés obtenus par ISCR à ceux de la chlordécone (115). Des doses identiques de chlordécone et des trois métabolites ont été administrés à des modèles murins de tumeur de la prostate humaine. Il a été mis en évidence sur modèle murin, que pour les mêmes doses ingérées, les concentrations sériques des dérivés chlorés était significativement inférieure à celle de la chlordécone. Ceci signifierait que les produits de transformation obtenus par ISCR sont absorbés ou métabolisés plus rapidement, ou les deux. De plus, les effets pro-angiogéniques étaient inférieurs pour les trois métabolites que pour la chlordécone.

Ainsi, l'ISCR permet d'obtenir des molécules déchlorées qui s'accumulent moins dans les sols, et qui présenteraient moins d'effets pro-angiogéniques et donc moins d'effets cancérigènes que la chlordécone. Cependant, cette technique nécessiterait des moyens colossaux : il est estimé que le traitement par FZV coûterait 160 000€ par hectare pollué, soit 3,2 milliards d'euros pour 20 000 hectares (116). Il semble donc peu probable que l'ISCR puisse être mise en œuvre sur l'ensemble des sols pollués antillais.

b. Le charbon actif et le biochar

Le biochar est une substance obtenue par pyrolyse de matière organique d'origine végétale. Le biochar peut ensuite être activé par exposition à différents produits chimiques pour donner du charbon actif. Ces deux substances sont utilisées pour leurs propriétés adsorbantes. Le charbon actif est déjà utilisé afin de séquestrer la chlordécone dans l'eau afin de la rendre potable. Mais, avec le biochar, il pourrait aussi être utilisé dans les sols pollués pour réduire la biodisponibilité du pesticide dans l'organisme. Une étude publiée en 2022 s'est intéressée à cette perspective (117). Du sol pollué par la chlordécone a été traité par du charbon actif et du biochar selon différentes modalités, et administré quotidiennement pendant 10 jours à des groupes de porcelets. Les concentrations de chlordécone ont ensuite été mesurées dans le foie et le tissu adipeux des animaux. Les concentrations étaient significativement inférieures chez les animaux exposés aux sols traités par charbon actif. Ceci signifie que l'adsorption de la chlordécone à la surface du charbon actif entraîne une diminution de la biodisponibilité du pesticide, probablement expliquée par une absorption diminuée du pesticide sous forme séquestrée. Une diminution statistiquement non significative des taux de chlordécone a été observée chez les animaux exposés aux sols traités par biochar.

L'utilisation de ces substances sur les sols pollués par le pesticide pourrait donc contribuer à diminuer l'exposition des populations antillaises. Une source intéressante de biomasse pouvant être utilisée pour obtenir du charbon actif et du biochar est étudiée : les algues brunes *Sargassum spp.* Ces dernières sont des algues flottantes qui proviennent habituellement de la Mer des Sargasses, dans l'océan Atlantique, au large des États-Unis (118). Cependant, depuis 2011, une nouvelle zone de circulation de ces algues se développe beaucoup plus au sud, au large du Brésil. Ceci entraîne depuis des échouages massifs de sargasses sur les côtes atlantiques de la Martinique et de la Guadeloupe : chaque année, des dizaines de milliers de tonnes s'y échouent (figure 16). Les algues sargasses représentent un fléau pour les Antilles. En effet, une fois échouées elles se décomposent et dégagent des gaz nocifs pour la santé telles que le sulfure d'hydrogène (119).



Figure 16: Une plage en Martinique envahie par les algues sargasses.
Source : <https://www.wlaps.com/plages-sargasses-en-martinique/>

L'utilisation des sargasses pour produire du charbon actif et du biochar est une perspective très intéressante car elle permettrait de mettre en valeur les tonnes d'algues qui s'échouent chaque année sur les côtes antillaises. Une étude publiée en 2022 a montré l'efficacité de biochar et de charbon actif obtenu à partir de sargasses pour séquestrer la chlordécone présente dans les sols (120).

c. La Biosorption

Il s'agit d'une technique d'adsorption qui consiste à utiliser du matériel biologique, afin d'éliminer une substance contenue dans un milieu aqueux. Une étude publiée en Février 2023 s'est intéressée à l'efficacité de cette technique pour éliminer divers polluants, dont la chlordécone, présents dans milieux aquatiques (121). Dans cette étude, différentes matières organiques ont été ajoutées à des solutions aqueuses contenant de la chlordécone. Les biosorbants utilisés étaient : des poudres de racines mortes de trois plantes (*Eichhornia crassipes*, *Pistia stratiotes* et *Fallopia japonica*) et du marc de café et de thé vert. Les résultats étaient très prometteurs : plus de 90% de la chlordécone présente dans l'eau a été adsorbée par les différents biosorbants. La poudre de racine de *Pistia stratiotes* a été l'adsorbant le plus efficace, et a entraîné une décontamination totale. Ces résultats sont très intéressants car *E. crassipes* et *P. stratiotes* sont des espèces abondantes en Martinique et en Guadeloupe. La

biosorption pourrait donc être une technique efficace et abordable pour éliminer la chlordécone des milieux aquatiques.

d. La dégradation enzymatique

Cette technique repose sur l'utilisation d'enzymes capables de dégrader la chlordécone présente dans les sols. Cette perspective est étudiée dans le cadre du quatrième plan d'action chlordécone, par le projet MetHalo : Criblage métagénomique des déhalogénases, nouveaux outils pour la dépollution de la chlordécone (122). Ce projet s'intéressera à l'utilisation de déhalogénases pour la remédiation des sols et eaux pollués par le pesticide.

e. La dégradation microbiologique

Il a été supposé pendant de nombreuses années que la chlordécone n'était pas biodégradable. Cependant, des études récentes montrent que la chlordécone peut effectivement être dégradée par des microorganismes en conditions anaérobies. Les chercheurs du Genoscope étudient cette biodégradation de la chlordécone depuis une dizaine d'années, et ont identifié des bactéries capables de dégrader la chlordécone (123). Ces bactéries pourraient être utiles pour la dépollution des sols. Cette technique sera étudiée dans le cadre du quatrième plan d'action chlordécone, par le projet REMED-CHIOR : recherche d'un procédé de remédiation des sols contaminés par la chlordécone, étude en laboratoire et à l'échelle pilote, application *in situ* et approche socio-politique (122). Ce projet permettra d'identifier les bactéries les plus efficaces, et d'étudier les produits de dégradation obtenus.

VII. Les alternatives à la chlordécone

La chlordécone n'est plus utilisée aux Antilles françaises depuis 1993, cependant le charançon du bananier reste un fléau majeur pour la culture bananière. Ainsi pour préserver celle-ci, il a été nécessaire de trouver des alternatives à la chlordécone.

a. Les pièges à phéromones

Cette technique repose sur l'utilisation d'une phéromone, la sordidine (124). Il s'agit d'une phéromone d'agrégation qui attire les charançons adultes des deux sexes. Elle est placée dans un piège, dans lequel le charançon peut rentrer mais ne peut pas sortir (figure 17). Il s'agit d'une technique facile à mettre en œuvre et efficace pour lutter contre l'infestation de la bananeraie. Ces pièges peuvent aussi être utilisés pour évaluer et surveiller la population de parasites de la parcelle.



Figure 17: Un exemple de piège à phéromone utilisé dans une bananeraie. Source: Nicolas Fégeant, UGPBAN

b. La prévention

Les pièges à phéromones n'attirent que les adultes en mouvement, et n'agit donc pas contre ceux qui parasitent déjà les bulbes des bananiers. Ils ne peuvent donc pas être utilisés à eux seuls pour agir sur les infestations massives. Il est donc indispensable d'employer des techniques de prophylaxie et d'adapter les pratiques de culture afin de limiter la pression

parasitaire et de s'assurer que les bananiers puissent se développer dans un environnement sain. Il est notamment recommandé (124) :

- d'utiliser des pièges à phéromones avant la constitution d'une nouvelle parcelle.
- de n'utiliser que des plantes saines. Il existe par exemple des vitroplants, obtenus en laboratoire à partir de tissu de bananier sain.
- de pratiquer des rotations de culture, avec des périodes de mise en jachère, permettant d'assainir les parcelles potentiellement infestées.
- de maintenir un drainage suffisant, car le charançon se développe surtout en milieu humide.
- d'éliminer rapidement les résidus de bananier après la récolte car ils peuvent être des sources de nourriture et des refuges pour le parasite.

VIII. Le rôle du pharmacien

Le pharmacien d'officine est un professionnel de santé ayant un rôle fondamental dans la Santé publique. Du fait de sa proximité, sa simplicité d'accès et de la relation de confiance qu'il entretient avec ses patients, le pharmacien a une place très importante dans la prévention et l'éducation sanitaire. Ainsi, dans le cadre de la pollution par la Chlordécone, il peut se révéler essentiel pour informer et accompagner les populations antillaises.

Cette dernière partie représente donc l'aboutissement de ce travail. J'y résume, sous forme de questions de comptoir, les principales informations qui peuvent être transmises par un pharmacien à sa patientèle. Ces informations sont regroupées sur une plaquette informative que j'ai élaborée à destination des patients antillais et pouvant servir d'aide ou de support aux pharmaciens (Annexe).

a. Qu'est-ce que la chlordécone ?

La chlordécone est un pesticide organochloré synthétisé pour la première fois aux États-Unis en 1951, et utilisée dans les bananeraies de Martinique et de Guadeloupe de 1972 à 1993 pour lutter contre le charançon du bananier. Ce pesticide est un polluant organique persistant, ce qui signifie qu'il est dégradé très lentement et demeurera donc de nombreuses décennies dans les sols antillais. La pollution des sols est très importante : en Martinique il est estimé que 40% de la Surface Agricole Utile est contaminée (31).

b. Quelles sont les zones les plus contaminées ?

En Martinique, les sols les plus contaminés se situent dans les communes du Nord Atlantique et le Lamentin (30). Ces zones correspondent effectivement aux principales zones de culture de la banane et donc d'utilisation du pesticide. De plus, les cours d'eau de ces communes sont aussi contaminés. Concernant le littoral, les eaux de la baie de Fort-de-France, et de la côte Atlantique du François à Macouba sont contaminés (59), et sont sujettes à une interdiction totale ou partielle de la pêche (98).

c. Comment se contamine-t-on ?

La principale source de contamination est la consommation d'aliments contaminés. Les aliments les plus contaminés sont les végétaux dits sensibles (52), cultivés dans des sols pollués par la chlordécone. Il s'agit essentiellement des racines et tubercules : l'igname, la patate douce, la dachine, la carotte, le radis, le gingembre... Ces aliments poussent dans le sol et sont donc en contact permanent avec le sol pollué. Ils peuvent donc présenter un niveau de contamination très important. Il y a aussi des végétaux à sensibilité intermédiaire, qui poussent à proximité du sol mais qui présentent un risque de contamination plus faible : il s'agit notamment du giraumon, du concombre, de la laitue, de la cive, de la canne à sucre... Enfin, les végétaux poussant à distance du sol sont peu sensibles, et présentent un risque de contamination très faible : la goyave, le citron, l'ananas, la papaye, la tomate, le poivron, le piment... mais aussi la banane.

Les végétaux provenant d'exploitations agricoles font l'objet de plans de contrôle et de surveillance (53), et présentent des taux de contamination très faibles. Cependant, ceci n'est pas le cas des végétaux provenant de circuits informels tels que l'achat au bord des routes, le don ou l'autoproduction. Ces circuits ne sont pas contrôlés et les végétaux peuvent être contaminés.

Les produits de pêche d'eau douce et les produits pêchés dans les eaux littorales contaminées peuvent aussi être des sources de contamination (60).

La chlordécone peut aussi être transférée de la femme enceinte au fœtus (72).

d. Quelles sont les conséquences sur la santé ?

La chlordécone est un perturbateur endocrinien, c'est-à-dire qu'elle interfère avec le fonctionnement normal du système hormonal (26). L'exposition chronique, c'est-à-dire une exposition constante et de longue durée, comme on peut observer chez les populations antillaises, peut avoir des effets néfastes sur la santé humaine. Différentes études se sont intéressées à ces effets, et certains liens ont pu être établis :

- l'exposition à la chlordécone chez la femme enceinte serait responsable d'une diminution de la durée de gestation (76).

- l'exposition à la chlordécone pendant la vie fœtale et la jeune enfance serait responsable d'anomalies de développement des jeunes enfants (77)(78)(79)(80)(81)(82).
- l'exposition à la chlordécone chez les hommes serait associée à une augmentation du risque de cancer de la prostate (88).

Les conséquences de la chlordécone sur la santé continuent d'être étudiées aujourd'hui.

e. Comment savoir si je suis contaminé ?

Le dosage du taux de chlordécone dans le sang, ou chlordéconémie, permet de connaître son niveau de contamination. Il traduit le niveau d'exposition au pesticide. Ce dosage est ouvert à tous les antillais, et peut être réalisé gratuitement et sans ordonnance dans tous les laboratoires de biologie médicale de Martinique.

Il est aussi possible de demander un diagnostic gratuit de son sol à travers le programme Jafa (109).

f. Comment réduire mon exposition ?

La demi-vie de la chlordécone dans le sang est d'environ six mois (23). Ainsi, si l'on diminue son exposition au pesticide, on diminue son niveau de contamination. Pour diminuer son exposition, il est conseillé de (126) :

- faire attention aux circuits informels : dons, achat aux bords des routes... Ces circuits ne sont pas contrôlés et peuvent donc être contaminés par la chlordécone. Il est donc préconisé de limiter sa consommation de produits provenant de ces circuits à :
 - 4 fois par semaine pour les poissons et crustacés
 - 2 fois par semaine pour les légumes racines
- ne pas consommer de poissons ou de crustacés pêchés en eau douce et ne provenant pas d'élevages contrôlés
- laver ses légumes racines, les éplucher sur environ 0,5 cm d'épaisseur, et les

relaver

- ne pas pêcher dans les zones soumises à une interdiction
- ne jamais boire l'eau de sources de bords de route
- demander un diagnostic gratuit du sol de son jardin familial, et adapter ses cultures et habitudes alimentaires s'il est contaminé. Comme rappelé précédemment, tous les végétaux n'ont pas le même niveau de sensibilité, et un grand nombre de cultures peuvent être réalisées sur un sol contaminé, sans risque de contamination. Il est donc important d'orienter les patients cultivant un jardin familial vers le programme Jafa afin qu'ils puissent obtenir un diagnostic de leur sol et disposer d'un accompagnement si nécessaire.

g. Rumeurs et fausses idées

De nombreuses rumeurs et fausses idées concernant la chlordécone circulent. Il est donc important pour le pharmacien de corriger celles-ci afin que les patients aient une compréhension plus juste de cette problématique. Parmi ces rumeurs on peut citer :

- « La chlordécone est encore utilisée aujourd'hui ». La chlordécone n'est plus utilisée depuis son interdiction définitive en 1993. De plus, le dernier produit à base de chlordécone n'est plus produit depuis 1991 (125).
- « L'eau du robinet est contaminée par la chlordécone ». L'eau du robinet répond aux normes de potabilité établies en 1998 par la Commission Européenne (44). Le contrôle de la qualité des eaux de distribution, réalisé par les producteurs d'eau et l'ARS, montre que sur les 35 captages d'eau, 33 ne présentent aucune trace du pesticide, 1 présente un taux très inférieur à la CMA, et un seulement, le captage de la rivière Capot, présente un taux supérieur à la CMA (45). L'eau de ce dernier subit cependant un traitement au charbon actif, lui permettant de satisfaire aux normes de potabilité.
- « Il y a de la chlordécone dans les bananes ». Certes, la chlordécone a été utilisée massivement sur les bananeraies. Néanmoins, comme nous l'avons dit précédemment, certaines cultures, comme la banane, présentent un très faible risque de contamination. Ainsi, même si les sols des bananeraies présentent des niveaux de contamination élevés, il n'y a pas de risque de contamination des bananes.

- « Les sols resteront pollués pendant plus de 600 ans ». Ce chiffre provient d'une première estimation de la durée de pollution des sols antillais (35). Celui-ci supposait que la chlordécone ne se dégraderait pas dans les sols. Cependant, les mesures montrent que les taux de chlordécone ont diminué beaucoup plus rapidement que ce qui était attendu, laissant supposer que le pesticide subissait bel et bien une dégradation. Les derniers modèles laissent supposer que la durée de pollution des sols serait en réalité de l'ordre de quelques décennies, et que les taux de chlordécone pourraient être indétectables dès le milieu du XXI^{ème} siècle (36). Il reste cependant important de noter que peu d'informations sont connues à ce jour sur les produits de cette dégradation.

CONCLUSION

Trente ans après son interdiction définitive, la chlordécone représente toujours un fléau majeur pour les populations de Martinique et de Guadeloupe. L'étendue de la pollution, la persistance du pesticide dans les sols, et la contamination des aliments, font que les habitants de ces deux îles sont exposés quotidiennement à cette molécule, entraînant des effets néfastes sur leur santé.

Dans cette étude, nous avons dressé un état des lieux des connaissances actuelles relatives à cette problématique. L'étendue de la pollution des sols et des eaux est bien connue. De plus, nous savons qu'une partie importante de la population est contaminée, et les sources de cette contamination ont été identifiées. De nombreuses études ont permis de mettre en évidence les effets néfastes de l'exposition au pesticide sur la santé humaine, néanmoins, d'autres explorations restent nécessaires. Les plans d'actions mis en œuvre, bien que jugés insuffisants, ont tout de même été à l'origine d'avancées significatives.

Nous avons aussi évoqué les perspectives de remédiation des sols pollués. Plusieurs techniques sont étudiées, mais leur mise en pratique n'est pas encore à l'ordre du jour. Elles pourraient cependant se révéler très utiles sur le long terme pour réduire l'exposition des populations.

Enfin, nous nous sommes intéressés au rôle du pharmacien d'officine auprès de sa clientèle. La plaquette informative réalisée lui permettra d'aborder avec elle le sujet, d'apporter des éléments probants, des conseils, et de combattre certaines rumeurs.

Peu d'informations sont cependant disponibles sur les produits de dégradation de la chlordécone et leurs effets sur la santé. De plus, qu'en est-il des autres pesticides, toujours utilisés en Martinique et en Guadeloupe, et dans les pays produisant des aliments potentiellement contaminés vendus dans ces îles ? Il serait en effet intéressant d'étudier les potentiels effets cocktails et cumulatifs de ces produits sur la santé dans une population déjà exposée à la chlordécone.

Annexe



**La chlordécone:
quelques rumeurs et fausses idées**

*"La chlordécone est encore utilisée."
Non, la chlordécone n'est plus utilisée
depuis son interdiction définitive en 1993*

*"L'eau du robinet est contaminée."
Les eaux de distribution sont contrôlées et
les taux de chlordécone ne dépassent pas
les normes de potabilité*

*"Il y a de la chlordécone dans les bananes."
Non, les bananes ne sont pas
sensibles à la contamination par la chlordécone*

*"Les sols seront pollués pendant 600 ans."
Les derniers modèles estiment que
la chlordécone pourrait être indétectable dans
les sols antillais dès le milieu du XXIème siècle*

**NOS SOURCES
ET POUR
PLUS D'INFORMATIONS**

ARS Martinique:
www.martinique.ars.sante.fr

JAFa Martinique: www.jafamartinik.mq
0596 50 33 44

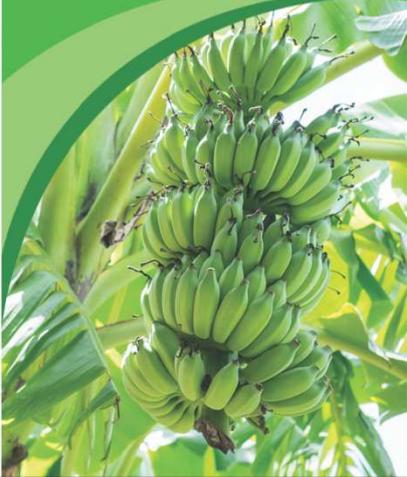
Chlordécone Infos:
www.chlordécone-infos.fr

Préfecture de la Martinique:
www.martinique.gouv.fr

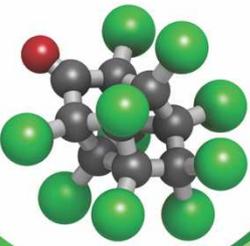
ANSES
Agence Nationale de Sécurité
Sanitaire de l'Alimentation,
de l'Environnement et du Travail
www.anses.fr

Cachet de la Pharmacie

**La Chlordécone:
Votre
Pharmacien
est à
Votre Écoute!**



Sources images : ACES Margaret Barse (gauche), Adobe stock (droite)



**La chlordécone,
qu'est-ce que c'est?**

La chlordécone est un pesticide organochloré utilisé de 1972 à 1993 pour lutter contre le charançon du bananier

La chlordécone est un perturbateur endocrinien classé cancérigène possible par l'OMS

L'exposition à ce pesticide augmente le risque de cancer de la prostate

L'exposition pendant la grossesse et pendant la jeune enfance peut perturber le développement de l'enfant

Comment se contamine-t-on?

La principale source de contamination est l'alimentation

La chlordécone peut être transmise pendant la grossesse au fœtus

Comment savoir si je suis contaminé(e)?

Le dosage de chlordécone dans le sang est gratuit pour tous les Martiniquais sans ordonnance, dans tous les laboratoires d'analyses médicales

Ce dosage permet de connaître son niveau d'exposition



Comment réduire mon exposition?

Le taux de chlordécone dans le sang est divisé par 2 après 6 mois sans exposition

Je limite à 4 fois par semaine ma consommation de poissons et de crustacés provenant de circuits informels (pêche de loisir, achat sur le bord des routes...)

Je limite à 2 fois par semaine ma consommation de légumes racines provenant de circuits informels

Je ne consomme jamais de produits de pêche d'eau douce ne provenant pas d'élevages contrôlés

Je ne bois pas l'eau des sources de bord des routes

Si je cultive un jardin familial, je réalise un dépistage de mon sol et j'adapte si nécessaire mes habitudes



Sources images : Alamy banque d'images (gauche), Anform.fr (milieu), Udo Schmidt (droite)

BIBLIOGRAPHIE

1. Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. La Martinique, terre d'agriculture. [Internet]. [cité 16 janv 2022]. Disponible sur: <https://agriculture.gouv.fr/la-martinique-terre-dagriculture>
2. Insee. Bilan économique 2019 – Martinique. [Internet]. [cité 17 janv 2022]. Disponible sur: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4475800?sommaire=4476002>
3. Service d'Information du Gouvernement. Martinique - Economie [Internet].. 2016 [cité 17 janv 2022]. Disponible sur: <https://www.outre-mer.gouv.fr/martinique-economie>
4. Ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire. La Martinique : l'essor du commerce agricole [Internet]. [cité 25 janv 2022]. Disponible sur: <https://agriculture.gouv.fr/la-martinique-lessor-du-commerce-agricole>
5. Insee. Agriculture - Une production affectée par des conditions climatiques défavorables – Bilan économique 2019 - Martinique | Insee [Internet]. [cité 25 janv 2022]. Disponible sur: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4507933?sommaire=4476002>
6. Ploetz RC. Fusarium Wilt of Banana. *Phytopathology*. déc 2015;105(12):1512-21. [Internet]. [cité 25 janv 2022]. Disponible sur: <https://apsjournals.apsnet.org/doi/10.1094/PHYTO-04-15-0101-RVW>
7. FAO. EST: Banana facts [Internet]. [cité 19 déc 2022]. Disponible sur: <https://www.fao.org/economic/est/est-commodities/oilcrops/bananas/bananafacts/en/#.Y6C75C8w35g>
8. Temple L, Marie P, Bakry F. Les déterminants de la compétitivité des filières bananes de Martinique et de Guadeloupe. *Économie Rurale Agric Aliment Territ*. 30 déc 2008;(308):36-54. [cité 19 déc 2022].
9. Gold CS, Tinzaara W. Banana Weevil, *Cosmopolites sordidus* (Germar) (Coleoptera: Curculionidae). In: Capinera JL, éditeur. *Encyclopedia of Entomology* [Internet]. Dordrecht: Springer Netherlands; 2008 [cité 24 janv 2022]. p. 369-78. Disponible sur: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6359-6_224
10. Huber JJ. Some physiological effects of the insecticide Kepone in the laboratory mouse. *Toxicol Appl Pharmacol*. juill 1965;7(4):516-24. [cité 24 janv 2022].
11. Good EE, Ware GW, Miller DF. Effects of insecticides on reproduction in the laboratory mouse. I. Kepone. *J Econ Entomol*. août 1965;58(4):754-7. [cité 24 janv 2022].
12. Impacts de l'utilisation de la chlordécone et des pesticides aux Antilles : bilan et perspectives d'évolution [Internet]. [cité 14 févr 2022]. Disponible sur: https://www.senat.fr/rap/r08-487/r08-487_mono.html
13. Philip J. Chenier. Survey of Industrial Chemistry. [Internet]. [cité 17 févr 2022]. Disponible sur: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4615-0603-4?noAccess=true>

14. C. Hansch, A. Leo, and D. Hoekman. Exploring QSAR: Hydrophobic, Electronic, and Steric Constants American Chemical Society, Washington, DC. 1995. Exploring QSAR: Fundamentals and Applications in Chemistry and Biology. C. Hansch and A. Leo. American Chemical Society, Washington, DC. Journal of Medicinal Chemistry [Internet]. [cité 13 avr 2022]. Disponible sur: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jm950902o>
15. Stehlik LL, Merriner JV. Effects of accumulated dietary Kepone on spot (Leiostomus xanthurus). *Aquat Toxicol.* 1 mai 1983;3(4):345-58. [cité 13 avr 2022].
16. Bonvallot N. et Dor F. Insecticides organochlorés aux Antilles: identification des dangers et valeurs toxicologiques de référence (VTR) - Etat des connaissances. *Jun 2004;52.* [cité 13 avr 2022].
17. Egle JL Jr; Fernandez, SB; Guzelian, PS; Borzelleca, JF. Assessment UENC for E. Distribution And Excretion Of Chlordecone (Kepone) In The Rat [Internet]. 2009 [cité 13 avr 2022]. Disponible sur: https://hero.epa.gov/hero/index.cfm/reference/details/reference_id/2918566
18. Skalsky HL, Fariss MW, Blanke RV, Guzelian PS. The Role of Plasma Proteins in the Transport and Distribution of Chlordecone (kepone®) and Other Polyhalogenated Hydrocarbons*. *Ann N Y Acad Sci.* 1979;320(1):231-7. [cité 13 avr 2022].
19. Multigner L, Kadhel P, Rouget F, Blanchet P, Cordier S. Chlordecone exposure and adverse effects in French West Indies populations. *Environ Sci Pollut Res.* janv 2016;23(1):3-8. [cité 13 avr 2022].
20. Molowa DT, Wrighton SA, Blanke RV, Guzelian PS. Characterization of a unique aldo-keto reductase responsible for the reduction of chlordecone in the liver of the gerbil and man. *J Toxicol Environ Health.* 1986;17(4):375-84. [cité 16 avr 2022].
21. Fariss MW, Blanke RV, Saady JJ, Guzelian PS. Demonstration of major metabolic pathways for chlordecone (kepone) in humans. *Drug Metab Dispos Biol Fate Chem.* déc 1980;8(6):434-8. [cité 16 avr 2022].
22. Cannon SB, Veazey JM, Jackson RS, Burse VW, Hayes C, Straub WE, et al. Epidemic kepone poisoning in chemical workers. *Am J Epidemiol.* juin 1978;107(6):529-37. [cité 5 mai 2022].
23. Cannon SB, Veazey JM, Jackson RS, Burse VW, Hayes C, Straub WE, et al. Epidemic kepone poisoning in chemical workers. *Am J Epidemiol.* juin 1978;107(6):529-37. [cité 5 mai 2022].
24. Cannon SB, Veazey JM, Jackson RS, Burse VW, Hayes C, Straub WE, et al. Epidemic kepone poisoning in chemical workers. *Am J Epidemiol.* juin 1978;107(6):529-37. [cité 5 mai 2022].
25. Taylor JR. Neurological manifestations in humans exposed to chlordecone and follow-up results. *Neurotoxicology.* 1 oct 1982;3(2):9-16. [cité 5 mai 2022].
26. Hammond B, Katzenellenbogen BS, Krauthammer N, McConnell J. Estrogenic activity of the insecticide chlordecone (Kepone) and interaction with uterine estrogen receptors. *Proc Natl Acad Sci U S A.* déc 1979;76(12):6641-5. [cité 5 mai 2022].

27. Nedellec V, Rabl A, Dab W. Public health and chronic low chlordecone exposure in Guadeloupe, Part 1: hazards, exposure-response functions, and exposures. *Environ Health*. 12 juill 2016;15(1):75. [cité 12 mai 2022].
28. Costa LG. The neurotoxicity of organochlorine and pyrethroid pesticides. *Handb Clin Neurol*. 2015;131:135-48. [cité 12 mai 2022].
29. Impacts de l'utilisation de la chlordécone et des pesticides aux Antilles : bilan et perspectives d'évolution [Internet]. [cité 13 sept 2022]. Disponible sur: <https://www.senat.fr/rap/r08-487/r08-48715.html>
30. JF. Desprats, C. Pierre-Léandre, T. Symphor. Suivi et mise à jour 2016 du SIG sur la contamination des sols de Martinique par la chlordécone - Rapport final [Internet]. 2016. [cité 13 sept 2022]. Disponible sur: <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-66297-FR.pdf>.
31. DAAF Martinique. Martinique : Cartographie de la contamination des sols par la chlordécone [Internet]. 2016 [cité 22 juin 2022]. Disponible sur: <https://daaf.martinique.agriculture.gouv.fr/cartographie-de-la-contamination-des-sols-par-la-chlordecone-a107.html>
32. IRD Martinique, PRAM. Carte pédologique simplifiée. [Internet]. [cité 13 sept 2022]. Disponible sur: <http://cbmartinique.org>
33. ODE Martinique, Comité de l'eau et de la biodiversité de Martinique, Agence française pour la biodiversité, Direction de l'environnement, de l'aménagement et du logement Martinique. Du district hydrographique de la Martinique - Révision de l'état des lieux 2019 [Internet]. [cité 13 sept 2022]. Disponible sur: <https://www.observatoire-eau-martinique.fr/documents/EDL-2019-Cahier-n--1-VF-20-11-2019--DISTRICT.pdf>
34. GéoMartinique. Synthèse des analyses de la chlordécone dans le sol de la Martinique [Internet]. [cité 28 janv 2023]. Disponible sur: https://carto.geomartinique.fr/1/layers/pref_chlordecone_analyse_sol_s_972.map
35. Cabidoche YM, Achard R, Cattan P, Clermont-Dauphin C, Massat F, Sansoulet J. Long-term pollution by chlordecone of tropical volcanic soils in the French West Indies: a simple leaching model accounts for current residue. *Environ Pollut Barking Essex* 1987. mai 2009;157(5):1697-705. [cité 25 juill 2022].
36. Comte I, Pradel A, Crabit A, Mottes C, Pak LT, Cattan P. Long-term pollution by chlordecone of tropical volcanic soils in the French West Indies: New insights and improvement of previous predictions. *Environ Pollut Barking Essex* 1987. 15 juin 2022;303:119091. [cité 25 juill 2022].
37. OECD. Guidance Document for Conducting Pesticide Terrestrial Field Dissipation Studies [Internet]. OECD; 2016 [cité 25 juill 2022]. (Series on Pesticides and Biocides). Disponible sur: https://www.oecd-ilibrary.org/environment/guidance-document-for-conducting-pesticide-terrestrial-field-dissipation-studies_82afb9d0-en
38. Julie Gresser, Corinne Figueras, Marion Labeille, Charlotte Vergès. Détermination de la contamination des milieux aquatiques par le chlordécone VOLET 4 : Investigations complémentaires -Renforcement du maillage géographique sur les cours d'eau d'intérêt piscicole [Internet]. 2012. [cité 10 août 2022]. Disponible sur: [74](https://www.observatoire-

</div>
<div data-bbox=)

eau-martinique.fr/images/7-ODE/Accompagner_les_politiques_de_leau/Etudes_socio-economiques/2012/pdf_E2546-PNA-Chlordecone-Volet4_vf1.pdf

39. Comité de bassin Martinique, Préfet de la Martinique. Schéma directeur d'aménagement et de Gestion des eaux et son programme de mesures associé. [Internet]. [cité 10 août 2022]. Disponible sur: <https://www.observatoire-eau-martinique.fr>
40. Office de l'eau Martinique. Révision de l'état des lieux 2019 du district hydrographique de la Martinique. Cahier 2 : Évaluation de l'état des masses d'eau. [Internet]. Novembre 2019. [cité 10 août 2022]. Disponible sur: <https://www.observatoire-eau-martinique.fr/documents/EDL-2019-Cahier-n--2-VF-20-11-2019-Etat-MASSES-D-EAU.pdf>
41. L. Arnaud, N. Baran, L. Gourcy. Étude du transfert de la chlordécone vers les eaux souterraines en Martinique brgm 2013.pdf [Internet]. Janvier 2013. [cité 10 août 2022]. Disponible sur: http://www.biodiversite-martinique.fr/sites/default/files/etude_du_transfert_de_la_chlordecone_vers_les_eaux_souterraines_en_martinique_brgm_2013.pdf
42. Observatoire de l'Eau Martinique. RAIMBAUD G. Les chiffres de l'eau potable en Martinique [Internet]. [cité 11 août 2022]. Disponible sur: <https://www.observatoire-eau-martinique.fr/services-d-eau-potable-et-d-assainissement/eau-potable>
43. Assemblée nationale. Rapport d'information sur l'utilisation du chlordécone et des autres pesticides dans l'agriculture martiniquaise et guadeloupéenne (M. Philippe-Edmond Mariette, Président, et M. Joël Beaugendre, Rapporteur) [Internet]. Juin 2005. [cité 12 sept 2022]. Disponible sur: https://www.assemblee-nationale.fr/12/rap-info/i2430.asp#P491_69623
44. Conseil de l'Union Européenne. Directive 98/83/EC du 3 Novembre 1998 relative à la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine. [Internet]. [cité 12 sept 2022]. Disponible sur: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:01998L0083-19981225&from=EN>
45. ARS Martinique. Eau potable : Les contrôles en toute transparence [Internet]. [cité 12 sept 2022]. Disponible sur: <https://www.martinique.ars.sante.fr/eau-potable-les-contrôles-en-toute-transparence>
46. Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire. Maîtrise des produits phytosanitaires - Limites maximales de résidus (LMR) [Internet]. Avril 2013. [cité 22 sept 2022]. Disponible sur: <https://agriculture.gouv.fr/maitrise-des-produits-phytosanitaires-limites-maximales-de-residus-lmr>
47. ANSES. Exposition des consommateurs des Antilles au chlordécone, résultats de l'étude Kannari [Internet]. Décembre 2017. [cité 2 oct 2022]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/system/files/ERCA2014SA0029Ra.pdf>
48. Commission européenne. RÈGLEMENT (UE) 2021/663 DE LA COMMISSION du 22 avril 2021. [Internet]. [cité 22 sept 2022]. Disponible sur: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:32021R0663&rid=4>
49. Clarisse Letondor. Étude des mécanismes histologiques et physiologiques du transfert de la chlordecone (insecticide organochlore) dans les végétaux. [Internet]. Février 2014.

- [cité 13 sept 2022]. Disponible sur: <https://oatao.univ-toulouse.fr/11987/1/Letondor.pdf>
50. Y. M. Cabidoche MLJ. Contamination of Harvested Organs in Root Crops Grown on Chlordecone-Polluted Soils. *Pedosphere*. 2012;22(4):562-71. [cité 13 sept 2022].
 51. Florence C, Philippe L, Magalie LJ. Organochlorine (chlordecone) uptake by root vegetables. *Chemosphere*. 1 janv 2015;118:96-102. [cité 13 sept 2022].
 52. Clostre F., Lesueur-Jannoyer M. (2012) - Transfert de la chlordécone du sol vers les produits cultivés. Document de synthèse Cirad : 19p. [Internet]. [cité 13 sept 2022]. Disponible sur: http://agents.cirad.fr/pjjimg/magalie.jannoyer@cirad.fr/1_4Synthese_transfert.pdf
 53. DAAF Martinique. Bilan des PSPC : vegetal [Internet]. [cité 25 sept 2022]. Disponible sur: https://daaf.martinique.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Bilan_des_PSPC_vegetal_cle01a6f1.pdf
 54. C. Collas M., Mahieu. Évaluation de l'exposition des ruminants au pâturage. [Internet]. Octobre 2018. [cité 25 sept 2022]. Disponible sur: <http://transfaire.antilles.inra.fr/IMG/pdf/mahieu.pdf>
 55. Jurjanz S, Collas C, Lastel ML, Godard X, Archimède H, Rychen G, et al. Evaluation of soil intake by growing Creole young bulls in common grazing systems in humid tropical conditions. *Animal*. 1 janv 2017;11(8):1363-71. [cité 25 sept 2022].
 56. Mahieu M. Élaborer des référentiels pour gérer le risque de transfert de chlordécone sols-légumes ou de bioaccumulation dans les animaux d'élevage - CHLORDEPAN. 2013;19. [cité 25 sept 2022].
 57. DAAF Martinique. Bilan des PSPC : animaux terrestres. [Internet]. [cité 25 sept 2022]. Disponible sur: https://daaf.martinique.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Bilan_des_PSPC_animaux_terrestres_cle82bddb.pdf
 58. Dromard Charlotte, Allenou Jean-Pierre, Bouchon-Navaro Yolande, Lemoine Soizig, Thouard Emmanuel, Reynal Lionel, Bertrand Jacques, Bouchon Claude. IFREMER. Consolidation des connaissances sur la contamination de la faune halieutique par le chlordécone autour de la Martinique et de la Guadeloupe (Projet "CHLOHAL"). [Internet]. Octobre 2015. [cité 27 sept 2022]. Disponible sur: <https://archimer.ifremer.fr/doc/00429/54058/>
 59. Ifremer. La contamination du milieu marin par le chlordécone [Internet]. [cité 30 sept 2022]. Disponible sur: <https://wwz.ifremer.fr/Recherche/Departements-scientifiques/Les-projets-Ifremer-dans-les-Antilles/La-contamination-du-milieu-marin-par-le-chlordecone>
 60. J.P. Allenou, C. Dromard, Y. Bouchon-Navaro, S. Lemoine. Consolidation des connaissances sur la contamination de la faune halieutique par la chlordécone autour de la Martinique et de la Guadeloupe (projet « CHLOHAL »)-Rapport final [Internet]. 2015. [cité 30 sept 2022]. Disponible sur: <https://archimer.ifremer.fr/doc/00429/54058/55370.pdf>
 61. Ministère de l'agriculture et de l'alimentation. Surveillance sanitaire des denrées animales et végétales en France : bilan 2018 des plans de surveillance et de contrôle. 2018. [cité

30 sept 2022].

62. DAAF Martinique. Bilan des PSPC : produits de la mer. [Internet]. [cité 30 sept 2022]. Disponible sur: https://daaf.martinique.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Bilan_des_PSPC_produits_de_la_mer_cle821211.pdf
63. Dubuisson C, Héraud F, Leblanc JC, Gallotti S, Flamand C, Bateau A, et al. Impact of subsistence production on the management options to reduce the food exposure of the Martinican population to Chlordécone. *Regul Toxicol Pharmacol*. 1 oct 2007;49(1):5-16. [cité 30 sept 2022].
64. Afssa. Avis de l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments concernant deux projets d'arrêtés relatifs à la teneur maximale en chlordécone que doivent présenter certaines denrées d'origine végétale et d'origine animale pour être reconnues propres à la consommation humaine. [Internet]. Septembre 2005. [cité 6 oct 2022]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/system/files/RCCP2005sa0279.pdf>
65. ANSES. Avis révisé de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif aux «valeurs sanitaires de références pour le chlordécone. [Internet]. Novembre 2021. [cité 6 oct 2022]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/system/files/ERCA2018SA0166Ra.pdf>
66. ANSES. Exposition des consommateurs des Antilles au chlordécone, résultats de l'étude Kannari. [Internet]. Décembre 2017. [cité 5 oct 2022]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/system/files/ERCA2014SA0029Ra.pdf>
67. Clémentine Dereumeaux, Jean-Luc Volatier, Laurence Guldner, Abdessattar Saoudi, Marie Pecheux, Gilles Rivière, et al. Chlordécone aux Antilles : de la caractérisation de la contamination alimentaire à l'imprégnation des individus. résultats de l'étude Kannari 2013-2014 [Internet]. BEH 18-19; 2019. Disponible sur: <https://www.santepubliquefrance.fr/regions/antilles/documents/article/2020/chlordec-one-aux-antilles-de-la-caracterisation-de-la-contamination-alimentaire-a-l-impregnation-des-individus.-resultats-de-l-etude-kannari-2013>. [cité 5 oct 2022].
68. Barrau M, Godard E, Ledrans M. Méthodes du socle commun aux quatre volets de l'étude Kannari sur la santé, la nutrition et l'exposition à la chlordécone aux Antilles, 2011-2018 [Internet]. Février 2020. [cité 4 oct 2022]. Disponible sur: <https://www.santepubliquefrance.fr/import/methodes-du-socle-commun-aux-quatre-volets-de-l-etude-kannari-sur-la-sante-la-nutrition-et-l-exposition-a-la-chlordecone-aux-antilles-2011-2018>
69. Clémentine Dereumeaux, Abdessattar Saoudi, M Pecheux, B Berat. Imprégnation de la population antillaise par la chlordécone et certains composés organochlorés en 2013/2014. *Étude Kannari. Santé Publique Fr*. 2018;6. [cité 4 oct 2022].
70. Clémentine Dereumeaux, Abdessattar Saoudi, Clémence Fillool. Imprégnation de la population antillaise par le chlordécone et certains composés organochlorés étude kannari [Internet]. *Santé publique France*; 2018. [cité 5 oct 2022]. Disponible sur: <https://www.chlordecone-infos.fr/sites/default/files/documents/impregnation-chlordecone-kannari.pdf>

71. ANSES, Santé Publique France. Martinique / Guadeloupe : Évaluation des expositions à la chlordécone et autres pesticides et surveillance du cancer de la prostate. Les résultats des études récentes de Santé publique France et de l'Anses. [Internet]. Octobre 2018. [cité 5 oct 2022]. Disponible sur: https://www.chlordecone-infos.fr/sites/default/files/documents/2018_Synthese_Chlordecone.PDF
72. ANSES. La chlordécone : valeurs sanitaires de référence. [Internet]. Février 2021. [cité 11 oct 2022]. Disponible sur: <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-37817-avis-anses-valeurs-sanitaires-reference-aliments-chlordecone.pdf>
73. ANSES. Avis de l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments relatif à la nécessité d'établir des recommandations particulières sur l'allaitement maternel au vu des bénéfices et des risques d'exposition au chlordécone pour les nourrissons martiniquais et guadeloupéens. [Internet]. Septembre 2008. [cité 11 oct 2022]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/system/files/RCCP2007sa0350.pdf>
74. JAJA Martinique. A propos du test de chlordéconémie [Internet]. [cité 7 oct 2022]. Disponible sur: <https://www.jafamatinik.mq/tests-de-chlordeconemie/>
75. ANSES. ChlorExpo, une étude affinée de l'exposition alimentaire au chlordécone de la population des Antilles [Internet]. 2021 [cité 5 oct 2022]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/content/chlorexpone-une-%C3%A9tude-affin%C3%A9e-de-l%2E%80%99exposition-alimentaire-au-chlord%C3%A9cone-de-la-population-des>
76. Sylvaine Cordier, Philippe Kadhel, Florence Rouget, Luc Multigner. Article - Bulletin épidémiologique hebdomadaire : Facteurs de risque de prématurité en Guadeloupe : résultats de la cohorte Timoun [Internet]. Juillet 2014. [cité 12 oct 2022]. Disponible sur: http://beh.santepubliquefrance.fr/beh/2014/34-35/2014_34-35_2.html
77. Boucher O, Simard MN, Muckle G, Rouget F, Kadhel P, Bataille H, et al. Exposure to an organochlorine pesticide (chlordecone) and development of 18-month-old infants. *NeuroToxicology*. 1 mars 2013;35:162-8. [cité 12 oct 2022].
78. Desrochers-Couture M, Cordier S, Rouget F, Michineau L, Monfort C, Thomé JP, et al. Visuospatial processing and fine motor function among 7-years old Guadeloupe children pre- and postnatally exposed to the organochlorine pesticide chlordecone. *Neurotoxicology*. janv 2022;88:208-15. [cité 12 oct 2022].
79. Cordier S, Bouquet E, Warembourg C, Massart C, Rouget F, Kadhel P, et al. Perinatal exposure to chlordecone, thyroid hormone status and neurodevelopment in infants: the Timoun cohort study in Guadeloupe (French West Indies). *Environ Res*. avr 2015;138:271-8. [cité 15 oct 2022].
80. Dallaire R, Muckle G, Rouget F, Kadhel P, Bataille H, Guldner L, et al. Cognitive, visual, and motor development of 7-month-old Guadeloupean infants exposed to chlordecone. *Environ Res*. oct 2012;118:79-85. [cité 15 oct 2022].
81. Saint-Amour D, Muckle G, Gagnon-Chauvin A, Rouget F, Monfort C, Michineau L, et al. Visual contrast sensitivity in school-age Guadeloupean children exposed to chlordecone. *NeuroToxicology*. 1 mai 2020;78:195-201. [cité 16 oct 2022].
82. Costet N, Pelé F, Comets E, Rouget F, Monfort C, Bodeau-Livinec F, et al. Perinatal exposure

- to chlordecone and infant growth. *Environ Res.* oct 2015;142:123-34. [cité 20 oct 2022].
83. Rouget F, Kadhel P, Monfort C, Viel JF, Thome JP, Cordier S, et al. Chlordecone exposure and risk of congenital anomalies: the Timoun Mother-Child Cohort Study in Guadeloupe (French West Indies). *Environ Sci Pollut Res Int.* nov 2020;27(33):40992-8. [cité 20 oct 2022].
 84. Gülen Ayhan. Chlordécone et grossesse / enfance. :31. [Internet]. [cité 14 oct 2022]. Disponible sur: https://www.reseauerinatguyane.fr/wp-content/uploads/2021/06/Chlordecone-et-grossesse_2021.pdf
 85. Clarisse Joachim-Contaret, Jacqueline Veronique-Baudin, Jonathan Macni, Stephen Ulric-Gervaise, Mélanie Cariou, Alice Billot-Grasset, et al. Estimations régionales et départementales d'incidence et de mortalité par cancers en France, 2007-2016 [Internet]. Santé publique France; 2019. [cité 14 oct 2022]. Disponible sur: <https://www.santepubliquefrance.fr/regions/antilles/documents/rapport-synthese/2019/estimations-regionales-et-departementales-d-incidence-et-de-mortalite-par-cancers-en-france-2007-2016-martinique>
 86. Multigner L. Le cancer de la prostate aux Antilles françaises : état des lieux. *Juillet* 2016;6. [cité 14 oct 2022].
 87. 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.* 20 juill 2010;28(21):3457-62. [cité 14 oct 2022].
 88. ANSES. Cancer de la prostate en lien avec les pesticides incluant le chlordécone [Internet]. Mars 2021. [cité 14 oct 2022]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/system/files/2018SA0267Ra.pdf>
 89. Branchu C, Oppelt ME. Evaluation du troisième plan chlordécone et propositions. :124. [cité 14 oct 2022].
 90. Multigner L, Kadhel P, Pascal M, Huc-Terki F, Kercret H, Massart C, et al. Parallel assessment of male reproductive function in workers and wild rats exposed to pesticides in banana plantations in Guadeloupe. *Environ Health.* 30 juill 2008;7:40. [cité 19 déc 2022].
 91. ANR. Appel à projets sur la pollution par la chlordécone aux Antilles : six projets de recherche lauréats. [Internet]. Décembre 2022. [cité 19 déc 2022]. Disponible sur: https://anr.fr/fileadmin/documents/2022/CP-Chlordecone_8-12-2022.pdf
 92. Mehendale HM. Potentiation of halomethane hepatotoxicity: chlordecone and carbon tetrachloride. *Fundam Appl Toxicol Off J Soc Toxicol.* juin 1984;4(3 Pt 1):295-308. [cité 19 déc 2022].
 93. ANR. Impact du chlordécone sur l'hépatite chronique active [Internet]. [cité 18 oct 2022]. Disponible sur: <https://anr.fr/Projet-ANR-11-CESA-0017>
 94. Les services de l'État en Martinique. Informations aux consommateurs : Établissement de valeurs toxicologiques de référence (VTR) pour la chlordécone aux Antilles. [Internet]. [cité 19 févr 2023]. Disponible sur: [79](https://www.martinique.gouv.fr/Actions-de-l-Etat/Environnement-sante-publique/Chlordecone/Informations-aux-professionnels/Je-

</div>
<div data-bbox=)

95. Préfecture de la région Martinique. Arrêté du préfet de la Martinique relatif aux analyses de sols : n° 030725 du 20 mars 2003.
96. Ministère de la Santé et de la Protection sociale. Plan national Santé Environnement 2004-2008. [Internet]. [cité 26 oct 2022]. Disponible sur: <https://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/pnse1-2.pdf>
97. Bilan par actions du plan d'action Chlordécone en Martinique et en Guadeloupe 2008-2010. [Internet]. 2010. [cité 26 oct 2022]. Disponible sur: https://www.chlordecone-infos.fr/sites/default/files/documents/Bilan_par_actions_du_plan_2008-2010.pdf
98. DGS, Coordination interministérielle chlordécone. Plan d'action chlordécone en Martinique et en Guadeloupe 2008-2010. [Internet]. [cité 26 oct 2022]. Disponible sur: <https://www.chlordecone-infos.fr/sites/default/files/documents/chlordecone-plan-DGS-11juin2008.pdf>
99. DGS, Coordination interministérielle chlordécone. Plan d'action contre la pollution par la chlordécone en Guadeloupe et en Martinique 2011-2013. [Internet]. [cité 30 nov 2022]. Disponible sur: https://www.chlordecone-infos.fr/sites/default/files/documents/plan_action_chordecone_2011.pdf
100. Branchu C, Oppelt ME. Évaluation du troisième plan chlordécone et propositions. [Internet]. [cité 19 déc 2022]. Disponible sur: <https://www.igas.gouv.fr/spip.php?article789>
101. Plan d'action contre la pollution par la chlordécone en Guadeloupe et en Martinique 2014-2020. [Internet]. Mars 2015. [cité 19 déc 2022]. Disponible sur: https://www.chlordecone-infos.fr/sites/default/files/documents/plan_chlordecone_iii.pdf
102. Chlordécone : les connaissances scientifiques [Internet]. [cité 6 janv 2023]. Disponible sur: <https://www.chlordecone-infos.fr/>
103. IVe plan stratégique de lutte contre la pollution par la chlordécone 2021-2027 : Synthèse. [Internet]. [cité 8 janv 2023]. Disponible sur: https://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/synthese_plan_chlordecone_iv_fevrier_2021.pdf
104. Plan stratégique de lutte contre la pollution par la chlordécone 2021-2027. [Internet]. Février 2021. [cité 6 janv 2023]. Disponible sur: https://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/plan_chlordecone_iv_fevrier_2021-2.pdf
105. Plan stratégique de lutte contre la pollution par la chlordécone 2021-2027 : bilan annuel [Internet]. Mars 2022. [cité 7 janv 2023]. Disponible sur: https://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/plan_strategique_de_lutte_contre_la_pollution_par_la_chlordecone_2021-2027_bilan_annuel.pdf
106. ANR. 1er appel à projets conjoint Chlordécone Edition 2022. [Internet]. Novembre 2022. [cité 11 janv 2023]. Disponible sur: <https://anr.fr/fileadmin/aap/2022/selection/chlordecone-selection-2022.pdf>

107. Vincent J, Camy D, Thalmensi G, Julien M, Ledrans M, Quénel P, et al. Le programme de santé des jardins familiaux en Martinique. *Env Risque Sante*. 2011;10. [cité 11 janv 2023].
108. ARS Martinique. Le programme des jardins familiaux : Jafa. [Internet]. [cité 25 janv 2023]. Disponible sur: <https://www.martinique.ars.sante.fr/system/files/2017-08/14-jafa-Vweb3.pdf>
109. Bourdy G. Découvrir le Pack Jafa [Internet]. Jafa. [cité 26 janv 2023]. Disponible sur: <https://www.jafamatinik.mq/decouvrir-le-pack-jafa/>
110. SelecDEPOL. Réduction chimique in situ. [Internet]. [cité 15 janv 2023]. Disponible sur: <https://selecdepol.fr/fiche-technique/reduction-chimique-in-situ>
111. Brown RA. Chemical Oxidation and Reduction for chlorinated Solvent Remediation. In: Stroo HF, Ward CH, éditeurs. *In Situ Remediation of Chlorinated Solvent Plumes* [Internet]. New York, NY: Springer; 2010 [cité 15 janv 2023]. p. 481-535. (SERDP/ESTCP Environmental Remediation Technology). Disponible sur: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1401-9_15
112. Mouvet C, Collet B, Gaude JM, Rangon L, Bristeau S, Lesueur-Jannoyer M., Jestin A.. Décontamination par In situ Chemical reduction d'un nitisol et d'un sol alluvionnaire pollués par la chlordécone. Résultats physico-chimiques et agronomiques. [Internet]. Janvier 2016. [cité 19 janv 2023]. Disponible sur: <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-65462-FR.pdf>
113. Mouvet C, Collet B, Gaude JM, Rangon L, Bristeau S, Senergues M, et al. 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 Int*. nov 2020;27(33):41063-92. [cité 19 janv 2023].
114. Legeay S, Billat PA, Clere N, Nesslany F, Bristeau S, Faure S, et al. Two dechlorinated chlordecone derivatives formed by in situ chemical reduction are devoid of genotoxicity and mutagenicity and have lower proangiogenic properties compared to the parent compound. *Environ Sci Pollut Res Int*. mai 2018;25(15):14313-23. [cité 19 janv 2023].
115. Alabed Alibrahim E, Legeay S, Billat PA, Bichon E, Guiffard I, Antignac JP, et al. In vivo comparison of the proangiogenic properties of chlordecone and three of its dechlorinated derivatives formed by in situ chemical reduction. *Environ Sci Pollut Res Int*. nov 2020;27(33):40953-62. [cité 19 janv 2023].
116. Audition publique sur le chlordécone [Internet]. videos.senat.fr. [cité 19 janv 2023]. Disponible sur: https://videos.senat.fr/video.2825335_620e396873fda.audition-publique-sur-le-chlordecone
117. Delannoy M, Yehya S, Techer D, Razafitianamaharavo A, Richard A, Caria G, et al. Amendment of soil by biochars and activated carbons to reduce chlordecone bioavailability in piglets. *Chemosphere*. nov 2018;210:486-94. [cité 22 janv 2023].
118. Pourquoi des algues sargasses s'échouent aux Antilles ? [Internet]. [notre-environnement.gouv.fr](https://www.notre-environnement.gouv.fr). [cité 22 janv 2023]. Disponible sur: <https://www.notre-environnement.gouv.fr/actualites/breves/article/pourquoi-des-algues-sargasses-s-echouent-aux-antilles>

119. ANSES. Expositions aux émanations d'algues sargasses en décomposition aux Antilles et en Guyane. [Internet]. Mars 2017. [cité 23 janv 2023]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2015SA0225Ra.pdf>
120. Ranguin R, Delannoy M, Yacou C, Jean-Marius C, Feidt C, Rychen G, et al. Biochar and activated carbons preparation from invasive algae *Sargassum* spp. for Chlordecone availability reduction in contaminated soils. *J Environ Chem Eng*. août 2021;9(4):105280. [cité 23 janv 2023].
121. Deyris PA, Pelissier F, Grison CM, Hesemann P, Petit E, Grison C. Efficient removal of persistent and emerging organic pollutants by biosorption using abundant biomass wastes. *Chemosphere*. 1 févr 2023;313:137307. [cité 23 janv 2023].
122. ANR. Appel à projets sur la pollution par la chlordécone aux Antilles : six projets de recherche lauréats [Internet]. Agence nationale de la recherche. [cité 25 janv 2023]. Disponible sur: <https://anr.fr/fr/actualites-de-lanr/details/news/appel-a-projets-sur-la-pollution-par-la-chlordecone-aux-antilles-six-projets-de-recherche-laureats/>
123. Chaussonnerie S, Saaidi PL, Ugarte E, Barbance A, Fossey A, Barbe V, et al. Microbial Degradation of a Recalcitrant Pesticide: Chlordecone. *Front Microbiol* [Internet]. 2016 [cité 26 janv 2023];7. Disponible sur: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2016.02025>
124. Piégeage à phéromones [Internet]. Improving the understanding of banana. [cité 20 févr 2023]. Disponible sur: <http://www.promusa.org>
125. Impact de l'utilisation de la chlordécone et des pesticides aux Antilles : bilan et perspectives d'évolution. [Internet]. [cité 20 févr 2023]. Disponible sur: <https://www.senat.fr/rap/r08-487/r08-4873.html>
126. ANSES. Chlordécone aux Antilles : les risques liés à l'exposition alimentaire. [Internet]. [cité 20 févr 2023]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/content/chlordecone-aux-antilles-les-risques-liés-à-l'exposition-alimentaire>

Résumé et mots clés

La chlordécone est un pesticide synthétisé pour la première fois en 1951, et utilisé sur les bananeraies de Martinique et de Guadeloupe entre 1972 et 1993, afin de lutter contre un parasite, le charançon du bananier. Sur cette période, des centaines de tonnes de ce pesticide ont été répandues sur les deux îles, entraînant une pollution massive et durable des sols.

En Martinique, les zones les plus contaminées sont celles du Nord Atlantique et du Lamentin. La chlordécone est aussi responsable d'une contamination non négligeable des littoraux de la côte Atlantique et de la baie de Fort-de-France.

Les populations antillaises sont donc largement exposées au pesticide. La principale voie de contamination est la consommation d'aliments contaminés, en particulier les légumes racines et les poissons provenant de circuits informels et non contrôlés.

La chlordécone est un perturbateur endocrinien, classé cancérigène possible par l'OMS. Plusieurs études réalisées en Guadeloupe et en Martinique ont permis de mettre en évidence les effets néfastes de ce pesticide sur la santé des populations antillaises. La chlordécone serait ainsi responsable entre autres d'un risque accru de développer un cancer de la prostate, d'une diminution de la durée de gestation, et de perturbations du développement de l'enfant.

Depuis 2008, trois plans d'action chlordécone se sont succédés, et un quatrième est toujours en cours. Bien que ces plans aient incontestablement permis des avancées, celles-ci ont néanmoins été limitées par l'absence de pilotage efficace.

L'utilisation de techniques de remédiation des sols telles que la réduction chimique *in situ*, l'utilisation de biochar, ou la biosorption pourraient se révéler utiles afin de réduire la contamination de sols et donc réduire l'exposition des populations antillaises.

La chlordécone constitue une problématique majeure de Santé Publique aux Antilles. Dans ce contexte, le pharmacien d'officine dispose d'un rôle fondamental, notamment en ce qui concerne l'information de sa patientèle.

Mots clés : Chlordécone - Pesticide organochloré - Perturbateur endocrinien - Martinique - Antilles - Santé Publique

Abstract and key words

Chlordecone is a pesticide that was synthesized for the first time in 1951. It was used between 1972 and 1993 on banana plantations in Martinique and Guadeloupe to fight against the banana weevil parasite. During this period, hundreds of tons of the pesticide were used on both islands, leading to massive and long-lasting soil pollution.

Chlordecone contamination is particularly severe in Martinique's North-East regions and in Lamentin. Additionally, chlordecone is responsible for the contamination of the marine environment and of marine life on the Atlantic coast and in the bay of Fort-de-France.

The Antillean population is therefore widely exposed to this pesticide. The main source of contamination is the consumption of contaminated food, especially root vegetables and seafood acquired from informal and unregulated sources.

Chlordecone is an endocrine disruptor, classified as a possible carcinogen by the WHO. Several studies conducted in Guadeloupe and Martinique have shown the harmful effects of this pesticide on the health of the Antillean populations. Chlordecone is thus responsible, among other things, for an increased risk of developing prostate cancer, a reduction in gestation duration, and disturbances in child development

Since 2008, three Chlordecone action plans have been implemented, and a fourth is currently underway. Even though these plans have undoubtedly led to progress, they have nevertheless been limited by the absence of effective management.

The use of soil remediation techniques such as in-situ chemical reduction, the use of biochar, or biosorption could prove useful in reducing soil contamination and therefore reducing the exposure to the Antillean populations.

Chlordecone is a major Public Health issue in the French West Indies. In this context, community pharmacists play a crucial role, particularly in terms of providing information to their patients.

Key words: Chlordecone – Organochlorine pesticide – Endocrine disruptor – Martinique – Public Health

Serment de Galien

En présence des Maitres de la Faculté, je fais le serment :

D'honorer ceux qui m'ont instruit dans les préceptes de mon art et de leur témoigner ma reconnaissance en restant fidèle aux principes qui m'ont été enseignés et d'actualiser mes connaissances,

D'exercer, dans l'intérêt de la santé publique, ma profession avec conscience et de respecter non seulement la législation en vigueur, mais aussi les règles de Déontologie, de l'honneur, de la probité et du désintéressement,

De ne jamais oublier ma responsabilité et mes devoirs envers la personne humaine et sa dignité,

De ne dévoiler à personne les secrets qui m'auraient été confiés ou dont j'aurais eu connaissance dans l'exercice de ma profession,

De faire preuve de loyauté et de solidarité envers mes collègues pharmaciens,

De coopérer avec les autres professionnels de santé.

En aucun cas, je ne consentirai à utiliser mes connaissances et mon état pour corrompre les mœurs et favoriser des actes criminels.

Que les Hommes m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses. Que je sois couvert d'opprobre et méprisé de mes confrères si j'y manque.

Signature de l'étudiant

du Président du jury

Nom :

Nom :

Prénom :

Prénom :

Résumé et mots clés

La chlordécone est un pesticide synthétisé pour la première fois en 1951, et utilisé sur les bananeraies de Martinique et de Guadeloupe entre 1972 et 1993, afin de lutter contre un parasite, le charançon du bananier. Sur cette période, des centaines de tonnes de ce pesticide ont été répandues sur les deux îles, entraînant une pollution massive et durable des sols.

En Martinique, les zones les plus contaminées sont celles du Nord Atlantique et du Lamentin. La chlordécone est aussi responsable d'une contamination non négligeable des littoraux de la côte Atlantique et de la baie de Fort-de-France.

Les populations antillaises sont donc largement exposées au pesticide. La principale voie de contamination est la consommation d'aliments contaminés, en particulier les légumes racines et les poissons provenant de circuits informels et non contrôlés.

La chlordécone est un perturbateur endocrinien, classé cancérogène possible par l'OMS. Plusieurs études réalisées en Guadeloupe et en Martinique ont permis de mettre en évidence les effets néfastes de ce pesticide sur la santé des populations antillaises. La chlordécone serait ainsi responsable entre autres d'un risque accru de développer un cancer de la prostate, d'une diminution de la durée de gestation, et de perturbations du développement de l'enfant.

Depuis 2008, trois plans d'action chlordécone se sont succédés, et un quatrième est toujours en cours. Bien que ces plans aient incontestablement permis des avancées, celles-ci ont néanmoins été limitées par l'absence de pilotage efficace.

L'utilisation de techniques de remédiation des sols telles que la réduction chimique *in situ*, l'utilisation de biochar, ou la biosorption pourraient se révéler utiles afin de réduire la contamination de sols et donc réduire l'exposition des populations antillaises.

La chlordécone constitue une problématique majeure de Santé Publique aux Antilles. Dans ce contexte, le pharmacien d'officine dispose d'un rôle fondamental, notamment en ce qui concerne l'information de sa patientèle.

Mots clés : Chlordécone - Pesticide organochloré - Perturbateur endocrinien - Martinique - Antilles - Santé Publique