

# CHLORDÉCONE AUX ANTILLES

Une approche *One Health*  
en construction

Pierre Benoit, Malcom Ferdinand,  
Jeanne Garric, Magalie Jannoyer, coord.





# Chlordécone aux Antilles

Une approche *One Health* en construction

Pierre Benoit, Malcom Ferdinand,  
Jeanne Garric, Magalie Jannoyer, coord.

Éditions Quæ

**Pour citer cet ouvrage :**

Benoit P., Ferdinand M., Garric J., Jannoyer M., coord., 2026. *Chlordécone aux Antilles. Une approche One Health en construction*, Versailles, éditions Quæ, 268 p.  
<https://doi.org/10.35690/978-2-7592-4147-7>

Les éditions Quæ réalisent une évaluation scientifique des manuscrits avant publication dont la procédure est décrite ici : <https://www.quae.com/store/page/199/processus-d-evaluation>

Le processus éditorial s'appuie également sur un logiciel de détection des similitudes et des textes potentiellement générés par intelligence artificielle.

Les versions numériques de cet ouvrage sont diffusées sous licence CC-by-NC-ND 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

La diffusion en accès ouvert de cet ouvrage a été soutenue par le Plan national d'action Chlordécone.

Éditions Quæ  
RD 10, 78026 Versailles cedex  
[www.quae.com](http://www.quae.com) – [www.quae-open.com](http://www.quae-open.com)

© Éditions Quæ, 2026

ISBN papier : 978-2-7592-4146-0  
ISBN epub : 978-2-7592-4148-4

ISBN PDF : 978-2-7592-4147-7

# Sommaire

---

<b>Introduction</b> .....	7
<b>Chapitre 1. Contamination des milieux par le chlordécone : origines, constats et premières mesures de gestion</b> .....	11
<i>Magalie Jannoyer, Luc Multigner</i>	
Les origines.....	11
Le temps des constats .....	13
Premières mesures de gestion.....	14
Retour d'expérience .....	16
Une contamination singulière.....	19
Références bibliographiques.....	19
<b>Chapitre 2. Défis analytiques pour quantifier et suivre la contamination ainsi que pour évaluer des solutions de remédiation</b> .....	22
<i>Mailie Saint-Hilaire, Jean-Pierre Thomé, Laurence Amalric, Pierre-Loïc Saaidi</i>	
La chlordécone, un insecticide organochloré pas tout à fait comme les autres.....	22
Historique et état des lieux des méthodes de dosage de la chlordécone et de ses produits de transformation .....	28
Défis analytiques pour mieux caractériser la contamination, ses évolutions et évaluer l'efficacité des méthodes de remédiation.....	45
Références bibliographiques.....	52
<b>Chapitre 3. Quels dispositifs pour observer, comprendre et quantifier les trajectoires de la contamination des sols et des eaux sur des temps longs ?</b> .....	57
<i>Lai Ting Pak, Charlotte R. Dromard, Anne-Lise Tailamé, Olivier Grünberger, Marc Voltz, Jean-Baptiste Charlier, Patrick Lachassagne, Anatja Samouëlian</i>	
Les dispositifs réglementaires pour suivre les pollutions et leurs impacts .....	58
Les dispositifs de recherche pour comprendre, prévoir et maîtriser les contaminations.....	65
Vers une consolidation à long terme des dispositifs d'observation.....	72
Références bibliographiques.....	73
<b>Chapitre 4. Perceptions, expériences et savoirs de la pollution au chlordécone et des risques sanitaires associés : apport des sciences sociales</b> .....	75
<i>Sara Angeli Aguiton, Iris Cervenka, Jérôme Foucaud, Rubis Le Coq</i>	
Rétrospective historique du chlordécone .....	75
Perceptions et vécus citoyens de la pollution.....	77
Santé environnementale : pathologies en milieu contaminé.....	80
Références bibliographiques.....	85

<b>Chapitre 5. L'évaluation des risques de contamination des écosystèmes et des êtres humains : processus, impacts et méthodologies</b> .....	88
<i>Marc Voltz, Dominique Monti, Mathieu Coulis, Magalie Jannoyer, Agnès Fournier, Guido Rychen, Xavier Coumoul</i>	
Évaluation des risques de contamination des écosystèmes et d'impacts écotoxicologiques .....	89
Évaluation des risques de contamination de la chaîne alimentaire humaine .....	101
Démarches d'évaluation des risques sanitaires liés à une exposition à la chlordécone .....	107
Toxicité et dangers potentiels de la chlordécone .....	108
Évaluation des impacts sanitaires de la contamination et événements de santé en fonction de l'exposition .....	108
Évaluation du risque de persistance de la contamination chez l'humain .....	109
Enjeux futurs en lien avec l'évaluation des risques liés à la contamination par la chlordécone .....	110
Références bibliographiques .....	110
<b>Chapitre 6. Comment prendre en compte la vulnérabilité des écosystèmes?</b> .....	114
<i>Dominique Monti, Charlotte R. Dromard</i>	
Sévérité du paysage aquatique contaminé .....	114
Raisons de la grande vulnérabilité des eaux douces antillaises .....	116
Milieu marin .....	118
Localisation de la chlordécone dans les organismes aquatiques .....	121
Impacts sur les communautés aquatiques .....	122
Une bio-indication difficile .....	123
Références bibliographiques .....	124
<b>Chapitre 7. Comment prendre en compte la vulnérabilité des populations antillaises?</b> .....	126
<i>Jacqueline Deloumeaux, Bernard Bhakkan-Mambir, Jonathan Macni, Jacqueline Véronique-Baudin, Clarisse Joachim, Danièle Luce, Jean-François Desprats, Anne-Lise Tailamé, Jean-Baptiste Charlier, Vincent Bonnal, Philippe Cattan, Pascal Degenne, Victor Dufleit, Jérémy Lavarenne, Lucie Lecat, Annelise Tran</i>	
Profil épidémiologique et contexte socio-économique de la population antillaise .....	126
Approches pour mettre en relation la contamination des sols et des données sanitaires : application aux données d'incidence des cancers .....	128
Vers une approche intégrée de l'exposome antillais .....	139
Références bibliographiques .....	139
<b>Chapitre 8. Gestion de la pollution par le chlordécone aux Antilles françaises et risques associés : un problème épineux</b> .....	142
<i>Valérie Angeon, Jean-Luc Volatier, Josselin Thuilliez</i>	
La crise chlordécone : au-delà d'un problème complexe .....	143
La crise chlordécone : une construction sociale des problèmes et de leurs voies de résolution .....	147

L'évaluation, une solution concrète au problème épineux de la crise chlordécone ? .....	153
La crise chlordécone : un révélateur des nécessités de renouvellement de l'action publique.....	158
Références bibliographiques.....	159
<b>Chapitre 9. Quels outils et solutions pour réduire l'exposition via le sol, l'eau et les aliments ? .....</b>	<b>162</b>
<i>Audrey Bruneau, Matthieu Delannoy, Agnès Fournier, Sarra Gaspard, Magalie Jannoyer, Soazig Lemoine, Christophe Mouvet, Guido Rychen</i>	
Agir sur le réservoir de la chlordécone dans les sols.....	163
Agir pour réduire l'exposition des populations humaines et animales au moyen de la qualité sanitaire des aliments.....	172
Principales avancées en vue de la réduction de l'exposition.....	181
Références bibliographiques.....	183
<b>Chapitre 10. Approches communicationnelles des crises du chlordécone en Guadeloupe et en Martinique — Pouvoir, communication publique et médiations .....</b>	<b>188</b>
<i>Séverine Ely-Marius, Yannick Exilie, Marthe Berthide-Limier, Célia Perito-Cincinnatus, Guillaume Pompougnac, Axelle Beniey, Raoul Legba, Daniel Césarus, Aurélie Pourrez</i>	
Approches sociopolitiques et communicationnelles de la crise du chlordécone comme contexte d'interaction.....	190
Communication publique : discours culpabilisants et pratiques descendantes.....	193
Enjeux scientifiques en communication sur les processus de médiation et de participation.....	195
Communication publique et environnementale incluant une co-existence culturelle, demain ?	
Médiations multiples pour accompagner la population.....	201
Références bibliographiques.....	202
<b>Chapitre 11. Construction du problème public et réception des politiques publiques chlordécone aux Antilles (1968-2023) .....</b>	<b>205</b>
<i>Malcom Ferdinand, Justin Daniel</i>	
Constitution du problème public (1972-2022) : pollution, santé et justice.....	205
Luttes de cadrage et démonétisation de la parole officielle .....	210
Conclusion.....	217
Références bibliographiques.....	218
<b>Chapitre 12. Quelle évolution de la mise à disposition et de l'utilisation des données pour une approche plus intégrée de l'exposition au chlordécone ? ...</b>	<b>221</b>
<i>Pierre Benoit, Philippe Hunel, Jeanne Garric</i>	
État des lieux .....	221
Freins à l'utilisation des données.....	229
Quelle évolution de la mise à disposition et l'utilisation des données environnementales et de santé ? .....	233
Références bibliographiques.....	239

<b>Chapitre 13. Conclusion : quelles pistes prioritaires pour de nouvelles recherches ?</b> .....	241
<i>Justin Daniel, Aurore Fourcot, Michel Samson, Guido Rychen</i>	
Pistes de recherche liées à l'analyse de la chlordécone et de ses produits de transformation dans les matrices d'intérêt .....	241
Pistes de recherche visant à dégrader la chlordécone dans les sols contaminés et à réduire l'exposition humaine au travers des chaînes trophiques .....	243
Pistes de recherches en lien avec la santé des populations : poursuites des recherches en cours et nouvelles perspectives pour la compréhension des impacts sanitaires .....	248
Pistes de recherche en sciences humaines et sociales .....	252
<b>Glossaire</b> .....	257
<b>Liste des abréviations, sigles et acronymes</b> .....	260
<b>Liste des auteurs et leurs affiliations</b> .....	265
<b>Remerciements</b> .....	267

# Introduction

---

Le cas du chlordécone aux Antilles représente une situation inédite d'une contamination généralisée des compartiments environnementaux et de la chaîne alimentaire qui impacte sur un large territoire et de manière durable la santé des populations humaines et non humaines. Cet insecticide a été utilisé pendant plus de deux décennies (entre 1972 et 1993) sur les cultures de bananes et des surfaces de plusieurs milliers d'hectares aux Antilles françaises. En dépit de son interdiction en 1993, le chlordécone continue de nos jours à être présent dans les sols où il a été appliqué et sa persistance est estimée de plusieurs dizaines d'années à plusieurs siècles selon la nature des sols rencontrés en Martinique et en Guadeloupe. Comme d'autres organochlorés, cette molécule fait partie depuis 2009 des polluants organiques persistants (POP) bannis, recensés dans le cadre de la Convention de Stockholm en raison de sa grande stabilité chimique et de sa toxicité. En France, à l'issue de premiers travaux de recherche identifiant l'ampleur du problème, la situation a nécessité la mise en place de mesures de gestion et d'actions visant à réduire l'exposition des populations et les risques sanitaires associés. Ces actions ont été organisées et coordonnées par l'État à partir de la fin des années 2000 dans le cadre de plans nationaux d'action chlordécone (Pnac) successifs. Le dernier en date, le Pnac IV est en cours (2021-2027).

Partie intégrante de ce plan, le colloque international et interdisciplinaire «Chlordécone, connaître pour agir» a été organisé du 14 au 16 décembre 2022 au Gosier en Guadeloupe, sous l'égide du comité de pilotage scientifique national du plan chlordécone (CPSN) mis en place par le ministère de la Recherche. L'objectif principal du présent livre, ouvrage collectif, est de partager l'état des connaissances récentes, en s'appuyant sur des résultats de recherche publiés ou présentés à ce colloque par la communauté de chercheurs<sup>1</sup> présents. Une seconde ambition est de proposer une réflexion sur l'évolution souhaitable, tant en matière de recherche que de gestion des risques, qu'il s'agisse d'interdisciplinarité scientifique ou d'approche systémique pour la gestion des risques d'exposition. Dans cette perspective, certains chapitres dépassent le cas du chlordécone, pour se référer à des pollutions chroniques durables passées ou actuelles — par exemple, les polychlorobiphényles (PCB), les substances perfluoroalkylées et polyfluoroalkylées (Pfas), ou encore la pollution minière — afin d'illustrer en quoi et d'analyser pourquoi la pollution par la chlordécone est différente ou similaire à ces pollutions dans ses impacts et dans sa gestion sur des temps longs. Enfin, cet ouvrage propose une analyse historique de la reconnaissance de la pollution aux Antilles, de sa caractérisation, de ses impacts environnementaux et sanitaires, ainsi que de sa gestion par les politiques publiques ayant abouti à des engagements de l'État et à des attentes de la société. Il paraît dans la collection « Synthèse » des éditions Quæ consacrée à des ouvrages scientifiques et techniques de référence, destinés à l'enseignement supérieur, aux scientifiques et aux ingénieurs.

---

1. Dans tout l'ouvrage, pour ne pas alourdir le texte et sans aucune intention discriminatoire, les termes employés pour désigner des personnes sont au masculin, ayant à la fois valeur d'un masculin et d'un féminin.

Cet ouvrage fait appel à diverses disciplines pour présenter les nouvelles avancées des connaissances, des analyses et des résultats des recherches. Cette pluridisciplinarité fait sa richesse, mais elle implique une complexité et des nuances dans l'usage des termes employés au fil de l'ouvrage. En lien avec la pluralité de points de vue disciplinaires, les acceptions de certains termes peuvent donc différer selon les chapitres. Dans ce cas, les définitions des termes et des concepts sont alors chaque fois précisées. En outre, dans cet ouvrage, en règle générale, le terme « chlordécone » présente un genre masculin lorsqu'il se réfère au pesticide, et féminin lorsqu'il se réfère à la molécule. Cette différence de genre est communément observée dans la littérature publiée en français depuis les premiers travaux menés sur le sujet.

Au-delà des connaissances, l'ouvrage propose aussi une analyse réflexive sur les leçons apprises, les outils, les méthodes ainsi que les approches, qui pourront être utiles dans d'autres contextes. Cette dimension méthodologique est transversale aux différents chapitres afin d'éclairer le lecteur sur la manière d'acquérir les données, de les transformer en connaissances et de les diffuser, sur la façon de gérer cette contamination à l'échelle d'un territoire sur le long terme, ainsi que sur les enseignements des différents Pnac et les recommandations pour les recherches futures. Elle permet dans le même temps de tracer des lignes directrices pour l'action publique et d'identifier les enjeux futurs.

Notre ambition initiale était de promouvoir les approches « une seule santé » (*One Health*) indispensables pour résoudre les enjeux de santé à long terme — santé des milieux et santé humaine, impliquant à la fois les sciences environnementales et médicales ainsi que les sciences humaines et sociales. Certains chapitres précisent lorsque des recherches de ce type ont déjà été menées et publiées, mais dans la plupart des champs d'action et de recherche, les approches de type *One Health* restent à construire. Elles sont donc évoquées en tant que perspectives dans de nombreux chapitres.

L'ouvrage traite successivement quatre grandes catégories de questions qui se sont posées à la recherche, comme à l'action, depuis le début de cette crise, dans les domaines de l'environnement, de l'alimentation et de la santé, ainsi que dans sa gestion par les décideurs publics, à l'échelle nationale comme territoriale :

- les questions posées en matière de mesures et de caractérisation des processus de pollution face à une contamination durable et généralisée ;
- les questions posées en matière d'impacts et d'évaluation des risques ;
- les questions posées en matière d'outils pour la gestion des risques et l'action sur le terrain ;
- les questions posées sur les enseignements de la crise du chlordécone pour l'action publique et les recherches à venir.

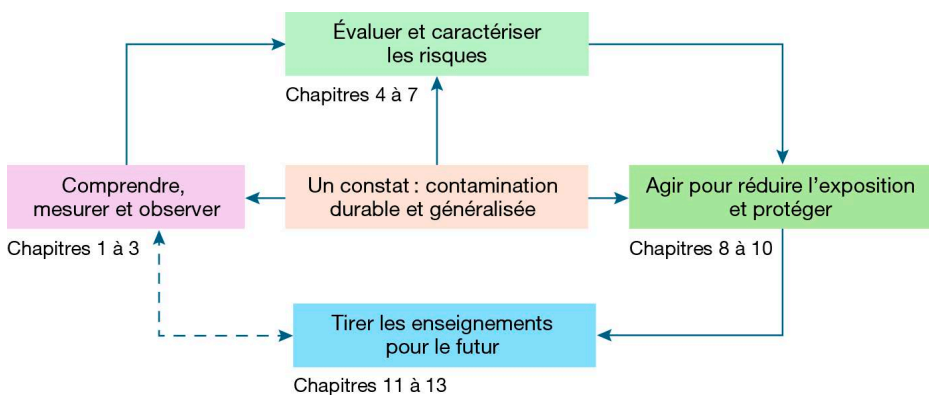
Ces parties s'enchaînent selon une logique et des liens entre chapitres illustrés dans la figure 0.1.

En matière de mesures et d'observations des processus de pollution face à une contamination durable et généralisée, le chapitre 1 « Contamination des milieux par le chlordécone : origines, constats et premières mesures de gestion » présente une analyse rétrospective des recherches menées pour mesurer et suivre la contamination de l'environnement et des populations. Le chapitre 2 « Défis analytiques pour quantifier et suivre la contamination ainsi que pour évaluer des solutions de remédiation » rappelle les propriétés et spécificités de la molécule ainsi que de ses produits de transforma-

tion et décrit les conséquences pour des méthodes d'analyse qu'il a fallu adapter et améliorer selon les milieux considérés (compartiments environnementaux, matrices biologiques<sup>2\*</sup>, dont fluides humains). Le chapitre 3 «Quels dispositifs pour observer, comprendre et quantifier les trajectoires de la contamination des sols et des eaux sur des temps longs?» décrit et analyse les moyens mis en œuvre en matière d'observations et de collectes de données pour suivre sur le terrain et à long terme le chlordécone ainsi que d'autres pesticides et contaminants dans les écosystèmes des deux îles.

Sur les impacts et la caractérisation des risques, le chapitre 4 «Perceptions, expériences et savoirs de la pollution au chlordécone et des risques sanitaires associés : apport des sciences sociales» explore les dimensions sociales et politiques, citoyennes comme institutionnelles, qui s'articulent autour de l'appréhension des risques sanitaires associés à l'exposition au chlordécone aux Antilles françaises. Le chapitre 5 «L'évaluation des risques de contamination des écosystèmes et des êtres humains : processus, impacts et méthodologies» rappelle les notions fondatrices de l'évaluation des risques environnementaux et sanitaires (exposition, danger et risque) pour faire le point sur les approches et les outils disponibles en discutant des limites rencontrées lors de leur utilisation aux Antilles. Le chapitre 6 «Comment prendre en compte la vulnérabilité des écosystèmes?» et le chapitre 7 «Comment prendre en compte la vulnérabilité des populations antillaises?» poursuivent sur ce thème sous l'angle de la vulnérabilité des populations humaines et non humaines, en approfondissant sur les spécificités des cas antillais.

Concernant les outils pour la gestion des risques et l'action sur le terrain, le chapitre 8 «Gestion de la pollution par le chlordécone aux Antilles françaises et risques associés : un problème épineux» s'intéresse aux enjeux de l'action pour la gestion de la pollution et des risques et pose la question des logiques de décision et d'action qui ont présidé au cours des dernières décennies. Le chapitre 9 «Quels outils et solutions pour réduire l'exposition via le sol, l'eau et les aliments?» présente une analyse critique de méthodes et de «solutions» existantes pour réduire l'exposition des écosystèmes et des populations par le biais des compartiments environnementaux



**Figure 0.1.** Organisation de l'ouvrage en quatre grandes thématiques et identification des chapitres correspondants.

2. Un glossaire est disponible en fin d'ouvrage. Les termes qui y sont définis sont signalés dans le texte, à la première occurrence, par un astérisque.

et de l'alimentation. Le chapitre 10 « Approches communicationnelles des crises du chlordécone en Guadeloupe et en Martinique — Pouvoir, communication publique et médiations » se penche sur les différentes approches communicationnelles déployées pour réduire les impacts sanitaires et écologiques de la pollution.

Enfin, sur les enseignements de la crise du chlordécone pour l'action publique à venir, le chapitre 11 « Construction du problème public et réception des politiques publiques sur le chlordécone aux Antilles (1968-2023) » propose une analyse historique de la constitution de la pollution environnementale par le chlordécone aux Antilles en problème public. Le chapitre 12 « Quelle évolution de la mise à disposition et de l'utilisation des données pour une approche plus intégrée de l'exposition au chlordécone ? » présente une cartographie des différents types de données et des nombreux acteurs qui collectent, centralisent et utilisent ces données sur la contamination comme sur les effets sur la santé des populations et des écosystèmes. Elle analyse également les freins actuels à la mise à disposition de ces données et à leur meilleure utilisation, notamment pour la caractérisation de l'exposome\* (c'est-à-dire de l'ensemble des expositions environnementales auxquelles un organisme est soumis tout au long de sa vie). Enfin pour conclure, le chapitre 13 « Conclusion : quelles pistes prioritaires pour de nouvelles recherches ? » revient sur les différentes perspectives de recherche exposées dans l'ouvrage et propose des pistes prioritaires dans quatre grands domaines : quantification analytique, dégradation et transfert dans l'environnement, effets sur la santé humaine et apport des sciences humaines et sociales.

## Chapitre 1

---

# Contamination des milieux par le chlordécone : origines, constats et premières mesures de gestion

*Magalie Jannoyer, Luc Multigner*

### » Les origines

En France, les décennies 1960 et 1970 se caractérisent par le début d'une prise de conscience des conséquences délétères des activités humaines sur l'environnement. En témoignage, par exemple, la création du premier ministère entièrement dédié à l'environnement en 1971. À cette époque, la problématique de la contamination des milieux naturels et de la faune sauvage entraînée par l'usage des insecticides dits « organochlorés » était devenue prégnante en conséquence de la constatation de leur rémanence ou persistance environnementale et de multiples observations faites dans les années 1950 aux quatre coins du globe montrant leur impact délétère sur la faune sauvage (Carson, 1962).

Les conditions climatiques qui caractérisent les régions tropicales (chaleur et humidité) telles que les Antilles françaises (composées de l'archipel de la Guadeloupe et de l'île de la Martinique) étaient connues pour favoriser le développement de pathogènes et bioagresseurs affectant les cultures, entraînant, qui plus est dans un contexte d'agriculture productiviste, un usage intensif de pesticides. C'est dans ce contexte qu'une première étude de l'Institut national de la recherche agronomique (Inra) fut initiée en 1975 en Guadeloupe pour caractériser et quantifier la contamination des bassins versants engendrée par l'usage d'insecticides organochlorés en culture bananière (Snegaroff, 1977). Les analyses montrèrent la présence dans les eaux de rivières, sédiments et sols de la région Basse-Terre de résidus de chlordécone dont l'autorisation provisoire de vente ne datait que de 1972. Les concentrations retrouvées dans les sols et les eaux de rivières atteignaient 9,5 mg/kg et 0,21 µg/l respectivement (Snegaroff, 1977).

À la fin des années 1970, l'Inra entreprit la réalisation d'une nouvelle étude associant l'Institut de recherche sur les fruits et agrumes, l'université des Antilles-Guyane et plusieurs services décentralisés de l'État et visant à décrire les contaminations agricoles et industrielles de la Guadeloupe (Kermarrec, 1980). Une partie fut consacrée à la description de la contamination de la faune sauvage par des pesticides organochlorés (HCH technique, dieldrine, DDT et ses métabolites DDD et DDE, mirex, chlordécone<sup>3</sup>)

---

3. HCH : hexachlorocyclohexane ; DDT : dichlorodiphényltrichloroéthane ; DDD : dichlorodiphényldichloroéthane ; DDE : dichlorodiphényldichloroéthylène.

et des PCB. Les espèces étudiées comprenaient des oiseaux (faucon « gli gli », rouge-gorge « gros-bec », sporophile « cici », héron « kio », ces dénominations correspondant aux noms vernaculaires utilisés dans les Antilles françaises), des mammifères terrestres (rat noir), ainsi que des poissons, coquillages et crustacés d'eaux douces (anguilles, gobies, écrevisses, palourdes, huîtres de palétuviers, etc.) capturés en Basse-Terre, au niveau du canal Perrin en Grande-Terre, ainsi que dans la rivière salée, détroit séparant la Basse-Terre de la Grande-Terre. Au constat d'une contamination généralisée de la faune sauvage par la plupart des pesticides et des PCB, de l'ordre du microgramme par kilogramme de poids frais, ce qui apparut remarquable furent les concentrations observées pour la chlordécone, de l'ordre du milligramme par kilogramme dans les tissus, dépassant parfois les 100 mg/kg dans le foie des rats noirs. Le rapport final de l'Inra fut transmis en 1980 au Secrétariat général du haut comité de l'environnement du ministère de l'Environnement et du Cadre de la Vie.

Ces premières observations auront été faites après un épandage du chlordécone de 3 kg de matière active par hectare et par traitement, sur un nombre réduit d'années (de 1972 à 1977), avec une fréquence de traitement variable selon les exploitations (Levillain *et al.*, 2012). Le ministère de l'Agriculture délivra en 1972 une autorisation provisoire de vente, pour une durée d'un an, du chlordécone sous la dénomination commerciale Kepone® (Fintz, 2010). En absence de réexamen de cette autorisation provisoire au terme prévu, son usage se poursuivra bien au-delà. Mais après l'arrêt définitif de production aux États-Unis dans la seule usine existante fabricant le chlordécone, son emploi aux Antilles s'arrêtera à l'épuisement des stocks importés, vraisemblablement vers 1977. En conséquence du passage des cyclones David (1979) et Allen (1980) en Guadeloupe et en Martinique, le chlordécone sera réintroduit aux Antilles en 1981 avec l'homologation de la formulation Curlone®, après rachat du brevet de fabrication par une compagnie française (Fintz, 2010).

Des années plus tard, en 1993, une étude conduite dans l'estuaire du Grand Carbet en Guadeloupe par la direction départementale de l'équipement montra, que parmi une dizaine de pesticides jusque-là employés en bananeraies, seul le chlordécone était systématiquement détecté et quantifié dans les sédiments (jusqu'à 120 µg/kg) et dans les eaux (jusqu'à 190 µg/l) de l'estuaire du Grand Carbet en Guadeloupe (Burgaud, 1993).

Toutes ces observations attireront l'attention de certains responsables locaux sur la nécessité d'une évaluation rigoureuse de la présence de pesticides aussi bien dans les eaux et l'environnement que dans les denrées alimentaires. Cependant, l'éloignement des laboratoires métropolitains prenant en charge les analyses de résidus de pesticides réduisait les opportunités d'un suivi régulier et d'un diagnostic étendu et précis de la contamination aux pesticides (Cooper, 1992). C'est ainsi que les services sanitaires locaux en charge du contrôle des eaux ne rapportaient que de fugitives et minimes contaminations par des pesticides. Et pour cause, les prélèvements étaient confiés à un laboratoire qui ne pouvait analyser qu'un nombre très réduit de molécules et qui se trouvait dans l'incapacité d'en identifier d'autres, très utilisées localement, dont la chlordécone. Cela entraîna la défiance des associations de protection de l'environnement qui dénoncèrent le peu de réalisme des résultats rendus publics et accusèrent les services de l'État de ne pas dire la vérité sur la contamination de l'eau. Cette controverse entre service de l'État et associations incita les ministères chargés de l'agriculture et de l'environnement à réaliser une mission d'inspection visant à évaluer les risques liés à l'utilisation de pesticides en

Guadeloupe et en Martinique (Balland *et al.*, 1998). Les conclusions de cette mission d'inspection furent particulièrement sévères, en décrivant une situation à risque du fait de l'importante utilisation de pesticides, d'une connaissance peu fiable et très lacunaire de la contamination des milieux, d'une absence de données sur la qualité des aliments produits localement, d'un impact méconnu sur la santé des populations, d'une application laxiste de la réglementation et d'une mauvaise connaissance des mécanismes de transfert des molécules dans les divers écosystèmes.

## ►► Le temps des constats

Le rapport très critique émis par la mission d'inspection allait changer radicalement la donne en poussant les préfetures de la Martinique et de la Guadeloupe à la réalisation d'un plan d'action. À l'initiative du chef du service santé-environnement, la direction départementale des Affaires Sanitaires et Sociales (Ddass) de la Martinique a pris les devants en identifiant un laboratoire disposant de capacités analytiques étendues incluant des molécules telles que la chlordécone. Elle lança alors courant 1999 une première campagne d'analyse des eaux provenant de différentes ressources. Les résultats montraient de nombreux dépassements des normes en vigueur pour les eaux destinées à la consommation humaine (0,1 µg/l) pour divers pesticides, dont le chlordécone. Ce dernier pouvait atteindre 3 µg/l dans certains captages (Basag, 2005), dépassant ainsi le seuil de potabilisation des eaux brutes. Des analyses entreprises en Guadeloupe au cours de la même année rapportèrent des observations similaires sur les sources et cours d'eau de la Basse-Terre avec pour la chlordécone des concentrations atteignant 10,3 µg/l (Blateau et Chaud, 2000). Selon la Cellule interrégionale d'épidémiologie Antilles-Guyane (Cire-AG), antenne régionale de l'Institut de veille sanitaire (INVS), de telles concentrations représentaient une contribution excessive (supérieure à 10%), voire même un dépassement, de la dose journalière tolérable<sup>4</sup> (DJT), également appelée valeur toxicologique de référence chronique (VTRc), établie par les autorités sanitaires des États-Unis (Blateau et Chaud, 2000).

Sur ces faits, les services décentralisés de l'État et de nombreuses institutions scientifiques et sanitaires présentes aux Antilles (notamment le Bureau de recherches géologiques et minières [BRGM], le Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement [Cirad], la Cire-AG, l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer), l'Institut national de la santé et de la recherche médicale [Inserm], l'Inra et l'université des Antilles et de la Guyane [UAG]) se mobilisèrent afin de disposer d'une vision globale de l'étendue de la contamination des écosystèmes, des ressources alimentaires et de la population par le chlordécone. Le dispositif mis en place confirma, dès le début des années 2000, autant en Guadeloupe qu'en Martinique, la présence de la molécule de chlordécone dans de nombreuses sources d'eaux destinées à la consommation humaine, dans les rivières ainsi que dans les sols historiquement consacrés à la culture bananière, pouvant atteindre pour ces derniers 13 mg/kg de sol

---

4. La dose journalière tolérable ou dose journalière admissible par voie orale correspond à la quantité maximum d'une substance pouvant être ingérée quotidiennement pendant toute une vie sans un risque appréciable pour la santé du consommateur. Elle est calculée sur la base de données toxicologiques ou épidémiologiques auxquelles des facteurs d'incertitude sont appliqués. L'Organisation mondiale de la santé (OMS) considère que pour un contaminant donné, la consommation d'eau ne devrait pas dépasser 10% de sa dose journalière tolérable.

sec en Martinique (Godard et Bellec, 2002) et jusqu'à 36 mg/kg de sol sec en Guadeloupe (Cabidoche et Lesueur Jannoyer, 2012). Dans la foulée, les premières campagnes destinées à caractériser la contamination de la chaîne alimentaire ont été entreprises. C'est ainsi que l'importante contamination des racines et tubercules (igname, patate douce, etc.) fut montrée et, dans une moindre mesure, celle des cucurbitacées par transfert passif du chlordécone à partir des sols pollués ainsi que celle d'espèces aquatiques d'eau douce et saumâtre (tilapias, par exemple), marines (anchois, pisquettes, chirurgiens, langoustes, etc.) et celle des productions d'aquaculture en eau de mer (Saint-Pierre, par exemple) et en eau douce (écrevisses, crevettes, etc.) à des concentrations allant des quelques microgrammes par kilogramme de matière fraîche jusqu'à plusieurs centaines de microgrammes par kilogramme de matière fraîche (Coat, 2002; Coat *et al.*, 2006; Monti, 2007). Ces premières estimations seront complétées par les enquêtes Reso (résidus organochlorés en Guadeloupe et en Martinique), coordonnées par la Cire-AG, au cours des années 2005 à 2007 (Blateau *et al.*, 2011) et conçues selon un plan d'échantillonnage représentatif des habitudes de consommation et d'approvisionnement de la population guadeloupéenne et martiniquaise. Elles confirmeront des fréquences de contamination plus élevées pour les produits d'eau douce, les produits de la mer (27% et 13% respectivement), les racines et tubercules et les cucurbitacées (18% à 11% respectivement), et constateront l'extension de la contamination au chlordécone à des produits carnés (bœuf, poulet, porc, mouton, etc.) avec une grande variabilité pour les valeurs mesurées.

Restait finalement à obtenir des données sur l'imprégnation de la population à la chlordécone. Des analyses de sang réalisées par l'Inserm entre 1999 et 2001 chez des hommes salariés (du secteur agricole et non agricole) résidant en Basse-Terre en Guadeloupe, puis en 2003 chez des femmes enceintes et leurs nouveau-nés accouchant au centre hospitalier universitaire de Pointe-à-Pitre Abymes et au centre hospitalier de Basse-Terre confirmèrent l'imprégnation par la chlordécone (Multigner *et al.*, 2006; Multigner et Kadhel, 2004, 2008). Chez les salariés, le taux de détection était de 88% avec une concentration médiane de 5,5 µg/l et un maximum de 104,5 µg/l. S'agissant des femmes enceintes, le taux de détection était de 87% (médiane : 2,2 µg/l; maximum : 16,6 µg/l). Chez les nouveau-nés (sang du cordon), le taux de détection était de 61% (médiane : 0,7 µg/l; maximum : 3,7 µg/l). Une analyse des déterminants de l'imprégnation maternelle à la chlordécone a montré, comme attendu, que la fréquence de consommation de légumes racines, mais aussi de produits carnés d'origine locale, était positivement corrélée à la concentration plasmatique en chlordécone.

Par la suite, au fil des années et jusqu'à ce jour, de nombreuses études renseigneront plus finement sur les niveaux de contamination des milieux et des ressources naturelles, des denrées alimentaires, notamment celles issues de productions informelles et des circuits courts de distribution, ainsi que sur les niveaux d'imprégnation des populations.

### ► Premières mesures de gestion

À compter de 1999 et au fur et à mesure que la caractérisation des niveaux de contamination au chlordécone des milieux naturels et de la chaîne trophique était complétée, l'ensemble des services de l'État et des institutions scientifiques et sanitaires présentes aux Antilles se mobilisèrent pour mettre en place des mesures de gestion visant à protéger la population ou à apporter, par la recherche, les informations nécessaires servant de support aux mesures de gestion.

Dans un premier temps, pour respecter les normes régissant la qualité des eaux destinées à la consommation humaine, des arrêtés préfectoraux et municipaux imposèrent dès 1999 l'arrêt de l'exploitation des ressources en eaux les plus fortement contaminées et, pour celles moyennement ou faiblement contaminées, le mélange avec des sources non contaminées ou le traitement par charbon actif.

La création en 2001 du Groupe de réflexion et d'étude sur les produits phytosanitaires (Grepp) en Guadeloupe et du Groupe régional phytosanitaire (Grepby) en Martinique associant l'ensemble des parties prenantes (services de l'État, professionnels, institutions de recherche, associations) permit de mettre en commun l'état des connaissances et de proposer des actions de gestion.

Dès 2003, sur la base des connaissances scientifiques acquises par le Cirad et l'Inra sur le transfert sol-plantes de la chlordécone (Cabidoche et Lesueur Jannoyer, 2012), des arrêtés préfectoraux en Martinique et en Guadeloupe obligèrent les agriculteurs à faire analyser les sols avant toute mise en culture de légumes racines. Les producteurs qui persistaient à cultiver des racines et tubercules sur sols contaminés devaient s'astreindre, à leur charge, à un contrôle des végétaux commercialisés. En cas de contrôle positif, le lot était impropre à la commercialisation et détruit, sans indemnité.

Les travaux du BRGM conduiront en 2004 aux premières cartographies de risques de contamination des sols, permettant ainsi de mieux cibler les zones affectées et d'anticiper les pratiques (Desprats *et al.*, 2004). Les recherches menées par l'Ifremer (Bocquené et Franco, 2005; Coat *et al.*, 2006) et l'UAG (Monti, 2007) serviront de support aux arrêtés interdisant la pêche dans des estuaires et rivières et sur les littoraux marins en lien avec les bassins versants pollués par le chlordécone.

L'Agence française de sécurité sanitaire des aliments (Afssa, 2003) puis l'INVS (Bonvallot et Dor, 2004) s'accorderont sur la VTRc à utiliser (0,5 µg/kg poids corporel/j), la même que celle retenue antérieurement par les autorités états-uniennes. Une première évaluation de l'exposition alimentaire de la population antillaise à la chlordécone (Afssa, 2005) servira de support aux arrêtés ministériels de 2005 réglementant la teneur maximale en chlordécone que ne devraient pas dépasser certaines denrées d'origine végétale et animale pour être reconnues propres à la consommation humaine (également appelée « limite maximale de résidus\* » ou LMR<sup>5</sup>).

La Cire-AG coordonnera à partir de 2003 les enquêtes sur la santé et les comportements alimentaires (Escal) en Martinique (Merle *et al.*, 2008) et le comportement alimentaire dans le sud de la Basse-Terre (Calbas) en Guadeloupe (Cornely et Théodore, 2007) permettant de caractériser les comportements alimentaires ainsi que les habitudes d'approvisionnement. Couplées aux enquêtes Reso (Blateau *et al.*, 2011), elles serviront ultérieurement de support aux agences sanitaires pour estimer les taux de dépassements de la VTRc de la population antillaise et caractériser les sous-populations dépassant cette valeur. Dès 2004, l'Inserm lancera un programme de recherche comprenant des études épidémiologiques et toxicologiques afin d'améliorer la connaissance des dangers et identifier les risques sanitaires dans le contexte

---

5. Les limites maximales de résidus (LMR) sont les concentrations maximales en résidus de pesticides, biocides ou médicaments vétérinaires autorisées légalement dans ou sur les denrées alimentaires commercialisées. Elles sont censées garantir à l'ensemble des consommateurs des niveaux d'exposition inférieurs aux valeurs toxicologiques de référence.

propre à l'exposition de la population antillaise au chlordécone. Les conclusions de ces recherches contribueront en 2021 à la diminution de la VTRc par voie orale ainsi qu'à l'élaboration d'une VTRc interne basée sur la concentration de chlordécone dans le sang (Anses, 2021).

Dès 2005, un Groupe d'étude et prospective associant le Cirad et l'Inra sera chargé par cinq ministères d'établir un état des lieux des connaissances sur les volets agronomiques et environnementaux ainsi que les recherches prioritaires à lancer pour une meilleure caractérisation et gestion de la contamination territoriale (Cabidoche *et al.*, 2006).

Ce n'est qu'en 2008 qu'une gestion centralisée du dossier chlordécone sera installée avec la mise en place du plan d'action national chlordécone I (2008-2010) et qui sera reconduit jusqu'au plan IV, actuellement en cours (2021-2027).

## ► Retour d'expérience

La contamination des Antilles au chlordécone est inédite à de nombreux égards. Elle concerne un vaste territoire insulaire de 2 700 km<sup>2</sup>, où résident près de 800 000 personnes. En dépit de son interdiction en 1993, le chlordécone continue de nos jours à être présent dans les sols des parcelles où il a été appliqué. Cette contamination durable concerne plusieurs milliers d'hectares, estimés à un tiers des surfaces agricoles utiles, et s'explique par la forte capacité du chlordécone à se fixer à la matière organique et à sa très faible capacité de dégradation biotique et abiotique. En absence de technique opérationnelle de décontamination, sa persistance est estimée à un ou plusieurs siècles selon la nature géologique des sols (Cabidoche *et al.*, 2009). Cette persistance, et les durées estimées de contamination qui en découlent, font aujourd'hui débat (Comte *et al.*, 2022; Saaidi *et al.*, 2023) et la question n'est pas encore élucidée (chapitre 5). Sa capacité de transfert à partir des sols vers les eaux superficielles, ou vers les nappes ainsi que vers la chaîne trophique, explique la contamination de nombreuses denrées alimentaires, végétales et animales, terrestres ou aquatiques, et, *in fine*, l'imprégnation de l'ensemble de la population. De plus, la chlordécone présente une forte capacité de bio-accumulation\* avec des demi-vies\* plasmatiques variables selon les organismes et pouvant atteindre 131 jours chez l'humain (Emond et Multigner, 2022). Finalement, la dangerosité du chlordécone, bien établie dès la fin des années 1980 et ne souffrant pas de controverse scientifique, a conduit les instances internationales à le considérer comme agent neurotoxique, toxique pour la reproduction, cancérigène et perturbateur endocrinien (ATSDR, 2020; IARC, 1979) et à l'intégrer à la liste A des polluants organiques persistants de la Convention de Stockholm en 2007.

La France n'ayant jamais été confrontée dans le passé à une contamination environnementale présentant l'ensemble des caractéristiques décrites ci-dessus, il n'était pas possible de puiser dans une expérience antérieure pour y faire face. Pour autant, la mobilisation des acteurs de la recherche et des services de l'État aura permis d'établir rapidement un diagnostic de situation et d'orienter les autorités à prendre les premières mesures de gestion. Une analyse critique des procédures mises en place pour estimer l'étendue et l'intensité de la contamination au chlordécone en conséquence des premières observations de dépassement des normes de qualité pour l'eau de consommation fait émerger trois aspects qui apparaissent essentiels pour estimer une telle contamination : les procédures de mesure, les procédures d'échantillonnage ainsi que le partage des informations et la capitalisation des acquis.

S'agissant des procédures de mesure, les prélèvements d'eaux destinés au contrôle sanitaire de l'eau de consommation humaine étaient jusque-là expédiés en France hexagonale à des laboratoires qui se limitaient à la recherche de pesticides ciblés, employés dans l'Hexagone (et non outre-mer). À l'initiative de la direction régionale des Affaires Sanitaires et Sociales (Drass) de la Martinique, les prélèvements d'eaux furent envoyés, à partir de 1999, à un nouveau laboratoire qui permit la caractérisation d'un grand nombre de molécules, incluant celles employées dans le passé aux Antilles, dont la chlordécone. Avec comme objectif d'estimer l'étendue de la contamination, des échantillons furent prélevés et envoyés à divers laboratoires, situés sur le territoire européen (en France et en Belgique), en fonction du type de matrice (sols, aliments, tissus biologiques, etc.), chaque laboratoire étant spécialisé dans l'une d'entre elles. Tenant compte des propriétés physico-chimiques particulières de la chlordécone, qui la différencie de la plupart des autres organochlorés, chaque laboratoire dut faire un investissement conséquent pour la mise au point analytique, avec l'abaissement des seuils de sensibilité en particulier. Avec le recul, on peut regretter une absence de concertation entre laboratoires, ce qui aurait permis un partage d'expérience, incluant des comparaisons interlaboratoires et, *in fine*, une plus grande efficacité (justesse et précision) et rapidité dans les validations des procédures d'analyse (Le Déhaut et Procaccia, 2009). On peut déplorer également que, à la suite du rapport commandité en 1992 par le service de Protection des Végétaux de la Martinique, les recommandations portant sur l'installation d'un laboratoire d'analyse des pesticides aux Antilles n'aient pas été suivies d'effets (Cooper, 1992). Un tel dispositif aurait sûrement permis, dès le début des années 2000, de faire face à deux difficultés majeures : le coût élevé d'expédition des échantillons en territoire européen et les longs délais d'obtention des résultats. Or la question du coût et des délais peut peser à la fois sur la caractérisation de la contamination, mais également sur la mise en place de mesures de gestion. Ainsi, le coût d'analyse a réduit la fréquence et le nombre de prélèvements, ce qui, à son tour, a impacté la précision et la résolution à l'échelle du territoire. Pour ce qui est de l'allongement des délais, dans certaines situations, celui-ci n'a pas permis la réactivité nécessaire pour une gestion efficace de terrain, par exemple pour l'analyse de la conformité des denrées alimentaires conditionnant leur mise sur le marché, dont le délai était supérieur à celui de la périssabilité de la denrée.

Les procédures de mesure ne concernent pas uniquement la performance analytique des laboratoires. En effet, un tel processus débute dès la prise d'échantillons. L'adaptation des protocoles de mesure au contexte est indispensable pour éviter certaines erreurs. Les sols constituant le réservoir de la contamination, leur analyse s'est vite imposée comme l'outil indispensable, tant pour la caractérisation du niveau de contamination que pour la gestion des pratiques agricoles ou d'élevage. Or le chlordécone a été appliqué de manière très hétérogène à l'échelle de la parcelle (application manuelle et ponctuelle sous forme de poudre autour des souches de bananiers), générant des points chauds (*hot spots*) de contamination des sols au sein des parcelles. De plus, cette hétérogénéité a pu être combinée avec la diversité de la nature des sols et avec certaines pratiques agricoles (fréquence très variable d'épandage selon les exploitations, travail du sol) sur des décennies, aboutissant à une situation complexe de la contamination. Une méthode d'échantillonnage des parcelles a été mise au point pour représenter au mieux une valeur moyenne de la contamination du fait de cette hétérogénéité. Un nombre minimum de 20 points de prélèvements par hectare a été jugé

nécessaire afin d'obtenir un échantillon composite représentatif de chaque parcelle (Achard *et al.*, 2003). Des fiches méthodologiques ont été produites pour harmoniser l'échantillonnage des sols (Achard *et al.*, 2003) et des végétaux (Carles *et al.*, 2010). S'agissant des méthodes d'échantillonnage pour les eaux, le prélèvement ponctuel est resté longtemps la référence, alors que la question de la variabilité temporelle et spatiale à l'échelle des bassins versants a été mise en évidence à partir de 2007 (ARS, 2017; Lesueur Jannoyer *et al.*, 2016). Un échantillonnage plus intégratif est actuellement mis en œuvre. Enfin, la préparation des échantillons de certaines denrées alimentaires des enquêtes Reso (Blateau *et al.*, 2011) réalisée selon les protocoles classiques de contrôle (réglementation en vigueur et *Codex alimentarius*) a pu conduire à des résultats aberrants pour la contamination par le chlordécone. En effet, la préparation sans lavage, exigée pour les pesticides contenus sur ou dans les fruits et légumes, ne prenait pas en compte la contamination fréquente liée à la présence de terre résiduelle contaminée sur ces denrées, notamment sur les légumes racines. Des ajustements progressifs ont ainsi permis la correction de ces premières erreurs et l'adaptation de protocoles dédiés aux différentes hypothèses testées et questions posées.

Enfin, la capitalisation d'expérience n'est que rarement intégrée dans la gestion d'une contamination. Or elle implique une posture d'amélioration continue, en limitant par exemple la perte d'informations, et permet *in fine* de mieux gérer, voire d'éviter, d'autres situations. Il est vrai que la mémoire d'un événement, dans ce cas la gestion d'une contamination majeure, n'est pas simple à formaliser et à transmettre. Pourtant, cela est encore plus précieux dans un contexte où les parties prenantes ont une dynamique de renouvellement rapide, avec, en particulier aux Antilles, beaucoup de rotations dans les équipes scientifiques et les services de l'État. La recommandation est simple, mais la mise en pratique complexe. Pour les acteurs de la recherche, la capitalisation scientifique a souvent été différée au profit d'une posture de transparence des résultats au service des mesures et des actions à mettre en œuvre par les gestionnaires du territoire. Une grande proximité avec des échanges réguliers et des productions conjointes entre recherche, services de l'État et institutions territoriales s'est ainsi mise en place.

Nous convenons que les résultats et conclusions qui découlent des premières phases de caractérisation d'une contamination ne sont pas toujours simples à exposer. En 2008, une enquête de l'Institut national de prévention et d'éducation pour la santé (Inpes) a porté sur la connaissance et la perception de la population antillaise de la problématique chlordécone (Girard, 2009). Une large majorité des personnes enquêtées avaient entendu parler du chlordécone et se sentaient concernées dans la mesure où cette contamination pouvait avoir des effets sur leur santé, mais elles déploraient un manque de transparence des pouvoirs publics. Cette défiance était bien moindre pour ce qui concernait les scientifiques et leurs travaux. Globalement, les résultats de cette enquête manifestaient un réel besoin d'information de la population antillaise, celle-ci étant jugée insuffisante, voire parfois contradictoire et incohérente. Aussi les connaissances et les données sur la perception de la contamination par les populations antillaises, des risques associés et des pratiques ou des stratégies mises en place ont été très utiles pour améliorer l'autonomie de décision et de gestion individuelle ou collective. Le niveau d'information de chacun est d'ailleurs clé dans la perception et la confiance accordée à la gestion (Girard, 2009).

## ► Une contamination singulière

La contamination aux Antilles est singulière. Peu de stratégies et de références scientifiques existaient pour faire face aux conséquences de cette contamination chronique en milieu tropical volcanique et insulaire. Les données anciennes sur la molécule ont cependant été primordiales pour les premières évaluations et afin d'élaborer les premières hypothèses environnementales et sanitaires.

La représentation d'une contamination invisible avec une variabilité spatiale et temporelle importante nécessite des outils adaptés. La mesure est souvent le moyen approprié pour l'objectiver dans ces différentes situations. Elle se révèle également un outil de gestion malgré de nombreuses incertitudes résiduelles. La production de données est donc un enjeu majeur, auquel il faut prêter une attention particulière avec des méthodes d'échantillonnage, d'analyse et de restitution adaptées au contexte.

Les données acquises à ce jour sur le chlordécone aux Antilles permettent de disposer de référentiels nouveaux et actualisés, mais aussi d'un retour d'expérience unique pour éviter à l'avenir les erreurs du passé et préserver les écosystèmes (Procaccia, 2023). C'est ainsi qu'à la vue des moyens et des connaissances disponibles, la mobilisation de la communauté scientifique et des services décentralisés de l'État dès la première heure peut être qualifiée de fondatrice. Elle a abouti à des outils en soutien aux mesures de gestion actuellement toujours en vigueur.

## ► Références bibliographiques

Achard R., Perrier X., Chabrier C., Lassoudière A., 2003. Cartographie du risque de pollution des sols de Martinique par les organochlorés — Rapport Phase 1 : Méthodologie d'échantillonnage à la parcelle — BRGM/RP-53262-FR, BRGM, 29 p. Disponible sur [http://agritrop.cirad.fr/533289/1/document\\_533289.pdf](http://agritrop.cirad.fr/533289/1/document_533289.pdf).

Afssa, 2003. Avis relatif à l'évaluation des risques liés à la consommation de denrées alimentaires contaminées par la chlordécone. Disponible sur <https://www.anses.fr/fr/system/files/RCCP2003sa0330.pdf>.

Afssa, 2005. Première évaluation de l'exposition alimentaire de la population martiniquaise au chlordécone — Propositions de limites maximales provisoires de contamination dans les principaux aliments vecteurs. Rapport Afssa, Maisons-Alfort, 40 p. Disponible sur <https://www.anses.fr/fr/system/files/RCCP-Ra-chlordecone.pdf>.

Anses, 2021. Avis et rapport révisés de l'Anses relatif aux valeurs sanitaires de référence (VSR) pour le chlordécone. Disponible sur <https://www.anses.fr/fr/system/files/ERCA2018SA0166Ra.pdf>.

ARS, 2017. Les rivières (eaux et sédiments) et la chlordécone. Martinique. Disponible sur <https://www.martinique.ars.sante.fr/media/17249/download?inline>.

ATSDR, 2020. Toxicological profile for Mirex and Chlordecone. Atlanta, U.S. Department of Health and Human Services. Disponible sur <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp66.pdf>.

Balland P., Mestres R., Fagot M., 1998. Rapport sur l'évaluation des risques liés à l'utilisation de produits phytosanitaires en Guadeloupe et Martinique. Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'environnement, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche.

Basag, 2005. Pesticides organochlorés et santé publique aux Antilles françaises. Bulletin d'Alertes et de Surveillance Antilles Guyane. Disponible sur [https://www.chlordecone-infos.fr/sites/default/files/documents/26\\_pesticides\\_organochlores\\_sante\\_publique\\_Antilles.pdf](https://www.chlordecone-infos.fr/sites/default/files/documents/26_pesticides_organochlores_sante_publique_Antilles.pdf).

Blateau A., Chaud P., 2000. Contamination par des pesticides de la famille des organochlorés des eaux de distribution publique des communes de Trois Rivières et Capesterre Belle Eau (Guadeloupe). Cellule interrégionale d'épidémiologie Antilles -Guyane.

Blateau A., Héraud F., Bordet F., Merle S., Reilhes O., Quénel P., 2011. Données de contamination des aliments en Martinique et en Guadeloupe : les enquêtes Reso (RÉSidus Organochlorés), 2005-2007. BEH, 3-5:29. Disponible sur <https://hal.science/hal-05035561v1>.

Bocquené G., Franco A., 2005. Pesticide contamination of the coastline of Martinique. *Marine Pollution Bulletin*, 51(5-7):612-619. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2005.06.026>.

Bonvallot N., Dor F., 2004. Insecticides organochlorés aux Antilles : identification des dangers et valeurs toxicologiques de référence (VTR) — État des connaissances. Institut de veille sanitaire. Disponible sur <https://www.santepubliquefrance.fr/exposition-a-des-substances-chimiques/pesticides/rapportsynthese/insecticides-organochlores-aux-antilles-identification-des-dangers-et-valeurs-toxicologiques-de>.

Burgaud L., 1993. Rémanence des pesticides utilisés dans les bananeraies. Cas de l'estuaire du Grand Carbet. Direction départementale de l'équipement, Guadeloupe. 23 p. plus annexes.

Cabidoche Y.M., Achard R., Cattan P., Clermont-Dauphin C., Massat F., Sansoulet J., 2009. Long-term pollution by chlordécone of tropical volcanic soils in the French West Indies: A simple leaching model accounts for current residue. *Environ. Pollut*, 157:1697-1705.

Cabidoche Y.M., Jannoyer M., Vannière H., 2006. Conclusions du Groupe d'étude et prospective (GEP) « Pollution par les organochlorés aux Antilles », rapport Cirad Inra, Montpellier : Cirad-FLHOR, 66 p. Disponible sur <https://agritrop.cirad.fr/535037/>.

Cabidoche Y.M., Lesueur Jannoyer M., 2012. Contamination of harvested organs in root crops grown on chlordécone-polluted soils. *Pedosphere*, 22:562-571. Disponible sur [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(12\)60041-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(12)60041-1).

Carles C., Lesueur Jannoyer M., Achard R., Michel S., Sainte Rose M., *et al.*, 2010. Guide d'échantillonnage des végétaux dans le cadre des diagnostics sanitaires et environnementaux. Cas de la pollution par la chlordécone. Pôle de recherche agro-environnemental de la Martinique, Cirad, 28 p. Disponible sur <https://ur-hortsys.cirad.fr/content/download/4453/33082/version/1/file/guidechantillonnagechlord%5B1%5D.pdf>.

Carson R., 1962. *Silent Spring*. Houghton Mifflin Harcourt. Traduction française datant de 2020 par Gravrand J.F.; révisée par Lanaspé B. *Printemps silencieux*. Wildproject, 352 p.

Coat S., 2002. Caractérisation de l'exposition de la population martiniquaise aux pesticides organochlorés par la consommation de ressources aquatiques. Mémoire de fin d'études, École nationale de la santé publique (ENSP), Rennes, 58 p. Disponible sur <https://documentation.ehesp.fr/memoires/2002/igs/coat.pdf>.

Coat S., Bocquené G., Godard E., 2006. Contamination of some aquatic species with the organochlorine pesticide chlordécone in Martinique. *Aquat. Living Resour.*, 19:181-187. <https://doi.org/10.1051/alr:2006016>.

Comte I., Pradel A., Crabit A., Mottes C., Pak L.T., Cattan P., 2022. Long-term pollution by chlordécone of tropical volcanic soils in the French West Indies: New insights and improvement of previous predictions. *Environmental Pollution.*, 303:119091. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119091>.

Cooper J.F., 1992. Étude de faisabilité d'un laboratoire d'analyses de résidus de pesticides en Martinique, rapport, faculté de Pharmacie de Montpellier.

Cornely V., Théodore M., 2007. Hygiène de vie et habitudes alimentaires dans une région de la Guadeloupe : le Sud Basse-Terre en 2005, Observatoire régional de la santé de Guadeloupe, 24 p.

Desprats J.F., Comte J.P., Chabrier C., 2004. Cartographie du risque de pollution des sols de Martinique par les organochlorés. Rapport phase 3. BRGM. Disponible sur [https://agritrop.cirad.fr/533313/1/document\\_533313.pdf](https://agritrop.cirad.fr/533313/1/document_533313.pdf).

Emond C., Multigner L., 2022. Chlordécone: development of a physiologically based pharmacokinetic tool to support human health risks assessments. *Arch Toxicol.*, 96(4):1009-1019. <https://doi.org/10.1007/s00204-022-03231-3>.

Fintz M., 2010. L'autorisation du chlordécone en France, 1968-1981 — Éléments historiques sur l'arrivée du chlordécone en France. Anses. Disponible sur <https://www.anses.fr/fr/system/files/SHS2009etPlanChlor01Ra.pdf>.

Girard D., 2009. Étude sur les connaissances, les perceptions et les comportements des populations de Martinique et de Guadeloupe vis-à-vis de la chlordécone. Inpes, Saint-Denis, 59 p. Disponible sur [https://portaildocumentaire.santepubliquefrance.fr/exl-php/document-affiche/spf\\_\\_\\_internet\\_recherche/OUVRE\\_DOC/16022?fic=inp00011145.pdf](https://portaildocumentaire.santepubliquefrance.fr/exl-php/document-affiche/spf___internet_recherche/OUVRE_DOC/16022?fic=inp00011145.pdf).

Godard E., Bellec S., 2002. Contamination par les produits phytosanitaires organochlorés en Martinique. Caractéristiques de l'exposition des populations. Direction de la santé et du développement social de la Martinique, Fort de France, 41 p. Disponible sur <https://www.chlordecone-infos.fr/sites/default/files/documents/rapport-organochlores-Godard-Bellec-972-complet.pdf>.

IARC, 1979. Chlordecone, *in* some halogenated hydrocarbons. *Monog. Eval. Carcinog. Risk Chem. Hum.*, 20:67-81.

Kermarrec A (coord.), 1980. Niveau actuel de la contamination des chaînes biologiques en Guadeloupe : pesticides et métaux lourds, 1979-1980. Ministère de l'Environnement et du Cadre de vie, Paris, 155 p. Disponible sur [https://hal.inrae.fr/hal-03578841/file/Kermarrec\\_1980\\_Rapport\\_contrat\\_niveau\\_contamination.pdf](https://hal.inrae.fr/hal-03578841/file/Kermarrec_1980_Rapport_contrat_niveau_contamination.pdf).

Le Déhault J.Y., Procaccia C., 2009. Impacts de l'utilisation de la chlordécone et des pesticides aux Antilles : bilan et perspectives d'évolution. Rapport de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, rapport n° 487, 223 p.

Lesueur Jannoyer M., Mottes C., Clostre F., Carles C., Guene M., *et al.*, 2016. Characterization of river pollution at the watershed scale, *in* Lesueur Jannoyer M., Cattani P., Woignier T., Clostre F., eds. *Crisis management of chronic pollution: contaminated soil and human health*, Boca Raton, CRC Press, 45-54.

Levillain J., Cattani P., Colin F., Voltz M., Cabidoche Y.M., 2012. Analysis of environmental and farming factors of soil contamination by a persistent organic pollutant, chlordecone, in a banana production area of French West Indies. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 159:123-32. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.07.005>.

Merle B., Deschamps V., Merle S., Malon A., Blateau A., *et al.*, 2008. Enquête sur la santé et les comportements alimentaires en Martinique (Escal 2003-2004). Résultats du volet « consommations alimentaires et apports nutritionnels ». Institut de veille sanitaire, université Paris 13, Conservatoire national des arts et métiers, Observatoire de la santé de Martinique, Saint-Maurice, 34 p. Disponible sur <https://hal.science/hal-04852118>.

Monti D., 2007. Évaluation de la biocontamination en Chlordecone,  $\beta$ -Hexachlorocyclohexane et Cadusaphos de Crustacés et Poissons d'eau douce en Guadeloupe. EA 926 DYNECAR, université des Antilles et de la Guyane.

Multigner L., Kadhel P., 2004. Exposition à des polluants environnementaux chez la femme enceinte et son enfant en Guadeloupe. Niveaux de chlordécone dans le sang maternel et étude des déterminants de l'imprégnation. Inserm U625, service Gynécologie-Obstétrique CHU Pointe-à-Pitre. Rapport final.

Multigner L., Kadhel P., 2008. Exposition à des polluants environnementaux chez la femme enceinte et son enfant en Guadeloupe. Niveaux de chlordécone dans le sang maternel et étude des déterminants de l'imprégnation. Inserm U625, service Gynécologie-Obstétrique CHU Pointe-à-Pitre. Rapport complémentaire.

Multigner L., Kadhel P., Huc-Terki F., Thome J.P., Janky E., Auger J., 2006. Exposure to chlordecone and male fertility in Guadeloupe (French West Indies). *Epidemiology*, 17:S372.

Procaccia C., 2023. Impact de l'utilisation de la chlordécone aux Antilles françaises. Rapport au nom de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, rapport n° 360, 170 p. Disponible sur [https://www.senat.fr/rap/r22-360/r22-360\\_mono.html](https://www.senat.fr/rap/r22-360/r22-360_mono.html).

Saaidi P.L., Grünberger O., Samouëlian A., Le Roux Y., Richard A., *et al.*, 2023. Is a dissipation half-life of 5 years for chlordecone in soils of the French West Indies relevant? *Environmental Pollution*, 324:121283. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121283>.

Snegaroff J., 1977. Les résidus d'insecticides organochlorés dans les sols et les rivières de la région bananière de la Guadeloupe. *Phytiatrie-Phytopharmacie*, 26(4):251-268.

## Chapitre 2

# Défis analytiques pour quantifier et suivre la contamination ainsi que pour évaluer des solutions de remédiation

*Mailie Saint-Hilaire, Jean-Pierre Thomé,  
Laurence Amalric, Pierre-Loïc Saaidi*

### ► La chlordécone, un insecticide organochloré pas tout à fait comme les autres

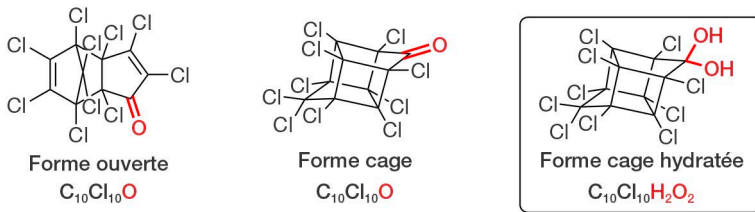
#### De sa découverte à sa structure réelle

En appliquant la réaction de Diels-Alder, découverte quelques années plus tôt, à l'hexachlorocyclopentadiène, l'industrie chimique développa, au sortir de la Seconde Guerre mondiale, une nouvelle génération d'organochlorés cycliques dont certains servirent pendant des décennies comme insecticides. On retrouve notamment la dieldrine et l'aldrine, nommés ainsi en l'honneur des chimistes allemands Diels et Alder, lauréats du prix Nobel de chimie 1950, mais également la chlordécone (brevetée en 1952). Du fait de leur grande stabilité et de leur toxicité, nombre de ces organochlorés, comme la chlordécone, font aujourd'hui partie des polluants organiques persistants bannis, recensés dans le cadre de la Convention de Stockholm (2023).

Dès sa découverte, la chlordécone dénote déjà : elle n'est pas simplement issue d'une réaction de Diels-Alder entre l'hexachlorocyclopentadiène et un diénophile, comme les autres organochlorés de cette génération. Pour sa synthèse, l'hexachlorocyclopentadiène réagit sur lui-même en présence de trioxyde de soufre, et conduit à la chlordécone après une hydrolyse basique. Contrairement au mirex ( $C_{10}Cl_{12}$ ), un autre insecticide, qui provient de la dimérisation de l'hexachlorocyclopentadiène ( $C_5C_{16}$ ), la structure de la chlordécone inclut de l'oxygène. Cette particularité et la complexité du mécanisme de sa formation ont donné lieu à d'intenses débats sur sa structure, alors même que la chlordécone présentée en forme ouverte (figure 2.1) était déjà commercialisée depuis 1958, principalement sous le nom de Kepone®, par la société Allied Chemical.

Ce n'est qu'en 1964 que la structure cage bishomocubane\* de la chlordécone est confirmée (Griffin et Price, 1964), la forme définitive en cage hydratée, également nommée chlordécone gem-diol ou chlordécone hydrate ( $C_{10}Cl_{10}H_2O_2$ ) est définitivement prouvée au cours des années 1970 (Alley *et al.*, 1974; Blanke *et al.*, 1977; Moseman *et al.*, 1977; Saleh et Lee, 1978; Harless *et al.*, 1978; Wilson et Zehr, 1979; figure 2.1).

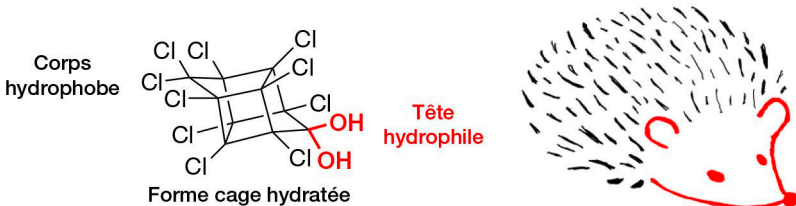
La technique de chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC-MS) utilisée pour l'analyse de la chlordécone provoque sa déshydratation lors de l'étape initiale de chauffage dans l'injecteur (Moseman *et al.*, 1977). Le spectre de masse obtenu correspond donc à la forme cage cétone en  $C_{10}Cl_{10}O$  ce qui peut induire en erreur les chercheurs non spécialistes. Une partie de la communauté scientifique emploie donc toujours cette représentation en  $C_{10}Cl_{10}O$ , quand bien même elle ne correspond pas à la structure réelle et ne reflète pas la réactivité exacte de la chlordécone.



**Figure 2.1.** Les différentes structures proposées pour la chlordécone, la forme cage hydratée représentant la structure réelle de la chlordécone.

## Propriétés physico-chimiques et réactivité particulière

La chlordécone possède un squelette carboné polycyclique de type bishomocubane hautement symétrique, extrêmement rigide qui conduit à une molécule atypique, compacte, sans aucune flexibilité conformationnelle. L'absence de liaisons carbone-hydrogène (C-H) limite grandement les possibilités d'oxydation, ce qui rend la chlordécone très stable. Elle est également très résistante aux acides forts, ce qui a été exploité dans plusieurs protocoles d'analyse où un lavage à l'acide sulfurique concentré permet d'éliminer un grand nombre de biomolécules (lipides, sucres) (Blanke *et al.*, 1977; Garrido Frenich *et al.*, 2003; Frias *et al.*, 2004; Lafontaine *et al.*, 2016). La chlordécone ne subit pas de décomposition thermique avant d'atteindre son point de sublimation, à  $350^{\circ}C$  à pression atmosphérique. Malgré sa masse molaire relativement élevée (508,6g/mol), elle peut donc être analysée en chromatographie en phase gazeuse (GC). Les dix atomes de chlore pointent vers l'extérieur et génèrent une surface concave entièrement hydrophobe. Seuls le mirex et quelques organochlorés dérivés de l'hexachlorocyclopentadiène présentent, au moins en partie, une telle caractéristique. Mais, la chlordécone se distingue là encore par la présence d'une fonction gem-diol : elle peut être vue comme un hérisson moléculaire avec un corps recouvert de piquants, les atomes de chlore, et une petite tête polaire et hydrophile, la fonction gem-diol, capable d'interactions multiples, par liaison hydrogène par exemple (figure 2.2).



**Figure 2.2.** La chlordécone vue comme un hérisson moléculaire.

Généralement, les fonctions gem-diols libèrent spontanément une molécule d'eau pour conduire aux cétones et aldéhydes correspondants, thermodynamiquement plus stables. Ici, c'est l'inverse : la chlordécone sous forme cétone  $C_{10}Cl_{10}O$  capte spontanément une molécule d'eau pour générer la fonction gem-diol (figure 2.1). La déstabilisation particulière de la fonction cétone dans la chlordécone s'explique par deux effets cumulatifs : (i) l'effet électroattracteur des atomes de chlore qui exaltent l'électrophilie de la cétone, la rendant plus sensible aux espèces nucléophiles, notamment l'eau, comme observé pour le chloral ou les fluorocétones ; (ii) les tensions de cycle sur l'atome de carbone de la cétone qui le contraignent à plutôt adopter une géométrie tétraédrique en acceptant un quatrième substituant, comme c'est le cas de la cyclopropanone, également plus stable sous forme hydratée. La tête gem-diol hydrophile rend la chlordécone globalement moins hydrophobe que ses congénères organochlorés de masse molaire équivalente (mirex, aldrine, dieldrine ou endrine), et plus soluble dans l'eau (de 1 à 3 mg/l à pH 7). La molécule est connue pour se fixer significativement à diverses surfaces (surfaces hydrophobes, membranes constituant les filtres 0,2  $\mu m$  utilisés en laboratoire) et fortement à la matière organique (Cabidoche *et al.*, 2009).

La solubilité de la chlordécone augmente énormément en conditions basiques pour dépasser 150 mg/l à pH 11 (augmentation d'un facteur 100 par rapport à pH 7). Ce comportement particulier s'explique par la déprotonation du gem-diol qui conduit à une espèce chargée négativement, de formule  $C_{10}Cl_{10}HO_2^-$ , beaucoup plus soluble dans l'eau (figure 2.3). La chlordécone passe spontanément d'un solvant organique vers une solution aqueuse basique. Cette propriété a notamment été exploitée dans le procédé de production industrielle de la chlordécone, dans lequel une étape d'acidification permet de précipiter et ainsi de purifier la chlordécone juste après l'étape d'hydrolyse basique. Fariss *et al.* (1982) utilisent un lavage basique pour éliminer la chlordécone n'ayant pas réagi dans leur protocole de synthèse du chlordécol (CLDOH). Des protocoles de dosage dans diverses matrices (fèces, bile, sérum, matrices animales, sols) jouent également avec le pH pour faire passer la chlordécone d'une phase organique à une phase aqueuse (ou inversement) et ainsi éliminer des interférents (Blanke *et al.*, 1977; Carver *et al.*, 1978; Borsetti et Roach, 1978; Caplan *et al.*, 1979; Bordet *et al.*, 2007).

La fonction gem-diol conduit à une très bonne solubilité dans les solvants organiques polaires protiques et aprotiques qui sont souvent utilisés en mélange avec des solvants apolaires pour limiter la présence d'interférents organiques polaires. Une autre particularité de la fonction gem-diol réside dans la formation spontanée d'un hémicétal lorsque la chlordécone est solubilisée dans un alcool comme le méthanol (figure 2.3). Formellement, cela signifie qu'une molécule de méthanol remplace une molécule d'eau sur la chlordécone. Certains chimistes ont tiré parti de cette particularité et ont ajouté une faible quantité de méthanol (1 à 2 %) aux échantillons de chlordécone en solvants apolaires (benzène ou hexane, par exemple) pour augmenter l'intensité du signal en chromatographie en phase gazeuse couplée au détecteur à capture d'électrons (GC-ECD) ou en GC-MS et améliorer la sensibilité de l'analyse (Moseman *et al.*, 1977; Saleh *et al.*, 1978; Carver *et al.*, 1978; Borsetti et Roach, 1978; Bristeau, 2012). Le revers de la médaille est qu'une faible variation de méthanol ajouté peut fortement impacter la réponse de la GC. En chromatographie en phase liquide couplée à la spectrométrie de masse (LC-MS), l'ajout de méthanol tend à complexifier le chromatogramme avec deux signaux chromatographiques, l'un pour la forme chlordécone-hydrate, l'autre

pour l'hémicétal méthylique de la chlordécone, ce qui est à proscrire dans le développement de méthodes d'analyse (He *et al.*, 2015). Aujourd'hui, la plupart des protocoles d'analyse évitent l'usage du méthanol et des autres alcools.

Même si la chlordécone gem-diol est la plus stable, elle est en équilibre avec la forme déshydratée  $C_{10}Cl_{10}O$  qui possède une réactivité similaire aux cétones non énolisables : elle peut être réduite en chlordécol ou subir des attaques nucléophiles, de carbanions ou d'énolates, par exemple. Une réaction de ce type, une cétolisation, a permis à la société allemande Spieß and Sohn de produire à grande échelle un insecticide dérivé, le Kelevan<sup>®</sup> qui a principalement été utilisé pour lutter contre le doryphore de la pomme de terre en Europe. On considère qu'environ 70 % de la chlordécone produite aux États-Unis a été transformée en Kelevan<sup>®</sup> (Epstein, 1978).

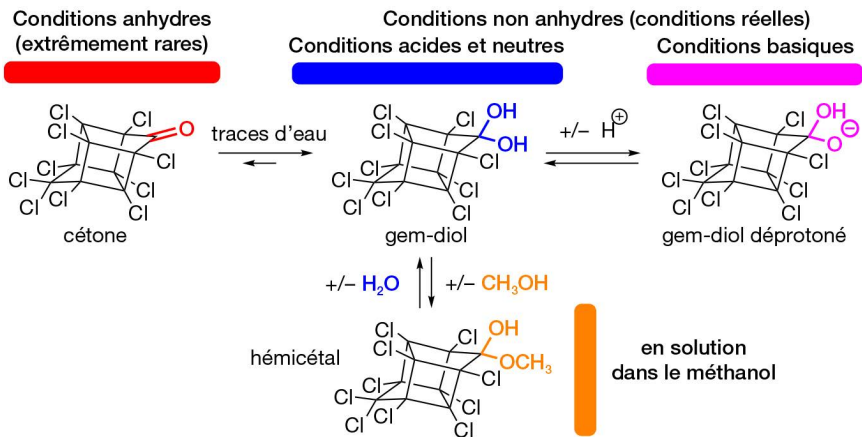


Figure 2.3. Formes les plus stables de la chlordécone selon les conditions.

## Le paradoxe : une molécule très récalcitrante aux multiples produits de transformation

Jusqu'à la médiatisation récente des Pfas, réputés polluants éternels, la chlordécone était reconnue comme l'une des molécules organiques les plus récalcitrantes fabriquée par l'humain, avec de possibles durées de persistance séculaires (Cabidoche *et al.*, 2009). Plusieurs raisons expliquent cela : (i) l'absence de liaisons C-H protège des oxydants ; (ii) l'effet électroattracteur des atomes de chlore défavorise la formation d'intermédiaires réactionnels positivement chargés, interdisant donc de nombreuses réactions chimiques ; (iii) les tensions de cycle de la cage empêchent la formation de doubles liaisons proscrivant nombre de réactions d'élimination ; (iv) la surface concave riche en atomes de chlore électronégatifs (figure 2.2) repousse les nucléophiles et réduit les chances de substitution nucléophile.

Les seules voies de dégradation attendues pour la chlordécone se limitent à des réductions radicalaires et à des réactions photochimiques pour rompre d'abord les liaisons carbone-chlore (C-Cl). Des résultats très encourageants ont été obtenus dès les années 1960 et 1970 pour chacune de ces stratégies. Chaque fois, le remplacement d'un ou plusieurs atomes de chlore par des atomes d'hydrogène a été observé conduisant ainsi à une première famille de produits de transformation (PT),

les hydrochlordécones (famille A; figure 2.4). Le traitement par rayonnement ultraviolet décrit par Wilson et Zehr conduit à la 8-monohydrochlordécone (A2 ou 5b-monohydrochlordécone<sup>6</sup>), et à la 2,8-dihydrochlordécone (A3) (Wilson et Zehr, 1979). L'utilisation de fer zérovalent\* comme réducteur chimique, introduite dans les années 2010 par l'équipe de Mouvet (Belghit *et al.*, 2015) favorise la formation initiale de la 10-monohydrochlordécone (A1 ou 5-monohydrochlordécone<sup>6</sup>) puis induit d'autres déchlorationes générant plusieurs autres hydrochlordécones (chapitre 9; figure 2.4). En 2012, Dolfing *et al.* montrent que les processus de déchloration réductrice exploités par certaines bactéries pour respirer en utilisant comme accepteurs d'électrons des organochlorés (halorespiration) sont thermodynamiquement favorisés dans le cas de la chlordécone. Les chercheurs prédisent ainsi la possible formation d'hydrochlordécones dans le cas d'une dégradation microbiologique en conditions réductrices (anaérobiose). Ces échanges chlore/hydrogène sont déjà observés dans l'environnement pour d'autres organochlorés, comme les polychlorobiphényles, les per- et polychloroéthylènes, et les dioxines. Des souches bactériennes capables de déchloration ces organochlorés en récupérant de l'énergie par halorespiration ont ainsi été isolées au cours des trente dernières années. À ce jour, pourtant, aucune bactérie capable d'utiliser la chlordécone comme source d'énergie n'a été identifiée, ce qui montre une nouvelle fois la particularité et la persistance de ce pesticide.

Dès la fin des années 1970, les chimistes américains Schrauzer et Katz (1978) constatent que l'utilisation de vitamine B12 en conditions réductrices permet de dégrader la chlordécone en produisant des hydrochlordécones accompagnés d'une deuxième famille de PT ne possédant plus de cage bishomocubane. Ce n'est que dans les années 2010 que l'équipe de Saaidi élucide les structures de ces PT (famille B) et décrit l'existence de plusieurs autres familles selon les conditions de dégradation appliquées (naturelles, chimiques et photochimiques, ou microbiologiques) (figure 2.4; Chevallier *et al.*, 2019; Della-Negra *et al.*, 2020). Si on ajoute les métabolites de la chlordécone détectés chez certains mammifères, dont l'humain, on obtient un total de sept familles de PT (figure 2.4). Pour une molécule réputée parmi les plus difficiles à dégrader, c'est un vrai paradoxe. Les PT présentent une diversité de structures et de fonctions chimiques avec d'un côté les produits de conjugaison du chlordécol (famille G) et les acides polychloroindénecarboxyliques (famille C), nettement hydrophiles, et de l'autre les polychloroindènes (famille B), les esters méthyliques et éthyliques (familles D et E), ainsi que les dérivés du chlordécthiol (famille F) largement apolaires et volatils. On note également qu'une bonne partie des PT comportant un cycle indène (familles B, C, D et E) sont en équilibre chimique deux à deux, du fait d'une isomérisation aisée de la double liaison du cycle à cinq membres non aromatiques. Le devenir exact de la chlordécone dans le cadre d'expériences de dégradation, voire de remédiation, représente donc un énorme défi analytique, tant pour le dosage de la molécule mère que pour la mise en place de méthodes analytiques adaptées à tous les types de PT possiblement formés. Certains articles évoquent même la possible formation d'autres dérivés de la chlordécone, allant de molécules en C<sub>1</sub> (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>) en cas de minéralisation à des complexes covalents chlordécone-biomolécules (Boylan *et al.*, 1978, 1979; Schrauzer et Katz, 1978; Fariss *et al.*, 1980; Bungay *et al.*, 1981; Huckins *et al.*, 1982; Francis et Metclaf, 1984; Jablonski *et al.*, 1996; Fernández-Bayo *et al.*, 2013).

6. Selon la nomenclature du *Chemical Abstracts Service* (CAS).

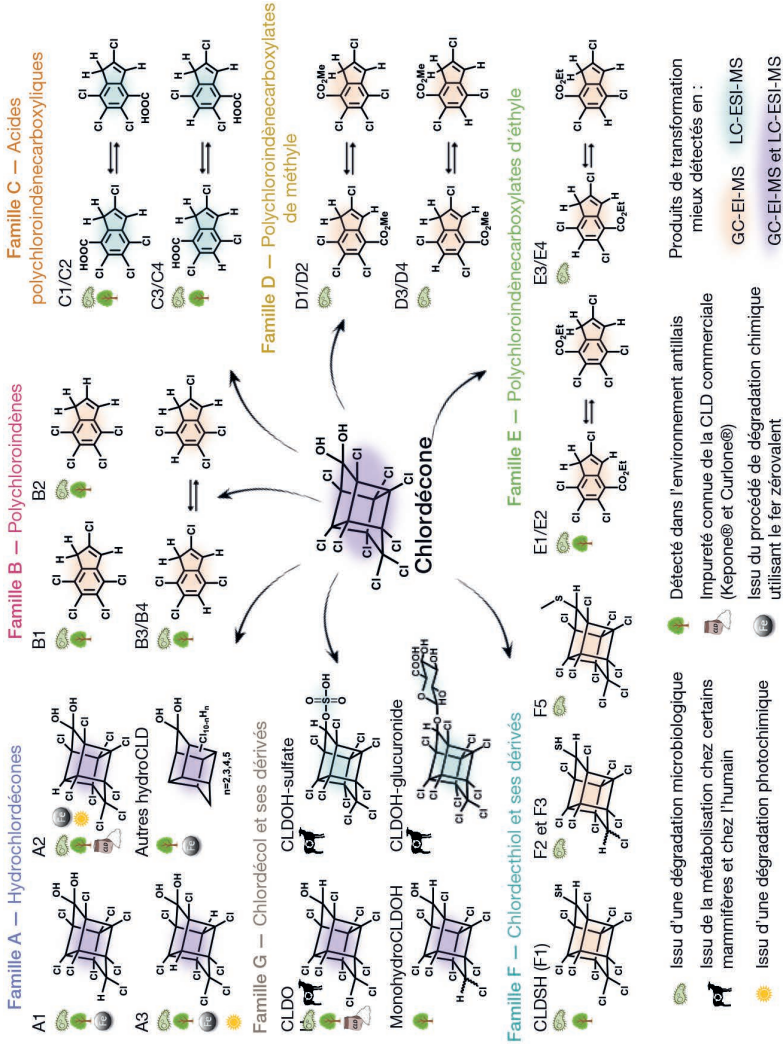


Figure 2.4. La chlordécone et ses sept familles de produits de transformation.

Tous les produits de transformation connus ne sont pas décrits ici; les 10- et 8-monohydrochlorodécones A1 et A2 sont également nommés 5- et 5b-monohydrochlorodécones, respectivement selon la nomenclature du *Chemical Abstracts Service*. CLD : chlordécone; GC-EI-MS : chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse avec un mode d'ionisation en impact électronique; LC-ESI-MS : chromatographie en phase liquide couplée à la spectrométrie de masse avec un mode d'ionisation de type électrospray.

## ► Historique et état des lieux des méthodes de dosage de la chlordécone et de ses produits de transformation

### Contexte général

#### Accident d'Hopewell et premières mesures de dosage dans le sang

En 1975, à Hopewell (Virginie, États-Unis), des ouvriers et des employés travaillant dans une usine de fabrication de Kepone® (chlordécone) ont présenté des troubles de santé, notamment neurologiques (Cannon *et al.*, 1978). Cette situation a entraîné un suivi clinique de ces personnes et une analyse des conditions de travail et des teneurs en chlordécone sur le site. Les méthodes d'analyse de la chlordécone dans les échantillons de sang comportaient une extraction avec un mélange de solvants organiques (hexane/diéthyléther ou hexane/acétone, généralement), suivie d'une étape de lavage par élution de l'extrait au travers d'une cartouche de Florisil®. La détermination quantitative de la chlordécone était alors effectuée par GC-ECD. Toutefois, ces méthodes n'étaient pas très sensibles dans la mesure où il était difficile de mesurer des concentrations inférieures à 3 µg/l de chlordécone dans le sérum, c'est-à-dire les concentrations les plus faibles mesurées sur les échantillons d'Hopewell. À l'époque (fin des années 1970, début des années 1980), en dessous de cette limite, et plus généralement sous 5 µg/l, les patients étaient considérés comme non contaminés.

#### Le développement de méthodes analytiques dans les matrices humaines

Historiquement, c'est à cette époque que les scientifiques ont développé de nouvelles méthodes d'analyse de la chlordécone dans les matrices biologiques\* (US EPA, 1980). Elles suivent toutes le même canevas, à savoir une extraction liquide-liquide avec des solvants organiques, une purification sur Florisil® et une analyse en GC-ECD. Des confirmations de la nature du composé étaient effectuées par chromatographie en couche mince ou par les techniques, récentes pour l'époque, de spectrométrie de masse (GC-MS), mais dont la sensibilité était de plusieurs ordres de grandeur inférieure à celle de la GC-ECD. Parallèlement, Blanke *et al.* (1977) faisaient figure de précurseurs en développant une méthode d'analyse de la chlordécone comportant un standard interne de recouvrement (chlordécone marquée à l'isotope  $^{14}\text{C}$  ou  $^{14}\text{C}$ -CLD) qui permettait d'obtenir des résultats plus reproductibles que ceux obtenus par les méthodes développées dans les années 1960 et sur de petits volumes de sang ou de sérum (1 à 2 ml). Les extractions étaient de type liquide-liquide à différents pH sans utilisation de cartouche Florisil®. Toutefois, leur limite de détection\* (LOD) était encore relativement élevée (5 µg/l). La même équipe de chercheurs s'est appuyée sur la méthode de Blanke *et al.* (1977) pour analyser la chlordécone dans le foie, les urines, les fèces et la bile d'animaux (Cohn *et al.*, 1978; Fariss *et al.*, 1980; Boylan *et al.*, 1979). 10 ml d'urine, 1 g de fèces et 1 ml de bile étaient respectivement utilisés pour les extractions suivies d'analyses par GC-ECD et/ou GC-MS. Ces méthodes historiques ont été utilisées par la suite pour les développements analytiques de la chlordécone. Alors que Blanke *et al.* (1977), Cohn *et al.* (1978), Boylan *et al.* (1979) utilisent la  $^{14}\text{C}$ -CLD pour corriger les performances analytiques, Fariss *et al.* (1978) la remplacent par la monohydrochlorécone A2 fournie par l'US EPA (*United States Environmental Protection Agency*, Agence américaine pour la protection de l'environnement).

## Mise en évidence de la nécessité du suivi de la chlordécone aux Antilles

C'est à l'occasion de contrôles de qualité de sources d'eau entre la fin des années 1990 et le début des années 2000 qu'une quantité particulièrement élevée de chlordécone (jusqu'à plus de 100 fois la norme), analysée parmi d'autres pesticides, sera découverte en Martinique puis en Guadeloupe, signant le début de la prise de conscience et l'éclatement du scandale sanitaire (chapitre 1 ; figure 2.5).

## Évolution des techniques utilisées pour l'analyse de la chlordécone

La GC-ECD est d'abord utilisée dès les années 1970 pour déterminer et quantifier la chlordécone en raison de la spécificité du détecteur à capture d'électrons (ECD) pour les composés halogénés, ce qui lui confère une grande sensibilité pour ce type de molécules (figure 2.6). Cependant, cette technique est très sensible à la présence d'interférents dans l'échantillon et n'est pas suffisamment spécifique pour garantir une identification sans équivoque des composés. Il est nécessaire de confirmer la présence de chaque composé, tel que la chlordécone, en réalisant une seconde analyse, soit en GC-ECD avec une colonne chromatographique différente, soit par une détection de type spectrométrie de masse (MS). Cette lourdeur (double analyse) et les progrès de la technique par MS incitent les laboratoires à remplacer progressivement la GC-ECD par la GC-MS puis par la chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse en tandem (GC-MS/MS ; figure 2.6). L'utilisation de la MS permet une identification fiable de la molécule en une seule analyse, et le tandem MS-MS présente une plus grande sensibilité que la MS simple. À partir des années 2000, on trouve donc majoritairement des méthodes d'analyse par GC-MS et MS/MS. Les premiers essais en chromatographie en phase liquide à haute performance (HPLC) couplée à un détecteur ultraviolet-visible (George *et al.*, 1986) ou à un spectromètre de masse avec ionisation chimique (Cairns *et al.*, 1982) datent des années 1980, mais ne sont pas considérés convaincants. Il faut attendre l'arrivée des instruments de type chromatographie en phase liquide couplée à la spectrométrie de masse en tandem (LC-MS/MS) avec l'ionisation douce par électrospray (ESI) pour que soit décrit un protocole de détection de la chlordécone par LC-ESI-MS/MS ayant des performances comparables aux approches par GC-MS/MS et GC-ECD (Moriwaki et Hasegawa, 2004 ; figure 2.6). Avec les récents progrès de l'instrumentation, la sensibilité de la détection de la chlordécone peut même s'avérer meilleure en LC-MS/MS qu'en GC-MS/MS. La nature des matrices joue également un rôle prépondérant pour l'analyse de la chlordécone, notamment en raison des propriétés physico-chimiques particulières de la molécule. De nombreux protocoles d'extraction et de purification ont donc dû être mis au point pour chaque type de matrices et ont évolué au fur et à mesure de l'apparition de nouvelles techniques. L'emploi d'un étalon interne ajouté dès l'extraction de l'échantillon a été introduit et s'est révélé souvent décisif pour la quantification fiable de la chlordécone. Cela permet de compenser et donc de corriger les effets éventuels de perte par adsorption (filtration, par exemple), de faibles ou différentes récupérations selon les échantillons, ou encore d'exaltation ou de suppression de signal dans le détecteur. L'utilisation de l'homologue marqué au carbone 13 ( $^{13}\text{C}_{10}$ -chlordécone) est la meilleure solution, mais ce composé est très onéreux. Elle constitue donc un coût élevé pour les laboratoires et a un impact sur le prix final de l'analyse.

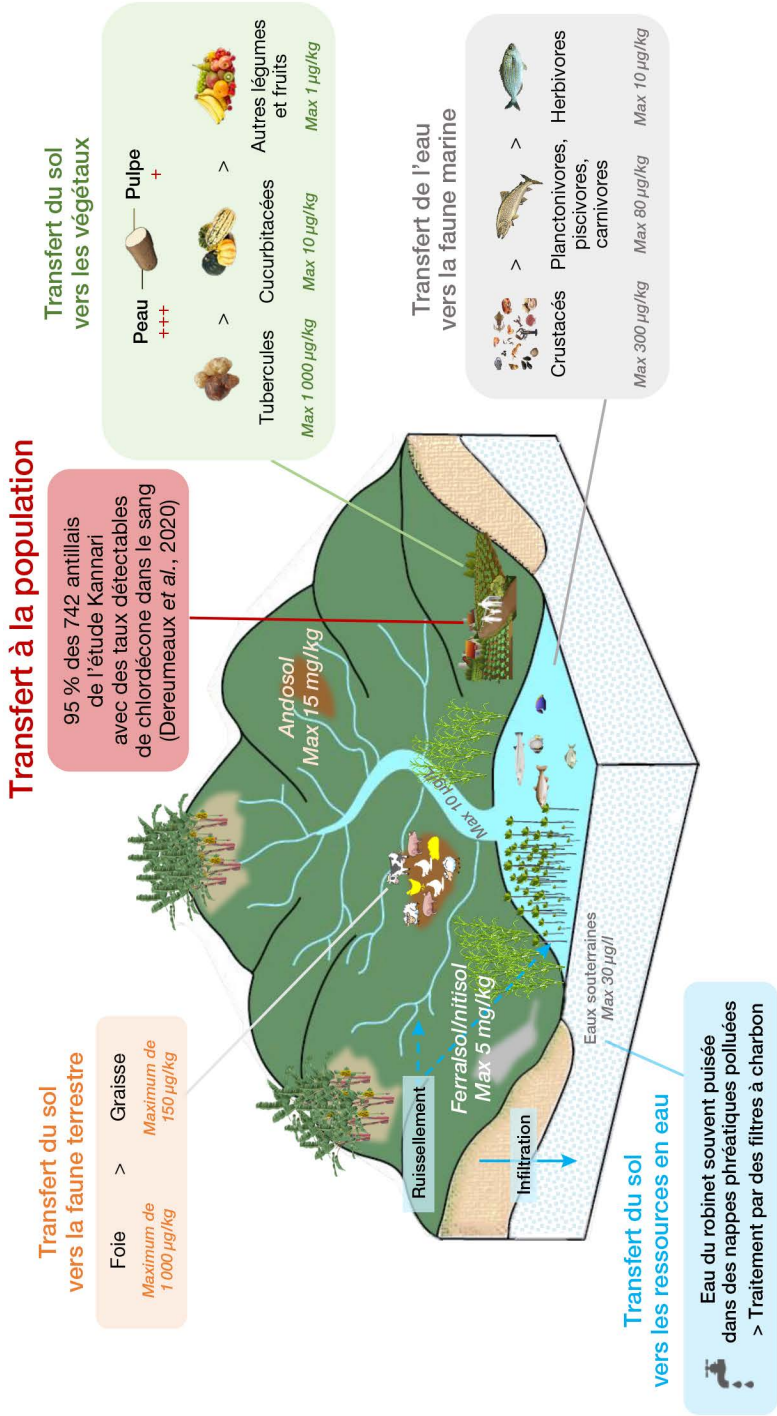
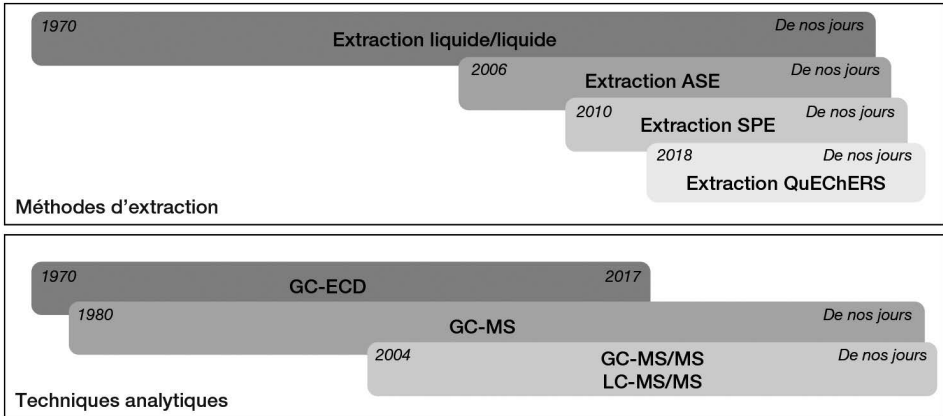


Figure 2.5. Pollution à la chlordécone aux Antilles, transfert du sol vers les autres compartiments, les organismes vivants et l'humain.

Les valeurs maximales sont données à titre indicatif.



**Figure 2.6.** Évolution temporelle des principales techniques d'analyse et d'extraction utilisées pour le dosage de la chlordécone.

ASE : extraction accélérée par solvant; SPE : extraction sur phase solide; QuEChERS : *quick, easy, cheap, effective, rugged and safe* (rapide, facile, peu coûteuse, efficace, robuste et sécuritaire). GC-ECD : chromatographie en phase gazeuse couplée au détecteur à capture d'électrons; GC-MS : chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse; GC-MS/MS : chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse en tandem; LC-MS/MS : chromatographie en phase liquide couplée à la spectrométrie de masse en tandem.

## Matrices environnementales

### Matrice eau

La matrice environnementale\* la plus simple à analyser est l'eau. Il existe différents types d'eaux et certaines présentent une complexité particulière due à la présence de particules en suspension généralement hydrophobes (matière organique pour les eaux usées, particules fines ou colloïdes organominéraux provenant de sol et de sédiment pour les eaux superficielles) sur lesquelles la chlordécone se fixe de manière préférentielle. Les étapes de filtration ou de centrifugation éventuellement introduites doivent être interprétées en gardant en tête ces phénomènes et les résultats doivent clairement indiquer s'ils tiennent compte ou non de la chlordécone adsorbée (Cimetièrre *et al.*, 2014). Généralement, pour les eaux, l'extraction liquide-liquide est privilégiée, notamment avec l'usage du dichlorométhane ou d'un mélange de solvants apolaire-polaire en raison de la nature relativement polaire de la chlordécone. L'extraction après basification n'est pas efficace comme le montrent Spingarn *et al.* (1982) avec une très faible récupération de la chlordécone (7 à 11 % selon le type d'eaux) et un seuil de détection de 18 µg/l. L'ajout d'une étape de purification de l'extrait sur des colonnes Florisil® après extraction liquide-liquide suivie d'une analyse par GC-ECD conduit dès la fin des années 1970 à de bien meilleurs taux de récupération (> 90 %) et à une sensibilité améliorée jusqu'à 0,02 µg/l pour trois litres d'eau prélevés (Saleh et Lee, 1978). Les limites de détection peuvent être encore abaissées à des niveaux inférieurs à 0,015 µg/l en utilisant de très grands volumes (20 l d'eau) et une extraction sur résine XAD-2 tout en conservant une très bonne récupération (91 %) et une excellente précision (4 % RSD<sup>7</sup>) (Harris *et al.*, 1980).

7. RSD : écart type relatif (pour *Relative Standard Deviation*).

L'émergence de la technique par LC-MS/MS dans les années 2010 ouvre la voie à des méthodes directes par simple filtration et injection en LC-MS/MS (Cimetière *et al.*, 2014; Gonzalez *et al.*, 2019) et à des protocoles enchaînant extraction liquide-liquide, concentration puis analyse LC-MS/MS. Les limites de quantification\* (LOQ) sont ainsi abaissées jusqu'à environ 0,001 µg/l (Gonzalez *et al.*, 2019; Hubas *et al.*, 2022) (tableau 2.1).

Il est intéressant de noter que les dosages des eaux de rivières et des eaux souterraines organisés par l'observatoire Opale en Martinique et en Guadeloupe sont réalisés depuis de nombreuses années par le BRGM et le LDA26 (aujourd'hui Terana Drôme) (tableau 2.1). Ces deux laboratoires, qui proposent ces prestations analytiques en routine, appliquent une extraction liquide-liquide, suivie dans un cas d'une analyse GC-MS/MS et dans l'autre cas d'une analyse LC-MS/MS. Leurs limites de quantification (0,03 µg/l et 0,01 µg/l, respectivement) sont plus élevées que les méthodes plus récentes de Gonzalez *et al.* (2019) et Hubas *et al.* (2022), mais elles restent parfaitement adaptées à la surveillance des sites d'eau douce pollués dont les concentrations en chlordécone sont très supérieures (> 0,5 µg/l) (tableau 2.1; figure 2.5; Martin *et al.*, 2024).

D'autres approches alternatives sont également développées comme la micro-extraction par phase solide (SPME; pour *Solid Phase Micro-Extraction*) couplée à la GC. Cette technique automatisée qui évite le recours à des solvants d'extraction permet de concentrer la chlordécone sur une fibre avant injection sur GC, ce qui conduit à des limites de quantification allant jusqu'à 0,015 µg/l en SPME-GC-MS (Martin *et al.*, 2024) et 0,002 µg/l en SPME-GC-MS/MS (Soler *et al.*, 2014). L'utilisation d'échantillonneurs passifs POCIS (*Polar Organic Chemical Integrative Sampler*, échantillonneur intégratif de composés organiques polaires) suivie d'une analyse LC-MS/MS (Gonzalez *et al.*, 2019) est une autre approche novatrice. Elle a été développée par l'équipe de Budzinski (EPOC, CNRS, université de Bordeaux) pour répondre à une double problématique : (i) descendre sous la limite de 0,001 µg/l pour étudier les eaux environnementales très faiblement contaminées, comme celles du littoral antillais; (ii) apporter des valeurs de concentration en chlordécone moyennées sur un ou plusieurs jours, plus facilement exploitables que les données issues de prélèvements ponctuels pour l'étude des masses d'eau en mouvement (rivières, mer) (Dromard *et al.*, 2022).

## Sols et sédiments

La difficulté pour les matrices solides, sols et sédiments est la forte capacité d'adsorption de la chlordécone ( $K_{oc}$  estimé entre 2000 et 20000 l/kg selon les études et les types de matrices solides) (Cabidoche *et al.*, 2009; Cimetière *et al.*, 2014), en particulier certains sols antillais très riches en matières organiques et en allophanes\* (andosols\*). Cela peut conduire à des difficultés particulières pour récupérer la molécule. Les méthodes privilégiées dans les années 1970-1980 consistaient principalement en une étape d'extraction avec un appareil de Soxhlet utilisant divers solvants, suivie d'une purification par colonne Florisil® et d'une analyse par GC-ECD (Moseman *et al.*, 1977; Saleh et Lee, 1978; US EPA, 1980). Ces études montrent de bons taux de récupération (> 85%), une sensibilité pouvant atteindre 10 µg/kg (Moseman *et al.*, 1977; Saleh et Lee 1978) et une bonne reproductibilité (< 6% RSD; Saleh et Lee, 1978). Ces protocoles ont servi au suivi de la pollution des sols autour de l'usine de production de la chlordécone à Hopewell ainsi qu'à l'étude des sédiments du fleuve James adjacent dans les années 1970 et 1980 (Huggett et Bender, 1980; Nichols, 1990).

Tableau 2.1. Évolution des techniques et des performances des protocoles de dosage dans la matrice eau.

Type de matrice	Prise d'essai	Technique d'extraction et de purification	Méthode d'analyse	Performance	Référence
Eaux de surface	50 ml	Extraction liquide-liquide; purification optionnelle sur Florisil® selon échantillons; injection avec 1-2% de méthanol	GC-ECD	LOD 0,04 µg/l	Moseman <i>et al.</i> , 1977 Méthode US EPA
Eaux	3 l	Extraction liquide-liquide; purification sur Florisil®	GC-ECD	LOD 0,02 µg/l	Saleh et Lee, 1978
Eaux	20 l	Extraction sur résine XAD2; purification sur Florisil®	GC-ECD	< 0,015 µg/l	Harris <i>et al.</i> , 1980
Eaux	1 l	Acidification; extraction liquide-liquide au dichlorométhane (ajout d'isopropanol 2%)	GC-ECD avec colonne capillaire	LOD 0,002 µg/l	Deleon <i>et al.</i> , 1980
Eaux usagées	1 l	Extraction par le dichlorométhane à pH basique	GC-MS	LOD 18 µg/l	Spingarn <i>et al.</i> , 1982
Eau distillée	10 µl injectés		LC-MS/MS	0,007 µg/l	Moriwaki et Hasegawa, 2004
Eau potable, eau de surface et surnageant de boue de station d'épuration	5 ml (ou moins)	Injection directe avec dilution par CH <sub>3</sub> CN et filtration	LC-MS/MS	LOQ 1,5-2 µg/l	Cimetièrre <i>et al.</i> , 2014
Eaux de surface et eaux souterraines	20 ml	Extraction SPME par immersion directe	GC-MS/MS	LOQ 0,002 µg/l	Soler <i>et al.</i> , 2014
Eaux	100 ml	Extraction liquide/liquide	LC-MS/MS	LOQ 0,015 µg/l	He <i>et al.</i> , 2015
Eaux	10 ml et 1 l	Extraction liquide-liquide; purification par du H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> à 98%	GC-ECD	LOQ 0,000 01 µg/l	Lafontaine <i>et al.</i> , 2016 Méthode Cart
Eaux usées	100 ml	Extraction liquide/liquide à pH acide	GC-MS/MS	LOD 0,1 µg/l	Devault <i>et al.</i> , 2018

Tableau 2.1. (suite)

Type de matrice	Prise d'essai	Technique d'extraction et de purification	Méthode d'analyse	Performance	Référence
Eaux de surface et eaux de mer	1 ml	Filtration; injection directe	LC-MS/MS	LOQ 0,001 5 µg/l	Gonzalez <i>et al.</i> , 2019 Méthode Epoc
Eaux de surface et eaux de mer		Accumulation sur Pocis (phase Oasis HLB); extraction solide-liquide	LC-MS/MS	LOQ extrapolée 0,000 01 µg/l	Gonzalez <i>et al.</i> , 2019 Méthode Epoc Pocis
Eaux de surface et eaux souterraines	1 l	Extraction liquide-liquide à différents pH	LC-MS/MS	LOQ 0,01 µg/l	Rochette <i>et al.</i> , 2020 Méthode LDA26
Eaux de surface	100 ml	Extraction liquide-liquide	LC-MS/MS	LOQ 0,001 µg/l	Hubas <i>et al.</i> , 2022
Eaux de surface et eaux souterraines	500 ml	Extraction liquide-liquide	GC-MS/MS	LOQ 0,03 µg/l	Martin <i>et al.</i> , 2024 Méthode BRGM
Eaux de surface et eaux souterraines	20 ml	Extraction SPME par immersion directe	GC-MS	LOQ 0,015 µg/l	Martin <i>et al.</i> , 2024 Méthode Genoscope

SPME : micro-extraction par phase solide; HLB : *hydrophilic-lipophilic balance*; GC-ECD : chromatographie en phase gazeuse couplée au détecteur à capture d'électrons; GC-MS : chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse; LC-MS/MS : chromatographie en phase liquide couplée à la spectrométrie de masse en tandem; GC-MS/MS : chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse en tandem; LOD : limite de détection; LOQ : limite de quantification; US EPA : *United States Environmental Protection Agency*; Cart : Centre de recherche et de technologie analytique (université de Liège, Belgique); Epoc : Unité mixte de recherche Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux (université de Bordeaux); Pocis : *Polar Organic Chemical Integrative Sampler*; LDA26 : laboratoire départemental de la Drôme; BRGM : Bureau de recherches géologiques et minières.

Il faut attendre près de trente ans pour voir un renouveau dans les protocoles d'analyse de la chlordécone dans les sols. En 2006, Amalric *et al.* s'appuient sur une technique d'extraction en plein essor à cette époque, l'extraction accélérée par solvant (ASE). Elle permet d'atteindre, après une étape de purification, des taux d'extraction satisfaisants (79%), similaires à ceux de l'appareil Soxhlet, qui est bien plus chronophage et coûteux en solvant. Une étape de purification est toujours nécessaire avant analyse. Les performances limitées (LOQ de 1 mg/kg) du protocole d'Amalric *et al.* (2006) s'expliquent par le recours à un instrument GC-MS peu sensible. Plusieurs méthodes couplant extraction par ASE et analyse GC-ECD ou GC-MS/MS permettent ensuite d'atteindre des limites de quantification équivalentes, voire meilleures (LOQ de 10-30 µg/kg) que celles obtenues à la fin des années 1970 (tableau 2.2). Au cours des dernières années, de nouvelles évolutions apparaissent avec le remplacement de la GC-MS/MS par la LC-MS/MS (Rochette *et al.*, 2020) et l'abandon de l'ASE pour une technique plus douce, plus rapide et peu onéreuse, l'extraction QuEChERS (Bizeul *et al.*, 2025; Cochenec *et al.*, 2024). Le LDA26 en charge d'une grande partie des analyses de sols antillais réalisées depuis une vingtaine d'années a ainsi appliqué trois protocoles de dosage successifs avec des performances relativement proches (LOD ou LOQ de l'ordre de 5 à 10 µg/kg). Un autre protocole dédié aux sédiments avec une combinaison d'ASE et de LC-ESI-MS/MS a permis de descendre en dessous de 1 µg/kg. Toutefois, l'absence de standard interne et d'informations sur les incertitudes\* de la méthode invite à certaines réserves (Sabatier *et al.*, 2021). Malgré toutes les améliorations effectuées, les meilleures méthodes de dosage de la chlordécone dans les sols conduisent à des incertitudes toujours très élevées, de l'ordre de 30%. Parallèlement, des protocoles alternatifs par extraction liquide-liquide et par SPME ont vu le jour (Martin-Laurent *et al.*, 2014; Soler *et al.*, 2014), mais n'ont pas été réappliqués depuis leur publication en 2014. On peut enfin noter une méthode utilisant la spectroscopie de réflectance dans le proche infrarouge (NIRS) proposée en 2009 (Brunet *et al.*, 2009); elle permet de classer les échantillons de sols les uns par rapport aux autres en matière de teneur en chlordécone, plutôt qu'une quantification précise de chaque sol. Ce niveau de performance moindre et la nécessité de calibrer la méthode avec un grand nombre d'échantillons (> 50) au préalable pour chaque type de sol antillais n'ont jusque-là pas convaincu la communauté scientifique à la plébisciter.

## Matrices biologiques

### Dans le sérum

#### Avertissement

Les méthodes d'analyse de la chlordécone dans le sérum humain et dans le sérum des autres vertébrés sont similaires. Il sera donc traité dans cette partie de l'évolution des méthodes mises au point sur le sérum humain, mais aussi de celles développées sur le sérum de diverses espèces animales non humaines (essentiellement porc, chèvre et mouton).

Pour pouvoir réaliser un suivi du niveau de contamination de la population des Antilles françaises, il convenait de disposer de méthodes suffisamment sensibles. Or, les limites de détection les plus faibles des méthodes développées jusqu'au début des années 2000 (de l'ordre du microgramme par litre pour le sérum et le sang; tableau 2.3)

**Tableau 2.2.** Historique des principales méthodes de dosage dans les matrices environnementales solides.

Type de matrice	Prise d'essai	Technique d'extraction et de purification	Méthode d'analyse	Performance	Incertitude (k = 2)	Références
Sédiments et sols	20 g	Extraction par Soxhlet; préconcentration sur cartouche Florisil®; injection avec 1-2% de méthanol	GC-ECD	LOD 10-20 µg/kg		Moseman <i>et al.</i> , 1977 US EPA, 1980 Méthode US EPA
Sédiments	10 g	Séchage; extraction liquide-solide; préconcentration sur Florisil®	GC-ECD	LOD 10µg/kg	RSD < 6 %	Saleh et Lee, 1978
Sols	10 g	ASE	GC-MS	LOQ 1000 µg/kg	30 %	Amalric <i>et al.</i> , 2006
Sols	ASE	ASE	GC-MS/MS	LOQ 10µg/kg	30 %	Cabidoche <i>et al.</i> , 2009 Méthode 1 LDA26
Sols	ASE; lavage H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Standards internes hexabromobenzène et triphénylphosphate	GC-ECD ou GC-MS/MS	GC-ECD ou GC-MS/MS	LOQ 10µg/kg	30 %	Woignier <i>et al.</i> , 2012 LDA972
Sols	5 g ASE	ASE	GC-MS/MS	LOQ 30µg/kg	40 %	Bristeau <i>et al.</i> , 2012 Méthode BRGM
Sols	0,5 g	Sol broyé et mélangé à de l'eau; immersion directe; extraction SPME	GC-MS/MS	LOQ 0,08 µg/kg	RSD < 30 %	Soler <i>et al.</i> , 2014
Sols	Extraction liquide-liquide	Extraction liquide-liquide	GC-MS	LOD 9 µg/kg	30 %	Martin-Laurent <i>et al.</i> , 2014
Sols	10 g ASE	ASE	LC-MS/MS	LOQ 5 µg/kg	40 %	Rochette <i>et al.</i> , 2020 Méthode 2 LDA26
Sédiments	3 g ASE; purification par SPE (colonne HLB)	ASE; purification par SPE (colonne HLB)	LC-MS/MS	LOD de l'ordre de 0,1 µg/kg		Sabatier <i>et al.</i> , 2021
Sédiments et sols	Extraction QuEChERS (ACN)	Extraction QuEChERS (ACN)	LC-MS/MS	LOQ 10µg/kg		Bizeul <i>et al.</i> , 2025 Méthode 3 LDA26
Sols	2 g Extraction QuEChERS (ACN)	Extraction QuEChERS (ACN)	LC-MS/MS	LOQ 2 µg/kg		Cochenec <i>et al.</i> , 2024

ASE : extraction par solvant accélérée; SPME : micro-extraction par phase solide; SPE : extraction sur phase solide; colonne HLB : *hydrophilic-lipophilic balanced column* (colonne avec un caractère à la fois hydrophile et lipophile); QuEChERS : *quick, easy, cheap, effective, rugged and safe* (rapide, facile, peu coûteuse, efficace, robuste et sécuritaire); ACN : acétonitrile; GC-ECD : chromatographie en phase gazeuse couplée à un détecteur à capture d'électrons; GC-MS : chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse; GC-MS/MS : chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse en tandem; LC-MS/MS : chromatographie en phase liquide couplée à la spectrométrie de masse en tandem; LOD : limite de détection; LOQ : limite de quantification; RSD : *Relative Standard Deviation*; US EPA : *United States Environmental Protection Agency*; LDA26 : laboratoire départemental de la Drôme; BRGM : Bureau de recherches géologiques et minières.

étaient totalement insuffisantes pour envisager des études épidémiologiques. Le développement d'une méthode plus sensible était nécessaire et a été confié au Centre de recherche et de technologie analytique (université de Liège; Cart pour *Center for Analytical Research and Technology*). Le défi était de taille, du fait de la présence du radical cétone/gem-diol et des quantités d'échantillon (2 ml maximum).

Au cours des quinze dernières années, la sensibilité d'analyse de la chlordécone en laboratoire s'est sans cesse améliorée par l'adaptation de la méthode originale initialement développée et décrite dans Multigner *et al.* (2010). Pour la première fois, la méthode développée ne comportait pas d'extraction liquide-liquide avec des solvants organiques, mais consistait en une étape d'extraction par enrichissement et de purification simultanée de l'échantillon sanguin (plasma ou sérum). Cette technique appelée « extraction sur phase solide » (SPE) nécessite l'utilisation de microcartouches remplies d'une phase retenant les composés recherchés, puis éluées avec un solvant adéquat pour l'analyse chromatographique en GC-ECD, en GC-MS/MS ou en chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse à haute résolution (GC-HRMS). Toutefois, cette nouvelle méthode présente quelques problèmes liés à la structure de la chlordécone et à sa tendance, lorsqu'elle se trouve dans un solvant apolaire comme l'hexane, à s'adsorber sur la paroi en verre de la seringue d'injection, ce qui provoque une légère rémanence visible lors des injections successives, et complique singulièrement la quantification de cet insecticide dans le sérum humain. Pour éviter ce problème, 2% de méthanol ont été ajoutés aux extraits hexaniques avant injection, comme préconisé par Blanke *et al.* (1977) et l'US EPA (1980). Dans ces conditions, les valeurs de LOD et de LOQ dans le sérum étaient respectivement de 0,02 µg/l et de 0,06 µg/l.

Le Laboratoire d'étude des résidus et contaminants dans les aliments (Laberca; Bichon *et al.*, 2015) a développé une méthode très sensible pour mesurer les concentrations de chlordécone dans le sérum humain. Après une SPE avec une cartouche C18, ces auteurs éluent la chlordécone à l'aide d'acétonitrile (ACN) et réalisent une purification ultérieure à l'acide formique au lieu du H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. L'analyse des extraits est effectuée en LC-MS/MS. Ils obtiennent une LOQ de 0,025 µg/l dans le sérum, soit environ deux fois plus sensibles que chez Fournier *et al.* (2017). Le Cart (Fourcot *et al.*, 2020) a continué à améliorer la méthode de dosage de la chlordécone en adoptant une analyse en GC-MS/MS. En outre, la monohydrochlordécone A2 (standard interne de recouvrement) a été remplacée par la 10-monohydrochlordécone A1 (fournie par l'équipe de Saaidi), jamais retrouvée dans des échantillons de sérum ni d'autres matrices biologiques jusque-là. Les différentes étapes d'extraction et de purification étaient identiques à celles décrites par Multigner *et al.* (2010). Dans ces conditions, les LOD et LOQ étaient respectivement de 0,02 et 0,06 µg/l de sérum.

Depuis début 2019, en collaboration étroite avec le Laboratoire de spectrométrie de masse (LSM) de l'université de Liège, un autre partenaire du Cart, de nouvelles modifications aux procédures d'analyses, et notamment l'utilisation de la GC-HRMS et l'utilisation de <sup>13</sup>C<sub>10</sub>-CLD comme standard interne de recouvrement et de quantification, ont permis de diminuer encore la LOQ à 0,03 µg/l et la LOD à 0,01 µg/l dans le sérum.

Des recherches sont toujours en cours pour améliorer la préparation de l'échantillon avant analyse finale par GC-MS/MS ou LC-MS/MS. En collaboration avec l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Anses), l'équipe de

Tableau 2.3. Historique des principales méthodes de dosage dans les matrices sériques.

Type de matrice	Prise d'essai	Technique d'extraction et de purification	Technique analytique	Performance	Incertitude de mesure	Référence
Sang	2 g	Liquide/liquide (hexane/diéthyl éther); lavage cartouche de Florisil®; injection avec 1-2% de méthanol	GC-ECD	LOD 5 µg/l		US EPA, 1980 Méthode US EPA
Sérum et plasma	1-2 ml	Liquide/liquide hexane-acétone (85-15); purification H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ; <sup>14</sup> C-CLD standard interne	GC-ECD	LOQ 5 µg/l	14 %	Blanke <i>et al.</i> , 1977
Sérum et sang	1 ml	Liquide/liquide benzène, NaOH; purification H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	GC-ECD	LOD 10 µg/l	7 %	Caplan <i>et al.</i> , 1979
Sérum	4 ml	Liquide/liquide MeOH; hexane/éthyl éther (1:1; v/v); purification H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + HPLC	GC-MS/MS GC-ECD	LOQ 1,25 µg/l LOQ 1 µg/l	10 %	Garrido French <i>et al.</i> , 2003
Sérum	2 ml	Extraction SPE sur C18; PCB209 standard interne	GC-ECD	LOQ 0,75 µg/l		Multigner <i>et al.</i> , 2010 Méthode 1 Cart
Sérum	0,5-1 ml	Extraction SPE sur C18; <sup>13</sup> C <sub>10</sub> -CLD standard interne	LC-MS/MS	LOQ 0,025 µg/l		Bichon <i>et al.</i> , 2015 Méthode Laberca
Sérum	2 ml	Extraction SPE sur C18; A2 standard interne	GC-ECD	LOQ 0,06 µg/l	19 %	Fournier <i>et al.</i> , 2017 Méthode 2 Cart
Sérum	2 ml	Extraction SPE sur C18; A1 standard interne	GC-MS/MS	LOQ 0,06 µg/l	6 %	Fourcot <i>et al.</i> , 2020 Méthode 3 Cart
Sérum	2 ml	Extraction SPE sur C18; <sup>13</sup> C <sub>10</sub> -CLD standard interne	GC-HRMS	LOQ 0,029 µg/l	17 %	Saint-Hilaire <i>et al.</i> , 2023 Méthode 4 Cart
Sérum	2 ml	Extraction QuEChERS (ACN) sans étape de purification; <sup>13</sup> C <sub>10</sub> -CLD standard interne	LC-MS/MS	LOQ 0,06 µg/l	21 %	Saint-Hilaire <i>et al.</i> , 2023 – Méthode Institut Pasteur de la Guadeloupe
Sérum	1 ml	Extraction QuEChERS (ACN) avec étape de purification; <sup>13</sup> C <sub>10</sub> -CLD standard interne	LC-MS/MS	LOQ 0,02 µg/l		El Balkhi et Saint-Macroux, 2023 Méthode CHU Limoges

CLD : chlordécone; v : volume; HPLC : chromatographie en phase liquide à haute performance; SPE : extraction sur phase solide; QuEChERS : *quick, easy, cheap, effective, rugged and safe* (rapide, facile, peu coûteuse, efficace, robuste et sécuritaire); ACN : acétonitrile; GC-ECD : chromatographie en phase gazeuse couplée au détecteur à capture d'électrons; GC-MS/MS : chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse en tandem; LC-MS/MS : chromatographie en phase liquide couplée à la spectrométrie de masse en tandem; GC-HRMS : chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse à haute résolution; LOD : limite de détection; LOQ : limite de quantification; US EPA : *United States Environmental Protection Agency*; Cart : Centre de recherche et de technologie analytique (université de Liège); Laberca : Laboratoire d'étude des résidus et contaminants dans les aliments; CHU : centre hospitalier universitaire.

Pichon a développé un polymère à empreinte moléculaire capable de fixer la chlordécone. Les premiers tests réalisés sur un extrait de sérum bovin dopé en chlordécone démontrent une meilleure efficacité et un gain de temps par rapport au protocole usuel de SPE avec une phase C18 (Bosman *et al.*, 2021). Cette technologie n'a cependant pas encore été intégrée à un protocole complet de dosage de la chlordécone, ce qui empêche de conclure définitivement sur la plus-value de cette approche.

En 2021, Saint-Hilaire *et al.* ont appliqué pour la première fois la méthodologie QuEChERS au dosage de la chlordécone et de ses métabolites dans le sérum animal. C'est une méthode d'extraction liquide-liquide ou liquide-solide douce et rapide, qui permet l'analyse d'un grand nombre d'échantillons. Elle repose sur deux grandes étapes : (i) une étape d'extraction et *salting-out* avec de l'ACN et des sels inorganiques ; (ii) une étape de purification, au besoin au moyen de phases dispersives en fonction des matrices. Dans le sérum, l'extraction se fait à l'aide de la première étape avec utilisation de l'étalon interne  $^{13}\text{C}_{10}$ -CLD. Récemment, cette méthode a été étendue (Saint-Hilaire *et al.*, 2023) avec une LOD et une LOQ de 0,02 µg/l et 0,06 µg/l respectivement dans le sérum humain et une incertitude de mesure de 21 %. En plus de cette validation, une comparaison entre la méthode du Cart et de l'Institut Pasteur de Guadeloupe (IPG) a été effectuée sur 49 échantillons de sérum humain. À ce jour, l'ensemble des méthodes permettent d'obtenir des LOD et LOQ proches par GC-MS/MS et LC-MS/MS (Bichon *et al.*, 2015 ; Saint-Hilaire *et al.*, 2023 ; El Balkhi et Saint-Marcoux, 2023 ; tableau 2.3).

### Autres matrices biologiques

La première méthode de dosage de la chlordécone dans la bile, les urines et les fèces des animaux a été développée par Blanke *et al.* en 1977, puis améliorée par Fariss *et al.* (1980). Elle a ensuite été appliquée à différentes matrices notamment aux urines et aux fèces de gerbilles (Houston *et al.*, 1981) et de porcs (Soine *et al.*, 1983). L'étalon interne utilisé était la monohydrochlordécone A2. Plus récemment, en 2018, Saint-Hilaire *et al.*, qui étudiaient le devenir de la chlordécone chez les animaux d'élevage, ont développé une méthode de dosage de la chlordécone et ses métabolites (CLDOH et les conjugués de la chlordécone et du CLDOH) dans les urines et les fèces. Cette méthode s'est appuyée sur la méthodologie QuEChERS utilisée pour la première fois dans ces matrices et une analyse par LC-MS/MS. L'utilisation de l'étalon interne  $^{13}\text{C}_{10}$ -CLD permet une correction précise des taux de récupération de la molécule (Saint-Hilaire *et al.*, 2018a ; tableau 2.4).

### Matrices alimentaires

Dans les années 1970, la pollution du fleuve James et de son estuaire a conduit à la contamination de nombreux organismes aquatiques consommés (poissons et huîtres). Cela a très rapidement poussé l'US EPA à mettre au point des méthodes dans ces matrices (tableau 2.5). Depuis 2005, les autorités françaises ont mis en place une limite maximale de résidus (LMR) afin de limiter l'exposition des consommateurs à la chlordécone. La première méthode de référence de dosage par GC-ECD et GC-MS/MS dans les matrices alimentaires\* : poissons, viande, lait, œufs, tissu gras, fruits et légumes a été mise en place en 2007 par le Laboratoire de sécurité des aliments de l'Anses (LSAI) de Maisons-Alfort (tableau 2.5). Des méthodes de type ASE ont aussi été mises en place par le laboratoire du Laberca (Bichon *et al.*, 2015) sur le

Tableau 2.4. Historique des principales méthodes de dosage dans les matrices biologiques non sériques.

Type de matrice	Prise d'essai	Technique d'extraction et de purification	Méthode d'analyse	Performance	Incertitude (k=2)	Référence
Fèces Bile	1 g de fèces 1 ml de bile	Liquide/liquide hexane-acétone (85-15), NaOH; purification H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ; <sup>14</sup> C-CLD standard interne	GC-ECD			Blanke <i>et al.</i> , 1977
Urine Salive	10 ml	Liquide/liquide hexane-acétone (85-15); purification H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ; <sup>14</sup> C-CLD standard interne	GC-ECD			Blanke <i>et al.</i> , 1977
Bile	1 ml	Liquide/liquide hexane-acétone (85-15); purification H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ; A2 standard interne	GC-ECD et/ou GC-MS		12 %	Fariss <i>et al.</i> , 1980
Lait maternel	4-8 ml	Liquide/liquide MeOH; hexane/ethyl éther (1:1; v:v); purification H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + HPLC	GC-MS/MS	LOQ 1,25 µg/l	10 %	Frias <i>et al.</i> , 2004
Lait maternel	3 ml	Extraction SPE sur C18; <sup>13</sup> C <sub>10</sub> -CLD standard interne	LC-MS/MS	LOQ 0,008 µg/l		Bichon <i>et al.</i> , 2015
Urine Fèces	4 ml d'urine 0,6 g de fèces séchées	QuEChERS (ACN); <sup>13</sup> C <sub>10</sub> -CLD standard interne	LC-MS/MS	LOQ 3,2 µg/kg PF (fèces) 0,1 µg/l (urine)	8 % (fèces) 12 % (urine)	Saint-Hilaire <i>et al.</i> , 2018a

CLD : chlordécone ; v : volume; HPLC : chromatographie en phase liquide à haute performance; SPE : extraction sur phase solide ; QuEChERS : *quick, easy, cheap, effective, rugged and safe* (rapide, facile, peu coûteuse, efficace, robuste et sécuritaire) ; ACN : acétonitrile ; GC-ECD : chromatographie en phase gazeuse couplée au détecteur à capture d'électrons ; GC-MS : chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse ; GC-MS/MS : chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse en tandem ; LC-MS/MS : chromatographie en phase liquide couplée à la spectrométrie de masse en tandem ; LOQ : limite de quantification ; PF : poids frais.

tissu adipeux et par le Service commun des Laboratoires de Jarry en Guadeloupe dans les fruits et légumes. Entre 2015 et 2021, dans le cadre du projet de l'Agence nationale de la recherche (ANR) Inssicca (Stratégies innovantes pour sécuriser les systèmes d'élevage dans les zones contaminées par la chlordécone), une nouvelle méthode de type QuEChERS-LC-MS/MS a été mise au point pour la première fois dans le foie, en partenariat avec l'Anses de Maisons-Alfort (Saint Hilaire *et al.*, 2018b). Cette méthode a l'avantage de ne plus utiliser le méthanol comme solvant d'analyse, et d'être plus rapide et moins coûteuse que la méthode officielle. La dernière version de cette méthode (par LC-MS/MS) pour doser la chlordécone dans les matrices alimentaires a été publiée en 2021 (Lavison-Bompard *et al.*, 2021). Le LSAI a finalisé la validation des méthodes QuEChERS dans les différentes matrices alimentaires afin de proposer une méthode officielle s'appuyant sur la technologie QuEChERS aux différents laboratoires départementaux. Différents projets de recherches menées à l'Anses se sont appuyés sur l'extraction QuEChERS pour le dosage de la chlordécone dans les matrices alimentaires (Martin *et al.*, 2020; tableau 2.5).

## Les méthodes de détection et de quantification pour les produits de transformation

Les méthodes analytiques adaptées aux PT de la chlordécone sont essentielles pour : (i) comprendre le devenir de cette molécule dans l'environnement; (ii) étudier ses voies de métabolisation et d'élimination chez les animaux, et chez l'humain; (iii) évaluer l'efficacité des méthodes de dégradation et des procédés de remédiation. Le développement de tels protocoles d'analyse nécessite de connaître les PT pouvant être formés et de disposer des mêmes PT comme étalons analytiques pour réaliser des courbes de calibration et les quantifier dans les matrices réelles. Les deux PT connus au milieu des années 1970 sont les mono- et dihydrochlordécones A2 et A3, produits photochimiquement (Wilson et Zehr, 1979; figure 2.4). Structurellement proches de la molécule-mère, ils sont facilement détectés avec la méthode utilisée pour la chlordécone dès la fin des années 1970 dans des sols autour de Hopewell, ainsi que dans les poissons et crustacés du fleuve James (Borsetti et Roach, 1978; Carver et Griffith, 1979). À cette époque, l'US EPA et la société Allied Chemical jouent un rôle-clé en mettant à disposition de la communauté scientifique ces deux PT ainsi que de la chlordécone marquée au carbone 14 ( $^{14}\text{C}$ -CLD) ce qui facilite la recherche de métabolites inconnus. Les chercheurs de l'université de Virginie détectent ainsi dans les selles humaines le CLDOH dont la structure est confirmée par comparaison en GC-ECD avec un standard CLDOH synthétique (Blanke *et al.*, 1978). Cette molécule présente des propriétés chimiques différentes de la chlordécone, ce qui nécessite une modification du protocole d'extraction pour pouvoir quantifier à la fois la chlordécone et le CLDOH dans des fluides biologiques humains (Fariss *et al.*, 1980). Les chercheurs de l'université de Virginie vont plus loin et développent un protocole pour doser indirectement dans la bile les formes conjuguées issues de la métabolisation de la chlordécone chez l'humain, en particulier le CLDOH glucuroné et le CLDOH sulfaté, sans avoir recours à des étalons dédiés (Fariss *et al.*, 1980). Au début des années 1980, la communauté états-unienne bénéficie donc de méthodes d'analyse permettant de doser selon les matrices, les deux hydrochlordécones A2 et A3, le CLDOH et les formes conjuguées (figure 2.4).

Tableau 2.5. Historique des principales méthodes de dosage dans les matrices alimentaires.

Type de matrice	Prise d'essai	Technique d'extraction et de purification	Méthode d'analyse	Performance	Incertitude (k=2)	Référence
Poissons, mollusques	10 g	Extraction liquide/liquide ; purification par Florisil® ; injection avec 1 % de méthanol	GC-ECD	LOD 10-20 µg/kg		Moseman <i>et al.</i> , 1977 US EPA, 1980 Méthode US EPA
Poissons, mollusques, crustacés	25-50 g	Extraction isopropanol/benzène ; séchage Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ; purification H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ; extraction liquide/liquide avec passage milieu basique ; injection avec 1 % de méthanol	GC-ECD	LOD 20-50 µg/kg		Carver <i>et al.</i> , 1978
Poissons		Extraction Liquide/liquide (hexane/ACN) ; purification C18 et Florisil®	GC-ECD	LOD 1 µg/kg PF		Coat <i>et al.</i> , 2006
Poissons, viande, lait, œufs, tissu gras	2 g de viande ou poissons 4 g de lait ou d'œufs 0,5 g de tissu gras	Extraction liquide/liquide (hexane/acétone)	GC-ECD GC-MS/MS	LOQ 5 µg/kg (viande et poissons) 2,5 µg/kg (œufs et lait)	15 % (RSD)	Bordet <i>et al.</i> , 2007 Méthode de référence, Anses
Fruits et végétaux	5 g	Extraction liquide/liquide (acétone) et SPE	GC-ECD GC-MS/MS	LOQ 2 µg/kg (fruits) 5 µg/kg (végétaux)	8,5 % (RSD)	Bordet <i>et al.</i> , 2007 Méthode de référence, Anses
Plantes		Extraction liquide/liquide (dichlorométhane et acétone)	GC-ECD GC-MS/MS	LOQ 1 µg/kg PF	30 % (intervalle de confiance)	Woignier <i>et al.</i> , 2012
Racines d'ananas	20 g	Extraction SPME après broyage et mise en suspension dans l'eau	GC-MS			Soler <i>et al.</i> , 2014

Tableau 2.5. (suite)

Type de matrice	Prise d'essai	Technique d'extraction et de purification	Méthode d'analyse	Performance	Incertitude (k=2)	Référence
Graisse, foie, œufs et muscle		Extraction liquide/liquide hexane acétone et ACN/dichlorométhane (tissu gras)	LC-MS/MS	LOQ 2 µg/kg tissu gras, 1 µg/kg œufs, 0,05 µg/kg muscle		Jondreville <i>et al.</i> , 2014
Tissu adipeux	1 g d'échantillon lyophilisé	Extraction ASE toluène/acétone (70:30, v/v)	LC-MS/MS	LOQ 0,2 µg/kg LW		Bichon <i>et al.</i> , 2015
Foie	2 g	Extraction QuEChERS (ACN) avec étape de purification	LC-MS/MS	LOQ 1,4 µg/kg PF	12 %	Saint-Hilaire <i>et al.</i> , 2018b
Matrices cuites : viande de bœuf	4 g	Extraction QuEChERS (ACN) avec étape de purification	LC-MS/MS	LOQ 5,8 µg/kg de viande cuite		Martin <i>et al.</i> , 2020
Tissu gras, foie et muscles	2 g de muscle et foie 0,5 g de tissu gras	Extraction liquide/liquide (hexane/acétone)	LC-MS/MS	LOQ 3 µg/kg PF	20 %	Lavison-Bompard <i>et al.</i> , 2021 Méthode de référence, Anses

ACN : acétonitrile; SPE : extraction sur phase solide; SPME : micro-extraction par phase solide; ASE : extraction accélérée par solvant; v : volume; QuEChERS : *quick, easy, cheap, effective, rugged and safe* (rapide, facile, peu coûteuse, efficace, robuste et sécuritaire); GC-ECD : chromatographie en phase gazeuse couplée au détecteur à capture d'électrons; GC-MS/MS : chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse en tandem; GC-MS : chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse; LC-MS/MS : chromatographie en phase liquide couplée à la spectrométrie de masse en tandem; LOD : limite de détection; LOQ : limite de quantification; PF : poids frais; LW : *Lipid weight* (poids en lipides); RSD : *Relative Standard Deviation* (écart type relatif).

Les premières analyses à grande échelle des sols et des eaux aux Antilles dans les années 2000 visent à établir une cartographie de la pollution en ciblant avant tout la chlordécone. Le LDA26 inclut en plus dans sa méthode multirésidus la monohydrochlordécone A2 et le CLDOH, les deux seuls PT commercialement disponibles à cette époque. Depuis les années 2010, le BRGM travaille sur un procédé de dépollution des sols par réduction chimique *in situ* utilisant le fer zérovalent (chapitre 9). Les chercheurs constatent la formation de nombreuses hydrochlordécones lors des expériences de dégradation en laboratoire (Belghit *et al.*, 2015). La société AlphaChimica fournit alors au BRGM plusieurs standards hydrochlordécones (notamment une monohydrochlordécone et une trihydrochlordécone) lui permettant de les intégrer aux méthodes déjà utilisées en routine pour la chlordécone (eau, culture microbiologique, sol, végétaux) (Mouvet et Bristeau, 2016; Hellal *et al.*, 2021; Martin *et al.*, 2024). Parallèlement, les chercheurs de l'unité de Recherche Animale et Fonctionnalités des Produits Animaux (université de Lorraine; Urafpa) travaillent sur le devenir de la chlordécone chez les animaux d'élevage contaminés. Pour étudier son élimination et sa métabolisation sous forme de CLDOH et conjugués, ils reprennent la stratégie de déconjugaison enzymatique décrite en 1980 sur la bile (Fariss *et al.*, 1980) et l'adaptent avec succès à la matrice urine avec un protocole d'extraction QuEChERS et une analyse par LC-MS/MS (Saint-Hilaire *et al.*, 2018a). Les travaux du Genoscope sur la dégradation microbiologique et chimique de la chlordécone mettent en lumière la formation de nouveaux PT de structures très variées et incitent les chercheurs à développer des méthodes pour les rechercher dans l'environnement (Chevallier *et al.*, 2019; Della-Negra *et al.*, 2020). Les protocoles d'extraction liquide-liquide et l'analyse par GC-MS sans standard interne ne permettent pas d'être très performants, mais cela suffit à montrer la présence de nombreux PT dans des prélèvements de sols, d'eaux de rivières et de sédiments (figure 2.4). Plus tard, une méthode d'extraction QuEChERS suivie d'analyses simultanées en GC-MS et LC-MS est mise au point pour suivre la dégradation de la chlordécone dans des digestats de méthaniseur (Martin *et al.*, 2023). Cette méthode qui quantifie neuf PT de quatre familles différentes (deux hydrochlordécones, trois polychloroindènes, deux acides polychloroindénecarboxyliques, le chlordecthiol et le chlordécol) avec des LOQ comprises entre 4 et 268 µg/l (Martin *et al.*, 2023) permet de démontrer la dégradation très avancée de la chlordécone dans ces conditions. La même équipe adapte également la méthode SPME-GC-MS pour l'eau introduite par Soler *et al.* (tableau 2.1) pour quantifier deux hydrochlordécones (A1 et A2), trois polychloroindènes (B1, B2, B3/B4) ainsi que le CLDOH et le 10-monohydroCLDOH. Les résultats obtenus sur un panel d'eaux environnementales montrent des profils de contamination différents et plus complets que ceux obtenus jusque-là par les méthodes de routine. Cela souligne bien la nécessité des développements analytiques encore à réaliser pour inclure les PT de la chlordécone dans le suivi de la pollution.

### Méthodes aujourd'hui employées

Actuellement, les techniques analytiques de choix et les plus sensibles pour le dosage de la chlordécone emploient des instruments de type GC-MS/MS et LC-MS/MS. De nombreux laboratoires transfèrent cependant leurs méthodes GC-MS/MS en méthodes LC-MS/MS, car la LC-MS/MS permet une meilleure répétabilité et reproductibilité des analyses tout en évitant les problèmes de rémanence au niveau des

injecteurs en GC. La technique d'extraction QuEChERS est actuellement la technique de choix pour l'extraction de la chlordécone dans toutes les différentes matrices d'intérêts (sol, foie, muscle, tissu gras, sérum, fèces, urines, etc. ; figure 2.5). Cette technique robuste, fiable et sensible permet d'atteindre de très bonnes performances analytiques tout en étant plus rapide et moins coûteuse que des méthodes de types liquide-liquide, ASE ou SPE. L'utilisation d'échantillonneurs passifs Pocs introduits au cours des dernières années répond à un besoin particulier et complète la palette d'outils d'étude de la pollution. À ce jour, certains PT ont pu être ajoutés à des protocoles de dosage de la chlordécone, mais il reste un travail conséquent à réaliser pour intégrer l'ensemble des sept familles de PT dans les protocoles de routine.

## ► Défis analytiques pour mieux caractériser la contamination, ses évolutions et évaluer l'efficacité des méthodes de remédiation

### Mettre en place des outils pour détecter, valider et comparer les méthodes d'analyses

Disponibilité des matériaux de référence certifiés et essais interlaboratoires

La chlordécone est une molécule qui nécessite un effort de développement analytique important et adapté en fonction des matrices. Afin d'accompagner les laboratoires dans le développement, la validation et la comparaison des méthodes, il est important de pouvoir s'appuyer sur des matériaux de référence certifiés (MRC), afin de garantir une concentration précise en chlordécone. Il est aussi important que les laboratoires participent à des essais interlaboratoires\* (EIL). En effet, ces essais permettent aux laboratoires d'évaluer les performances de leurs méthodes en place et d'identifier d'éventuelles dérives analytiques. Ces EIL sont importants pour l'accréditation du Comité français d'accréditation (Cofrac) et l'agrément des laboratoires par les ministères, mais aussi en cas de changement de méthodes.

Le premier EIL français de dosage de la chlordécone et de la monohydrochlordécone A2 dans les eaux a été réalisé en 2012, sous l'initiative du réseau Aquaref. Cet essai a permis de tester les capacités de dix laboratoires nationaux (Bristeau et Ghesthem, 2012). La totalité des laboratoires avait rendu des résultats pour la chlordécone, et la moitié seulement pour la monohydrochlordécone A2. Huit laboratoires sur les dix montraient des résultats considérés comme « exacts » — c'est-à-dire suffisamment justes et suffisamment fidèles pour les besoins du contrôle des eaux de surface continentales et des eaux souterraines — et la variabilité interlaboratoire ( $CV_R$ ) était de l'ordre de 30%.

Le premier EIL français de dosage de la chlordécone et ses métabolites, la monohydrochlordécone A2 et le chlordécol, dans les sols a été réalisé en 2013, initiative financée par le service de la Prévention des Nuisances et de la Qualité de l'Environnement de la Direction générale de la prévention des risques. Cet essai avait réuni onze participants, dont neuf laboratoires nationaux (Amalric et Bristeau, 2014). Les résultats de l'essai montraient notamment une dispersion importante pour la chlordécone ( $CV_R$  comprise entre 30% et 58% selon la nature de l'échantillon de sol) du même ordre que certains composés organochlorés particulièrement complexes à analyser.

Pour la monohydrochlordécone A2, la variabilité était nettement plus forte ( $CV_R$  variant de 45 % à 104 %) et appelait à des efforts analytiques supplémentaires.

En 2024, le premier EIL dans le sérum animal, le sérum humain et une solution supplémentée en chlordécone a été réalisé à l'initiative du Laberca (Nantes). Au total, neuf laboratoires ont participé à cet essai pour le dosage de la solution de chlordécone et le sérum humain et huit pour le sérum animal. Pour le sérum humain et la solution de chlordécone, huit z-scores sur neuf étaient compris dans l'intervalle [-2; +2]. Dans le cas du sérum animal, sept z-scores sur huit étaient inclus dans ce même intervalle. Actuellement, hormis les EIL mis en place ponctuellement par des laboratoires, les seuls EIL réalisés régulièrement concernent les eaux douces pour la molécule de chlordécone. Ces essais sont organisés par les organismes de comparaison interlaboratoires (Ocils) nationaux Aglae (association générale des laboratoires d'analyses et d'essais) et Bipea (association à but non lucratif de laboratoires réalisant des essais interlaboratoires).

En plus des EIL, le LSAI de l'Anses met en place dans le cadre de son mandat national des essais interlaboratoires d'aptitudes (Eila). Ces Eila sont exclusivement destinés aux laboratoires agréés, lesquels doivent appliquer la méthode officielle mise en place par l'Anses. Les laboratoires qui ne sont pas agréés ne peuvent pas participer à ces tests primordiaux pour une garantie des analyses. L'Anses est en effet responsable d'un nombre important de mandats de référence nationaux, européens et internationaux. Ces mandats permettent d'assurer le bon fonctionnement du système d'analyses officielles, qui garantit la sécurité sanitaire des animaux, des végétaux et des denrées alimentaires. Le LSAI de l'Anses de Maisons-Alfort est le Laboratoire national de référence (LNR) pour le dosage de la chlordécone dans les denrées d'origine animale depuis août 2010. Le laboratoire actualise et améliore ses méthodes au fil du temps, et transmet les nouvelles versions aux laboratoires départementaux. Dans le cadre des Plans de surveillance et de contrôle de la chlordécone (PSPC), il est impératif que les laboratoires soient accrédités par le Cofrac, mais aussi agréés par le ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire (instruction technique DGAL/SDEIGIR/2024-48). En 2024, les plans de surveillance et de contrôle des denrées d'origine végétale à la mise sur le marché sont également ajoutés. Cet ajout s'inscrit dans le cadre de la réforme créant la police sanitaire unique de l'alimentation.

L'accréditation du Cofrac reconnaît et atteste les compétences et l'impartialité des organismes de contrôle au niveau national, voire international si l'organisme d'accréditation est signataire des accords de reconnaissance internationaux.

Les services de contrôle du ministère en charge de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt s'appuient sur un réseau de laboratoires reconnus, constitué principalement par les laboratoires nationaux de référence (LNR) et les laboratoires d'analyses agréés.

Il apparaît donc urgent de mettre en place des EIL réguliers de la chlordécone et de ses métabolites ou PT, et ce, dans différentes matrices biologiques, alimentaires et environnementales. Les laboratoires ont besoin de ces essais pour vérifier que la performance de leurs méthodes reste intacte, mais aussi pour les améliorer dans le temps.

L'un des prochains défis est la mise en place d'essais interlaboratoires et de matériaux de référence certifiés pour la chlordécone et ses métabolites et PT dans toutes les matrices (biologiques, environnementales et alimentaires; figure 2.5). Ces essais sont importants pour assurer une garantie dans le temps des résultats transmis par

les laboratoires, mais aussi pour accompagner le développement, la validation et la comparaison des méthodes.

## Disponibilité des standards analytiques

Un frein majeur au développement des méthodes de dosage des PT de la chlordécone provient du manque de disponibilité d'une grande partie de ces molécules. Alors que la société AlphaChimica a produit et vendu plusieurs hydrochlordécones dans les années 2010, actuellement seuls la 8-monohydrochlordécone et le CLDOH sont commercialement disponibles. Il faut noter que la 8-monohydrochlordécone est fabriquée par un unique fournisseur basé aux États-Unis et a subi une rupture d'approvisionnement de plus d'un an au début des années 2020, forçant certains laboratoires à ne plus pouvoir délivrer de valeurs de concentration pour cette molécule, faute de standard analytique. La communauté scientifique est donc moins bien armée aujourd'hui en matière de standards analytiques disponibles dans le commerce que dans les années 2010. Concernant les analyses de chlordécone, il existe actuellement un fabricant de  $^{13}\text{C}_{10}$ -chlordécone et un fabricant de  $^{13}\text{C}_8$ -chlordécone. Cela rend ces composés rares et donc onéreux. Si ces standards isotopiques venaient à manquer, cela mettrait en péril la dizaine de milliers d'analyses de chlordécone réalisées en routine chaque année (tableau 2.6). On voit bien là tout l'enjeu de la disponibilité des standards analytiques.

Plusieurs projets financés dans le cadre de l'appel à projets Chlordécone 2022 soutenu conjointement par l'ANR ainsi que la région Guadeloupe et la collectivité territoriale de la Martinique, mais aussi soutenus au moyen d'autres guichets de financement (Ademe, programme national de recherche environnement-santé-travail [PNR-EST] Anses, par exemple) visent à améliorer les protocoles de synthèse des PT et à réaliser un transfert de compétences pour leur manipulation et leur détection vers les laboratoires d'analyse, ceci afin d'accélérer le développement de nouvelles méthodes d'analyse. La diffusion et la pérennisation dans le temps de l'approvisionnement en PT des différents laboratoires d'analyse restent cependant un défi pour le futur. Le marché de niche ciblé et le nombre élevé de PT à atteindre (au moins une dizaine) n'intéressent aujourd'hui pas les entreprises de chimie de synthèse à façon. Et quand bien même un industriel proposerait ces molécules, il pourrait imposer ses tarifs, avec un monopole, comme c'est déjà partiellement le cas avec la chlordécone marquée au  $^{13}\text{C}$  et la 8-monohydrochlordécone A2, par exemple.

## Développer de nouveaux outils pour le dosage de la chlordécone et de ses PT (sur site et en laboratoire)

### Développement de méthodes pour le dosage simultané de la chlordécone et de ses PT

Comme nous l'avons vu plus haut, le CLDOH et A2 sont les seuls PT aujourd'hui dosés avec la chlordécone en routine par plusieurs laboratoires d'analyse. Outre le fait qu'ils soient commercialement disponibles, ces PT présentent une polarité et des comportements relativement proches de la chlordécone. Ils ont donc pu être intégrés aux méthodes multirésidus qui fonctionnaient avec la chlordécone. On notera cependant que le CLDOH se détecte moins bien en LC-MS/MS par rapport à la

chlordécone, ce qui conduit à des limites de quantification intrinsèquement moins bonnes (Saint-Hilaire *et al.*, 2018a, 2018b). L'équipe de Saaidi, qui est experte dans la synthèse des PT, a récemment mis au point deux protocoles d'analyse, l'un pour les eaux environnementales avec l'utilisation de la SPME-GC-MS (Martin *et al.*, 2024), l'autre pour la matrice digestat de méthaniseur en appliquant un protocole d'extraction QuEChERS suivi d'analyses combinées GC-MS et LC-HRMS (Martin *et al.*, 2023). Deux difficultés subsistent, liées à la gamme de polarité très large des PT. Il faut en effet trouver un protocole d'extraction efficace pour l'ensemble des composés et appliquer une double analyse GC-MS et LC-MS, afin de détecter tous les types de PT. Même si l'extraction QuEChERS semble efficace pour la majorité des familles de PT (Martin *et al.*, 2023), des adaptations selon les matrices (environnementales, biologiques et alimentaires; figure 2.5) seront nécessaires. L'intérêt scientifique émergeant pour la question de la quantification des PT de la chlordécone reste pour l'instant cantonné à la recherche académique. La directive européenne de 2020<sup>8</sup> met pourtant l'accent sur la nécessité du suivi des métabolites pertinents des pesticides dans les eaux. En France hexagonale, cela a permis de découvrir des contaminations de grande ampleur causées par certains métabolites (métabolite du chlorothalonil, métabolite du *S*-métolachlore, et acide trifluoroacétique issu de la dégradation des Pfas). À ce jour, malgré les preuves scientifiques solides démontrant les profils de toxicité des monohydrochlordécones et du CLDOH similaires à celui de la chlordécone, aucun PT n'a été classé métabolite pertinent. Ce retard, outre les lacunes de connaissance qu'il engendre, empêche également d'enclencher un levier du côté des laboratoires d'analyse privés, qui auraient alors un intérêt commercial fort à développer de nouvelles méthodes.

Le suivi de la contamination par la chlordécone et ses PT est un défi actuel pour les Antilles françaises. Plusieurs projets de recherche financés par des organismes publics ainsi que la région Guadeloupe et la collectivité territoriale de la Martinique sont en cours, avec pour objectif la mise au point de protocoles analytiques fiables pour le dosage de la chlordécone et de ses PT dans les matrices alimentaires, environnementales et biologiques.

## Nouveaux outils pour suivre et comprendre l'évolution de la pollution

Les coûts d'analyse élevés et les longs délais de rendu des résultats, surtout si les échantillons sont envoyés en France hexagonale, limitent les capacités de suivi de la pollution et restreignent les marges financières des projets de recherche qui doivent aujourd'hui prévoir un budget conséquent pour les dosages de la chlordécone. Ce constat appelle à rechercher des méthodes alternatives de détection de la chlordécone, plus rapides et moins coûteuses, qui, pour certaines, pourraient directement être mises en place sur le terrain. Ces nouveaux outils ne rivaliseront probablement pas en matière de performance avec les méthodes utilisant des instruments de haute précision comme les GC-MS/MS ou les LC-MS/MS. Ils répondront cependant à un besoin réel des scientifiques, mais aussi de la population, où émergent une tendance au zéro-chlordécone et un souhait d'autocontrôle de l'eau et des denrées alimentaires. On pourrait donc imaginer le développement d'un test rapide chlordécone, à l'instar des tests rapides Covid-19,

8. Directive (UE) 2020/2184 du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2020, relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine.

et aussi envisager un test Elisa à bas coût, comme celui commercialement disponible pour le glyphosate, qui a permis de mettre en évidence une contamination généralisée de la population française (Grau *et al.*, 2022). Pour développer ces technologies dans le cas de la chlordécone, il sera au préalable nécessaire de trouver un anticorps spécifique de la chlordécone ou une biomolécule de reconnaissance analogue. Des recherches sont déjà en cours en ce sens au travers de plusieurs approches (anticorps monoclonaux, nano-anticorps, aptamères\*). Une approche au moyen de la chimie supramoléculaire a déjà montré des résultats prometteurs : des molécules cages fluorescentes encapsulant spécifiquement la chlordécone ont récemment été découvertes (Della-Negra *et al.*, 2023). Une nouvelle génération de ces molécules cages pourrait être utilisée pour détecter la chlordécone par une simple mesure de fluorescence, plus simple et plus rapide à mettre en œuvre que les méthodes actuelles. On peut également penser à des détecteurs électrochimiques, qui pourraient servir à mesurer de manière continue la concentration en chlordécone dans des eaux de rivière, nappes phréatiques, usines de traitement de l'eau ou circuits d'eau potable, par exemple.

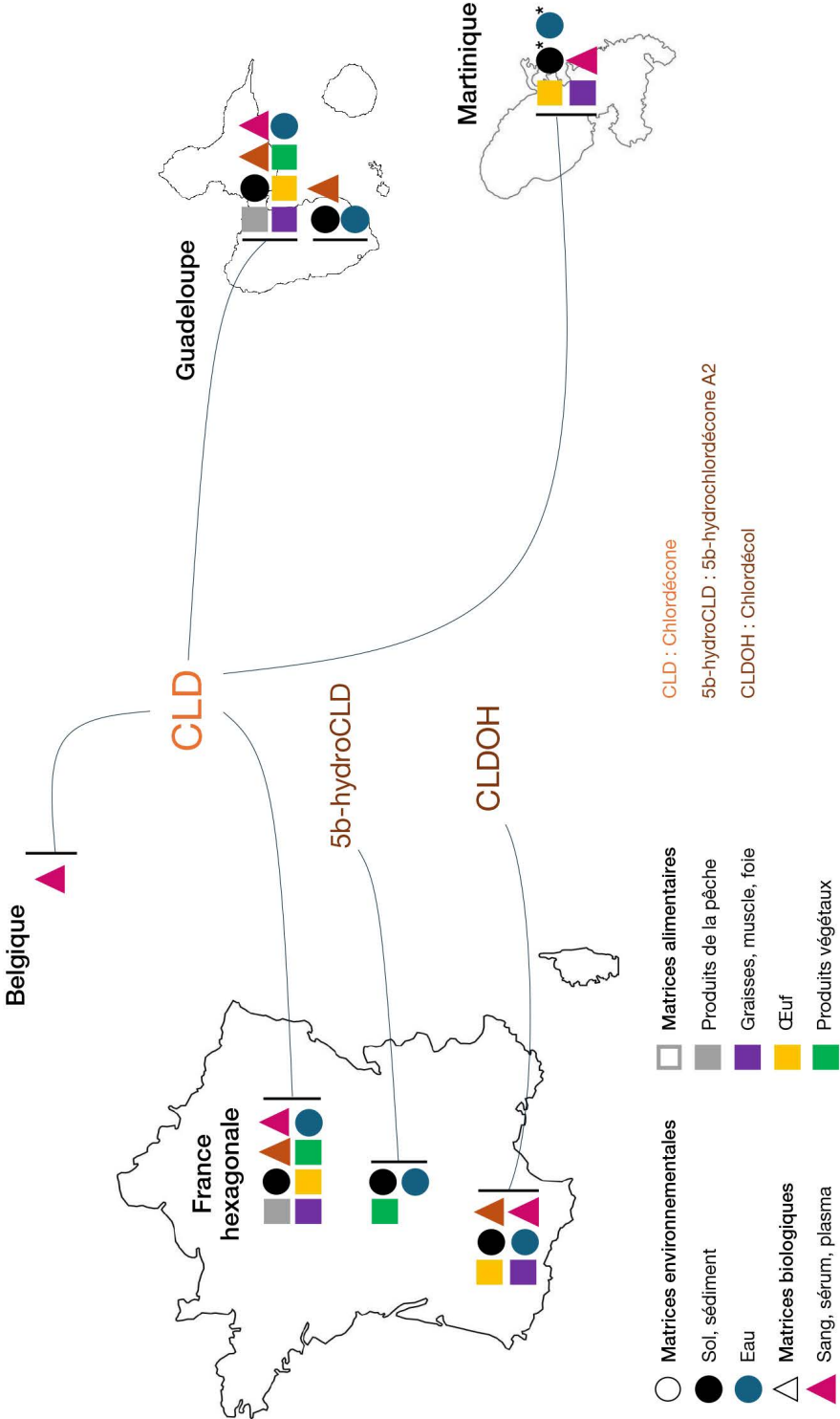
Parallèlement à ces méthodes alternatives de suivi de la pollution, des chercheurs travaillent sur la mise au point de méthodes de mesure du fractionnement isotopique de la chlordécone (Chevallier *et al.*, 2018; Prieto-Espinoza *et al.*, 2024). Ces outils permettent d'étudier et de distinguer parmi les processus de dégradation, transformation et transfert du polluant. En effet, lorsque la chlordécone subit un type particulier de modification chimique, les liaisons impliquant les isotopes plus lourds vont avoir tendance à réagir plus lentement. Selon les mécanismes chimiques, les molécules de chlordécone n'ayant pas réagi ont tendance à présenter des ratios  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  et  $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$  plus élevés qu'avant réaction, on parle d'enrichissement en  $^{13}\text{C}$  et en  $^{37}\text{Cl}$ . Les chercheurs ont ainsi déjà pu identifier des signatures d'enrichissement isotopiques plus ou moins fortes associées à des dégradations microbiologiques (Chevallier *et al.*, 2018), réductions chimiques et transformation en conditions oxydantes (Prieto-Espinoza *et al.*, 2024). Des travaux supplémentaires sont requis pour compléter les connaissances et pouvoir étudier les processus de dégradation, transformation et transfert se déroulant sur le terrain. Les données obtenues seront très précieuses pour mieux comprendre et prédire le devenir de la chlordécone dans les sols et l'environnement.

## Vers une intensification des dosages analytiques de la chlordécone aux Antilles

Depuis la découverte de la pollution par la chlordécone, la grande majorité des analyses sont réalisées en France hexagonale. La figure 2.7 présente l'état actuel de la localisation des laboratoires analysant la chlordécone et ses deux principaux métabolites (chlordécol et monohydrochlordécone A2).

Au niveau des territoires, il y a un fort besoin en matière de dosage de la chlordécone dans les différentes matrices (tableau 2.6).

Au total, à l'aide de ce tableau estimatif, environ 17 000 échantillons, toutes matrices (sauf la matrice eau) et territoires confondus, ont été analysés aux Antilles en 2024. Ces estimations ne prennent pas en compte les besoins analytiques des chercheurs pour les projets de recherche menés autour de la chlordécone.



**Figure 2.7.** Localisation des laboratoires analysant la chlordécone et ses deux métabolites commercialement disponibles. La position des vignettes n'est pas liée au lieu d'analyse des différentes matrices.

**Tableau 2.6.** Estimation des besoins analytiques annuels (nombre d'échantillons) en 2024 pour les analyses réglementaires (matrice eau exclue).

	<b>Guadeloupe</b>	<b>Martinique</b>
Denrées animales	1 255	1 450
Produits de la pêche	355	705
Denrées végétales	350	465
Sol	1 500 (Jafa + Daaf)	1 170 (Fredon + PSPC)
Sang humain	2 400	7 200
Sang animal	100	100
Échantillons totaux	5 960	11 090

Jafa : jardins familiaux; Daaf : Direction régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt; Fredon : Fédération régionale de défense contre les organismes nuisibles; PSPC : plans de surveillance et de contrôle de la chlordécone.

En France hexagonale et en Belgique, les principaux laboratoires d'analyses de la chlordécone sont : BRGM, Carso, Cart, CHU de Limoges, Epec, Eurofins, Laberca, Labocea (Laboratoire départemental d'analyses vétérinaire, eau, environnement et alimentaire), LSAI (laboratoire de l'Anses de Maisons-Alfort), Terana Drôme (anciennement, LDA26).

En Martinique, il s'agit de : Cerballiance, CHU de Martinique, LTA (Laboratoire territorial de la Martinique).

En Guadeloupe enfin, nous trouvons : IPG (Institut Pasteur de la Guadeloupe), SCL (Service commun des laboratoires).

Actuellement, des disparités fortes existent toujours entre les capacités analytiques des Antilles et la France hexagonale. Seuls les laboratoires hexagonaux peuvent mesurer certains des PT de la chlordécone. De plus, la majeure partie des analyses de chlordécone sont réalisées dans l'Hexagone, notamment les analyses de sol et des denrées alimentaires d'origine animale de Guadeloupe, avec pour conséquence des délais importants dans l'obtention des résultats, des coûts d'acheminement, tout cela étant incompatible avec les besoins locaux d'actions rapides et de suivi. Cependant, il y a une volonté affirmée de relocaliser au maximum les analyses de chlordécone aux Antilles françaises. La mesure R5 du Pnac IV insiste en effet sur la nécessité du développement d'approches analytiques aux Antilles et de la création d'une plateforme analytique pour le dosage de la chlordécone. Actuellement, trois laboratoires des Antilles disposent d'une accréditation Cofrac et d'agrément pour la mesure de la chlordécone dans différentes matrices. La mesure de la chlordécone dans les produits végétaux est réalisée historiquement par le SCL en Guadeloupe. L'IPG analyse le sérum humain et animal. Les denrées alimentaires d'origine animale sont analysées par le LTA de la Martinique. Plus récemment, depuis fin 2023, le CHU de Martinique et Cerballiance ont mis au point des méthodes pour le suivi de la chlordéconémie\* en Martinique.

Le développement des capacités analytiques aux Antilles est un enjeu majeur pour une surveillance efficace de la contamination par la chlordécone et ses métabolites, mais également de la pollution chimique en général.

## ► Références bibliographiques

- Alley E.G., Layton B.R., Minyard J.P., 1974. Identification of the photoproducts of the insecticides Mirex and Kepone. *Journal of agricultural and food chemistry*, 22(3):442-445. <https://doi.org/10.1021/jf60193a054>.
- Amalric L., Henry B., Berrehouc A., 2006. Determination of chlordécone in soils by GC/MS. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 86(1-2):15-24. <https://doi.org/10.1080/03067310500247637>.
- Amalric L., Bristeau S., 2014. Essai d'intercomparaison de l'analyse de la chlordécone et de ses métabolites dans les sols. Rapport final. BRGM/RP-63113-FR, 87 p. Disponible sur <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-63113-FR.pdf>.
- Blaghit H., Colas C., Bristeau S., Mouvet C., Maunit B., 2015. Liquid chromatography–high-resolution mass spectrometry for identifying aqueous chlordecone hydrate dechlorinated transformation products formed by reaction with zero-valent iron. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 95(2):93-105. <https://doi.org/10.1080/03067319.2014.994615>.
- Bichon E., Guiffard I., Vénisseau A., Marchand P., Antignac J.P., Le Bizec B., 2015. Ultra-trace quantification method for chlordecone in human fluids and tissues. *Journal of Chromatography A*, 1408:169-177. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2015.07.013>.
- Bizeul R., Lajoie O., Cerdan O., Pak L. T., Foucher A. *et al.*, 2025. Delayed environmental pollution caused by transient landscape storage — An example from the Lesser Antilles. *Environmental Pollution*, 366:125412. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125412>.
- Blanke R.V., Fariss M.W., Griffith Jr F.D., Guzelian P., 1977. Analysis of chlordecone [kepone®] in biological specimens. *Journal of Analytical Toxicology*, 1(2):57-62.
- Blanke R.V., Fariss M.W., Guzelian P.S., Paterson A.R., Smith D.E., 1978. Identification of a reduced form of chlordecone (Kepone) in human stool. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 20(6):782-785.
- Bordet F., Thieffine A., Mallet J., Heraud F., Bateau A., Inthavong D., 2007. In-house validation for analytical methods and quality control for risk evaluation of chlordecone in food. *International Journal of Environmental and Analytical Chemistry*, 87(13-14):985-998. <https://doi.org/10.1080/03067310701461490>.
- Borsetti A.P., Roach J.A., 1978. Identification of kepone alteration products in soil and mullet. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 20(2):241-247. <https://doi.org/10.1007/BF01683515>.
- Bosman P., Combès A., Lambert M., Lavison-Bompard G., Pichon V., 2021. Development and application of molecularly imprinted polymers for the selective extraction of chlordecone from bovine serum. *Separations*, 8(12):237. <https://doi.org/10.3390/separations8120237>.
- Boylan J.J., Cohn W.J., Egle Jr J.L., Blanke R.V., Guzelian P.S., 1979. Excretion of chlordecone by the gastrointestinal tract: evidence for a nonbiliary mechanism. *Clinical Pharmacology & Therapeutics*, 25(5part1):579-585. <https://doi.org/10.1002/cpt1979255part1579>.
- Boylan J.J., Egle J.L., Guzelian P.S., 1978. Cholestyramine: use as a new therapeutic approach for chlordecone (kepone) poisoning. *Science*, 199(4331):893-895. <https://doi.org/10.1126/science.74852>.
- Bristeau S., avec la collaboration de Amalric L., Mouvet C., 2012. Validation de la méthode d'analyse de la chlordécone pour l'application au suivi des procédés de dépollution des sols Antillais. Rapport final, BRGM/RP-60469-FR, 64 p. Disponible sur <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-60469-FR.pdf>.
- Bristeau S., Ghestem J.P., 2012. Résultats de l'essai interlaboratoire chlordécone et chlordécone-5b-hydro dans les eaux de surface continentales et les eaux souterraines. Rapport final, BRGM/RP-61916-FR, 72 p. Disponible sur <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-61916-FR.pdf>.
- Brunet D., Woignier T., Lesueur-Jannoyer M., Achard R., Rangon L., Barthès B.G., 2009. Determination of soil content in chlordecone (organochlorine pesticide) using near infrared reflectance spectroscopy (NIRS). *Environmental pollution*, 157(11):3120-3125. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.05.026>.
- Bungay P.M., Dedrick R.L., Matthews H.B., 1981. Enteric transport of chlordecone (Kepone®) in the rat. *Journal of Pharmacokinetics and Biopharmaceutics*, 9(3):309-341. <https://doi.org/10.1007/BF01059269>.

- Cabidoche Y.M., Achard R., Cattan P., Clermont-Dauphin C., Massat F., Sansoulet J., 2009. Long-term pollution by chlordecone of tropical volcanic soils in the French West Indies: a simple leaching model accounts for current residue. *Environmental pollution*, 157(5):1697-1705. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.12.015>.
- Cairns T., Siegmund E.G., Doose G.M., 1982. Liquid chromatography/mass spectrometry of Kepone hydrate, Kelevan, and Mirex. *Analytical Chemistry*, 54(6):953-957.
- Cannon S.B., Veazey J.M., Jackson R.S., Burse V.W., Hayes C. *et al.*, 1978. Epidemic kepone poisoning in chemical workers. *American Journal of Epidemiology*, 107(6):529-537. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a112572>.
- Caplan Y.H., Thompson B.C., Hebb Jr J.H., 1979. A method for the determination of chlordecone (kepone) in human serum and blood. *Journal of Analytical Toxicology*, 3(5):202-205. <https://doi.org/10.1093/JAT/3.5.202>.
- Carver R.A., Borsetti A.P., Kamps L.R., 1978. Gas-liquid chromatographic determination of kepone residues in finfish, shellfish, and crustaceans. *Journal of the Association of Official Analytical Chemists*, 61(4):877-883. <https://doi.org/10.1093/jaoac/61.4.877>.
- Carver R.A., Griffith Jr F.D., 1979. Determination of kepone dechlorination products in finfish, oysters, and crustaceans. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 27(5):1035-1037. <https://doi.org/10.1021/jf60225a005>.
- Chevallier M.L., Cooper M., Kümmel S., Barbance A., Le Paslier D. *et al.*, 2018. Distinct carbon isotope fractionation signatures during biotic and abiotic reductive transformation of chlordecone. *Environmental Science & Technology*, 52(6):3615-3624. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05394>.
- Chevallier M.L., Della-Negra O., Chaussonnerie S., Barbance A., Muselet D. *et al.*, 2019. Natural chlordecone degradation revealed by numerous transformation products characterized in key French West Indies environmental compartments. *Environmental Science & Technology*, 53(11):6133-6143. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06305>.
- Cimetière N., Giraudet S., Papazoglou M., Fallou H., Amrane A. *et al.*, 2014. Analysis of chlordecone by LC/MS-MS in surface and wastewaters. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(2):849-856. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.01.010>.
- Coat S., Bocquené G., Godard E., 2006. Contamination of some aquatic species with the organochlorine pesticide chlordecone in Martinique. *Aquatic Living Resources*, 19(2):181-187. <https://doi.org/10.1051/alr:2006016>.
- Cochennec M., Devriendt-Renault Y., Massat F., Guérin T., Ollivier P. *et al.*, 2024. Microwave-enhanced thermal removal of organochlorine pesticide (chlordecone) from contaminated soils. *Chemosphere*, 352:141486. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141486>.
- Cohn W.J., Boylan J.J., Blanke R.V., Fariss M.W., Howell J.R., Guzelian P.S., 1978. Treatment of chlordecone (Kepone) toxicity with cholestyramine: results of a controlled clinical trial. *New England Journal of Medicine*, 298(5):243-248. <https://doi.org/10.1056/NEJM197802022980504>.
- Convention de Stockholm, révisée en 2023. Disponible sur [www.pops.int](http://www.pops.int).
- Deleon I.R., Remele P.C., Miles S.K., Laseter J.L., 1980. Glass capillary columns in the gas chromatographic and gas chromatographic-mass spectrometry determination of trace levels of kepone in natural waters. *Analytical Letters*, 13(6):503-515. <https://doi.org/10.1080/00032718008059806>.
- Della-Negra O., Chaussonnerie S., Fonknechten N., Barbance A., Muselet D. *et al.*, 2020. Transformation of the recalcitrant pesticide chlordecone by *Desulfovibrio* sp. 86 with a switch from ring-opening dechlorination to reductive sulfidation activity. *Scientific Reports*, 10(1):13545. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70124-9>.
- Della-Negra O., Kouassi A.E., Dutasta J.P., Saadi P.L., Martinez A., 2023. Fluorescence detection of the persistent organic pollutant chlordecone in water at environmental concentrations. *Chemistry-A European Journal*, 29(28):e202203887. <https://doi.org/10.1002/chem.202203887>.
- Dereumeaux C., Saoudi A., Guldner L., Pecheux M., Chesneau J. *et al.*, 2020. Chlordecone and organochlorine compound levels in the French West Indies population in 2013-2014. *Environ Sci Pollut Res.*, 27(33):41033-41045. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07181-9>.

Devault D.A., Amalric L., Bristeau S., 2018. Chlordecone consumption estimated by sewage epidemiology approach for health policy assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(29):29633-29642. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2995-x>.

Dolfing J., Novak I., Archelas A., Macarie H., 2012. Gibbs free energy of formation of chlordecone and potential degradation products: implications for remediation strategies and environmental fate. *Environmental Science & Technology*, 46(15):8131-8139. <https://doi.org/10.1021/es301165p>.

Dromard C.R., Devault D.A., Bouchon-Navaro Y., Alléno J.P., Budzinski H. *et al.*, 2022. Environmental fate of chlordecone in coastal habitats: recent studies conducted in Guadeloupe and Martinique (Lesser Antilles). *Environmental Science and Pollution Research*, 29:51-60. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04661-w>.

El Balkhi S., Saint-Marcoux F., 2023. Chlordecone determination in serum by LC-MS/MS and the importance of low limit of detection. *Journal of Chromatography B*, 1230:123915. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2023.123915>.

Epstein S.S., 1978. Kepone-hazard evaluation. *Science of the Total Environment*, 9(1):1-62. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(78\)90002-5](https://doi.org/10.1016/0048-9697(78)90002-5).

Fariss M.W., Blanke R.V., Saady J.J., Guzelian P.S., 1980. Demonstration of major metabolic pathways for chlordecone (kepone) in humans. *Drug Metabolism and Disposition*, 8(6):434-438. [https://doi.org/10.1016/S0090-9556\(25\)00304-6](https://doi.org/10.1016/S0090-9556(25)00304-6).

Fariss M.W., Smith J.D., Blanke R.V., Guzelian P.S., 1982. Convenient preparation of chlordecone alcohol (kepone alcohol) and its deuterated, tritiated and dechlorinated derivatives. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 30(1):185-187. <https://doi.org/10.1021/jf00109a041>.

Fernández-Bayo J.D., Saison C., Voltz M., Disko U., Hofmann D., Berns A.E., 2013. Chlordecone fate and mineralisation in a tropical soil (andosol) microcosm under aerobic conditions. *Science of the total environment*, 463-464:395-403. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.06.044>.

Fourcot A., Feidt C., Bousquet-Mélou A., Ferran A.A., Gourdine J.L. *et al.*, 2020. Modeling chlordecone toxicokinetics data in growing pigs using a nonlinear mixed-effects approach. *Chemosphere*, 250:126151. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126151>.

Fournier A., Feidt C., Lastel M.L., Archimede H., Thome J.P. *et al.*, 2017. Toxicokinetics of chlordecone in goats: implications for risk management in French West Indies. *Chemosphere*, 171:564-570. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.054>.

Francis B.M., Metcalf R.L., 1984. Evaluation of mirex, photomirex and chlordecone in the terrestrial aquatic laboratory model ecosystem. *Environmental health perspectives*, 54:341-346.

Frías M.M., Torres M.J., Frenich A.G., Martínez Vidal J.L., Olea-Serrano F., Olea N., 2004. Determination of organochlorine compounds in human biological samples by GC-MS/MS. *Biomedical Chromatography*, 18(2):102-111. <https://doi.org/10.1002/bmc.300>.

Garrido Frenich A., Martínez Vidal J.L., Moreno Frías M., Olea-Serrano F., Olea N., Cuadros Rodriguez L., 2003. Determination of organochlorine pesticides by GC-ECD and GC-MS-MS techniques including an evaluation of the uncertainty associated with the results. *Chromatographia*, 57(3):213-220. <https://doi.org/10.1007/BF02491719>.

George S.E., King L.C., Claxton L.D., 1986. High-performance liquid chromatography separation of chlordecone and its metabolites. *Chromatographia*, 22(1-6):165-167. <https://doi.org/10.1007/BF02257320>.

Gonzalez J.L., Allenou J.P., Togola A., Guyomarch J., Tapie N., Budzinski H., 2019. Synthèse des actions de développement et de validation de méthodes d'analyse opérationnelles du chlordécone dans les eaux littorales de Martinique par les techniques d'échantillonnage passif (POCIS et membrane silicone) et par SBSE. Rapport Aquaref, 29 p.

Grau D., Grau N., Gascuel Q., Paroissin C., Stratonovitch C. *et al.*, 2022. Quantifiable urine glyphosate levels detected in 99% of the French population, with higher values in men, in younger people, and in farmers. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(22):32882-32893. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18110-0>.

Griffin G.W., Price A.K., 1964. Perchloro Cage Compounds. I. Structural Studies. *The Journal of Organic Chemistry*, 29(11):3192-3196. <https://doi.org/10.1021/jo01034a017>.

Harless R.L., Harris D.E., Sovocool G.W., Zehr R.D., Wilson N.K., Oswald E.O., 1978. Mass spectrometric analyses and characterization of Kepone in environmental and human samples. *Biomedical Mass Spectrometry*, 5(3):232-237. <https://doi.org/10.1002/bms.1200050312>.

- Harris R.L., Huggett R.J., Slone H.D., 1980. Determination of dissolved Kepone by direct addition of XAD-2 resin to water. *Analytical Chemistry*, 52(4):779-780. <https://doi.org/10.1021/AC50054A044>.
- He D., Xia B., Liu J., Ding L., Zhou Y., 2015. Determination of Kepone and Its Metabolite in Water and Soil by High-Performance Liquid Chromatography–Mass Spectrometry. *Analytical Letters*, 48(1):1-8. <https://doi.org/10.1080/00032719.2014.930867>.
- Hellal J., Saaidi P.L., Bristeau S., Crampon M., Muselet D. *et al.*, 2021. Microbial transformation of chlordecone and two transformation products formed during in situ chemical reduction. *Frontiers in microbiology*, 12:742039. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.742039>.
- Houston T.E., Mutter L.C., Blanke R.V., Guzelian P.S., 1981. Chlordecone alcohol formation in the Mongolian gerbil (*Meriones unguiculatus*): a model for human metabolism of chlordecone (kepone). *Toxicological Sciences*, 1(3):293-298. [https://doi.org/10.1016/S0272-0590\(81\)80132-7](https://doi.org/10.1016/S0272-0590(81)80132-7).
- Hubas C., Monti D., Mortillaro J.M., Augagneur S., Carbon A. *et al.*, 2022. Chlordecone-contaminated epilithic biofilms show increased adsorption capacities. *Science of the Total Environment*, 825:153942. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153942>.
- Huckins J.N., Stalling D.L., Petty J.D., Buckler D.R., Johnson B.T., 1982. Fate of Kepone and mirex in the aquatic environment. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 30(6):1020-1027. <https://doi.org/10.1021/JF00114A004>.
- Huggett R.J., Bender M.E., 1980. Kepone in the James River. *Environmental Science & Technology*, 14(8):918-923. <https://doi.org/10.1021/es60168a001>.
- Jablonski P.E., Pheasant D.J., Ferry J.G., 1996. Conversion of Kepone by *Methanosarcina thermo-philica*. *FEMS microbiology letters*, 139(2-3), 169-173.
- Jondreville C., Fournier A., Mahieu M., Feidt C., Archimède H., Rychen G., 2014. Kinetic study of chlordecone orally given to laying hens (*Gallus domesticus*). *Chemosphere*, 114:275-281. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.05.008>.
- Lafontaine A., Gismondi E., Boulangé-Lecomte C., Geraudie P., Dodet N. *et al.*, 2016. Effects of chlordecone on 20-hydroxyecdysone concentration and chitobiase activity in a decapod crustacean, *Macrobrachium rosenbergii*. *Aquatic Toxicology*, 176:53-63. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2016.04.006>.
- Lavison-Bompard G., Parinet J., Huby K., Guérin T., Inthavong C., Lambert M., 2021. Correlation between endemic chlordecone concentrations in three bovine tissues determined by isotopic dilution liquid chromatography–tandem mass spectrometry. *Science of The Total Environment*, 788:147833. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147833>.
- Martin D.E., Alnajjar P., Muselet D., Soligot-Hognon C., Kanso H. *et al.*, 2023. Efficient biodegradation of the recalcitrant organochlorine pesticide chlordecone under methanogenic conditions. *Science of The Total Environment*, 903:166345. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166345>.
- Martin D., Lobo F., Lavison-Bompard G., Guérin T., Parinet J., 2020. Effect of home cooking processes on chlordecone content in beef and investigation of its by-products and metabolites by HPLC-HRMS/MS. *Environment International*, 144:106077. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106077>.
- Martin D.E., Muselet D., Kanso H., Alnajjar P., Mexler J. *et al.*, 2024. Analysis of chlordecone and its transformation products in environmental waters by a new SPME-GC-MS method and comparison with LLE-GC-MS/MS and LLE-LC-MS/MS: A case study in the French West Indies. *Science of the Total Environment*, 948:174610. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174610>.
- Martin-Laurent F., Sahnoun M.M., Merlin C., Vollmer G., Lübke M., 2014. Detection and quantification of chlordecone in contaminated soils from the French West Indies by GC-MS using the <sup>13</sup>C<sup>10</sup>-chlordecone stable isotope as a tracer. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(7):4928-4933. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1839-y>.
- Moriwaki H., Hasegawa A., 2004. Detection of chlordecone by liquid chromatography with tandem mass spectrometry. *Rapid communications in mass spectrometry*, 18(11):1243-1244. <https://doi.org/10.1002/rcm.1474>.
- Moseman R.F., Crist H.L., Edgerton T.R., Ward M.K., 1977. Electron capture gas chromatographic determination of Kepone® residues in environmental samples. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 6(2-3):221-231. <https://doi.org/10.1007/BF02097763>.

Mouvet C., Bristeau S., 2016. Comparaison du transfert sol-plantes entre la chlordécone et ses produits de dégradation formés par déchloration réductive. Rapport final, BRGM/RP-65275-FR, 50 p. Disponible sur <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-65275-FR.pdf>.

Multigner L., Ndong J.R., Giusti A., Romana M., Delacroix-Maillard H. *et al.*, 2010. Chlordecone exposure and risk of prostate cancer. *Journal of clinical oncology*, 28(21):3457-3462. <https://doi.org/10.1200/JCO.2009.27.2153>.

Nichols M.M., 1990. Sedimentologic fate and cycling of Kepone in an estuarine system: example from the James River estuary. *Science of the Total Environment*, 97-98:407-440. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(90\)90254-R](https://doi.org/10.1016/0048-9697(90)90254-R).

Prieto-Espinoza M., Malleret L., Durand A., Höhener P., 2024. Elucidating the Fate of the Organochlorine Pesticide Chlordecone under Abiotic Reductive and Oxidative Processes: Kinetics, Transformation Products, and C vs Cl Isotope Fractionation. *Environmental Science & Technology*, 58(43):19475-19485. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c04912>.

Rochette R., Bonnal V., Andrieux P., Cattani P., 2020. Analysis of surface water reveals land pesticide contamination: an application for the determination of chlordecone-polluted areas in Guadeloupe, French West Indies. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(33):41132-41142. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10718-y>.

Sabatier P., Mottes C., Cottin N., Evrard O., Comte I. *et al.*, 2021. Evidence of chlordecone resurrection by glyphosate in French West Indies. *Environmental Science & Technology*, 55(4):2296-2306. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05207>.

Saint-Hilaire M., Bertin T., Inthavong C., Lavison-Bompard G., Guérin T. *et al.*, 2018a. Validation of analytical methods for chlordecone and its metabolites in the urine and feces of ewes. *Journal of Chromatography B*, 1093-1094:66-76. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2018.06.058>.

Saint-Hilaire M., Fourcot A., Bousquet-Mélou A., Rychen G., Thomé J. P. *et al.*, 2021. Characterization and quantification of chlordecone elimination in ewes. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 87:103698. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2021.103698>.

Saint-Hilaire M., Inthavong C., Bertin T., Lavison-Bompard G., Guérin T. *et al.*, 2018b. Development and validation of an HPLC-MS/MS method with QuEChERS extraction using isotopic dilution to simultaneously analyze chlordecone and chlordecol in animal livers. *Food Chemistry*, 252:147-153. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.01.092>.

Saint-Hilaire M., Plumain D., Thomé J.P., Adam C., Scholl G. *et al.*, 2023. Validation of an HPLC-MS/MS method with QuEChERS extraction using isotopic dilution to analyze chlordecone in human serum. *Journal of Chromatography B*, 1229:123894. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2023.123894>.

Saleh F.Y., Lee G.F., 1978. Analytical methodology for Kepone in water and sediment. *Environmental Science & Technology*, 12(3):297-301. <https://doi.org/10.1021/es60139a013>.

Schrauzer G.N., Katz R.N., 1978. Reductive dechlorination and degradation of mirex and kepone with vitamin B12s. *Bioinorganic chemistry*, 9(2):123-142. [https://doi.org/10.1016/s0006-3061\(00\)80285-9](https://doi.org/10.1016/s0006-3061(00)80285-9).

Soine P.J., Blanke R.V., Schwartz C.C., 1983. Chlordecone metabolism in the pig. *Toxicology letters*, 17(1-2):35-41. [https://doi.org/10.1016/0378-4274\(83\)90032-2](https://doi.org/10.1016/0378-4274(83)90032-2).

Soler A., Lebrun M., Labrousse Y., Woignier T., 2014. Solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry for quantitative determination of chlordecone in water, plant and soil samples. *Fruits*, 69(4):325-339. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/epdf/10.1051/fruits/2014021>.

Spingarn N.E., Northington D.J., Pressely T., 1982. Analysis of Non-volatile Organic Hazardous Substances by GC/MS. *Journal of Chromatographic Science*, 20(12):571-574. <https://doi.org/10.1093/chromsci/20.12.571>.

US EPA, 1980. Manual of Analytical Methods for the Analysis of Pesticides in Humans and Environmental Samples. EPA-600/8-80-038.

Wilson N.K., Zehr R.D., 1979. Structures of some Kepone photoproducts and related chlorinated pentacyclodecanes by carbon-13 and proton nuclear magnetic resonance. *The Journal of Organic Chemistry*, 44(8):1278-1282. <https://doi.org/10.1021/jo01322a020>.

Woignier T., Clostre F., Macarie H., Jannoyer M., 2012. Chlordecone retention in the fractal structure of volcanic clay. *Journal of Hazardous Materials*, 241-242:224-230. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.09.034>.

## Chapitre 3

---

# Quels dispositifs pour observer, comprendre et quantifier les trajectoires de la contamination des sols et des eaux sur des temps longs ?

*Lai Ting Pak, Charlotte R. Dromard, Anne-Lise Taïlamé, Olivier Grünberger, Marc Voltz, Jean-Baptiste Charlier, Patrick Lachassagne, Anatja Samouëlian*

La contamination liée à l'utilisation passée du chlordécone continue de provoquer des effets sanitaires importants sur l'ensemble des écosystèmes et des populations des Antilles, nécessitant la mise en place de mesures de gestion adaptées (chapitre 1). Si l'origine de la contamination et les mécanismes de propagation de la molécule depuis les sols contaminés vers les autres compartiments environnementaux (Cabidoche *et al.*, 2009; Levillain *et al.*, 2012; Crabit *et al.*, 2016; Della Rossa *et al.*, 2017; Cattan *et al.*, 2019; Mottes *et al.*, 2020; Comte *et al.*, 2022; Voltz *et al.*, 2023) ainsi qu'au sein des réseaux trophiques (Dromard *et al.*, 2016, 2018; Coulis *et al.*, 2024) ont été étudiés et sont relativement bien connus, les dynamiques spatiale et temporelle de la contamination demeurent encore mal caractérisées. Or, une telle connaissance est essentielle pour élaborer et proposer des mesures capables de limiter les impacts de cette contamination aux plans sanitaire, environnemental, social et économique. Des dispositifs réglementaires et des programmes de recherche ont ainsi été mis en place ou mobilisés afin de caractériser la dynamique de la contamination et d'aider à l'élaboration de politiques publiques de gestion du risque lié à la pollution du milieu antillais par le chlordécone. Ce chapitre décrit ces dispositifs et infrastructures, et en propose un bilan critique.

Il convient tout d'abord de rappeler les principales caractéristiques des mécanismes de contamination des eaux et des sols par le chlordécone, ainsi que le besoin de dispositifs pérennes d'observation. L'origine d'une pollution chronique du milieu antillais par le chlordécone après son épandage est liée en particulier à la nature physico-chimique spécifique de cette molécule organique de synthèse. La chlordécone présente une affinité élevée pour les composés hydrophobes, notamment pour la matière organique des sols. Ceci induit une forte rétention de la molécule dans les sols antillais, qui présentent pour la plupart des teneurs élevées en matière organique. Elle est par ailleurs très faiblement biodégradable en conditions aérobies, a une faible volatilité et une faible solubilité dans l'eau. Ces propriétés expliquent la persistance, dans les sols antillais, d'un stock important de chlordécone longtemps après son application. Non seulement la molécule se dégrade très peu, mais, de surcroît, elle est fortement retenue sur la phase solide

des sols (Fernández-Bayo *et al.*, 2013a, 2013b). Toutefois, bien que la mobilité de la chlordécone soit faible, elle n'est pas nulle et suffit à contaminer les eaux circulant au contact des sols contaminés. Ainsi, dans les bassins versants comportant des sols contaminés, les eaux de rivières, les eaux souterraines, mais aussi les eaux côtières situées en aval sont exposées à une pollution chronique par le chlordécone. On observe donc aujourd'hui une pollution généralisée des eaux de surface et souterraines dans les zones d'application du chlordécone (Gourcy *et al.*, 2009; Crabit *et al.*, 2016; Arnaud *et al.*, 2017; Mottes *et al.*, 2017, 2020; Cattan *et al.*, 2019; Voltz *et al.*, 2023). Par voie de conséquence, les organismes se développant au contact de sols ou d'eaux pollués sont également exposés à une pollution chronique par la chlordécone.

Les connaissances actuelles sur les transferts dans l'environnement permettent d'identifier les principaux processus impliqués dans la contamination des sols et des eaux (lixiviation des sols vers les nappes d'eau souterraine, ruissellement de surface, exfiltration en surface d'eau souterraine) et soulignent la complexité des interactions entre les compartiments de l'environnement, complexité accentuée par la variabilité marquée de l'intensité des événements pluvieux, qui modulent la dynamique des transferts. L'évolution à long terme de la contamination des sols et des eaux est de faible intensité au regard de sa variabilité spatiale et temporelle à court terme, et de l'importance des stocks présents dans les sols et les eaux souterraines. Il est donc extrêmement difficile d'observer ou d'estimer l'évolution de la contamination des sols et des eaux. L'estimation de la durée pendant laquelle la contamination restera significative fait actuellement l'objet de travaux et débats importants au sein de la communauté scientifique (Cabidoche *et al.*, 2009; Cattan *et al.*, 2019; Comte *et al.*, 2022; Saaidi *et al.*, 2023; Voltz *et al.*, 2023, 2024).

Dans ce contexte, l'observation des pollutions des sols et des eaux sur les territoires concernés et à différentes échelles de temps est une nécessité pour pouvoir diagnostiquer l'ampleur et la variabilité des pollutions et détecter leurs évolutions. Elle est également essentielle pour analyser les flux de polluants entre les sols et les différents réservoirs hydrologiques, afin d'identifier et de hiérarchiser les processus à l'origine des dynamiques, d'élaborer des modèles explicatifs et prédictifs des trajectoires futures de contamination et de concevoir les mesures pour les maîtriser. Ces objectifs constituent le cœur des dispositifs d'observation présentés ci-après, au-delà de leurs fonctions premières de diagnostic de la pollution actuelle et de ses impacts.

## ► Les dispositifs réglementaires pour suivre les pollutions et leurs impacts

Cette section présente les outils réglementaires et incitatifs mobilisés pour le suivi de la chlordécone dans l'environnement, en soulignant leur apport au diagnostic des pollutions et à la réduction de l'exposition des populations.

### Les eaux : un suivi réglementaire dans le cadre de la directive-cadre sur l'eau

La directive-cadre sur l'eau (DCE), adoptée par l'Union européenne (UE) en 2000, établit un dispositif de gestion et de protection des milieux aquatiques au travers d'un suivi régulier pour les eaux superficielles (eaux douces, eaux de transition, eaux

côtières) et les eaux souterraines. Elle vise à atteindre un « bon état » des masses d'eau, entendues comme des entités d'eau de surface (canal, lac, cours d'eau, zone côtière) ou souterraine (aquifère) ayant des conditions biologiques et physico-chimiques homogènes. Ce suivi, réalisé selon un cycle de six ans, repose sur l'évaluation conjointe des états écologique et chimique des masses d'eau. L'état chimique est défini par le respect de seuils réglementaires relatifs à une liste de substances prioritaires, comprenant des substances dites « dangereuses ». À cet égard, pour les pesticides, la limite de qualité réglementaire de l'eau est fixée à 0,1 µg/l pour chaque substance pesticide et 0,5 µg/l pour la somme de tous les pesticides, sauf exceptions justifiées par une dangerosité marquée de certaines substances. L'état écologique traduit quant à lui le fonctionnement global des écosystèmes aquatiques au travers de critères biologiques, hydromorphologiques et physico-chimiques intégrant, entre autres, les concentrations en métaux lourds, pesticides et autres polluants industriels.

### Eaux superficielles (cours d'eau)

Le suivi des contaminations des cours d'eau en Guadeloupe et Martinique est réalisé par plusieurs organismes et institutions. Les offices de l'Eau (ODE) jouent un rôle central dans la coordination et la mise en œuvre des programmes de surveillance. Dans le cadre des suivis réglementaires de l'état environnemental des masses d'eau superficielle et de suivis complémentaires, ces offices recherchent un ensemble de micropolluants, dont une majorité de pesticides (Bonnet *et al.*, 2022), grâce à des prélèvements d'eau mensuels, réalisés manuellement dans les cours d'eau. Parmi les substances détectées sont inclus la chlordécone et deux de ses produits de transformation connus, dont l'analyse en routine est possible, à savoir : le 5b-hydrochlordécone et le chlordécol.

En Martinique, le réseau DCE comprend 20 stations de suivi, complétées par 8 stations supplémentaires mises en place par l'ODE dans des bassins versants agricoles exposés aux pollutions par les pesticides (Lala et Bocaly, 2023). En 2022, la chlordécone a été quantifiée dans 21 des 28 stations, presque toute l'année. En complément, l'étude de Cattan *et al.* (2019), réalisée à partir des données couvrant une quinzaine d'années entre 2009-2014 sur 14 stations DCE, a observé une baisse des concentrations dans la majorité des rivières, bien que certaines conservent un niveau stable de pollution, et qu'une rivière présente au contraire une légère tendance à la hausse. Ces tendances observées nécessitent confirmation sur le long terme.

En Guadeloupe, le bilan des analyses de 2020 (Bonnet *et al.*, 2022) indique que seules 4 des 33 stations suivies ne présentent aucun pesticide quantifié. Dans les autres, 24 produits phytosanitaires différents ont été retrouvés, soit 11% des pesticides recherchés. Pour 25 stations, une contamination par la chlordécone a pu être mesurée, avec pour 8 stations des concentrations maximales supérieures à 1 µg/l.

### Eaux souterraines (aquifères)

Les ODE de Martinique et de Guadeloupe, en partenariat avec le BRGM, assurent dans le cadre de la DCE la surveillance bisannuelle de la qualité des masses d'eau souterraine lors des hautes eaux et basses eaux. Le dispositif analyse chaque année 27 paramètres *in situ* et molécules inorganiques, ainsi que 84 micropolluants, dont la chlordécone et ses métabolites (5b-hydrochlordécone et chlordécol) sur l'ensemble des sites suivis.

Cette liste minimale de substances à surveiller est complétée pour chaque masse d'eau en fonction de la nature des pressions existantes par ailleurs (industrielle, urbaine, agricole, etc.).

La Martinique compte 8 masses d'eau souterraine surveillées depuis 2008 par 21 points, répartis entre 18 forages et 3 sources. Ces stations représentent la diversité des masses d'eau du territoire. Sur 11 d'entre elles, l'état écologique est jugé insuffisant pour atteindre leurs objectifs environnementaux. En 2022, la chlordécone représente à elle seule 27 % des résultats dépassant le seuil de potabilité, tandis que l'ensemble des autres produits phytosanitaires et leurs métabolites représentent près de 77 % des cas déclassant la qualité des masses d'eau (Malcuit *et al.*, 2022).

En Guadeloupe, le réseau de surveillance comprend 19 stations réparties sur 7 masses d'eau souterraine, 2 sources et 10 forages ou puits. En 2020, 11 substances chimiques ont été détectées dans les masses d'eau souterraine, dont 8 présentes de façon concomitante en saison sèche et en saison humide. Les concentrations de 4 substances dépassaient le seuil de potabilité : chlordécone, chlordécol, 5b-hydrochlordécone et hexachlorocyclohexane (HCH) bêta, avec pour la chlordécone des concentrations ponctuelles observées pouvant être plus de 40 fois supérieures à la valeur seuil (Lemaitre et Seux, 2021).

### Eaux côtières

Le suivi de la qualité des masses d'eau côtière a également été mis en place en Guadeloupe et en Martinique, par les ODE de chacun des deux territoires. Ainsi, 11 masses d'eau côtière ont été définies en Guadeloupe et à Saint-Martin, et 19 en Martinique, chacune comprenant plusieurs stations d'étude visitées une ou plusieurs fois par an, selon les paramètres mesurés. La chlordécone (sans ses métabolites) est systématiquement recherchée dans toutes les stations, à l'aide d'échantillonneurs passifs de type Pocis.

Entre 2017 et 2022, en Guadeloupe et à Saint-Martin, 6 masses d'eau côtière étaient classées en état écologique « médiocre » et 5 en état écologique « moyen » (Kleitz *et al.*, 2022). En revanche, l'état chimique des 11 masses d'eau a été jugé « bon ». Par rapport au bilan précédent (2012-2017), l'état écologique d'une masse d'eau s'est amélioré (de « médiocre » à « moyen ») tandis que l'état écologique de 3 masses d'eau a été déclassé (de « moyen » à « médiocre », et de « bon » à « moyen »). Les paramètres décisifs dans ces changements d'état écologique sont les indicateurs de communautés coralliennes et la turbidité. Par ailleurs, en 2021, 60 % des stations suivies affichaient la présence de chlordécone, avec des concentrations variant entre 0,01 et 0,21 ng/l, et une concentration maximale de 0,41 ng/l mesurée à la Caye à Dupont (Batailler, 2022).

En Martinique, le dernier bilan réalisé en 2019 sur les masses d'eau côtière, couvrant la période 2015-2019, indique que 5 d'entre elles présentent un bon état écologique, 8 sont dans un état écologique « moyen » et 2 « médiocre » (plus 2 non évaluées). En parallèle, on observe un état chimique « bon » pour 17 masses d'eau sur 19, les deux autres étant « non déterminées ». La chlordécone a été recensée dans 18 des 19 masses d'eau étudiées, avec des concentrations maximales enregistrées au Banc Gabelle en 2022 (2,1 ng/l) et dans la baie du Galion en 2019 (1,5 ng/l) (Desrosier, 2024).

## Les sols : des analyses pour une cartographie de la pollution

En position d'interface entre l'atmosphère et les eaux souterraines et de surface, les sols constituent le compartiment-réservoir de chlordécone depuis lequel s'opèrent des transferts vers les autres compartiments de l'environnement. Cette accumulation, notamment dans les couches superficielles des sols (50 premiers centimètres), résulte directement du mode d'application de l'insecticide, réalisé au pied des bananiers. Elle est également renforcée par les propriétés particulières des sols volcaniques. En Guadeloupe et en Martinique, la cartographie et le suivi de la contamination des sols constituent des outils essentiels pour évaluer l'ampleur de la pollution par la chlordécone et ses impacts sur les écosystèmes et la santé publique. Depuis 2004, les autorités locales, en collaboration avec des organismes techniques et scientifiques publics, mènent des programmes d'analyses de sol pour mesurer les teneurs en chlordécone et cartographier les surfaces contaminées. L'ensemble de ces analyses, conduites depuis plus de 20 ans, contribue à la connaissance de l'état de la contamination des sols. Les analyses effectuées sont principalement destinées aux agriculteurs, tandis que de manière complémentaire le programme Jafa (Jardins familiaux) offre un service gratuit d'analyse de sol pour les particuliers. Ces dispositifs permettent d'identifier les parcelles à risque et de recommander des mesures de gestion adaptées, telles que la restriction de certaines cultures sensibles au transfert de la chlordécone ou d'informer les populations sur les précautions à adopter afin d'assurer la qualité sanitaire de leurs récoltes (chapitre 5). Ces démarches visent à limiter l'exposition des populations au chlordécone, tout en assurant la sécurité sanitaire des productions agricoles.

### État de la contamination des sols en Martinique et en Guadeloupe

En Martinique, fin 2025, environ 11 500 hectares avaient fait l'objet d'au moins une analyse de sol par parcelle : la moitié des surfaces ne présentaient pas de chlordécone quantifiable, tandis que 13 % de ces surfaces affichaient des concentrations supérieures à 1 mg/kg (figure 3.1A). En Guadeloupe, plus de 9 000 hectares ont été analysés : la chlordécone n'est pas quantifiée dans 59 % des surfaces échantillonnées, mais 18 % de ces surfaces sont contaminées au-delà de 1 mg/kg (figure 3.1B).

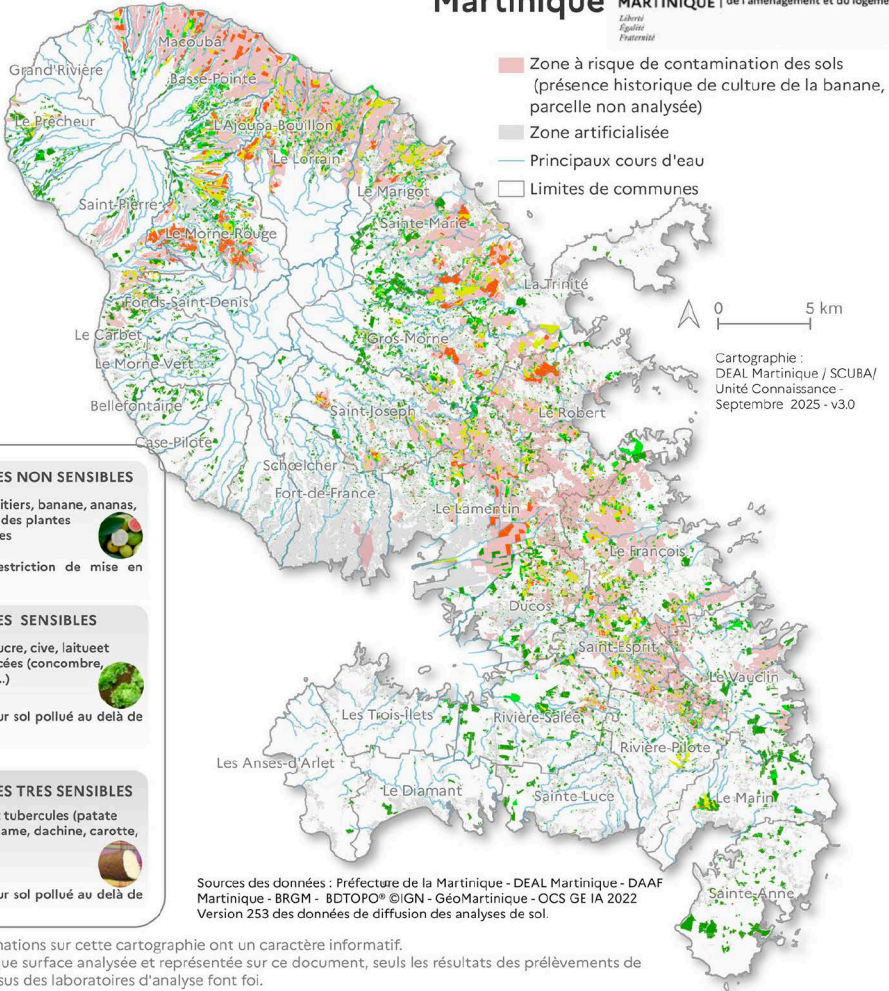
Au-delà du seuil de 1 mg/kg, il est recommandé d'éviter la culture de végétaux sensibles au transfert de chlordécone vers les organes récoltés, tels que les cucurbitacées, les salades, les oignons péyi ou les cives et la canne à sucre, ainsi que toutes les cultures de racines et tubercules. Dans les zones concernées, l'élevage de rente\* de plein air est déconseillé, sauf en respectant une période minimale de retrait du pâturage avant abattage (chapitre 9).

### Les produits issus de l'agriculture et de la pêche : un suivi réglementaire par les services de l'État

Le niveau de contamination par le chlordécone des produits agricoles et halieutiques est suivi dans le cadre du plan de surveillance et de contrôle des denrées alimentaires, mis en œuvre depuis 2008 par la direction des Services vétérinaires, puis par les directions de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt (Daaf) de Guadeloupe et Martinique.

# Teneur en chlordécone des sols analysés Martinique

**PRÉFET DE LA MARTINIQUE**  
Liberté Égalité Fraternité  
Direction de l'environnement, de l'aménagement et du logement



**CULTURES NON SENSIBLES**  
 Arbres fruitiers, banane, ananas, la plupart des plantes maraîchères  
 Pas de restriction de mise en culture

**CULTURES SENSIBLES**  
 Canne à sucre, cive, laitueet cucurbitacées (concombre, giraumon...)  
 A éviter sur sol pollué au delà de 1 mg/kg

**CULTURES TRES SENSIBLES**  
 Racines et tubercules (patate douce, igname, dachine, carotte, navet...)  
 A éviter sur sol pollué au delà de 0,1 mg/kg

Les informations sur cette cartographie ont un caractère informatif. Pour chaque surface analysée et représentée sur ce document, seuls les résultats des prélèvements de terrains issus des laboratoires d'analyse font foi.

## Niveau de contamination par la chlordécone (mg/kg)

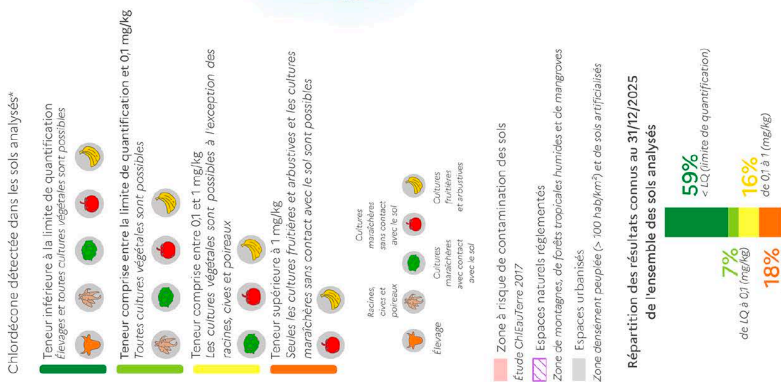
Non détecté < LD (limite de détection)	Faible LD à 0,1	Moyen 0,1 à 1	Fort > 1
<b>53%</b>	<b>14%</b>	<b>20%</b>	<b>13%</b>
Toutes cultures possibles.	Toutes cultures possibles.	Eviter les cultures très sensibles	Eviter les cultures sensibles et très sensibles
Tous élevages de plein air, toutes espèces possibles. Tous élevages hors sol, toutes espèces possibles	Eviter tous élevages de rente de plein air pendant une période dépendante de l'espèce avant l'abattage. Tous élevages hors sol, toutes espèces possibles		

← Répartition des résultats en surface sur l'ensemble des sols analysés

Nombre de surfaces analysées : 27410  
 Surface totale couverte : 11361 Hectares

**Figure 3.1.** Carte de contamination des sols par le chlordécone. A : en Martinique (Deal, 2025); B : en Guadeloupe (Daaf, 2026).

## Teneurs en chlordécone des sols



5 km

SOURCES :  
DAAF 971 / SAIUM 2025 - INRA/CIHAD 2017  
Base CCZ Kar-Cover 2017  
IGN BD CARTO - IGN RECALIT 5m  
Réalisation : DAAF 971 / SISEP - mars 2026  
Direction de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt  
Martinique

\* Les analyses de sols sont issues des démarches volontaires des producteurs et des jardiniers amateurs.

Deal, 2025. Teneur en chlordécone des sols analysés – Martinique. Cartographie : DEAL Martinique / SCUBA / Unité Connaissance, version 3.0, septembre 2025 ; Daaf, 2026. Teneurs en chlordécone des sols. Réalisation : DAAF 971 / SISEP, mars 2026.

Chaque année, environ 2000 échantillons sont prélevés dans les abattoirs, sur les marchés et les étals, dans les poissonneries et les supermarchés (plan de contrôle), mais aussi directement au sein des exploitations agricoles et aquacoles (plan de surveillance). Un produit est jugé conforme lorsque sa teneur en chlordécone est inférieure à la LMR fixée à 20 µg/kg de poids frais (chapitre 9), valeur définie par l'Union européenne en 2008 et révisée en 2018.

Les bilans récents réalisés en Guadeloupe (2023) et en Martinique (2021) indiquent des taux de conformité élevés depuis 2018 : pour la viande bovine, 99% des échantillons sont conformes en Guadeloupe et 97% en Martinique; pour la viande porcine, respectivement 100% et 95%. Les échantillons de volaille et d'œufs affichent 100% de conformité en Guadeloupe et 93% en Martinique, atteignant 100% sur les deux îles lorsque les élevages sont hors-sol. Concernant les produits végétaux, les taux de conformité sont de 95% en Guadeloupe et 99% en Martinique au stade de la production dans les exploitations agricoles, et de 98% au stade de la distribution pour les deux îles.

Enfin, en 2023, quelle que soit l'île concernée, les produits de la pêche affichaient un taux de conformité de 100% pour les espèces pélagiques du large. Pour les autres espèces issues de la pêche côtière, le taux de conformité atteignait 100% dans les zones éloignées des zones impactées par la pollution par le chlordécone et 94% près des zones maritimes contaminées par le chlordécone (de Pointe-à-Pitre à Vieux-Habitants en Guadeloupe); cette valeur n'était que de 30% de conformité en 2018. Cette nette amélioration s'explique par la mise en place des zones d'interdiction totale et partielle de pêche, leur respect par les marins-pêcheurs professionnels et la valorisation des produits conformes grâce au macaron « Titiri » attestant de la qualité sanitaire.

### **Les limites des dispositifs de surveillance réglementaires pour comprendre les transferts et le devenir du chlordécone**

Ces dispositifs de suivi, bien que nécessaires et précieux, reposent principalement sur des prélèvements ponctuels qui ne permettent pas de caractériser les processus complexes impliqués dans la variabilité spatio-temporelle de la contamination, pourtant essentielle à la gestion et à la prédiction du risque. Ils répondent avant tout à des impératifs réglementaires liés à l'évaluation du risque d'exposition de la population (pour les plans de surveillance) ou le suivi de la qualité des masses d'eau dans le cadre de la DCE.

De plus, dans le dispositif DCE, la localisation des stations est définie à partir d'un découpage territorial élémentaire des milieux aquatiques, basé sur une typologie de masses d'eau (cours d'eau, zone côtière, aquifère) et présentant des caractéristiques hydrologiques, biologiques et physico-chimiques homogènes. Ce protocole, orienté vers la conformité aux indicateurs et valeurs seuils, n'intègre pas de suivi coordonné dans un même bassin versant agricole de l'ensemble des compartiments contribuant aux transferts. De ce fait, il n'est pas adapté et est insuffisant pour analyser les flux de contaminants et les interactions entre eaux de surface, souterraines et milieux côtiers.

## ► Les dispositifs de recherche pour comprendre, prévoir et maîtriser les contaminations

Cette section s'appuie sur les informations issues de l'Observatoire des pollutions agricoles aux Antilles (Opale)<sup>9</sup> et montre comment les données provenant de dispositifs de recherche dédiés permettent de mieux comprendre les mécanismes de contamination par le chlordécone et leur évolution spatio-temporelle. Ces informations viennent compléter celles des réseaux de surveillance réglementaire, qu'elles contribuent à enrichir, voire à faire évoluer, afin d'améliorer les stratégies de réduction des impacts et de l'exposition des populations.

### Opale : un dispositif de suivi des compartiments de l'environnement

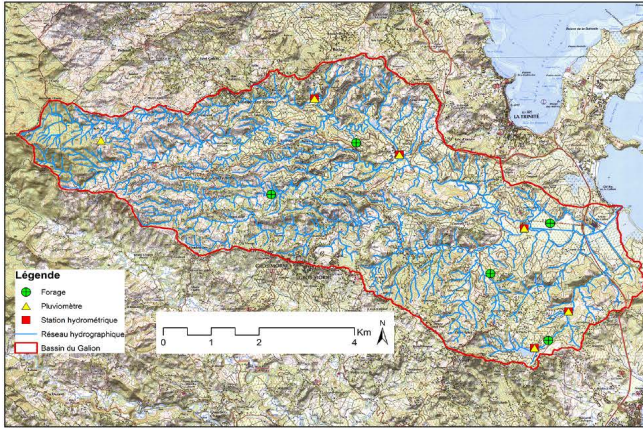
Le dispositif d'observation de la pollution environnementale en milieu tropical volcanique a été mis en place en 2016 par le BRGM, le Cirad, INRAE et l'IRD. Il est déployé sur les deux îles (figure 3.2), avec le suivi de deux hydrosystèmes contigus en Guadeloupe (rivière Pérou et rivière des Pères) et un en Martinique (bassin versant de la rivière du Galion). Son objectif est de suivre l'impact des pratiques agricoles, passées et actuelles, sur l'environnement, et notamment l'état de la contamination des sols par la chlordécone ainsi que la contamination multipesticide des eaux superficielles et souterraines. Depuis 2022, Opale s'est étendu aux milieux côtiers, avec la participation de l'université des Antilles en Guadeloupe et de l'Ifremer en Martinique, couvrant désormais le *continuum* terre-mer. La compréhension des processus de transferts intra- et intercompartiments (eaux superficielles, souterraines et côtières) a pour objectif de relier la pollution des sols et des eaux, ainsi que la contamination des biotes, aux pratiques agricoles passées, actuelles et futures.

Opale est le lieu d'acquisition de données à haute résolution sur les relations entre pratiques agricoles et exposition des sols et des milieux aquatiques aux produits phytosanitaires. Cela permet de comprendre et quantifier les processus de transfert et les impacts sur les différents compartiments des agrohydrosystèmes, au travers d'une caractérisation (i) spatiale (de la parcelle au bassin versant), et (ii) temporelle (évolutions pluriannuelle et saisonnière des transferts), selon des déterminants physiques et anthropiques.

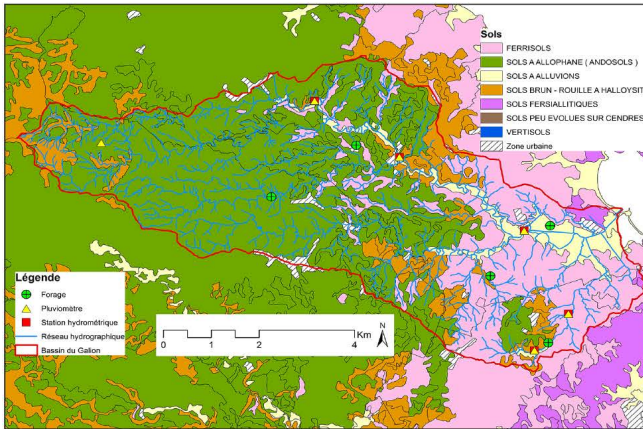
Les bassins versants du Galion (Martinique) et de Pérou et Pères (Guadeloupe) présentent des caractéristiques physiographiques spécifiques du milieu insulaire tropical volcanique cultivé. Ils se distinguent principalement par une forte variabilité climatique alternant saisons des pluies, pouvant être marquées par des tempêtes tropicales, et périodes sèches. Les sols sont généralement très perméables (Cattan *et al.*, 2006) et la géologie résulte d'une superposition de dépôts volcaniques très diversifiés et de leurs produits d'altération (Charlier *et al.*, 2015). Leurs complémentarités en matière d'occupation du sol, de pédologie, de géologie, d'hydrologie et de géomorphologie du littoral apportent une valeur ajoutée à l'étude de la variabilité du fonctionnement agrohydrologique et le devenir des contaminants en milieu antillais (figure 3.2). Le dispositif de mesures permet d'acquérir en continu des paramètres climatologiques (précipitations, température, humidité de l'air, ensoleillement, etc.),

9. <https://www.caec-carib.org/recherche/projets/projets-en-cours/opale>.

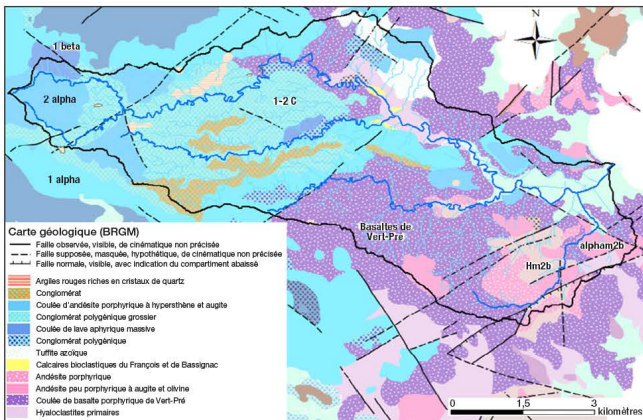
Martinique : Galion



40 km<sup>2</sup>  
 0 à 700 m  
 Réseau hydrographique ramifié  
 Aval : mangrove

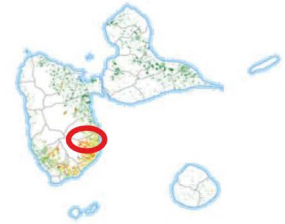
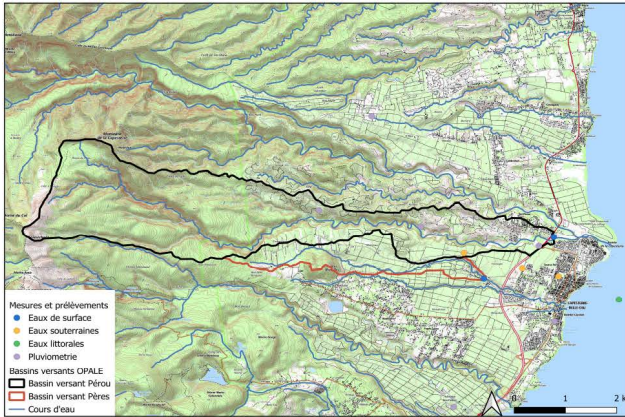


Andosols  
 Nitisols  
 Ferrisols

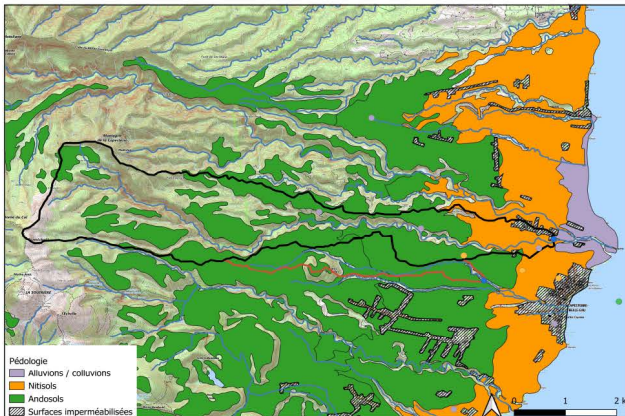


Formations géologiques anciennes  
 > 10 Ma  
 Forte altération

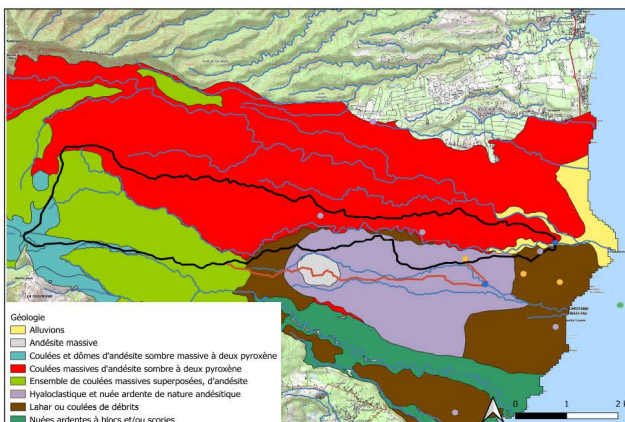
Guadeloupe : Pérou et Pères



15 km<sup>2</sup>  
 0 à 1 400 m  
 Réseau hydrographique linéaire  
 Aval : estuaire



Andosols  
 Nitisols



Formations géologiques récentes  
 < 1 Ma  
 Faible altération

Figure 3.2. Dispositif Opale : localisation et principales caractéristiques des sites observatoires.

les débits des cours d'eau en plusieurs points des bassins versants, ainsi que les niveaux piézométriques des nappes, associés à des mesures en continu de paramètres physico-chimiques des eaux (température, conductivité électrique, turbidité).

Le suivi des paramètres hydroclimatologiques (climatologie et débit des cours d'eau) poursuit deux objectifs principaux : (i) d'une part, évaluer les flux de polluants en couplant mesures de débits et de concentrations (en contaminants, en matières en suspension, etc.) ; (ii) d'autre part, déterminer les éléments-clés des bilans hydrologiques afin de quantifier et spatialiser leurs différents termes (précipitations ; évapotranspiration, c'est-à-dire flux d'eau repartant vers l'atmosphère ; écoulements par ruissellement et par drainage vers les nappes souterraines). Ce suivi est réalisé à un pas de temps fin (infrahoraire) pour appréhender les processus rapides (averses, crues) et lents (dynamique de tarissement de nappes d'eau souterraine, par exemple). Cette connaissance détaillée est indispensable pour analyser les transferts et le devenir des contaminants (dégradation, rétention, etc.) et pour évaluer les impacts du changement climatique et de l'occupation des sols sur le cycle hydrologique et les transferts de contaminants.

Pour les eaux de surface et souterraines, le suivi de contaminants repose sur une analyse multirésidus (469 pesticides, dont la chlordécone et ses deux métabolites, 5b-hydrochlordécone et chlordécol) des concentrations globales, dissoutes et particulaires, sur eaux brutes non filtrées. Dans les eaux de surface, le protocole d'échantillonnage repose sur des prélèvements hebdomadaires intégratifs par préleveur automatique, asservi au temps ou au débit, permettant d'acquérir une chronique long terme quasi exhaustive des concentrations en pesticides dans les rivières suivies. Dans les eaux souterraines, les prélèvements sont manuels, réalisés au pas de temps trimestriel jusqu'en 2019, avant d'être intensifiés à une fréquence mensuelle. Les échantillons d'eau souterraine sont collectés dans des forages ou par des prélèvements au niveau des sources, qui sont des émergences naturelles des aquifères. S'agissant des eaux côtières, elles sont suivies de façon trimestrielle, par le biais d'une station marine en Martinique située dans la baie du Galion et de deux stations en Guadeloupe, situées respectivement à 400 mètres et 900 mètres de l'embouchure de la rivière Pérou. La contamination des eaux côtières par les polluants agricoles en phase dissoute est suivie à l'aide d'échantillonneurs passifs de type Pocis sur lesquels sont recherchées 70 substances adsorbées durant la période d'immersion du Pocis (entre 2 et 3 semaines). Ce type de dispositif compense la forte variabilité des concentrations en polluants chimiques qui peut affecter les prélèvements manuels ponctuels. En Guadeloupe, le sédiment marin et le plancton (phyto- et zooplancton) sont également prélevés à chaque campagne afin d'évaluer leur niveau de contamination par le chlordécone seulement.

## Des premiers éléments pour comprendre les transferts de chlordécone

Les chroniques de concentration acquises par le dispositif Opale en Guadeloupe et en Martinique présentent des fluctuations importantes à court terme (figure 3.3), soulignant une dynamique de contamination très complexe dans le temps et selon la ressource en eau considérée (rivières, aquifères).

Ces mesures permettent de formuler des hypothèses sur les différents processus de transfert impliqués actuellement, notamment dans la dispersion du chlordécone dans l'environnement, mais également sur les autres pesticides en tenant compte des spécificités agronomiques, pédologiques, hydrologiques et hydrogéologiques des milieux

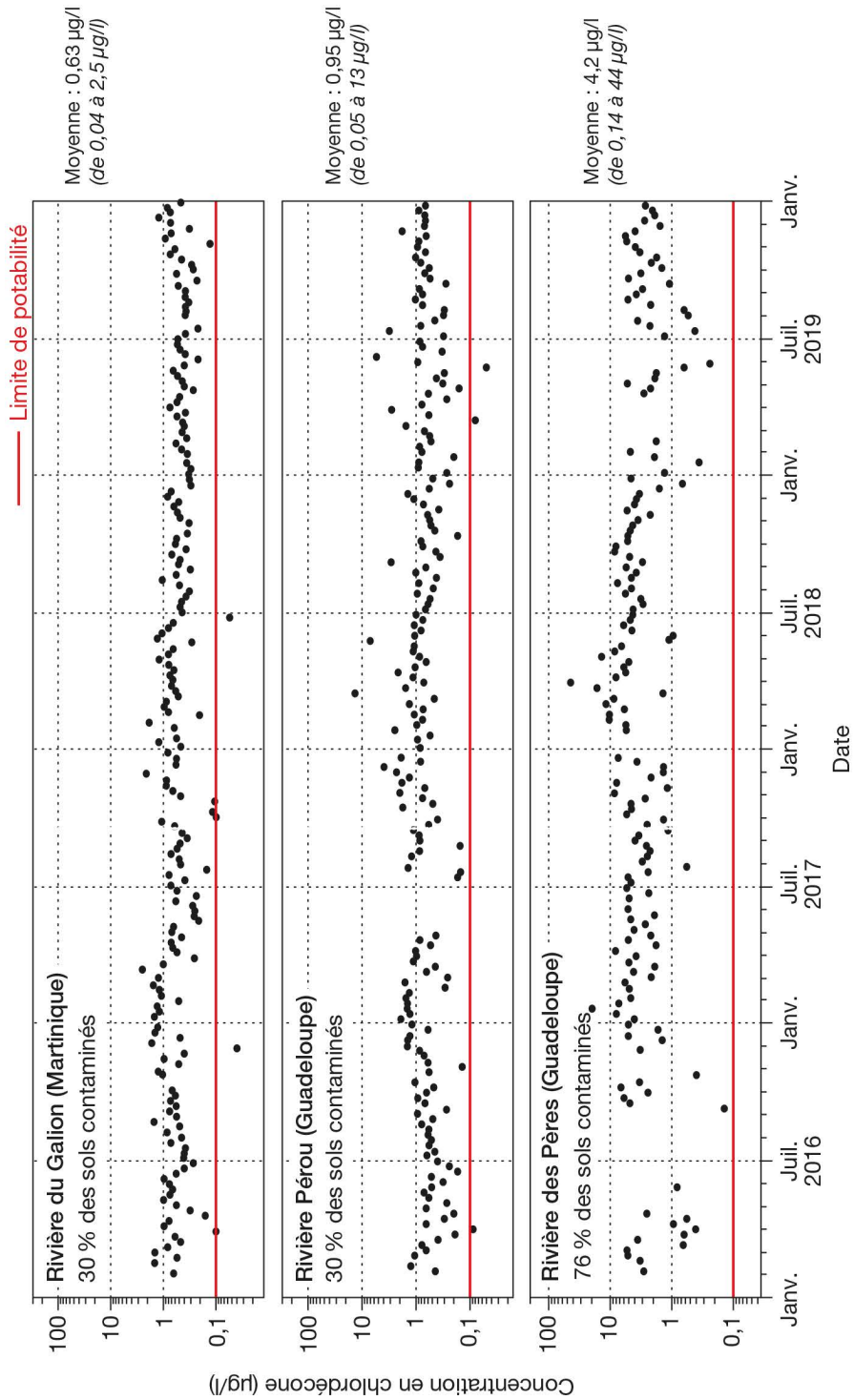


Figure 3.3. Chroniques et moyennes des concentrations en chlorodécone aux exutoires des trois bassins versants d'Opale de 2016 à 2019 (Voltz et al., 2022).

insulaires volcaniques antillais. Il en résulte plusieurs voies potentielles de transfert des contaminants du sol vers les eaux : ruissellement de surface, érosion, percolation à travers les sols vers les aquifères, échanges interaquifères, exfiltration des aquifères vers les rivières. Dans l'état actuel des connaissances, ces travaux ont conduit à hiérarchiser certaines voies de transferts. La contamination des nappes par flux de percolation provenant des sols contaminés constitue un premier élément majeur parmi les voies de contamination de l'environnement. En zone bananière, des concentrations de plusieurs dizaines de microgrammes par litre sont observées dans les eaux de sources et de forages (Gourcy *et al.*, 2009; Charlier *et al.*, 2015; Arnaud *et al.*, 2017), soit plusieurs centaines de fois la norme de potabilité. C'est notamment le cas de nombreuses sources dites «bord de route», dont l'eau est encore trop largement consommée par la population.

La notion de temps de résidence de l'eau au sein des aquifères est également cruciale pour caractériser le devenir du chlordécone et de ses produits de transformation dans les aquifères (Charlier *et al.*, 2015). En effet, les transferts souterrains, lents et quantifiés par des approches géochimiques, s'étendent sur plusieurs années à plusieurs décennies, selon le contexte hydrogéologique. Ainsi, les eaux souterraines fortement contaminées drainées actuellement par les sources ou les rivières sont des eaux anciennes dont la contamination peut dater de la période d'application du chlordécone (des eaux infiltrées pendant ou juste après les années 1970). L'exfiltration des eaux souterraines fortement contaminées vers les eaux de surface apparaît comme le vecteur majeur de la contamination chronique des rivières (Charlier *et al.*, 2011, 2015; Crabit *et al.*, 2016; Mottes *et al.*, 2020; Voltz *et al.*, 2023). Les transferts par ruissellement de surface, sous formes dissoute et particulaire (matières en suspension), peuvent toutefois générer des pics de concentration lors d'événements de précipitations intenses ou, inversement, diluer la contamination issue des eaux souterraines (Ponchant *et al.*, 2020; Mottes *et al.*, 2020; Voltz *et al.*, 2023). Une étude d'érosion sur carottes sédimentaires conforte l'occurrence de transfert particulaire de chlordécone (Bizeul *et al.*, 2025). Toutefois, un suivi spécifique de plusieurs crues dans la rivière Pérou a montré que, malgré l'affinité élevée du chlordécone pour la phase solide, la phase particulaire ne représente qu'une faible proportion, estimée à moins de 5 %, du transfert total annuel opéré par la rivière. La contribution du transfert particulaire au transfert total n'atteint un niveau comparable à celui de la phase dissoute que lors d'événements hydrologiques extrêmes (Ponchant *et al.*, 2020).

## Évaluation de la persistance du chlordécone à partir des analyses de sol

Les travaux de Cabidoche *et al.* (2009) ont proposé une première évaluation par modélisation de la persistance à long terme de la contamination des sols par le chlordécone en considérant la lixiviation comme le seul processus de dissipation du chlordécone dans les sols. Basé sur des hypothèses de fréquence et de dose d'application du chlordécone dans les parcelles, le modèle prédit des durées de contamination des sols allant de 60 à 600 ans selon les types de sol et en supposant l'absence de dégradation de la molécule. Récemment, la durée de contamination a été réestimée à la baisse sur la base d'une approche de modélisation modifiée et d'observations d'évolution de la teneur en chlordécone sur un nombre limité de parcelles (Comte *et al.*, 2022). Cette réestimation a toutefois été contestée (Saaidi *et al.*, 2023) et le débat scientifique reste donc ouvert (Voltz *et al.*, 2024).

Ainsi, la durée de contamination des sols antillais demeure une source majeure d'inquiétude, appelant un approfondissement des connaissances, et souligne notamment le besoin de concevoir un plan d'échantillonnage spatial. Ce protocole devrait avoir pour objectif de détecter des changements temporels de la concentration en chlordécone en prenant en compte la diversité des types de sols, l'hétérogénéité spatiale et les effets des pratiques agricoles. Cet objectif, accompagné d'un plan d'échantillonnage adapté, est actuellement absent des programmes de cartographie en cours. Ces derniers portent uniquement sur l'établissement d'un diagnostic de la pollution des parcelles par le chlordécone, donnée certes incontournable pour définir des mesures de gestion adaptées et réduire *in fine* l'exposition actuelle des populations, mais ne permettant pas d'appréhender les processus et d'évaluer la durabilité de la contamination.

### Qu'en est-il des pesticides utilisés aujourd'hui ?

L'interprétation des chroniques de qualité des eaux des bassins versants Pérou et Pères (Guadeloupe), mesurées durant la période 2016-2019, a également mis en évidence des pesticides actuels, sources de contamination des eaux de surface. Ces pesticides se caractérisent à la fois par leur intensité d'usage, mais aussi par des propriétés de dégradation et de rétention dans les sols qui leur confèrent une plus forte persistance ou mobilité (Voltz *et al.*, 2023). Parmi les pesticides actuellement utilisés, ce sont les herbicides (glyphosate et 2,4-D, par exemple) appliqués en cultures de banane et de canne à sucre, ainsi que les fongicides appliqués en traitement post-récolte des bananes (azoxystrobine, imazalil, thiabendazole, par exemple), qui sont à l'origine des niveaux significatifs de contamination des eaux de surface. Contrairement à la chlordécone, les voies majeures de contamination par ces molécules sont d'origine superficielle, au travers du ruissellement et du drainage des sols par le réseau hydrographique. Pour ces situations, des options de mitigation des contaminations sont envisageables par la mise en place de zones tampons végétalisées ou d'arrêt d'usage. Les observations sur ces bassins versants, mais aussi plus largement en Martinique (Delarque et Pak, 2023), montrent qu'un arrêt de l'utilisation de ces pesticides conduit en quelques mois à une diminution très significative de leur présence dans les eaux de surface. C'est, à titre d'exemple, ce qui a pu être observé après l'arrêt de l'usage d'un fongicide (l'imazalil) en traitement post-récolte de la banane en mai 2019, qui a conduit à une diminution progressive de sa concentration dans les eaux de rivière. Toutefois, l'introduction de molécules de substitution dans les pratiques agricoles peut engendrer de nouvelles formes de contamination, certaines substances émergentes étant déjà détectées dans les eaux superficielles, soulignant la nécessité d'une vigilance continue et de la promotion de pratiques agricoles visant à réduire l'usage de pesticides.

Ces observations sont cohérentes avec celles des suivis multirésidus opérés sur les eaux souterraines qui montrent que la chlordécone est la principale molécule déclassant la qualité des eaux des aquifères. Cependant, certains autres organochlorés, également interdits, et, pour certains, très anciens sont toujours présents dans les eaux souterraines (HCH alpha, HCH bêta, dieldrine), ainsi que certaines molécules ou produits de transformation d'autres molécules aujourd'hui interdites d'utilisation (le paraquat, qui est un métabolite de l'atrazine).

## ► Vers une consolidation à long terme des dispositifs d'observation

L'analyse conjointe des outils de diagnostic, de compréhension et d'action mis en place pour faire face à la contamination des milieux par le chlordécone, et les pesticides d'une manière générale, met en évidence une dynamique progressive de structuration, par compartiments environnementaux, de la gestion des pollutions diffuses.

Les dispositifs de suivi et de diagnostic, appuyés par les cadres réglementaires, ont permis d'identifier les zones géographiques les plus exposées, à l'échelle des bassins versants, mais aussi de balayer la diversité et la rémanence des substances chimiques utilisées à l'échelle des territoires antillais. Ces jeux de données constituent un socle de connaissances qui a servi de base à l'élaboration des premières réponses de gestion environnementale pour limiter l'exposition actuelle des populations. De manière complémentaire, le dispositif Opale opère des échantillonnages à haute fréquence et conjoints des compartiments sols-eau du *continuum* terre-mer en plusieurs sites représentatifs du milieu antillais. Ils permettent d'étudier de manière approfondie les mécanismes à l'origine des transferts du chlordécone depuis son lieu d'épandage initial vers les compartiments sols, eaux superficielles, souterraines et côtières. Les observations déjà acquises par Opale, combinées à des expérimentations temporaires ciblées, ont ainsi identifié plusieurs facteurs majeurs de variation dans le temps à court et moyen terme de la contamination des sols et des eaux par la chlordécone et ses métabolites, mais aussi par un ensemble de molécules pesticides anciennement ou actuellement utilisées. Le dispositif Opale joue également un rôle central dans le lien entre pratiques agricoles et contaminations. En documentant les effets de certaines pratiques culturales sur la qualité de l'eau, il accompagne des dynamiques de changement qui, bien qu'efficaces localement, nécessitent encore un passage à une échelle territoriale plus large au travers d'actions collectives, concertées et coordonnées.

Il en ressort notamment une connaissance plus aboutie des voies de transfert de ces molécules et des risques d'exposition chronique des organismes. Toutefois, les observations menées doivent être poursuivies pour améliorer la connaissance des tendances d'évolution des contaminations à long terme.

Sur la base des données et connaissances acquises par ces dispositifs, plusieurs mesures réglementaires ont été progressivement mises en place à la suite des actions de suivi environnemental. L'interdiction de pêche dans les zones littorales situées en aval des bassins versants contaminés, l'installation de systèmes de filtration pour les eaux de consommation captées en rivière, ou encore la mise en œuvre de contrats de rivière visant à appliquer une gestion concertée des ressources en eau, constituent autant de réponses concrètes.

Pour conclure, on soulignera que l'estimation de la durée de la contamination des sols et des eaux antillais par le chlordécone reste un enjeu primordial afin de pouvoir définir des mesures de gestion *ad hoc* pour réduire sur le long terme l'exposition des populations et des organismes animaux et végétaux. L'apport des dispositifs d'observation de la contamination, réglementaires et de recherche, est à cet égard essentiel et doit être approfondi. Outre la poursuite des observations sur des temps plus longs et un échantillonnage plus dense des compartiments environnementaux, les suivis menés

à l'échelle des bassins versants pourraient intégrer des données sur la santé humaine, permettant ainsi de lier le niveau d'exposition et le risque sanitaire des populations vivant dans ces bassins versants (chapitre 13).

## ► Références bibliographiques

- Arnaud L., Charlier J.B., Ducreux L., Taïlamé A.L., 2017. Groundwater quality assessment, in Lesueur-Jannoyer M., Cattani P., Woignier T., Clostre F. (éd.), *Crisis management of chronic pollution: Contaminated soil and human health*, Boca Raton, CRC Press, 55-72.
- Batailler C., 2022. Suivi du réseau de surveillance des masses d'eau littorales de la Guadeloupe : Évaluation de la contamination chimique à l'aide d'échantillonneurs passifs – Année 2021. Rapport d'étude, OFB-ODE-CREOCEAN, 85 p.
- Bizeul R., Lajoie O., Cerdan O., Pak L.T., Foucher A. *et al.*, 2025. Delayed environmental pollution caused by transient landscape storage — An example from the Lesser Antilles. *Environmental Pollution*, 366:125412. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125412>.
- Bonnet A., Labeille M., Bargier N., 2022. Valorisation des données de surveillance de la qualité des cours d'eau de Guadeloupe — année 2020, rapport Hydreco-Sentinelle Lab, Office de l'Eau Guadeloupe, Guadeloupe, 82 p.
- Cabidoche Y.M., Achard R., Cattani P., Clermont-Dauphin C., Massat F., Sansoulet J., 2009. Long-term pollution by chlordecone of tropical volcanic soils in the French West Indies: a simple leaching model accounts for current residue. *Environmental Pollution*, 157(5):1697-1705. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.12.015>.
- Cattani P., Cabidoche Y.M., Lacas J.G., Voltz M., 2006. Effects of tillage and mulching on runoff under banana (*Musa* spp.) on a tropical Andosol. *Soil & Tillage Research*, 86(1):38-51. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.02.002>.
- Cattani P., Charlier J.B., Clostre F., Letourmy P., Arnaud L. *et al.*, 2019. A conceptual model of organochlorine fate from a combined analysis of spatial and mid- to long-term trends of surface and ground water contamination in tropical areas (FWI). *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(2):691-709. <https://doi.org/10.5194/hess-23-691-2019>.
- Charlier J.B., Arnaud L., Ducreux L., Ladouche B., Dewandel B. *et al.*, 2015. CHLOR-EAU-SOL Caractérisation de la contamination par la chlordécone des eaux et des sols des bassins versants pilotes guadeloupéen et martiniquais, rapport final, BRGM-Cirad, 150 p.
- Charlier J.B., Lachassagne P., Ladouche B., Cattani P., Moussa R., Voltz M., 2011. Structure and hydrogeological functioning of an insular tropical humid andesitic volcanic watershed: a multi-disciplinary experimental approach. *Journal of Hydrology*, 398(3-4):155-170. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.10.006>.
- Comte I., Pradel A., Crabit A., Mottes C., Pak L.T., Cattani P., 2022. Long-term pollution by chlordecone of tropical volcanic soils in the French West Indies: New insights and improvement of previous predictions. *Environmental Pollution*, 303:119091. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119091>.
- Coulis M., Senecal J., Devriendt-Renault Y., Guerin T., Parinet J., Pak L.T., 2024. Fate of chlordecone in soil food webs in a banana agroecosystem in Martinique. *Environmental Pollution*, 362:124874. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124874>.
- Crabit A., Cattani P., Colin F., Voltz M., 2016. Soil and river contamination patterns of chlordecone in a tropical volcanic catchment in the French West Indies (Guadeloupe). *Environmental Pollution*, 212:615-626. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.02.055>.
- Delarque S., Pak L.T., 2023. Caractérisation des évolutions des concentrations en pesticides dans les eaux de surface du bassin versant du Galion en Martinique : résultats de six campagnes de suivi. Rapport annuel, Cirad, Martinique, 79 p.
- Della Rossa P., Jannoyer M., Mottes C., Plet J., Bazizi A. *et al.*, 2017. Linking current river pollution to historical pesticide use: Insights for territorial management? *Science of the Total Environment*, 574:1232-1242. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.065>.
- Desrosiers C., 2024. Suivi chimique des stations du Réseau de Surveillance des Masses d'Eau côtières et de Transition de la Martinique (Marché 2022). Rapport final, ODE-OFB-Impact Mer, 29 p.

- Dromard C.R., Bodiguel X., Lemoine S., Bouchon-Navaro Y., Reynal L. *et al.*, 2016. Assessment of the contamination of marine fauna by chlordécone in Guadeloupe and Martinique (Lesser Antilles). *Environmental Science and Pollution Research*, 23(1):73-80. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4732-z>.
- Dromard C.R., Bouchon-Navaro Y., Cordonnier S., Guéné M., Harmelin-Vivien M., Bouchon C., 2018. Different transfer pathways of an organochlorine pesticide across marine tropical food webs assessed with stable isotope analysis. *Plos One*, 13(2):e0191335. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191335>.
- Fernández-Bayo J.D., Saison C., Geniez C., Voltz M., Vereecken H., Berns A., 2013a. Sorption Characteristics of Chlordecone and Cadusafos in Tropical Agricultural Soils. *Current Organic Chemistry*, 17(24):2976-2984. <https://doi.org/10.2174/13852728113179990121>.
- Fernández-Bayo J.D., Saison C., Voltz M., Disko U., Hofmann D., Berns A.E., 2013b. Chlordecone fate and mineralisation in a tropical soil (andosol) microcosm under aerobic conditions. *Science of the Total Environment*, 463-464:395-403. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.06.044>.
- Gourcy L., Baran N., Vittecoq B., 2009. Improving the knowledge of pesticide and nitrate transfer processes using age-dating tools (CFC, SF<sub>6</sub>, <sup>3</sup>H) in a volcanic island (Martinique, French West Indies). *Journal of Contaminant Hydrology*, 108(3-4):107-117. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2009.06.004>.
- Kleitzi J., Cheng C., Batailler C., Coulon S., 2022. Suivi du réseau de surveillance des masses d'eau côtières du district de la Guadeloupe 2018-2021 au titre de la DCE : physico-chimie, phytoplancton, communautés coralliennes et herbiers — Année 2022. Rapport OFB-ODE-CREOCEAN, 240 p.
- Lala G., Bocaly M., 2023. Suivi des produits phytopharmaceutiques dans les cours d'eau de Martinique. Rapport de suivi 2022, Office de l'Eau Martinique, Martinique, 98 p.
- Lemaitre L., Seux B., 2021. Surveillance de l'état chimique des masses d'eau souterraine de la Guadeloupe et de Saint-Martin au titre de la DCE — Année 2020. Rapport final, OFB-ODE-BRGM, 60 p.
- Levillain J., Cattan P., Colin F., Voltz M., Cabidoche Y.M., 2012. Analysis of environmental and farming factors of soil contamination by a persistent organic pollutant, chlordecone, in a banana production area of French West Indies. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 159:123-132. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.07.005>.
- Malcuit E., Pinson S., Lions J., Taïlamé A.L., 2022. Suivis quantitatif et chimique des eaux souterraines de Martinique — Rapport annuel 2022. Rapport final,, BRGM/RP-73029-FR, 126 p. Disponible sur <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-73029-FR.pdf>.
- Mottes C., Deffontaines L., Charlier J.B., Comte I., Della Rossa P. *et al.*, 2020. Spatio-temporal variability of water pollution by chlordecone at the watershed scale: what insights for the management of polluted territories? *Environmental Science and Pollution Research*, 27(33):40999-41013. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06247-y>.
- Mottes C., Lesueur-Jannoyer M., Le Bail M., Guéné M., Carles C., Malézieux E., 2017. Relationships between past and present pesticide applications and pollution at a watershed outlet: The case of a horticultural catchment in Martinique, French West Indies. *Chemosphere*, 184:762-773. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.061>.
- Ponchant L., Samouëlian A., Andrieux P., Voltz M., 2020. Transfert des Pesticides par voies Dissoutes et Particulaire aux Antilles — TPDP Évaluation de la contamination par la chlordécone en rivière : rôle des voies de transfert dissoutes et particulaire. Rapport final, INRAE, Guadeloupe, 55 p.
- Saaidi P.L., Grünberger O., Samouëlian A., Le Roux Y., Richard A. *et al.*, 2023. Is a dissipation half-life of 5 years for chlordecone in soils of the French West Indies relevant? *Environmental Pollution*, 324:121283. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121283>.
- Voltz M., Andrieux P., Grünberger O., Pak L.T., Richard A., Samouëlian A., 2022. Actualisation des données scientifiques sur la contamination des eaux de surface par la chlordécone. Audition par l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et techniques, 17 février 2022. Disponible sur [https://videos.senat.fr/video.2825335\\_620e396873fda.audition-publique-sur-le-chlordecone](https://videos.senat.fr/video.2825335_620e396873fda.audition-publique-sur-le-chlordecone).
- Voltz M., Andrieux P., Samouëlian A., Ponchant L., Grünberger O. *et al.*, 2023. Flow patterns and pathways of legacy and contemporary pesticides in tropical volcanic catchments. *Science of the Total Environment*, 893:164815. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164815>.
- Voltz M., Saaidi P.L., Samouëlian A., 2024. Le chlordécone, une présence persistante. *La Recherche*, 580:42-43.

## Chapitre 4

---

# Perceptions, expériences et savoirs de la pollution au chlordécone et des risques sanitaires associés : apport des sciences sociales

*Sara Angeli Aguiton, Iris Cervenka, Jérôme Foucaud, Rubis Le Coq*

Dans une approche de sciences sociales, ce chapitre propose d'explorer les dimensions sociales et politiques, citoyennes comme institutionnelles, qui s'articulent à l'appréhension des risques sanitaires associés à l'exposition au chlordécone aux Antilles françaises. La première partie du chapitre revient sur une rétrospective historique du contexte d'utilisation du chlordécone et de l'émergence de la pollution comme problème public, rendant compte de l'imbrication des enjeux constitutifs de l'affaire chlordécone. Face à ces enjeux, il est essentiel de s'intéresser aux perceptions de la pollution et des risques. Après un aperçu des études menées sur le sujet, la deuxième partie du chapitre donne à voir les vécus citoyens au travers d'une étude ethnographique réalisée dans le cadre du projet de recherche Chloecapa. Enfin, la troisième partie du chapitre se base sur une étude détaillée de la littérature biomédicale et institutionnelle sur les questions de santé environnementale en lien avec le chlordécone, afin d'analyser la production de savoirs sur ces questions : recherches académiques, politiques publiques et mobilisations antillaises autour de la pollution au chlordécone et des risques sanitaires associés.

### » Rétrospective historique du chlordécone

#### Contexte de production et d'utilisation du chlordécone : à la croisée des enjeux

De 1971 à 1993, environ 300 tonnes de chlordécone ont été utilisées sur les terres de Guadeloupe et Martinique dans la lutte contre le charançon du bananier (Le Déaut et Procaccia, 2009), les habitants de ces îles se retrouvant aujourd'hui contaminés pour plus de 90% (Santé publique France, 2018). Au-delà d'une crise sanitaire et environnementale, revenir sur le contexte de production et d'utilisation du chlordécone montre que cette affaire est à la croisée de problématiques agricoles, économiques et politiques.

La production de la chlordécone a commencé en 1958 à Hopewell, dans l'état de Virginie aux États-Unis, par l'entreprise Allied Chemicals, puis LifeSciences

(Wilson, 2023). En France, après plusieurs rejets par la commission des toxiques pour le caractère persistant des organochlorés et les effets observés chez le rat, la molécule est autorisée provisoirement pour un an en 1972, sous la dénomination de Kepone® (Joly, 2010). Cette autorisation intervient après l'interdiction de l'HCH, pesticide jusqu'alors utilisé contre le charançon du bananier. En 1976, alors que l'usage du chlordécone s'était déjà probablement généralisé selon la chronologie documentée par Pierre-Benoit Joly, l'autorisation est renouvelée (Joly, 2010). À cette même période, les connaissances des risques pour la santé et l'environnement se sont développées : en 1975, un scandale sanitaire éclate à Hopewell en conséquence de contaminations aiguës des salariés de l'usine et d'une pollution importante de la rivière attenante (Wilson, 2023). Des études sur les ouvriers contaminés et l'environnement sont initiées. En 1979, le Centre international de recherche sur le cancer (Circ) classe le chlordécone en cancérogène probable pour l'humain grâce aux preuves existantes chez les modèles animaux. Malgré le développement de ces connaissances, le chlordécone est homologué en 1981 sous la formulation commerciale Curlone® après les cyclones David et Allen et leurs effets sur les monocultures de bananiers. Ce n'est qu'en 1990 que l'homologation est retirée, avec une dérogation jusqu'en 1993 pour les Antilles. En 2002, dix et trois tonnes de Curlone® ont été saisies respectivement en Martinique et en Guadeloupe, mais les soupçons d'une utilisation ou d'achats de Curlone® postérieurs à son interdiction en 1993 sont jugés infondés par la Commission des affaires économiques de l'Assemblée nationale au regard des quantités, de l'état des emballages et des contrôles pratiqués (Torny, 2009). Cette rétrospective historique montre que la pollution au chlordécone se rapproche d'un schéma fréquent en santé environnementale, où les intérêts économiques priment sur des signaux existants de risques sanitaires et environnementaux (Wilson, 2023). Le contexte sociohistorique spécifique aux Antilles ajoute par ailleurs une forte dimension sociale et politique, exposée et analysée par une approche ethnographique dans la seconde section de ce chapitre.

## Une définition tardive de la pollution au chlordécone comme problème public

Dès 1974, des travailleurs agricoles manifestent aux Antilles, dénonçant le manque de protection pour l'utilisation du chlordécone, et des rapports alertent sur la pollution des milieux à la fin des années 1970 (Wilson, 2023). Cependant, ce n'est qu'au début des années 2000 que des savoirs et des mesures visant à réduire l'exposition s'élaborent. En conséquence des premiers efforts de protection des eaux et des aliments, des contrôles des denrées alimentaires sont réalisés à partir de 2003, en parallèle d'un effort de cartographie des sols pollués (chapitre 3). L'alimentation étant identifiée comme un facteur central d'exposition, une dynamique de production de connaissances et de réglementations liées à l'exposition par les produits alimentaires est engagée, conduisant l'Afssa (Agence française de sécurité sanitaire des aliments, rôle actuellement tenu par l'Anses) à élaborer des valeurs toxicologiques de référence (VTR) pour l'absorption orale et des LMR pour les aliments (Torny, 2009). La VTR du chlordécone est ainsi produite en 2003, et a été réactualisée en 2021. L'élaboration et la mise à jour de ces seuils d'exposition alimentaire s'appuient sur des études d'exposition, notamment l'étude Kannari (2013-2014) et l'étude Kannari 2 (2021-2024) pilotées par Santé publique France. L'élaboration de ces valeurs toxicologiques dans l'espace de

la science réglementaire a plusieurs traductions concrètes pour les Antillais, notamment : (i) une régulation des marchés formels de l'agroalimentaire au titre de ces LMR; (ii) des préconisations alimentaires, notamment diffusées par les agences régionales de santé (ARS) au travers du programme Jafa (limitation de la consommation de légumes racines produits au jardin ou précautions culinaires spécifiques, telles l'épluchage dit « généreux »; carottage des sols dans les jardins privés); (iii) mais aussi un accès ouvert à la biosurveillance, avec la décision du parlement depuis 2020 du remboursement du dosage sanguin de la chlordécone (chlordéconémie) des habitants des deux îles, dans le but d'en faire un outil de prévention, comme le demandait depuis longtemps les associations et collectifs sur place. Les préconisations en matière de prise en charge en cas de chlordéconémie élevée sont en cours d'élaboration.

Le développement de ces connaissances et mesures, depuis les années 2000 jusqu'à nos jours, s'accompagne d'une mise en visibilité progressive de la pollution au chlordécone. Les mesures prises initialement — fermetures de captages, filtration d'eau, retrait d'aliments, restrictions sur la pêche, etc. — contribuent à une visibilité locale (Torny, 2009), renforcée par la médiatisation et les plaintes déposées contre X et contre l'État (Ferdinand, 2015). La visibilité au niveau national est plus tardive : la pression médiatique issue du rapport Belpomme en 2007 pousse notamment la mise à l'agenda de la gestion de la pollution au chlordécone dans la politique nationale, avec le lancement du premier plan gouvernemental sur la chlordécone en 2008 (Torny, 2009; chapitre 1).

## ► Perceptions et vécus citoyens de la pollution

Si la pollution au chlordécone a tardé à être reconnue comme une crise sanitaire et environnementale (chapitre 1), sa gestion ne peut se faire sans considérer l'imbrication de ses différentes composantes — économiques, sociales et historiques. S'intéresser aux perceptions, c'est-à-dire, aux vécus des populations locales, directement touchées par ces problématiques est ainsi primordial.

### Perceptions : un enjeu pour les institutions

Avec la mise en place des plans gouvernementaux successifs, des études sur la perception de la population ont vu le jour. En 2008, l'Inpes (Institut national de prévention et d'éducation pour la santé, aujourd'hui intégré à Santé publique France) réalise une enquête téléphonique afin d'analyser les perceptions et connaissances sur le chlordécone en Guadeloupe et en Martinique (Girard *et al.*, 2011) et en 2010, une enquête d'opinion est menée dans une perspective d'évaluation du plan chlordécone I (Féménias *et al.*, 2011). De multiples enquêtes incluant un recueil des perceptions sont effectuées concernant le programme Jafa (Aromataro, 2022; Jafa, 2016). En 2021, le volet Département et régions d'outre-mer du Baromètre santé de Santé publique France intègre une partie sur le chlordécone, avec des indicateurs tels que le sentiment d'information et la perception des risques pour la santé (Santé publique France, 2022). En 2022, une enquête qualitative pilotée par Santé publique France interroge les moyens de communication et la perception des messages de prévention sur le chlordécone (Noirot *et al.*, 2022).

Les résultats de ces études tendent à montrer une perception du risque, mais également un sentiment d'information insuffisant et une défiance envers les institutions. L'enquête réalisée en 2008 par l'Inpes montre que la chlordécone est connue d'une

majorité d'Antillais (85,1 % des 18-75 ans en ont entendu parler en Martinique et 85,0% en Guadeloupe) et plus des trois quarts estiment qu'elle représente un risque pour leur propre santé (Féménias *et al.*, 2011 ; Girard *et al.*, 2011). En revanche, plus de 80 % des enquêtés de 2008 expriment une insuffisance de l'information diffusée (Girard *et al.*, 2011). Ce sentiment d'information semble s'être amélioré, mais en 2017, encore 40% des personnes interrogées dans le cadre de l'enquête de l'Ireps (Instance régionale d'éducation et de promotion de la santé) sur la pêche déclarent ne pas être bien informées sur le chlordécone (Daniel Ladieu, 2017). Au-delà du manque d'information, les interrogés en 2008 expriment également en majorité une insatisfaction quant à l'action de l'État et des élus (entre 33 % et 45 % ne sont pas du tout satisfaits, et entre 25 % et 29 % plutôt pas satisfaits). Cette insatisfaction n'est pas isolée si on l'étend à l'ensemble des pesticides : en 2023, le Baromètre de l'Institut de radioprotection et sûreté nucléaire rapporte également au niveau hexagonal une grande défiance envers les autorités pour leurs actions de protection dans ce champ (53 %, dont 23 % ne sont pas du tout confiants) (Lutun et Bourgeois, 2023). Par ailleurs, la défiance envers les autorités aux Antilles ne se limite pas au chlordécone, mais concerne également la vie chère, l'état des infrastructures et des services publics, les inégalités, mais aussi le legs colonial (Odin, 2016).

## Ethnographier l'expérience de la pollution : une crise sanitaire et sociale

De manière complémentaire aux études de perception, en mobilisant des observations, entretiens et interactions répétées, l'ethnographie rend compte des expériences, usages, mobilisations et pratiques des Antillais exposés à cette pollution et à son traitement technicopoliticojuridique<sup>10</sup>. Il s'agit également d'analyser ces expériences et formes de vie des habitants des Antilles dans le contexte d'une pollution environnementale dont les origines sont anciennes (Ferdinand, 2019) et qui ne se limite pas au chlordécone. Comme ailleurs, les Martiniquais et Guadeloupéens sont également exposés à d'autres pesticides, passés ou actuels, notamment au glyphosate (Génération futures, 2018a) ainsi qu'à d'autres types de pollutions environnementales, telles que les émanations gazeuses des algues appelées « sargasses » (Menez, 2021). Malgré cela, la colère observée lors des mobilisations citoyennes et sa médiatisation semblent se concentrer autour de la molécule du chlordécone, alors même que ce pesticide a été utilisé sur d'autres territoires sur lesquels il n'a pas donné lieu à tant de mobilisations (Le Déaut et Procaccia, 2009). De quoi cette particularité antillaise dans le rapport au chlordécone est-elle le symptôme ?

Notre ethnographie témoigne de la conscience populaire de la dangerosité de l'exposition à ce pesticide, une inquiétude qui est notamment manifestée par une frange engagée de la population au travers de mobilisations ponctuelles ou à l'intérieur de collectifs.

---

10. Ce travail ethnographique a été conduit dans le cadre du projet Chloecapa, financé par l'Institut national du cancer. Les données présentées sont le résultat de l'analyse thématique et lexicale d'une cinquantaine d'entretiens et d'une trentaine d'observations conduites entre novembre 2022 et juillet 2025 en Martinique et en Guadeloupe. Les entretiens ont été menés auprès d'agriculteurs, de militants, d'institutionnels et de citoyens, hommes et femmes de statuts sociaux différents. Les observations ont été conduites lors de manifestations, de réunions d'associations militantes, au tribunal, dans les différents dispositifs mis en place dans le cadre du plan national d'action chlordécone IV (chlordéconémie, ateliers Jafa, carottages par la Fredon, etc.).

La perception des questions de santé, et le lien qui peut être fait avec la pollution environnementale au chlordécone, sont d'ailleurs au cœur de ces questions sociales et politiques. Des maladies chroniques (endométriase, diabète, hypertension) — surtout quand celles-ci sont hormonodépendantes et donc potentiellement sensibles aux perturbateurs endocriniens —, mais aussi la prévalence des cancers prostatiques (Multigner *et al.*, 2010) ou encore des pathologies du neurodéveloppement chez l'enfant (troubles dits « dys ») sont tour à tour associées par les enquêtés à l'exposition au chlordécone et font l'objet de recherches scientifiques (Oulhote *et al.*, 2023), permettant de donner une dimension systémique à différentes pathologies et, pour certains, de se constituer en victimes d'une exposition subie (Jouzel et Prete, 2024). Pour cette raison, la contribution des sciences biomédicales et naturelles s'avère indispensable à l'organisation de la réponse sanitaire. À partir des programmes de recherches mis en place, plusieurs dispositifs sont déployés pour aborder cet aspect du problème : ils prennent la forme de séances de sensibilisation aux bonnes pratiques alimentaires organisées dans le cadre du programme Jafa, de la gratuité de l'accès au dosage sanguin du chlordécone avec (Guadeloupe) ou sans (Martinique) ordonnance, de rendez-vous avec des diététiciens ou nutritionnistes pour les personnes considérées à risque telles que les femmes enceintes, ou pour les individus ayant une chlordéconémie significative, de formations à destination d'enseignants du secondaire, de jeux de société et pièces de théâtre de sensibilisation, etc. Malgré cette profusion de dispositifs à destination de la société civile, l'ethnographie montre que la connaissance de leur existence ainsi que leur accessibilité réelle pour les citoyens restent faibles.

Le constat de cet écart conduit à renouveler le postulat que la seule réponse technique et organisationnelle à un problème sanitaire ne suffit pas, et qu'il convient de ne pas négliger les dimensions sociales et politiques de cette crise.

La relation des citoyens antillais à l'État est fragilisée par le contexte d'utilisation de ce pesticide. Ces tensions se formalisent au travers de slogans de manifestations ou de graffitis, observés à Fort-de-France comme à Pointe-à-Pitre, mais également au travers de la procédure juridique mettant en cause la responsabilité de l'État français dans cette pollution. La conflictualité de la relation à l'État apparaît également dans les discours recueillis lors d'entretiens dans lesquels la pollution est qualifiée d'« empoisonnement volontaire », voire de « génocide » par certains enquêtés.

De l'ethnographie de l'expérience citoyenne de la pollution émerge un paradoxe : si la colère vis-à-vis de cette pollution est quasi unanime, les stratégies mises en place dans les pratiques quotidiennes pour se prémunir contre l'exposition à ce pesticide (dépistage sanguin, test des sols privés, modification des lieux d'approvisionnement, non-consommation des eaux de bord de route, non-culture de légumes racines dans les jardins contaminés, non-consommation de certains produits d'origine animale, etc.) sont existantes, mais peu mises en œuvre. Des enquêtés témoignent d'une forme de lassitude ressentie face au sentiment d'être trop souvent relégués et délaissés par l'État. Comme dans d'autres contextes, cette lassitude peut également s'exprimer face à l'exposition environnementale (Hart, 2023). Pour certains, les plans chlordécone et les différents projets de recherche mis en place leur donnent l'impression d'être considérés comme des « cobayes ». Un sentiment renforcé par des écrits institutionnels envisageant les territoires ultramarins comme des « sentinelles » ou des « laboratoires » pour la recherche française (CNRS, 2023). Ainsi, le dispositif de

chlordéconémie, les seuils d'exposition (VTR et LMR) ainsi que les programmes tels que les plans chlordécone sont perçus avec suspicion, voire rejet. La pollution des Antilles au chlordécone a ensuite été analysée comme symptomatique d'un « habiter colonial » (Ferdinand, 2019), issu de l'établissement d'une économie de la plantation et d'un système d'exploitation esclavagiste, duquel émane les modes de production agricole actuels (monocultures d'exportation) (Ferdinand et Jas, 2022), tandis que la consommation des denrées autoproduites dans les jardins fait l'objet des discours de prévention les plus visibles dans l'espace public (concernant les techniques de jardinage et d'élevage, les modes de préparation et de cuisson, etc.), pouvant être analysés comme une nouvelle forme d'individualisation des risques et de dépossession de l'usage de la terre. En parallèle, la crise du chlordécone aggrave les contraintes qui pèsent sur une agriculture en contexte insulaire et ultramarin, contribuant à freiner une volonté d'autosuffisance et de réduction de la dépendance économique à l'importation.

Par l'analyse de l'espace politique de la santé (Fassin, 1996), la contribution des sciences humaines et sociales révèle que l'expérience de la pollution au chlordécone aux Antilles françaises est vécue localement comme une violence ordinaire (Das, 2007), une *slow violence* (Nixon, 2013), diffuse et peu visible, venant s'additionner à d'autres formes d'injustices en matière de santé (insuffisance de médecins par habitant, infrastructures manquantes [IRM, pour imagerie par résonance magnétique], lenteur de la reconstruction du CHU de Pointe-à-Pitre après l'incendie de 2017). Ces violences répétées conduisent à un régime de doute (Fribault, 2015) vis-à-vis de l'État, qui a un effet sur la réception des politiques publiques mises en place, comme cela a été le cas au sujet de l'obligation vaccinale pendant la pandémie de Covid-19 (Mulot, 2021). En pratique, cela prend la forme de résistances d'une partie des citoyens face aux dispositifs étatiques.

### ► Santé environnementale : pathologies en milieu contaminé

La pollution des Antilles au chlordécone constitue un cas exemplaire de problématique de santé environnementale. Présente dans l'environnement sous forme résiduelle, la molécule contamine les eaux, les terres, traverse la chaîne alimentaire pour atteindre les corps humains, et est associée à différentes pathologies. Les liens entre présence du chlordécone dans l'environnement antillais et santé humaine des habitants de Martinique et de Guadeloupe font, depuis la fin des années 1990, l'objet de recherches, de mobilisations et de politiques publiques dédiées.

### Effets sociopolitiques contrastés des études scientifiques, et reproduction des inégalités de genre dans la prévention

En parallèle à la production de savoirs sur l'exposition alimentaire présentée en première partie, c'est le dossier du cancer, et plus particulièrement du cancer de la prostate, qui a été un point de focale des études scientifiques et de la réglementation publique, notamment en matière de santé au travail. L'étude épidémiologique Karuprostate sur le cancer de la prostate, de type « cas-témoin », fut conduite en Guadeloupe entre 2005 et 2007 (Multigner *et al.*, 2010), constatant une association positive significative entre le taux de concentration de chlordécone dans le sang et le taux de cancer de la prostate, suggérant ainsi un risque accru de ce cancer chez les personnes les plus exposées. Si de nombreuses études toxicologiques vont également dans le sens de ces résultats, Karuprostate est la seule étude épidémiologique sur le cancer de la prostate à ce jour.

Dès sa publication, cette étude a eu un fort retentissement public. Selon l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (Opecst; Le Déaut et Procaccia, 2009), en conséquence des préoccupations liées à la publication du rapport Belpomme en 2007, l'étude Karuprostate est considérée par les autorités publiques comme une manière de temporiser la crise dans l'attente de résultats épidémiologiques robustes, et alimente de nombreuses mesures du plan chlordécone II (2011-2013). L'étude Karuprostate contribue alors aux réflexions, dans le champ de la santé publique, sur l'éventualité d'une politique de dépistage du cancer de la prostate pour les hommes à risque aggravé, dont l'exposition au chlordécone (Haute Autorité de santé, 2012). Cette politique ne sera finalement pas mise en œuvre, mais elle indique un état des préoccupations du début des années 2010. À plus long terme, l'étude Karuprostate a été l'un des facteurs contribuant à la création, à l'hiver 2021, d'un tableau de maladie professionnelle sur le cancer de la prostate et l'exposition aux pesticides, incluant le chlordécone (Anses, 2021a). Deux nouvelles études épidémiologiques sont en cours sur le dossier du cancer de la prostate : la cohorte rétrospective KP-Caraïbes-Breizh incluant la Guadeloupe, et l'étude cas-témoin Chloecapa en Martinique.

Un autre ensemble d'études s'intéressent aux effets transgénérationnels de la pollution, par des recherches en épigénétique sur des modèles animaux. Ces travaux ont notamment porté sur des effets transgénérationnels de l'exposition au chlordécone sur la fertilité masculine chez les souris (Gely-Pernot *et al.*, 2018), de même que sur la dysfonction ovarienne (Legoff *et al.*, 2019) et sur des mutations génétiques dans les tissus de la prostate (Legoff *et al.*, 2021), toujours chez la souris, et même à faible dose. Ces recherches posent la question des effets sanitaires probables du chlordécone, notamment sur la fertilité, et pas uniquement pour les Antillais ayant été exposés de leur vivant, mais pour plusieurs générations encore à naître. La contamination au chlordécone donne à penser la « vie altérée » (Murphy, 2017) par son intrication avec des polluants dont les effets dépassent les seuls individus et agissent sur les générations futures, altération remettant en cause les conceptions épidémiologiques traditionnelles de l'exposition. En parallèle, les effets intergénérationnels de l'exposition aux pesticides font également l'objet d'une nouvelle reconnaissance politique au sein du Fonds d'indemnisation des victimes des pesticides (FIVP), qui, outre des expositions professionnelles, indemnise aussi des pathologies pédiatriques liées à l'exposition prénatale aux pesticides dans le cadre de l'activité professionnelle des parents. Sans présager d'un lien direct de causalité entre ces recherches en épigénétique et la mise en place du FIVP, il faut noter l'apparition des effets transgénérationnels de la pollution dans l'agenda de la recherche scientifique comme des dispositifs publics (Cara, 2023). L'accès des Antillais, notamment des enfants, à des dispositifs de réparation reste toutefois à étudier.

Si ces cas donnent à voir une traduction des recherches en mesure de politiques de santé publique, celles-ci relèvent principalement de la prévention concernant l'exposition alimentaire (autoconsommation), ou de l'indemnisation dans le cas d'exposition professionnelle en agriculture, en cas de cancer de la prostate. Derrière ces éléments très visibles, reste néanmoins dans l'ombre l'expérience concrète des Antillais : expériences de la pollution et de la maladie, qui méritent également d'être documentées.

La mise en visibilité de pathologies en santé-environnement a parfois pour contrepartie de produire de l'invisibilisation. Ainsi, les effets de l'exposition au chlordécone de certaines populations qualifiées de vulnérables (femmes enceintes, nouveau-nés et

enfants) font l'objet d'un discours ciblé, relativement général en matière de prévention et diminution des expositions, mais sans mesures spécifiques pour ces publics jusqu'à très récemment. C'est seulement en 2023 qu'est mis en place un dispositif d'accompagnement des femmes enceintes résidentes aux Antilles pour les aider à réduire leur exposition (chlordéconémie et consultations diététiques). Pourtant, une étude d'imprégnation de femmes enceintes et de nourrissons nommée « Hibiscus » avait été menée dès 2003 auprès d'un échantillon de 115 femmes accouchant dans les maternités publiques de Guadeloupe. Ses résultats montrent que la chlordécone est présente dans 87 % des prélèvements de sang maternel et 61,3 % au cordon ombilical, dans 100 % des prélèvements de graisse abdominale chez la mère, et dans 40 % du lait maternel (Multigner et Kadhel, 2004). La cohorte mère-enfant nommée « Timoun » a été constituée entre 2004 et 2007, incluant 1 068 femmes recrutées lors de leur troisième trimestre de grossesse. Un questionnaire a été réalisé, des échantillons sanguins ont été recueillis lors des accouchements ; et 55 % des enfants de la cohorte ont été suivis de façon longitudinale jusqu'à leurs 7 ans. Aujourd'hui âgés de 17 à 20 ans, ils ont été recontactés pour prendre part à la cohorte Timoun Puberté. Les publications des recherches en épidémiologie sur les données issues de cette cohorte sont nombreuses, et traitent de l'effet du chlordécone pendant la grossesse (Rouget *et al.*, 2020), sur le poids de naissance de l'enfant (Hervé *et al.*, 2016), son neurodéveloppement (Cordier *et al.*, 2015), sa motricité fine (Desrochers-Couture *et al.*, 2022), sa croissance (Costet *et al.*, 2015) et son poids (Costet *et al.*, 2022), son développement hormonal (Ayhan *et al.*, 2021), ainsi que sa cognition et son comportement (Oulhote *et al.*, 2023). Une étude menée par l'Anses sur l'exposition alimentaire des enfants de 18 mois (Anses, 2011) rend compte de conclusions rassurantes pour cette tranche d'âge dues à la composition de leur régime alimentaire (encore principalement composé de lait), mais identifie les 3-5 ans comme potentiellement plus exposés et appelle à la production de nouvelles données d'exposition au sujet de cette tranche d'âge, étude qui n'a pas encore été engagée. Ces travaux se sont principalement traduits en mesure de prévention visant les comportements individuels. D'autres pistes sont pourtant suggérées : l'équipe de recherche de l'Inserm à l'origine de la cohorte Timoun invite par exemple à mettre en place une surveillance et une prise en charge des enfants « présentant un retard psychomoteur, des troubles sensoriels, neuromoteurs ou intellectuels et/ou des difficultés relationnelles ». On constate d'importants décalages en matière de production de savoir en santé environnement sur d'autres dimensions du dossier, par exemple les effets de la pollution sur la fertilité. Ce décalage invite à penser les différences de genre dans la production de savoirs et de zones d'ignorance sur les pathologies en santé-environnement. La fertilité masculine a été étudiée dès 1999 à l'occasion d'une étude sur des travailleurs salariés (agricoles et non agricoles ; Multigner *et al.*, 2008) et n'a trouvé aucune corrélation significative entre exposition au chlordécone et infertilité. C'est uniquement en 2023 qu'est lancée l'étude Karufertil (étude épidémiologique cas-témoin et sociologie), financée par l'ANR, pour l'étude de la fertilité féminine en lien avec l'exposition au chlordécone. Les résultats de l'étude sur les effets de l'exposition au chlordécone sur la fertilité masculine ont-ils contribué à ralentir la production de connaissance sur la fertilité féminine ? Sans disposer de réponse à cette question, cet écart de 25 ans entre les deux études illustre typiquement un cas de production d'ignorance sur des questions touchant à la santé des femmes (de type « savoir que l'on ne sait pas, mais ne pas se soucier de savoir », si l'on suit la typologie de la sociologue des sciences et théoricienne féministe Nancy Tuana [2006]).

## Des mobilisations sur la santé environnementale

La santé environnementale est au cœur des préoccupations exprimées par les mobilisations antillaises sur le dossier du chlordécone, qu'elles soient portées par des associations écologistes, politiques, syndicales, féministes ou culturelles. Néanmoins, deux associations et collectifs ont mis ces préoccupations au centre de leur agenda.

L'Association médicale de sauvegarde de l'environnement et de la santé (Amses) se constitue en 2010 dans la foulée de la publication du rapport de Dominique Belpomme en 2007 sur la pollution des Antilles par les pesticides. Cette association rassemble des médecins, et se structure en marge de l'Union des médecins, dans le but de mener une activité de partage d'information entre professionnels, de sensibilisation sur les questions de santé environnementale et de la mobilisation judiciaire aux côtés d'autres associations, et sur le chlordécone en particulier (l'Amses est partie civile dans le procès contre l'État). Elle est également très présente dans les mouvements sociaux, en témoigne sa participation au Forum social de Martinique en 2018. En partenariat avec des associations écologistes, l'Amses réalise également du matériel de sensibilisation, comme le fascicule «Chlordécone, quelles sont les répercussions sur notre santé?» élaboré avec le collectif Lyannaj Pou Depolyé Matinik en 2021, couvrant des thématiques telles que la santé reproductive, le cancer et l'obésité, mais prenant également soin de rappeler l'historique du dossier et d'appeler à la mobilisation. L'Amses est donc une voix médicale alternative par rapport à la production de savoirs biomédicaux plus académiques et institués, alternative également au sens politique, car prenant part à des mobilisations aux côtés d'autres voix critiques et associations environnementales demandant des comptes à l'État.

Outre l'Amses, le Collectif des ouvriers agricoles et de leurs ayant droits empoisonnés par les pesticides (Coaadep), créé en décembre 2019 en Martinique, a également mené des actions et organisé une mobilisation sur les thématiques de la santé environnementale dans le contexte de la pollution au chlordécone. Sa principale action a été la réalisation d'une démarche d'épidémiologie populaire, c'est-à-dire une étude par laquelle des non-professionnels cherchent à produire des connaissances sur un risque environnemental et ses maladies associées et à obtenir une reconnaissance en retour (Brown, 1987). Les acteurs engagés dans une démarche d'épidémiologie populaire ont souvent une définition du problème, un *design* d'étude, et une interprétation des résultats et des objectifs politiques qui diffèrent des scientifiques professionnels et des acteurs publics (Brown, 1992). Ainsi, le Coaadep, aidé des médecins de l'Amses et d'Anne-Marie Gilles-Dumoutier, médecin scolaire, a constitué un questionnaire et initié une campagne d'entretiens menée par 30 enquêteurs activistes. Les résultats collectés (70 fiches en 2020) faisaient remonter un nombre important de cancers (de la prostate, du côlon, du pancréas, du cerveau, du sein), de maladies cardiaques, de diabète, de cholestérol, d'insuffisances rénales, d'hypertension, de polyarthrites, de troubles musculosquelettiques, de fausses-couches à répétition, de déchaussements de la dentition, d'asthme, de cécités et d'endométrioses. Ces données, qui ne sont pas réalisées selon les standards de l'épidémiologie professionnelle, sont néanmoins de précieux savoirs expérimentiels permettant une mise en visibilité des maux de santé environnementale des Martiniquais, et des supports de mobilisation pour les associations et collectifs engagés.

Les mobilisations de l'Amses et du Coaadep éclairent les dynamiques contestataires et revendicatives qui traversent également le champ de la santé environnementale.

Elles rappellent que la production de savoirs académiques n'épuise pas les problématiques et les besoins locaux, et cherchent à faire reconnaître d'autres cadrages de la pollution et de ses conséquences (autres pathologies, modes d'exposition, générations futures) de même qu'elles formulent des demandes de réparation à la hauteur des dommages subis.

### **Continuités toxiques et inégalités sanitaires**

À l'issue de ce chapitre, et notamment de la présentation des travaux de recherche engagés sur les effets sanitaires de la pollution au chlordécone, nous souhaitons insister sur l'importance de ne pas faire du chlordécone le problème public d'un passé dont nous serions sortis. Certes, le chlordécone n'est plus employé et les efforts de santé publique visent maintenant exclusivement à gérer les effets sanitaires et environnementaux de traces résiduelles persistantes. Néanmoins, d'autres pesticides sont massivement utilisés aux Antilles françaises, la Guadeloupe et la Martinique étant en troisième et sixième position des départements les plus consommateurs de glyphosate en France par hectare de surface agricole utile (Génération futures, 2018b). Ces pesticides sont massivement employés à domicile (Anses, 2021b), et laisse ouverte la question de l'accumulation des molécules dans l'environnement et des effets cocktails. Ainsi, l'étude Chleauterre, menée en Guadeloupe dans le cadre du plan chlordécone III par des chercheurs du Cirad et d'INRAE, a détecté des résidus de pesticides dans 79% des bassins versants en Grande-Terre et 84% en Basse-Terre (Rochette *et al.*, 2017). 37 molécules ont été détectées, « majoritairement des herbicides (glyphosate, acide aminométhylphosphonique ou AMPA...) puis des insecticides (chlordécone, HCH bêta...), des fongicides et des nématicides ». Si « plus de la moitié des molécules détectées correspondent à des pesticides aujourd'hui interdits, qui ne sont plus utilisés mais qui persistent dans l'environnement (chlordécone, HCH bêta, dieldrine, atrazine...) »<sup>11</sup>, il est néanmoins important de questionner ce que sera la persistance des produits actuels dans les corps et les environnements.

Par ailleurs, si nous avons choisi de nous concentrer sur la production de savoirs et de dispositifs de santé publique au sujet du chlordécone, la question du risque sanitaire en Martinique et en Guadeloupe est à resituer plus largement dans le contexte d'un système de santé en crise, encore plus criante aux Antilles qu'à l'échelle nationale. En effet, les Martiniquais et Guadeloupéens sont confrontés à des inégalités d'accès à la santé prenant la forme d'un nombre de médecins par patient inférieur à la moyenne nationale, ainsi que par la nécessité de devoir se rendre en Hexagone ou de circuler entre les îles (Martinique, Guadeloupe et Saint-Barthélemy) pour avoir accès à certains médecins spécialistes n'exerçant pas sur leur île de résidence, et sont également confrontés à des délais de prise en charge de plusieurs mois. Le chlordécone invite donc à penser ensemble les conditions de vie de même que les conditions de soin, sans dissocier les aspects sanitaires d'une pollution passée des questions sociales et environnementales actuelles.

---

11. Voir : <https://daaf.guadeloupe.agriculture.gouv.fr/chlordecone-et-pesticides-mise-a-disposition-des-resultats-de-l-etude-a507.html>.

## ► Références bibliographiques

- Anses, 2011. Évaluation de l'exposition alimentaire au chlordécone des enfants guadeloupéens de 18 mois. Rapport d'étude, 47 p. Disponible sur <https://www.anses.fr/en/system/files/PASER-Ra-ChlordeconeEnfants.pdf>.
- Anses, 2021a. Cancer de la prostate en lien avec les pesticides incluant le chlordécone. Avis de l'Anses — Rapport d'expertise collective, 368 p. Disponible sur <https://www.anses.fr/system/files/2018SA0267Ra.pdf>.
- Anses, 2021b. Étude Pesti'home. Départements et régions d'outre-mer. Guadeloupe - Martinique - La Réunion — Rapport d'étude scientifique, 260 p. Disponible sur <https://www.anses.fr/en/system/files/2019SA0163-Ra.pdf>.
- Aromatarario O., 2022. Évaluation des conditions d'efficacité du programme « Jardins familiaux » (Evajafa).
- Ayhan G., Rouget F., Giton F., Costet N., Michineau L. *et al.*, 2021. In Utero Chlordecone Exposure and Thyroid, Metabolic, and Sex-Steroid Hormones at the Age of Seven Years: A Study From the TIMOUN Mother-Child Cohort in Guadeloupe. *Frontiers in Endocrinology*, 12:771641. <https://doi.org/10.3389/fendo.2021.771641>.
- Belpomme D., 2007. Rapport d'expertise et d'audit externe concernant la pollution par les pesticides en Martinique. Conséquences agrobiologiques, alimentaires et sanitaires et proposition d'un plan de sauvegarde en cinq points. Association pour la recherche thérapeutique anti-cancéreuse, 54 p. Disponible sur [https://www.artac.info/wp-content/uploads/2023/09/Rapport\\_Martinique.pdf](https://www.artac.info/wp-content/uploads/2023/09/Rapport_Martinique.pdf).
- Brown P., 1987. Popular epidemiology: Community response to toxic waste-induced disease in Woburn, Massachusetts. *Science, Technology, & Human Values*, 12(3/4):78-85. <https://www.jstor.org/stable/689386>.
- Brown D.P., 1992. Mortality of workers employed at organochlorine pesticide manufacturing plants — an update. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 18(3):155-161. <https://doi.org/10.5271/sjweh.1593>.
- Cara G., 2023. L'exposition pré et postnatale au chlordécone pourrait impacter le développement cognitif et le comportement des enfants. Salle de presse de l'Inserm.
- CNRS, 2023. Feuille de route Outre-mer du CNRS. Disponible sur <https://www.cnrs.fr/sites/default/files/news/2023-06/Feuille%20de%20route%20Outre-mer.pdf>.
- Cordier S., Bouquet E., Warembourg C., Massart C., Rouget F. *et al.*, 2015. Perinatal exposure to chlordecone, thyroid hormone status and neurodevelopment in infants: The Timoun cohort study in Guadeloupe (French West Indies). *Environmental Research*, 138:271-278. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.02.021>.
- Costet N., Lafontaine A., Rouget F., Michineau L., Monfort C. *et al.*, 2022. Prenatal and childhood exposure to chlordecone and adiposity of seven-year-old children in the Timoun mother-child cohort study in Guadeloupe (French West Indies). *Environmental Health*, 21(1):42. <https://doi.org/10.1186/s12940-022-00850-2>.
- Costet N., Pelé F., Comets E., Rouget F., Monfort C. *et al.*, 2015. Perinatal exposure to chlordecone and infant growth. *Environmental Research*, 142:123-134. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.06.023>.
- Daniel Ladieu, 2017. Apporter des éléments de connaissance sur la thématique pêche et chlordécone. Rapport, Études et Stratégie SAS.
- Das V., 2007. *Life and words: violence and the descent into the ordinary*. Berkeley, University of California Press, 281 p. <https://doi.org/10.1515/KL.2010.006F>.
- Desrochers-Couture M., Cordier S., Rouget F., Michineau L., Monfort C. *et al.*, 2022. Visuospatial processing and fine motor function among 7-years old Guadeloupe children pre- and postnatally exposed to the organochlorine pesticide chlordecone. *NeuroToxicology*, 88:208-215. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2021.12.003>.
- Fassin D., 1996. L'espace politique de la santé — Essai de généalogie (1re éd). Paris, Presses universitaires de France, 323 p.

- Féménias A., Blanchard P., Gillet H., Renucci A., 2011. Évaluation des plans d'action Chlordécone aux Antilles (Martinique, Guadeloupe). Cgedd, Igas, Cgaaer, Igaenr, 106 p. Disponible sur <https://igas.gouv.fr/Evaluation-des-plans-d-action-Chlordecone-aux-Antilles-Martinique-Guadeloupe>.
- Ferdinand M., 2015. De l'usage du chlordécone en Martinique et en Guadeloupe : l'égalité en question. *Revue française des affaires sociales*, (1-2):163-183.
- Ferdinand M., 2019. *Une écologie décoloniale — Penser l'écologie depuis le monde caribéen*. Paris, Éditions du Seuil, 461 p. (coll. Anthropocène Seuil).
- Ferdinand M., Jas N., 2022. Habiter colonial, pollution et production d'ignorance, in Boudia S., Henry E. (dir.), *Politiques de l'ignorance*, La vie des idées.
- Fribault M., 2015. Ebola en Guinée : violences historiques et régimes de doute. *Anthropologie et Santé*, 11. <https://doi.org/10.4000/anthropologiesante.1761>.
- Gely-Pernot A., Hao C., Legoff L., Multigner L., D'Cruz S.C. et al., 2018. Gestational exposure to chlordecone promotes transgenerational changes in the murine reproductive system of males. *Scientific Reports*, 8:10274. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28670-w>.
- Génération futures, 2018a. Carte des ventes de glyphosate par ha de SAU, par département (2017), Génération Futures. Disponible sur <https://www.generations-futures.fr/cartes/carte-ventes-de-glyphosate-ha-de-sau-departement-2017/>.
- Génération futures, 2018b. Les cartes des pesticides et les GlyphAwards : comment se répartissent géographiquement les ventes de pesticides en France ? Disponible sur [https://www.generations-futures.fr/wp-content/uploads/2018/11/dp201178\\_cartes\\_pesticidesv2-1.pdf](https://www.generations-futures.fr/wp-content/uploads/2018/11/dp201178_cartes_pesticidesv2-1.pdf).
- Girard D., Léon C., Gall B., Guilbert P., 2011. Encadré. Le chlordécone : connaissances, perceptions et comportements de la population antillaise. *Bulletin épidémiologique hebdomadaire*, 3-4-5:24. Disponible sur [https://www.santepubliquefrance.fr/sites/default/files/rdd/document/18454\\_10605-10605-ps.pdf](https://www.santepubliquefrance.fr/sites/default/files/rdd/document/18454_10605-10605-ps.pdf).
- Hart L., 2023. *Risk and Adaptation in a Cancer Cluster Town*. New Brunswick, Rutgers University Press, 176 p.
- Haute Autorité de santé, 2012. Cancer de la prostate : identification des facteurs de risque et pertinence d'un dépistage par dosage de l'antigène spécifique prostatique (PSA) de populations d'hommes à haut risque ?, 80 p. Disponible sur [https://www.has-sante.fr/jcms/c\\_1238317/fr/rapport-d-orientation-cancer-de-la-prostate](https://www.has-sante.fr/jcms/c_1238317/fr/rapport-d-orientation-cancer-de-la-prostate).
- Hervé D., Costet N., Kadhel P., Rouget F., Monfort C. et al., 2016. Prenatal exposure to chlordecone, gestational weight gain, and birth weight in a Guadeloupean birth cohort, *Environmental Research*, 151:436-444. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.08.004>.
- Jafa, 2016. Bilan des actions du programme Jafa 2009-2015. ARS-Ireps, 40 p. Disponible sur <https://jafa.ireps.gp/wp-content/uploads/2016/10/Bilan-actions-Jafa-impression.pdf>.
- Joly P.B., 2010. La saga du chlordécone aux Antilles françaises Reconstruction chronologique 1968-2008. Document réalisé dans le cadre de l'action 39 du plan chlordécone, Inra-Ifris, 82 p. Disponibles sur <https://www.anses.fr/system/files/SHS2010etInracol01Ra.pdf>.
- Jouzel J.N., Prete G., 2024. *L'agriculture empoisonnée*. Presses de Sciences Po, 288 p. <https://doi.org/10.3917/scpo.jouze.2024.01>.
- Le Déaut J.Y., Procaccia C., 2009. Impacts de l'utilisation de la chlordécone et des pesticides aux Antilles : bilan et perspectives d'évolution. Rapport d'information, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. Disponible sur <https://www.senat.fr/rap/r08-487/r08-487.html>.
- Legoff L., Dali O., D'Cruz S.C., Suglia A., Gely-Pernot A. et al., 2019. Ovarian dysfunction following prenatal exposure to an insecticide, chlordecone, associates with altered epigenetic features. *Epigenetics Chromatin*, 12(1):29.
- Legoff L., D'Cruz S.C., Lebosq M., Gely-Pernot A., Bouchehchoukha K. et al., 2021. Developmental exposure to chlordecone induces transgenerational effects in somatic prostate tissue which are associated with epigenetic histone trimethylation changes. *Environment International*, 152106472. <https://doi.org/10.1186/s13072-019-0276-7>.

- Lutun H., Bourgeois T., 2023. La confiance accordée par les Français aux autorités pour les protéger, in IRSN, *Baromètre 2023 — La perception des risques et de la sécurité par les Français — L'analyse*, 36-38. Disponible sur <https://barometre-perceptiondesrisques.asnr.fr/wp-content/uploads/2025/09/IRSN-Barometre-2023-ANALYSE.pdf>.
- Menez F., 2021. Les lanceurs de SOS : entre mobilisations profanes et expertes pour la reconnaissance du problème des échouements de sargasses en Martinique, *Écologie & politique*, 63(2):107-119. <https://doi.org/10.3917/ecopo1.063.0107>.
- Mulot S., 2021. Sur le refus de la vaccination en Guadeloupe. *AOC.media*.
- Multigner L., Kadhel P., 2004. Exposition à des polluants environnementaux chez la femme enceinte et son enfant en Guadeloupe. Niveaux de chlordécone dans le sang maternel et étude des déterminants de l'imprégnation., Inserm U625-Service Gynécologie-obstétrique CHU Pointe-à-Pitre.
- Multigner L., Kadhel P., Pascal M., Huc-Terki F., Kercret H. *et al.*, 2008. Parallel assessment of male reproductive function in workers and wild rats exposed to pesticides in banana plantations in Guadeloupe. *Environmental Health*, 7(1):40. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-7-40>.
- Multigner L., Ndong J.R., Giusti A., Romana M., Delacroix-Maillard H. *et al.*, 2010. Chlordecone Exposure and Risk of Prostate Cancer. *Journal of Clinical Oncology*, 28(21):3457-3462. <https://doi.org/10.1200/JCO.2009.27.2153>.
- Murphy M., 2017. Alterlife and Decolonial Chemical Relations. *Cultural Anthropology*, 32:4, 494-503. <https://doi.org/10.14506/ca32.4.02>.
- Nixon R., 2013. *Slow violence and the environmentalism of the poor*. Cambridge, Harvard University Press, 353 p.
- Noirot L., Delamaire C., Barrau M., 2022. Élaboration de messages de prévention chlordécone : mise en oeuvre d'une démarche participative. Présenté à Chlordécone : connaître pour agir. Colloque scientifique international., Le Gosier, Guadeloupe, 12-14 décembre 2022, 4 p.
- Odin P., 2016. « Négociateur pour mieux lutter » : définition des problèmes publics et stratégies de mobilisation en Guadeloupe (2009). *Participations*, 16(3):223-248. <https://doi.org/10.3917/parti.016.0223>.
- Oulhote Y., Rouget F., Michineau L., Monfort C., Desrochers-Couture M. *et al.*, 2023. Prenatal and childhood chlordecone exposure, cognitive abilities and problem behaviors in 7-year-old children: the TIMOUN mother-child cohort in Guadeloupe. *Environmental Health*, 22(1):21. <https://doi.org/10.1186/s12940-023-00970-3>.
- Rochette R., Andrieux P., Bonnal V., Cattan P., 2017. Projet ChlEauTerre — Contamination des bassins versants de la Guadeloupe continentale par la chlordécone — Actualisation des connaissances et cartographie des zones à risque de contamination. Rapport final, Inra-Cirad, 89 p. Disponible sur [https://daaf.guadeloupe.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Projet\\_ChEauTerre\\_-\\_Rapport\\_Final\\_2017\\_cle8e6961.pdf](https://daaf.guadeloupe.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Projet_ChEauTerre_-_Rapport_Final_2017_cle8e6961.pdf).
- Rouget F., Kadhel P., Monfort C., Viel J.F., Thome J.P. *et al.*, 2020. Chlordecone exposure and risk of congenital anomalies: the Timoun Mother-Child Cohort Study in Guadeloupe (French West Indies). *Environmental Science and Pollution Research*, 27(33):40992-40998. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06031-y>.
- Santé publique France (éd.), 2018. Imprégnation de la population antillaise par la chlordécone et certains composés organochlorés en 2013/2014. 6 p. Disponible sur <https://www.santepubliquefrance.fr/regions-et-territoires/antilles/rapportsynthese/impregnation-de-la-population-antillaise-par-la-chlordecone-et-certains-composes-organochlores-en>.
- Santé publique France, 2022. Baromètre de Santé publique France 2021. Questionnaire / Volet DROM. 29 p.
- Torny D., 2009. Le chlordécone aux Antilles : de la découverte de la pollution à la constitution de la crise sanitaire, in Inserm-Institut de veille sanitaire, *Impact de l'utilisation du chlordécone aux Antilles françaises — Recommandations pour les recherches et les actions de santé publique*, 5-16.
- Tuana N., 2006. The speculum of ignorance: the women's health movement and epistemologies of ignorance. *Hypatia*, 21(3):1-19. <https://doi.org/10.1111/j.1527-2001.2006.tb01110.x>.
- Wilson G.S., 2023. *Poison Powder: The Kepone Disaster in Virginia and Its Legacy*. Athens, University of Georgia Press, 252 p

## Chapitre 5

---

# L'évaluation des risques de contamination des écosystèmes et des êtres humains : processus, impacts et méthodologies

*Marc Voltz, Dominique Monti, Mathieu Coulis, Magalie Jannoyer,  
Agnès Fournier, Guido Rychen, Xavier Coumoul*

L'indissociabilité entre la santé humaine et la santé des écosystèmes est une réalité incontournable, particulièrement mise en lumière dans le cas de contaminations par des polluants organiques persistants (POP), tels que la chlordécone. Ces substances, caractérisées par leur extrême persistance dans l'environnement et leur capacité à s'accumuler dans les tissus biologiques (humains ou non), génèrent des risques majeurs pour la santé humaine et la biodiversité. Pour être à même de gérer ces risques et notamment de les réduire, une des conditions préalables est de pouvoir les caractériser et les évaluer.

L'objectif de ce chapitre est ainsi de faire le point sur les démarches actuelles ou souhaitables d'évaluation de ces risques à partir du cas très exemplaire de la contamination et des impacts sur les écosystèmes et la santé humaine causés par la chlordécone dans les Antilles françaises.

L'introduction de la chlordécone dans l'environnement antillais par son utilisation agricole dans les années 1970 a produit une pollution diffuse, contaminant en premier lieu les sols sur lesquels la molécule a été appliquée, puis se diffusant progressivement vers d'autres milieux, dont les eaux souterraines et les cours d'eau, avec pour conséquence une exposition de la flore et de la faune locales sur de larges surfaces de l'écosystème antillais. Le fait que des organismes aquatiques, des oiseaux, des reptiles et des mammifères soient touchés et accumulent cette molécule témoigne de sa migration et des perturbations causées à large échelle dans les chaînes alimentaires trophiques. En bout de chaîne, la chlordécone a pu être ingérée par l'être humain au travers de l'alimentation, en particulier par l'intermédiaire de produits agricoles contaminés et de l'eau. Ceci explique pourquoi les travailleuses et travailleurs agricoles ne sont pas les seuls concernés par cette contamination (environ 90 % de la population aux Antilles présente un taux de chlordécone détectable dans le sang). Une fois dans les organismes, la chlordécone peut provoquer de nombreux problèmes de santé qui ne sont pas tous caractérisés. On peut citer un risque accru de troubles hormonaux, d'effets neurotoxiques et de cancers (prostate, par exemple). L'évaluation des risques liés à la chlordécone nécessite donc de considérer non seulement les mécanismes de transfert de la molécule entre les compartiments des écosystèmes et entre ces derniers et la chaîne alimentaire, mais aussi l'influence de l'organisation spatiale des écosystèmes et des circuits alimentaires sur l'expression de ces mécanismes. L'approche d'évaluation

de risques doit ainsi être de nature holistique et menée à l'échelle du territoire, croisant les organisations physique et humaine, concernées par la contamination.

Il est essentiel à ce stade de comprendre les différences entre danger et risque pour mieux appréhender quels outils et méthodes d'évaluation des impacts et de caractérisation des risques peuvent être mis en place à l'échelle des territoires.

– Le danger fait référence aux propriétés intrinsèques d'une substance qui lui confèrent la capacité de causer des dommages ou des effets nocifs pour la santé des organismes exposés. Il est généralement évalué en termes de toxicité, de persistance, de bio-accumulation et d'autres caractéristiques intrinsèques du polluant. Par exemple, la chlordécone est considérée comme une molécule hépatotoxique, neurotoxique, reprotoxique, mais aussi capable de favoriser les processus de prolifération cellulaire (importants pour la cancérogenèse) et enfin de s'accumuler dans les tissus biologiques.

– Le risque est une estimation de la probabilité que le danger se concrétise et entraîne des conséquences néfastes, en fonction de l'exposition humaine ou environnementale à la substance dangereuse. Le risque dépend de plusieurs facteurs, notamment la voie et la durée d'exposition, la concentration du polluant et ses propriétés intrinsèques (voir ci-dessus avec le danger), la sensibilité de la population exposée et les mesures de réduction des risques mises en œuvre. Par exemple, le risque associé à l'exposition à la chlordécone dépendra de la quantité de cette substance présente dans les aliments consommés, de la fréquence de consommation, et de la sensibilité individuelle. En tant que probabilité, il dépend aussi de l'incertitude de connaissances des facteurs de risque et de leur influence exacte sur l'expression du danger.

En résumé, le danger est lié aux propriétés intrinsèques du polluant (ici, la chlordécone et de manière implicite, ses métabolites), tandis que le risque est une estimation de la probabilité que ce danger se manifeste en fonction de l'exposition. Comprendre cette différence est crucial pour évaluer de manière adéquate les effets potentiels d'une exposition à un polluant et mettre en place des mesures de gestion des risques efficaces pour protéger la santé humaine et l'environnement.

L'interconnexion entre la santé humaine et la santé des écosystèmes implique de lier étroitement les mesures de protection de la santé publique à la préservation et la restauration des écosystèmes impactés. Cette indissociabilité suppose des stratégies de surveillance environnementale, des pratiques agricoles durables, des normes de sécurité alimentaire strictes, des programmes de décontamination et de réhabilitation et remédiation, ainsi qu'une sensibilisation accrue des populations.

Dans ce chapitre, nous décrivons et discutons des démarches successives d'évaluations :

- des risques de contamination et de l'impact écotoxicologique des différents compartiments des écosystèmes;
- des risques de contamination consécutive de la chaîne alimentaire;
- des risques d'impact sanitaire consécutifs à une exposition à la chlordécone.

## » Évaluation des risques de contamination des écosystèmes et d'impacts écotoxicologiques

La chlordécone étant réputée très peu volatile, ce sont surtout les compartiments édaphiques (sols) et aquatiques (eaux de surface, eaux souterraines, mer) qui sont susceptibles d'être contaminés et dont il s'agit donc d'évaluer les risques de contamination et les risques consécutifs d'impacts écotoxicologiques.

## Risque de contamination des sols et de son évolution

Sur le principe, on ne devrait pas parler de risque de contamination des sols en ce qui concerne la chlordécone, car la contamination est avérée. Toutefois, une incertitude forte subsiste sur les sols concernés et sur les niveaux de contamination, puisque les épandages de chlordécone n'ont pas fait l'objet d'enregistrements, et que la contamination, bien que fortement rémanente, peut évoluer dans le temps et l'espace sous l'effet du travail du sol, de l'érosion, du lessivage par les eaux de ruissellement et de percolation, et d'éventuels processus de dégradation. Des démarches d'évaluation de la contamination des sols antillais ont donc été menées afin de disposer d'un état des lieux et de permettre aux utilisateurs de connaître, sinon le niveau exact de contamination de leurs sols, tout au moins un risque ou une probabilité de contamination. Elles reposent sur trois types d'approches qui se complètent, détaillées ci-après.

– L'analyse de la teneur en chlordécone des sols des parcelles agricoles. Bien que la densité spatiale des analyses progresse grâce à des programmes d'échantillonnages successifs (voir, par exemple, Daaf Guadeloupe, 2024<sup>12</sup>), elle ne permet pas d'avoir une estimation exhaustive de la contamination de tous les sols.

– L'analyse des facteurs de variabilité des concentrations afin de pouvoir extrapoler à l'ensemble du territoire (Desprats *et al.*, 2004). Parmi les facteurs identifiés se trouve l'historique d'occupation des sols, qui permet de cartographier, à une résolution parcellaire, le risque de contamination en supposant qu'il est d'autant plus élevé que la durée de la mise en culture bananière a été longue durant la période de commercialisation de la molécule. Il en ressort, pour la Guadeloupe, une carte en quatre classes de risque de contamination (Tillieut, 2006) à résolution parcellaire.

– L'analyse de la qualité des eaux qui permet d'identifier les bassins versants, à risque de sols contaminés (Rochette *et al.*, 2020). Cette approche est de résolution spatiale inférieure à la précédente, mais permet d'identifier de manière plus assurée, les zones à risques élevés de contamination.

La combinaison de ces démarches aboutit ainsi actuellement à une perception cartographique des risques de contamination des sols sur les deux îles<sup>13</sup>.

L'évolution à long terme de la contamination des sols est un enjeu majeur puisqu'elle conditionne les mesures de gestion de la contamination à mettre en place. Cabidoche *et al.* (2009) ont ainsi proposé et appliqué une approche de modélisation simple, nommée Wisorch, pour estimer l'évolution pluriannuelle de la contamination des principaux types de sols aux Antilles. Wisorch suppose une décroissance des stocks en chlordécone du sol qui serait uniquement due aux pertes par lessivage liées à l'eau percolant au travers du sol. Le modèle permet ainsi à la fois d'estimer l'évolution des niveaux de contamination des sols et les niveaux de concentration des percolats qui vont recharger les eaux souterraines. Après avoir calé et vérifié le modèle sur les données disponibles de contamination des sols et des eaux, Cabidoche *et al.* (2009) montrent par simulation que la contamination des sols persistera de quelques dizaines d'années à plusieurs centaines d'années en fonction de la nature du sol et de sa contamination initiale. Cette première estimation repose toutefois sur l'hypothèse simplifiée

12. <https://daaf.guadeloupe.agriculture.gouv.fr/cartographie-des-teneurs-en-chlordécone-des-sols-a1304.html>.

13. [https://carto.karugeo.fr/1/l\\_chld\\_carte\\_dyn\\_971.map](https://carto.karugeo.fr/1/l_chld_carte_dyn_971.map); <https://www.geomartinique.fr/accueil/ressources/pollution-des-sols-par-la-chlordecone-en-martinique>.

d'aucune dégradation de la chlordécone dans les sols. Au stade actuel, cette hypothèse semble toujours la plus probable en l'absence de faits expérimentaux suffisamment solides pour la contredire (Voltz *et al.*, 2025). Elle est toutefois susceptible d'évoluer avec les travaux en cours sur l'identification et la quantification des métabolites de la chlordécone dans les sols et la mise en place envisagée d'un suivi de référence d'un échantillon de sols contaminés dans le cadre d'Opale (dispositif mis en place en 2016<sup>14</sup>).

On notera enfin que les démarches d'évaluation de contamination des sols pour les pesticides actuellement homologués et utilisés sont différentes de celles exposées ci-dessus. En effet, au contraire de la chlordécone, ces molécules sont plus rapidement dégradables dans les sols et présentent ainsi des teneurs très évolutives à l'échelle annuelle, d'ailleurs dépendantes de la nature de ces sols. L'observation de la contamination des pesticides actuels par mesure directe a donc uniquement valeur d'image instantanée, à moins de la répéter très fréquemment pour suivre son évolution temporelle. Les démarches d'évaluation des risques de contamination sont ainsi préférentiellement basées sur des approches de modélisation prenant en compte la connaissance des vitesses de dégradation des molécules et l'évolution des usages grâce à la Banque de données nationale des ventes des distributeurs de produits phytopharmaceutiques (BNVD) qui répertorie les ventes selon la commune de l'acheteur depuis 2008<sup>15</sup>.

## Risques de contamination des eaux de surface

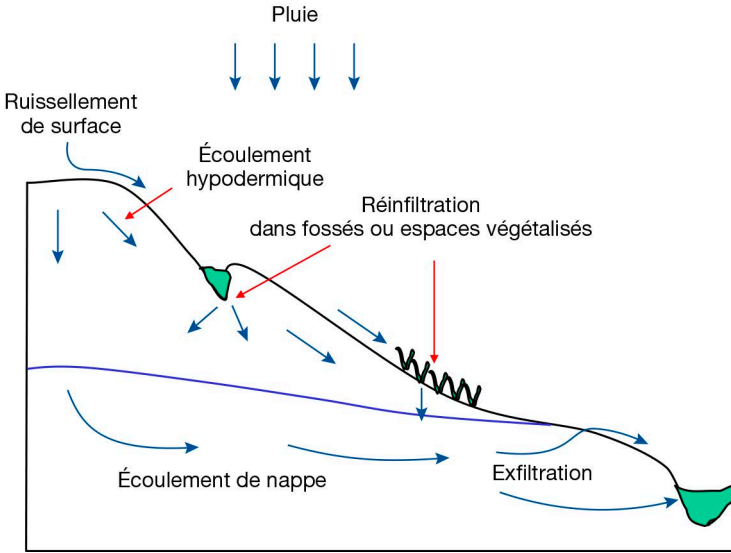
Comme pour les sols, la contamination des eaux par les pesticides peut être évaluée par des mesures directes. Les réseaux réglementaires de surveillance des eaux et les observatoires tels qu'Opale permettent ces mesures (chapitre 3). Toutefois, ces dispositifs sont restreints à des zones et à des périodes d'observation limitées et ne permettent donc qu'une vision partielle de la contamination, tant sur le plan spatial que temporel. Les démarches d'évaluation du risque de contamination des eaux tentent de suppléer ces limites afin de prévoir l'état et l'évolution de la contamination sur l'ensemble d'un territoire. À cet effet, elles considèrent les principaux facteurs et processus de contamination des eaux à l'aide soit d'indicateurs simples, soit de modèles à bases mécanistes.

La contamination des eaux intervient comme conséquence du transit de l'eau au travers ou à la surface de sols contaminés. La figure 5.1 montre les principales voies de transit de l'eau de pluie dans un paysage. Le niveau résultant des contaminations dépend de l'importance de la contamination des sols traversés par l'eau (d'où le besoin de caractériser préalablement le risque de contamination des sols), mais aussi des propriétés de dégradation et de mobilité vers l'eau des molécules pesticides et de leurs métabolites stockés dans les sols ainsi que des propriétés physicochimiques de ces derniers.

Sur le plan européen, les risques de contamination des eaux de surface et des eaux souterraines par les pesticides sont estimés dans le cadre réglementaire de l'homologation des produits phytosanitaires avant mise sur le marché. La procédure européenne repose sur l'application de modèles simulant la contamination des eaux pour une gamme de scénarios agropédoclimatiques supposés représenter la variabilité de cultures, de sols et de climats, existante dans l'UE hors régions ultrapériphériques. La contamination des eaux par les métabolites est également estimée quand ceux-ci

14. <https://www.caec-carib.org/recherche/projets/projets-en-cours/opale>.

15. <https://ventes-produits-phytopharmaceutiques.eaufrance.fr/>.



**Figure 5.1.** Schéma représentant les processus contribuant aux transferts et aux contaminations des eaux de surface.

Parmi ces processus, l'écoulement hypodermique est un type d'écoulement de l'eau qui se produit dans la zone non saturée du sol, juste en dessous de la surface, mais au-dessus de la nappe phréatique. Il s'agit d'un écoulement souterrain peu profond, distinct de l'infiltration verticale et de l'écoulement souterrain profond (de nappe).

sont connus et présentent un danger du fait de leurs propriétés de mobilité et de toxicité. Cette procédure est actuellement appliquée par l'Anses pour l'homologation des molécules pesticides en usage dans les Antilles françaises. Elle soulève toutefois de nombreuses interrogations en raison de l'inadéquation des scénarios agropédoclimatiques d'Europe continentale utilisés vis-à-vis des conditions de milieu et de cultures tropicales. Aussi, une collaboration entre l'INRAE et l'Anses développe une modélisation des risques de contamination des eaux, appuyée sur des scénarios spécifiques au milieu antillais (Voltz *et al.*, 2015; Campan, 2022). Cette modélisation est actuellement en phase de comparaison avec la procédure européenne standard.

Dans le cas de la chlordécone, l'évaluation des risques de contamination des eaux n'a évidemment pas pour objet l'homologation de la molécule, mais l'identification des ressources en eau potentiellement contaminées, et l'estimation de l'évolution sur le long terme de la contamination pour permettre une gestion de la ressource en eau potable et des milieux aquatiques. Les approches de modélisation reliant le niveau de contamination des sols au risque de contamination des eaux constituent également des outils pour cette estimation de risque. Les travaux déjà cités de Cabidoche *et al.* (2009) permettent ainsi de simuler l'évolution attendue de la contamination des eaux percolant à travers les sols contaminés. Cela n'est toutefois pas suffisant pour évaluer les risques de contamination des eaux de surface et des eaux souterraines. En effet, le niveau de contamination des eaux souterraines dépend non seulement des flux percolant depuis les sols, mais aussi des effets de dilution et de circulation des eaux au sein des aquifères, effets qui peuvent être extrêmement variables selon les aquifères considérés. Quant à la contamination des eaux de surface, les travaux sur le dispositif Opale ont

montré la complexité de leur dynamique temporelle sous la dépendance simultanée de flux d'exfiltration des eaux souterraines et de flux de ruissellement de surface issus des parcelles contaminées (Mottes *et al.*, 2020; Voltz *et al.*, 2023). Il n'y a donc pas encore de démarche opérationnelle disponible pour l'estimation des risques de contamination des eaux par la chlordécone et leur évolution sur les masses d'eaux souterraines ou de surface. Dans l'état actuel, on peut simplement dire que la contamination des eaux durera sans doute plus longtemps que celle des sols, car à partir de l'arrêt des flux de chlordécone provenant des sols, il faudra compter le délai supplémentaire de vidange des stocks de molécules déjà accumulés dans les eaux souterraines.

## Risques de contamination des faunes sauvages aquatiques et édaphiques<sup>16</sup>

Cette partie aborde le cas de la contamination des faunes sauvages vivant en milieu aquatique terrestre et marin et hébergée par le sol. Elle n'aborde pas le cas des espèces terrestres ou aériennes pour lesquelles trop peu de références sont disponibles. Le cas particulier des espèces terrestres élevées à fins de consommation humaine est abordé plus loin dans ce chapitre.

### Faune des rivières

La contamination par la chlordécone des organismes présents dans les rivières dépend de nombreux facteurs et est très variable en fonction des espèces et de leur stade de développement. Pour évaluer les risques de contamination, des suivis sont effectués. La représentativité des individus capturés est déterminante pour l'évaluation du risque.

#### Identifier les tailles d'organismes les plus contaminés

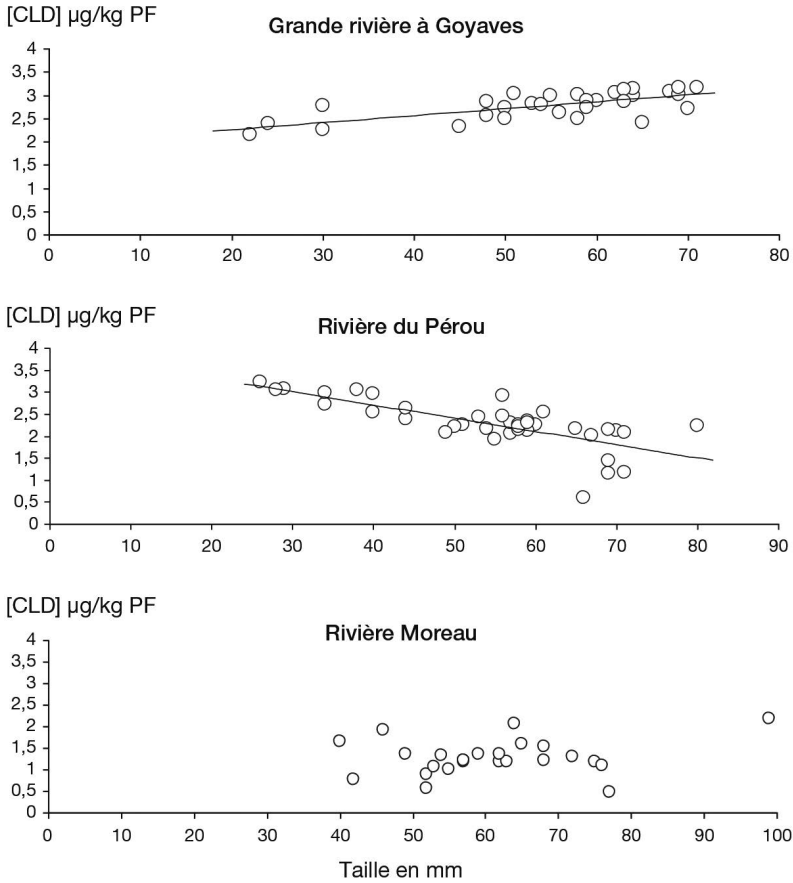
En ce qui concerne le cycle de vie des espèces des rivières antillaises (crustacés, poissons), il n'existe pas d'espèce dite « primaire », c'est-à-dire effectuant son développement entièrement en eau douce, sauf des espèces introduites. Les espèces indigènes obéissent donc au même schéma : des cycles de vie qui se partagent entre eau salée et eau douce, avec des migrations d'ampleur entre ces deux milieux. Presque tout ce qui vit dans les rivières des Antilles (mollusques, crustacés, poissons) est donc diadrome, naviguant entre eau douce et eau salée. Le schéma le plus courant est une entrée massive dans l'embouchure des rivières d'individus au stade juvénile et provenant de milieux salés (entrée annuelle ou bisannuelle), chargés en polluants de manière variable selon les endroits traversés.

En un endroit de la rivière, trois cas de figure sont possibles (figure 5.2) : (i) une contamination du même ordre de grandeur entre individus adultes et juvéniles ; (ii) une contamination plus importante des juvéniles (qui subissent ensuite une dilution par la croissance) ; (iii) une contamination plus importante des adultes.

Ces caractéristiques ne permettent pas la standardisation d'une taille privilégiée de capture (notamment la plus susceptible d'être fortement contaminée) pour les suivis du biote dans les rivières. Il n'est pas possible non plus de dégager un déterminisme dans les contaminations, qui seraient fonction de l'altitude (individus plus contaminés en aval qu'en amont, par exemple), compte tenu des migrations individuelles effectuées

---

16. Relatif au sol en tant que milieu biologique.



**Figure 5.2.** Concentrations de chlordécone (CLD) en microgramme par kilogramme ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) de poids frais (PF) en fonction de la taille des individus du crustacé *Macrobrachium faustinum* en millimètre (mm) (Monti, 2017).

jusqu'en tête de bassin versant. Cibler la taille des individus prélevés pour analyser le risque caractéristique de contamination et limiter le risque d'exposition humaine en cas de consommation est donc complexe dans les milieux aquatiques antillais.

De plus, la bio-accumulation de la molécule étant rapide et s'effectuant en quelques jours au retour de ces juvéniles en eau douce, la teneur en contaminant des zones de mélange dans le bas des rivières qui abritent les juvéniles de poissons et de crustacés est donc un paramètre fondamental, susceptible d'expliquer l'ampleur des contaminations. L'équilibre entre teneur dans l'eau et concentration dans les organismes se réalise rapidement, dans les premières semaines de la vie de ces animaux. Un modèle de bioconcentration\* en chlordécone chez un crustacé (Bahner et Oglesby, 1979) a été ajusté à une population de crustacés des Antilles; il montre l'importance de cette charge précoce des organismes (Monti, 2008). La connaissance de ces milieux de mélange entre eau douce et eau salée, de leur dynamique en ce qui concerne les concentrations en polluants et de leur importance dans la charge en contaminant des organismes est encore trop limitée.

### Prendre également en compte les métabolites de la chlordécone

Bien que le nombre de métabolites de la chlordécone soit potentiellement élevé, deux d'entre eux ont spécifiquement fait l'objet d'identification dans les organismes aquatiques.

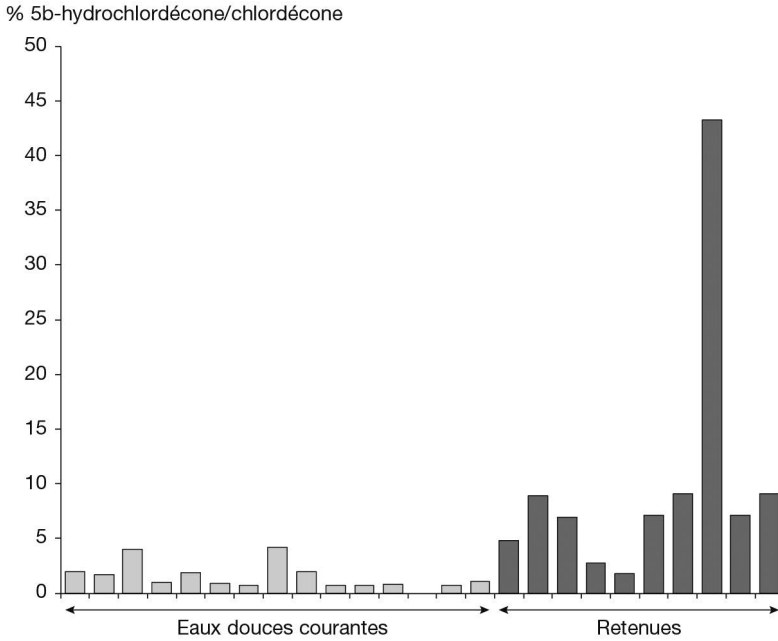
– La 5-b-hydro-chlordécone (b pour bêta). Certaines publications anciennes font état d'une possible dégradation de la chlordécone en monohydrochlordécone et dihydro-chlordécone dans les sols par des mécanismes qui feraient intervenir le rayonnement solaire et la présence éventuelle d'éthylènediamine (une molécule largement utilisée dans l'industrie comme précurseur de nombreux dérivés : médicaments, polymères, etc.), ou encore par un possible métabolisme bactérien (Carver *et al.*, 1978; Orndorff et Colwell, 1980). Les très nombreuses analyses réalisées dans le biote aux Antilles montrent une présence régulière de cette molécule (détectée dans près de 60% des échantillons de crustacés ou poissons, avec les teneurs les plus élevées chez le poisson (225 µg/kg PF; Coat *et al.*, 2009), mais en quantité très minoritaire par rapport à la chlordécone, ce qui laisse supposer soit (i) une présence de la molécule dans le produit épandu sur parcelle (et donc une molécule générée lors du process ou du stockage du produit); soit (ii) une molécule résultant d'une dégradation bactérienne (ou plus généralement du vivant) dont on ne connaîtrait pas encore parfaitement le mécanisme. Les travaux conséquents menés ces dernières années ont identifié de façon expérimentale différents produits de dégradation possibles de la chlordécone (selon les méthodes choisies pour les générer), ainsi que tous les produits théoriques possibles de sa dégradation, soit 484 dérivés (Mouvet, 2013). La 5b-hydrochlordécone est identifiée comme un métabolite préférentiel potentiel de la chlordécone<sup>17</sup>.

Lorsque la molécule était détectée et sa concentration supérieure au seuil analytique, le ratio 5b-hydrochlordécone/chlordécone était toujours très bas, en faveur de la molécule-mère. Les pourcentages obtenus dans les eaux courantes se trouvent dans la fourchette des 0 à 5% des teneurs en chlordécone (figure 5.3). Toutefois, les teneurs en 5b-hydrochlordécone de ces mêmes crustacés vivant dans les eaux stagnantes sont apparues plus élevées. Ces éléments laissent présager d'une originalité liée au milieu dans la production de cette molécule (boucles bactériennes, conditions oxydo-réductrices, etc.) qui ferait des milieux « lents » des sites privilégiés d'une éventuelle dégradation naturelle de la molécule-mère.

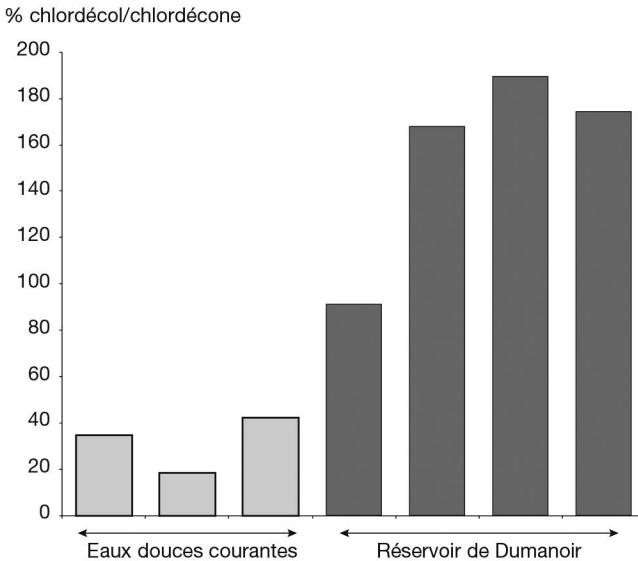
– Le chlordécol. Les études réalisées sur l'animal indiquent qu'après ingestion, la chlordécone est facilement absorbée au niveau intestinal, puis passe ensuite dans la circulation sanguine, où elle se lie aux protéines de poids moléculaire élevé. Cette distribution serait responsable de son accumulation privilégiée dans le foie, le cerveau et les reins des organismes. La molécule serait ensuite métabolisable en chlordécol par une enzyme, la chlordécone-réductase (transformant le groupe cétone en alcool). Celle-ci ne serait spécifique que de certaines espèces (humain, porc, etc.), mais les espèces qui pourraient exprimer cette enzyme ne sont pas, loin de là, toutes identifiées. Les résultats obtenus sur le biote d'eau douce aux Antilles montrent rarement la présence de chlordécol à des niveaux supérieurs au seuil analytique, et sa fréquence dans les échantillons est plus faible que la 5b-hydrochlordécone. Il est quantifiable uniquement dans les situations de biote fortement contaminé, et dans des niveaux très

17. [https://www.aquaref.fr/sites/default/files/Aquaref\\_2013\\_D1b\\_BRGM\\_MA21\\_chlordecone5bhydro\\_eau\\_brute\\_VE.pdf](https://www.aquaref.fr/sites/default/files/Aquaref_2013_D1b_BRGM_MA21_chlordecone5bhydro_eau_brute_VE.pdf).

largement supérieurs aux limites maximales en résidus. Toutefois, lorsqu'il est détecté, les valeurs obtenues sont nettement plus importantes dans le biote d'eau dormante qu'en eau courante (figure 5.4).



**Figure 5.3.** Pourcentage de 5b-hydrochlordécone/chlordécone dans le biote d'eaux courantes et de retenues, en Guadeloupe (sources : Monti, 2017).



**Figure 5.4.** Pourcentage de chlordécol/chlordécone dans le biote d'eaux courantes et dans la retenue d'eau de Dumanoir (sources : Monti, 2017; Soileau et Moreland, 1988).

Peu de recherches ont été réalisées sur la toxicité des métabolites éventuels de la chlordécone, mais parmi elles, quelques-unes montrent un effet du chlordécol sur les protéines des membranes cellulaires, analogue à celui de la chlordécone, conduisant à une augmentation de la perméabilité membranaire aux cations (Soileau et Moreland, 1988).

Les différences relevées pour des espèces identiques recueillies dans ces deux types de milieux (par exemple, étangs ou réservoirs *versus* eau courante) laissent présager qu'à espèces et tailles communes, il existe une originalité qui feraient des milieux lents, des sites privilégiés d'une éventuelle dégradation de la molécule-mère (tout comme pour la 5b-hydrochlordécone) et à des niveaux tels qu'il y aurait nécessité à prendre en compte ces produits de dégradation dans les évaluations de contamination, de façon à réduire l'exposition de la population et la diminution des risques associés.

## Faune marine

Les connaissances sur la contamination des différents compartiments marins par la chlordécone sont limitées, mais plusieurs études sur le milieu marin et la faune marine sont néanmoins disponibles. L'étude de De Rock *et al.* (2020) a permis de mieux appréhender les voies de contamination de la chlordécone dans les écosystèmes côtiers de la Martinique à partir du site pilote de la baie du Galion. Dromard *et al.* (2019) précisent que la concentration en chlordécone dans le zooplancton collecté à l'embouchure des rivières touchées par la pollution varie fortement : de 22 à 272 µg/kg en Martinique et de 40 à 306 µg/kg en Guadeloupe. La recherche de chlordécone dans différents habitats (mangrove, herbiers et récifs coralliens) indique que tous les compartiments et organismes sont contaminés par la chlordécone. Les valeurs les plus importantes concernent les consommateurs secondaires, contaminés de 232,6 µg/kg dans la mangrove à 91,9 µg/kg sur les récifs coralliens. Concernant la faune halieutique, quelques études sont disponibles et montrent que la contamination d'un poisson est fortement liée à son lieu de vie (estuaire, zone côtière et large) ainsi qu'à son mode de vie (sédentarité, migrations ontogénétiques\*, raids trophiques\*, etc.) et son niveau trophique (Dromard *et al.*, 2015, 2018). Le tableau 5.1 donne quelques exemples de contamination de poissons, de crustacés ou de mollusques (Dromard *et al.*, 2015). L'étude de Méndez-Fernandez *et al.* (2018) mentionne que les quatre espèces de cétacés analysés (cachalots, pseudorques, dauphins Fraser et dauphins pantropicaux) sont toutes contaminées par la chlordécone bien que leur lieu de vie soit relativement éloigné des côtes. Les concentrations de 0,001 à 0,329 µg/kg observées dans les tissus graisseux sont toutefois assez faibles, en cohérence avec les études sur la cinétique de la chlordécone dans le milieu marin. En conclusion, les concentrations observées en mer sont plutôt faibles (maximum 1,5 ng/l au large), mais supérieures à la norme de Qualité Environnementale Eau marine (0,000 5 ng/l) définie par l'arrêté ministériel du 27 juillet 2015<sup>18</sup>. La contamination de la faune marine est étendue géographiquement avec une forte variabilité entre les zones et les espèces. Par ailleurs, même si l'entrée dans la chaîne trophique de la chlordécone semble être liée aux matières en suspension et au zooplancton, la contamination de certaines espèces pourrait aussi être liée à d'autres facteurs, comme l'imprégnation au contact de l'eau contaminée. De même, du fait du

18. <https://www.legifrance.gouv.fr/download/pdf?id=CzMk9C9TuiNiDv8adNATce6yplGEB0Xgie4-TnS53g=>.

caractère lipophile de la chlordécone, la bio-accumulation (bioconcentration) dans les organismes est probable. Dromard *et al.* (2019) ont ainsi calculé des facteurs de bioconcentration entre l'eau de mer et le zooplancton qui variaient entre 440 et 27 200.

Malheureusement, les apports permanents en chlordécone en provenance des bassins versants contaminés ne permettent pas d'envisager une amélioration de la situation à moyen terme en mer, du fait de la persistance de cette molécule dans les différents compartiments.

**Tableau 5.1.** Contamination de poissons, crustacés ou mollusques en Guadeloupe et Martinique (source : Dromard *et al.*, 2015).

Zones	Poissons (µg/kg)	Crustacés (µg/kg)	Mollusques (µg/kg)
Guadeloupe, zone 1	80,9 ± 20,5	29,0 ± 9,9	29,1 ± 7,9
Guadeloupe, zone 2	69,6 ± 10,2	94,1 ± 19,2	23,7 ± 8,0
Guadeloupe, zone 3	13,6 ± 2,7	48,1 ± 18,1	1,1 ± 0,8
Martinique, zone 1	57,6 ± 9,5	732,7 ± 689	0
Martinique, zone 2	30,5 ± 6,9	130,1 ± 21,6	1,2 ± 0,6
Martinique, zone 3	9,9 ± 1,7	53,9 ± 9,0	1,7 ± 1,1

### Faune du sol (invertébrés du sol)

La faune sauvage terrestre des Antilles se caractérise par l'absence de grands mammifères. Les plus grands organismes présents sont les reptiles (serpents, iguanes et lézards) ainsi que des oiseaux ; les mammifères sont représentés par les chauves-souris et quelques espèces introduites de petite taille (rats, mangoustes, opossums, etc.). Les invertébrés représentent la majeure partie de la biodiversité et de la biomasse de ces écosystèmes insulaires tropicaux, ils sont également à la base des chaînes alimentaires (réseaux trophiques). L'ensemble des invertébrés du sol peut se diviser en trois grandes classes de taille : la microfaune (< 0,2 mm), la mésofaune (0,2-2 mm) et la macrofaune (> 2 mm). La contamination de la mésofaune et de la microfaune par la chlordécone n'a jamais fait l'objet d'évaluation aux Antilles. En revanche, les micro-organismes du sol ont été étudiés sous l'angle de leur potentiel de dégradation du polluant. Jusqu'à récemment, il n'existait également aucune étude sur la contamination de la macrofaune, en dépit du rôle primordial que joue celle-ci dans les processus écologiques du sol. Un travail récent (Coulis *et al.*, 2024) comble cette lacune, nous en présentons ci-après les principales conclusions ainsi que les perspectives des recherches actuellement menées.

La contamination des organismes du sol par la chlordécone est très variable d'une espèce à l'autre. Il a été observé des niveaux de contamination très importants, proches de ceux mesurés sur la faune aquatique du fleuve James lors de l'incident survenu dans l'usine de production de Kepone® de Hopewell (Virginie, États-Unis; Luellen *et al.*, 2006). Par exemple, l'espèce de vers de terre endogée *Pontoscolex corethrurus* (vivant entre 10 et 40 cm de profondeur dans le sol) a une contamination moyenne de 5 072 ng/g lorsqu'elle vit sur des sols ayant des niveaux de contamination de 253 ng/g en moyenne. La concentration dans cette espèce de vers de terre est donc 20 fois supérieure à celle du milieu environnant, ce qui montre qu'un processus de

bio-accumulation actif est à l'œuvre. Le phénomène de bio-accumulation a également été mis en évidence chez la majorité des espèces d'invertébrés du sol étudiées avec néanmoins des niveaux de contamination variables d'une espèce à l'autre.

Il existe plusieurs modes d'exposition des invertébrés du sol à la chlordécone. La contamination peut se produire soit par contact direct entre le sol pollué et l'épiderme, soit par ingestion de particules de sol contaminé. La voie d'exposition privilégiée est principalement l'ingestion des polluants, plutôt que le contact avec l'épiderme. En effet, à régime alimentaire et milieu de vie équivalent, les espèces à corps mou (vers de terre, escargot) n'ont pas montré de contamination supérieure aux espèces ayant une cuticule (insectes et autres arthropodes). En revanche, l'analyse croisée des données portant sur la proportion de sol dans le bol alimentaire des invertébrés et leur niveau de pollution a permis de démontrer que c'est en ingérant du sol pollué que les invertébrés du sol se contaminent. Cette tendance est clairement illustrée par la figure 5.5, qui montre le niveau de contamination de différentes espèces d'invertébrés du sol en fonction du pourcentage de cendres dans leurs fèces, cette mesure étant un proxy\* de la consommation de sol.

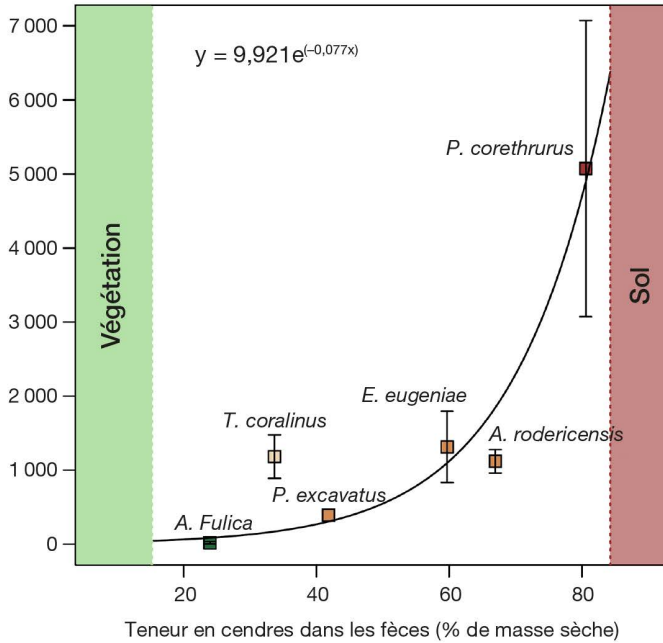
Un phénomène de bio-amplification\*, par lequel la concentration en contaminants augmente à chaque niveau trophique, a également été mis en évidence dans les réseaux trophiques des invertébrés du sol de Martinique (Coulis *et al.*, 2024). Ainsi, plus une espèce occupe un niveau trophique élevé, plus elle risque d'avoir une contamination en chlordécone élevée. Par exemple, la contamination en chlordécone du lézard endémique de la Martinique, *Dactyloa roquet*, est plus importante que celle de ses proies. Ce phénomène est néanmoins complexe et relativement difficile à prédire, car les prédateurs consomment généralement une grande diversité de proies, chacune ayant des niveaux de contamination différents.

En résumé, les processus bien connus de bio-accumulation et de bio-amplification permettent d'expliquer la contamination des invertébrés du sol à la chlordécone aux Antilles françaises. De plus, le mode d'exposition à la chlordécone étant essentiellement par consommation de sol contaminé, les organismes appartenant à des chaînes trophiques liées à des organismes détritivores, qui consomment de la matière organique morte du sol, sont plus susceptibles d'être fortement contaminés que des organismes appartenant à des réseaux trophiques liés à des organismes herbivores.

À ce jour, le chlordécol est le seul produit de transformation à avoir été dosé dans les invertébrés du sol. Les premiers résultats indiquent que le facteur de bio-accumulation du chlordécol ( $\times 10$  chez *Pontoscolex corethrurus*) est moins important que celui de la chlordécone. De plus, le chlordécol est moins bio-amplifié dans les réseaux trophiques que la chlordécone. Il est encore prématuré de conclure sur l'origine du chlordécol. En effet, cette molécule pourrait résulter d'un transfert depuis le sol par un phénomène de bio-accumulation ou d'une dégradation de la chlordécone dans les organismes. Les invertébrés du sol, en raison de leur grande diversité de formes de vie et de physiologies, pourraient constituer un laboratoire idéal pour étudier la dégradation de la chlordécone dans l'environnement. C'est pourquoi il est crucial de poursuivre les études sur la distribution de la chlordécone et de ses PT chez les invertébrés du sol.

Une autre perspective intéressante est d'utiliser les vers de terre comme sentinelles de la pollution. En effet, ces organismes sont présents en très grand nombre dans presque tous les écosystèmes des Antilles françaises (Gabriac *et al.*, 2024; Dupont *et al.*, 2023).

A Concentration en CLD dans la faune du sol (ng/g de matière sèche)



**Figure 5.5.** A. Graphique montrant la relation entre la proportion de sol ingéré (estimée par le taux de cendre dans les fèces) et la concentration en chlordécone (CLD) dans les tissus des invertébrés du sol. B. Diplopode *Trigoniuulus corallinus* ayant un régime alimentaire presque exclusivement à base de feuilles mortes. C. Vers de terre endogé *Pontoscolex corethrurus* ayant un régime alimentaire presque exclusivement à base de sol (géophage). Crédit photo : Baptiste Bentameur, Cirad.

Or, comme il a été montré que les vers endogés ont un facteur de bioconcentration de x 20, cela signifie que ces organismes pourraient révéler la présence de la molécule dans le sol à de très faibles doses. Cela a d'ailleurs été prouvé lorsque de la chlordécone a été quantifiée dans des vers de terre récoltés sur un sol dont la teneur en chlordécone était inférieure à la limite de détection. Ainsi, les vers de terre, en intégrant et en amplifiant les polluants dans leur environnement proche, pourraient être utilisés comme indicateurs de pollution.

Enfin, il est important de considérer la connectivité entre les différents écosystèmes aquatiques et terrestres, qui peut se faire par l'intermédiaire des prédateurs ayant un large rayon d'action. On peut citer, par exemple, des oiseaux prédateurs, des chauves-souris ou encore les mangoustes. Ces organismes peuvent consommer des proies dans une zone contaminée et se déplacer vers une zone non contaminée, restituant ainsi la pollution après leur mort naturelle ou en étant consommés par d'autres prédateurs. Ce transfert biologique n'a jamais été étudié en profondeur, mais on peut mentionner une étude menée en 2011 en Martinique (Eraud *et al.*, 2011) qui a permis de détecter de la chlordécone dans trois espèces d'oiseaux. Deux espèces de hérons, qui sont des oiseaux prédateurs, étaient plus contaminées que la tourterelle à queue carrée, qui est granivore, indiquant potentiellement un phénomène de bio-amplification. Néanmoins, les données restent très lacunaires, une évaluation plus poussée de la contamination de la faune sauvage serait nécessaire afin de mieux caractériser les risques, notamment en ce qui concerne les enjeux de conservation, et les processus de transfert par voie biologique.

## ► Évaluation des risques de contamination de la chaîne alimentaire humaine

### Eau potable

La chlordécone est un polluant hydrophobe et la question de la contamination des eaux, notamment des eaux de distribution, pourrait sembler contre-intuitive. Toutefois, le risque de contamination des eaux a été révélé par des campagnes d'analyses réalisées au début des années 2000 en Guadeloupe et en Martinique. Elles ont montré une pollution significative par la chlordécone au niveau de plusieurs points de captages d'eau potable ainsi que d'autres pesticides organochlorés, comme la dieldrine ou le  $\beta$ -hexachlorocyclohexane (HCH).

L'analyse d'échantillons d'eaux destinées à la consommation humaine est à la base de la démarche d'évaluation des risques de contamination des eaux. Les analyses menées passent par deux étapes détaillées à la suite.

- Une préparation de l'échantillon visant à concentrer la chlordécone à partir de l'échantillon d'eau. L'extraction sur phase solide (SPE) est particulièrement courante grâce à sa simplicité et son efficacité. Elle peut être complétée par une étape de purification supplémentaire pour éliminer les contaminants.
- Des techniques d'analyse reposant sur la chromatographie qui peut se décliner sous plusieurs formes : phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC-MS), liquide à haute performance couplée à la spectrométrie de masse (HPLC-MS/MS), phase liquide couplée à la spectrométrie de masse haute résolution (LC-HRMS). Les méthodes utilisées doivent être validées selon les normes, telles que celles définies par l'Organisation internationale de normalisation (ISO) ou des agences nationales de santé publique. Elles nécessitent l'utilisation de standards internes.

Les normes de potabilité imposent l'utilisation de ces techniques de spectrométrie de masse particulièrement sensibles permettant de détecter la chlordécone à des concentrations très faibles, souvent de l'ordre du nanogramme par litre (ng/l). En effet, en France, la concentration maximale admissible pour la chlordécone dans l'eau potable est fixée à 0,1  $\mu$ g/l en cohérence avec la directive européenne sur la qualité de l'eau

potable. Les quantifications analytiques et donc leur comparaison avec ces normes de potabilité en vigueur ont ainsi conduit à la mise en évidence de dépassements importants des concentrations (jusqu'à 10 µg/l) ce qui a conduit dans un premier temps à une fermeture de ces points de captage. Cette fermeture visait à diminuer l'exposition des populations (et donc le risque de contamination et le risque sanitaire associé) avec des alternatives proposées à la population, comme la distribution d'eaux embouteillées ou la connexion à des réseaux non contaminés. Une autre démarche permettant la diminution des risques de contamination consiste à rendre transparente l'information par le biais des médias et par des réunions publiques.

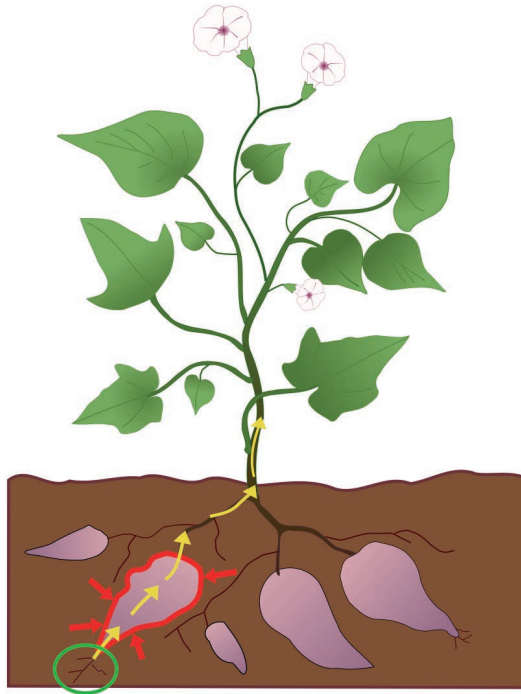
La démarche d'évaluation des risques de contamination conduit donc, en cas de dépassement des normes, à des démarches de réduction de ce risque. À moyen terme, des systèmes de filtration en charbon actif ont été utilisés : le charbon actif capte la chlordécone principalement grâce à un processus d'adsorption, qui repose sur des interactions physiques et chimiques. Ainsi, ce charbon possède une surface spécifique très élevée, pouvant atteindre 500 à 1500 m<sup>2</sup>/g. Cette surface poreuse offre de nombreux sites où les molécules de chlordécone peuvent se fixer. Les propriétés hydrophobes de la chlordécone, en raison de sa structure chlorée, lui confèrent une affinité pour les surfaces hydrophobes du charbon. Ces mesures ont permis d'obtenir des eaux destinées à la consommation humaine, exemptes de chlordécone à plus de 99%.

## Produits végétaux agricoles

### Processus de contamination des organes végétaux

Pour les plantes cultivées qui ont été étudiées, le phénomène de bioconcentration n'a pas été observé. Leur teneur reste toujours très inférieure à celle mesurée dans les sols, avec un gradient décroissant des racines — les plus contaminées — aux feuilles — rarement contaminées — (racines > tiges > feuilles). Les fruits peuvent présenter des niveaux de contamination intermédiaires selon leur position et leur connexion au réseau de sève brute (xylème). Un schéma global du transfert de la chlordécone du sol vers la plante a pu être élaboré en agrégeant les résultats obtenus par diverses expérimentations et des publications sur le transfert d'autres molécules hydrophobes dans les plantes. Les voies principales de transfert sont de deux ordres : (i) une contamination des tissus végétaux exposés directement à la pollution du sol, comme l'épiderme des racines et des tubercules; et (ii) un transfert passif et une diffusion dans la plante par la voie xylémique à partir de l'eau du sol. Du fait de propriétés de volatilisation faibles de la chlordécone (pression de vapeur de 3,5.10<sup>-5</sup> mPa; constante de Henry de 2,5.10<sup>-3</sup> Pa.m<sup>3</sup>/mol, selon la Pesticide properties Database<sup>19</sup>), il n'a pas été mesuré de transfert de la molécule par voie gazeuse, au travers d'une absorption par les feuilles. Le flux transpiratoire est ainsi le principal moteur du transfert de la chlordécone au sein de la plante. Plus l'organe consommé est éloigné du sol, moins il sera contaminé. Pour les fruits, l'hypothèse de la contamination est liée au type d'alimentation du fruit en sève. Lorsque la sève brute (flux xylémique) participe au grossissement du fruit (cas de cucurbitacées), la teneur en chlordécone peut être plus élevée dans le fruit. Lorsque le fruit est majoritairement alimenté par la sève élaborée (flux phloémien; par exemple, les tomates), la contamination est très faible, voire non détectée (figure 5.6).

19. <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/Reports/1293.htm>.



**Figure 5.6.** Transfert de chlordécone du sol vers et au sein de la plante (d'après Clostre *et al.*, 2015b).

En rouge : contamination par contact direct entre épiderme et sol (adsorption) ; en vert : zone d'origine de la solution du sol contaminé et entrée dans la plante par les racines fines ; en jaune : diffusion de la solution du sol contaminé par l'intermédiaire des racines fines et du xylème.

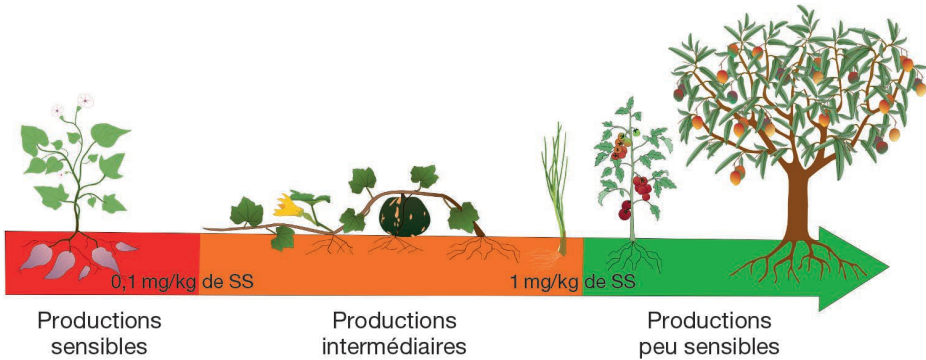
Pour les racines et tubercules, l'adsorption de la molécule sur l'épiderme peut être suivie d'une très lente diffusion de la molécule vers les tissus internes des racines ou tubercules (Létondor *et al.*, 2015, pour le radis). La structure et la vascularisation des racines et tubercules peuvent alors influencer sur cette diffusion. De manière globale, des différences notables entre pulpe et peau des racines et tubercules sont mesurées. La peau peut être de 3 à 40 fois plus contaminée que la pulpe, en particulier chez l'igname (Clostre *et al.*, 2014a et 2015b). Cette différence entre la peau et la pulpe est également mesurée chez les cucurbitacées (Clostre *et al.*, 2014b) : pour le giraumon, la peau peut être jusqu'à trois fois plus contaminée que la pulpe. Ces différences peuvent résulter de la voie de contamination (contact), des processus de dilution lors de la croissance ainsi que des différences de composition entre pulpe et peau (lipides et fibres).

### Classification du risque de contamination des produits végétaux

Un dispositif d'enquêtes et d'expérimentations des productions végétales, en condition de production et sur différents types de sols pollués, a permis d'identifier trois réponses à la contamination des végétaux (figure 5.7).

– Les végétaux dits « sensibles au transfert de chlordécone », dont l'organe consommé se développe dans le sol (les racines et tubercules) et pour lesquels des teneurs très supérieures à la LMR ont pu être mesurées.

- Les végétaux qui sont peu sensibles au transfert de chlordécone, dont les teneurs mesurées quel que soit le niveau de pollution du sol sont très faibles (proches de la limite de détection et très inférieures à la LMR), comme les fruits tels que les agrumes, les mangues, les goyaves, les bananes et les ananas, ou certains légumes tels que les tomates, les aubergines, les piments et les poivrons.
- Enfin, les végétaux ayant une réponse intermédiaire, avec des valeurs proches de la LMR pour des niveaux de pollution des sols élevés, comme les cucurbitacées (giraumons, courgettes, concombres), les laitues et la canne à sucre lorsqu'elle est consommée fraîche (en particulier son bas de tige plus sucré).



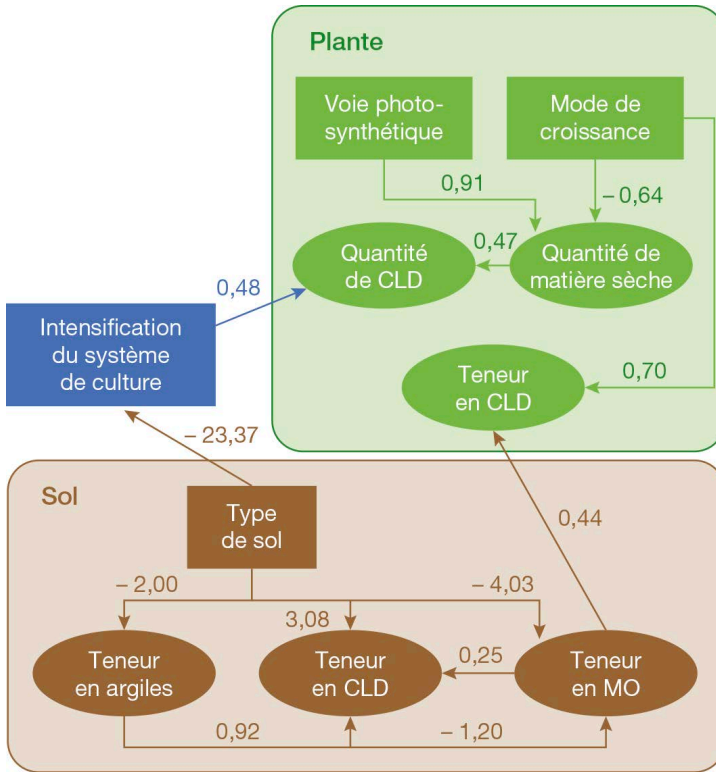
**Figure 5.7.** Trois catégories de réponse à la contamination par la chlordécone des productions végétales (d'après Clostre, 2017).

En rouge : les productions sensibles (racines et tubercules : ignames, patates douces, dachines/malangas, carottes, navets, etc.); en orange : les productions intermédiaires (salades, cives/oignons pèyi, cannes à sucre, cucurbitacées comme giraumons, concombres, courgettes, etc.); en vert : les productions peu sensibles (agrumes, ananas, bananes, goyaves, solanacées comme tomates, poivrons, piments, aubergines, etc.). SS : sol sec.

L'intensité du transfert dépend du type de sol, de sa teneur en matières organiques, du niveau de contamination du sol et du type de végétaux, comme indiqué précédemment. Les andosols sont contaminés à des niveaux plus élevés que les autres sols (ferralsol\* et nitisol\*) et retiennent davantage la chlordécone (Cabidoche *et al.*, 2009), leur transfert est donc moins conséquent (Woignier *et al.*, 2012; Clostre *et al.*, 2014b). De la même façon, plus un sol est riche en matières organiques, moins le transfert est important (Clostre *et al.*, 2015b). Une courbe enveloppe du transfert maximal entre la chlordécone du sol et les productions végétales suit une régression linéaire, c'est-à-dire que la teneur dans la plante est proportionnelle à celle du sol (Clostre *et al.*, 2017; voir l'outil de gestion au chapitre 9). Plus le niveau de pollution du sol est élevé, plus le transfert vers les plantes est important.

Des travaux encore partiels sur les produits de transformation indiquent que les teneurs en 5b-hydrochlordécone dans les plantes sont plus faibles que celles de la chlordécone, mais avec une proportion qui augmente du sol vers les hauts des tiges des végétaux (Clostre *et al.*, 2015a).

L'ensemble des facteurs agronomiques, biologiques et environnementaux influençant le transfert de la chlordécone entre le sol et les productions végétales est résumé par le schéma de la figure 5.8 (Liber *et al.*, 2020).



**Figure 5.8.** Influence des différents moteurs dans le transfert sol-plante par l'utilisation de réseaux et de modélisations bayésiennes : paramètres biologiques, agronomiques et environnementaux (d'après Liber *et al.*, 2020).

CLD : chlordécone; MO : matières organiques.

En matière de pratiques et de réglementation et donc de gestion, il ne faut cependant pas négliger des contaminations post-récoltes qui peuvent survenir lors du conditionnement des produits végétaux à commercialiser. C'est le cas, par exemple, lors de la récolte, si le produit récolté est posé au sol lorsque celui-ci est contaminé (cas des bananeraies) ou stocké dans un contenant souillé de sol pollué. Des résidus de sol ou des poussières sur l'épiderme des aliments pourraient alors rendre l'aliment non commercialisable ou constituer un risque pour l'alimentation du bétail.

## Produits animaux issus d'élevage

Cette section présente les démarches mises en œuvre pour évaluer la contamination des animaux terrestres d'élevage. Les outils et solutions pour réduire l'exposition des populations au travers des produits de ces animaux sont développés dans le chapitre 9.

Les volailles, les porcs ou les ruminants (bovins, caprins, ovins) élevés sur un sol pollué ou nourris avec des aliments contaminés sont exposés à la chlordécone. L'eau d'abreuvement peut également être une voie de contamination significative, en particulier lorsque les animaux boivent une eau en contact direct avec le sol (mare, trous d'eau, rigole de surface) ou dans certaines ravines réceptionnant des eaux de sole

bananière (Rochette *et al.*, 2017). Les données disponibles pour la contamination éventuelle des fourrages sont rares. Les parties basses proches du sol sont généralement les plus contaminées (Feidt *et al.*, 2022), soit par des particules de sol adsorbées (piétinement, projection lors de pluies intenses), soit par une translocation de la chlordécone par voie racinaire. De manière générale, le sol est considéré comme une voie majeure d'exposition.

En Guadeloupe, des ingestions journalières moyennes de 0,6 g de sol sec par kilogramme de poids vif chez les bovins (Collas *et al.*, 2019, 2020; Jurjanz *et al.*, 2017) et de 4,6 g de sol sec par kilogramme de poids vif chez les porcs (Collas *et al.*, 2023) ont pu être estimées. Chez les volailles, l'ingestion journalière de sol a été en moyenne de 1,2 et 3,1 g de sol sec par kilogramme de poids vif chez le poulet (Jurjanz *et al.*, 2020) et la poule pondeuse, respectivement (Jondreville *et al.*, 2013). Il convient de rappeler que la sensibilité à l'ingestion de sol diffère entre les espèces en raison notamment de leur comportement et de leur régime alimentaire; l'activité de fouissage du porc, tout comme la recherche de macrofaune ou de grit\* par les volailles, rendent ces espèces particulièrement vulnérables au risque d'exposition. L'ingestion de sol est également influencée par différents facteurs externes. Ainsi, une offre fourragère limitante incite les animaux à pâturer plus ras, ce qui favorise l'ingestion de sol. De fortes précipitations, ou une inondation temporaire de la parcelle, peuvent également induire une salissure du couvert végétal, amplifiée par le piétinement, et entraîner une ingestion indirecte de sol au travers de l'ingestion d'herbe souillée. Le tableau 5.2 indique l'étendue des variations de l'ingestion de sol chez les différentes espèces.

**Tableau 5.2.** Quantités de sol ingéré selon l'espèce.

Espèces	Ingestion de sol en g/kg poids métabolique	Références
Poule plein air	3 à 16	Jondreville <i>et al.</i> , 2010
Poulet plein air	0,5 à 3	Jurjanz <i>et al.</i> , 2015
Bovine	2 à 5	Collas <i>et al.</i> , 2020
Porcin	11 à plus de 25	Collas <i>et al.</i> , 2023

La chlordécone ingérée par l'intermédiaire du sol, rendue bio-accessible lors de la phase de digestion, est absorbée par les animaux avec un taux d'absorption considéré comme supérieur à 90% (Bouveret *et al.*, 2013; Jurjanz *et al.*, 2014; Fournier *et al.*, 2017). Une fois dans la circulation sanguine générale, la chlordécone se distribue dans les différents organes et tissus de l'organisme. Contrairement aux autres composés organochlorés, la chlordécone est une molécule non lipotrope à fort tropisme hépatique. Les concentrations de chlordécone par gramme de matière fraîche se répartissent comme suit dans les différents tissus : davantage dans le foie, suivi du gras, et enfin dans les muscles, avec des différences de distribution entre les types de muscles et les types de tissus gras (Fourcot *et al.*, 2021; Jurjanz *et al.*, 2020).

Le chapitre 9 aborde de manière détaillée les connaissances sur l'absorption, la distribution, le métabolisme et l'excrétion de la chlordécone chez l'animal d'élevage, dans une perspective de modélisation toxicocinétique. Il présente les recommandations en matière de pratiques agricoles ainsi que les outils mis à disposition des acteurs des filières animales pour éviter la contamination des animaux et réduire ainsi l'exposition des populations.

## ► Démarches d'évaluation des risques sanitaires liés à une exposition à la chlordécone

### Contamination des humains et persistance

Du point de vue des processus d'absorption, de distribution, de métabolisme et d'excrétion (ADME), le comportement de la chlordécone chez l'être humain est le suivant.

– **Absorption.** La chlordécone est principalement absorbée par voie orale par l'ingestion de produits alimentaires contaminés, tels que les fruits, les légumes et les poissons, mais aussi par l'eau de boisson. Elle peut également être absorbée par inhalation et en moindre mesure par contact cutané, bien que l'absorption cutanée soit généralement considérée comme faible.

– **Distribution.** Une fois absorbée, la chlordécone se distribue largement dans l'organisme. Elle peut traverser les barrières hémato-encéphalique et placentaire, ce qui signifie qu'elle peut atteindre le cerveau et être transmise de la mère au fœtus pendant la grossesse. Contrairement à d'autres POP, comme les dioxines, il n'y a pas d'accumulation sur le long terme au niveau du tissu adipeux chez l'humain. En revanche, le foie joue un rôle fondamental, car la chlordécone peut y être partiellement stockée, mais aussi métabolisée.

– **Métabolisme.** La chlordécone subit un processus de métabolisme hépatique, principalement par le biais d'une alphacétoréductase (ou chlordécone réductase), pour former des métabolites comme le chlordécol, puis des dérivés secondaires glucuronides.

– **Excrétion.** La chlordécone et ses métabolites sont excrétés principalement par les voies biliaires et se retrouvent ainsi dans les fèces. Toutefois, il existe un cycle entéro-hépatique qui consiste en une réabsorption des molécules précitées au niveau colique. Ce processus est physiologique et concerne la circulation et le recyclage de certaines substances, comme les acides biliaires, entre l'intestin et le foie. Le cycle entéro-hépatique est très important dans le contexte de la contamination, car il limite l'excrétion fécale de la chlordécone, d'où une persistance prolongée dans l'organisme humain (demi-vie égale à 131 jours).

### Évaluation de la contamination des humains : la chlordéconémie, un marqueur biologique de l'exposition et un outil pour gérer le risque

Les études Kannari 1 et Kannari 2 sont des études épidémiologiques menées aux Antilles pour évaluer les effets de l'exposition à la chlordécone sur la santé humaine.

Une étude épidémiologique a mis en évidence une association entre l'exposition à la chlordécone et le risque de cancer de la prostate chez l'humain aux Antilles (Multigner *et al.*, 2010), tandis que le programme Kannari 1 a ensuite confirmé l'ampleur de l'exposition de la population générale, avec une détection de la chlordécone chez plus de 90 % des individus (Dereumeaux *et al.*, 2020). En parallèle, l'Anses a mené une action d'évaluation des risques pour la population antillaise liés à cette contamination par la chlordécone et a donc développé des VTR et des LMR dans les aliments.

Une VTR est une estimation de la quantité d'une substance chimique (comme la chlordécone) considérée comme étant sans risque pour la santé humaine sur une période donnée. Ces VTR ont pour but de guider les politiques de gestion des risques,

ou les normes de certaines matrices (air, eau, aliments). On distingue plusieurs VTR (chronique ou aiguë, externe ou interne) en fonction de la durée d'exposition et de l'organe cible.

Concrètement, en 2021, après l'analyse de nouvelles données, l'Anses a réévalué les VTR pour la chlordécone. La VTR externe, qui correspond à une quantité maximale de chlordécone entrant dans l'organisme (par voies orale, respiratoire et cutanée), est passée de 0,5 à 0,17 µg par kilogramme de poids corporel et par jour, tandis que la VTR interne, définissant la concentration de chlordécone dans le sang (ou chlordéconémie) en dessous de laquelle le risque d'effets néfastes est jugé négligeable, a été fixée à 0,4 µg de chlordécone par litre de plasma. Kannari 2 a utilisé cette VTR interne pour ré-évaluer le pourcentage de la population adulte antillaise ayant une chlordéconémie présentant des risques sanitaires.

Une autre conséquence des études Kannari est la détermination de la demi-vie de la chlordécone chez l'humain. Celle-ci peut être considérée comme relativement longue dans l'organisme humain avec une valeur de 131 jours. Ceci signifie qu'elle peut persister pendant une période prolongée, en particulier si l'exposition n'est pas réduite. Cette valeur est l'une des conséquences du cycle entérohépatique. Cela augmente le risque d'imprégnation des tissus (sang, foie, prostate) et pourrait expliquer des effets néfastes sur la santé sur le long terme, tels que des perturbations endocriniennes, des effets neurotoxiques et des risques accrus de certains cancers (détaillés dans le chapitre suivant).

## ► Toxicité et dangers potentiels de la chlordécone

Les études toxicologiques menées sur des rats (administration par voie orale) ont principalement montré que la chlordécone est un composé : neurotoxique (tremblements du corps et des membres), reprotoxique (atrophie testiculaire), hépatotoxique, et possiblement cancérigène pour l'être humain selon le Circ.

Les mécanismes d'action identifiés portent sur la perturbation d'ATPases\* membranaires, de l'homéostasie calcique\*, des niveaux de multiples neurotransmetteurs et par un effet de perturbation endocrinienne (œstrogènes et progestérone). Ces résultats sont à nuancer en fonction des doses d'exposition (aiguë dans la plupart des cas) et doivent être considérés avec prudence, au regard des études épidémiologiques évaluant les impacts sanitaires.

## ► Évaluation des impacts sanitaires de la contamination et événements de santé en fonction de l'exposition

Pour ce qui est de ces impacts sanitaires, les études épidémiologiques menées chez les populations antillaises ont permis de démontrer des associations entre exposition à la chlordécone et certaines pathologies :

- un risque accru de survenue d'un cancer de la prostate, mais aussi de récurrence biochimique de la maladie (ré-élévation du marqueur *Prostate Specific Antigen*, ou PSA, sans signe clinique) ;
- un risque accru de prématurité et une réduction de la durée de la grossesse ;
- plusieurs risques neurologiques en cas d'exposition *in utero* à différents âges (préférence visuelle pour la nouveauté, motricité fine, tremblements des mains, comportement internalisé) ;

– plusieurs risques neurologiques en cas d'exposition postnatale jusqu'à 7 ans (traitement de l'information visuelle, comportements « externalisés », capacités intellectuelles).

Ces études révèlent aussi une absence d'association significative entre exposition à la chlordécone et infertilité masculine. Ceci ne contredit pas les observations expérimentales (voir précédemment) ou celles obtenues avec les ouvriers de l'usine de production du chlordécone Hopewell (États-Unis) chez qui une toxicité testiculaire a en revanche été mesurée. En effet, les doses d'exposition (animaux, ouvriers Hopewell) n'étaient pas les mêmes, ce qui illustre l'importance de la mesure de l'exposition dans l'estimation des risques. Par ailleurs, pour ce qui est de l'exposition maternelle à la chlordécone, aucune augmentation de risque de survenue de diabète gestationnel, d'hypertension gestationnelle ou de prééclampsie\* n'a été observée. Il en est de même pour ce qui est des malformations congénitales.

Certaines associations négatives peuvent être identifiées, mais doivent être interprétées avec beaucoup de précautions : l'étude « Hepatochlor » montre ainsi une diminution significative du risque de fibrose hépatique avancée avec l'augmentation de la concentration plasmatique de chlordécone. Cependant, ce constat est probablement lié à la pathologie qui, dans ce cas précis, influence la chlordéconémie : il s'agit d'un cas de causalité inverse qui souligne l'importance de prendre en compte la pharmacocinétique des contaminants environnementaux dans les études épidémiologiques. Ainsi, les méthodes d'évaluation et de caractérisation des risques doivent être interprétées avec précaution, mais demeurent fiables dans un grand nombre de cas.

## » Évaluation du risque de persistance de la contamination chez l'humain

Au regard de tous les éléments présentés auparavant, l'évaluation du risque de persistance de la contamination par la chlordécone chez l'être humain implique plusieurs considérations importantes. Ainsi, du point de vue des processus ADME, la chlordécone est principalement absorbée par voie orale par l'ingestion de produits alimentaires contaminés, elle se distribue largement dans l'organisme (et potentiellement au fœtus) avec une métabolisation hépatique qui conduit à son excrétion par les voies biliaires, mais avec une réabsorption liée à un cycle entérohépatique très efficace. Les considérations pour évaluer le risque de persistance de la contamination chez l'humain sont donc de procéder à :

- une surveillance de l'environnement des humains (sol, eau, cultures agricoles et produits alimentaires);
- une surveillance des voies d'exposition en particulier alimentaire (au travers des produits agricoles contaminés), mais aussi par inhalation et contact cutané; cela inclut une analyse des habitudes alimentaires, donc celle de la consommation d'eau (également du point de vue sociologique);
- une surveillance médicale avec le suivi de la chlordéconémie qui est la mesure de la concentration de chlordécone dans le sang ou d'autres fluides biologiques d'un individu. Ce *biomonitoring* est utilisé pour évaluer l'exposition humaine à la chlordécone et ses métabolites, et identifier les groupes à risque élevé de développement pathologique en se basant sur la VTR interne.

## ►► Enjeux futurs en lien avec l'évaluation des risques liés à la contamination par la chlordécone

La contamination par la chlordécone aux Antilles illustre de manière frappante les interrelations complexes entre risques sanitaires et écosystémiques. Utilisé comme pesticide dans les bananeraies, ce polluant organique persistant a infiltré durablement les sols, les eaux et les chaînes alimentaires. Sur le plan sanitaire, il est associé à une augmentation des risques de cancers de la prostate, de troubles neurologiques et de perturbations endocriniennes chez les populations exposées. Sur le plan écosystémique, la chlordécone perturbe les écosystèmes aquatiques et terrestres, affectant les espèces locales, et compromet la qualité des ressources naturelles, notamment l'eau potable et les produits agricoles.

Certains impacts découlent d'une chaîne de causes à effets. Ainsi, les impacts écosystémiques peuvent concerner la qualité des sols, avec pour conséquence la qualité des récoltes et donc des enjeux sanitaires. La présence de chlordécone à haute concentration dans certaines parcelles se répercute sur les activités économiques et culturelles, impactant par exemple les réseaux de production alimentaire informels et potentiellement les inégalités sociales. La contamination des sols par la chlordécone implique ainsi des adaptations fortes pour les populations avec pour conséquences des enjeux sociétaux majeurs.

Vivre sur un territoire contaminé, c'est devoir s'adapter pour diminuer les risques sanitaires et écosystémiques : cela passe par l'adaptation des pratiques agricoles et la gestion des sols contaminés pour limiter les expositions et donc la chlordéconomie pour les populations. Aussi, la réhabilitation des terres affectées ou la régénération des habitats aquatiques apparaissent nécessaires pour protéger la santé publique tout en préservant les écosystèmes locaux en promouvant une gestion durable des ressources naturelles.

Ce cas met en évidence l'importance d'une approche intégrée, combinant santé publique, gestion environnementale et justice sociale, pour comprendre et atténuer les impacts à long terme de la chlordécone et plus généralement des polluants persistants.

Le concept *One Health* est justement une approche intégrée qui reconnaît l'interconnexion étroite entre la santé humaine, animale et environnementale. Il repose sur la compréhension que la santé des humains est étroitement liée à celle des animaux et des végétaux, et plus généralement à celle de l'environnement dans lequel nous vivons (dont les myco- et microbiotes). Cette approche holistique vise à promouvoir la collaboration entre les professionnels de la santé humaine, vétérinaire, agricole, environnementale et d'autres disciplines connexes pour atteindre des objectifs communs de préservation de l'environnement et de diminution des risques, qui nécessitent donc d'être correctement évalués.

## ►► Références bibliographiques

Bahner L.H., Oglesby J.L., 1979. Test of a model for predicting Kepone accumulation in selected estuarine species. *Aquatic Toxicology*. p. 221-231. <https://doi.org/10.1520/STP34890S>.

Bouveret C., Rychen G., Lerch S., Jondreville C., Feidt C., 2013. Relative bioavailability of tropical volcanic soil-bound Chlordécone in piglets. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(38):9269-9274. <https://doi.org/10.1021/jf400697r>.

- Cabidoche Y.M., Achard R., Cattan P., Clermont-Dauphin C., Massat F., Sansoulet J., 2009. Long-term pollution by chlordecone of tropical volcanic soils in the French West Indies: A simple leaching model accounts for current residue. *Environmental Pollution*, 157(5):1697-1705. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.12.015>.
- Campan P., 2022. Caractérisation du devenir des produits phytosanitaires dans les sols volcaniques antillais : application à l'évaluation du risque de contamination des eaux. Thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier-université de Montpellier, 294 p.
- Carver R.A., Borsetti A.P., Kamps L.R., 1978. Gas-liquid chromatographic determination of Kepone residues in finfish, shellfish, and crustaceans. *J. Assoc. Off. Anal. Chem.*, 61:877-883.
- Clostre F., Letourmy P., Thuriès L., Lesueur-Jannoyer M., 2014a. Effect of home food processing on chlordecone (organochlorine) content in vegetables. *Science of the Total Environment*, 490:1044-1050. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.082>.
- Clostre F., Letourmy P., Turpin B., Carles C., Lesueur-Jannoyer M., 2014b. Soil type and growing conditions influence uptake and translocation of organochlorine (chlordecone) by cucurbitaceae species. *Water, Air, and Soil Pollution*, 225:2153. <https://doi.org/10.1007/s11270-014-2153-0>.
- Clostre F., Cattan P., Gaude J.M., Carles C., Letourmy P., Lesueur-Jannoyer M. 2015a. Comparative fate of an organochlorine, chlordecone, and a related compound, chlordecone-5b-hydro, in soils and plants. *Science of the Total Environment*, 532:292-300. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.026>.
- Clostre F., Philippe L., Lesueur Jannoyer M., 2015b. Organochlorine (chlordecone) uptake by root vegetables, *Chemosphere*, 118:96-102. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.06.076>.
- Clostre F., Letourmy P., Lesueur-Jannoyer M., 2017. Soil thresholds and a decision tool to manage food safety of crops grown in chlordecone polluted soil in the French West Indies. *Environmental Pollution*, 223:357-366. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.01.032>.
- Coat S., Monti D., Bouchon C., Lepoint G., 2009 Trophic relationships in a tropical stream food web assessed by stable isotope analysis. *Fresh water Biol.*, 54(5):1028-1041. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2008.02149.x>.
- Collas C., Mahieu M., Tricheur A., Crini N., Badot P.M. *et al.*, 2019. Cattle exposure to chlordecone through soil intake. The case-study of tropical grazing practices in the French West Indies. *Science of the Total Environment*, 668:161-170. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.384>.
- Collas C., Mahieu M., Badot P.M., Crini N., Rychen G. *et al.*, 2020. Dynamics of soil ingestion by growing bulls during grazing on a high sward height in the French West Indies. *Scientific Reports*, 10(1):1-8. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74317-0>.
- Collas C., Gourdine J.-L., Beramice D., Badot P.-M., Feidt C., Jurjanz S., 2023. Soil ingestion, a key determinant of exposure to environmental contaminants. The case study of chlordecone exposure in free-range pigs in the French West Indies. *Environmental Pollution*, 316:120486. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120486>.
- Coulis M., Senecal J., Devriendt-Renault Y., Guerin T., Parinet J., Pak L.T., 2024. Fate of chlordecone in soil food webs in a banana agroecosystem in Martinique. *Environmental Pollution*, 362:124874. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124874>.
- Dereumeaux C., Saoudi A., Guldner L., Pecheux M., Chesneau J. *et al.*, 2020 Chlordecone and organochlorine compound levels in the French West Indies population in 2013–2014. *Environ Sci Pollut Res.*, 27(33):41033-41045. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07181-9>.
- De Rock P., Dromard C., Allenou J.P., Thouard E., Cimiterra N. *et al.*, 2020. Recherche des voies de contamination des écosystèmes côtiers de Martinique par le chlordecone — Projet ChloAnt. Rapport technique, 65 p. Disponible sur <https://www.observatoire-eau-martinique.fr/app/uploads/1/2025/09/Rapport-CHLOANT-24-07-2020.pdf>.
- Desprats J.F., Comte J.P., Chabrier Ch., 2004. Cartographie du risque de pollution des sols de Martinique par les organochlorés — Rapport phase 3, BRGM/RP-53262-FR, 23 p.
- Dromard C.R., Bodiguel X., Lemoine S., Bouchon-Navaro Y., Reynal L. *et al.*, 2015. Assessment of the contamination of marine fauna by chlordecone in Guadeloupe and Martinique (Lesser Antilles). *Environmental Science and Pollution Research*, 23(1):73-80. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4732-z>.

- Dromard C.R., Devault D.A., Bouchon-Navaro Y., Alléno J.P., Budzinski H. *et al.*, 2019. Environmental fate of chlordecone in coastal habitats: recent studies conducted in Guadeloupe and Martinique (Lesser Antilles). *Environmental Science and Pollution Research*, 29(1):51-60. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04661-w>.
- Dromard C.R., Guéné M., Bouchon-Navaro Y., Lemoine S., Cordonnier S., Bouchon C., 2018. Contamination of marine fauna by chlordecone in Guadeloupe: evidence of a seaward decreasing gradient. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(15):14294-14301. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8924-6>.
- Dupont L., Brunet C.M., Fourcade Y., James S., Gabriac Q., Coulis M., 2023. Recording earthworm diversity on the tropical island of Martinique using DNA barcoding unveiled endemic species in bromeliad plants. *Soil Biology and Biochemistry*, 182:109038. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.109038>.
- Eraud C., Mastain O., Lafitte D., Berny P., 2011. Imprégnation biologique des populations d'oiseaux de la Martinique par la Chlordécone. Rapport de l'ONCFS.
- Feidt C., Collas C., Mantran M., Liber Y., Tournebise R. *et al.*, 2022. Quels enjeux pour les fourrages dans la gestion de la crise chlordécone aux Antilles françaises? *Fourrages*, 249:9-18.
- Fourcot A., Feidt C., Le Roux Y., Thomé J.P., Rychen G., Fournier A., 2021. Characterization of chlordecone distribution and elimination in ewes during daily exposure and depuration. *Chemosphere*, 277:130340. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130340>.
- Fournier A., Feidt C., Lastel M.L., Archimède H., Thomé J.P. *et al.*, 2017. Toxicokinetics of chlordecone in goats: Implications for risk management in French West Indies. *Chemosphere*, 171:564-570. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.054>.
- Gabriac Q., James S., Dupont L., Csuzdi C., Coulis M., 2024. Biodiversité des vers de terre (Annelida, Clitellata) des milieux cultivés des Antilles françaises. *Zoosystema*, 46(17):411-455. <https://doi.org/10.5252/zoosystema-2024v46a17>.
- Jondreville C., Bouveret C., Lesueur-Jannoyer M., Rychen G., Feidt C., 2013. Relative bioavailability of tropical volcanic soil bound chlordecone in laying hens (*Gallus domesticus*). *Environmental Science and Pollution Research*, 20(1):292-299. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1010-1>.
- Jondreville C., Fournier A., Travel A., Feidt C., Roudaut B., 2010. Organic chemical contaminants in hens egg: regulatory context, modes and risk of transfer. *Productions animales*, 23(2):205-213.
- Jurjanz S., Colas C., Lastel M.L., Godard X., Archimède H. *et al.*, 2017. Evaluation of soil intake by growing Creole young bulls in common grazing systems in humid tropical conditions. *Animal*, 11(8):1363-1371. <https://doi.org/10.1017/S1751731116002755>.
- Jurjanz S., Fournier A., Clostre F., Godard E., Feidt C., 2020. Control of poultry contamination in chlordecone contaminated areas of the French West Indies. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(33):41117-41121. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08172-x>.
- Jurjanz S., Germain K., Juin H., Jondreville C., 2015. Plant and soil intake by organic broilers reared in tree- or grass-covered plots as determined by means of n-alkanes and of acid-insoluble ash. *Animal*, 9(5):888-898. <https://doi.org/10.1017/S1751731114002870>.
- Jurjanz S., Jondreville C., Mahieu M., Fournier A., Archimède H. *et al.*, 2014. Relative bioavailability of soil-bound chlordecone in growing lambs. *Environmental Geochemistry and Health*, 36(5):911-917. <https://doi.org/10.1007/s10653-014-9608-5>.
- Létondor C., Pascal-Lorber S., Laurent F., 2015. Uptake and distribution of chlordecone in radish: Different contamination routes in edible roots. *Chemosphere*, 118:20-28. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.03.102>.
- Liber Y., Cornet D., Tournebise R., Feidt C., Mahieu M. *et al.*, 2020. A Bayesian network approach for the identification of relationships between drivers of chlordecone bioaccumulation in plants. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(33):41046-41051. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07449-0>.
- Luellen D.R., Vadas G.G., Unger M.A., 2006. Kepone in James River fish: 1976-2002. *Science of the Total Environment*, 358(1-3):286-297. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.08.046>.
- Méndez-Fernandez P., Kiszka J.J., Heithaus M.R., Beal A., Vandersarren G. *et al.*, 2018. From banana fields to the deep blue: Assessment of chlordecone contamination of oceanic cetaceans in the eastern Caribbean. *Marine Pollution Bulletin*, 137:56-60. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.10.012>.

- Monti D., 2008. Évaluation de la biocontamination en Chlordecone de crustacés et poissons de rivières du Nord-Ouest de la Basse-Terre, et synthèse à l'échelle de la Guadeloupe. Convention, Direction régionale de l'Environnement, 31 p. + annexes.
- Monti D., 2017. Étude de la faune aquatique in SAFEGE 2017, Diagnostic et suivi de la qualité de l'eau au niveau des ouvrages départementaux 2014-2017. Convention Conseil général de la Guadeloupe, rapport final 174 p. + annexes.
- Mottes C., Deffontaines L., Charlier J.B., Comte I., Della Rossa P. *et al.*, 2020. Spatio-temporal variability of water pollution by chlordecone at the watershed scale: what insights for the management of polluted territories? *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 27(33):40999-41013. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06247-y>.
- Mouvet C., 2013. ABACHlor Analyse, Bactéries Anaérobies, Chlordécone. Rapport final, BRGM RP-62769-FR, 145 p. Disponible sur <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-62769-FR.pdf>.
- Multigner L., Ndong J.R., Giusti A., Romana M., Delacroix-Maillard H. *et al.*, 2010. Chlordecone exposure and risk of prostate cancer. *Journal of clinical oncology*, 28(21):3457-3462. <https://doi.org/10.1200/JCO.2009.27.2153>.
- Orndorff S.A., Colwelle R.R., 1980. Microbial transformation of Kepone. *Appl. Environ. Microbiol.*, 39(2):398-406. <https://doi.org/10.1128/aem.39.2.398-406.1980>.
- Rochette R., Andrieux P., Bonnal V., Cattan P., Nannette J.B. *et al.*, 2017. Contamination des bassins versants de la Guadeloupe continentale par la chlordécone. Actualisation des connaissances et cartographie des zones à risque de contamination. Inra-Cirad, 89 p.
- Rochette R., Bonnal V., Andrieux P., Cattan P., 2020. Analysis of surface water reveals land pesticide contamination: an application for the determination of chlordecone-polluted areas in Guadeloupe, French West Indies. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(33):41132-41142. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10718-y>.
- Soileau S.D., Moreland D.E., 1988. Effects of chlordécone and chlordécone alcohol on isolated ovine erythrocytes. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 24(2):237-249. <https://doi.org/10.1080/15287398809531157>.
- Tillieut O., 2006. Cartographie de la pollution des sols de Guadeloupe par la chlordécone. Rapport technique 2005-2006, préfecture de la région Guadeloupe-DAF, DAF/SPV 971, 25 p. Disponible sur [https://daaf.guadeloupe.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/071005\\_DAF-SPV-OT\\_cartographie-pollution-sols-Guadeloupe-chlordecone\\_cle8da565.pdf](https://daaf.guadeloupe.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/071005_DAF-SPV-OT_cartographie-pollution-sols-Guadeloupe-chlordecone_cle8da565.pdf).
- Voltz M., Andrieux P., Samouëlian A., Ponchant L., Grünberger O. *et al.*, 2023. Flow patterns and pathways of legacy and contemporary pesticides in surface waters in tropical volcanic catchments. *Science of the Total Environment*, 893:164815, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164815>.
- Voltz M., Crevoisier D., Fernandez-Bayo J.D., Libres A., Samouëlian A. *et al.*, 2015. Développement d'un outil de prédiction des concentrations dans les eaux souterraines et superficielles pour les produits phytosanitaires destinés aux DOM. Convention de recherche et développement, n° 2012-CRD-03 ANSES/Inra, rapport final, 101 p. + annexes.
- Voltz M., Saaidi P.L., Samouëlian A., 2025. Le chlordécone une présence persistante. *La Recherche*, Janv/Mars (580):42-43.
- Woignier T., Fernandes P., Lesueur-Jannoyer M., Soler A., 2012. Sequestration of chlordecone in the porous structure of an andosol and effects of added organic matter: an alternative to decontamination. *European Journal of Soil Science, Special Issue: ISMOM – soil interfaces in a changing world*, 63(5):717-723. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2012.01471.x>.

## Chapitre 6

# Comment prendre en compte la vulnérabilité des écosystèmes ?

*Dominique Monti, Charlotte R. Dromard*

Les milieux insulaires ultramarins ont de nombreuses originalités écologiques tant du point de vue du fonctionnement de leurs écosystèmes naturels, que des caractéristiques des populations animales ou humaines qui les peuplent. De la connaissance de ces originalités dépend l'efficacité des mesures de limitation des transferts du contaminant ainsi que celles visant à limiter l'exposition des populations.

Les travaux antérieurs aux années 2000 établissant un lien entre teneur en chlordécone et altération des écosystèmes naturels aux Antilles sont peu nombreux (par exemple, la survie d'adultes, de larves ou de juvéniles de la faune d'eau douce ou marine a été peu étudiée en relation avec la teneur en contaminant). Des études menées dans les années 1970 indiquaient toutefois que la molécule s'accumulait dans les chaînes alimentaires à partir de concentrations dans l'eau aussi faibles que 0,023 µg/l (Bahner *et al.*, 1997) et que la chlordécone était un composé extrêmement stable qui subissait peu de dégradation dans le milieu naturel. La bibliographie nous indiquait aussi que dans le fleuve James (Virginie, États-Unis), site d'une pollution massive par la chlordécone en 1976, le plancton avait été l'un des plus touchés parmi tous les compartiments biologiques des écosystèmes aquatiques. Les premières données historiques antillaises (Snegaroff, 1977; Kermarrec, 1980) et les analyses beaucoup plus tardives (années 2000) sur les teneurs en chlordécone de l'eau et de la faune de certaines rivières de la Basse-Terre (Guadeloupe) ont révélé une bio-accumulation qui pouvait être très élevée, avec des valeurs jusqu'à 16 000 fois plus importantes dans les organismes que dans les masses d'eau environnantes (Monti, 2008). Ces données indiquaient aussi que les phases juvéniles d'organismes aquatiques pouvaient être plus contaminées que les phases adultes et que la taille individuelle ne présageait nullement, avec certitude, d'un niveau de contamination donné.

En conséquence, une suite logique d'actions a rapidement concerné, dès les années 2000, (i) un élargissement de la couverture géographique, de manière à identifier les zones les plus contaminées afin de réduire l'exposition des populations humaines, (ii) une étude des transferts et des articulations ou connexions possibles entre milieux, et (iii) une recherche d'éventuels dommages causés par la chlordécone sur le comportement d'écosystèmes et d'organismes aquatiques ou terrestres.

### ► Sévérité du paysage aquatique contaminé

Lorsque des teneurs en chlordécone très importantes ont été découvertes dans des organismes d'eau douce, dont certains possiblement consommés par la population

locale, les services de l'État ont rapidement déployé des campagnes de collecte sur le terrain, élargies d'un point de vue géographique et spécifique. Cette mesure a révélé un vaste paysage contaminé, avec des différences entre Guadeloupe et Martinique tenant à l'historique et la géographie des pratiques culturelles, ainsi qu'à la nature des sols : les biocontaminations aquatiques les plus importantes dans les deux îles étant observées dans les rivières baignant la zone historique bananière du sud de la Guadeloupe.

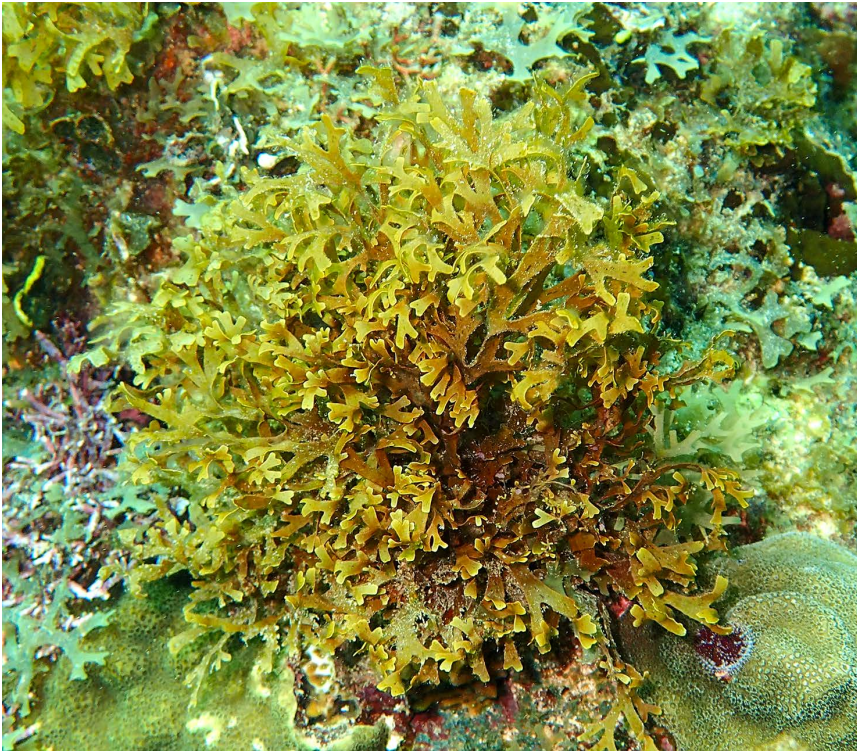
Une recherche bibliographique extensive menée sur des données mondiales, de terrain ou expérimentales, montre, pour la chlordécone, l'existence de facteurs de bioconcentration (facteur multiplicatif entre la teneur dans l'eau et celle dans la chair des organismes) différents selon le mode, la durée d'exposition et les organismes considérés. En conditions expérimentales, ces facteurs s'étagent le plus souvent entre  $\times 10$  et  $\times 340$  pour les expositions statiques (c'est-à-dire en eau stagnante) et entre  $\times 900$  et  $\times 16\,600$  (« record » d'accumulation pour *Pimephales promelas*, poisson Cyprinidae) lors d'essais dynamiques (c'est-à-dire en eau courante). Avec un facteur de concentration de  $\times 16\,543$  observé dans des poissons d'eau douce de Guadeloupe et des teneurs de  $39\,400\ \mu\text{g}/\text{kg}$  PF dans des poissons de la rivière Grande Anse (Trois-Rivières, Guadeloupe), la biocontamination s'est donc révélée extrême dans les rivières des Antilles, se situant dans les records mondiaux de contamination.

Compte tenu de cette aptitude de la molécule de chlordécone à être concentrée par le vivant, les premières études après le déversement accidentel de chlordécone dans la baie de Chesapeake (Virginie, États-Unis) avaient abouti à fixer un seuil au-dessous duquel la situation était considérée comme n'induisant pas un risque de biocontamination importante (ou « *clean-up index* » eau). Celui-ci avait été défini de manière expérimentale comme inférieur ou égal à  $0,008\ \mu\text{g}/\text{l}$  (US EPA, 1978). Dans les rivières antillaises, compte tenu (i) de limites maximales en résidus généralement fixées plus basses qu'aux États-Unis (soit  $20\ \mu\text{g}/\text{kg}$  PF pour les poissons et crustacés aux Antilles), (ii) de la capacité de ceux-ci à la concentrer (valeur moyenne retenue  $\times 5\,500$ ), un « *clean-up index* » a d'abord été proposé à  $0,000\,14\ \mu\text{g}/\text{l}$  de chlordécone, première approximation obtenue par modélisation des concentrations dans l'eau et dans la chair de crustacés d'embouchure de rivière aux Antilles en 2008, puis a évolué avec un seuil à  $0,000\,005\ \mu\text{g}/\text{l}$  (arrêté ministériel du 27 juillet 2015). Il est à noter que cette concentration est par ailleurs très inférieure aux limites de quantification généralement proposées par les laboratoires, ce qui introduit un biais dans l'appréciation des niveaux réels de biocontamination.

De la même façon, des concentrations extrêmes ont également été observées dans les organismes marins évoluant dans les masses d'eaux côtières aux Antilles. Ainsi, les échantillons de zooplancton collectés devant les embouchures de Rivière Monsieur en Martinique et de la rivière Grand Carbet en Guadeloupe atteignaient des concentrations moyennes en chlordécone de  $272$  et  $306\ \mu\text{g}/\text{kg}$  respectivement, correspondant à des valeurs de bioconcentration entre eau et organismes situées entre  $\times 440$  et  $\times 27\,200$ , valeur extrême dépassant ainsi la valeur du facteur de bioconcentration record obtenu en milieu dulçaquicole.

La contamination de la faune marine a donc été étudiée de façon très élargie lors de plusieurs campagnes menées dès 2003, dont le but était de proposer une cartographie de la contamination marine par la chlordécone. Dans ce cadre,  $3\,642$  échantillons de poissons et de crustacés marins ont été collectés entre 2003 et 2014, sur toutes les

côtes de la Guadeloupe et de la Martinique (Dromard *et al.*, 2016a). Ces données ont permis de dresser un bilan du niveau de contamination du milieu marin, en fonction des zones géographiques et des espèces animales, et d'identifier les valeurs extrêmes de contamination de la faune halieutique. Les crustacés, tels que les crabes du genre *Callinectes*, affichent les concentrations les plus élevées, avec une valeur record atteignant 15 200 µg/kg PF, et une valeur moyenne de 1 547 µg/kg PF dans les mangroves de Petit-Bourg (Dromard *et al.*, 2016a, 2016b). Parmi les espèces marines les plus fortement contaminées, le brochet de mer *Centropomus* spp. figure en bonne place, avec une concentration maximale mesurée de 2 159 µg/kg PF et une concentration moyenne de 230 µg/kg PF tous sites confondus. Enfin, contre toute attente, des échantillons de macroalgues brunes du genre *Dictyota* (figure 6.1) ont montré des valeurs très élevées, avec une valeur extrême de 13 230 µg/kg PF en milieu expérimental et de 1 458 µg/kg PF dans le milieu naturel, dans la baie du Galion en Martinique (Contarini et Dromard, 2021).



**Figure 6.1.** Macroalgues du genre *Dictyota* qui présentent un très fort potentiel de bio-accumulation. Crédit photo : Charlotte Dromard.

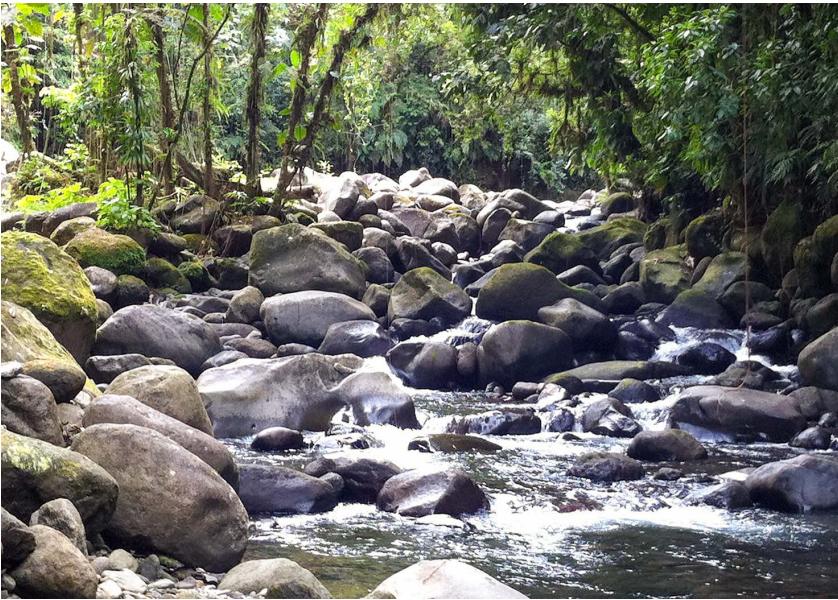
### ► Raisons de la grande vulnérabilité des eaux douces antillaises

Les cours d'eau antillais ont des originalités qui les distinguent de la majorité des rivières européennes et qui sont pénalisantes lors d'une contamination par des pesticides bio-accumulables.

## Incidences de la turbulence

Dans les îles avec relief, la pente des parties moyennes et supérieures, et les petits bassins versants qui concentrent rapidement la pluie, font des rivières aux faibles lames d'eau des milieux turbulents et agités sur l'essentiel de leur cours. Leur lit est pauvre en sédiments fins (par nature riches en matière organique) et ce, même à faible altitude. Ainsi, parmi les paramètres environnementaux importants dans la capacité du vivant à concentrer les polluants, la fraction de carbone organique contenu dans les sédiments du milieu de vie est déterminante : le facteur de bioconcentration de la chlordécone entre sédiment et vivant varie de  $\times 3,3$  à  $\times 600$  chez le ver de vase lorsque l'on passe de 12 % à 0,09 % de carbone organique dans les sédiments, et de 5790 à 17 600 fois lorsque l'on se rapporte à la concentration de chlordécone dissoute dans l'eau interstitielle (Dickson *et al.*, 1987). Plus le sédiment est riche en matière organique et plus il capte le polluant, le rendant moins biodisponible\* pour les organismes.

Turbulentes, pauvres en carbone organique sédimentaire, les rivières des Antilles sont structurellement des milieux vulnérables et sensibles où la biodisponibilité est naturellement particulièrement forte pour les polluants bio-accumulables (figure 6.2). En corollaire, en matière de mesures de gestion, les teneurs en contaminants mesurées dans l'eau et dans les sédiments de ces cours d'eau ne permettront pas, ou avec beaucoup d'incertitude, d'inférer la contamination réelle des organismes aquatiques.

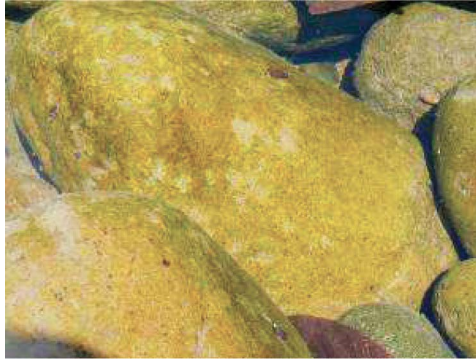


**Figure 6.2.** Une rivière antillaise, rapide et pauvre en sédiments fins. Crédit photo : Dominique Monti.

## Un réseau trophique simplifié, des cycles de vie originaux

Une autre originalité des rivières antillaises tient aux espèces présentes et à leur organisation au sein de l'écosystème aquatique. Les îles des Antilles sont des systèmes géologiques récents, isolés, et leurs rivières ont été colonisées par un petit nombre

d'espèces comportant originellement une phase de dispersion marine, et qui ont conservé cette aptitude au cours de l'évolution. La richesse spécifique y est faible et le réseau trophique de rivière est donc simplifié. Les producteurs primaires y sont rares : peu de phytoplancton, de macroalgues, etc., ce qui a pour conséquence de renforcer la consommation de matière d'origine terrestre (feuilles, fruits, matière dérivante, etc.), avec une forte variabilité temporelle liée à la faiblesse des transferts par l'eau en saison sèche. Le vivant s'est adapté à ces fortes contraintes trophiques, avec la mise en place d'une grande plasticité alimentaire et comportementale, mais aussi la consommation massive du seul producteur primaire pérenne et spatialement stable dans la rivière : le biofilm épilithique\* (figure 6.3).



**Figure 6.3.** Biofilm épilithique dans une rivière antillaise. Crédit : Monti et Lefrançois, 2010.

Communautés de micro-organismes adhérant à une surface solide, les biofilms aquatiques sont majoritairement représentés par un ensemble de bactéries, de microalgues photosynthétiques et de cyanophycées, enrobés par une matrice exopolysaccharidique (EPS), qui représentent une biomasse souvent importante et un ensemble de producteurs de matière en interaction rapide et permanente avec le milieu aquatique qui les entoure. Le biofilm offre aux micro-organismes qu'il héberge des propriétés métaboliques différentes des organismes libres et est ainsi capable d'accumuler voire de métaboliser des polluants, comme certains pesticides qui sont retrouvés en quantité plus importante que dans les sédiments. Les analyses de biofilm de rivière en Guadeloupe ont montré une forte contamination par la chlordécone de l'ordre de 300 à 500  $\mu\text{g}/\text{kg}$  PF. Une expérience consistant à immerger trois semaines dans l'eau de la rivière des feuilles prélevées dans les arbres bordant le cours d'eau a montré une contamination secondaire de la litière qui s'effectuait par contact direct avec le polluant contenu dans l'eau, passant alors de 20 à 610  $\mu\text{g}/\text{kg}$  PF (Coat *et al.*, 2011). Le biofilm et la matière végétale contaminée participent donc à une entrée importante de la chlordécone dans les chaînes alimentaires, dont la teneur sera amplifiée en allant vers les espèces de niveau trophique élevé comme les anguilles, les dormeurs (poissons) ou les ouassous (crustacés).

## ► Milieu marin

Les écosystèmes marins côtiers fonctionnent de façon très différente des milieux dulçaquicoles étant donné la diversité des espèces présentes et la complexité des interactions observées. Les rivières tropicales se déversent dans le milieu marin au niveau

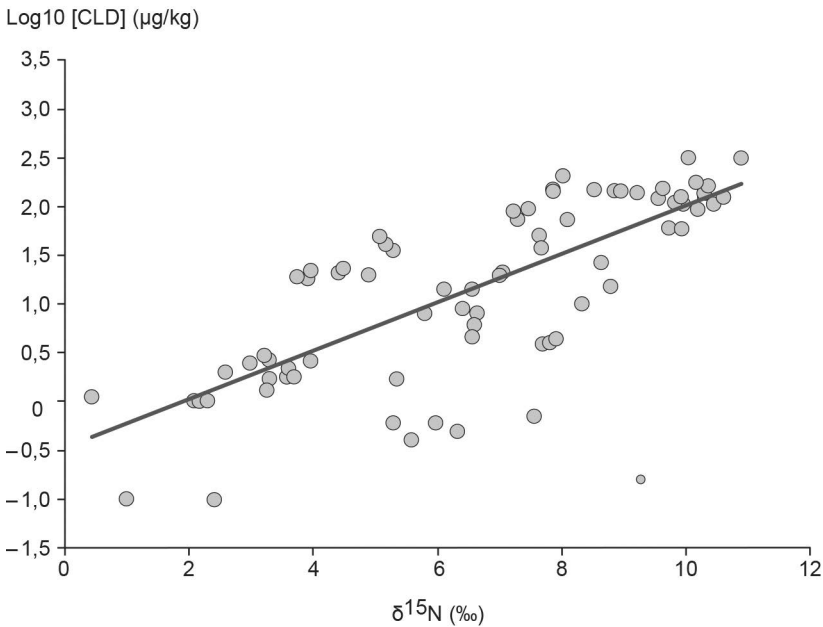
des embouchures qui, en milieu tropical, peuvent être colonisées par des mangroves, c'est-à-dire des forêts littorales de palétuviers. Les mangroves jouent des rôles écologiques fondamentaux incluant la rétention des sédiments terrigènes, la filtration des eaux de ruissellement et le stockage du carbone. Elles abritent les nurseries de nombreuses espèces de poissons et de crustacés, mais aussi des réserves alimentaires pour des prédateurs occasionnels. Les caractéristiques écologiques des mangroves les rendent aussi propices à la rétention de divers polluants, tels que la chlordécone. Ainsi, les valeurs de chlordécone les plus élevées mesurées dans les espèces marines ont été trouvées dans des organismes fréquentant les zones de mangroves, tels que les mullets (*Mugil* spp.) qui fouissent dans le sédiment pour se nourrir et sont de fait en contact avec des particules terrigènes potentiellement chargées en chlordécone, les brochets (*Centropomus* spp.), comme vu précédemment, par le lien étroit qu'ils entretiennent avec les zones saumâtres, mais aussi toutes les espèces détritivores comme les crabes, les crevettes et les langoustes du fait de leur régime alimentaire et de la diversité des sources de matières ingérées (Dromard *et al.*, 2016b). Le niveau de contamination moyen mesuré pour l'ensemble du réseau trophique en mangrove a été estimé à 200 µg/kg en Guadeloupe (193 à Goyave et 213 à Petit-Bourg en Guadeloupe) et de 1 122 µg/kg dans la baie du Galion en Martinique (Dromard *et al.*, 2018b). Étant donné la concentration en chlordécone du milieu ambiant, le processus de contamination privilégié en mangrove est celui dit « par bain », c'est-à-dire par contact des branchies, des téguments ou des tissus avec les eaux environnantes contaminées, auquel s'ajoute la contamination par voie trophique pour certains organismes, tels que les détritivores et les prédateurs (Dromard *et al.*, 2018a).

Les herbiers à magnoliophytes marins sont généralement installés proches des mangroves, car ils nécessitent la présence d'un substrat meuble pour leur implantation ainsi que d'une eau relativement claire, assurée par l'action de rétention particulière des palétuviers. Il a été démontré que la contamination moyenne du réseau trophique dans les herbiers est généralement deux fois plus faible que celle du réseau trophique de la mangrove en Guadeloupe (entre 85 et 107 µg/kg) et jusqu'à cinq fois plus faible par exemple pour la baie du Galion (231 µg/kg) (Dromard *et al.*, 2022).

Cette diminution du niveau de contamination générale est expliquée par l'éloignement de la source de pollution (c'est-à-dire de l'embouchure des rivières), la courantologie marine et la dilution par les masses d'eau marines océaniques. Dans les herbiers, la contamination des organismes peut avoir lieu par bain, mais également par la voie trophique, c'est-à-dire par la consommation de proies contaminées. Une étude des variations saisonnières de la contamination par la chlordécone dans la baie du Galion a montré que les organismes inféodés aux herbiers étaient particulièrement touchés lors de la saison humide, du fait de l'élargissement de la zone impactée par le panache turbide des rivières lié à des débits plus importants (Dromard *et al.*, 2022). Ainsi, l'herbe à tortue, *Thalassia testudinum*, l'espèce climacique\* des herbiers aux Antilles affiche une concentration en chlordécone quatre fois plus élevée en saison humide (37 µg/kg) qu'en saison sèche (9 µg/kg) et cette tendance a également été observée pour des consommateurs primaires, tels que les holothuries, les poissons herbivores, mais aussi les langoustes.

Enfin, les récifs coralliens représentent le troisième écosystème marin côtier emblématique des Antilles. Les récifs coralliens nécessitent la présence d'une eau très claire pour leur développement et sont, de ce fait, souvent éloignés des mangroves de

plusieurs centaines de mètres à plusieurs kilomètres. Malgré la distance, les réseaux trophiques récifaux sont également touchés par la contamination par la chlordécone, et le niveau de contamination du réseau trophique récifal est proche de celui des herbiers (71  $\mu\text{g}/\text{kg}$  en Guadeloupe et 210  $\mu\text{g}/\text{kg}$  dans la baie du Galion). Dans les récifs, aucune variation saisonnière de la contamination des organismes marins, quel que soit leur embranchement n'a pu être mise en évidence, ce qui traduit le fait que la voie de contamination principale est la voie trophique. Ainsi, les espèces les plus touchées dans les récifs coralliens sont des espèces prédatrices (niveau élevé dans la chaîne alimentaire), telles que le barracuda *Sphyraena barracuda* ou le poisson-lion *Pterois volitans*, ou des détritivores, telles que les langoustes *Panulirus* spp. (à cause de la consommation de particules terrigènes polluées). Une corrélation statistiquement significative a été montrée entre le niveau de contamination des organismes et leur niveau trophique (Dromard *et al.*, 2018a), exprimé par un proxy couramment utilisé en écologie qui est la signature isotopique en azote (c'est-à-dire la valeur  $\delta^{15}\text{N}$ ; figure 6.4).



**Figure 6.4.** Concentrations en chlordécone [CLD] (log-transformées) en fonction du niveau trophique des organismes, exprimé par leurs compositions isotopiques en azote ( $\delta^{15}\text{N}$ ), dans un récif corallien de Guadeloupe (source : Dromard *et al.*, 2018a).

Les différences de contamination entre les écosystèmes marins s'expliquent par la microcourantologie côtière, mais aussi par les déplacements de certains organismes entre le récif et les zones littorales. Effectivement, les organismes marins peuvent se déplacer entre les mangroves, les herbiers et les récifs au cours de migrations ontogénétiques\* (les zones de mangrove et d'herbier étant reconnues comme des « zones de nurserie » au sein desquelles les larves et les juvéniles se développent à l'abri de prédateurs), de recherche de nourriture (raids trophiques de certains prédateurs) ou pour la reproduction (pour les langoustes, par exemple). Ces déplacements entre les écosystèmes, qui peuvent avoir lieu à différents stades de vie,

favorisent le transfert de la pollution vers les zones au large. Ainsi, des traces de chlordécone ont été retrouvées dans des mammifères marins, tels que des dauphins de Fraser (*Lagenodelphis hosei*) et des pseudorques (*Pseudorca crassidens*), alors qu'ils évoluent dans des zones pélagiques relativement éloignées des sources de pollution (Méndez-Fernandez *et al.*, 2018).

Lors des études sur la contamination des réseaux trophiques côtiers, les valeurs mesurées ont été plus faibles en Guadeloupe que celles observées en Martinique. Ces différences de valeurs observées entre les écosystèmes marins de Guadeloupe et ceux de la Martinique s'expliquent par la géomorphologie des zones étudiées. Les sites impactés en Guadeloupe sont des sites ouverts, exposés à la houle dominante, ce qui favorise l'effet de dilution. En revanche, en Martinique, les sites marins étudiés (baie du Robert ou du Galion) sont des baies semi-fermées propices à la rétention de la molécule. Ces différences s'expliquent également par la longueur et la morphologie des bassins versants ainsi que par les débits des rivières associées.

Le déplacement des organismes le long des côtes peut également entraîner un transfert de la chlordécone vers des zones côtières éloignées des embouchures de rivières contaminées.

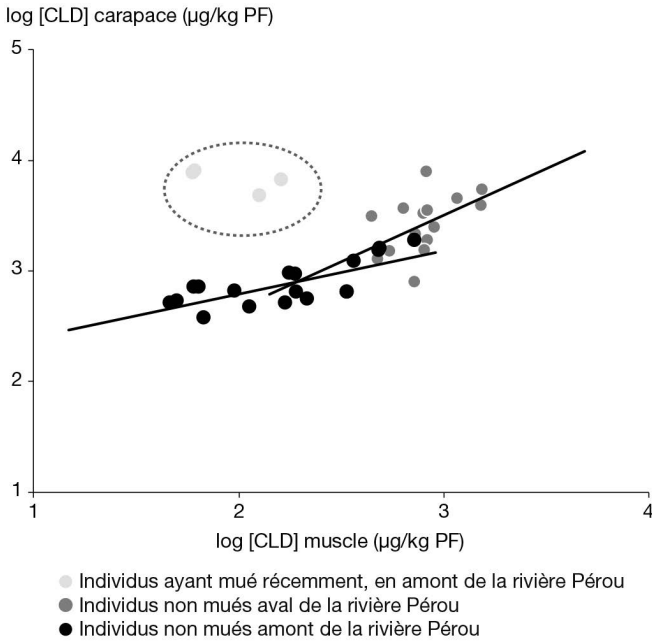
Ces particularités écologiques ont rendu la délimitation des zones d'interdiction de pêche difficile, voire impossible selon les espèces, notamment les espèces à large répartition spatiale et à forte mobilité, et impliquent que le risque « zéro » est presque impossible à atteindre aujourd'hui en ce qui concerne les produits de la mer et de la pêche.

## ► Localisation de la chlordécone dans les organismes aquatiques

La distribution préférentielle interne entre muscles et viscères (foie et muscle chez le poisson ou encore hépatopancréas et muscle chez les crustacés) a été étudiée de manière à informer les consommateurs et optimiser la protection des populations en proposant des modifications de leurs habitudes de consommation. La tendance, pour la chlordécone, est celle d'une accumulation générale dans tout l'organisme, avec des valeurs extrêmes dans le foie des poissons et une préférence pour le muscle chez certains crustacés, largement consommés aux Antilles.

L'étude de la répartition de la charge individuelle en chlordécone dans des situations de contamination variée montre un piégeage encore plus important dans la carapace des crustacés, de l'ordre de trois à quatre fois la teneur dans le muscle et jusqu'à 67 fois la teneur dans l'eau pour les crustacés en période de mue (figure 6.5).

Des expériences menées aux Antilles sur 2000 alevins d'ombrine (poisson marin d'élevage) en situation expérimentale dans des aquariums d'eau de mer contaminée à la chlordécone ont aussi montré que, comme dans le cas des litières immergées, la contamination était très rapide. Elle est détectable analytiquement en moins de 24 heures. Cependant, contrairement au milieu naturel, des alevins placés dans des aquariums d'eau saine et non nourris montrent une décontamination de 60 % observée au bout d'un mois et de 92 % au bout de deux mois (Bisque, 2016; Lemoine, 2017). Très différentes des contaminations extrêmes observées en milieu naturel qui perdurent dans le temps, ces résultats montrent l'importance des contaminations par voie trophique, en milieu aquatique.



**Figure 6.5.** Accumulation de la chlordécone chez les crustacés *Macrobrachium faustinum*.  
[CLD] : concentration en chlordécone.

## ► Impacts sur les communautés aquatiques

La recherche de conséquences physiologiques et écologiques de cette biocontamination a été menée au travers d'études de dynamique de population chez le crustacé *Macrobrachium faustinum* et de la recherche d'anomalies histologiques dans les gonades du poisson « petit dormeur » *Eleotris perniger*, pouvant être associées à un possible effet oestrogénomimétique de la chlordécone, c'est-à-dire une possible perturbation endocrinienne. Des dosages de molécules d'intérêt (ecdystéroïdes, vitellogénines), des concentrations individuelles en adénylates (adénosine triphosphate ou ATP, adénosine diphosphate ou ADP et adénosine monophosphate ou AMP) ou des modifications comportementales (trajectoires et vitesses de déplacement de larves maintenues à l'intérieur d'un toximètre dynamique\*) ont été réalisés sur le crustacé. Lors d'exposition en laboratoire avec des concentrations nominales de 3 µg/l et 9 µg/l, écologiquement plausibles, il a été montré que la chlordécone diminuait la concentration d'hormone de mue (20-hydroxyecdysone) chez les crustacés exposés au polluant, par rapport au contrôle (Lafontaine *et al.*, 2016). Les molécules de l'énergie dans les cellules (ATP, ADP et AMP) de larves contaminées ont montré des changements post-exposition avec un temps de latence de l'ordre de 24 heures. Ce temps de latence court était corrélé avec une perte de mobilité et une diminution de la distance parcourue par les larves (Monti *et al.*, 2012); cette durée de 24 heures étant par ailleurs très inférieure au temps de résidence des larves dans les milieux naturels d'eau de mélange, avant leur migration vers l'amont. Dans ces milieux d'aval, les espèces qui partagent leur vie entre eau douce et eau salée ont justement de gros efforts à réaliser pour (i) réintégrer les embouchures à partir du milieu marin, (ii) effectuer leur montaison à l'état juvénile

et (iii) faire face à des producteurs de matières consommables en nombre réduit. Ces éléments concernant la modification du potentiel métabolique\* des larves, la diminution de leur mobilité, jointes aux données de contamination importante du biofilm épilithique, producteur primaire largement consommé, laissent présager des répercussions fonctionnelles globales sur la biodiversité des écosystèmes d'eau douce aux Antilles. Des recherches sont encore à mener pour approfondir les voies moléculaires qui sont impliquées dans les réponses physiologiques observées.

## ►► Une bio-indication difficile

Gérer, conserver et préserver les milieux pour freiner la perte de biodiversité repose sur l'utilisation d'outils de suivi et d'évaluation de la qualité des écosystèmes, dont les bio-indicateurs\*. L'ensemble des particularités développées plus avant : (i) le paradoxe d'animaux fortement contaminés se retrouvant dans des eaux apparemment de très bonne qualité, car contenant des concentrations non quantifiables par les analyses courantes; (ii) les aspects inopérants des indicateurs de richesse, biodiversité, biomasses, etc., dus aux aspects migratoires et aux nouvelles entrées massives, annuelles ou bisannuelles, d'individus de provenance inconnue; (iii) la faible sensibilité de certains bio-indicateurs aux insecticides; et (iv) la complexité des analyses de type physiologique, métabolique, génétique ou comportementale réalisées dans un contexte de recherche et peu praticables en ce qui concerne le suivi *in situ*. Tous ces points nécessitent de développer des recherches ciblées sur la mise au point d'outils de bio-indication fiables, adaptés aux fonctionnements des écosystèmes antillais et utilisables à large échelle.

Compte tenu du rôle écologique central de ces biofilms épilithiques dans les rivières des Antilles, des résultats publiés existants et prometteurs sur les propriétés physiques des biofilms naturels et leur signification écologique (Ditsche *et al.*, 2014; Rubol *et al.*, 2018), leur pertinence comme bio-indicateur des charges des écosystèmes en chlordécone aux Antilles a été recherchée. Plusieurs niveaux d'approche ont été combinés : (i) une étude *in situ* des assemblages de diatomées (éléments constitutifs du biofilm), (ii) une étude *in situ* de la primocolonisation bactérienne du biofilm de substrats artificiels situés dans des stations présentant des niveaux de pollution de chlordécone importants ( $> 2,5 \mu\text{g/l}$ ) et (iii) une exposition contrôlée de biofilms en microcosmes pour évaluer les effets de la contamination par la chlordécone seule.

Les résultats obtenus sur les biofilms contaminés de Guadeloupe ont montré une teneur en carbone et des propriétés physiques (viscosité, élasticité) modifiées dans les milieux fortement contaminés. Les premiers effets de la chlordécone sur la survie et la croissance de micro-organismes aquatiques avaient été démontrés depuis les années 1980 et avaient souligné la forte diminution de la croissance bactérienne aérobie causée par la perturbation des fonctions oxydatives dans des expériences fortement contaminées en chlordécone (Mahaffey *et al.*, 1982). Ce travail pionnier avait aussi montré que l'activité de la NADH (forme réduite du nicotinamide adénine dinucléotide) oxydase et de la succino-oxydase était réduite de 51 % et 25 % respectivement après l'ajout de  $1 \mu\text{mol/l}$  de chlordécone aux cultures bactériennes, ainsi qu'une modulation du gène de la NADH oxydase, induisant la réduction du taux de croissance bactérienne avec une diminution de la biosynthèse des exopolymères bactériens (matrice EPS) des biofilms. Dans les études menées en Guadeloupe qui ont recherché des effets comparables dans les biofilms, fortement accumulateurs du polluant, les analyses de

la matrice EPS ont aussi montré des différences significatives dans les concentrations de glucides et de protéines entre milieux contaminés et non contaminés. Ces résultats mettant en évidence une réactivité chimique et physique à l'échelle mésoscopique pouvant être corrélée à la contamination, et notamment, les propriétés de friction, ont révélé une très bonne corrélation avec la concentration en chlordécone ainsi qu'avec les concentrations en glucides et protéines de la matrice EPS (Monti *et al.*, 2020).

Ce travail a révélé des relations intéressantes entre les caractéristiques physiques des biofilms épilithiques et la composition ainsi que la quantité des sécrétions des exopolymères le composant, en relation avec la pollution par la chlordécone. De plus, ces modifications dans la composition et structure du biofilm laissent présager d'un impact sur la disponibilité et l'accessibilité des ressources consommables pour les consommateurs supérieurs, crustacés et poissons, à l'échelle de l'écosystème.

## ► Références bibliographiques

- Bahner L.H., Wilson A.J., Sheppard J.M., Patrick J.M., Goodman L.R., Walsh G.E., 1977. Kepone® Bioconcentration, accumulation, loss, and transfer through estuarine food chains. *Chesapeake Sci.*, 18(3):299-308.
- Bisque L., 2016. Étude de la contamination et de la capacité de décontamination du poisson marin d'élevage *Scianops ocellatus* exposé à la chlordécone. Suivi de la contamination d'un biomarqueur du stress oxydant. Mémoire, master 2, Toxicologie de l'environnement, université d'Angers, 21 p.
- Coat S., Monti D., Legendre P., Bouchon C., Massat E., Lepoint G., 2011. Organochlorine pollution in tropical rivers (Guadeloupe): Role of ecological factors in food web bioaccumulation. *Environmental Pollution*, 159(6):1692-1701. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.02.036>.
- Contarini P.E., Dromard C.R., 2021. Biosorption capacity of genus *Dictyota* facing organochlorine pesticide pollutions in coastal areas of the Lesser Antilles. *Aquatic Botany*, 169:103346. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2020.103346>.
- Dickson K.L., Maki A.W., Brungs W.A. (éd.), 1987. *Fate and Effects of Sediment-Bound Chemicals in Aquatic Systems*. New York, Pergamon Press, 219-244.
- Ditsche P., Michels J., Kovalev A., Koop J., Gorb S., 2014. More than just slippery: the impact of biofilm on the attachment of non-sessile freshwater mayfly larvae. *J. R. Soc. Interface*, 11(92):20130989. <https://doi.org/10.1098/rsif.2013.0989>.
- Dromard C.R., Bodiguel X., Lemoine S., Bouchon-Navaro Y., Reynal L. *et al.*, 2016a. Assessment of the contamination of marine fauna by chlordecone in Guadeloupe and Martinique (Lesser Antilles). *Environmental Science and Pollution Research*, 23(1):73-80. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4732-z>.
- Dromard C.R., Thouard E., Reynal L., Bertrand J., Lemoine S. *et al.*, 2016b. Consolidation des connaissances sur la contamination de la faune halieutique par la chlordécone autour de la Guadeloupe et de la Martinique (ChloHal). Rapport final, UAG-Ifremer, 73 p.
- Dromard C.R., Bouchon-Navaro Y., Cordonnier S., Guéné M., Harmelin-Vivien M., Bouchon C., 2018a. Different transfer pathways of an organochlorine pesticide across marine tropical food webs assessed with stable isotope analysis. *Plos One*, 13(2):e0191335. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191335>.
- Dromard C.R., Guéné M., Bouchon-Navaro Y., Lemoine S., Cordonnier S., Bouchon C., 2018b. Contamination of marine fauna by chlordecone in Guadeloupe: evidence of a seaward decreasing gradient. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(15):14294-14301. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8924-6>.
- Dromard C.R., Allenou J.P., Tapie N., Budzinski H., Cimmaterra N. *et al.*, 2022. Temporal variations in the level of chlordecone in seawater and marine organisms in Martinique Island (Lesser Antilles). *Environmental Science and Pollution Research*, 29(54):81546-81556. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21528-9>.

- Kermarrec A., 1980. Niveau actuel de la contamination des chaînes biologiques en Guadeloupe : pesticides et métaux lourds 1979-1980. Inra, Petit-Bourg, Guadeloupe, 155 p.
- Lafontaine A., Gismondi E., Boulangé-Lecomte C., Geraudie P., Dodet N. *et al.*, 2016. Effects of chlordecone on 20-hydroxyecdysone concentration and chitobiase activity in a decapod crustacean, *Macrobrachium rosenbergii*. *Aquatic Toxicology*, 176:53-63. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2016.04.006>.
- Lemoine S., 2017. Capacité éventuelle des poissons marins contaminés par la chlordécone à se décontaminer à compter du moment où ils ne sont plus exposés à la contamination sur la base du modèle expérimentale de l'ombrine ocellée (*Sciaenops ocellatus*). Convention Daaf Guadeloupe, 18 p.
- Mahaffey W.R., Pritchard P.H., Bourquin A.W., 1982. Effects of kepone on growth and respiration of several estuarine bacteria. *Appl Environ Microbiol.*, 43(6):1419-1424. <https://doi.org/10.1128/aem.43.6.1419-1424.1982>.
- Méndez-Fernandez P., Kiszka J.J., Heithaus M.R., Beal A., Vandersarren G. *et al.*, 2018. From banana fields to the deep blue: Assessment of chlordecone contamination of oceanic cetaceans in the eastern Caribbean. *Marine pollution bulletin*, 137:56-60. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.10.012>.
- Monti D., 2008. Évaluation de la biocontamination en Chlordecone de crustacés et poissons de rivières du Nord-Ouest de la Basse-Terre, et synthèse à l'échelle de la Guadeloupe. Convention, UAG-Direction régionale de l'Environnement Guadeloupe, 31 p. + annexes.
- Monti D., Lefrançois E., 2010. Le biofilm épilithique, un élément fondamental du fonctionnement des milieux d'eau douce antillais : recherche de bioindicateurs dans un contexte de pollution par les pesticides. Rapport, université des Antilles et de la Guyane.
- Monti D., Forget-Leray J., Lagadic L., Thomé J.P., Boulangé-Lecomte C. *et al.*, 2012. Vulnérabilité des nurseries dulçaquicoles de Guadeloupe et Martinique face à la contamination des eaux par la chlordecone. Rapport final, Onema-ODE-Office de l'Eau Guadeloupe, 43 p. + annexes.
- Monti D., Hubas C., Lourenço X., Begarin F., Haouisée A. *et al.*, 2020. Physical properties of epilithic river biofilm as a new lead to perform pollution bioassessments in overseas territories. *Nature Sci Rep.*, 10(1):17309. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73948-7>.
- Rubol S., Freixa A., Sanchez-Vila X., Romaní A.M., 2018. Linking biofilm spatial structure to real-time microscopic oxygen decay imaging. *Biofouling*, 34(2):200-211. <https://doi.org/10.1080/08927014.2017.1423474>.
- Snegaroff J., 1977 Les résidus d'insecticides organochlorés dans les sols et les rivières de la région bananière de la Guadeloupe. *Phytiatrie-Phytopharmacie*, 26(4):251-268.
- US EPA, 1978. Kepone in the marine environment. Publications and pre-publications, Appendix C. U.S. Environmental Protection Agency, Sabine Island.

# Comment prendre en compte la vulnérabilité des populations antillaises ?

*Jacqueline Deloumeaux, Bernard Bhakkan-Mambir, Jonathan Macni, Jacqueline Véronique-Baudin, Clarisse Joachim, Danièle Luce, Jean-François Desprats, Anne-Lise Tailamé, Jean-Baptiste Charlier, Vincent Bonnal, Philippe Cattan, Pascal Degenne, Victor Dufleit, Jérémy Lavarenne, Lucie Lecat, Annelise Tran*

### ► Profil épidémiologique et contexte socio-économique de la population antillaise

Les Antilles françaises jouissent d'une situation singulière dans les Caraïbes. En tant que territoires français, la Martinique et la Guadeloupe sont classées parmi les pays à revenu élevé, alors que la plupart des autres États des Caraïbes sont des pays à revenu faible ou moyen. La population des Antilles françaises bénéficie des mêmes systèmes d'assurance maladie et de redistribution financière que la population française hexagonale. Si les Antilles françaises apparaissent comme une région privilégiée au sein des Caraïbes, la comparaison avec l'Hexagone est beaucoup moins favorable. Bien que le produit intérieur brut par habitant soit l'un des plus élevés des Caraïbes, il ne représente qu'environ 65 % de la moyenne nationale française. Par rapport à la moyenne nationale, la population des Antilles françaises se caractérise par un revenu médian plus faible, un niveau d'éducation plus bas et un taux de chômage plus élevé. Le contexte ethnogéographique et culturel des Antilles est cependant proche de celui de leurs voisins caribéens.

Cette situation unique se reflète dans les conditions de santé, avec pour la plupart une position intermédiaire entre la France hexagonale et les autres pays de la Caraïbe. Le cancer et les maladies cardiovasculaires sont les principales causes de décès aux Antilles, chacune de ces catégories représentant environ 25 % de l'ensemble des décès, avant la pandémie de Covid (Fouillet *et al.*, 2023). Les taux d'incidence du cancer sont globalement inférieurs à ceux de la France hexagonale, à l'exception des cancers de la prostate, de l'estomac et du col de l'utérus, mais supérieurs à ceux des autres pays de la Caraïbe pour la plupart des localisations cancéreuses (Deloumeaux *et al.*, 2022; Joachim *et al.*, 2020). Les taux de mortalité par maladies cardiovasculaires, bien que plus élevés qu'en France hexagonale, sont parmi les plus bas des Caraïbes (Paho, 2019). L'hypertension artérielle (Atallah *et al.*, 2019) et le diabète (Carrère *et al.*, 2018) sont également fréquents aux Antilles. La prévalence du syndrome métabolique qui associe un ensemble d'anomalies marqueurs de risque cardiovasculaire (obésité abdominale,

hypertension artérielle, taux élevé de triglycérides et bas de cholestérol) a été estimée à 18% en Guadeloupe et 28% en Martinique selon la définition du *Joint Interim Statement* (Colombet *et al.*, 2019). Dans l'Hexagone, l'étude nationale Nutrition Santé (ENNS) menée en France entre 2006 et 2007 l'évaluait à 21% selon la même définition (Vernay *et al.*, 2013).

Le tabagisme, la consommation d'alcool et l'obésité sont des facteurs de risque importants pour les maladies non transmissibles. Les consommations de tabac et d'alcool sont relativement faibles dans la population antillaise comparées à celles de l'Hexagone, alors que la prévalence de l'obésité est élevée, surtout chez les femmes (Auguste *et al.*, 2019).

De nombreuses études ont montré que ces facteurs de risque étaient répartis de manière inéquitable entre les différentes catégories sociales, mais leur distribution sociale varie toutefois en fonction du niveau de développement du pays et des indicateurs utilisés (Fleisher *et al.*, 2012; Allen *et al.*, 2017). En France hexagonale et dans d'autres pays développés, un statut socio-économique faible est généralement associé à une plus grande prévalence de ces facteurs de risque, tandis que dans les pays à revenu faible ou intermédiaire, c'est l'inverse qui est généralement observé (Sommer *et al.*, 2015). Aux Antilles françaises, ce sont les femmes de statut socio-économique élevé qui sont le plus souvent fumeuses, alors que le tabagisme n'est pas associé à la position sociale chez les hommes. En revanche, la consommation d'alcool chez les hommes et l'obésité chez les femmes sont plus fréquentes dans les catégories socialement défavorisées (Auguste *et al.*, 2019). La qualité de l'alimentation, évaluée par un score global, est moins bonne chez les bénéficiaires du revenu de solidarité active (RSA) et chez les personnes n'ayant jamais travaillé, que chez les sujets ayant un emploi et ne percevant pas d'aide sociale (Colombet *et al.*, 2019).

Cette distribution socialement inégalitaire des facteurs de risque peut partiellement expliquer les inégalités sociales de santé observées aux Antilles pour différentes maladies, inégalités qui varient aussi en fonction du genre.

L'hypertension artérielle (Atallah *et al.*, 2010) et le diabète (Carrère *et al.*, 2018) sont associés à un faible niveau d'études ou de revenus chez les femmes seulement. La prévalence de syndrome métabolique est doublée chez les personnes avec un faible niveau d'études ou bénéficiaires des minima sociaux, comparativement aux niveaux d'études élevés et aux non-bénéficiaires (Colombet *et al.*, 2019).

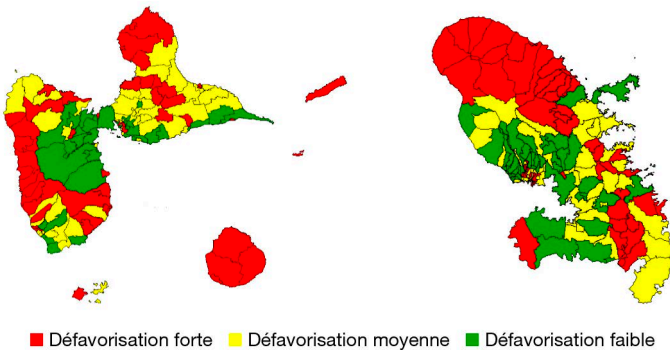
La participation au dépistage des cancers dépend également du statut socio-économique aux Antilles : le dépistage du cancer du col de l'utérus est plus fréquent chez les femmes occupant une profession qualifiée et plus faible chez les femmes n'ayant jamais travaillé. En revanche, les femmes de catégorie professionnelle élevée participent moins au dépistage du cancer colorectal. Par ailleurs, une participation plus élevée au dépistage du cancer du sein et du cancer colorectal (pour les hommes et les femmes) a été associée à la présence d'eau chaude au domicile (Menvielle *et al.*, 2018), un indicateur indirect de revenus aux Antilles.

Les inégalités sociales d'incidence des cancers présentent des particularités aux Antilles. Un faible niveau socio-économique de la zone de résidence est associé chez les hommes à une incidence élevée de cancer de la prostate, mais n'est pas associé à l'incidence des cancers respiratoires. Les femmes vivant dans les zones les plus

défavorisées ont une incidence plus élevée des cancers de l'estomac, du sein et du col de l'utérus, mais une incidence plus faible des cancers respiratoires (Luce *et al.*, 2017).

Ces derniers résultats sont basés sur un indice de défavorisation sociale, indice composite caractérisant le niveau socio-économique de la zone de résidence, combinant plusieurs variables et développé spécifiquement pour les Antilles. L'unité géographique qui constitue la première couche d'information pour les études sanitaires est l'îlot regroupé pour l'information statistique (Iris). Les Iris sont les plus petites unités spatiales statistiques, inférieures à l'échelon communal. Les communes d'au moins 10000 habitants et la plupart des communes de 5000 habitants sont découpées en Iris, zones démographiques homogènes. Apparues au recensement de 1999, les Iris ont une population généralement comprise entre 1 800 et 5 000 habitants. Chaque Iris a un type d'habitat relativement homogène, et les limites recouvrent préférentiellement les grandes rues et les coupures urbaines.

La Martinique et la Guadeloupe comptent respectivement 141 et 136 Iris. La figure 7.1 présente les Iris de Guadeloupe et Martinique en fonction de cet indice de défavorisation sociale.



**Figure 7.1.** Îlots regroupés pour l'information statistique (Iris) de Guadeloupe (à gauche) et de Martinique (à droite) selon le niveau de défavorisation sociale.

### ►► **Approches pour mettre en relation la contamination des sols et des données sanitaires : application aux données d'incidence des cancers**

Les approches utilisées pour obtenir des données de contamination des sols sont complexes et doivent prendre en compte de nombreux facteurs liés aux utilisations de produits phytosanitaires et aux modifications des pratiques agricoles au cours du temps, aux caractéristiques intrinsèques des sols ainsi qu'aux phénomènes climatiques sous les latitudes des Antilles. Nous présentons les deux approches développées respectivement en Martinique et en Guadeloupe pour estimer le niveau de contamination des sols ainsi que les résultats de leur utilisation dans des modèles statistiques appliqués aux données sanitaires. Les bases de données des registres des cancers de Guadeloupe et de Martinique permettent d'étudier sur une période suffisante et pour les cancers les plus fréquents d'éventuelles corrélations spatiales en tenant compte notamment du niveau socio-économique de la zone de résidence.

## Martinique : historique bananier et cartographie de la contamination des sols par la chlordécone

Dans cette approche, trois couches d'information géographique ont été retenues : la cartographie de contamination des sols par le chlordécone, la cartographie de l'historique bananier et les Iris.

### Cartographie des sols contaminés

En Martinique, de nombreuses analyses de sols ont été réalisées dans le cadre de différentes études, et la Daaf a lancé en 2009 un projet dans le cadre de l'Action 1 du Pnac, visant à intégrer dans un système d'information géographique (SIG) les analyses réalisées par différents acteurs : ARS, Daaf 972, chambre d'Agriculture 972, etc. dans le cadre de différents projets (Jafa, suivi agricole, etc.) permettant *in fine* une représentation cartographique de la pollution des sols par le chlordécone. La figure 7.2 représente cet état des lieux régional après la mise à jour réalisée en avril 2022 sur des données acquises entre 2003 et 2022 (Desprats, 2022).

Le SIG Chlordécone est une cartographie interactive de l'ensemble des analyses effectuées dans le sol de la Martinique. Il disposait en 2022 de 15 204 analyses associées à une parcelle (registre parcellaire graphique, cadastre ou contour GPS). Le rendu cartographique à l'échelle parcellaire consultable par le public<sup>20</sup> permet de visualiser les parcelles analysées avec leur teneur en chlordécone (en mg/kg), la classe de contamination et les restrictions de mise en culture correspondantes.

### Cartographie de l'historique bananier

Une deuxième couche d'information est la cartographie de l'historique bananier (figure 7.3). Pour réaliser cette couche d'information, les cartographies d'occupation du sol de 1970 et 1980 (Bureau des Sols Orstom [aujourd'hui IRD], échelle 1/20 000), et de 1992 (BD Topo IGN) ont été croisées (Bernoux *et al.*, 2004; Desprats *et al.*, 2004).

Les bananeraies représentaient 11 374 ha en 1970, 12 595 ha en 1980, et 8 778 ha en 1992. Ces trois dates permettent d'encadrer au mieux la période d'usage de la chlordécone, en l'absence d'autres cartographies de l'occupation du sol durant cette période.

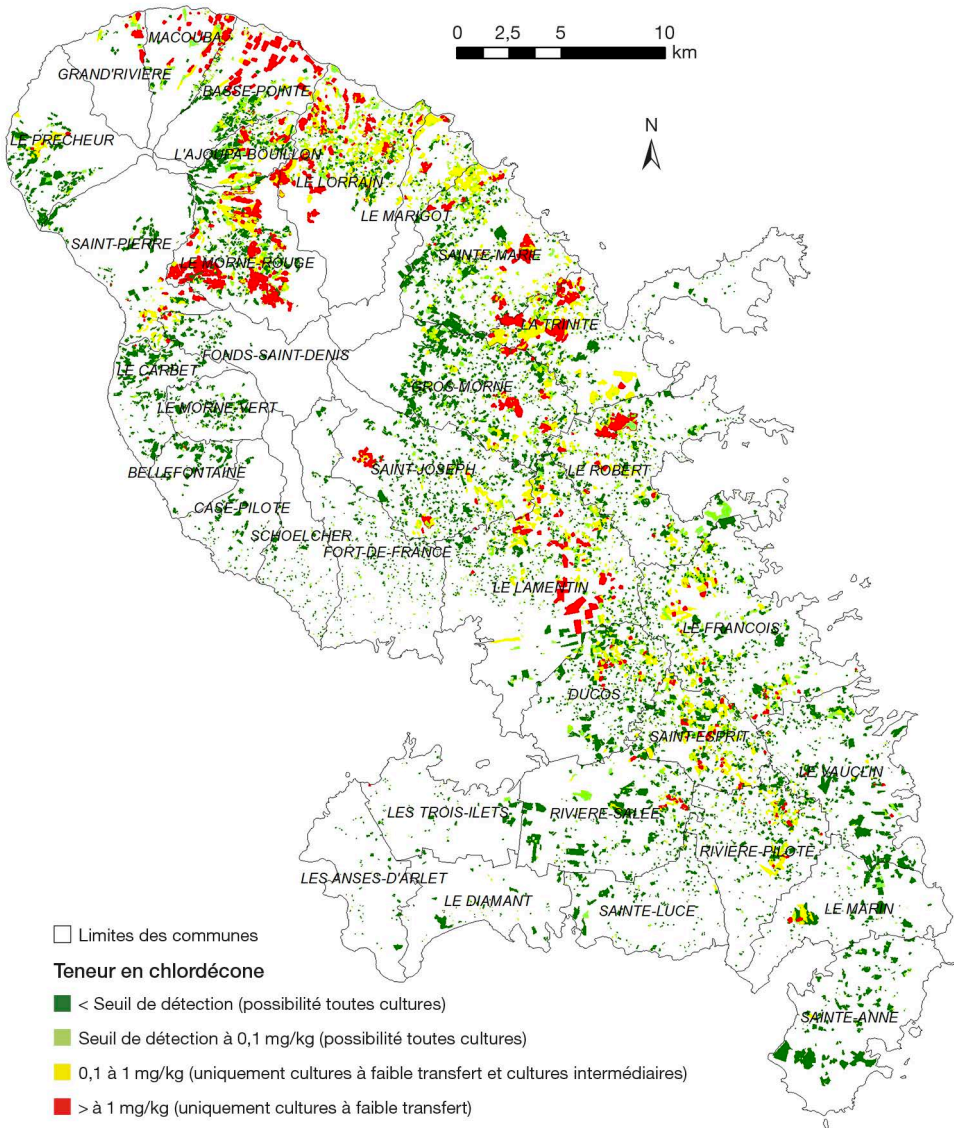
Le croisement de ces cartographies (sols contaminés et historique bananier) avec celle des Iris a permis la représentation en trois classes de l'historique bananier.

- Lorsque la culture bananière était présente aux trois dates, la durée de présence a été extrapolée à 23 ans (de 1970 à 1992); 3 412 hectares sont concernés.
- Lorsque les bananes étaient présentes à deux dates sur trois, l'extrapolation amène à 15 ans; 6 796 hectares sont concernés.
- Enfin, on retrouve 8 920 hectares ayant eu de la banane à seulement une de ces dates.

Au total, ce sont 19 129 hectares qui ont été cultivés en banane au moins une fois pendant cette période.

L'analyse combinée des Iris avec les analyses de sol a permis de hiérarchiser les Iris d'après le taux de contamination moyen des sols. Pour chaque Iris, les surfaces calculées sont classées en contamination forte, moyenne, faible et sans contamination,

20. [www.geomartinique.fr](http://www.geomartinique.fr).



**Figure 7.2.** Représentation parcellaire du niveau de contamination des sols par la chlordécone en Martinique (mise à jour septembre 2022; sources : Desprats, 2010, 2022).

en différenciant les zones sans historique et avec historique bananier. Un zonage des Iris en quatre classes a été réalisé sur la base des surfaces contaminées (figure 7.4) pour trois niveaux de chlordécone (chlordécone détectée, que ce soit en quantité faible — < 0,1 mg/kg de sol —, intermédiaire — de 0,1 à 1 mg/kg de sol —, ou forte — > 1 mg/kg de sol) :

- la classe 1 correspond à moins de 25 % de la surface analysée contaminée ;
- la classe 2 correspond à entre 25 et 50 % de la surface analysée contaminée ;
- la classe 3 correspond à entre 50 et 85 % de la surface analysée contaminée ;
- la classe 4 correspond à plus de 85 % de la surface analysée contaminée.

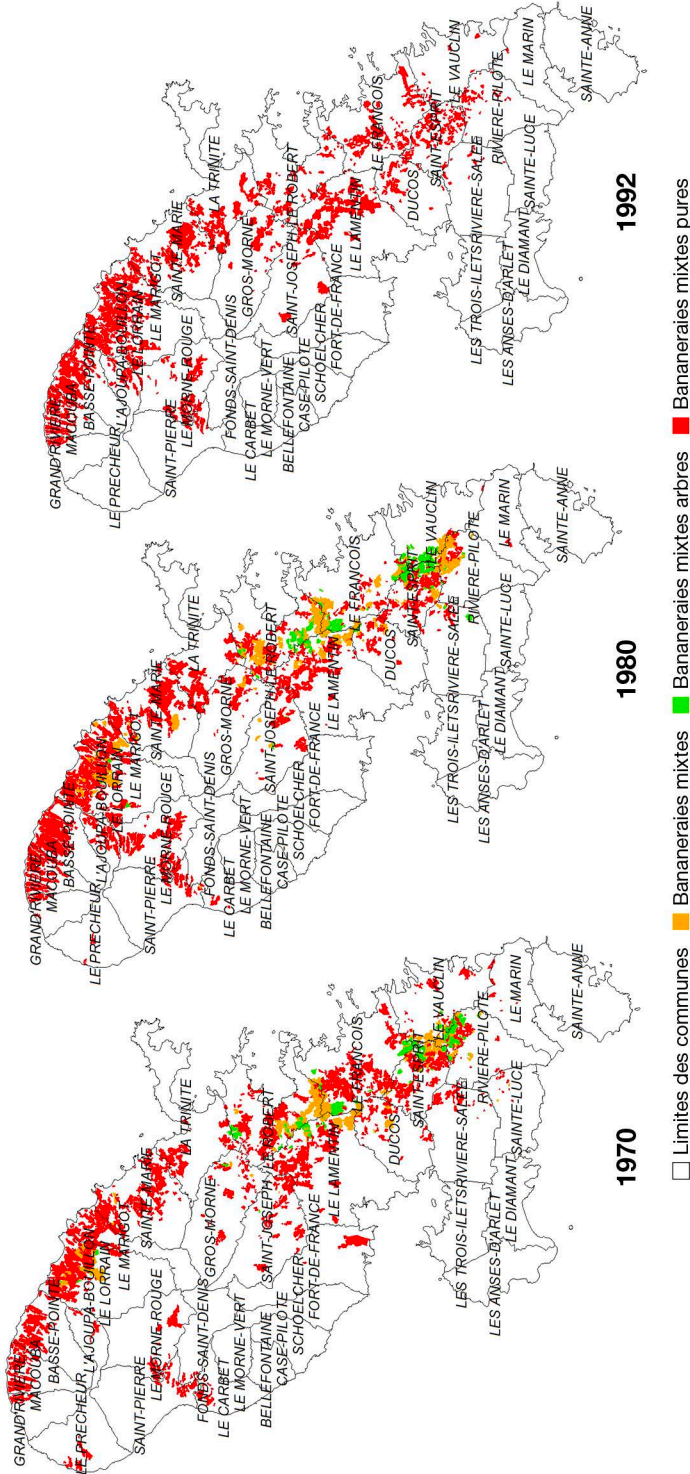
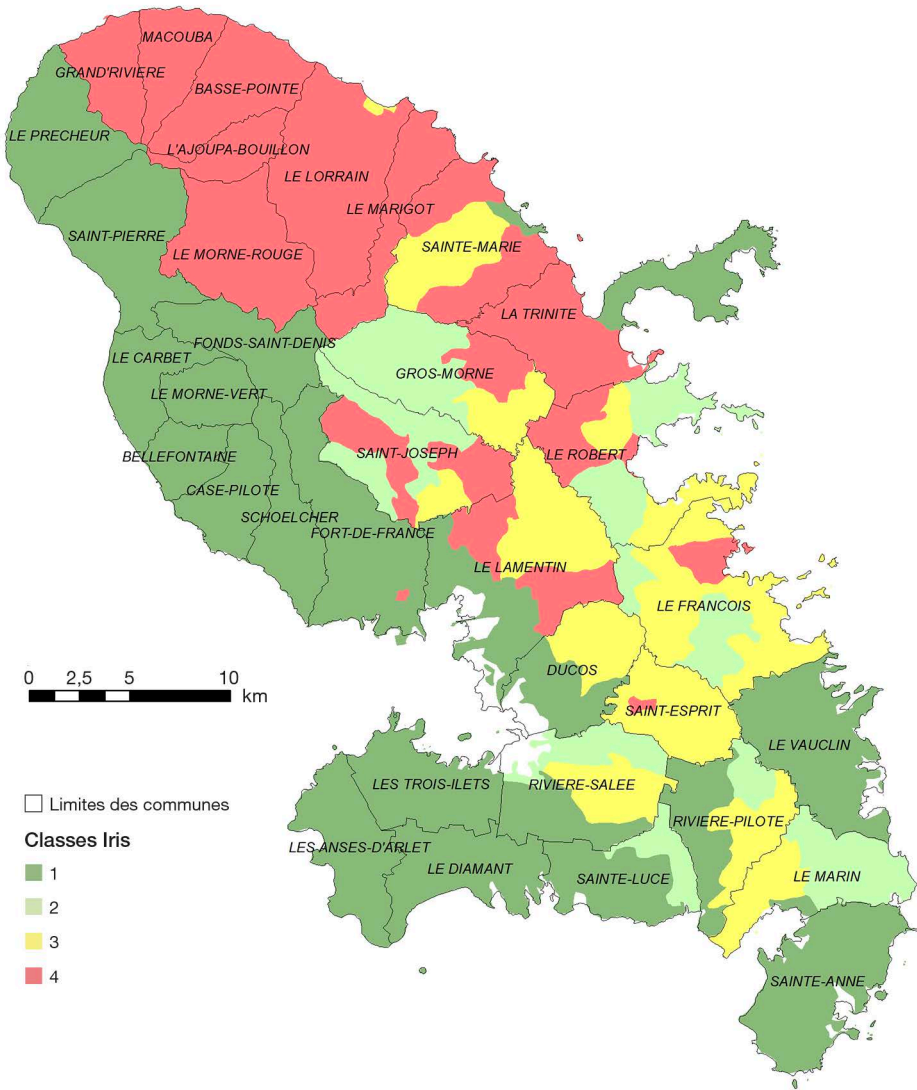


Figure 7.3. Historique bananier en 1970, 1980 et 1992.



**Figure 7.4.** Zonage des îlots regroupés pour l'information statistique selon le taux de contamination moyen des sols en Martinique.

Les Iris de classe 1 sont situés dans les communes du sud et de la côte caraïbe, où la culture bananière était inexistante ou secondaire pendant la période d'application du chlordécone. On retrouve aussi des Iris particuliers comme la presqu'île de la Caravelle, dépendant d'une commune à fort historique bananier, La Trinité, mais sur laquelle il n'y avait quasiment pas de plantations.

À l'inverse, les Iris de classe 4 sont situés dans des communes à fort historique bananier : le Nord et le Nord-Est atlantique, depuis les communes de Grand-Rivière jusqu'au Robert. Cette classe inclut aussi des Iris à fort historique à Morne-Rouge, à Saint-Joseph, ou au Lamentin.

Enfin, les Iris des autres communes se répartissent sans frontière géographique précise entre les classes 2 et 3, depuis la zone centrale de la Martinique jusqu'au Sud (Le Marin).

C'est donc sur ces quatre classes présentant une certaine homogénéité en matière d'historique bananier et de niveau de contamination (les deux éléments étant fortement corrélés) qu'ont été menées les analyses mesurant l'association entre exposition environnementale à la chlordécone dans la zone d'habitation et risque de survenue de cancer en Martinique.

## **Guadeloupe : l'apport de la modélisation pour prendre en compte les contaminations multiples sur le long terme**

Remonter le temps pour caractériser la contamination de l'environnement par les pesticides

Les données historiques sur les traitements phytosanitaires appliqués en agriculture sont rares ou inexistantes (Crouy-Chanel *et al.*, 2023), alors qu'elles seraient d'une aide significative pour estimer l'exposition environnementale et humaine aux pesticides sur plusieurs années, voire décennies. Pour reconstruire l'historique des utilisations et estimer ces expositions, plusieurs types de données doivent être collectées :

- des cartes d'occupation des sols, à l'échelle de la parcelle, qui constituent un premier indicateur des pratiques et donc de la pollution par les pesticides sur un territoire (Nuckols *et al.*, 2007; Leyk *et al.*, 2009), étant donné que le type de culture détermine en grande partie le type de pesticide utilisé;
- des matrices culture-exposition comme la base de données « Matphyto » développée en France par Santé publique France afin d'estimer l'exposition humaine aux différents pesticides à partir des types de cultures (Spinosi et Févotte, 2009);
- des données sur les caractéristiques des systèmes de culture (durée de culture, temps de jachère) et sur celles des pratiques de traitements pesticides (cible du traitement, dose, fréquence, pourcentage de la surface traitée de la parcelle), qui peuvent être estimées par des enquêtes effectuées auprès d'agriculteurs et de techniciens agricoles (Dufleit *et al.*, 2023).

Dans le cadre du projet Gessica (facteurs géographiques, environnementaux, socio-économiques associés au cancer en Guadeloupe<sup>21</sup>), toutes ces données ont pu être collectées pour la Guadeloupe (Dufleit *et al.*, 2023). Des cartes anciennes au format papier ont été numérisées et homogénéisées avec des données de recensement agricole plus récentes, de manière à constituer une base de données d'occupation du sol standardisée allant de 1970 à aujourd'hui, au pas de temps annuel à l'échelle parcellaire (figure 7.5). La base de données Matphyto, disponible seulement pour la culture de la banane, a été complétée par enquêtes auprès d'agriculteurs pour la canne à sucre et le maraîchage. De là, des itinéraires techniques phytopharmaceutiques ont été définis pour des systèmes culturels génériques associés à ces trois principaux types de culture. Ils sont caractérisés par des informations sur le système de culture et sur le calendrier des applications de pesticides, ainsi que leur évolution au cours du temps.

Toutes ces informations ont ensuite été intégrées dans le modèle Agri-STAMP (*spatial-temporal model of pesticide use in agriculture*), réalisant le calcul de dégradation,

21. <https://www.gessica.org/>.



**Figure 7.5.** Paysage agricole, Basse-Terre, prise de vue : mai 2023. Crédit : Vincent Bonnal, Cirad. Photo prise par drone à 56 m d'altitude sur Blonzac, lieu-dit situé sur la commune de Goyave en Guadeloupe qui dévoile un paysage agricole composé de différentes cultures (banane, igname, cocotiers, prairies, etc.) réparties sur un plateau et des versants.

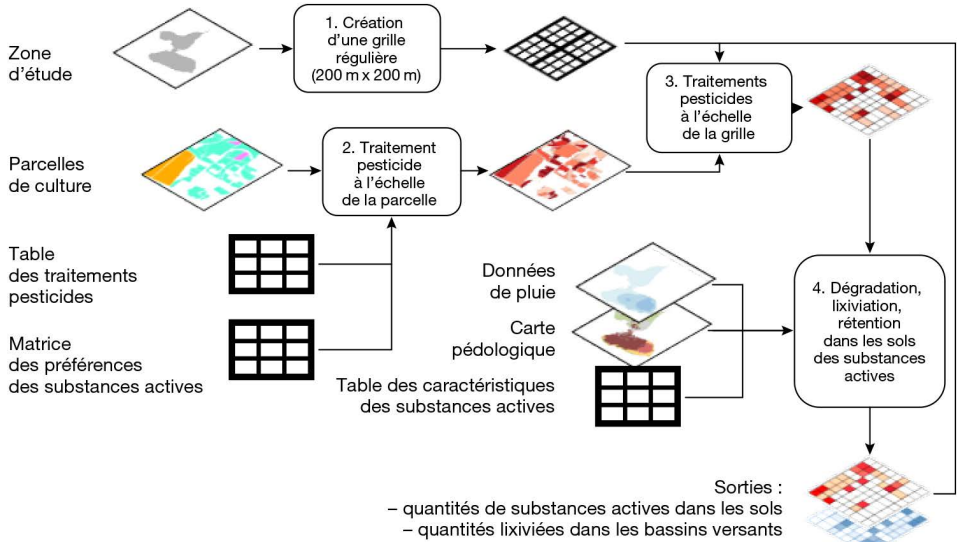
lixiviation et percolation des différentes substances actives dans les compartiments sol et eau. Ces valeurs agrégées spatialement constituent ainsi autant d'indicateurs de dispersion des pesticides dans l'environnement, notamment les quantités restant dans les sols et mobilisées dans les eaux.

### Agri-STAMP : un modèle spatialisé pour représenter l'utilisation et le devenir des pesticides sur le long terme à partir de données hétérogènes

Au-delà des données, l'enjeu logiciel apparaît important alors qu'il s'agit, au sein d'un espace géographique de dimensions conséquentes (ici, l'échelle départementale de la Guadeloupe, soit environ 1 600 km<sup>2</sup>), sur une période de temps en rapport avec l'impact évalué (une trentaine d'années pour les cancers), de mettre en correspondance des données hétérogènes pour évaluer un possible lien entre cocktail de pesticides utilisés sur la période, et données de santé humaine. Le modèle Agri-STAMP a été développé dans ce but sur la plate-forme Ocelet (Degenne et Lo Seen, 2016).

Agri-STAMP prend en compte de manière explicite les pratiques agricoles associées à un système cultural donné (localisation des cultures, durée des cultures dans l'assolement incluant les jachères), les choix techniques concernant l'utilisation des pesticides (type, fréquence, dose), les caractéristiques des substances actives utilisées (temps de demi-vie [DT 50], coefficient de partage sol/eau [Koc]) et les conditions de milieu (pluviométrie, teneur en matière organique et densité apparente des sols) (figure 7.6). Il permet de simuler, au fil des années et à pas de temps régulier (quotidien à décadaire, paramétrable pour accélérer les calculs), les traitements pesticides effectués et le devenir des substances actives dans le milieu (dégradation, lixiviation, rétention par le sol, qui sont les différents processus représentés par le modèle) après leur application. Les sorties sont des cartes d'indicateurs représentatifs des

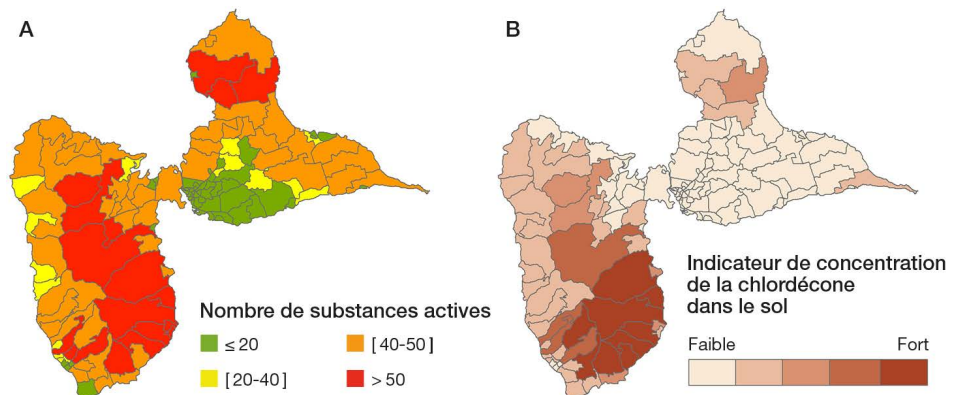
quantités de substances actives qui ont été apportées et qui ont été lixiviées ainsi que de celles qui persistent dans les sols, à plusieurs échelles d'agrégation spatiale : grille régulière de 200 m x 200 m, Iris, communes, ou bassins versants, mais aussi agrégations temporelles (quotidienne, décadaire, mensuelle, annuelle, cette dernière étant l'échelle couramment utilisée).



**Figure 7.6.** Fonctionnement simplifié du modèle Agri-STAMP, modèle spatiotemporel de l'utilisation et du devenir des pesticides dans les agrosystèmes en Guadeloupe.

Mise en évidence de l'hétérogénéité spatiale des contaminations des sols

En Guadeloupe de 1972 à 2014, selon les sorties obtenues par le modèle (figure 7.7), 56 substances actives pesticides ont été utilisées dans les systèmes de culture de la banane, de la canne à sucre et du maraîchage, et se répartissent différemment sur le



**Figure 7.7.** Cartes de sorties du modèle Agri-STAMP, par unité Iris. A : nombre de substances actives considérées dans l'analyse depuis les données d'entrée ; B : indicateur de concentration dans le sol de la chlordécone (d'après Tran *et al.*, 2025).

territoire en fonction de l'historique des cultures et des pratiques. Les cartes obtenues, comme celles pour le chlordécone, permettent de calculer des indices d'exposition (par exemple, quantité par hectare de substance active apportée, dégradée ou restante) à analyser comme facteurs explicatifs des variations géographiques observées dans l'incidence des cancers en Guadeloupe (Bhakkan-Mambir *et al.*, 2022; Luce *et al.*, 2017). L'outil Agri-STAMP peut également être utilisé comme objet intermédiaire, outil de discussion et d'orientation pour les décideurs, afin d'explorer les impacts potentiels de l'aménagement du territoire sur la santé, avec une approche prospective.

### Perspectives et limites du modèle Agri-STAMP

De façon originale, le modèle Agri-STAMP propose d'articuler des données historiques d'occupation du sol et de pratiques phytopharmaceutiques pour proposer des indicateurs de contamination de l'environnement (sol et eau) qui prennent en compte l'ensemble des molécules utilisées. Les difficultés sont relatives aux dimensions temporelle et spatiale embrassées par le modèle : difficulté à rendre compte de l'historique des traitements pour une culture donnée; difficulté à rendre compte de la spatialisation des systèmes cultureux généralement peu documentée. Le poids des orientations culturelles dans le choix des traitements pesticides en fait une variable-clé dont les atlas donnent une profondeur historique. Les perspectives portent sur l'utilisation du modèle dans des actions de prospective accompagnant l'évolution des pratiques de traitement.

### Relation entre indicateurs de pollution des sols et incidences des cancers

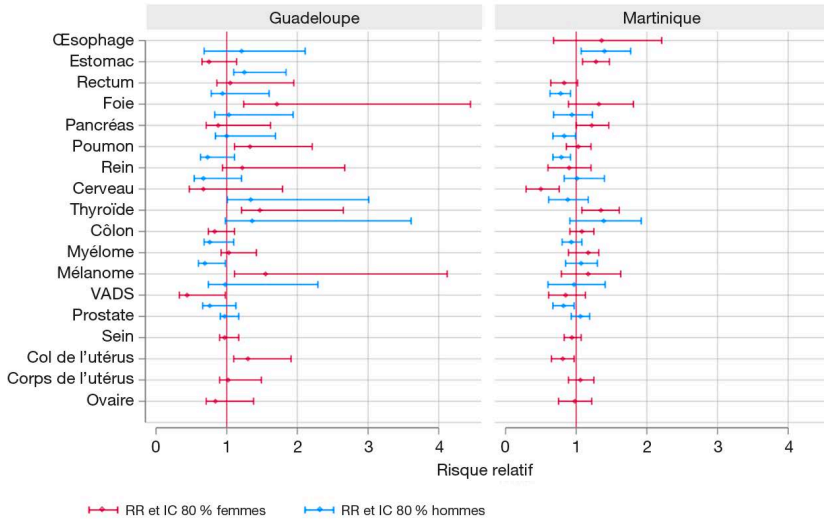
Les corrélations entre la cartographie des sols contaminés et la géolocalisation des cas de cancers ont été étudiées sur la période 2008-2017 en Guadeloupe et sur la période 2006-2019 en Martinique sur plus de 15 000 cas de cancers en Guadeloupe et plus de 21 000 cas en Martinique. L'indicateur de contamination des sols ramené à l'Iris de résidence comprenait trois classes en Guadeloupe et quatre classes en Martinique. Les analyses ont été réalisées à l'aide de modèles bayésiens et prennent en compte l'indice de défavorisation sociale comme facteur d'ajustement. En effet, la comparaison cartographique montre que certaines zones fortement contaminées par la chlordécone sont aussi des zones socialement défavorisées.

La figure 7.8 présente pour les principaux cancers le risque relatif (RR), comparant les zones fortement contaminées aux zones non contaminées. Un risque relatif supérieur à 1 indique une incidence plus élevée dans les zones contaminées, un risque relatif inférieur à 1, une incidence plus faible dans les zones contaminées.

Une augmentation du risque de certains cancers est observée dans les zones fortement contaminées, avec cependant des variations importantes selon le territoire et le sexe. Le risque de cancer de la thyroïde est plus élevé dans les zones les plus contaminées dans les deux régions, bien que l'augmentation de risque ne soit significative que chez les femmes.

Le cancer de l'œsophage présente un risque relatif élevé uniquement chez les hommes en Martinique. Pour le cancer de l'estomac, un risque relatif élevé est observé uniquement chez les femmes en Martinique et uniquement chez les hommes en Guadeloupe.

Aucune augmentation du risque de cancer de la prostate dans les zones fortement contaminées par le chlordécone n'a été observée dans les deux régions.



**Figure 7.8.** Risque relatif (RR) de cancer et intervalle de crédibilité (IC) des zones fortement contaminées par le chlordécone *versus* zones non contaminées par localisation cancéreuse et par sexe en Guadeloupe (2008-2017) et en Martinique (2006-2019).

VADS : voies aérodigestives supérieures.

L'interprétation de ces résultats rend compte de la difficulté de ces approches et de leurs limites. Dans l'ensemble, on observe peu de concordance des risques relatifs calculés dans chaque région et pour chaque sexe. Les méthodes de construction de l'indice de contamination des sols par la chlordécone en Guadeloupe et en Martinique diffèrent et ne permettent pas de superposer complètement les résultats. D'autres biais doivent être pris en compte, le premier étant le biais écologique lié à l'agrégation des données à un niveau géographique et qui ne permet pas d'extrapoler les résultats à l'échelle individuelle. Une autre limite importante est celle de l'adresse de résidence qui est recueillie au moment du diagnostic de cancer et ne tient pas compte des déménagements éventuels ni du temps de résidence qui pourrait faire varier le temps d'exposition aux facteurs de risque considérés. L'utilisation de l'Iris comme unité géographique est une autre limite, car la taille des Iris est très hétérogène, certains Iris pouvant couvrir des zones peu peuplées. Enfin, les autres facteurs de risque de cancer sont autant de facteurs de confusion à prendre en compte, mais non disponibles dans ces bases de données à visée de surveillance épidémiologique. Bien que l'utilisation de l'indice de défavorisation permette un contrôle partiel de certains modes de vie (tabac, alcool, alimentation) liés au niveau socio-économique, il ne permet toutefois pas d'exclure un biais de confusion résiduel.

Il est important de noter que la chlordécone ne représente qu'une partie des contaminants chimiques auxquels est exposée la population antillaise. L'outil Agri-STAMP du Cirad met en évidence en Guadeloupe certaines zones contaminées par plus de 50 substances actives. Cette multiexposition aux pesticides s'applique aussi au niveau

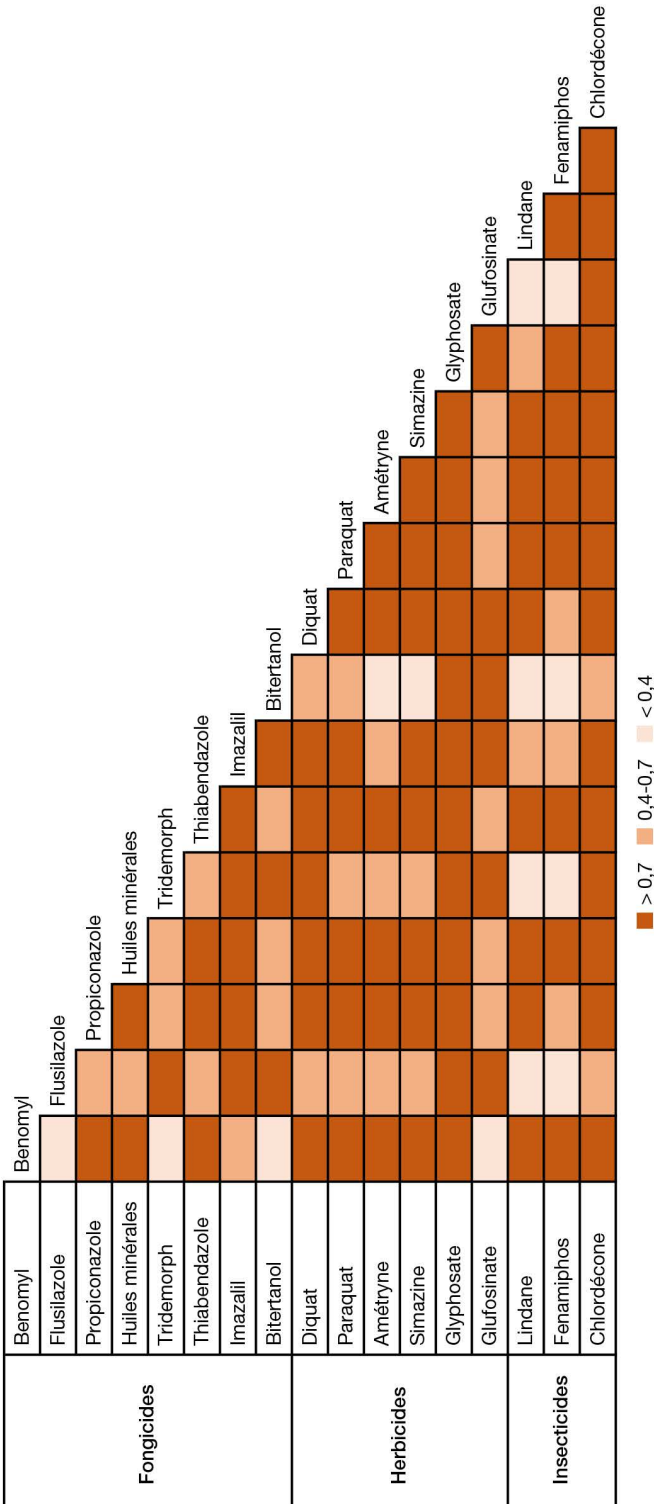


Figure 7.9. Coefficients de corrélation entre les indices d'exposition cumulée aux pesticides les plus utilisés sur la cohorte des travailleurs agricoles de la banane (source : CPSN, 2022).

individuel dans la population des travailleurs agricoles, qui est une population particulièrement exposée aux pesticides : elle cumule l'exposition environnementale de la population générale à des expositions professionnelles liées à leur contact étroit et répété avec les produits lors des applications en parcelle. Par exemple, les travailleurs de la banane en activité pendant la période d'utilisation du chlordécone ont été exposés à 40 autres pesticides, et ces expositions sont fortement corrélées (figure 7.9).

## ► Vers une approche intégrée de l'exposome antillais

La population antillaise est exposée à une multitude de facteurs : des agents chimiques, physiques ou biologiques, des facteurs environnementaux, des facteurs sociaux et psychosociaux ainsi que des facteurs liés au mode de vie. Ces expositions varient tout au long de la vie et interagissent entre elles. Différentes définitions de l'exposome ont été proposées depuis l'apparition du concept il y a une vingtaine d'années, par exemple celle proposée par l'Anses dans son rapport sur l'intégration de l'exposome dans ses activités (Anses, 2022) : « l'exposome correspond à la totalité des expositions néfastes comme bénéfiques à des agents chimiques, biologiques et physiques, en interaction avec le statut physiologique, le milieu de vie et le contexte psycho-social, que connaît un organisme vivant de sa conception jusqu'à la fin de sa vie, afin d'expliquer son état de santé ». Cette définition est adaptée à tout organisme vivant et intègre l'écosystème et les effets potentiellement bénéfiques des expositions.

Dans l'idéal, l'ensemble des composantes de l'exposome devrait être pris en compte dans l'évaluation des risques sanitaires associés à la chlordécone dans une démarche multidisciplinaire. En pratique, il est rare de disposer de l'ensemble des données nécessaires, souvent hétérogènes et de natures diverses. Par ailleurs, le niveau de complexité augmente avec le nombre de composantes à intégrer pour évaluer les expositions et leurs combinaisons. Si certaines études ont pris en compte plusieurs expositions chimiques (Emeville *et al.*, 2015), la plupart des travaux restent néanmoins limités à une composante de l'exposome. Une nouvelle dynamique semble cependant se dessiner dans le cadre de projets en cours au travers de l'étude des effets de mélanges de pesticides, de l'environnement social et de facteurs liés au mode de vie dans une approche intégrée.

## ► Références bibliographiques

Allen L., Williams J., Townsend N., Mikkelsen B., Roberts N. *et al.*, 2017. Socioeconomic status and non-communicable disease behavioural risk factors in low-income and lower-middle-income countries: a systematic review. *Lancet Glob Health*, 5(3):e277-e289. [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(17\)30058-X](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(17)30058-X).

Anses, 2022. Intégration de l'exposome dans les activités de l'Anses. Avis de l'Anses, rapport du conseil scientifique, 197 p. Disponible sur <https://www.anses.fr/fr/system/files/AUTRE2022METH0197Ra.pdf>.

Atallah A., Carrère P., Atallah V., Inamo J., 2019. Différences de prise en charge de l'HTA entre la métropole et les DOM-ROM. *Ann Cardiol. Angeiol.*, 68(4):260-263. <https://doi.org/10.1016/j.ancard.2019.07.003>.

Atallah A., Kelly-Irving M., Zouini N., Ruidavets J.B., Inamo J., Lang T., 2010. Controlling arterial hypertension in the French West Indies: a separate strategy for women? *Eur J Public Health*, 20(6):665-70. <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckp207>.

Auguste A., Dugas J., Menvielle G., Barul C., Richard J.B., Luce D., 2019. Social distribution of tobacco smoking, alcohol drinking and obesity in the French West Indies. *BMC Public Health*, 19(1):1424. <https://doi.org/10.1186/s12889-019-7802-1>.

Bernoux M., Blanchart E., Venkatapen C., Noronha N.C., Burac M. *et al.*, 2004. Évolution de l'occupation des sols en Martinique. *Cahiers du PRAM*.

Bhakkan-Mambir B., Deloumeaux J., Luce D., 2022. Geographical Variations of Cancer Incidence in Guadeloupe, French West Indies. *BMC Cancer*, 22(1):783. <https://doi.org/10.1186/s12885-022-09886-6>.

Carrère P., Fagour C., Sportouch D., Gane-Troplent F., Hélène-Pelage J. *et al.*, 2018. Diabetes mellitus and obesity in the French Caribbean: a special vulnerability for women? *Women Health*, 58(2):145-159. <https://doi.org/10.1080/03630242.2017.1282396>.

Colombet Z., Perignon M., Salanave B., Landais E., Martin-Prevel Y. *et al.*, 2019. Socioeconomic inequalities in metabolic syndrome in the French West Indies. *BMC Public Health*, 19(1):1620. <https://doi.org/10.1186/s12889-019-7970-z>.

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

Crouy-Chanel P. (de), Mancini M., Clavel J., Goujon S., Guldner L., 2023. Development of geographical information system for agricultural land mapping in metropolitan France and its application to estimate residential proximity to crops in the GEOCAP Agri Project. *Environnement, Risques & Santé*, 22(1):45-57. <https://doi.org/10.1684/ers.2023.1763>.

Degenne P., Lo Seen D., 2016. Ocelet: Simulating Processes of Landscape Changes Using Interaction Graphs. *SoftwareX*, 5:89-95. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2016.05.002>.

Deloumeaux J., Bhakkan-Mambir B., Desroziers L., Plenet J., Peruvien J. *et al.*, 2022. Urological Cancers in French Overseas Territories: A Population-Based Cancer Registry Pooled Analysis in Martinique, Guadeloupe and French Guiana (2007-2014). *J Epidemiol Glob Health*, 12(3):232-238. <https://doi.org/10.1007/s44197-022-00033-9>.

Desprats J.F., 2022. Cartographie de la contamination des sols par la chlordécone en Martinique — Mise à jour 2021. BRGM RP-72061-FR.

Desprats J.F., Bray X., Malon J.F., 2010. Conception et mise en place d'un SIG sur la contamination des sols de Guadeloupe et de Martinique par la chlordécone. Rapport final BRGM RP-59110-FR.

Desprats J.F., Comte J.P., 2004. Cartographie du risque de pollution des sols de Martinique par les organochlorés. Rapport Phase 3. BRGM RP-53262-FR.

Dufleit V., Tran A., Bonnal V., Lecat L., Degenne P., Cattan P., 2023. Cartographie des zones agricoles et des pratiques associées pour caractériser la pollution par les pesticides sur le long terme. *Environnement, Risques & Santé*, 22(1):64-72. <https://doi.org/10.1684/ers.2023.1762>.

Emeville E., Giusti A., Coumoul X., Thomé J.-P., Blanchet P., Multigner L., 2015. Associations of plasma concentrations of dichlorodiphenyldichloroethylene and polychlorinated biphenyls with prostate cancer: a case-control study in Guadeloupe (French West Indies). *Environ Health Perspect*, 123(4):317-323.

Fleischer N.L., Roux D.V.A., Hubbard A.E., 2012. Inequalities in body mass index and smoking behavior in 70 countries: evidence for a social transition in chronic disease risk. *Am J Epidemiol.*, 175(3):167-176. <https://doi.org/10.1093/aje/kwr314>.

Fouillet A., Ghosn W., Rivera C., Clanché F., Coudin É., 2023. Grandes causes de mortalité en France en 2021 et tendances récentes. *Bull. Épidémiol. Hebd.*, (26):554-569.

Joachim C., Véronique-Baudin J., Desroziers L., Chatignoux É., Belliard S. *et al.*, 2020. Gynaecological cancer in Caribbean women: data from the French population-based cancer registries of Martinique, Guadeloupe and French Guiana (2007-2014). *BMC Cancer*, 20(1):643. <https://doi.org/10.1186/s12885-020-07128-1>.

Leyk S., Binder C.R., Nuckols J.R., 2009. Spatial Modeling of Personalized Exposure Dynamics: The Case of Pesticide Use in Small-Scale Agricultural Production Landscapes of the Developing World. *International Journal of Health Geographics*, 8(1):17. <https://doi.org/10.1186/1476-072X-8-17>.

Luce D., Michel S., Dugas J., Bhakkan B., Menvielle G. *et al.*, 2017. Disparities in Cancer Incidence by Area-level Socioeconomic Status in the French West Indies. *Cancer Causes and Control*, 28(11):1305. <https://doi.org/10.1007/s10552-017-0946-3>.

- Menvielle G., Dugas J., Richard J.B., Luce D., 2018. Socioeconomic and healthcare use-related determinants of cervical, breast and colorectal cancer screening practice in the French West Indies. *Eur J Cancer Prev.*, 27(3):269-273. <https://doi.org/10.1097/CEJ.0000000000000329>.
- Nuckols J.R., Gunier R.B., Riggs P., Miller R., Reynolds P., Ward M.H., 2007. Linkage of the California Pesticide Use Reporting Database with Spatial Land Use Data for Exposure Assessment. *Environmental Health Perspectives*, 115(5):684.
- Paho, 2019. Non communicable diseases in the region of the Americas: facts and figures. Washington. 14 p. Disponible sur <http://iris.paho.org/xmlui/handle/123456789/51483>.
- Sommer I., Griebler U., Mahlknecht P., Thaler K., Bouskill K. *et al.*, 2015. Socioeconomic inequalities in non-communicable diseases and their risk factors: an overview of systematic reviews. *BMC Public Health*, 15:914.35.
- Spinosi J., Févotte J., 2009. Le programme Matphyto : matrices cultures-expositions aux produits phytosanitaires. Exemple de matrices cultures-expositions aux pesticides arsenicaux». Institut de veille sanitaire, Saint-Maurice, 6 p. Disponible sur <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/exposition-a-des-substances-chimiques/pesticides/documents/rapport-synthese/le-programme-matphyto-matrices-cultures-expositions-aux-produits-phytosanitaires.-exemple-de-matrices-cultures-expositions-aux-pesticides-arsenicaux>.
- Tran A., Dufleit V., Bonnal V., Degenne P., Lavarenne J. *et al.*, 2025. Agri-STAMP: A spatial model representing the use and fate of pesticides over the long term. *Science of The Total Environment*, 959:178225. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.178225>.
- Vernay M., Salanave B., De Peretti C., Druet C., Malon A. *et al.*, 2013. Metabolic syndrome and socioeconomic status in France: The French Nutrition and Health Survey (ENNS, 2006-2007). *International Journal of Public Health*, 58(6):855-864. <https://doi.org/10.1007/s00038-013-0501-2>.

## Chapitre 8

# Gestion de la pollution par le chlordécone aux Antilles françaises et risques associés : un problème épineux

*Valérie Angeon, Jean-Luc Volatier, Josselin Thuilliez*

La pollution par le chlordécone aux Antilles françaises et ses effets sur la santé des écosystèmes, des animaux et des humains constituent un exemple de contamination environnementale sans précédent historique en France. Il s'agit en effet d'une pollution de grande ampleur (diversité de milieux impactés), de long terme (persistance de la molécule) et délétère (toxicité de la molécule), faisant de ce problème un véritable enjeu sociétal. Pour autant, les modalités de gestion de cette pollution et des risques associés ont différé au cours du temps, à la fois en ce qui concerne les objets (écosystèmes ou denrées soumis à la réglementation), les cibles (indicateurs retenus) et l'implication d'acteurs (scientifiques pratiquant une « recherche confinée »<sup>22</sup> [Callon *et al.*, 2014] *versus* intégration d'autres catégories d'acteurs dans la production et la circulation des connaissances contribuant à la formation de communautés épistémiques [Meyer et Molyneux-Hodgson, 2011]). Les choix opérés ont régulièrement été soumis à débat, voire contestés dans des arènes diverses (scientifiques comme profanes) par une activité de médiatisation à différentes échelles (locale comme nationale) concourant à la mise en « problème public » (Sheppard, 2014) de cette pollution.

Nous avançons que la gestion de cette pollution et des risques associés relève d'une situation d'incertitude radicale qui n'offre pas de possibilité de prédiction des comportements économiques (Keynes, 1921, 1936 ; Simon, 1964, 1978). Les décisions à prendre imposent un « pari sur l'avenir », résultat de l'impossibilité de disposer aujourd'hui des informations nécessaires à la décision. Dans ce cas, la rationalité des agents est qualifiée de limitée ou procédurale (pour une mise en discussion de ces approches, voir Postel, 2008). Elle décrit leur capacité de délibération, c'est-à-dire de construction et de légitimation de leurs choix.

En posant que la problématique de gestion de la pollution par le chlordécone et des risques associés illustre une situation d'incertitude radicale, nous pointons que les processus de décision des agents sont contingents aux acteurs ou en interaction. Or, chacune des

---

22. Expression tirée de Callon *et al.* (2014). L'expression renvoie aux savoirs produits dans le monde scientifique et à leurs relations avec les acteurs de la société. Elle fait référence aux formes « d'organisation de la production des savoirs scientifiques selon laquelle le chercheur doit travailler en milieu confiné, pour éviter toutes les interférences qui entraveraient l'exactitude de la science, pour ensuite seulement [...] présenter des résultats au public » (Cardona *et al.*, 2018).

réactions de ces agents est imprévisible dans un cadre de pluralité humaine. Ainsi, face à un problème donné, nous postulons qu'il n'est pas possible de connaître avec certitude la manière dont les acteurs concernés vont se saisir du problème ni le traiter; autrement dit, comment est (sera) relevé le défi de gestion de la pollution par le chlordécone et des risques associés; en somme, selon quelles logiques de décision et d'action; au moyen de quels dispositifs; selon quels critères d'évaluation. En nous appuyant sur la littérature et sur les connaissances liées à notre expertise plurielle, ce chapitre montre que la gestion de la pollution par le chlordécone et des risques associés ainsi que les modalités d'évaluation des politiques publiques potentiellement mobilisables relèvent de problèmes «épineux» (Rittel et Webber, 1973; Andersson *et al.*, 2014) qui nécessitent que les acteurs concernés s'accordent à la fois sur la définition et les modalités de résolution des problèmes identifiés. Les problèmes épineux induisent fondamentalement un contexte d'incertitude radicale. Un tel cadre de raisonnement amène à considérer la décision et l'action comme relevant de processus d'exploration, de tâtonnement et d'erreur dans la mesure où les réponses ne présentent de caractère ni univoque ni définitif. Cette configuration, porteuse de conflits, contient en elle les ferments d'une crise. Dans le contexte du chlordécone aux Antilles, cette crise a bien éclaté.

Notre réflexion, structurée en trois volets, propose tout d'abord un point de littérature sur les problèmes épineux. Elle s'appuie ensuite sur l'analyse de divers documents sources (rapports, articles scientifiques, saisines, règlements, plans) liés à la gestion de la pollution par le chlordécone et des risques associés, qui expose dans une perspective critique les dispositifs d'action et d'évaluation mis en œuvre. Enfin, la troisième section discute l'applicabilité des méthodes d'évaluation des politiques publiques à la gestion du chlordécone.

## ►► La crise chlordécone : au-delà d'un problème complexe

Les spécificités de la crise chlordécone par rapport à d'autres problèmes environnementaux nous enjoignent à mobiliser la grille de lecture des problèmes épineux. Il s'agit de différencier les problèmes selon leur nature et les systèmes organisés pour leur gestion.

### Nature et caractérisation du problème généré par la pollution par le chlordécone et sa gestion

Comme souligné antérieurement, la pollution par le chlordécone est un problème environnemental inédit à plusieurs titres et ses modalités de gestion sont difficiles. Premièrement, sur le plan biophysique, les effets de la pollution se mesurent à grande échelle : une large partie des milieux terrestres et aquatiques de la Guadeloupe et de la Martinique sont concernés. Ainsi, bien que non discernables pour la plupart des acteurs du territoire, les impacts de la pollution ne sont pas circonscrits. Deuxièmement, les effets de cette pollution se diffusent (transferts d'un écosystème à un autre) et entrent en synergie avec d'autres contaminants. Il existe donc une multiplicité d'interdépendances causales qui augmentent la difficulté à décortiquer les composantes du problème et à identifier des pistes de solutions adéquates. Troisièmement, la crise chlordécone — comme pour d'autres problèmes environnementaux — rend compte d'une configuration au sein de laquelle les connaissances scientifiques demeurent incomplètes (il existe un certain nombre de domaines inexplorés) et, dans certains cas, non stabilisées (l'affinement continu des connaissances conduit à remettre en cause les anciennes).

Quatrièmement, cette crise est marquée par l'absence d'alertes épidémiologiques et de plans d'action. L'inexistence d'indicateurs et de données a ainsi contribué à obérer la compréhension du phénomène et à rendre laborieuse la mise en place de démarches d'évaluation. Enfin, cette pollution médiatisée dans l'espace public concourt à faire de la gestion du chlordécone et des risques associés une question socialement vive (Angeon et Fréguin-Gresh, 2023) dont s'emparent une pluralité d'acteurs. Cela induit des difficultés supplémentaires de prise de décision liées, d'une part, à la mise en cohérence des visions et des représentations des acteurs et, d'autre part, à leur coordination.

Fondamentalement, la sphère de la décision et de l'action échappe au seul acteur étatique et s'étend, sur fond de controverses scientifiques et de polémiques, à la société civile (Ferdinand, 2015). Cette dernière exprime son mécontentement quant au traitement de la crise et formule un ensemble de revendications, en faveur notamment d'une plus grande transparence sur les procédures et les choix décisionnels, d'une meilleure circulation de l'information (pour améliorer, par exemple, l'appropriation et la mise en pratique effective des consignes de réduction de l'exposition), et de principes de réparation. Ces revendications, au-delà du caractère anxiogène qu'elles reflètent de la crise, révèlent une défiance certaine dans les institutions.

La crise chlordécone est symptomatique d'une situation de pollution avérée dans un contexte où les procédures de décision et d'action mises en place doivent être régulièrement revisitées sous l'effet de l'évolution des connaissances acquises, mais aussi de la composition des groupes d'acteurs mobilisés. Dans la littérature, la contingence du cadre de décision explique le caractère erratique des solutions proposées et plaide en faveur d'une gestion moins techniciste des problèmes (Pressman et Wildavsky, 1973). Cela est en particulier vrai pour les problèmes épineux. Le cas précis de la gestion de la pollution par le chlordécone et des risques associés renvoie à un problème plus que complexe, multiacteurs et contingent.

## Une grille de lecture des problèmes et de leur modalité de gestion

En nous référant à la littérature (Rittel et Webber, 1973; Andersson et Törnberg, 2018; Head, 2022; Lönngrén et van Poeck, 2021), nous proposons une esquisse de définition des problèmes à propos desquels nous montrons que leurs modalités de résolution sont liées aux dynamiques d'acteurs impliqués<sup>23</sup>.

Éléments de définition : problèmes simples, compliqués, complexes, épineux

Un problème simple n'a qu'une seule cause et appelle une solution unilatérale. Cette solution est généralisable dans l'espace et dans le temps. La caractéristique des problèmes compliqués est leur causalité multiple, mais clairement identifiable et dénombrable. La démarche à observer pour résoudre de tels problèmes tient dans leur décomposition en sous-problèmes. Cela revient à isoler chaque cause afin d'y apporter une solution. Dans cette configuration comme dans la première, le problème de départ est circonscrit, n'entre pas en interaction avec des phénomènes qui lui sont extérieurs, et peut être aisément résolu suivant un raisonnement séquentiel et mécanique : définition du problème, recueil de données, analyse des données, proposition de solution, mise en œuvre de

23. Pour une mise en discussion de cette grille de lecture, voir Alford et Head (2017).

la solution. En revanche, un problème complexe se caractérise par plusieurs relations causales interdépendantes. Le processus de résolution d'un tel problème implique de saisir les relations entre le tout et ses parties. Si la définition d'un problème complexe peut faire consensus, il n'en est pas de même de son mode de résolution. Les solutions proposées dépendront de la manière dont le problème à traiter est formalisé, c'est-à-dire est interprété et défini. Enfin, un problème épineux fait l'objet d'interprétations continues à la fois du point de vue de sa définition et de ses procédures de résolution. Autrement dit, la définition et la résolution de tels problèmes sont contingentes au contexte dans lequel ils émergent. De tels problèmes ne peuvent donc être strictement circonscrits sans prendre en considération l'ensemble des éléments auxquels ils sont liés. Les représentations que s'en font les acteurs qui ont en charge sa résolution importent, ce qui rend ces problèmes difficilement objectivables. Par ailleurs, les problèmes de cette nature ne se prêtent pas à une décomposition en sous-problèmes. Le tableau 8.1 résume ce propos en proposant des exemples discutés ci-après.

**Tableau 8.1.** Une typologie des problèmes (source : d'après Snowden et Boone, 2007).

		Procédure de résolution du problème	
		Claire	Confuse
Définition du problème et appréciation de ses effets	Claire	<p><b>SIMPLE</b>            Définition consensuelle du problème            Prédicibilité des effets du problème            Linéarité du processus de résolution            Application de solutions généralisables  <i>Exemples : certains additifs alimentaires (colorants azoïques par exemple).</i>  <b>Domaine du connu</b></p>	<p><b>COMPLEXE</b>            Définition consensuelle du problème            Effets du problème non connus à l'avance            Procédures de résolution non définies à l'avance, mais adaptatives  <i>Exemples : plomb, amiante, dioxines incinérateurs (œufs), nitrites dans les charcuteries.</i>  <b>Domaine de l'inconnu</b></p>
	Confuse	<p><b>COMPLIQUÉ</b>            Définition consensuelle du problème            Effets du problème connus            Linéarité du processus de résolution            Standardisation des solutions proposées            Degré élevé de certitude des résultats  <i>Exemples : bisphénol A après une phase initiale de controverse correspondant à la catégorie complexe.</i>  <b>Domaine du connaissable</b></p>	<p><b>ÉPINEUX</b>            Mauvaise appréhension du problème            Absence de consensus à la fois sur la définition du problème et sur ses modes de résolution            Tâtonnement erreur  <i>Exemples : chlordécone, métabolites de pesticides dans l'eau</i>  <b>Domaine de l'inconnu désirable</b></p>

Si la nature des problèmes à traiter implique des divergences dans leur mode de résolution, elle soulève également des différenciations quant aux catégories d'acteurs impliqués et à leurs modalités de coordination.

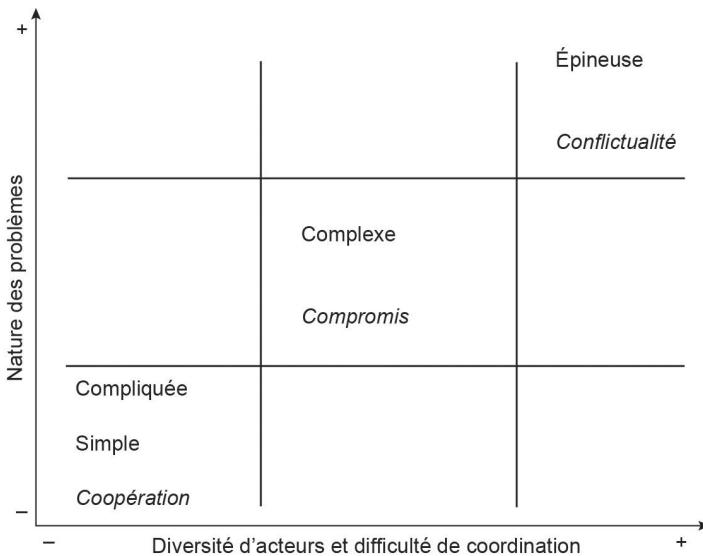
## Nature des problèmes, catégories d'acteurs impliqués et formes de coordination

Selon leur nature, les problèmes à traiter impliquent une plus ou moins forte diversité d'acteurs mobilisant des compétences et des connaissances plus ou moins spécifiques pour s'engager dans la résolution des problèmes (figure 8.1). Dans le cas des problèmes simples et compliqués, on note un faible nombre d'acteurs impliqués. Les connaissances et les compétences nécessaires pour résoudre le problème sont génériques et standards. Une codification des rapports sociaux selon un ordre hiérarchique établi permet d'exécuter les tâches de résolution du problème. Pour le traitement de tels problèmes, les agents s'engagent généralement dans des relations de coopération. Les exemples des additifs alimentaires (colorants azoïques interdits au niveau européen par l'Autorité européenne de Sécurité Sanitaire des Aliments [Efsa] après alerte des scientifiques) et du bisphénol A (évaluation européenne négative après une phase de controverse entre agences) illustrent respectivement les deux premières catégories de problèmes (simples, compliqués). En effet, dans le cas des colorants azoïques, un consensus scientifique est posé sur leur impact sanitaire négatif avéré, notamment pour les enfants. Elle a débouché sur une prise de décision claire : l'interdiction de l'usage de ces substances. Cette position portée par l'OMS et l'Efsa est partagée et déclinée dans les réglementations nationales et supranationales des différents pays. S'agissant du bisphénol A, reconnu comme perturbateur endocrinien, le caractère dangereux de la molécule est connu, et ses effets sont prévisibles. La véritable question soulevée n'est pas tant la dangerosité de la substance dans l'absolu en raison de son caractère de perturbateur endocrinien, mais le risque lié à l'exposition des individus. En France, l'Anses a proposé d'interdire la substance et a été suivie par le gouvernement français, la mesure a ensuite été entérinée par l'Efsa. Une réponse technocratique a donc été proposée pour solutionner le problème posé.

Pour ce qui concerne les problèmes complexes, le recours à l'expertise et la mobilisation de connaissances scientifiques sont requis. Aussi divers que soient les acteurs, ils sont reconnus comme détenant des niveaux d'information et de connaissances utiles, dont l'articulation est susceptible de déboucher sur une solution acceptable. Ce primat et cette reconnaissance de la place de l'expert et de sa légitimité placent les parties prenantes sur la voie de la négociation et du compromis. Les exemples du plomb, de l'amiante, des nitrites dans les charcuteries et des dioxines nous semblent relever de cette catégorie de problèmes. Ces substances sont rémanentes, diffuses, non circonscrites et coûteuses à éliminer. Le cas récent de la contamination avérée des œufs de poules élevées en plein air par les dioxines en Île-de-France élargit le périmètre de décision et d'action. La simple solution technique d'interdire les dioxines n'est pas possible. L'agence régionale de santé francilienne émet alors des recommandations de consommation qui reposent sur la responsabilité des consommateurs (normes de consommation, choix d'aliments adaptés aux besoins des poules, diversité des sources d'approvisionnement) visant à réduire le risque de surexposition aux polluants.

Les problèmes épineux sont caractérisés par une grande diversité d'acteurs dont, d'une part, les valeurs et représentations diffèrent — voire divergent — et, d'autre part, les niveaux de connaissances et de savoirs varient. Si dans la configuration précédente, un principe d'équivalence régit les rapports entre acteurs, les problèmes épineux confrontent davantage les acteurs. La légitimité des savoirs, la place et le rôle de

l'expertise scientifique sont discutés. La littérature considère comme inhérent à ces problèmes le fait qu'ils soient mal définis, sujets à évolution ou contestation, reposant sur un socle insuffisant de connaissances (Alford et Head, 2017) rendant inapplicables les solutions proposées. C'est, à notre sens, le cas du chlordécone abordé et traité originellement par le seul prisme biophysique. Ainsi, les contours du problème sont insuffisamment cernés : le problème reste défini en termes biophysiques et non sanitaires (pas d'alerte épidémiologique sur les humains). Par la suite, d'autres divergences scientifiques se feront jour notamment sur le plan sanitaire : absence de définition commune sur les limites de la chlordéconémie (abordée dans la suite du chapitre), mais aussi des métabolites de pesticides autorisés dans l'eau de consommation courante (c'est-à-dire absence d'accord sur la notion de métabolite pertinent). Sur ces problèmes, le consensus scientifique n'émerge pas, alors même que leur rémanence rend socialement vive leur gestion.



**Figure 8.1.** Des modalités de résolution des problèmes contingente (source : d'après Alford et Head, 2017).

Dans la suite du chapitre, nous analysons de manière pragmatique les mesures mises en œuvre, en soulignant à la fois les éléments de contexte scientifique (c'est-à-dire les montées thématiques) et l'émergence de nouveaux acteurs avec notamment la création de groupes (Grephe et Grepp en 2001, respectivement en Martinique et en Guadeloupe) et d'agences (Afssa en 1999, Anses et ARS en 2010), témoignant de la volonté de gérer localement la crise chlordécone.

## » La crise chlordécone : une construction sociale des problèmes et de leurs voies de résolution

Pour cette lecture rétrospective de la crise chlordécone, nous reprenons le phasage et la terminologie de Joly (2010) que nous actualisons et complétons sur la base de nos connaissances jusqu'à 2023. Nous distinguons, suivant la chronologie des événements,

quatre périodes où à la fois les niveaux de connaissances et les acteurs impliqués dans la sphère de la décision et de l'action ont évolué, et avec eux les dispositifs de gestion et d'évaluation de la crise chlordécone.

## **De 1968 à 1999 : un « problème confiné » au monde de l'environnement et de l'agriculture**

Avant 1999, les travaux menés sur la pollution par le chlordécone sont produits par la sphère académique. C'est dans le domaine de l'écotoxicologie que s'incrémente la connaissance. L'article scientifique de Snegaroff (1977) constitue une référence à partir de laquelle des résultats robustes sont présentés. Après cet article, l'alerte porte sur les organochlorés en général (dont le lindane et le chlordécone) et en vise principalement des conséquences écotoxicologiques. Les données de contamination environnementale sont rares et ne permettent pas une interprétation sanitaire en matière d'évaluation de risque pour le consommateur ou pour les travailleurs agricoles. La question des conséquences sanitaires de l'utilisation de chlordécone aux Antilles n'a pas émergé comme un problème majeur du domaine de la santé environnementale. Ainsi, les épreuves concernant le chlordécone ne sortent pas du monde scientifique et restent rattachées aux domaines de l'environnement et de l'agriculture.

## **De 1999 à 2008 : le chlordécone en « régime de crise »**

La seconde et dernière période étudiée par Joly (2010) est marquée par la prise en charge nationale, puis la politisation du débat public de 2005 à 2007. La prise de position alarmiste du professeur Belpomme sur la recrudescence des cancers du sein et de la prostate aux Antilles françaises a induit une médiatisation à l'échelle nationale de la pollution. Le « scandale Belpomme » est aussi celui par lequel des résultats scientifiques sont portés à la connaissance du grand public (le savoir scientifique se déconfiné) ouvrant la voie à des controverses scientifiques et entraînant des réactions socialement vives.

### **De la construction de données (1999-2005)...**

Durant cette période, l'action publique n'est pas organisée autour d'un plan d'action national, spécifique, le premier plan chlordécone commençant en 2008. Le lanceur d'alerte Éric Godard joue un rôle majeur, son action étant orientée par son point de vue d'agent de l'ARS Martinique. Il contribue à l'émergence de la thématique chlordécone en tant que problème de santé publique. L'action est coordonnée localement par le Grephy (Martinique) et le Grepp (Guadeloupe), créés en 2001 par arrêtés préfectoraux et dont le périmètre est beaucoup plus large (ensemble des produits phytopharmaceutiques). L'encadré 8.1 récapitule les premiers rapports élaborés ayant contribué à l'émergence de l'identification collective du risque chlordécone.

Les premières actions de gestion sont difficiles à justifier en l'absence d'une évaluation de risques et de réglementation spécifique pour les aliments. Ces fortes incertitudes sont soulignées par la première mission d'inspection sur les actions menées, réalisée en 2005.

S'appuyant sur les données des ARS sur la contamination de l'eau, de premières actions visent à réduire cette pollution par l'utilisation de charbon actif et ainsi de

rendre les concentrations de chlordécone dans l'eau conformes à la limite réglementaire (0,1 µg/l) commune à tous les produits phytopharmaceutiques, que ceux-ci soient encore autorisés ou interdits.

Des analyses de sols sont mises en œuvre par arrêté préfectoral en Martinique comme en Guadeloupe, mais se heurtent à la difficulté d'interpréter les résultats obtenus autrement que par la notification de la présence ou de l'absence de chlordécone. Il n'existe pas de limite réglementaire. Il en va de même pour les aliments analysés : légumes racines comme les dachines, les ignames ou les patates douces, les oignons ou les poireaux.

La pêche est interdite dans l'estuaire de la Lézarde en Martinique en application du principe de précaution.

Plusieurs actions de recherche épidémiologique sont lancées en Guadeloupe, notamment sur le développement de l'enfant (étude Timoun) et le cancer de la prostate (étude Karuprostate).

### **Encadré 8.1. Premiers rapports pour l'émergence de l'identification collective du risque au niveau local et national**

1999 : rapport commandité par les directions régionales de la santé et du développement social (DSDS) sur la contamination de l'eau, lanceur d'alerte Éric Godard.

2002 : rapport DSDS Bellec-Godard sur la contamination des légumes racines, première évaluation de risques préoccupante par scénario.

Godard E., Bellec S., 2002. Contamination par les produits phytosanitaires organochlorés en Martinique. Caractérisation de l'exposition des populations. État des lieux, proposition d'axes d'intervention, DSDS.

2002 : rapport de l'Ifremer sur les pesticides en milieu littoral.

Ifremer, 2002. Bilan ponctuel de la présence et des effets des pesticides en milieu littoral martiniquais en 2002.

2002 : premier plan d'action présenté au Grephy.

L'ensemble de ces travaux a permis de consolider les informations disponibles et d'augmenter le niveau de connaissances, rendant possibles les premières évaluations de risque. Il s'agit là d'évaluations sanitaires classiques s'organisant autour de séries d'indicateurs de contamination de l'environnement et d'exposition alimentaire, de risque toxicologique (seuils, par exemple) et de santé humaine ou d'environnement. Ces mesures d'évaluation marquent la seconde phase de cette période.

... aux premières évaluations de risque (2005-2007)

Les premières évaluations de risque sont menées pour l'humain en 2005, avec des propositions de limites maximales de résidus provisoires permettant de lancer des plans de contrôle des aliments produits localement et de les interpréter. Il faut noter que le délai nécessaire à la réalisation des premières évaluations de risque est lié à l'absence de données de consommation alimentaire individuelle aux Antilles.

En 2007, l'étude Calbas réalisée en Guadeloupe en 2005 et l'étude Escal en Martinique ainsi que les enquêtes Reso sur la contamination des aliments réalisée sur les deux îles

en 2005 et 2007 ont permis de proposer une actualisation des limites maximales provisoires (LMp) et des recommandations de consommation tout en précisant les niveaux de contamination des aliments et d'exposition des Antillais. Il est démontré que les LMR ne peuvent pas suffire à protéger les consommateurs en raison de la forte contribution des denrées autoconsommées à l'exposition (jardins familiaux, pêche de loisir). Des recommandations de limitation de la consommation de ces aliments autoproduits sont proposées.

En parallèle, les premières cartographies des risques de pollution des sols en fonction de l'historique des cultures bananières sont produites afin d'orienter la gestion des productions agricoles.

Les premières évaluations de risque sanitaire sont défavorables, les seuils toxicologiques étant dépassés par une partie de la population, notamment celle qui consomme de façon régulière des aliments produits localement. Ces constats entraînent de nouvelles mesures de gestion et le lancement du plan chlordécone I.

Ces évaluations de risque impliquent la mise en place d'une réglementation au niveau européen en 2008 limitant les concentrations de chlordécone :

- 20 µg/kg pour les denrées cultivables sous climat tropical ou tempéré (agrumes, fruits tropicaux, tous les légumes, maïs, canne à sucre, etc.);
- 10 µg/kg pour certains produits spécifiques aux régions de climat tempéré ou susceptibles d'être importés de pays autres que les Antilles (blé, riz, pommes, poires et fruits à noyau, betterave sucrière, etc.);
- 20 µg/kg pour les denrées alimentaires d'origine animale qu'elles soient d'origine terrestre ou aquatique et quelle que soit leur provenance géographique.

L'identification des productions des jardins familiaux comme source d'exposition entraîne le lancement par les ARS du programme de sensibilisation et conseil Jafa en 2007. Des recommandations de limitation des consommations de ces produits dans les jardins contaminés sont diffusées.

L'encadré 8.2 rend compte de la chronologie des événements par l'identification de rapports d'évaluation clés.

## **De 2008 à 2016 : lancement des plans chlordécone I (2008-2010), II (2011-2013) et III (2014-2020)**

La visite aux Antilles du professeur Belpomme et le lancement de nouvelles alertes sanitaires dans le débat public en 2007 encouragent le lancement d'un premier plan d'action spécifique sur le chlordécone en 2008. Ces alertes sont d'autant plus entendues que les premières évaluations de risque pour les consommateurs sont défavorables, une partie de la population dépassant les valeurs toxicologiques de référence.

En 2010, une première publication de Luc Multigner et ses collaborateurs sur le chlordécone et le cancer de la prostate montre une association positive par une étude cas-témoin (encadré 8.3). Suivent plusieurs publications de la cohorte Timoun sur le développement de l'enfant. Il faut noter que ces travaux épidémiologiques avaient été lancés avant 2005, mais le délai inhérent aux études épidémiologiques et notamment le délai entre la mesure des expositions et les effets sanitaires attendus expliquent cette temporalité.

### **Encadré 8.2. Rapports d'évaluation de risque ou sur la contamination des milieux et des aliments**

2003 : avis de l'INVS et de l'Afssa sur les valeurs toxicologiques de référence (deux avis indépendants l'un de l'autre, mais convergents).

Afssa, 2003. Avis de l'Afssa relatif à l'évaluation des risques liés à la consommation de denrées alimentaires contaminées par le chlordécone en Martinique et en Guadeloupe, 8 p.

Desprats J.F., Comte J.P., Perian G., 2003. Cartographie du risque de pollution des sols de Martinique par les organochlorés. Rapport de phase 2. BRGM RP-52257-FR. FAO/OMS.

Afssa, 2005. Première évaluation de l'exposition alimentaire de la population martiniquaise au chlordécone. Propositions de limites maximales provisoires de contamination dans les principaux aliments vecteurs. 40 p.

Inspection interministérielle, 2005. Évaluation des actions menées en rapport avec la présence de chlordécone et autres pesticides organochlorés en Guadeloupe et en Martinique.

2007 : Afssa. Actualisation de l'exposition alimentaire au chlordécone de la population antillaise. Évaluation de l'impact de mesures de maîtrise des risques.

Règlement (UE) n°149/2008 de la Commission du 29 janvier modifiant le règlement (CE) n° 396/2005 du Parlement européen et du Conseil en ce qui concerne ses annexes II, III et IV relatives aux limites maximales applicables aux résidus de pesticides présents dans ou sur certains produits.

Une campagne de surveillance des produits de la pêche est lancée en 2008 et conduit les préfets de Martinique et de Guadeloupe à suspendre, par arrêtés des 22 et 23 septembre 2009, la pêche et la commercialisation de certaines espèces de poissons et crustacés issues de certaines zones maritimes. L'Afssa recommande de renforcer la surveillance et maintient la recommandation de limiter la consommation de produits de la pêche à un jour sur deux. Les résultats de l'évaluation de ces données ont été pris en compte dans l'avis de l'Afssa, *Avis de l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments relatif à l'interprétation des résultats de la campagne 2008 de surveillance du chlordécone dans les produits de la pêche*, datant de janvier 2010 (encadré 8.3).

### **Encadré 8.3. Rapports et publications conduisant à renforcer les mesures de gestion 2008-2016**

Multigner L., Ndong J.R., Giusti A., Romana M., Delacroix-Maillard H. *et al.*, 2010. Chlordécone exposure and risk of prostate cancer. *Clin Oncol.* 28(21):3457-62. <https://doi.org/10.1200/JCO.2009.27.2153>.

Afssa, 2010. Avis de l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments relatif à l'interprétation des résultats de la campagne 2008 de surveillance du chlordécone dans les produits de la pêche. 49 p.

Inserm, 2013. Pesticides : effets sur la santé. Expertise collective Inserm.

Multigner L., Kadhel P., Rouget F., Blanchet P., Cordier S., 2016. Chlordécone exposure and adverse effects in French West Indies populations. *Environ Sci Pollut Res Int.*, 23(1):3-8. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4621-5>.

En 2013, l'expertise collective Inserm conclut à une présomption forte d'un lien causal entre exposition de la population générale au chlordécone et cancer de la prostate, en s'appuyant notamment sur l'association positive entre concentrations plasmatiques de chlordécone aux Antilles de manière dose-dépendante et risque augmenté de survenue du cancer de la prostate<sup>24</sup>.

## De 2017 à 2023 : nouvelles études d'exposition et développement de la chlordéconémie comme outil de gestion du risque

En 2017, l'étude d'exposition Kannari de Santé publique France et de l'Anses montre que les expositions alimentaires dépassent encore, pour une partie de la population antillaise, les valeurs toxicologiques de référence en raison principalement du non-suivi des recommandations de limitation de la consommation d'aliments autoconsommés, notamment des produits de la pêche (encadré 8.4). La contribution des légumes racines autoproduits à l'exposition a cependant baissé avec leur niveau moyen de contamination.

Les résultats de l'étude Kannari montrent que l'imprégnation biologique par le chlordécone généralisée est contrastée chez les participants de l'étude. Les niveaux d'imprégnation mesurés semblent montrer une diminution du bruit de fond de l'exposition au cours des dix dernières années, mais des sous-groupes de population restent très exposés. Les niveaux d'imprégnation de la population sont comparables entre les deux îles. Ils sont notamment déterminés par l'exposition alimentaire, mais aussi par le lieu de résidence. La consommation de poissons frais en provenance de circuits informels est associée à une imprégnation plus élevée.

Une controverse se développe en janvier 2018 sur l'évolution des limites réglementaires LMR sur les produits animaux terrestres. Le lanceur d'alerte et les associations dénoncent une augmentation de ces LMR en conséquence de l'insertion d'une note de bas de page dans le règlement européen sur l'expression des limites par kilogramme de poids frais ou par gramme de matières grasses. Bien que la Commission européenne démente cette évolution, de nouvelles LMR sont proposées au niveau national. Elles conduisent à un alignement sur la LMR nationale pour les produits de la mer.

Ce n'est que fin 2018 qu'a lieu un colloque scientifique sur le chlordécone ouvert au public, suivi d'ateliers avec les parties prenantes, qui permet de mieux partager l'état des connaissances scientifiques et des incertitudes.

La nécessité d'interpréter les données de chlordéconémie du point de vue sanitaire conduit l'Anses à proposer une valeur sanitaire de référence interne prenant en compte l'ensemble des effets sanitaires connus y compris le caractère de perturbateur endocrinien du chlordécone (encadré 8.4).

La valeur sanitaire de référence est divisée par trois en raison de la prise en compte des effets de perturbation endocrinienne. Il en résulte que malgré une baisse des expositions, celles-ci dépassent toujours les valeurs sanitaires de référence pour une partie de la population.

Les ARS lancent dans le cadre du plan chlordécone IV des campagnes de mesure des chlordéconémies pour les populations souhaitant y participer et des conseils pour réduire ces chlordéconémies quand celles-ci s'avèrent trop élevées.

---

24. Les travaux de Multigner (2022) montrent que la part de cas de cancer de la prostate aux Antilles attribuable au chlordécone est de 5 à 10 %.

#### **Encadré 8.4. Nouvelles évaluations de risque et émergence de la chlordéconémie comme outil de suivi et de gestion des expositions humaines**

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

Santé publique France, 2018. Imprégnation de la population antillaise par le chlordécone et certains composés organochlorés en 2013-2014 : Étude Kannari.

Anses, 2022. Avis relatif à la réévaluation des risques sanitaires prenant en compte la construction et la mise à jour de valeurs sanitaires de référence (externe et interne) du chlordécone.

La mise en perspective des différentes mesures de gestion de la crise chlordécone montre l'intégration tardive d'enjeux de santé, un manque d'évaluation des dispositifs mis en œuvre et un lancement tardif des plans d'action. Ces éléments factuels indiquent que les contours du problème, la définition même de ce qui fait problème relèvent d'un processus plus que complexe. L'appréhension du problème et ses modalités de gestion ont évolué, de même que la diversité d'acteurs mobilisant des compétences et des connaissances plus ou moins stabilisées pour s'engager dans la « résolution » du problème. Cela est révélateur du caractère épineux de la crise chlordécone. Pour autant, les nouvelles connaissances scientifiques intègrent le débat public de façon continue pendant 25 ans dans le sens d'une révélation d'une plus grande toxicité du chlordécone. Ces éléments de constat concourent à montrer le caractère épineux de cette crise environnementale. Comme l'indiquent Marano et Squinazi (2024), les crises environnementales relevant d'une exposition chronique à des substances chimiques figurent parmi les plus difficiles à gérer.

#### **» L'évaluation, une solution concrète au problème épineux de la crise chlordécone ?**

Plusieurs définitions de l'évaluation des politiques publiques sont utilisées dans la littérature<sup>25</sup>. L'évaluation vise à apprécier les impacts d'un dispositif (une mesure particulière, un investissement public ou privé, un ensemble d'actions ou de projets, une loi, etc.), en qualifiant ou quantifiant ses effets, pour juger de sa valeur au regard d'un ensemble de critères, dans l'objectif de l'améliorer et d'éclairer la décision. L'objectif de cette section n'est pas de lister l'ensemble des méthodes d'évaluation. De nombreux ouvrages ont déjà été consacrés à l'évaluation des politiques publiques (Baslé et Josselin, 2019; Baslé *et al.*, 2018; Josselin et Le Maux, 2017; Niedergang *et al.*, 2024).

La contamination des populations humaines à la chlordécone est due à l'alimentation et à l'exposition environnementale. En effet, l'exposition peut être indirecte (l'alimentation étant contaminée par l'exposition à la contamination de l'environnement) ou directe (les personnes sont exposées directement aux compartiments de l'environnement contaminés comme l'eau, l'air et le sol). Les agriculteurs ayant effectué les traitements dans les bananeraies avec le chlordécone ont été exposés directement à la molécule et au travers

25. Se référer par exemple à la définition donnée par la Société française d'évaluation : Qu'est-ce que l'évaluation ? (<https://www.sfe-asso.fr/levaluation/quest-ce-que-levaluation/>).

de la contamination de l'environnement. Les dispositifs mis en place pour limiter cette exposition sont parfois spécifiques ou communs à d'autres problèmes de santé publique. On peut les regrouper en trois catégories par simplification, détaillées à la suite.

- Les actions directes sur les modes de production et de consommation : des incitations au moyen de subventions ou de taxes, prenant la forme d'interdictions dans le cas extrême ; des innovations dans les modes de production, de décontamination ou de distribution ; des importations provenant de zones non contaminées.
- La surveillance incluant le dépistage et le suivi médical, les contrôles des pratiques et des produits mis à disposition sur les marchés.
- La sensibilisation au moyen d'une meilleure circulation de l'information sur les bonnes pratiques et un suivi personnalisé. Elle permet de lever les barrières à l'appropriation de la problématique chlordécone par la population et d'améliorer les comportements.

Évaluer les politiques publiques sur ces trois types de mesures demande au préalable de bien comprendre les arbitrages en ce qui concerne les comportements, notamment la consommation alimentaire dans un contexte social, sanitaire et économique singulier. De ce point de vue, Bazoche et Angeon (2025), en conduisant une expérience de choix en Guadeloupe, s'interrogent sur l'intérêt accordé par les consommateurs aux attributs environnementaux des produits maraîchers et vivriers locaux. Des paniers de biens composés de tomates, laitues, concombres et bananes plantain présentant différents attributs environnementaux (définis selon leur mode de production : conventionnel, pratiques agroécologiques sans label, agriculture biologique) étaient soumis au choix des participants. Les résultats montrent une valorisation de la caractéristique environnementale pour tous les produits du panier. Il existe bien une préférence des consommateurs pour les pratiques environnementalement vertueuses, dès lors qu'ils disposent de l'information sur la qualité environnementale des produits (contrôlé ici par la diffusion d'une information décrivant les trois niveaux d'utilisation d'intrants). Néanmoins, le prix a une incidence significative discriminante sur l'utilité des consommateurs. On note en effet une sensibilité au prix importante des consommateurs guadeloupéens, quels que soient les produits du panier. Par ailleurs, on observe également une différenciation des préférences pour les pratiques culturelles en fonction des produits. Ces derniers peuvent se regrouper en deux catégories distinguant, premièrement, ceux pour lesquels l'attribut environnemental provoque indifféremment une augmentation d'utilité selon le mode de production et, deuxièmement, ceux pour lesquels on constate une valorisation de la caractéristique environnementale croissante avec la réduction d'intrants. Ainsi, pour la première catégorie de produits, les pratiques agroécologiques sans label et en agriculture biologique ne semblent pas différenciées par les consommateurs en matière de gain d'utilité. Les produits appartenant à cette catégorie sont le concombre et la salade. Pour la seconde catégorie de produits (tomates, bananes plantain), le mode de production relevant de l'agriculture biologique procure des niveaux d'utilité plus élevés que celui relevant de l'agroécologie (sans label), lui-même mieux valorisé que les produits issus de l'agriculture conventionnelle. Ces résultats interpellent quant à la maîtrise des signaux informationnels sur la sensibilité des biens alimentaires au chlordécone<sup>26</sup>. En outre, s'agissant des produits

---

26. Bazoche et Angeon (2025) observent, à partir d'un test de connaissances sur les risques liés à la contamination des produits locaux, une relative méconnaissance des risques. En effet, environ 38 % de l'échantillon constitué (110 consommateurs guadeloupéens) présentent au moins 50 % de réponses justes.

locaux frais, les résultats montrent que les consommateurs tendent à associer la qualité environnementale des produits aux circuits de commercialisation, considérant à 65 % les marchés de plein air comme des sources d'approvisionnement fiables. Cet engouement pour les marchés de plein air comme gages de qualité environnementale des produits est également observé par Fréguin-Gresh *et al.* (2020).

D'autres enquêtes complémentaires ont déjà été menées sur la perception des risques, les connaissances et les pratiques sur d'autres polluants ou perturbateurs endocriniens (voir par exemple Marguillier *et al.*, 2020). Par ailleurs, plusieurs évaluations ont déjà été menées aux Antilles. Les plus emblématiques sont celles menées dans le cadre du programme «jardins familiaux», plus connus sous le nom de Jafa, qui ciblent prioritairement la société civile et cherchent à faire évoluer les pratiques de production hors du milieu professionnel (par exemple, diagnostics de sol des jardins privés, conseils en élevage et en agriculture), les comportements alimentaires (par exemple, éclairage sur les choix de consommation compte tenu du degré d'exposition) et les pratiques de santé (par exemple, prévention à l'aide des tests de chlordéconémie), afin de diminuer l'exposition au risque.

Cependant, ces évaluations en temps et en conditions réelles restent relativement limitées, comparativement à d'autres problèmes de santé de cette ampleur. Elles pourraient être systématiquement mises en place dès la conceptualisation des programmes, en s'inspirant notamment de la révolution empirique qui a émergé dans les années 1970 dans le domaine de l'évaluation (encadré 8.5). Des évaluations en population pourraient par exemple être menées au travers de protocoles expérimentaux ou quasi expérimentaux. Elles peuvent concerner des dispositifs de production, en exploitant par exemple le respect des seuils recommandés, des dispositifs informant la population (pas uniquement l'élaboration, mais aussi le test en conditions réelles), des incitations financières permettant d'améliorer l'alimentation ou encore un croisement de ces différentes mesures.

### **Encadré 8.5. La révolution empirique en économie et en évaluation des politiques publiques**

Popularisée entre autres par les prix Nobel 2000 (Heckman et McFadden), 2003 (Granger), 2019 (Banerjee, Duflo, Kremer) et 2021 (Angrist, Card, Imbens), elle fournit de nombreux outils utiles à l'évaluation des politiques publiques à l'aide de méthodes empiriques permettant d'estimer l'efficacité des mesures et leur impact sur la société. Les deux types de méthodes les plus popularisées sont :

- les études expérimentales et en particulier les expériences contrôlées aléatoires (RCT) permettant de mesurer un effet causal de la politique en isolant les autres facteurs en assignant de manière aléatoire à un groupe traité (qui reçoit la politique) ou à un groupe témoin (qui ne la reçoit pas) ;
- les études quasi expérimentales cherchant à se rapprocher du cadre expérimental comme la méthode des doubles différences (comparaison d'un groupe traité à un groupe témoin, avant et après traitement sans assignation aléatoire du traitement) ou les méthodes de régression discontinues (exploitation des seuils ou des règles de sélection pour comparer les individus juste en dessous et juste au-dessus d'un seuil).

La multiplication d'analyses rigoureuses permet des recoupements et des recommandations.

Nous donnons ci-dessous quelques exemples d'applications de ces méthodes hors du sujet chlordécone, mais sur des problèmes de pollution du sol ou de l'air ou des programmes d'assainissement de l'eau, de réglementation sur la pollution de l'air ou encore de mesures de dépollution des sols.

Premièrement, de nombreuses études utilisant des méthodes quasi expérimentales se sont focalisées sur les effets nocifs des pesticides ou de la pollution atmosphérique sur la santé, la productivité et le développement humain (Antle et Pingali, 1995; Antel *et al.* 1998; Currie et Neidell, 2005; Brainerd et Menon, 2014; Camacho et Mejía, 2017). Elles tentent de résoudre des problèmes d'identification classiques d'un effet causal (encadré 8.6). Elles exploitent en général des chocs économiques soudains ou des chocs de pollution liés à une industrie spécifique, qui induisent des variations substantielles entre zones géographiques sur la pollution atmosphérique ou des sols. C'est le cas par exemple de Chay et Greenstone (2003) qui exploitent la récession de 1980-1982 aux États-Unis qui réduisit la pollution de l'air dans certaines zones en particulier — les autres zones moins impactées par la récession servant de contrôle. Ils estiment l'impact des particules fines en suspension et montrent qu'une réduction de 1 % des particules fines en suspension entraîne une baisse de 0,35 % du taux de mortalité infantile au niveau du comté, ce qui signifie que 2500 nourrissons de moins décédèrent pendant la récession. Cet effet n'aurait pas été observé en l'absence de réduction de l'exposition aux particules fines. Ils précisent également la temporalité des effets, l'exposition du fœtus étant un mécanisme physiopathologique potentiel. En général, ces études n'utilisent pas des suivis de cohortes, mais des données issues de vastes enquêtes démographiques et sociales menées en population générale. Les études de ce type appliquées aux pesticides se développent rapidement (Lai, 2017; Dias *et al.*, 2023; Fletcher et NoghaniBehambari, 2024).

### **Encadré 8.6. Les problèmes d'identification**

L'identification est un concept central en évaluation lorsqu'il s'agit d'estimer des relations causales. La pollution ou une mesure de contrôle n'étant pas répartie de manière aléatoire entre zones géographiques ou individus, un certain nombre d'autres facteurs ou de déterminants non observés peuvent être confondus à l'exposition; par exemple :

- les zones où les niveaux de pollution sont plus élevés ont souvent des caractéristiques particulières et des conditions économiques différentes, autant d'éléments qui pourraient contribuer à des résultats différentiels en matière de santé et venir confondre l'effet isolé de la pollution;
- l'exposition de l'individu à la pollution tout au long de sa vie est souvent inconnue ou mal mesurée;
- la pollution peut affecter des personnes déjà malades;
- les ménages avec des moyens suffisants peuvent choisir de s'installer loin des zones à risque ou de consommer des produits issus de zones non contaminées induisant des biais de sélection.

Deuxièmement, les évaluations de mesures ou politiques utilisant des méthodes quasi expérimentales sont également nombreuses et ces questions ne sont pas récentes. Néanmoins, elles restent quasiment inexistantes en France. Elles sont complémentaires aux modèles développés dès les années 1980. Par exemple, Heimlich *et al.* (1982)

utilisaient déjà un modèle de programmation linéaire de l'agriculture en Caroline du Nord pour analyser les stratégies de réduction d'utilisation de pesticides. Ils montraient que des réductions importantes de l'exposition aux pesticides avec des niveaux comparables de contrôle de l'érosion sont réalisables à un coût relativement faible, mais qu'elles impliquent des changements dans les modes de culture et d'utilisation des ressources. Les évaluations quasi expérimentales plus récentes se sont concentrées sur des politiques de régulation. C'est le cas de Greenstone et Hanna (2014) en Inde, par exemple. Cette étude évalue l'effet de réglementations environnementales à l'aide d'un modèle de différence en différences. Les réglementations sur la pollution de l'air sont associées à des améliorations substantielles de la qualité de l'air. Ils montrent que la réglementation sur l'air la plus efficace a entraîné une baisse modeste de la mortalité infantile. En revanche, les réglementations sur l'eau n'ont pas eu d'effets bénéfiques mesurables. Ils soulignent que le succès de ces nouvelles règles dépend fortement de la demande accrue en matière de qualité de l'air, favorisant ou non l'application effective des règles, qui est endogène. Un soutien public fort permet aux réglementations environnementales de mieux réussir. D'autres évaluations tirent avantage de la mise en place de larges programmes d'assainissement (Zhang, 2012 ; Zhang et Colin Xu, 2016). Les auteurs analysent l'effet d'un programme conséquent d'amélioration de la qualité de l'eau en Chine rurale sur la santé et l'éducation des adultes et des enfants. En utilisant des données de panel couvrant plus de 4500 ménages entre 1989 et 2006, ils estiment l'impact de l'introduction de l'accès à une eau traitée et purifiée au niveau des villages à partir d'usines de traitement de l'eau sur diverses mesures de santé et d'éducation. De façon intéressante, Bennett (2012) montre que les programmes d'assainissement de l'eau peuvent cependant générer des effets contre-intuitifs et qu'assainir l'eau peut paradoxalement la « rendre plus sale ». Il montre que l'approvisionnement en eau courante fournie se substitue aux comportements sanitaires des ménages et que les comportements sanitaires des voisins sont au contraire des compléments. Dans cette situation, assainir l'eau peut avoir des effets indésirables non négligeables. Madajewicz *et al.* (2007) ont évalué l'effet d'un autre type de politique, à savoir une campagne d'information relative aux comportements liés à la contamination de l'eau par l'arsenic au Bangladesh.

Troisièmement et pour finir, les expériences aléatoires sont plus rares dans ce domaine, mais il existe de nombreux exemples sur l'information à la santé, ou les incitations. Guiteras *et al.* (2015) ont par exemple testé les avantages respectifs de l'information par rapport à une subvention financière. C'est la subvention qui donnait les meilleurs résultats. Thuilliez et Dumont (2019) se focalisent sur la lutte contre les moustiques comme un bien public environnemental et sanitaire. Ils utilisent les données d'une expérience contrôlée randomisée en grappes menée entre 2012 et 2014 dans les zones urbaines de La Réunion en France pour étudier l'impact de techniques de contrôle dites mécaniques recommandées par l'OMS, qui impliquent l'élimination des sources d'eau stagnante autour de la maison par les habitants ou une agence publique, sur un certain nombre de résultats, y compris des indices entomologiques objectifs et des comportements de protection autodéclarés. Les résultats empiriques montrent que les politiques publiques peuvent parfois avoir des effets non anticipés. Les ménages réduisent leur comportement de protection en réponse au contrôle public, générant un effet de substitution en action publique et privée. Ces études sont souvent

spécifiques à un contexte donné et difficilement généralisables, mais elles permettent d'évaluer de façon rigoureuse les stratégies d'actions possibles.

En conclusion, l'évaluation des politiques publiques en vie réelle et en population peut être réalisée de différentes manières et par le prisme de différentes disciplines. Nous avons ici donné quelques exemples issus de la littérature empirique en économie, une discipline qui s'est largement focalisée sur l'évaluation des politiques publiques au cours des 50 dernières années, en développant des outils statistiques spécifiques et robustes. Tous les outils n'ont pas été évoqués ici, par exemple les méta-analyses, les laboratoires vivants (*living labs*), entre autres. Par ailleurs, certaines évaluations spécifiques comme la compréhension des effets sur le développement de l'enfant nécessitent une durée d'observation longue. Des études qualitatives peuvent apporter des indices et des réponses plus rapides et complémentaires dans ce cas. L'évaluation reste dans tous les cas indispensable, car elle aide au bon usage des financements, à la soutenabilité et à l'appropriation des politiques et des mesures environnementales mises en place. Intégrer systématiquement la démarche d'évaluation au pilotage et au suivi des programmes ainsi qu'à la gestion de la contamination au chlordécone semble donc indispensable pour aborder ce problème épineux de façon transparente. Elle permet également d'améliorer les politiques publiques en temps réel de façon efficace du point de vue de la protection des populations. Par exemple, évaluer les dispositifs de financement des aides aux éleveurs de bovins ou pêcheurs touchés par la pollution au chlordécone pour les aider à sécuriser leur production peut permettre d'optimiser ces dispositifs d'aide et de les ajuster en temps réel. Évaluer la prise en charge du surcoût du traitement de l'eau potable engendré par la pollution par le chlordécone peut permettre d'informer simultanément la population, d'estimer quelles incitations sont les plus efficaces, et enfin d'éviter certains effets comportementaux non intentionnels observés dans des études passées sur l'assainissement de l'eau.

## ► La crise chlordécone : un révélateur des nécessités de renouvellement de l'action publique

À travers notre analyse de la gestion du chlordécone et des risques associés, nous mettons en évidence que ce problème de pollution environnementale soulève des questionnements sur des pratiques et un mode opératoire apparaissant comme singuliers : prise en charge tardive du problème, pas d'attributions claires au départ des responsabilités ni d'identification des acteurs devant prendre en charge la gestion du problème, difficulté à entrevoir de manière systématique et coordonnée la définition et les modalités de résolution du problème. Ces éléments de diagnostic concourent à donner une lecture de la crise chlordécone sous le prisme des problèmes épineux pour lesquels il n'y a pas d'univocité des solutions, ce qui est susceptible de générer des tâtonnements, des processus d'essais et d'erreurs.

La crise chlordécone a mis à jour des dispositifs d'évaluation sous-dimensionnés, alors même que la situation insulaire (espace de petite dimension et circonscrit) aurait probablement pu faciliter leur mise en œuvre. Par exemple, un état des lieux détaillé de l'évolution de l'état de santé des populations vivant dans les zones contaminées des Antilles par rapport aux zones non contaminées n'a pas été lancé à ce jour, alors que les bases de données médicoadministratives complétées par les registres disponibles permettraient de le faire.

En outre, malgré le fait que les premières données relatives à la chlordéconémie remontent à 2015, on ne dispose pas à ce jour d'évaluation sur la chlordéconémie. Le parent faible des études reste la toxicologie. Si des durées d'observation de long terme sont nécessaires (par exemple, développement de l'enfant et épidémiologie), le recours aux études qualitatives peut apporter des réponses plus rapides. Les signaux issus de la vigilance sont dès lors à considérer, au sens où ils permettent de déclencher plus vite et donc plus efficacement des processus d'alerte.

Nous soulignons surtout ici l'importance de raisonner avec des contrefactuels\* bien définis (sur des événements qui ne se sont pas réalisés, mais auraient pu se réaliser sous certaines conditions), afin d'estimer et d'évaluer ce qui aurait pu se passer si telle zone ou ménage avait bénéficié d'une politique. Cette posture distanciée et critique par rapport au phénomène étudié autorise un raisonnement hypothétique. Si la mise en œuvre de dispositifs de surveillance (contrôles notamment) est certainement sous-optimale dans l'Hexagone, le temps de traitement de la crise, si elle s'y était déroulée, aurait-il été différent ? Malgré son caractère épineux, le problème du chlordécone présente également une opportunité de croiser différentes approches, afin de trouver des solutions nouvelles qui pourraient éviter de futures crises, voire bénéficier à d'autres situations.

## ► Références bibliographiques

- Alford J., Head B.W., 2017. Wicked and less wicked problems: A typology and a contingency framework, *Policy and Society*, 36(3), 397-413.
- Andersson C., Törnberg A., Törnberg P., 2014. Societal systems — Complex or worse? *Futures*, 63:145-157. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2014.07.003>.
- Andersson C., Törnberg P., 2018. Wickedness and the anatomy of complexity, *Futures*, 95:118-138. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2017.11.001>.
- Angeon V., Freguin-Gresh S., 2023. La mise sur agenda d'un modèle agri-alimentaire alternatif en Guadeloupe : une fenêtre d'opportunité pour le renouvellement de l'action publique. *Géographie, Économie, Société*, 25:163-184. <https://hal.inrae.fr/hal-04241896v1>.
- Antle J.M., Cole D.C., Crissman C.C., 1998. Further evidence on pesticides, productivity and farmer health: potato production in Ecuador. *Agricultural Economics*, 18(2):199-207. <https://doi.org/10.1111/j.1574-0862.1998.tb00499.x>.
- Antle J.M., Pingali P.L., 1995. Pesticides, Productivity, and Farmer Health: A Philippine Case Study, in Pingali P.L., Roger P.A. (éd.), *Impact of Pesticides on Farmer Health and the Rice Environment*, Dordrecht: Springer Netherlands, 361-387. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-0647-4\\_13](https://doi.org/10.1007/978-94-011-0647-4_13).
- Baslé M., Josselin J.M., 2019. *Évaluations des politiques publiques. Guide pratique et citoyen*. Éditions Ellipses, 240 p.
- Baslé M., Josselin J.M., Maux B.L., 2018. Dispositifs d'évaluation des politiques publiques et des programmes : connaissances de base, choix des méthodes, sociogramme des acteurs et études de cas, in Rapport à l'Assemblée nationale : Étude pour le Comité d'évaluation et de contrôle des politiques publiques de l'Assemblée Nationale.
- Bazoche P., Angeon V., 2025. Valuing environmental attributes of food products in a polluted area: what are the preferences of Guadeloupean consumers? *Rev Agric Food Environ Stud.*, 106:167-189. <https://doi.org/10.1007/s41130-025-00229-0>.
- Bennett D., 2012. Does Clean Water Make You Dirty? Water Supply and Sanitation in the Philippines. *Journal of Human Resources*, 47(1):146-173. <https://doi.org/10.1353/jhr.2012.0008>.
- Brainerd E., Menon N., 2014. Seasonal effects of water quality: The hidden costs of the Green Revolution to infant and child health in India. *Journal of Development Economics*, 107:49-64. <https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2013.11.004>.

- Callon M., Lascoumes P., Barthe Y., 2014. La recherche confinée, in Callon M., Lascoumes P., Barthe Y., *Agir dans un monde incertain. Essai sur la démocratie technique*, Le seuil (coll. La couleur des idées), 61-104.
- Camacho A., Mejía D., 2017. The health consequences of aerial spraying illicit crops: The case of Colombia, *Journal of Health Economics*, 54:147-160. <https://doi.org/10.1016/j.jhealeco.2017.04.005>.
- Cardona A., Lefèvre A., Simon S., 2018. Les stations expérimentales comme lieux de production des savoirs agronomiques semi-confinés, *Revue d'anthropologie des connaissances*, 139-170. <https://doi.org/10.3917/rac.039.0139>.
- Chay K.Y., Greenstone M., 2003. The Impact of Air Pollution on Infant Mortality: Evidence from Geographic Variation in Pollution Shocks Induced by a Recession. *The Quarterly Journal of Economics*, 118(3):1121-67. <https://doi.org/10.1162/00335530360698513>.
- Currie J., Neidell M., 2005. Air Pollution and Infant Health: What Can We Learn from California's Recent Experience? *The Quarterly Journal of Economics*, 120(3):1003-30. <https://doi.org/10.1093/qje/120.3.1003>.
- Dias M., Rocha R., Soares R.R., 2023. Down the River: Glyphosate Use in Agriculture and Birth Outcomes of Surrounding Populations. *The Review of Economic Studies*, 90(6):2943-2981. <https://doi.org/10.1093/restud/rdad011>.
- Ferdinand M., 2015. De l'usage du chlordécone en Martinique et en Guadeloupe : l'égalité en question. *Revue française des affaires sociales*, 1:163-183. <https://doi.org/10.3917/rfas.151.0163>.
- Fletcher J., NoghaniBehambari H., 2024. The siren song of cicadas: Early-life pesticide exposure and later-life male mortality. *Journal of Environmental Economics and Management*, 123:102903. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2023.102903>.
- Fréguin-Gresh S., Angeon V., Cortès G., 2020. Les petites agricultures familiales en Guadeloupe : une contribution à l'ancrage de l'alimentation? Rapport final de l'Atelier professionnel du Master EDEV 2019-2020, Montpellier, Petit Bourg, Cirad-INRAE-université Paul Valéry de Montpellier, 310 p.
- Greenstone M., Hanna R., 2014. Environmental Regulations, Air and Water Pollution, and Infant Mortality in India. *American Economic Review*, 104(10):3038-3072. <https://doi.org/10.1257/aer.104.10.3038>.
- Guiteras R., Levinsohn J., Mobarak A.M., 2015. Encouraging sanitation investment in the developing world: A cluster-randomized trial. *Science*, 348(6237):903-906. <https://doi.org/10.1126/science.aaa0491>.
- Head B. W., 2022. *Wicked Problems in Public Policy. Understanding and Responding to Complex Challenges*, Palgrave, Macmillan. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-94580-0>.
- Heimlich R.E., Ogg C.W., 1982. Evaluation of soil-erosion and pesticide-exposure control strategies. *Journal of Environmental Economics and Management*, 9(3):279-288. [https://doi.org/10.1016/0095-0696\(82\)90035-3](https://doi.org/10.1016/0095-0696(82)90035-3).
- Joly P.-B., 2010. La saga du chlordécone aux Antilles françaises. Reconstruction chronologique 1968-2008. Rapport réalisé pour l'AFSSET dans le cadre du Plan national chlordécone.
- Josselin J.M., Le Maux B., 2017. *Statistical Tools for Program Evaluation: Methods and Applications to Economic Policy, Public Health, and Education*. Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52827-4>.
- Keynes J.M., 1921. *A Treatise on Probability*. Royal Economic Society (coll. The collected Writings of John Maynard Keynes, vol. 8). <https://doi.org/10.1017/UPO9781139524247>.
- Keynes J.M., 1936. *Théorie générale de l'emploi, de l'intérêt et de la monnaie*. Traduction de Largentaye, Paris: Payot.
- Lai W., 2017. Pesticide use and health outcomes: Evidence from agricultural water pollution in China. *Journal of Environmental Economics and Management*, Special issue on environmental economics in developing countries, 86:93-120. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2017.05.006>.
- Lönngrén J., van Poeck K., 2021. Wicked problems: A mapping review of the literature. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 28(6), 481-502. <https://doi.org/10.1080/13504509.2020.1859415>.

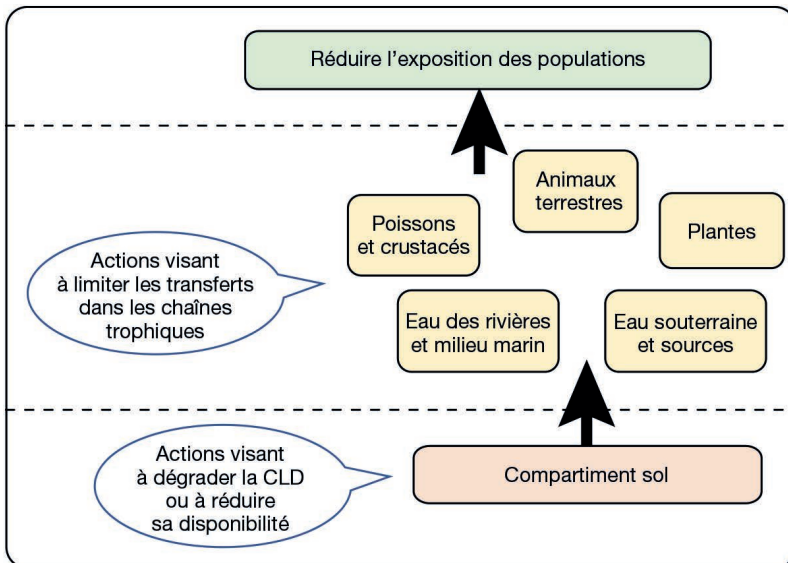
- Madajewicz M., Pfaff A., van Geen A., Graziano J., Hussein I. *et al.*, 2007. Can information alone change behavior? Response to arsenic contamination of groundwater in Bangladesh. *Journal of Development Economics*, 84(2):731-754. <https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2006.12.002>.
- Marano F., Squinazi F., 2024, Les crises sanitaires environnementales — Comment les éviter? Versailles: Quæ, 120 p. (coll. Essais).
- Marguillier E., Beranger R., Garlantezec R., Levêque J., Lassel L. *et al.*, 2020. Endocrine disruptors and pregnancy: Knowledge, attitudes and practice of perinatal health professionals. A French multi-centre survey. *European Journal of Obstetrics & Gynecology and Reproductive Biology*, 252:233-238. <https://doi.org/10.1016/j.ejogrb.2020.06.032>.
- Meyer M., Molyneux-Hodgson S., 2011. «Communautés épistémiques»: une notion utile pour théoriser les collectifs en sciences? *Terrains & Travaux*, 18(1):141-154. <https://doi.org/10.3917/tt.018.0141>.
- Multigner L., 2022. La pollution des Antilles françaises par le chlordécone : des origines aux conséquences. Association française pour l'information scientifique. Disponible sur <https://www.afis.org/La-pollution-des-Antilles-francaises-par-le-chlordecone-des-origines-aux>.
- Niedergang M., 2024. L'action publique à l'épreuve des preuves. *Action publique. Recherche et pratiques*, 21. Disponible sur [https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions\\_services/igpde-editions-publications/Action\\_Publique\\_21.pdf?v=1719229977](https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/igpde-editions-publications/Action_Publique_21.pdf?v=1719229977).
- Postel N., 2008. Rationalité, institution et coercition : une lecture croisée de Keynes et Simon. *Revue économique*, 59(2):265-290.
- Pressman J.L., Wildavsky A.B., 1973. Implementation. Berkeley: University of California Press, 1973, pp. xviii, 182. *Canadian Journal of Political Science*, 7(2):369-370. <https://doi.org/10.1017/S000842390003849X>.
- Rittel H., Webber M., 1973. Dilemmas in a general theory of planning. *Policy Sciences*, 4(2):155-169. <https://doi.org/10.1007/BF01405730>.
- Simon H., 1964. Rationality, in Gould J., Kolb W.L. (éd.), *Dictionnaire of Social Science*. Glencoe: The Free Press, 761 p.
- Simon H., 1978. Rationality as a process and a product of thought. *American Economic Review*, 68(2):1-16.
- Sheppard E., 2014. Problème public, in Boussaguet L. (éd.), *Dictionnaire des politiques publiques*. 4<sup>e</sup> édition précédée d'un nouvel avant-propos, Paris: Presses de Sciences Po, 530-538. <https://doi.org/10.3917/scpo.bouss.2014.01.0530>.
- Snégaroff J., 1977. Résidus d'insecticides organochlorés, dans la région bananière de Guadeloupe. *Phytiatrie-phytopharmacie*, 26:251-268.
- Snowden D.J., Boone M.E., 2007, A leader's framework for decision making. *Harvard Business Review*, 85(11):68-76.
- Thuilliez J., Dumont Y., 2019. Public Mosquito Abatement: A Cluster Randomized Experiment. *The World Bank Economic Review*, 33(2):479-497. <https://doi.org/10.1093/wber/lhw066>.
- Zhang J., 2012. The impact of water quality on health: Evidence from the drinking water infrastructure program in rural China. *Journal of Health Economics*, 31(1):122-34. <https://doi.org/10.1016/j.jhealeco.2011.08.008>.
- Zhang J., Colin Xu L., 2016. The long-run effects of treated water on education: The rural drinking water program in China. *Journal of Development Economics*, 122:1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2016.04.004>.

## Chapitre 9

# Quels outils et solutions pour réduire l'exposition via le sol, l'eau et les aliments ?

*Audrey Bruneau, Matthieu Delannoy, Agnès Fournier, Sarra Gaspard, Magalie Jannoyer, Soazig Lemoine, Christophe Mouvet, Guido Rychen*

Ce chapitre présente les actions mises en œuvre pour dégrader la chlordécone dans les sols et pour réduire sa disponibilité et ses transferts dans les compartiments sol, eau, aliments (figure 9.1) dans une perspective de santé globale (*One Health*<sup>27</sup>). Il est organisé en deux sections : la première met l'accent sur les moyens d'agir sur le réservoir de la chlordécone dans les sols contaminés, et la seconde présente les actions visant à réduire l'exposition des populations animales et humaines au travers de l'eau et des agroécosystèmes. Les limites des connaissances actuelles ainsi que les perspectives de recherche sont également évoquées.



**Figure 9.1.** Niveaux d'actions et compartiments ciblés pour limiter l'exposition humaine à la chlordécone.

CLD : chlordécone.

27. <https://www.anses.fr/fr/content/one-health-une-seule-sant%C3%A9-pour-les-%C3%AAtres-vivants-et-les-%C3%A9cosyst%C3%A8mes>.

## ► Agir sur le réservoir de la chlordécone dans les sols

### Quelles techniques pour diminuer la concentration en chlordécone dans les sols ?

Le sol est le réservoir principal de la pollution par la chlordécone avec une évaluation d'une pollution persistante pour 1/5 de la surface agricole utile (SAU) en Guadeloupe et 2/5 en Martinique (Cabidoche et Jannoyer-Lesueur, 2011). Les sols contaminés représentent une priorité en matière de gestion et de décontamination. Le traitement des sols *ex-situ* (sol excavé pour être traité) étant techniquement et économiquement inenvisageable du fait des volumes concernés, c'est le traitement *in situ* (sol laissé en place pour être traité) qui doit être privilégié. À ce jour, quatre approches sont envisagées : la voie microbiologique, la voie physico-chimique (réduction chimique *in situ* [ISCR ou *In Situ Chemical Reduction*]), la voie végétale (phytoremédiation) et dans une moindre mesure la voie thermique.

#### Dégradation microbiologique

En conditions aérobies dans des microcosmes d'andosol avec ajout d'une solution de  $^{14}\text{C}$ -CLD dans l'acétone, Fernandez-Bayo *et al.* (2013) ont montré que 4,4% de la dose initiale de  $^{14}\text{C}$ -CLD étaient minéralisés après 215 jours, sans détection de métabolites déchlorés. Les résultats les plus probants ont été obtenus en conditions anaérobies, dans des conditions expérimentales cependant éloignées de celles de l'environnement naturel : atmosphère réductrice constituée seulement d'azote ( $\text{N}_2$ ) et de dihydrogène ( $\text{H}_2$ ), abondance de nutriments, chlordécone ajoutée sous une forme initialement très biodisponible (en solution dans un solvant), très forts rapports liquide/solide avec des souches bactériennes isolées mises en milieu de culture (Chaussonnerie *et al.*, 2016) ou des échantillons de sols de Guadeloupe (Lomheim *et al.*, 2020). La transformation de la quasi-totalité de la chlordécone ajoutée a été observée, avec la formation de différentes familles de produits de transformation, par exemple hydrochlordécones, polychloroindènes et polychloroindènes carboxylés (Chaussonnerie *et al.*, 2016; Lomheim *et al.*, 2020; chapitre 2). Une totale déchloration de la chlordécone aboutissant à un indène carboxylé ( $\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_2$ ) a été observée après 96 mois d'incubation, mais cet indène ne représente au maximum que 3% de la masse de chlordécone initiale (Lomheim *et al.*, 2021).

Pour se rapprocher des conditions naturelles et éviter le biais de l'ajout de chlordécone exogène, d'autres expériences ont été menées, mais toujours en microcosmes de laboratoire (0,5 g de sol dans 12 ml de milieu de culture) et en anaérobiose stricte (Chevallier *et al.*, 2019). Un andosol et un nitisol contaminés ont été incubés dans un milieu de culture bactérien dopé ou non en vitamine B12, et maintenus pendant 36 mois sous atmosphère enrichie en azote et en dihydrogène (95% de  $\text{N}_2$  et 5% de  $\text{H}_2$ ). La chlordécone n'était plus détectable après 10 mois d'incubation pour le nitisol, avec ou sans vitamine B12. Pour l'andosol, la teneur en chlordécone a diminué légèrement sans vitamine B12, et a été non détectable après 36 mois en présence de vitamine B12 (Chaussonnerie *et al.*, 2016; Lomheim *et al.*, 2020).

Dans sept échantillons de sols et deux sédiments antillais, des analyses ont révélé la présence de produits de transformation des familles hydrochlordécones, polychloroindènes et polychloroindènes carboxylés (Chevallier *et al.*, 2019). Dans six échantillons de sols, seuls des hydrochlordécones et des polychloroindènes ont pu être analysés

(Lomheim *et al.*, 2020). Si ces résultats mettent en évidence l'existence de transformations microbiologiques *in situ*, les vitesses et l'efficacité de ces transformations ne sont pas encore bien connues. Générer *in situ* les conditions nécessaires pour stimuler cette biodégradation à des fins de remédiation sera un vrai challenge, et les diverses propriétés des produits de transformation devront être évaluées.

## Dégradation par voie physico-chimique

Le procédé ISCR consiste à générer dans le sol des conditions très réductrices propices à la déchloration réductive des micropolluants organochlorés par voie physico-chimique. Ces conditions sont obtenues par l'apport de matière organique facilement biodégradable additionnée de FZV, ou par l'apport de FZV seul, et par la saturation en eau du sol. En fin de traitement, un labour du sol permet de revenir aux conditions d'oxydoréduction initiales du sol (Mouvet *et al.*, 2016).

Le potentiel de l'ISCR a été étudié dans un premier temps à l'échelle de mésocosmes de laboratoire, contenant 80 kilogrammes de chacun des trois principaux types de sols antillais. Après six mois de traitement, la concentration en chlordécone a baissé de 74 % dans le nitisol, 71 % dans le ferralsol et 22 % dans l'andosol. 11 produits de transformation déchlorés de la chlordécone, de mono- (CLD-1 Cl) à penta-déchlorée (CLD-5 Cl), ont pu être identifiés. Aucun ne s'est accumulé dans le sol au cours de l'expérience et six des sept tests d'écotoxicité n'ont pas révélé de différence significative entre les sols traités et les témoins non traités. Seul le test basé sur le rotifère *Brachionus calyciflorus* appliqué au nitisol traité montre une réponse plus forte que le nitisol témoin. Il faut toutefois noter que ce test montre une écotoxicité des témoins de l'andosol et du ferralsol plus élevée que celle du nitisol traité. L'effet écotoxique observé sur *Brachionus calyciflorus* dans le nitisol après traitement ISCR/Daramend® doit donc être largement relativisé (Mouvet *et al.*, 2017).

En conditions *in situ* dans des parcelles de bananeraies (100 m<sup>2</sup>, 50 cm de profondeur) en Martinique (Mouvet *et al.*, 2020), quatre types d'amendement ont été testés. Les doses d'application étaient de 6 % pour les trois amendements de FZV en mélange avec de la matière organique, et de 4 % pour la poudre de FZV seule. Une compaction du sol par deux passages croisés de tracteur a été réalisée après l'incorporation des amendements, suivie d'une irrigation régulière maintenant la saturation de la capacité au champ. Deux essais indépendants sur nitisol (concentration initiale en chlordécone de  $0,7 \pm 0,3$  mg/kg de sol sec dans la tranche 0-40 cm) menés sur une durée de trois mois ont montré une diminution de la concentration de chlordécone de l'ordre de 70 % pour le FZV à granulométrie fine (98 % < 50 µm). Des produits de transformation ayant perdu jusqu'à quatre atomes de chlore ont été identifiés dans le sol, le principal dérivé étant une monohydrochlordécone (CLD-1 Cl) non accumulée dans le sol pendant la durée de l'expérience. Sur le plan agronomique, l'implantation des trois cultures (radis, concombre, patate douce), quelques semaines après la fin des traitements par ISCR, a globalement été satisfaisante pour tous les traitements. Toutefois, pour les concombres, un dépérissement des plants supérieur à 80 % a été observé sur la parcelle « FZV seul ». Ce dépérissement n'a pas été observé lors d'une autre expérience menée dans des systèmes expérimentaux hors sol avec une meilleure maîtrise de l'irrigation. Les traitements ISCR ont permis de baisser significativement la concentration en chlordécone dans les radis avec des valeurs

en dessous de la LMR (20 µg/kg PF), limite dépassée par les radis du sol non traité. Ils ont aussi permis de produire des concombres avec des niveaux de chlordécone significativement inférieurs à la LMR. Pour les patates douces, un traitement avec l'incorporation au sol de 6 % (masse ajout / masse de sol sec traité) d'un mélange de bagasse\* et de particules micrométriques de FZV (70 % de bagasse et 30 % de FZV) a conduit à des concentrations moyennes de chlordécone significativement plus faibles que les témoins et inférieures à la LMR. Tous les résultats physico-chimiques et agronomiques d'un troisième essai mené dans une bananeraie au sol alluvionnaire plus contaminé ( $1,9 \pm 0,3$  mg CLD/kg sol sec) que le nitisol ont confirmé ceux obtenus dans les essais sur le nitisol (Mouvet *et al.*, 2016).

### Élimination par voie thermique

Une seule étude en laboratoire a été publiée (Cochennec *et al.*, 2024). En utilisant une source de micro-ondes domestique (750 W, 2,45 GHz), un traitement de 10 minutes d'un andosol sec permet d'éliminer 90 % de la chlordécone, mais avec une température qui atteint 350 °C. Si la teneur en eau de ce sol est amenée à 10 %, la température plafonne à 200 °C et l'efficacité d'élimination de la chlordécone baisse, mais reste de 70 %. Le test réalisé sur un nitisol donne les mêmes tendances, mais avec une efficacité maximale de 70 % associée à une température maximale de 180 °C. Dans un four traditionnel, un chauffage à 200 °C pendant 60 minutes a une efficacité de l'ordre de 50 % pour les deux types de sol, quelle que soit la teneur en eau initiale.

### Phytoremédiation

Pour les cultures vivrières étudiées, les taux de transfert du sol contaminé vers les plantes (Clostre *et al.*, 2014a, 2014b, 2015; Woignier *et al.*, 2012, 2016) sont trop faibles pour envisager une phytoextraction efficace. Dans le cas de deux espèces de *Miscanthus* (plante considérée comme invasive dans les conditions antillaises), une expérimentation exploratoire conduite en laboratoire dans un sol limono-argileux (artificiellement contaminé à 1 mg de chlordécone par kg de sol sec) différent des sols antillais montre qu'un cycle de croissance ne permet d'extraire que 0,03 % de la masse de chlordécone ajoutée (Liber *et al.*, 2018). Une étude menée *in situ* (Nicolini *et al.*, 2022) suggère que certains arbres poussant sur nitisol dans des friches de bananeraies en Guadeloupe seraient les organismes végétaux les plus fortement contaminés par la chlordécone ( $3,4 \pm 1,7$  mg/kg de bois sec de la partie basale du tronc). À partir d'une hypothèse de transfert linéaire, d'un facteur de bioconcentration plante-sol d'environ 150 et de la biomasse produite (Nicolini *et al.*, 2022), il est possible d'estimer qu'une durée de croissance d'environ 165 ans serait nécessaire pour retrouver dans le bois des arbres les plus bio-accumulateurs 50 % de la masse de chlordécone contenue dans les 30 premiers centimètres du nitisol étudié.

### Limites actuelles à la mise en œuvre des procédés de remédiation

Concernant la dégradation microbiologique, aucun protocole n'a encore été testé en conditions réelles. La transposition des conditions de dégradation microbiologique en laboratoire vers des conditions réelles sera donc l'étape-clé. Sur le terrain, il faudrait ensuite lever les limites de mises en œuvre, liées aux conditions nécessaires à la biodégradation (anoxie, nutriments, biodisponibilité de la chlordécone). Enfin, pour les

familles de produits de transformation autres que les hydrochlordécones, rien n'est connu sur leur devenir environnemental, leur transfert vers les eaux, les plantes et les animaux, ni leur toxicité.

Pour l'ISCR, seule technique de dégradation testée *in situ* avec des résultats positifs sur la baisse des concentrations dans les sols et dans certaines cultures vivrières, les limites au déploiement du procédé concernent les manques de données sur :

- l'effet à long terme des ajouts sur les rendements et la qualité des différents types de culture, par exemple les légumes racines et les tubercules, ce qui nécessiterait des durées d'étude plus longues;
- la faisabilité et les possibilités concrètes d'application (travail du sol) et l'accès à la maîtrise de ces techniques par tous les utilisateurs potentiels;
- la disponibilité des amendements (4% par rapport au poids sec de sol) qui seraient nécessaires à la mise en œuvre à grande échelle;
- l'acceptabilité sociale (besoin de formation pour la bonne maîtrise des pratiques, charge de travail induite pour la mise en œuvre, impact des particules de fer sur la santé des applicateurs, besoin de lunettes et masques de type FFP2 pour l'application de la poudre de FZV);
- le cas des andosols, qui représentent environ 50% des surfaces contaminées en Martinique, pour lesquels la baisse de 20% des concentrations obtenue par ISCR pourrait être insuffisante pour garantir une baisse des transferts vers les plantes et les eaux, et sur lesquels la possibilité de maintenir la saturation en eau n'est pas assurée;
- le devenir environnemental (bilan de masse complet, mobilité d'un compartiment environnemental à un autre incluant le *continuum* eau douce-eau de mer, le transfert dans les plantes et les animaux, etc.), et la toxicité des produits de transformation éventuellement produits autres que les hydrochlordécones.

Face à ces limites, des travaux sont en cours pour augmenter l'opérationnalité de l'ISCR en recherchant la dose minimale d'amendements qui serait efficace, ou pour stimuler certains micro-organismes naturellement présents dans les sols et susceptibles d'induire la dégradation de la chlordécone en appui aux réducteurs chimiques introduits.

Pour l'approche thermique, les températures élevées atteintes pendant le traitement ont assurément des effets délétères irréversibles sur les organismes vivants, et très probablement sur les caractéristiques et fonctionnalités agronomiques et physico-chimiques des sols, dont la matière organique. Quoiqu'il en soit l'application de ce type de procédés à l'échelle d'une parcelle agricole, même de petite taille, et *a fortiori* celle du territoire, paraît irréaliste en l'état.

Pour la phytoremédiation, plusieurs mécanismes sont à considérer, dont la phytoextraction (capacité des plantes à extraire et concentrer le polluant) et la stimulation de la biodégradation dans la rhizosphère. Pour la phytoextraction, deux verrous subsistent. Tout d'abord le besoin d'identifier des plantes locales ou non invasives dont le taux de transfert sol-plante permette d'obtenir une extraction significative de la chlordécone. Le second verrou concerne la gestion des matières végétales aériennes et souterraines contaminées récoltées. Les résultats préliminaires de méthanisation en conditions optimisées (55°C, 40 jours d'incubation, ajout de chlordécone dissoute au digestat testé) ouvrent des perspectives intéressantes (Martin *et al.*, 2023) qui doivent être approfondies. La phytoremédiation pourrait également reposer sur l'action conjointe des plantes et des micro-organismes associés aux systèmes racinaires. Les exsudats

produits par les racines des plantes (les cucurbitacées, par exemple) pourraient favoriser le développement de bactéries produisant des surfactants qui augmenteraient la biodisponibilité de la chlordécone et permettraient une meilleure phytoextraction ou phytodégradation *in situ*. Toutefois, l'augmentation de la biodisponibilité de la chlordécone dans le sol par l'effet de surfactants pourrait aussi faciliter la lixiviation et entraîner ainsi un risque de contamination accrue des eaux. Dans l'état actuel des recherches sur le cas spécifique de la chlordécone, ces deux dernières considérations restent purement théoriques.

Quel que soit le procédé (ou le couplage de procédés) envisagé, il est nécessaire de développer une approche globale et de procéder à une véritable analyse coûts/bénéfices à l'échelle du système, mettant en perspective les coûts (i) de la gestion du risque liés aux interdictions de pêche, d'aquaculture et de certaines productions végétales, (ii) des impacts sanitaires sur les populations et les écosystèmes, (iii) des suivis de qualité des aliments, et (iv) des analyses sur l'acceptabilité de ces techniques aux Antilles. Le tableau 9.1 résume les principaux acquis et les limites des approches de remédiation visant à diminuer la concentration en chlordécone dans les sols.

## Approches permettant de séquestrer la chlordécone dans le sol

La séquestration des polluants dans le sol est une stratégie de gestion de la pollution pour réduire son impact sur l'environnement et la santé publique. Elle a démontré son efficacité dans la diminution du transfert du sol vers d'autres compartiments : la biosphère (ultimement l'être humain), les eaux (superficielles, souterraines dont l'eau de boisson et potentiellement les eaux marines). Elle permet une gestion des réservoirs sol et eau dans l'attente de solutions de décontamination. À noter toutefois que cette approche ne vise pas à diminuer la quantité totale de polluants présents dans le sol.

### Principes et mécanismes de la séquestration des polluants organiques

Le principe de la séquestration implique l'ajout dans le sol de matériaux capables de fixer les polluants dans le sol. Parmi ces matériaux, on trouve le compost, le biochar et le charbon actif, tous trois dérivés de la transformation de biomasses. Le compost résulte de la fermentation aérobie de biomasse, se rapprochant du processus naturel d'humification. Le biochar, matériau poreux, est produit par pyrolyse en condition anoxique. Enfin, le charbon actif résulte d'un traitement permettant d'accroître la porosité du biochar. Une fois ajoutés aux sols, ces matériaux agissent en adsorbant les polluants, réduisant ainsi leur disponibilité pour les organismes vivants et les processus de lixiviation. À l'heure actuelle, le mécanisme exact de cette séquestration n'est pas parfaitement connu, même si des processus physiques et chimiques sont rapportés (Ahmad *et al.*, 2014; Woignier *et al.*, 2012, 2016). L'hypothèse majeure est un piégeage direct à la surface du matériau d'adsorption. On distingue ainsi la chimisorption de la physisorption (Caria *et al.*, 2021).

### Applications opérationnelles pour la séquestration de la chlordécone

#### Une efficacité démontrée au laboratoire

Peu d'études ont porté sur l'efficacité de la séquestration des polluants organiques hydrophobes par des amendements en charbons actifs ou biochars dans les sols. Les travaux disponibles se concentrent généralement sur la réduction de

**Tableau 9.1.** Synthèse des résultats et limites des approches de remédiation des sols visant à diminuer la concentration en chlordécone dans les sols.

Approche	Résultats en laboratoire	Résultats en plein champ	Limites
<b>Thermique</b> (four à micro-ondes domestique)	Diminution de la concentration en CLLD Andosol : 90% si sec, 70% si 10% d'eau Nitisol : 70% si sec, 50% si 10% d'eau Diminution de la concentration en monohydroCLLD	Aucun	Effets négatifs des températures élevées atteintes dans le sol Transfert de la CLLD dans l'atmosphère (volatilisation) Adaptabilité aux conditions de terrain
<b>ISCR</b> (abaissement du potentiel redox)	Diminution de la lixiviation Diminution de la concentration en CLLD : 74% dans les nitisols et 20% dans les andosols, avec formation de divers produits de transformation	Réduction du transfert sol-plante pour différentes cultures étudiées Diminution de l'entraînement par l'eau Diminution de 68% de la CLLD dans les nitisols Pas de données pour les andosols	Absence de données sur les effets à long terme et le devenir des produits de transformation dans l'environnement Disponibilité des amendements Acceptabilité par les utilisateurs (maîtrise des techniques, protections, charge de travail supplémentaire, etc.) Pas testé sur une superficie supérieure à 100 m <sup>2</sup>
<b>Microbiologique</b> (souche isolée ou consortium bactérien ; avec catalyseurs en laboratoire)	Diminution de la concentration en CLLD (voire élimination complète) et formation de diverses familles de produits de transformation	Dégradation naturelle avérée Bioremédiation stimulée non testée	Conditions de laboratoire très éloignées de celles prévalant dans le milieu naturel Mécanisme nécessitant l'absence d'oxygène et la présence d'agents réducteurs Absence de données sur les propriétés de la plupart des familles de produits de transformation
<b>Phytoremédiation</b> (par phytoextraction)	Très faible taux de transfert vers <i>Miscanthus</i> de la CLLD ajoutée à un sol non représentatif de sols antillais	Transferts CLLD sol-cultures vivrières et arbres	Très faibles taux de transfert sol-plantes étudiées Récolte et gestion de la biomasse contaminée

CLLD : chlordécone; ISCR : *in situ chemical reduction*.

la biodisponibilité des contaminants vis-à-vis des végétaux et des invertébrés du sol. Ainsi, Paul et Ghosh (2011) ont mis en évidence une réduction significative des concentrations totales en PCB, autres polluants hydrophobes polychlorés, dans des vers de fumier après l'ajout de charbon actif dans des sols contaminés. À titre d'exemple, un amendement en charbon actif (jusqu'à 2%) de sol contaminé par un mélange de PCB a permis de réduire de 68 à 94% les concentrations totales en PCB dans les vers de fumier après 28 jours. Des tests de bio-accumulation à long terme ont confirmé la capacité de séquestration des polluants par le charbon actif, même après une maturation de 19 mois du sol.

Pour la chlordécone, seules des données sur l'emploi de biochar et de charbon actif en conditions contrôlées de laboratoire, ont été publiées. Une nette différence d'efficacité a été obtenue d'un matériau à un autre, pouvant s'expliquer par leurs caractéristiques physiques, notamment de porosité, et une chimie de surface (groupes fonctionnels) différente (Ranguin *et al.*, 2020, 2021). La nécessité d'une surface poreuse de plus de 650 m<sup>2</sup>/g est recommandée (Stephan *et al.*, 2023). Pour les matériaux les plus efficaces, une séquestration de plus de 85% (réduction de disponibilité environnementale et essai *in vivo* de biodisponibilité) a été observée (Stephan *et al.*, 2022; Stephan *et al.*, 2024). La mise en œuvre de cette stratégie consiste à amender l'horizon supérieur du sol par la matrice séquestrante, et à l'homogénéiser mécaniquement. Dans les approches de laboratoire, pour le biochar et le charbon actif, le sol est humidifié (80% de la capacité au champ). Une phase de maturation (*ageing*) de la matrice est nécessaire après l'amendement et avant l'utilisation du sol. Si la maturation peut être efficace dès les premières minutes suivant l'amendement, sa pleine efficacité semble acquise après un délai de trois mois (en conditions de laboratoire) pour le biochar ou le charbon actif (Delannoy, 2023). Un essai en conditions *in situ* pour caractériser la cinétique de cette séquestration est en cours.

Pour le biochar et le charbon actif, l'efficacité de la séquestration dépend du taux d'amendement et de la granulométrie (Stephan *et al.*, 2023). Ainsi, les biochars de Sargasses commencent à être efficaces *in vitro* dès lors qu'ils sont ajoutés au sol à raison de 2% avec une granulométrie inférieure à 150 µm. Cet ajout apparaît conséquent au regard d'amendement à de seules fins agronomiques, mais reste nécessaire pour séquestrer efficacement la chlordécone. En effet, ces modalités permettent de réduire de plus de 70% la disponibilité environnementale de la chlordécone sur un andosol et un nitisol prélevés en zone contaminée (Stephan *et al.*, 2022). La réduction du transfert vers les végétaux semble plus importante avec près de 90% de réduction du transfert après l'emploi de charbons actifs commerciaux (amendés à 2%) sur du sol prélevé en zone contaminée par la chlordécone (un nitisol et un andosol). Dans les mêmes conditions, des réductions d'apport de 30 à 37% ont été mesurées pour les œufs et le foie respectivement (Caria *et al.*, 2021) de poules pondeuses exposées à des particules de sols contaminés amendés.

Les études récentes convergent pour montrer l'importance de la surface poreuse totale dans la séquestration, mais également sa qualité. Ainsi, la micro- et la mésoporosité apparaissent particulièrement importantes pour obtenir une réduction de transfert de la chlordécone du sol à l'animal, au végétal ou à l'eau (Ranguin *et al.*, 2020, 2021). Secondairement, les groupes fonctionnels de surface permettent d'établir des interactions chimiques avec la chlordécone dont l'énergie de liaison dépend des conditions

de pH et de l'état de charge de ces groupes fonctionnels (Durimel *et al.*, 2013). Ces résultats positifs obtenus en conditions de laboratoire doivent être confirmés en conditions réelles de terrain.

### **Une efficacité *in situ* observée, mais à approfondir**

Pour la chlordécone, les applications de terrain n'ont concerné jusqu'à présent que l'utilisation du compost. L'ajout de compost dans le sol à hauteur de 5 % a permis de réduire l'accumulation de la chlordécone dans les organes récoltés de 7 % pour le radis, de 23 % pour la laitue et de 51 % pour le concombre sur un andosol (Clostre *et al.*, 2014b; Woignier *et al.*, 2012, 2016). Cette réduction d'accumulation permet, suivant les concentrations en chlordécone initiales du sol et l'organe récolté, de produire des denrées alimentaires conformes (c'est-à-dire en dessous des limites réglementaires). Il convient de préciser qu'un apport de 5 % sur 30 centimètres de sol correspond à environ 70 tonnes de matière sèche de compost par hectare dans un andosol (densité apparente d'environ 0,5), ce qui constitue une dose agronomiquement très élevée. Dans un sol plus dense (1,4 environ), 70 tonnes de matière sèche par hectare ne représenteraient qu'environ 2 % de la masse de sol, et atteindre 5 % requerrait près de 200 tonnes de matière sèche par hectare (environ 700 tonnes de compost frais). Ces ordres de grandeur soulignent la difficulté d'envisager de tels apports à grande échelle. De même, ces études doivent être approfondies en prenant en compte la dynamique temporelle de cette réduction du transfert vers les plantes. Il est en effet possible qu'avec le temps et la dégradation des matières organiques, l'opération d'amendement soit à renouveler, voire à être couplée à d'autres techniques de remédiation et de gestion de la pollution.

Si l'intérêt de la stratégie de séquestration est démontré en conditions de laboratoire, la recherche actuelle tend à investiguer (i) les caractéristiques du matériau séquestrant nécessaires pour assurer une réduction de transfert aux biotes *in situ* et (ii) les conditions socio-économiques et environnementales (impact carbone, émission de gaz à effet de serre) nécessaires à la mise en place de filières locales de production de compost ou de biochar. Les ressources de biomasses peu valorisées (bagasse, noix de coco, bancs de sargasses, etc.) pourraient potentiellement contribuer à alimenter cette filière pour produire des matériaux séquestrants d'origine locale. Ainsi, des ateliers de compostage ont été construits récemment, et des financements d'installations de pyrolyse sont également en cours. Ces solutions intégrées permettraient finalement de répondre à plusieurs autres enjeux locaux (gestion de la biomasse permettant de boucler les cycles biogéochimiques, gestion des pollutions de l'air par valorisation des algues échouées, création d'emplois, amélioration de la qualité sanitaire, etc.).

### **Avantages et limites de la séquestration de la chlordécone**

Une des questions en suspens est le coût de cette stratégie d'amendement *in situ* qui n'est pas totalement élucidée, car extrêmement dépendante du type de matériau produit et du procédé industriel employé. Dans tous les cas, cette évaluation devra se baser sur l'ensemble des coûts et bénéfices, notamment ceux liés à la gestion du risque, aux impacts sanitaires, aux suivis de qualité des aliments et aux analyses et études pour mesurer les impacts sur les populations, de façon similaire aux approches de remédiation par dégradation. Ainsi, une étude économique et une analyse du cycle de vie en amont s'avèrent nécessaires pour mieux évaluer le coût

d'opportunité de ces stratégies et leur intégration dans une politique publique. Basée sur la sorption des polluants organiques, la réversibilité de la séquestration est un facteur déterminant à investiguer. Bien que certaines données de laboratoire soient issues d'observations continues sur 12 mois (Delannoy, 2023), cette immobilisation devrait être évaluée sur plusieurs années. Il s'agit également de caractériser la variabilité de la demi-vie de ces matériaux dans le sol.

L'ajout de compost comme du biochar et du charbon actif est sans doute impactant pour la vie du sol et sa fonctionnalité (Delannoy, 2023 ; tableau 9.2). De même, il faut noter que ces matériaux adsorbants ne sont pas spécifiques des polluants et peuvent donc adsorber d'autres molécules ou éléments, notamment certains nutriments essentiels à la fertilité des sols, limitant dès lors leur disponibilité pour les organismes (Ahmad *et al.*, 2014). La source même à l'origine du compost et du biochar est à considérer pour éviter des contaminations additionnelles du sol. C'est le cas par exemple pour l'arsenic présent dans la sargasse, qui pourrait être concentré lors de la fabrication de ce biochar. Un traitement spécifique du biochar doit donc être envisagé avant son application au sol. Ce procédé impliquerait cependant une dépense énergétique et un coût supplémentaire. Par ailleurs, en rendant la chlordécone moins disponible pour les organismes du sol, une séquestration trop efficace pourrait diminuer sa biodégradation par la microflore, risquant ainsi de ralentir son élimination naturelle (alors que son temps de résidence apparaît très élevé). Cette perspective ouvre une piste de recherche : déterminer si la réduction durable du flux de chlordécone vers le biote (obtenue par séquestration au prix d'un temps de résidence plus long) est plus pertinente, du point de vue sanitaire et écologique, qu'une stratégie visant d'abord la diminution des concentrations et du stock de chlordécone dans le sol.

Dans le cadre d'un processus industriel, la stabilité des caractéristiques des lots de biochar ou de composts obtenus est nécessaire pour garantir des niveaux d'efficacité

**Tableau 9.2.** Synthèse des résultats et limites des approches de séquestration de chlordécone dans les sols contaminés.

Résultats en laboratoire	Résultats en plein champ	Limites
<b>Séquestration par apport de biochar et charbon actif</b>		
Diminution de la concentration en CLD : plantes (> -95 %) et animaux (-30 à -57 %)	En cours d'obtention (ANR Pyrosar)	Approvisionnement à sécuriser, mais contraintes de qualité
Nécessite un amendement de 2 %, granulométrie < 150 µm, surface spécifique active > 650 m <sup>2</sup> /g)		Coûts énergétiques et qualité des biochars
		Durée de l'effet biochar/charbon actif
		Acceptabilité du traitement
<b>Séquestration par apport de compost</b>		
Diminution du transfert vers eau et plantes cultivées	Diminution : -7% (radis) à -51% (concombre)	Durée de l'effet compost
Effet chimique et physique (adsorption et diminution de la porosité des andosols)		(labilité des matières organiques)

CLD : chlordécone ; ANR Pyrosar : *Sargassum valorization by pyrolysis – application for food safety.*

constants de ces matériaux. Les caractéristiques physico-chimiques du sol contaminé doivent également être prises en compte pour mieux prédire l'efficacité de séquestration obtenue par l'application de ces méthodes. Si les résultats de transfert sont consolidés, un outil d'aide à la décision pour les productions végétales et animales pourra être développé, intégrant l'accompagnement aux pratiques d'amendement et aux nouveaux choix de cultures et de productions. En pratique, il importera également d'accompagner les populations dans l'adoption de cet outil et des bonnes pratiques correspondantes, en associant une approche sociale afin d'assurer une adoption effective des solutions proposées.

## ► Agir pour réduire l'exposition des populations humaines et animales au moyen de la qualité sanitaire des aliments

### Approches permettant de réduire l'exposition humaine par l'eau de boisson

Afin de potabiliser les eaux brutes de surface, des procédés de traitement conventionnels, tels que la coagulation-floculation et la filtration, sont couramment utilisés, mais ils s'avèrent inefficaces pour éliminer un certain nombre de contaminants organiques, dont des pesticides comme le chlordécone. Pour l'heure, les technologies avancées telles que la technologie des membranes (osmose inverse) et les processus d'oxydation avancés ont le potentiel de les éliminer, mais il existe des freins à leurs utilisations liés à la fois à leur coût et à la complexité de leur exploitation pratique. Aussi, les procédés d'adsorption utilisant le charbon actif constituent une méthode privilégiée pour le traitement à grande échelle des eaux contaminées par la chlordécone. Ainsi, dès 2000, certaines stations de traitement des eaux, telles que Belle-eau-Cadeau, en Guadeloupe, ont été équipées de filtres à charbon actif. Afin d'optimiser le traitement des eaux par des charbons actifs (Durimel *et al.*, 2013), dont les propriétés sont adaptées à l'adsorption de la molécule de chlordécone, des études d'isothermes d'adsorption de la chlordécone ont été réalisées sur des charbons actifs présentant différentes propriétés de surface et de texture, et préparés à partir de bagasse de canne à sucre. Compte tenu de la taille de la molécule, la présence de nanopores permet l'adsorption de la molécule au sein du réseau poreux du charbon actif. Ces résultats ont été corrélés à des études de modélisation moléculaire confirmant les interactions de la chlordécone avec les groupements fonctionnels carboxyliques de surface du charbon actif. Globalement, les meilleures conditions pour l'adsorption de la chlordécone seraient atteintes en présence de groupements de surface acides (Melchor-Rodriguez *et al.*, 2018).

Par ailleurs, pour augmenter la capacité d'adsorption de la chlordécone sur les charbons actifs, des nanoparticules d'oxyhydroxyde de fer/oxyde de fer (FeO-Nps) ont été immobilisées *in situ* sur la surface du charbon actif (Rana *et al.*, 2017). Une augmentation de 64% de la capacité moyenne d'adsorption de la chlordécone sur le composite FeO-Nps-charbon actif a été obtenue comparativement au charbon actif seul. Enfin, une étude (Deyris *et al.*, 2023) suggère que des matériaux végétaux naturels, tels que les poudres de racines d'espèces exotiques envahissantes aquatiques et de zones humides (*E. crassipes*, *P. stratiotes*, *F. japonica*) ainsi que le marc de café et de thé vert présenteraient des capacités de biosorption de la chlordécone dans des solutions aqueuses.

Pour le traitement des eaux, Alsbaiee *et al.* (2016) ont utilisé la  $\beta$ -cyclodextrine connue pour encapsuler les micropolluants et former des complexes avec ces derniers au lieu des charbons actifs, dont la régénération peut être coûteuse. Ils ont ainsi produit un polymère de cyclodextrine mésoporeux, et ont montré qu'il pouvait être plus facilement régénéré que les charbons actifs, par simple lavage. Rana *et al.* (2016) ont montré que les  $\beta$ - et  $\gamma$ -cyclodextrines forment des complexes stables insolubles dans l'eau et dans la plupart des solvants organiques et pouvant être simplement filtrés pour obtenir une eau traitée. Un matériau hybride (charbon actif- $\gamma$ -cyclodextrine) a été produit et constitue un meilleur adsorbant pour la chlordécone dans l'eau que le charbon actif seul.

Une des limites pratiques liées à l'utilisation de filtres à charbon actif dans les stations de traitement des eaux réside dans le suivi des installations (Procaccia, 2023), avec des difficultés ou parfois des retards dans le changement des filtres. Ceci conduit à des non-conformités quant à la qualité des eaux distribuées (Procaccia, 2023). Ainsi, il serait souhaitable de pouvoir disposer d'une méthode pratique, rapide, bon marché et robuste pour détecter la chlordécone dans l'eau. Dans cette optique, Della-Negra *et al.* (2024) ont développé une cage moléculaire fluorescente, à base d'hémicryptophane, permettant d'estimer des concentrations de chlordécone dans l'eau sur cinq ordres de grandeur (0,01-1000  $\mu\text{g/l}$ ). Un instrument de détection rapide de la chlordécone utilisant les  $\beta$ - ou  $\gamma$ -cyclodextrines ou l'hémicryptophane doit être mis au point. Des travaux montrent que la cage d'hémicryptophane peut complexer efficacement la chlordécone dans l'eau, permettant ainsi son élimination par une simple filtration. Un lavage ultérieur du complexe précipité par une solution aqueuse basique conduit à la décomplexation de la chlordécone qui passe dans le filtrat basique, régénérant ainsi la cage d'hémicryptophane (Della-Negra *et al.*, 2024; Long *et al.*, 2019).

De manière générale, l'utilisation de charbons actifs pour la potabilisation des eaux polluées par la chlordécone a montré son efficacité en matière de dépollution. Néanmoins, un certain nombre de limites existent. Une des questions restant posée concerne le devenir des charbons actifs usagés ou de la biomasse contaminée, utilisée pour le traitement des eaux (Ranguin *et al.*, 2017). Une autre question restant sans réponse, et qui doit être traitée, concerne l'approvisionnement en eau dans les sources aux abords des routes, qui pour une grande part sont polluées par la chlordécone et ne sont pas traitées (Desmazes, en préparation).

## **Approches permettant de réduire le transfert vers les sédiments, la flore et la faune**

Le transport de l'amont (terre) vers l'aval (mer) de la chlordécone du sol s'opère de plusieurs manières lors des phénomènes de lixiviation (transport en phase dissoute) lors du drainage par les eaux d'infiltration entraînant la contamination des autres compartiments aquifères et celles des horizons de sols en profondeur (Mottes *et al.*, 2020). Ainsi, le contaminant transite avec les eaux de drainage et de ruissellement, via les cours d'eau ou les eaux souterraines en direction de la mer. Les facteurs accentuant les transports de la chlordécone de la terre vers la mer sont la pluie et les drainages naturel et anthropique. Une attention particulière est à porter sur les caractéristiques (nature) et le niveau de couverture des sols comme variables susceptibles d'aggraver le transfert de contamination vers les ressources en eaux (Sanchez *et al.*, 2023).

Dans les eaux marines, la composition des sédiments, les dynamiques sédimentaires et les cortèges minéralogiques peuvent expliquer les différences de contamination des sédiments par la chlordécone entre les bassins versants (Robert, 2012). La chlordécone a une grande résistance à la décomposition ou dégradation et une biodécomposition limitée (Kumari *et al.*, 2024). Afin de prévenir la dispersion de la chlordécone et remédier à la pollution sédimentaire aquatique, des mesures de confinement ou de décontamination (*ex-situ*) de sédiments peuvent être testées. Cette dernière reste un processus énergivore et coûteux. Elle nécessite en outre une première étape de dragage et de transport des sédiments en vue de leurs traitements (Perelo, 2010). Dans le projet Piegeachlor (piégeage des composés halogénés lipophiles organiques rémanents; Caria *et al.*, 2021), des procédés de recouvrement *in situ* de la couche sédimentaire par des géosorbants non contaminés (par exemple, sables, limons, argiles, charbons actifs, biochars) associés aux phénomènes d'atténuation naturelle (Perelo, 2010) ont également été effectués à l'image de ce qui a été mis en œuvre dans la baie de Chesapeake (au large de la zone historique de production de la chlordécone aux États-Unis), où à l'arrêt de la production à Hopewell, les sédiments pollués ont été recouverts par les sédiments indemnes. La question de l'efficacité dans le temps de cette mesure est encore à évaluer, d'autant que le processus de sédimentation est dynamique et affecte aussi l'intégrité de la couche sédimentaire non contaminée.

La bio-accumulation<sup>28</sup> de la chlordécone dans les organismes aquatiques dépend du milieu d'exposition. Ainsi, il existe un gradient décroissant de contamination à la chlordécone dans les organismes aquatiques depuis l'amont (proche des exutoires) vers l'aval jusqu'au large du littoral, avec des modulations en fonction des traits de vie des organismes (migrations ou physiologie). D'après Bodiguel *et al.* (2011), une bio-accumulation différente est observée pour une même espèce selon son habitat (cas de la carangue grasse, *Chloroscombrus chrysurus*, et du crabe lénée, *Callinectes danae*) : des individus aux caractéristiques comparables sont plus contaminés lorsqu'ils sont proches des exutoires des rivières comparés à ceux qui en sont éloignés. Le lieu de vie et le mode d'alimentation jouent donc un rôle important sur le niveau de contamination en chlordécone des organismes (Coat *et al.*, 2011). Une diminution des niveaux de contamination a été observée au cours de la vie de la langouste blanche (*Panulirus argus*) : elle serait principalement expliquée par l'évolution de son milieu de vie, en lien avec la migration de l'espèce vers le large entre les phases juvéniles et adultes. Selon l'étude de Dromard *et al.* (2016) qui prend en compte la région, le groupe taxonomique et les facteurs écologiques comme l'habitat, les crustacés sont plus sensibles à la contamination que les poissons et les mollusques.

En plus de la chlordécone solubilisée dans l'eau, les matières en suspension (MES) venant de la colonne d'eau seraient l'une des principales sources conduisant à la bio-accumulation de chlordécone (sédiment, biofilm, macroalgues, herbiers, litière). Les MES jouent un rôle important dans l'introduction de la molécule par la voie alimentaire (Guene *et al.*, 2015; Dromard *et al.*, 2015). Outre une bioconcentration (de l'eau vers l'organisme), une bio-amplification le long des réseaux trophiques (Coat *et al.*, 2011),

---

28. Voir la différence entre « bio-accumulation » et « bioconcentration » dans le glossaire ou sur <https://joint-research-centre.ec.europa.eu/eu-reference-laboratory-alternatives-animal-testing-eurl-ecvam/alternative-methods-toxicity-testing/validated-test-methods-health-effects/aquatic-bioconcentration-bioaccumulation>.

depuis les producteurs primaires jusqu'aux consommateurs secondaires (facteur de bio-amplification trophique estimé entre 1,4 et 1,9) est également constatée. Des mesures de bioconcentration, de bio-accumulation et de bio-amplification ont permis d'estimer des facteurs de concentration par rapport à la concentration initiale dans l'eau de 6 000 pour le phytoplancton, de 21 600 pour les invertébrés et de 60 200 pour les poissons (Unep, 2006 ; Colombano *et al.*, 2009).

À ce stade, les mesures d'atténuation (séquestration, remédiation, dégradation) de la chlordécone dans les matrices amont au milieu littoral sont menées principalement à l'échelle des laboratoires et ne permettent pas encore de limiter à grande échelle les transferts de la chlordécone dans les eaux douces et marines pour garantir la qualité de l'eau et atténuer les phénomènes de bio-accumulation et biomagnification\* dans la faune et la flore du littoral. Il paraît prioritaire de mieux cartographier la dynamique des MES afin de préciser leur rôle dans la contamination des organismes aquatiques et élaborer des mesures permettant de réduire le transfert dans les sédiments à l'échelle d'un territoire.

De manière générale, des connaissances et des données de surveillance de la dynamique de la chlordécone dans l'environnement selon un *continuum* terre-mer sont encore nécessaires pour envisager d'éventuelles mesures permettant à terme de réduire le transfert vers les sédiments, la flore et la faune marine, ainsi que l'exposition des populations humaines.

## **Approches permettant de limiter l'exposition par une gestion de la qualité sanitaire des productions agricoles**

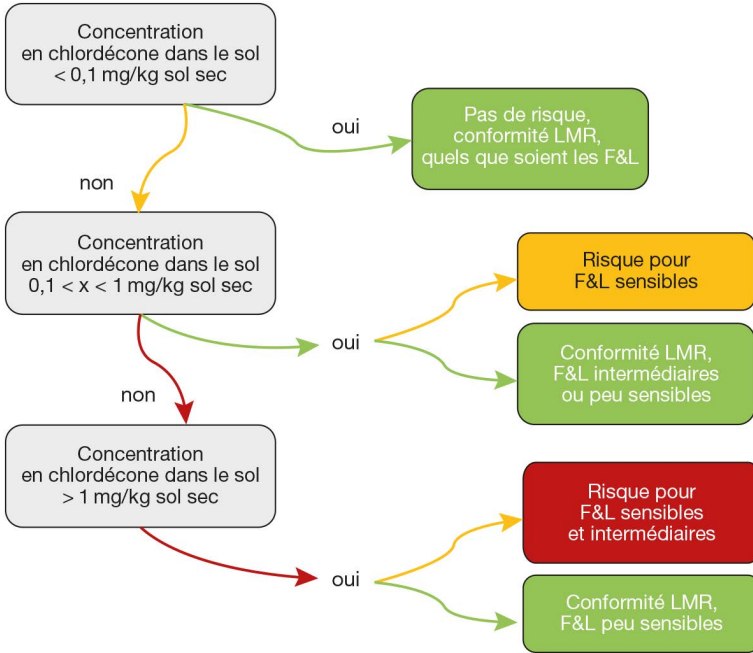
La principale voie d'exposition à la chlordécone des populations antillaises est la voie alimentaire. Limiter la contamination des denrées animales et végétales est donc un enjeu principal de santé publique. Les connaissances acquises au fil des plans d'action ont permis de proposer des « solutions » de différents types pour accompagner la production de denrées alimentaires et permettre une commercialisation de produits agricoles ou une autoconsommation en réduisant fortement les risques pour les consommateurs.

### **Réduire le transfert vers les productions végétales**

#### **Outils de gestion et recommandations**

Les connaissances actuelles sur le transfert de la chlordécone du sol vers les végétaux ont permis de calculer, à partir des LMR, des limites de contamination du sol au-delà desquelles la qualité sanitaire du végétal consommé n'est plus garantie (Clostre *et al.*, 2017). Ce calcul a été réalisé pour chaque production végétale. Dans une logique de gestion d'un risque qui serait maximum (exposition maximale), les limites dans le sol ont été déterminées pour les différentes catégories de réponse des végétaux, en ne retenant que la limite la plus contraignante, quelle que soit la production considérée de la catégorie et quel que soit le type de sol. Ainsi, les productions sensibles (chapitre 5) peuvent être cultivées sans risque de dépassement de la LMR sur un sol ne dépassant pas 0,1 mg/kg de sol sec (SS). Cette valeur est calculée à 1 mg/kg SS pour les cultures intermédiaires. Les cultures peu sensibles peuvent être cultivées sans risque de dépassement, quelle que soit la teneur en chlordécone du sol (au-delà de 1 mg/kg SS) (Clostre *et al.*, 2017). Ces limites pour le sol garantissent la conformité des végétaux et permettent aux producteurs d'anticiper le risque de contamination

de leurs productions de fruits et légumes dès la plantation (et non de subir le résultat lors de la récolte). Ainsi, en fonction de l'analyse de sol, et à la plantation, le producteur peut choisir les productions à cultiver sans risque de dépassement de la LMR de ses récoltes (figure 9.2). Il peut ainsi organiser ses différentes productions selon le contexte de ses parcelles. Cet outil est évolutif. Si les LMR ou les objectifs de qualité sanitaire venaient à changer, les limites de décision pour les niveaux de pollution des sols pourraient être révisées.



**Figure 9.2.** Représentation schématique de l'outil de gestion des productions végétales en fonction de la teneur en chlordécone du sol de la parcelle.

LMR : limite maximale de résidus; F&L : fruits et légumes.

**Impact pour les autoconsommateurs, les exploitations agricoles et les systèmes de production**

Un accompagnement des producteurs est réalisé dans le cadre du programme Jafa, animé par l'Ireps (Instance d'éducation et promotion de la santé) pour les deux îles<sup>29</sup>. Les jardins se trouvant en zone contaminée bénéficient d'une analyse de sol gratuite et de conseils de cultures, de préparation des productions et de diversification de l'alimentation.

En Martinique, les enquêtes réalisées au sein de la filière racines et tubercules ont montré que la pollution par la chlordécone n'était pas le seul facteur ayant abouti au déclin des volumes produits, observé depuis les années 1980 (Clostre *et al.*, 2015b). La majorité des producteurs de racines et tubercules interviewés citent finalement peu la contrainte chlordécone. Les pratiques de diversification des cultures, quasi

29. <https://jafa.promotion-sante.gp/>.

généralisées et en particulier avec des productions végétales intermédiaires ou peu sensibles à la chlordécone, leur permettent de poursuivre et de réorganiser leurs rotations et leurs productions lorsque certaines de leurs parcelles sont contaminées.

### **Recommandations pour la préparation des fruits et légumes**

Du fait d'une forte différence de teneur en chlordécone entre la peau et la pulpe de certains végétaux (racines, tubercules et cucurbitacées), un épluchage plus épais est recommandé (Clostre *et al.*, 2014a) pour ces légumes (de 5 mm pour les tubercules, ce qui est proche de la pratique classique pour les ignames, par exemple). Par ailleurs, il est conseillé de maintenir les mesures d'hygiène classique, en lavant tous les fruits et légumes avant leur consommation. De même, il est recommandé lors de la commercialisation par les producteurs, de disposer leurs produits dans des contenants propres, indemnes de sol pollué. Tout contact avec des particules de sol pollué après la récolte peut aboutir à une analyse positive du végétal lors d'un contrôle. La cuisson à l'eau ne modifie pas la teneur en chlordécone du végétal. Il n'est donc pas utile de faire bouillir trop longtemps les produits végétaux, au risque de dégrader leur qualité organoleptique et nutritionnelle.

### **Limites**

Un outil de gestion a été mis au point et nécessite un accompagnement régulier des producteurs que ce soit par les chambres d'agriculture, les Daaf ou les interprofessions. Une première étape est la cartographie de la pollution des parcelles de l'exploitation, une deuxième est celle du choix des productions végétales en fonction de leur teneur en chlordécone, une troisième est celle de l'adaptation des pratiques agronomiques, comme le choix des productions et l'assolement, l'amendement organique, etc.

Actuellement, un des freins majeurs de cet outil est qu'il n'intègre pas les PT de la chlordécone. Peu de données existent du fait de difficultés à analyser en routine ces molécules et du manque d'information sur leurs propriétés toxicologiques. À ce stade, peu d'hypothèses peuvent être formulées quant au transfert du sol vers les végétaux de telles molécules, à l'exception de la 5b-hydrochlordécone, plus mobile que la molécule mère et à niveau de toxicité proche (Clostre *et al.*, 2015a).

### **Réduction du transfert vers les animaux d'élevage**

La réduction des niveaux de contamination des denrées d'origine animale peut être favorisée en agissant à deux niveaux du transfert de la molécule vers l'animal : en limitant l'exposition des animaux à la chlordécone et en favorisant leur décontamination le cas échéant.

#### **Animaux terrestres**

– Réduire l'exposition des animaux

L'exposition des animaux terrestres à la chlordécone a notamment lieu au travers de l'ingestion de matrices environnementales contaminées. Différentes matrices peuvent être incriminées : le sol en cas d'élevage sur un sol contaminé (Jurjanz *et al.*, 2015; Collas *et al.*, 2020, 2023); l'aliment tel que le fourrage, les épluchures et autres résidus végétaux; et l'eau d'abreuvement, notamment lorsque les animaux boivent une eau en contact direct avec le sol (mares, par exemple) ou dans certaines ravines (Rochette *et al.*, 2020). Différentes études ont montré que la chlordécone du sol, une fois ingérée était bio-accessible dans le tractus digestif de l'animal quel que soit le type de sol,

c'est-à-dire que le sol «ne retient pas» la chlordécone qui peut être absorbée (Jondreville *et al.*, 2013; Bouveret *et al.*, 2013; Jurjanz *et al.*, 2014). Une autre étude a montré que la chlordécone est absorbée en quasi-totalité (Fournier *et al.*, 2017). Les solutions pour réduire l'exposition des animaux résident donc dans des stratégies permettant de limiter l'ingestion de matrices contaminées ou permettant de réduire l'absorption de la chlordécone.

– Limiter l'ingestion de matrices contaminées

Différents facteurs peuvent influencer le niveau d'ingestion de sol par les animaux d'élevage, notamment l'offre fourragère plus ou moins limitante (pouvant favoriser un pâturage plus ras et donc un risque d'ingestion de sol) et les précipitations ou inondations de la parcelle entraînant une salissure du couvert végétal (effet *splash* pouvant être amplifié par le piétinement des animaux). La sensibilité à l'ingestion de sol diffère également entre les espèces, notamment en raison de leur comportement et de leur régime alimentaire. Ainsi, l'activité de fouissage du porc ou de picage de la volaille rend ces espèces particulièrement vulnérables au risque d'exposition, et à l'ingestion de sol en situation d'élevage plein air.

Les pratiques d'affouragement et de pâturage constituent des leviers d'actions pour réduire l'exposition des animaux à la chlordécone, au travers du fourrage et du sol. Les parties basses du fourrage (premiers entre-nœuds) proches du sol sont les plus contaminées (Feidt *et al.*, 2022a). En cas de fauche (pour un affouragement en vert, par exemple), il est donc recommandé de couper le couvert végétal à 20 centimètres de hauteur (s'il est prélevé sur une parcelle contaminée). En cas de pâturage, une offre fourragère abondante, couplée à une surface et une hauteur d'herbe non limitante permet aux animaux de couvrir leurs besoins tout en maintenant une distance avec le sol (Collas *et al.*, 2019, 2020; Jurjanz *et al.*, 2017). En parallèle, l'objectif est de limiter les impacts du piétinement sur la végétation. Pour les volailles élevées au sol, le maintien d'un couvert végétal dense permet de réduire l'ingestion de sol. De même, la distribution d'un aliment, sans contact direct avec le sol, dans un récipient propre à l'abri des projections provoquées par le comportement de grattage et picage des volailles, permet de réduire l'ingestion de sol. Concernant l'abreuvement, il est recommandé d'utiliser de l'eau potable ou de l'eau de pluie dans des abreuvoirs propres.

– Limiter la bio-accessibilité de la chlordécone ingérée au travers du sol

Comme cela est développé précédemment dans ce chapitre, cette stratégie repose sur la limitation de la bio-accessibilité de la chlordécone dans l'intestin de l'animal grâce à la formation dans le sol, ultérieurement ingéré, de complexes chlordécone-matières organiques de type biochar ou charbon actif, séquestrant la chlordécone (Delannoy *et al.*, 2020). Cette stratégie n'est pas encore mise en pratique sur le terrain, mais semble être cependant prometteuse, notamment pour de petites parcelles (étant donné les coûts engendrés), avec la condition de ménager une période de contact séquestrant-sol suffisamment longue (Delannoy *et al.*, 2020).

En parallèle, l'idée de séquestrer la chlordécone directement dans le tractus de l'animal a été testée chez le porcelet, au moyen de l'ingestion de charbon actif concomitamment à de l'aliment contaminé en chlordécone (Delannoy *et al.*, 2020), mais le temps de contact n'est pas suffisant pour que le séquestrant puisse avoir une action, ce qui est cohérent avec la nécessité d'un temps de maturation du séquestrant de plusieurs semaines.

– Favoriser leur décontamination

Une fois dans la circulation sanguine générale, la chlordécone se distribue dans les différents tissus de l'organisme. Elle a un comportement non lipotrope, c'est-à-dire qu'elle ne se fixe pas spécifiquement sur les graisses. Elle présente en outre un fort tropisme hépatique contrairement aux autres contaminants organochlorés, ce qui entraîne un gradient de concentrations de chlordécone par gramme de matière fraîche dans les différents tissus comme suit : on la retrouve dans le foie, plus que dans le gras ; et dans le gras, plus que dans le muscle, avec différentes distributions entre les types de muscles et de tissus gras (Fourcot *et al.*, 2021 ; Fourcot, 2020 ; Jurjanz *et al.*, 2020). Plusieurs études chez les ruminants (caprin, ovin, bovin) comme chez les monogastriques (porcin, volaille) montrent que l'organisme parvient à éliminer la chlordécone au cours du temps. Ce processus est la résultante des mécanismes de métabolisme et d'excrétion. Le métabolisme correspond à la transformation de la chlordécone principalement en chlordécol. La voie majoritaire d'excrétion pour la chlordécone et son métabolite est la voie fécale, largement devant la voie urinaire : 2 % de la dose retrouvée dans les urines contre 20 à 54 % dans les fèces au bout de 84 jours de décontamination chez le porc *versus* l'ovin (Fourcot *et al.*, 2020 ; Saint-Hilaire *et al.*, 2021).

Les valeurs de demi-vies indiquées dans le tableau 9.3 suggèrent des temps de décontamination compatibles avec les durées d'élevage de ces animaux, même si cela suppose un arrêt de la consommation des produits pour le cas des œufs ou du lait pendant la période de décontamination. Les différences de durées entre catégories d'animaux peuvent s'expliquer par un effet dilution chez les animaux en croissance (chevreau *versus* chèvre adulte, par exemple) (Fournier *et al.*, 2017), par des quantités différentes de chlordécone exportées au travers d'une production d'œuf ou de lait (par exemple, cas de l'intensité de ponte de la poule pondeuse *versus* celle de la cane) (Jondreville *et al.*, 2014a, 2014b).

**Tableau 9.3.** Demi-vie (en jours) de la chlordécone (CLD) chez différentes espèces.

Espèces	Matrices	Demi-vie de la CLD (j)	Références
Poule	serum	5,1	Jondreville <i>et al.</i> , 2014a
	œuf	5,5	
Canard	œuf	19	Jondreville <i>et al.</i> , 2014b
Porc	serum	52	Fourcot <i>et al.</i> , 2020
Caprin en croissance	serum	14	Lastel <i>et al.</i> , 2016
Caprin adulte non lactant	serum	20	Fournier <i>et al.</i> , 2017
Ovin adulte non lactant	serum	24	Saint-Hilaire <i>et al.</i> , 2021
Bovin non lactant	serum	43	Mahieu <i>et al.</i> , 2015
Bovin en lactation	lait	20-25 (estimée d'après lecture graphique)	Smith et Arant, 1967

– Stratégie de décontamination et accompagnement sur le terrain

Les demi-vies du tableau 9.3 montrent qu'en évitant tout contact de l'animal avec la source d'exposition (par exemple, avec un élevage en bâtiment ou en box, avec une protection du sol et avec un apport d'aliment non contaminé), ce dernier voit sa teneur

en chlordécone décroître. En fonction de la physiologie de l'animal et de son niveau de contamination initial, le temps nécessaire pour atteindre un niveau inférieur à la LMR peut varier. Ainsi, pour les espèces à durée d'élevage courte, mais à durée de demi-vie de la chlordécone assez longue, une décontamination semble difficilement envisageable (cas du porc). À l'opposé, pour les espèces à durée d'élevage assez longue, telles que les ruminants pour lesquels la décontamination est assez rapide comparée à la durée d'élevage, la stratégie de décontamination s'applique avec succès. Ainsi, un outil d'aide à la décision (OAD) basé sur des données toxicocinétiques (modélisation pharmacocinétique basée sur la physiologie, ou *physiologically based pharmacokinetic* [PBPK]) a été validé sur le terrain en Guadeloupe et Martinique entre 2021 et 2022. Cet OAD a été construit chez le ruminant adulte à partir d'un modèle général qui intègre l'exposition en amont, le devenir de la chlordécone chez l'animal et l'excrétion (Fournier *et al.*, 2022), ce qui permet de connaître la quantité de chlordécone rejetée par les animaux en décontamination. L'OAD est utilisé depuis 2023 par les organismes de veille sanitaire sur chacune des deux îles dans le cadre de l'accompagnement des éleveurs en zone contaminée. Le principe est qu'à partir d'une prise de sang, le statut de contamination de l'animal est déterminé et la durée de décontamination est ajustée, en lien avec ce statut de contamination et le poids vif de l'animal (Feidt *et al.*, 2022b). Le respect de cette période de décontamination permet d'obtenir systématiquement à l'abattage une carcasse conforme ( $[CLD] < LMR$ ), en adéquation avec une filière « zéro chlordécone » (correspondant à une concentration de chlordécone non quantifiable). Depuis 2023, cet OAD est appliqué aux élevages suivis et les données recueillies lors de son utilisation permettent la consolidation de l'outil.

– Éviter la recontamination du milieu au travers des déjections

Des études menées en batch ont montré que la méthanisation permettrait de dégrader la chlordécone des déjections animales, avec un taux d'abattement de 50 % en conditions mésophiles et de 90 % en conditions thermophiles (Martin *et al.*, 2023). Les premiers travaux menés en système continu confirment une dégradation possible de la chlordécone par méthanisation (Alnajjar, 2024). Cette étude a également montré la formation de produits de transformation (chapitre 2) actuellement non réglementés, qu'il serait nécessaire d'étudier davantage (devenir dans les différents compartiments de l'environnement, toxicité) afin de mieux évaluer les conséquences.

La solution de compostage de déjections contaminées n'a pas été étudiée à ce jour, mais l'on peut se référer au paragraphe où ce processus est évoqué (chapitre 9, « Une efficacité *in situ* observée, mais à approfondir »).

– Perspectives

Les travaux menés jusqu'à ce jour ont permis de proposer des solutions d'accompagnement pour réduire l'exposition du consommateur au travers des denrées d'origine animale, notamment pour les bovins. Cependant, des études sont encore nécessaires pour appréhender la dynamique de contamination-décontamination aux différents stades physiologiques (gestation, lactation, croissance) et chez différentes espèces (ovins, caprins). Développer le même type de modèle intégratif que celui ayant donné lieu à la construction de l'OAD pour les bovins adultes pour les espèces chez lesquelles la demi-vie de la chlordécone est plus longue (porcin) ou pour des élevages donnant lieu à une production quotidienne de denrées (poules pondeuses) permettrait de simuler des situations et proposer des stratégies limitant la contamination d'un plus

large panel de denrées d'origine animale (Thiébaud, 2024). Par ailleurs, il a été observé sur le terrain une certaine variabilité au niveau des cinétiques de décontamination des animaux d'un même troupeau (Mahieu *et al.*, 2015). Pour affiner les prévisions issues des simulations de l'OAD, il est donc important de travailler sur les composantes de cette variabilité interindividuelle.

Concernant la gestion et le traitement des effluents d'élevage, la faisabilité et l'organisation logistique de la collecte, du traitement par méthanisation et du devenir du digestat restent à définir en lien avec les acteurs locaux. Ce type de traitement pose également la question de l'apparition des produits de transformation encore non réglementés.

### **Animaux d'élevage aquatique**

La réduction de la LMR de 200 à 20 µg/kg de matière fraîche en 2018 a conduit à la fermeture de la plupart des fermes aquacoles. Les crevettes d'élevage (*Macrobrachium rosenbergii*) ou « ouassous » ont révélé des concentrations de chlordécone jusqu'à 12 fois supérieures à la LMR. Coat *et al.* (2011) avaient mis en évidence une contamination importante et généralisée du biote vivant dans les rivières polluées et en particulier pour les crustacés. En effet, les molécules de chlordécone, dissoutes ou fixées à des particules de sol, sont transportées vers les eaux côtières par les rivières ou les résurgences des nappes sur le littoral. Pour les organismes aquatiques, vertébrés et invertébrés, il est difficile de différencier les modes de contamination qui dépendent à la fois du transfert par l'intermédiaire de l'eau et du transfert au travers de l'alimentation, résultant en une bio-accumulation plus ou moins importante, voire une biomagnification selon les réseaux trophiques considérés. Dans le projet ANR CES Machloma, l'ouassou *M. rosenbergii* a été choisi comme organisme modèle. Lafontaine *et al.* (2017) ont observé que la bioconcentration de la chlordécone dépendait de la dose et du temps d'exposition. La chlordécone dissoute dans l'eau est présente dans les tissus après seulement six heures d'exposition, phénomène également décrit sur une espèce envahissante de crustacé *Cherax quadricarinatus* (Baudry *et al.*, 2022). Pour l'ouassou et l'écrevisse une période de décontamination de 20 jours n'a pas été suffisante pour obtenir des individus ayant des concentrations en dessous de la LMR. L'hépatopancréas et la cuticule ont été les tissus les plus contaminés. Les femelles ouassous ont semblé moins contaminées que les mâles, probablement du fait d'une élimination du contaminant par les œufs. À ce stade des recherches, la solution de « dépuration » dans un bassin non contaminé n'est donc pas envisageable pour une exploitation commerciale. Récemment, le développement d'un modèle de transfert chez l'ouassou, basé sur la physiologie, et permettant ainsi de prendre en compte le phénomène de mue a été développé. Ce modèle est pour le moment conceptuel et nécessite des jeux de données complémentaires de calibration et de validation (Thiébaud, 2024).

## **► Principales avancées en vue de la réduction de l'exposition**

L'enjeu de l'élimination de la chlordécone dans les sols contaminés reste un enjeu majeur de la gestion de la pollution par la chlordécone. Les recherches menées jusqu'ici, si elles laissent entrevoir des pistes utilisables à petite échelle (parcelles), ne permettent cependant pas de proposer une solution à l'échelle du territoire. Ainsi, si le potentiel de dégradation de la chlordécone par ISCR dans les horizons superficiels de sols contaminés est avéré, plusieurs limites apparaissent clairement : manque

de données sur l'effet à long terme de l'amendement, genèse, dynamique et devenir environnemental, ainsi que toxicité des produits de transformation de la chlordécone. La dégradation microbiologique de la chlordécone en PT n'est que partielle et provient exclusivement de travaux menés en laboratoire dans des conditions très éloignées des conditions naturelles. La faisabilité de ces transformations microbiologiques devrait, à présent, être évaluée *in situ*. La phytoremédiation seule ne semble pas être une option très efficace. Sa mise en œuvre pourrait reposer sur l'action conjointe de plantes et de micro-organismes associés aux systèmes racinaires. En complément des approches visant à dégrader la chlordécone dans les sols contaminés, les chercheurs ont mis en œuvre des procédés pour réduire autant que possible les transferts dans les chaînes trophiques et l'exposition humaine au travers de la chaîne alimentaire. Deux objectifs sont poursuivis :

- la réduction de la disponibilité de la chlordécone du sol au travers des amendements de biochars et de charbons actifs. L'utilisation de charbons actifs pour le traitement des eaux destinées à la consommation humaine a montré son efficacité en ce qui concerne la dépollution. Néanmoins, un certain nombre de limites apparaissent, notamment dans le suivi du process. En conditions de laboratoire, les amendements des sols en biochars et en charbons actifs ont permis une diminution significative du transfert de la chlordécone du sol vers la biosphère et les eaux superficielles et souterraines. Il conviendrait à présent d'évaluer la faisabilité de la mise en place de ce type de traitement en conditions réelles (efficacité des amendements *in situ*, production de biochars et de charbons actifs à grande échelle, effets des amendements sur la santé du sol, effets à long terme, etc.);
- la production d'aliments sains y compris dans les territoires contaminés. La principale voie d'exposition à la chlordécone des populations antillaises étant la voie alimentaire, il convient de limiter la contamination des denrées végétales et animales. Les connaissances acquises au fil des plans d'action ont permis de proposer des « solutions » de différents types pour accompagner la production de ces denrées et permettre une commercialisation de produits agricoles ou une autoconsommation sans risque. Les relations proportionnelles existant pour le transfert de la pollution du sol vers les végétaux permettent de calculer, à partir des LMR, des limites de pollution du sol au-delà desquelles la qualité sanitaire du végétal consommé n'est plus garantie. Chez les animaux terrestres, les mesures proposées concernent la limitation de l'ingestion de matrices contaminées, la bio-accessibilité de la chlordécone ingérée au travers du sol ou la décontamination des animaux. Chez les ruminants en particulier, les temps de demi-vie dans l'organisme permettent d'envisager la décontamination des animaux dans des délais raisonnables. Un outil d'aide à la décision est aujourd'hui utilisé par les organismes de veille sanitaire de Martinique et de Guadeloupe pour permettre aux éleveurs concernés d'être accompagnés dans ces processus qui aboutissent à la production d'une viande saine pour les consommateurs.

Il apparaît nécessaire, dans une approche *One Health*, de bien évaluer les solutions de réduction de la pollution des sols et de l'exposition des écosystèmes et des populations. Cette évaluation devrait prendre en compte les coûts et bénéfices directs, mais également à moyen et long terme, ainsi que les coûts cachés. Par exemple, une dégradation partielle de la chlordécone n'est pas satisfaisante tant que la toxicité et le comportement des produits de dégradation n'ont pas été caractérisés et les solutions co-construites avec les acteurs; l'utilisation de charbons actifs pour traiter l'eau devrait intégrer une économie circulaire locale viable; etc. Finalement, il est important de confronter les

choix et les avancées scientifiques, d'une part aux réalités de terrain, et d'autre part aux attentes des acteurs, dans une approche la plus globale possible, ce qui, loin s'en faut, n'est pas aisé dans un contexte où beaucoup de lacunes restent à combler.

## ► Références bibliographiques

- Ahmad M., Rajapaksha A.U., Lim J.E., Zhang M., Bolan N. *et al.*, 2014. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 99:19-33. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>.
- Alnajjar P., 2024. Étude et modélisation du devenir d'un polluant organique persistant, la chlordécone, par la méthanisation. Thèse de doctorat, université de Lorraine, Sciences et ingénierie de ressources naturelles.
- Alsaiee A., Smith B.J., Xiao L., Ling Y., Helbling D.E., Dichtel W.R., 2016. Rapid removal of organic micropollutants from water by a porous  $\beta$ -cyclodextrin polymer, *Nature*, 529(7585):190-194. <https://doi.org/10.1038/nature16185>.
- Baudry T., Gismondi E., GoPut J.P., Arqué A., Smith-Ravin J., Grandjean F., 2022. The invasive crayfish *Cherax quadricarinatus* facing chlordecone in Martinique: Bioaccumulation and depuration study. *Chemosphere*, 286(3):131926. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131926>.
- Bodiguel X., Bertrand J., Fremery J., 2011. Devenir de la CLD dans les réseaux trophiques des espèces marines consommées aux Antilles (Chloretro). Direction de l'environnement de l'aménagement et du logement, Martinique 972 (DEAL Martinique)-Direction des services vétérinaires, Martinique 972 (DSV Martinique)-Onema-Office de l'eau Martinique 972 (ODE), réf. Délégation des Antilles - Station du Robert, 54 p. Disponible sur <https://archimer.ifremer.fr/doc/00036/14684/>.
- Bouveret C., Rychen G., Lerch S., Jondreville C., Feidt C., 2013. Relative bioavailability of tropical volcanic soil-bound Chlordecone in piglets. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(2013):9269-9274. <https://doi.org/10.1021/jf400697r>.
- Cabidoche Y.M., Lesueur-Jannoyer M., 2011. Pollution durable des sols par la chlordécone aux Antilles : comment la gérer ? *Innovations Agronomiques*, 16(2011):117-133.
- Caria G., Cheviron N., Caldas T. (de), Delannoy M., Demont-Caulet N. *et al.*, 2021. PIEGEAGE des Composés Halogénés Lipophiles Organiques Rémanents (PIEGEACHLOR). Rapport de recherche, Ensaia.
- Chaussonnerie S., Saaidi P.L., Ugarte E., Barbance A., Fossey A., 2016. Microbial degradation of a recalcitrant pesticide: Chlordecone. *Frontiers in Microbiology*, 20(7):2025. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.02025>.
- Chevallier M., Della-Negra O., Chaussonnerie S., Barbance A., Muselet D. *et al.*, 2019. Natural chlordecone degradation revealed by numerous transformation products characterized in key French West Indies environmental compartments. *Environmental Science & Technology*, 53(2019):6133-6143. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06305>.
- Clostre F., Cattan P., Gaude J.M., Carles C., Letourmy P., Lesueur-Jannoyer M., 2015a. Comparative fate of an organochlorine, chlordecone, and a related compound, chlordecone-5b-hydro, in soils and plants. *Science of the Total Environment*, 532:292-300. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.026>.
- Clostre F., Letourmy P., Lesueur-Jannoyer M., 2015b. Organochlorine (chlordecone) uptake by root vegetables. *Chemosphere*, 118:96-102. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.06.076>.
- Clostre F., Letourmy P., Lesueur-Jannoyer M., 2017. Soil thresholds and a decision tool to manage food safety of crops grown in chlordecone polluted soil in the French West Indies. *Environmental Pollution*, 223:357-366. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.01.032>.
- Clostre F., Letourmy P., Turpin B., Carles C., Lesueur-Jannoyer M., 2014a. Soil Type and Growing conditions Influence Uptake and Translocation of Organochlorine (Chlordecone) by Cucurbitaceae Species. *Water, Air, & Soil Pollution*, 225(10):2153. <https://doi.org/10.1007/s11270-014-2153-0>.
- Clostre F., Woignier T., Rangan L., Fernandes P., Soler A., Lesueur-Jannoyer M., 2014b. Field validation of chlordecone soil sequestration by organic matter addition. *Journal of Soils and Sediments*, 14(1):23-33. <https://doi.org/10.1007/s11368-013-0790-3>.

Coat S., Monti D., Legendre P., Bouchon C., Massat F., Lepoint G., 2011. Organochlorine pollution in tropical rivers (Guadeloupe): Role of ecological factors in food web bioaccumulation. *Environmental Pollution*, 159(6):1692-1701. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.02.036>.

Cochennec M., Devriendt-Renault Y., Massat F., Guérin T., Ollivier P. *et al.*, 2024. Microwave-enhanced thermal removal of organochlorine pesticide (chlordecone) from contaminated soils. *Chemosphere*, 352:141486. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141486>.

Collas C., Gourdine J.L., Beramice D., Badot P.M., Feidt C., Jurjanz S., 2023. Soil ingestion, a key determinant of exposure to environmental contaminants. The case study of chlordecone exposure in free-range pigs in the French West Indies. *Environmental Pollution*, 316(1):120486. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120486>.

Collas C., Mahieu M., Badot P.M., Crini N., Rychen G. *et al.*, 2020. Dynamics of soil ingestion by growing bulls during grazing on a high sward height in the French West Indies. *Scientific Reports*, 10(1):1-8. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74317-0>.

Collas C., Mahieu M., Tricheur A., Crini N., Badot P.M. *et al.*, 2019. Cattle exposure to chlordecone through soil intake. The case-study of tropical grazing practices in the French West Indies. *Science of the Total Environment*, 668:161-170. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.384>.

Colombano S., Dumon A., Guérin V., Chevrier B., 2009. Examen des possibilités de traitement de la chlordécone dans les sols notamment sur les aires d'alimentation des captages d'eau potable. Rapport final, BRGM, 358 p. Disponible sur <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-57708-FR.pdf>.

Delannoy M., 2023. Évaluer et réduire le transfert des polluants vers les biotes : ancrer les outils de l'évaluation et de gestion des sites et sols contaminés dans une approche « One Health ». Habilitation à diriger des recherches, université de Lorraine, 101 p. Disponible sur <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-04500582v1/file/HDR%20Manuscrit%20final%20sur%20HAL.pdf>.

Delannoy M., Techer D., Yehya S., Razafitianamaharavo A., Amutova F. *et al.*, 2020. Evaluation of two contrasted activated carbon-based sequestration strategies to reduce soil-bound chlordecone bioavailability in piglets. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(33):41023-41032. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06494-z>.

Della-Negra O., Poujade M., Muselet D., Chevallier-Michaud S., Dutasta J.P. *et al.*, 2024. Hemicryptophane: A Viable Supramolecular Approach to Improve Chlordecone Removal from Water. *ChemistrySelect*, 9(4):e202304107. <https://doi.org/10.1002/slct.202304107>.

Desmazes O., en préparation. L'eau entre liens et ruptures socio-environnementales dans les Caraïbes : le cas de la gestion de l'eau en Martinique. Thèse de doctorat, université des Antilles, Environnement ville société.

Deyris P.A., Pelissier F., Grison C.M., Hesemann P., Petit E., Grison C., 2023. Efficient removal of persistent and emerging organic pollutants by biosorption using abundant biomass wastes. *Chemosphere*, 313:137307. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137307>.

Dromard C., Allenou J.P., Bouchon-Navaro Y., Lemoine S., Thouard E. *et al.*, 2015. Consolidation des connaissances sur la contamination de la faune halieutique par le CLD autour de la Martinique et de la Guadeloupe (Projet « CHLOHAL »). Rapport final, Ifremer, 86 p. Disponible sur <https://archimer.ifremer.fr/doc/00429/54058/>.

Dromard C.R., Bodiguel X., Lemoine S., Bouchon-Navaro Y., Reynal L. *et al.*, 2016. Assessment of the contamination of marine fauna by chlordecone in Guadeloupe and Martinique (Lesser Antilles). *Environ Sci Pollut Res Int.*, 23(1):73-80. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4732-z>.

Durimel A., Altenor S., Miranda-Quintana R., Couespel du Mesnil P., Jauregui-Haza U. *et al.*, 2013. pH dependence of chlordecone adsorption on activated carbons and role of adsorbent physico-chemical properties. *Chemical Engineering Journal*, 229:239-249. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.03.036>.

Feidt C., Collas C., Mantran M., Liber Y., Tournebize R. *et al.*, 2022a. Quels enjeux pour les fourrages dans la gestion de la crise chlordécone aux Antilles françaises ? *Fourrages*, 249:9-18.

Feidt C., Fournier A., Beugnet C., Fourcot A., Jock S. *et al.*, 2022b. Validation in situ d'un Outil d'Aide à la Décision pour la maîtrise de la teneur en chlordécone des carcasses bovines issues de zones contaminées. Rencontres «Chlordécone, connaître pour agir», 12-14 décembre, Le Gosier (Guadeloupe), France.

- Fernandez-Bayo J.D., Saison C., Voltz M., Disko U., Hofmann D., Berns A.E., 2013. Chlordecone fate and mineralisation in a tropical soil (andosol) microcosm under aerobic conditions. *Sci. Total Environ.*, 463-464:395-403. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.06.044>.
- Fourcot A., 2020. Distribution et élimination de la chlordécone chez les animaux d'élevage – Modélisation des processus. Thèse de doctorat, université de Lorraine, Science et ingénierie des ressources naturelles, 309 p. Disponible sur [https://docnum.univ-lorraine.fr/public/DDOC\\_T\\_2020\\_0260\\_FOURCOT.pdf](https://docnum.univ-lorraine.fr/public/DDOC_T_2020_0260_FOURCOT.pdf).
- Fourcot A., Feidt C., Bousquet-Mélou A., Ferran A.A., Gourdine J.L. *et al.*, 2020. Modeling chlordecone toxicokinetics data in growing pigs using a nonlinear mixed-effects approach. *Chemosphere*, 250:126151. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126151>.
- Fournier A., Feidt C., Lastel M.L., Archimède H., Thomé J.P. *et al.*, 2017. Toxicokinetics of chlordecone in goats: Implications for risk management in French West Indies. *Chemosphere*, 171:564-570. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.054>.
- Fourcot A., Feidt C., Le Roux Y., Thomé J.P., Rychen G., Fournier A., 2021. Characterization of chlordecone distribution and elimination in ewes during daily exposure and depuration. *Chemosphere*, 277:130340. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130340>.
- Fournier A., Fourcot A., Gourdine J.L., Rychen G., Feidt C., 2022. Modélisation PBPK du transfert de la chlordécone chez le ruminant adulte. Rencontres « Chlordécone, connaître pour agir », 12-14 décembre, Le Gosier (Guadeloupe), France.
- Guene M., Dromard C., Bouchon-Navaro Y., Lemoine S., Boucho C., 2015. Contamination dynamic of chlordecone in trophic chains of guadeloupe coastal ecosystems. Conférence « Proceedings of the 68<sup>th</sup> Gulf and Caribbean Fisheries Institute », Panama city, République de Panama.
- Jondreville C., Bouveret C., Lesueur-Jannoyer M., Rychen G., Feidt C., 2013. Relative bioavailability of tropical volcanic soil bound chlordecone in laying hens (*Gallus domesticus*). *Environmental Science and Pollution Research*, 20(1):292-299. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1010-1>.
- Jondreville C., Fournier A., Mahieu M., Feidt C., Archimède H., Rychen G., 2014a. Kinetic study of chlordecone orally given to laying hens (*Gallus domesticus*). *Chemosphere*. 114:275-281. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.05.008>.
- Jondreville C., Lavigne A., Jurjanz S., Dalibard C., Liabeuf J.M. *et al.*, 2014b. Contamination of free-range ducks by chlordecone in Martinique (French West Indies): A field study. *Science of the Total Environment*, 493:336-341. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.083>.
- Jurjanz S., Collas C., Lastel M.L., Godard X., Archimède H. *et al.*, 2017. Evaluation of soil intake by growing Creole young bulls in common grazing systems in humid tropical conditions. *Animal*, 11(8):1363-1371. <https://doi.org/10.1017/S1751731116002755>.
- Jurjanz S., Fournier A., Clostre F., Godard E., Feidt E., 2020. Control of poultry contamination in chlordecone contaminated areas of the French West Indies. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(33):41117-41121. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08172-x>.
- Jurjanz S., Germain K., Juin H., Jondreville C., 2015. Plant and soil intake by organic broilers reared in tree- or grass-covered plots as determined by means of n-alkanes and of acid-insoluble ash. *Animal*, 9(5):888-898. <https://doi.org/10.1017/S1751731114002870>.
- Jurjanz S., Jondreville C., Mahieu M., Fournier A., Archimède H. *et al.*, 2014. Relative bioavailability of soil-bound chlordecone in growing lambs. *Environmental Geochemistry and Health*, 36(5):911-917. <https://doi.org/10.1007/s10653-014-9608-5>.
- Kumari K., Marathe D., Raghunathan K. 2024. Chlordecone, in Kumari K., *Pollutants of Global Concern: A Comprehensive Overview of Persistent Organic Pollutants*, Cham: Springer International Publishing, 181-193.
- Lafontaine A., Baiwir D., Joaquim-Justo C., Pauw E (de), Lemoine S. *et al.*, 2017. Proteomic response of *Macrorachium rosenbergii* hepatopancreas exposed to chlordecone: Identification of endocrine disruption biomarkers? *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 141:306-314. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.03.043>.
- Lastel M.-L., Lerch S., Fournier A., Jurjanz S., Feidt C. *et al.*, 2016. Dynamique de décontamination en chlordécone de jeunes ruminants en croissance. Journées d'Animation des Crédits Incitatifs du Département de Physiologie Animale et Systèmes d'Élevage (JACI Phase 2016), Avril 2016, Tours, France.

- Liber Y., Létonдор C., Pascal-Lorber S., Laurent F., 2018. Growth parameters influencing uptake of chlordecone by *Miscanthus* species. *Science of the Total Environment*, 624:831-837. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.071>.
- Lomheim L., Flick R., Rambinaising S., Gaspard S., Edwards E.A., 2021. Identification of a fully dechlorinated product of chlordecone in soil microcosms and enrichment cultures. *Environmental Science & Technology Letters*, 8(8):662-667. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00505>.
- Lomheim L., Laquittaine L., Rambinaising S., Flick R., Starostine A. *et al.*, 2020. Evidence for extensive anaerobic dechlorination and transformation of the pesticide chlordecone (C<sub>10</sub>Cl<sub>10</sub>O) by indigenous microbes in microcosms from Guadeloupe soil. *Plos One*, 15(4):0231219. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231219>.
- Long A., Lefevre S., Guy L., Robert V., Dutasta J.P. *et al.*, 2019. Recognition of the persistent organic pollutant chlordecone by a hemicyclopentane cage. *New Journal of Chemistry*, 43(26):10222-10226. <https://doi.org/10.1039/C9NJ01674K>.
- Mahieu M., Fournier A., Lastel M.L., Feidt C., Rychen G., Archimède H., 2015. Chlordecone and animal breeding individual variability of the excretion capacity of ruminants and consequences on the contamination. Congrès du groupe français des pesticides : « Protection des cultures et santé environnementale : héritages et conceptions nouvelles », Groupe Français des Pesticides (GFP), mai 2014, Schoelcher, Martinique, France.
- Martin D.E., Alnajjar P., Museleta D., Soligot-Hognon C., Kanso H. *et al.*, 2023. Efficient biodegradation of the recalcitrant organochlorine pesticide chlordecone under methanogenic conditions. *Science of the Total Environment*, 903:166345. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166345>.
- Melchor-Rodríguez K., Gamboa-Carballo J.J., Ferino-Pérez A., Passé-Coutrin N., Gaspard S., Jáuregui-Haza U.J., 2018. Theoretical study on the interactions between chlordecone hydrate and acidic surface groups of activated carbon under basic pH conditions. *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, 81:146-154. <https://doi.org/10.1016/j.jmkgm.2018.02.012>.
- Mottes C., Deffontaines L., Charlier J.B., Comte I., Della Rossa P. *et al.*, 2020. Spatio-temporal variability of water pollution by chlordecone at the watershed scale: what insights for the management of polluted territories? *Environmental Science and Pollution Research*, 27(33):40999-41013.
- Mouvet C., Collet B., Gaude J.M., Bristeau S., Rangon L. *et al.*, 2016. Décontamination par In Situ Chemical Reduction d'un nitisol et d'un sol alluvionnaire pollués par la chlordécone. Résultats physico-chimiques et agronomiques. Rapport final, BRGM, 188 p. Disponible sur <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-65462-FR.pdf>.
- Mouvet C., Collet B., Gaude J.M., Rangon L., Bristeau S. *et al.*, 2020. Physico-chemical and agronomic results of soil remediation by In Situ Chemical Reduction applied to a chlordecone contaminated nitisol at plot scale in a French Caribbean banana plantation. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(33):41063-41092. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07603-z>.
- Mouvet C., Dictor M.C., Bristeau S., Breeze D., Mercier A., 2017. Remediation by chemical reduction in laboratory mesocosms of three chlordecone-contaminated tropical soils. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(33):25500-25512. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7582-4>.
- Nicolini É.A., Beauchene J., Bonnal V., Hattermann T., 2022. Chlordecone in basal trunk wood of native trees growing in abandoned banana plantations in Guadeloupe, France. *Bois et Forêts des Tropiques*, 352:31-42. <https://doi.org/10.19182/bft2022.352.a36937>.
- Paul P., Ghosh U., 2011. Influence of activated carbon amendment on the accumulation and elimination of PCBs in the earthworm *Eisenia fetida*. *Environmental Pollution*, 159(12):3763-3768. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.07.025>.
- Perelo L.W., 2010. Review: In situ and bioremediation of organic pollutants in aquatic sediments. *Journal of Hazardous Materials*, 177(1-3):81-89. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.12.090>.
- Procaccia C., 2023. L'impact de l'utilisation de la chlordécone aux Antilles françaises. Rapport n° 360, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, 170 p. Disponible sur <https://www.senat.fr/rap/r22-360/r22-360.html>.
- Rana V.K., Kissner R., Gaspard S., Levalois-Grützmaier J., 2016. Cyclodextrin as a Complexation Agent in the Removal of Chlordecone from Water. *Chemical engineering journal*, 293:82-89. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.02.032>.

- Rana V.K., Kissner R., Jauregui-Haza U., Gaspard S., Levalois-Grützmacher J., 2017. Enhanced chlordecone (Kepone) removal by FeO-nanoparticle loaded activated carbon. *Journal of environmental chemical engineering*, 5(2):1608-1617. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.01.039>.
- Ranguin R., Delannoy M., Yacou C., Jean-Marius C., Feidt C. *et al.*, 2021. Biochar and activated carbons preparation from invasive algae *Sargassum* spp. for Chlordecone availability reduction in contaminated soils. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4):105280. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105280>.
- Ranguin R., Durimel A., Karioua R., Gaspard S., 2017. Study of chlordecone desorption from activated carbons and subsequent dechlorination products formation by reduced cobalamin. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(2):25488-25499. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9542-z>.
- Ranguin R., Jean-Marius C., Yacou C., Gaspard S., Feidt C. *et al.*, 2020. Reduction of chlordecone environmental availability by soil amendment of biochars and activated carbons from lignocellulosic biomass. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(33):41093-41104. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07366-2>.
- Robert S., 2012. Historique de la contamination des sédiments littoraux des Antilles françaises par la CLD (ChloSed). Rapport de contrat, Ifremer, 93 p. Disponible sur <https://archimer.ifremer.fr/doc/00071/18247/>.
- Rochette R., Bonnal V., Andrieux P., Cattan P., 2020. Analysis of surface water reveals land pesticide contamination: an application for the determination of chlordecone-polluted areas in Guadeloupe, French West Indies. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(33):41132-41142. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10718-y>.
- Saint-Hilaire M., Fourcot A., Bousquet-Mélou A., Rychen G., Thomé J.P. *et al.*, 2021. Characterization and quantification of chlordecone elimination in ewes. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 87:103698. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2021.103698>.
- Sanchez W., Mamy L., Pesce S., Leenhardt S., 2023. Contamination des milieux aquatiques par les produits phytopharmaceutiques : état des lieux et conséquences sur le bien-être humain. Synthèse, in *YearBook Santé et environnement 2023*, John Libbey Eurotext, 101-104.
- Smith J.C., Arant F.S., 1967. Residues of kepone in milk from cows receiving treated feed. *J Econ Entomol.*, 60(4):925-7. <https://doi.org/10.1093/jee/60.4.925>.
- Stephan P., Amutova F., Le Roux Y., Gaspard S., Feidt C. *et al.*, 2022. Impact du taux d'amendement de biochar de Sargasse sur la disponibilité environnementale de la chlordécone, du DDT et de ses métabolites. Rencontres « Chlordécone, connaître pour agir », 12-14 décembre, Le Gosier (Guadeloupe), France.
- Stephan P., Le Roux Y., Gaspard S., Michaux F., Feidt C. *et al.*, 2023. Effects of particle size and amendment rates of *Sargassum* biochar on chlordecone sequestration in West Indian soils. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(3):5873-5880. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21885-5>.
- Stephan P., Gaspard S., Dulormne M., Francoeur M., Melyon S. *et al.*, 2024. Antillean contaminated soils amendment with microwave prepared sargassum biochar: A promising solution to reduce chlordecone transfer to laying hens and piglets? *Chemosphere*, 359:142282. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142282>.
- Thiébaud J., 2024. Modélisation à base physiologique, générique et adaptative, du devenir des polluants organiques persistants chez l'animal d'élevage. Thèse de doctorat, université de Lorraine, Science et ingénierie des ressources naturelles, 234 p. Disponible sur [https://docnum.univ-lorraine.fr/public/DDOC\\_T\\_2024\\_0102\\_THIEBAUT.pdf](https://docnum.univ-lorraine.fr/public/DDOC_T_2024_0102_THIEBAUT.pdf).
- Unep, 2006. Draft risk profile: chlordecone. Persistent Organic Pollutants Review Committee, Second meeting, Genève, 6-10 novembre, 32 p. Disponible sur <https://chm.pops.int/Portals/0/download.aspx?d=UNEP-POPS-POPRC.2-8.English.DOC>.
- Woignier T., Clostre F., Fernandes P., Rangon L., Soler A., Lesueur-Jannoyer M., 2016. Compost addition reduces porosity and chlordecone transfer in soil microstructure. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(1):98-108. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5111-5>.
- Woignier T., Fernandes P., Jannoyer-Lesueur M., Soler A., 2012. Sequestration of chlordecone in the porous structure of an andosol and effects of added organic matter: an alternative to decontamination. *European Journal of Soil Science*, 63(5):717-772. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2012.01471.x>.

## Chapitre 10

---

# Approches communicationnelles des crises du chlordécone en Guadeloupe et en Martinique — Pouvoir, communication publique et médiations

*Séverine Ely-Marius, Yannick Exilie, Marthe Berthide-Limier,  
Célia Perito-Cincinnatus, Guillaume Pompougnac, Axelle Beniey,  
Raoul Legba, Daniel Césarus, Aurélie Pourrez*

Informations archivées, perdues ou transmises, désinformation et mésinformation en politique, en économie, en sciences ou dans les médias, messages de sensibilisation et de prévention *One Health* auprès de différents publics, la communication interne à chaque organisation, les nombreuses interactions, les médiations ou encore les controverses peuvent être différents champs de recherche des crises du chlordécone pour la discipline universitaire des sciences de l'information et de la communication (SIC). Par une mise en perspective des approches communicationnelles, les SIC constituent une ressource à mobiliser dans une analyse des différentes approches communicationnelles en cours et à venir et dans la lutte contre la pollution, tant la communication modèle les interactions en jeu et les médiations nécessaires. Sur le terrain, deux domaines d'activité professionnelle différents permettront d'exposer les enjeux communicationnels de médiation préventive et d'éducation : tout d'abord, le rectorat de l'académie de Martinique a constitué le Groupe de réflexion et de formation interdisciplinaire chlordécone (GRFI-chlordécone) pour s'assurer de l'éducation des apprenants au plus près des résultats de recherche avec les choix pédagogiques les mieux adaptés. L'autre activité présentée sera celle de Promotion Santé Guadeloupe, Saint-Martin et Saint-Barthélemy (anciennement Ireps), qui est une association d'expertise et d'appui pour le développement régional de la politique de prévention, de formation et de promotion de la santé mobilisée précocement pour mettre en place des stratégies afin d'aborder la chlordécone avec la population. Le chapitre commencera par une présentation non exhaustive de la matrice communicationnelle dans laquelle s'effectuent les échanges, se profile l'atmosphère, se transmettent les informations, se trouvent les non-dits, les incompréhensions ou encore les mépris (encadré 10.1). La dimension postcoloniale tapisse ces crises, explique en partie la singularité des rapports avec les différentes institutions et interpelle quant à l'homogénéisation attendue d'actions entre la Guadeloupe et la Martinique. Ensuite, les discours culpabilisants et les pratiques descendantes en œuvre de la communication publique seront mis en perspective. Enfin, les enjeux scientifiques en communication et les

enjeux éducatifs sur les processus de médiation et de participation grâce à la présentation des actions du GRFI-chlordécone du rectorat de la Martinique et des Jafa de la Guadeloupe seront discutés.

### **Encadré 10.1. Chronologie des événements politiques et législatifs**

**1977** Interdiction du chlordécone suite au scandale de Hopewell aux États-Unis.

**1981** Autorisation de mise sur le marché accordée en France par la ministre de l'Agriculture Édith Cresson.

**1990** Retrait du pesticide chlordécone en France.

**1990-1992** Dérogation de deux ans accordée par Henri Nallet, ministre de l'Agriculture, pour permettre l'utilisation des stocks.

**1992-1993** Dérogation d'un an accordée par Louis Mermez, ministre de l'Agriculture, pour permettre l'utilisation des stocks.

**1993** Dérogation de six mois accordée par Jean-Pierre Soisson, ministre de l'Agriculture, pour permettre l'utilisation des stocks.

**1999** Première campagne d'analyse des eaux montrant un dépassement des normes pour le chlordécone et d'autres pesticides.

**2001** Loi 2001-434 du 21 mai 2001, dite « loi Taubira », pour une reconnaissance de la traite et de l'esclavage en tant que crime contre l'humanité.

**Article 2** : « Les programmes scolaires et les programmes de recherche en histoire et en sciences humaines accorderont à la traite négrière et à l'esclavage la place conséquente qu'ils méritent. La coopération qui permettra de mettre en articulation les archives écrites disponibles en Europe avec les sources orales et les connaissances archéologiques accumulées en Afrique, dans les Amériques, aux Caraïbes et dans tous les autres territoires ayant connu l'esclavage sera encouragée et favorisée. »

**2005** Arrêtés ministériels déterminant la teneur maximale du chlordécone dans l'alimentation (LMR).

**2006** Plainte déposée par sept associations antillaises pour empoisonnement.

**2008** Gestion centralisée du dossier « Chlordécone ».

**2018** Label zéro chlordécone en Martinique.

**2021** Plaintes déposées par l'Amses et l'Association guadeloupéenne d'action contre le chlordécone (Agac), affiliée au syndicat Union générale des travailleurs de Guadeloupe (UGTG) contre d'anciens ministres quant à l'utilisation du chlordécone aux Antilles.

**2022** Label Mòso Tè la en Guadeloupe

**Février 2022** Plaintes de 2021 qualifiées d'irrecevables par la Cour de justice de la République.

**5 janvier 2023** Non-lieu définitif après plus de 16 ans de procédure, une indisponibilité des archives ministérielles pouvant contredire l'ignorance contemporaine avancée du risque sanitaire.

**27 Avril 2023** Hommage à Toussaint Louverture (1743-1803), haïtien, déporté et emprisonné par Napoléon au château de Joux dans le Doubs, réalisé par le président Emmanuel Macron en ce lieu.

### Encadré 10.1. (suite)

**25 mars 2026** La France s'abstient pour le vote relatif à la résolution de l'Assemblée générale des Nations unies qui qualifie la traite transatlantique de « plus grave crime contre l'humanité ». 123 voix pour, 3 contre (l'Argentine, Israël et les États-Unis) et 52 abstentions.

Explication de vote de M. Sylvain Fournel, conseiller juridique de la France auprès des Nations unies à l'assemblée générale des Nations unies, rappelant en premier lieu la mobilisation de la France pour la mémoire de l'esclavage, de ses victimes et de ceux qui l'ont combattu :

« Monsieur le Président,

Comme ses partenaires de l'Union européenne, la France s'abstiendra sur le texte car nous estimons que la résolution proposée soulève, sur le fond, plusieurs difficultés au regard du droit international. Nous nous référons à cet égard à la déclaration de l'Union européenne et de ses États membres.

Nous regrettons que cette résolution établisse une « hiérarchie » entre les crimes contre l'humanité. Outre qu'une telle approche soulève de sérieuses difficultés juridiques, elle risque de mettre en concurrence des tragédies historiques qu'il n'y a pas lieu de comparer, et ce, au détriment de la mémoire des victimes.

Alors même que les Nations Unies travaillent à l'élaboration d'une nouvelle convention sur les crimes contre l'humanité, il nous semble important de rappeler que toute résolution de l'Assemblée générale doit s'ancrer dans le droit international et dans une approche universelle des droits de l'Homme. »

## ► Approches sociopolitiques et communicationnelles de la crise du chlordécone comme contexte d'interaction

### Empreinte postcoloniale de la crise du chlordécone en Martinique et en Guadeloupe

La toxicité impacte la santé de l'environnement (sols, eaux, écosystèmes environnants des îles), la santé animale et la santé humaine, pour un temps long (Saïdi *et al.*, 2023), de la Guadeloupe et de la Martinique, à partir des lieux où les cultures bananières ont été implantées durant la colonisation. L'étiologie de la crise mobilise en effet la reconnaissance d'un « habiter colonial » persistant des terres guadeloupéennes et martiniquaises et une invitation à une écologie décoloniale (Ferdinand, 2019, 2023). Cette non-reconnaissance participe à une tension s'immiscant dans tout processus communicationnel relatif au chlordécone. Les manquements de précaution de l'État dans la gestion politique et agricole relative au chlordécone ont ainsi mis en exergue une dimension postcoloniale perçue principalement aux Antilles et faisant écho à l'héritage collectif inconscient encore impensé des descendants directs et indirects de colonisateurs. Cela révèle notamment un manque d'application de la loi tendant à la reconnaissance de la traite et de l'esclavage en tant que crime contre l'humanité (encadré 10.1). La loi prévoyait en effet, il y a plus de vingt ans, que l'histoire de l'esclavage soit développée dans les programmes scolaires reçus par tout citoyen pour permettre une égalité dans l'histoire de France. Sans une histoire commune, il semble difficile de dire, d'entendre et de « co-construire » quoi que ce soit. L'histoire de l'esclavage et des colonies, invisible et tacite en Hexagone<sup>30</sup>, semble ainsi flotter dans un traumatisme collectif plus ou moins inconscient et irrésolu dans les anciennes colonies, mais aussi dans une ignorance perpétuée. L'évolution amorcée notamment par le

30. En témoignage par exemple l'absence de mobilisation nationale le 10 mai 2001 sur le territoire hexagonal.

discours présidentiel appelant à la commémoration des trois mémoires de l'esclavage — celles des victimes, des abolitionnistes et des héros (encadré 10.1) — doit aujourd'hui s'imposer pour toute citoyenne et tout citoyen. Ainsi, le massacre des Amérindiens au début de la colonisation (Chartol, 1982), la question de l'esclavage ou de l'exploitation esclavagiste des Indiens (Lasserre, 1953) et Japonais sont-ils réactivés lors de directives institutionnelles ou gouvernementales, en mobilisant la question identitaire en tension, et impactent avec différentes intensités la qualité de toute communication. C'est pourtant dans un couple organisation-mouvement social que peut se penser une alternative (Sedda, 2024). Au-delà de la lutte contre la contamination au chlordécone, quelle alternative agricole peut participer à une préservation de ces riches territoires ? Les logiques agricoles actuelles favorisent la surproduction, comme majoritairement partout ailleurs, au détriment de la santé environnementale et de la dimension *One Health*. Malgré les conséquences connues de l'utilisation du chlordécone, ces logiques persistent. Au-delà d'un passé qui doit être raconté par la population caribéenne métissée, comment la gestion du chlordécone a-t-elle mis en tension le contexte sociopolitique ?

L'intensité de la pollution permise par les autorisations d'utilisation postérieures à 1976, date d'interdiction du produit faisant suite aux enjeux *One Health*<sup>31</sup> du scandale de l'usine productrice de Hopewell (Wilson, 2023), accentuée par les dérogations relatives au maintien de son utilisation jusqu'en 1993<sup>32</sup> (encadré 10.1), témoigne de « la dernière modalité de la violence historique exercée contre les populations autochtones » (Bombardi, 2023 ; p. 66-81). Larissa Mies Bombardi, chercheuse brésilienne, pointe l'incohérence de la mondialisation permettant à des pays européens d'exporter des produits interdits sur leurs propres sols, procédé qu'elle qualifie de colonialisme chimique. Les Nations Unies jugeaient en ce sens les pratiques européennes « odieuses ». L'Europe a tardé à légiférer, permettant ainsi la préservation d'intérêts économiques prévalant sur les intérêts environnementaux (Parrot et Faure, 2023). La France a été le premier pays européen à prohiber l'exportation de pesticides interdits, mais sans avoir su se prémunir des failles permettant aux industriels agrochimiques de poursuivre cette trajectoire<sup>33</sup>. Aussi, ce contexte participe-t-il à la tension sociopolitique de la crise, où attitude postcoloniale et pratiques productivistes parfois illégales impactent, à des intensités variables, les interactions entre la population et les institutions. Igor Babou (2017), professeur en sciences de l'information et de la communication, interpelle : « pris en tension entre nature et culture, entre illusion romantique, rationalisme scientifique, expertise et technocratie, appétits économiques et cynisme colonial, l'environnement est fondamentalement politique. »

## Singularité du rapport avec les institutions en question

Les dérogations accordées au-delà de l'interdiction découlent d'une perception changeante pouvant aller d'une préoccupation étatique de la santé de la population antillaise différente de la population hexagonale (Gama, 2024) à un usage courant

31. Concept anachronique en 1976, que nous nous permettons d'utiliser malgré tout tant l'impact du pesticide y fait écho.

32. Le rapport Inra Science en Société de 2010 mentionne que si les alternatives à disposition étaient peut-être moins efficaces que le chlordécone en 1980, ce n'était plus le cas en 1990 (Joly, 2010 ; p. 33).

33. À ce sujet, lire l'article de Stéphane Mandard, paru dans le journal *Le Monde* du 30 novembre 2022 titrant en ce sens : « La France continue à exporter des milliers de tonnes de pesticides ultratoxiques, malgré l'interdiction de cette pratique ».

des dérogations ayant émergé dans une transition entre sécurité alimentaire et sécurité sanitaire et porté par de nombreuses motivations économiques ou agronomiques (Parrot et Faure, 2023). Plusieurs démarches pour réclamer justice ont été menées par la population (encadré 10.1). En janvier 2023, un non-lieu est prononcé concernant les plaintes déposées par sept associations contre empoisonnement en 2006. La longueur de la procédure et l'indisponibilité des archives ministérielles pouvant contredire l'ignorance contemporaine avancée du risque sanitaire (Ferdinand et Jas, 2022) alimentent suspicion et défiance vis-à-vis des institutions et un sentiment d'injustice légitime.

Depuis 2008, les plans chlordécone I, II, III et IV financés par l'État orchestrent la lutte contre la pollution et la contamination. Le terme « réparation » présent dans le plan chlordécone IV « Vivre sans risque chlordécone et réparer par l'action » — au-delà d'une correction des conséquences sanitaires, animales et environnementales de la pollution — convoque une appropriation collective de l'histoire de la Guadeloupe, de la Martinique et des colonies françaises (Singaravelou, 2023).

Une approche communicationnelle des crises relatives au chlordécone souligne le pluriversalisme\* (Piron et Arsenault, 2021) avec lequel sont à penser l'information et la réception de tout échange ou interaction, c'est-à-dire permettre de penser un collectif comme une multitude de singularités s'entremêlant dans leur trajectoire (Ingold, 2011).

## Convergence et divergence des deux îles antillaises

Les institutions appellent à une homogénéisation entre les deux îles, voire à ne pas distinguer Guadeloupe et Martinique, dans l'idée d'une visibilité et d'une cohérence dans la prévention menée, comme cette seizième recommandation quant au plan chlordécone : « faire converger les dispositifs mis en place en Guadeloupe et en Martinique pour la chlordéconémie, dans un souci d'efficacité et de lisibilité » (Procaccia, 2023). De la même façon, l'étude Kannari 2 prévoit des messages de prévention dits « co-construits » avec des Martiniquais et des Guadeloupéens pour s'assurer de leur compréhension par la population. À noter que cette convergence est aussi souhaitée par certains indépendantistes appelant à se penser peuple des Antilles (Gama, 2024). Si la convergence recherchée est une lutte contre la pollution et la contamination sur chacune des îles, le lissage des divergences ne semble pas être l'approche communicationnelle la plus pertinente. En effet, la santé intégrative\* invite, plutôt que de lister les divergences observables dans les deux îles quant aux dispositifs mis en place, à tenir compte des singularités et de leurs sens. Une histoire, une culture et une identité différentes ne permettent pas l'appropriation d'une information préventive pensée comme universelle et descendante vers une population homogénéisée irréaliste. L'approche communicationnelle interculturelle permet de mettre en perspective les limites de l'information réduite à un message à transmettre et des pratiques descendantes en communication publique.

## ► Communication publique : discours culpabilisants et pratiques descendantes

### Dimension culpabilisante dans les stratégies de communication publique

Les campagnes de prévention en santé mises en œuvre dans la lutte contre la contamination au chlordécone énumèrent ce qu'il ne faut pas faire et ce qu'il ne faut pas manger. Par exemple, une personne qui aura une chlordéconémie supérieure à la norme élaborée verra ses habitudes évaluées et recevra des recommandations personnalisées. Si l'approche est *a priori* rationnelle, elle reste descendante et renvoie aux individus leur ignorance ou leur niveau insuffisant de connaissances. Ce diagnostic est ainsi expliqué par une « dyslittératie en santé » impliquant une rationalité médicale déficiente ou une rationalité non médicale (Guingal, 2024). Cette évaluation témoigne de la doxa de l'acceptabilité sociale pensée par les institutions publiques (Ollivier-Yaniv, 2023), où la santé est tout sauf intégrative. Or, la temporalité imposée par les caractéristiques de la pollution impose aussi la chronicité de la prévention en santé. Les discours descendants et culpabilisants ne peuvent y être suffisamment opérationnels. Des chercheurs ont déjà éprouvé par des recherches-actions des préventions efficaces en proposant des préventions à partir des usages des patients : Evelyne Y. Ho, chercheuse en communication, propose des recommandations nutritionnelles et diététiques pour les personnes sinoaméricaines atteintes de diabète à partir des plats traditionnellement cuisinés par la communauté, mais adaptés (Ho, 2020). Marc-Alexandre Tareau, chercheur en ethnobotanique et anthropologie, propose quant à lui un appareil de mesure de glycémie à des Amérindiens diabétiques qui ont ainsi pu adapter les posologies de plantes et les quantités d'aliments ingérés (Tareau, 2019). Aussi, ne faut-il pas négliger la faisabilité des recommandations proposées en santé publique et préférer partir des usages de la population plutôt que de « traduire » un message de prévention. Par exemple, même s'il est connu que les œufs de poule se nourrissant de terres polluées contaminent facilement la population, indiquer de ne plus manger d'œufs ne sera pas une recommandation suivie. En revanche, si un dispositif est réfléchi pour que même en terre polluée, les poules ne soient plus contaminées et donc ne produisent plus d'œufs contaminants, la consommation d'œufs n'est plus problématique<sup>34</sup>.

Le contexte sociopolitique des crises du chlordécone témoigne parfois de la perception du caractère culpabilisant des discours publics, où la question des responsabilités devient un argument pour ne pas suivre les recommandations, où le passé ressurgit entre autres au travers de l'histoire de la propriété de la grande distribution antillaise. Une défiance de la population vis-à-vis du potentiel pouvoir du groupe Bernard Hayot dans les politiques en œuvre aux Antilles alimente la défiance de la population vis-à-vis des autorités et institutions. Les investigations journalistiques ne permettent pas à la population de déterminer les responsabilités effectives et assistent à une bataille médiatique : attaques pour diffamation du groupe contre un cabinet de conseil, auteur de différents rapports des Observatoires des prix, des marges et des revenus qui a riposté par une plainte pour dénonciation calomnieuse<sup>35</sup>.

34. Les poules ne peuvent plus être en liberté, et sont mises hors sol quand leurs œufs sont consommés.

35. Article publié dans le journal *Le monde* le 27 juin 2025. Disponible sur [https://www.lemonde.fr/economie/article/2025/06/27/vie-chere-en-oultre-mer-le-distributeur-gbh-attaque-en-diffamation-un-cabinet-de-conseil-qui-denonce-sa-position-dominante\\_6616109\\_3234.html](https://www.lemonde.fr/economie/article/2025/06/27/vie-chere-en-oultre-mer-le-distributeur-gbh-attaque-en-diffamation-un-cabinet-de-conseil-qui-denonce-sa-position-dominante_6616109_3234.html).

## « Co-construction » de l'action publique

Presque devenue aujourd'hui une injonction légitimant une action publique souhaitée élaborée pour et par la société, la co-construction semble réglementer les interventions publiques comme une recette de management des interventions sociales (Foudriat, 2019) tant elle s'est ancrée dans la communication et la communication publique (Akrich, 2013). Cette co-construction a pour objectif une convergence vers une rationalité scientifique ou médicale et reste unidirectionnelle. Le préfixe « co- » est compris comme « avec », mais délaisse le « ensemble ».

Co-construire ne doit pas être seulement une collaboration, une participation à quelque chose d'élaboré au préalable. Les sciences humaines et sociales sont ainsi, pour cause de critère d'obtention de financement, régulièrement invitées à participer à une recherche pluridisciplinaire dont le *design* est déjà finalisé. Aujourd'hui, la population se retrouve souvent prise à partie dans une configuration où science citoyenne, recherche collaborative et recherche participative sont confondues. L'appel ANR Sciences avec et pour la société « Ambitions Innovantes » s'est appliqué à sélectionner des projets de recherche participative où la co-construction était présente dès l'élaboration d'une problématique de recherche. Il s'agit en effet de reconnaître l'apport d'une construction faite réellement ensemble, dans un état d'esprit d'apprentissage mutuel (*mutual learning*). Nous avons ainsi obtenu un financement pour une recherche participative<sup>36</sup>, c'est-à-dire dont la problématique émane de la population par l'intermédiaire d'une association, coordonnant l'association Institut technique d'élevage de Guadeloupe et de Saint-Martin, l'unité de recherche en Agroécologie, Génétique et Systèmes d'élevage tropicaux d'INRAE Antilles-Guyane, le laboratoire Animal et Agroécosystème et le Centre de recherche sur les médiations (UR 3476) de l'université de Lorraine. La recherche-actions émane d'une limite identifiée par l'association lors de la création d'un espace de discussion entre éleveurs, associations de consommateurs et politiques guadeloupéens. En effet, les mesures de sécurisation et prévention prises ne tiennent pas compte d'une des modalités de consommation en Guadeloupe : les circuits informels utilisés par la population. C'est par l'échange des différents savoirs usuels et scientifiques que la recherche peut avancer.

## Relation entre institutions et associations — Les enjeux de la reconnaissance et de la confiance

Nous avons échangé<sup>37</sup> avec une ingénieure de recherche d'INRAE en Guadeloupe qui a auparavant travaillé comme chargée de mission chlordécone dans l'association Institut technique d'élevage de la Guadeloupe et de Saint-Martin. Sa double expérience nous semble intéressante pour une évaluation subjective de l'éventuelle différence des rapports avec le public entre association et institution. Ellen Laclef précise que même si le statut associatif pouvait favoriser une relation de confiance

36. GwadaSafeMeat, recherche participative financée par l'ANR-23-SSAI-0014, coordonnée par Aurélie Pourrez, avec l'Institut technique de l'élevage de Guadeloupe et de Saint-Martin (Olivier César Auguste), INRAE (Centre Antilles-Guyane, Jean-Christophe Bambou et Jean-Luc Gourdine), le laboratoire Animal et Agroécosystèmes (Agnès Fournier et Guido Rychen, université de Lorraine) et le Centre de recherche sur les médiations (UR 3476, Laurence Corroy, Céline Ségur, Julie Brusq et Aurélie Pourrez, université de Lorraine).

37. Entretien réalisé en visioconférence sur Teams le 12 juin 2024 avec Aurélie Pourrez.

avec le public, notamment car il n'y a pas la défiance éprouvée vis-à-vis de l'institutionnel, perçu plus ou moins directement comme l'État français, l'efficacité de la sensibilisation menée par l'association dépendait surtout du sujet traité, plus que du statut associatif. Les limites de l'action du milieu associatif sont principalement la recherche constante de financement. Les associations qui agissent dans l'intérêt de la population peuvent se tourner vers le département ou la région pour demander des financements. Ceux-ci sont en effet sensibles aux remontées des problématiques ou aux besoins de la population et peuvent considérer les associations comme des interlocuteurs ou des médiateurs privilégiés.

## ► Enjeux scientifiques en communication sur les processus de médiation et de participation

### Place des SIC dans les crises du chlordécone

Les SIC apportent une analyse des différents acteurs et enjeux de la crise, ainsi que des différents constituants ascendants, descendants et transverses de la communication. Pensée habituellement dans les organisations entrepreneuriales et la gestion des risques, la communication de crise repose aujourd'hui classiquement majoritairement sur l'anticipation. Le contexte de la crise du chlordécone ne permet qu'une anticipation des conséquences sanitaires à venir pour le vivant. Les SIC invitent à élaborer l'origine de la crise avant tout dispositif ou stratégie de communication à partir des différentes responsabilités et permettent une analyse des communications engagées dans la crise (Libaert, 2020b). Si les SIC peuvent notamment décrypter la communication mise en œuvre par les divers acteurs, les enjeux des différentes crises traversées ou encore la couverture médiatique relative au chlordécone, elles peuvent aussi accompagner les multiples processus de médiation en faveur de la lutte contre la contamination de la population et du vivant, mais aussi en faveur d'une éthique de la discussion (Habermas, 2003) au cœur des tensions sociopolitiques de la crise.

Au départ absentes des études environnementales (*environmental studies*), les SIC, par la communication environnementale, distinguent les discours moralisateurs, les discours technocentrés, les discours sublimant la nature ou encore ceux convoquant humilité et proximité (Espuny, 2022) et développent les champs de recherche mobilisables dans la crise du chlordécone.

La pollution au chlordécone et ses enjeux *One Health* invitent à s'appuyer sur les recherches passées en communication de crise (Libaert, 2020a), en communication environnementale (Galibert, 2013; Espuny, 2022), en communication des organisations (Morillon *et al.*, 2013; Baillargeon *et al.*, 2021), en éducation aux médias (Corroy, 2022; Cordier, 2023) ou encore en communication en santé (Romeyer, 2010; Olivier-Yanniv, 2015; Staii, 2022).

### Éducation : la place des discours scientifiques à l'école face aux discours ordinaires

Les professeurs peuvent se retrouver confrontés aux conflits de loyauté des apprenants, au cœur de différents discours dans leur cercle familial ou même des enseignants. En Martinique, le rectorat a mis en place un groupe de réflexion et de formation

interdisciplinaire spécifique pour le chlordécone. Nous avons échangé avec différents membres du groupe. Une synthèse de l'échange a été élaborée par Séverine Ely-Marius, Yannick Exilie, Marthe Berthide-Limier et Célia Perito-Cincinnatus (encadré 10.2).

### **Encadré 10.2. Le groupe de réflexion et de formation interdisciplinaire (GRFI) chlordécone de la Martinique**

À l'initiative de l'académie de Martinique, ce groupe rassemble des enseignants du premier degré de différentes disciplines. Il a pour missions d'impulser et concevoir des dispositifs de formation dans le rectorat, d'accompagner la mise en œuvre d'actions éducatives relatives au chlordécone et d'assurer une veille informationnelle et une curation\* destinées aux enseignants. La médiation scientifique, la diffusion de dispositifs didactiques, la création de projets et l'ancrage de la problématique du chlordécone dans sa complexité sont des objectifs annexes du groupe, engagé, souvent au-delà du cadre scolaire, sur la chlordécone mobilisée comme une question socialement vive (QSV).

Faute d'accès simple aux colloques scientifiques, le groupe actualise ses connaissances en conviant des chercheurs. La médiation scientifique doit ainsi être accentuée pour permettre des interactions efficaces entre les diverses communautés, car les niveaux de culture scientifique sont très hétérogènes. Des questions restent en suspens, comme le lien potentiel entre la chlordécone et l'endométriase, l'impact de la chlordécone sur le développement de l'enfant avec une chlordéconémie non nulle et l'effet cocktail de la chlordécone avec d'autres polluants. Une recherche-action collaborative avec des chercheurs universitaires pour développer et évaluer des dispositifs éducatifs ou de sensibilisation est souhaitée pour aborder la problématique de la chlordécone dans toute sa complexité en tant que QSV.

Consolider la culture scientifique du public scolaire, mais aussi de l'ensemble de la population, est indispensable afin que tous comprennent les enjeux, le temps long de la recherche, les possibilités de dépollution et la lutte contre la contamination. Les dissonances entre discours profanes et discours savants des publics avertis, ainsi que les questions de responsabilité, de justice, de réparation, de considérations liées à la colonialité, peuvent rendre le choix d'une posture de neutralité impartiale ou d'une neutralité engagée délicate pour les enseignants. Ils peuvent ainsi ressentir un conflit de loyauté similaire à celui des élèves. Le plan chlordécone IV invite à rendre nos élèves compétents en leur offrant une vraie tentative de résilience et de réparation grâce à un ancrage socialement vif, économique, politique et culturel. Les enjeux éducatifs liés à la chlordécone incluent l'incertitude et la controverse scientifique pour une compréhension continue et multidimensionnelle de la problématique, sans stigmatisation. L'enjeu est la formation de citoyens en devenir, capables de s'engager et d'exercer leurs responsabilités civiques face aux diverses problématiques environnementales; capables de faire des choix de consommation éclairés avec un esprit critique et une approche systémique, quel que soit leur pouvoir d'achat; et capables de concevoir un système plus favorable à la santé environnementale. Pour cela, commencer dès le premier degré est essentiel. Les formateurs encouragent leurs collègues à exploiter les opportunités du programme pour aborder la chlordécone, tout en envisageant avec optimisme l'avenir des apprenants.

L'impact de la chlordécone sur les pratiques traditionnelles questionne la disparition de savoir-faire et de connaissances relationnelles, comme la pêche à l'écrevisse et les dons familiaux de légumes, mais aussi sur les possibilités de préservation.

## Comment aborder la chlordécone avec la population ? Retour d'expérience des programmes Jafa et Titiri en Guadeloupe

Promotion Santé Guadeloupe, Saint-Martin et Saint-Barthélemy est missionnée et financée depuis 2008 par l'ARS pour mettre en œuvre les programmes Jafa, puis Titiri<sup>38</sup>. Ces programmes visent à contribuer à réduire l'exposition à la chlordécone des populations exposées au travers de l'autoconsommation régulière de denrées issues de leur jardin pollué ou de la pêche. C'est dans cette logique que Promotion Santé Guadeloupe met en œuvre des projets, programmes et actions dans le cadre des politiques régionales, sociales, sanitaires, médico-sociales et de santé publique.

Son engagement et ses actions se fondent sur des valeurs fortes : une vision globale et positive de la santé qui prend en considération les composantes physique, psychique et sociale de la personne ; un engagement éthique qui donne la parole à la population, prend en compte son expression et négocie avec elle les objectifs des projets de santé ; et une perspective d'autonomie avec une pratique d'autonomisation des usagers où il s'agit de renforcer les capacités des individus et des groupes sociaux à faire des choix favorables à leur bien-être et à celui de la collectivité.

### Communiquer dans un contexte défavorable

À partir de 2018, notamment après le discours du président de la République, les services de l'État se sont ouverts à la communication et des experts des sciences humaines et sociales ont commencé à être intégrés aux groupes de travail. Enfin, c'est en 2021 qu'une coordinatrice a été nommée pour porter un regard plus large et piloter les actions en Guadeloupe et en Martinique. Au niveau des collectivités locales, le climat est peu propice à la prise en main par les élus locaux de cette problématique épineuse et polémique qui porte trop d'enjeux politiques.

De 2008 à fin 2017, hormis les actions du programme Jafa, il y a eu très peu de communication sur le sujet à destination de la population. Ce vide de communication a contribué à renforcer les « théories du complot » de volonté de dissimuler des informations et de développer des rumeurs et représentations parfois fausses sur la problématique. De plus, une minorité d'intervenants a monopolisé les médias sur le sujet durant cette période. On observe également qu'il y a peu de débats contradictoires et de sujets de journalisme d'investigation sur les thématiques environnementales au niveau local. De ce fait, la population n'a pas la possibilité d'accéder à une information complète et scientifiquement étayée face aux informations d'actualité contradictoires et floues. Au niveau local, une partie des sols, de la mer et des rivières est polluée par la chlordécone à des teneurs qui peuvent être élevées et pour une longue durée. Il en résulte qu'une part de la chaîne alimentaire humaine locale est contaminée, notamment les racines et tubercules, les animaux d'élevage, les poissons ou encore les crustacés de rivières. Ces aliments ont une place importante dans les habitudes alimentaires locales. Cette alimentation fait partie des marqueurs identitaires forts comme le sont le gwoka<sup>39</sup> ou encore la langue créole. De ce fait, la pollution à la chlordécone touche directement

38. Programme d'information qui vise à réduire les risques d'exposition à la chlordécone. Il concerne la consommation des produits de la pêche issus des eaux douces et de la mer. Titiri est le nom créole de l'alevin.

39. « Le *ka*, c'est l'ensemble des rythmes — il en existe six, voire sept — qui sont à la base de la musique guadeloupéenne traditionnelle et sont joués sur des tambours par des tambouyés (...). Le *gwoka*, c'est le *ka* et les danses et chants qui y sont associés » (Bulle, 2025 ; p.31-33).

à l'identité et à des habitudes culturelles fortement ancrées. Cette pollution, vécue comme injuste et imposée à la population, touche l'alimentation traditionnelle et positionne les habitants comme victimes. Cette situation rentre aisément en résonance avec les « théories du complot ».

D'ailleurs, une étude commandée par l'Ireps et menée par la société de sondages LH Dom en 2017 sur un panel de 1 000 Guadeloupéens montre que plus d'un quart des enquêtés aurait entendu dire que la chlordécone « a été inventée pour que les Guadeloupéens arrêtent de consommer local au profit des importations » ou qu'elle « a été inventée pour détruire la filière pêche au profit des importations ». Près des deux tiers des enquêtés ont entendu dire que « les organismes qui travaillent sur la problématique chlordécone ne disent pas tout à la population ». Une très large majorité des enquêtés concernés n'accorde pas complètement crédit à ces affirmations. Tous ces éléments mettent en évidence un climat peu favorable à une appropriation constructive de la problématique par les différents acteurs.

De plus, dans une région où la prévalence du diabète, de l'obésité et de l'hypertension est importante, un enjeu fort est de ne pas détourner les personnes consommant des produits locaux non transformés vers une alimentation industrielle souvent trop grasse, trop sucrée ou trop salée, sous prétexte de pollution à la chlordécone. Or, il est à noter une tendance positive du retour au « manger local », au jardin et à l'identité, qui sont des leviers pour créer un capital confiance auprès d'une partie de la population. Il s'agit donc pour Promotion Santé Guadeloupe de développer une approche positive en valorisant les produits locaux, leurs bienfaits pour la santé, tout en prenant en compte la contrainte chlordécone.

C'est au travers de cette lecture du contexte que Promotion Santé tente de construire et de faire évoluer une stratégie afin de contribuer à la réduction de l'exposition à la chlordécone des autoconsommateurs des produits de la pêche et du jardin.

## Les différentes approches expérimentées

### **Faire émerger et rendre accessible les discours**

De 2009 à 2015, le programme Jafa a, dans un premier temps, principalement axé ses actions sur l'acquisition de connaissances et de compétences au niveau individuel. Cette phase a permis de contribuer à une évolution importante des connaissances et des représentations de la population sur la problématique chlordécone. Les formats d'animation interactifs, conviviaux et en créole ont permis une bonne participation et des échanges avec les populations présentes.

Ces actions d'information étaient nécessaires afin d'améliorer la connaissance de la population sur la problématique et sur les recommandations permettant de préserver sa santé. La connaissance du problème et des bons comportements à adopter est nécessaire, mais pas suffisante pour induire un changement de comportement. De plus, l'évaluation qualitative des représentations de la population sur la chlordécone et le programme Jafa, menés par l'Observatoire régional de la santé de Guadeloupe (Orsag) en 2013, ont permis de mettre en évidence les leviers d'actions suivants :

- renforcer les messages de promotion du « manger local » ;
- privilégier la proximité et faire des « tests » pour légitimer les recommandations ;
- impulser une dynamique collective en impliquant de nombreux acteurs ;

- communiquer sur l'avancée des connaissances épidémiologiques ;
- favoriser l'échange et l'interactivité ;
- renforcer les actions collectives et mettre en place la « Maison Jafa ».

Ainsi, le programme a fait le choix de développer des activités à deux niveaux :

- poursuivre des missions d'information et de développement de la phase de diagnostic des jardins créoles à l'échelle régionale ;
- intensifier l'accompagnement dans les zones les plus touchées par une approche communautaire visant à responsabiliser les populations sur l'impact de l'environnement sur leur santé en s'appuyant sur un espace physique d'échange et de démonstration.

### **Encourager une participation active des populations**

De 2016 à 2019, une démarche de mobilisation des populations sur la commune de Capesterre-Belle-Eau a été initiée. L'idée consistait à faire émerger avec un groupe d'une centaine de personnes des projets d'actions permettant de répondre à la question : « comment continuer à manger local sans pesticides ? ». De ces travaux ont émergé trois grands objectifs qui ont été verbalisés et formulés comme suit par les populations.

- Objectif 1 : continuer à s'approvisionner à partir de son jardin avec des techniques alternatives agroécologiques et sans risques.
- Objectif 2 : disposer d'une offre alimentaire sans pesticide et accessible.
- Objectif 3 : mettre en place un ou des jardins partagés permettant une production saine, la formation à l'agroécologie, et le partage de savoir-faire traditionnels liés à la culture du jardin créole.

L'objectif à moyen terme était de tendre vers une labélisation de la commune « Ville sans pesticide » ou « Ville santé ». Cette démarche de mobilisation de la population par l'équipe Jafa, bien que cohérente, a été confrontée à la difficulté de mobiliser autour de la problématique chlordécone. L'expérimentation a été menée avec une somme d'individus plutôt qu'une population organisée, rendant difficile la mise en œuvre des actions. La relation horizontale souhaitée par Jafa, axée sur la co-construction et la responsabilisation, ne répondait pas aux attentes de la population mobilisée, qui préférerait des solutions concrètes immédiates et trouvait plus de sens commun au jardin créole qu'à la pollution. De plus, certains projets d'action dépassaient de loin les missions de Promotion Santé Guadeloupe.

Cependant, au travers de cette démarche, le programme a affirmé son positionnement d'interface crédible entre la population et les institutions en créant du lien entre le monde de la recherche, les associations et la population. Plusieurs enseignements de cette expérimentation ont été tirés. Les principaux sont les nécessités de :

- connaître le contexte socioculturel et les représentations du public ;
- travailler avec un public organisé ayant un but commun.

### **Dialoguer avec la population**

Lancé 10 ans après le démarrage de Jafa, le programme Titiri s'appuie sur une expérience solide auprès des populations et une analyse sociologique. Il représente un tournant considérable dans la communication de Promotion Santé Guadeloupe, en ce sens qu'il s'adresse à l'ensemble de la population en diffusant des recommandations sur les produits de la pêche.

Il est déployé dans un contexte sensible, puisque les pêcheurs ont été fortement impactés dans leur activité par la mise en vigueur des zones d'interdiction de pêche.

Entre 2017 et 2020, plusieurs mouvements sociaux ont été menés par les professionnels du secteur.

Au départ, trois contraintes fondamentales concernent la mise en œuvre d'un tel programme de sensibilisation :

- l'absence d'alternatives pour les pêcheurs plaisanciers pratiquant la pêche à pied et habitant des zones d'interdiction de pêche ;
- la non-signalisation terrestre de celles-ci ;
- la grande difficulté pour le consommateur de distinguer les produits de la pêche formelle de ceux de la pêche informelle.

Ces contraintes ont fortement influencé le choix de la communication. La sensibilisation s'est déployée en plusieurs phases, reprenant ainsi le rythme d'une conversation.

La première phase a été de créer l'identité du programme et de la présenter à l'image d'une rencontre pour initier un dialogue. Pendant une phase relativement longue, le programme a mis en avant son identité et ses valeurs. Le programme Titiri est incarné par un personnage qui relate son vécu de pêcheur dans un spot radio, et campe ainsi l'identité locale par l'usage du créole. Au long de cette phase, un deuxième message de valorisation des produits locaux est également véhiculé.

Dans un second temps, afin de construire le dialogue et de permettre à la population d'exprimer ses doutes et ses questions, le programme a lancé une consultation en ligne et sous forme de micro-trottoir. Les questions recueillies touchent à de nombreux sujets, tels que la justice, la potabilité de l'eau ou encore la santé. Après ce recueil, une phase de réponse a été organisée en partenariat avec un groupe d'experts. Différents outils permettant de répondre aux questionnements de la population ont été créés : articles, dépliants, spots vidéo courts ainsi qu'émissions et webinaires diffusés à la télévision et sur les réseaux sociaux.

Cette manière de sensibiliser, tel un dialogue, nécessite une ouverture de l'équipe pour s'adapter aux besoins du public visé.

Dans un troisième temps, la discussion s'est poursuivie par des rencontres physiques dans les communes concernées par les interdictions de pêche, dans un objectif de faciliter une meilleure compréhension de la problématique chlordécone.

Dans ce cadre, un concept d'animation de proximité, reprenant les modalités d'animation Jafa et s'appuyant sur les municipalités, a été conçu et expérimenté à partir de 2023. Très peu mobilisatrice, cette manière « d'aller vers » a montré ses limites. D'une part, la proposition d'animation a attiré des pêcheurs professionnels qui ne trouvent pas de réponses à leurs questions auprès de leur organisme de tutelle et peuvent être réfractaires aux recommandations diffusées. Les communes ne jouent pas leur rôle de diffusion de l'information et de mobilisation de leur population. D'autre part, l'équipe a constaté qu'après l'épidémie de Covid, la population a modifié ses habitudes de vie et de sortie, ce qui pouvait justifier la faible mobilisation de la population. Par ailleurs, avec l'augmentation de l'inflation, les personnes ont eu moins le choix de se questionner sur la chlordécone, et se sont approvisionnées en privilégiant les solutions qui préservent leur pouvoir d'achat.

En 2024, fort d'un acquis expérimental d'une quinzaine d'années sur le terrain, Promotion Santé Guadeloupe a repositionné son action en proposant des animations co-construites avec des groupes associatifs.

## Retisser du lien avec les groupes

Aujourd'hui, l'approche consiste à entrer en relation avec les publics de ces associations, afin de les rejoindre dans leur quotidien au travers de leurs champs d'intérêt. L'animation s'intègre à l'univers et aux objectifs de l'association qui accueille la manifestation. Plus exigeante en matière de capacité d'adaptation de l'équipe et de ressources, mais également plus mobilisatrice, cette nouvelle approche se veut positive et s'articule autour de la question plus large « comment vivre tout en prenant en compte la chlordécone ? ».

Dans un second temps, cette approche pourra permettre de construire un maillage territorial dans le but d'avoir des relais d'information sur la chlordécone, qui s'approprient le discours de prévention et la mise en œuvre des recommandations concernant le jardin et le quotidien.

## Aborder la chlordécone auprès de la population avec une approche holistique

Malgré un contexte de défiance, des actions très concrètes ont été mises en place, se basant sur ces stratégies d'intervention pour soutenir des systèmes locaux d'agriculture familiale par la promotion du jardin créole; pour sensibiliser les acteurs qui favorisent une connaissance mutuelle et une culture commune, vulgarisant les discours scientifiques sur la pollution; pour développer l'action communautaire et co-construite avec les associations locales (jardin partagé de Gallard Doubout); pour impulser une implication des collectivités locales dans le cadre d'une approche territoriale, notamment dans le croissant bananier (à Capesterre-Belle-Eau, par exemple); pour favoriser la participation des publics (dans le cadre de la science participative pour l'émergence de solutions locales et endogènes), etc. Au travers de son expérience, l'équipe de Promotion Santé Guadeloupe, Saint-Martin et Saint-Barthélemy a commencé à recenser plusieurs leviers pour aborder la chlordécone avec la population consistant à :

- prendre en compte la réalité du contexte et l'interaction constante des personnes avec celui-ci;
- avoir une approche collective plutôt qu'individuelle;
- faire avec les populations (prendre en compte leur réalité, leurs perceptions et leurs envies);
- adopter une posture professionnelle d'ouverture (être adaptable, avoir une approche positive, honnête et authentique, écouter et dialoguer).

## ►► Communication publique et environnementale incluant une co-existence culturelle, demain ?

### Médiations multiples pour accompagner la population

Les approches communicationnelles des crises du chlordécone sont multiples, complexes et non coordonnées. Elles constituent, au-delà d'une anthropologie de la communication (Winkin, 2001), un exemple de communication du vivant au sein d'une crise complexe, dans laquelle une mise en perspective devient possible au travers du concept de communication orchestrale (Winkin, 2000). L'image est celle d'un orchestre en train de jouer une musique sans chef d'orchestre ni partition. Il s'agit donc de comprendre ce qui se déroule localement, les différents acteurs et enjeux, ainsi que les différentes interactions et stratégies de communication.

La tension sociopolitique enveloppant les différents enjeux de la pollution au chlordécone est une réalité au cœur de laquelle est développée une communication publique perfectible. Vivre avec cette pollution est avant tout permettre de la comprendre, c'est ce à quoi travaille, entre autres, le GRFI du rectorat de la Martinique. Vivre avec cette pollution engage à lutter au quotidien contre la contamination, notamment dans la réalisation des jardins créoles et dans la pêche, en pouvant s'appuyer sur l'accompagnement de Promotion Santé, ses programmes et ses actions.

Dans la même logique de santé intégrative sensible et respectueuse des cultures martiniquaise et guadeloupéenne, le projet de recherche participative en cours, GwadaSafeMeat<sup>40</sup>, permettra une réciprocité des connaissances apportées. La valorisation de la dimension patrimoniale des circuits informels de la viande bovine permise par la population renforcera la connaissance des différents acteurs et différentes institutions permettant leur sécurisation. Au-delà du caractère illégal de ces circuits, la vente sous le manguier révèle une dimension patrimoniale, sociale et culturelle impactée par la pollution. Le début du projet ouvre ainsi un axe de recherche inattendu : celui des usages traditionnels menacés par la pollution, comme le savoir-faire de réalisation d'un panier de pêche à écrevisses évoqué par un pêcheur.

## ► Références bibliographiques

- Akrich M., 2013. Co-construction, in Casillo I., Barbier R., Blondiaux L., Chateauraynaud F., Fourniau J.M. et al. (dir.), *Dictionnaire critique et interdisciplinaire de la participation*, Paris:GIS Démocratie et Participation. Disponible sur <https://www.dicopart.fr/co-construction-2013>.
- Babou I., 2017. L'atelier politique de la nature : Des grands partages à l'expérience sensible. *Questions de communication*, 2(32):7-28.
- Baillargeon D., Bencherki N., Boivin G., 2021. 20 ans des approches de la communication constitutive des organisations : émergence et innovations. *Communication et Organisation*, 1(59):13-25. <https://doi.org/10.4000/communicationorganisation.9723>.
- Bombardi L.M., 2023. *Pesticides. Un colonialisme chimique*. Editions Anacaona, 106 p.
- Bulle E.S., 2025. *Visa pour la Guadeloupe*. Elytis, 144 p.
- Chartol M., 1982. *Le génocide amérindien — Conquête et exploitation de l'Amérique au XVI<sup>e</sup> siècle*. Pointe-à-Pitre: Centre départemental de documentation pédagogique de Guadeloupe.
- Cordier A., 2023, *Grandir informés — Les pratiques informationnelles des enfants, adolescents et jeunes adultes*, C&F éditions, 344 p.
- Corroy L.(dir.), 2022. *Éducation aux médias en Europe Histoire, enjeux et perspectives*. Paris: L'Harmattan, 216 p. (coll. Éducation et médias).
- Espuny C., 2022. La communication environnementale, au cœur des humanités environnementales. *Questions de communication*, 41:211-222. <https://doi.org/10.4000/questionsdecommunication.28993>.
- Ferdinand M., 2019. *Une écologie décoloniale — Penser l'écologie depuis le monde caribéen*, Paris: Seuil, 464 p. (coll. Anthropocène).
- Ferdinand M., 2023. Le scandale du chlordécone, in Singaravérou P. (éd.), *Colonisations. Notre Histoire*, Paris: Seuil, 53.
- Ferdinand M., Jas N., 2022. L'invisibilité des risques en contexte postcolonial : la chlordécone aux Antilles et en Afrique, in Boudia S., Henry E. (éd.), *Politiques de l'ignorance*, Paris: Presses universitaires de France.
- Foudriat M., 2019. La co-construction — Une alternative managériale. Presses de l'EHESP, 228 p. <https://doi.org/10.3917/ehesp.foudr.2019.01>.

---

40. Programme ANR-23-SSAI-0014 coordonné par Aurélie Pourrez sur l'abattage sous le manguier en Guadeloupe.

- Galibert O., 2013. L'injonction participative au débat environnemental en ligne : imaginaires d'Internet, démocratie environnementale et communication engageante. *Les Enjeux de l'information et de la communication*, 14/1(1):35-49. <https://doi.org/10.3917/enic.014.0035>.
- Gama M., 2024. *Se penser peuple des Antilles*. Autres Talents, 54 p.
- Guingal P., 2024. La littératie en santé : destinée à l'amélioration de la santé? *Santé Publique*, 36(2):13-22. <https://doi.org/10.3917/spub.242.0013>.
- Habermas J., 2003. *De l'éthique de la discussion*. Paris: Flammarion, 208 p. (coll. Champs essais).
- Ho E.Y., Pak S., Leung G., Xu S., Kwun Yu C. *et al.*, 2020. Pilot Cluster Randomized Controlled Trial of Integrative Nutritional Counseling Versus Standard Diabetes Self-Management Education for Chinese Americans with Type 2 Diabetes. *Health Equity*, 4(1):410-420. <https://doi.org/10.1089/heq.2020.0002>.
- Ingold T., 2011. *Une brève histoire de lignes*. Molenbeek-Saint-Jean: Zones sensibles, 256 p.
- Joly P.B., 2010. La saga du chlordécone aux Antilles françaises. Reconstruction chronologique 1968-2008. Document réalisé dans le cadre de l'action 39 du plan chlordécone, Inra/Science en société-Ifris, 82 p. Disponible sur <https://www.anses.fr/system/files/SHS2010etInracol01Ra.pdf>.
- Lasserre G., 1953. Les « Indiens » de Guadeloupe. *Les Cahiers d'Outre-Mer*, 6-22:128-158. <https://doi.org/10.3406/caoum.1953.1847>.
- Libaert T., 2020a. Chapitre 2. L'organisation de la communication de crise, *in* Libaert T., *La communication de crise*, Paris: Dunod, 33-50.
- Libaert T., 2020b. Chapitre 3. Les stratégies de communication de crise, *in* Libaert T., *La communication de crise*, 5<sup>e</sup> éd., Paris: Dunod, 51-74.
- Morillon L., Bouzon A., Lee C., 2013. Épistémologies, théories et pratiques professionnelles en communication des organisations, *Études de communication*, 40(1):9-26. <https://doi.org/10.4000/edc.5038>.
- Ollivier-Yaniv C., 2015. La communication publique sanitaire à l'épreuve des controverses. *Hermès, La Revue*, 73(3):69-80. <https://doi.org/10.3917/herm.073.0069>.
- Parrot L., Faure C., 2023. Chapitre 1. Le droit et la loi comme ressources au service de la transition agroécologique : le rôle des dérogations, *in* Montouroy Y. (éd.), *Les transitions écologiques ultramarine au concret : Politiques publiques, animations territoriales et pratiques sectorielles*, Presses universitaires des Antilles, 29-41. <https://doi.org/10.3917/pua.monto.2023.01.0029>.
- Piron F., Arsenault É. (dir.), 2021. *Guide décolonisé et pluriversel de formation à la recherche en sciences sociales et humaines*. Éditions Sciences et Bien Commun. <https://uqam-bib.on.worldcat.org/oclc/1350794587>.
- Procaccia C., 2023. L'impact de l'utilisation de la chlordécone aux Antilles françaises. Rapport n° 360, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques., 170 p. Disponible sur <https://www.senat.fr/rap/r22-360/r22-360.html>.
- Romeyer H. (dir.), 2010. *La santé dans l'espace public*. Presses de l'EHESP, 15 p. Disponible sur [https://www.presses.ehesp.fr/wp-content/uploads/2026/01/9782810900336.pdf?srsltid=AfmBOorzzol74knEx7gqh\\_hup9SaKPhOJMzZxOnH\\_aCtlHto8Y5MhT72](https://www.presses.ehesp.fr/wp-content/uploads/2026/01/9782810900336.pdf?srsltid=AfmBOorzzol74knEx7gqh_hup9SaKPhOJMzZxOnH_aCtlHto8Y5MhT72).
- Saaidi P.L., Grünberger O., Samouëlian A., Le Roux Y., Richard A. *et al.*, 2023. Is a dissipation half-life of 5 years for chlordecone in soils of the French West Indies relevant? *Environmental Pollution*, 324:121283. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121283>.
- Sedda P., 2024. Organisation de mouvement social et défense du vivant : une alternative au capitalisme? *Communication et organisation*, 65(1):53-70. <https://doi.org/10.4000/11yyx>.
- Singaravelou P. (dir.), 2023. *Colonisations — Notre histoire*, Paris: Seuil, 720 p. (coll. L'Univers historique).
- Staii A., 2022. La participation des « influenceurs » non spécialisés aux communications publiques de santé : enjeux de légitimation. *Études de communication*, 58(1):125-145. <https://doi.org/10.4000/edc.14435>.

Tareau M.A., 2019. Les pharmacopées métissées de Guyane : ethnobotanique d'une phytothérapie en mouvement. Thèse de doctorat, Anthropologie et Ethnobotanique, université de Guyane, 516 p. Disponible sur <https://theses.hal.science/tel-02926473>.

Wilson G., 2023. *Poison powder. The kepone disaster in Virginia*, University of Georgia Press, 252 p.

Winkin Y., 1996 et 2001. *Anthropologie de la communication. De la théorie au terrain*. Paris: Seuil, 336 p.

Winkin Y., 1981 et 2000. *La Nouvelle Communication*. Paris: Seuil, 391 p.

## Chapitre 11

# Construction du problème public et réception des politiques publiques chlordécone aux Antilles (1968-2023)

*Malcom Ferdinand, Justin Daniel*

La contamination des Antilles par le chlordécone est aujourd'hui un problème public reconnu au niveau local, national et international au travers de nombreuses publications dans les médias, les quatre plans interministériels, les programmes de recherche et les nombreuses manifestations des collectifs locaux. Toutefois, cette reconnaissance n'a pas toujours été présente, et n'a pas toujours pris cette forme actuelle (Joly, 2010). Comme nous l'enseignent la sociologie pragmatiste et la sociologie des sciences et des techniques (Barthe *et al.*, 2010), la constitution d'une pollution environnementale en problème public est loin d'être une évidence (Gusfield, 1984). Au contraire, celle-ci relève d'un processus sociopolitique comportant ses biais, attirant l'attention sur certains aspects plutôt que d'autres. Quelle fut donc la constitution de la contamination au chlordécone en problème public ? Cette contribution propose dans un premier temps de réaliser un historique de la constitution de la pollution au chlordécone en problème public en retraçant certains moments-clés et certaines de ses questions. Puis, dans un second moment, elle envisage des pistes d'analyse sur la difficile réception des politiques publiques par les habitants et suggère des pistes à encourager pour la sortie de crise.

### ► Constitution du problème public (1972-2022) : pollution, santé et justice

L'histoire de la construction du problème public de la contamination des Antilles au chlordécone peut être racontée au travers des cinq périodes suivantes, chacune étant marquée par des processus singuliers qui infléchissent la controverse : 1968-1998, 2000-2005, 2006-2014, 2015-2017 et 2018-2022 (tableau 11.1).

La période 1968-1998 est marquée par une production structurelle d'innocence sur le chlordécone, celle qui précède l'émergence de la pollution au chlordécone des Antilles en tant que problème public. Elle débute par les premières tentatives de l'utilisation du chlordécone en 1968, son autorisation en 1972, son utilisation légale jusqu'en 1993, avec une utilisation prolongée illégalement jusqu'en 1995<sup>41</sup>, et s'achève en 1998,

---

41. Voir l'audition de Bruno Ferreira, directeur général de la direction générale de l'Alimentation, par la commission d'enquête sur le chlordécone (Letchimy et Benin, 2019b ; p. 61) et l'audition de Virginie Beaumeunier, directrice générale de la direction générale de la Concurrence, de la Consommation et de la Répression des fraudes (Letchimy et Benin, 2019b ; p. 260). Disponible sur [https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/rapports/cechlordec/115b2440-tii\\_rapport-enquete.pdf](https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/rapports/cechlordec/115b2440-tii_rapport-enquete.pdf).

**Tableau 11.1** Chronologie de la constitution du chlordécone en problème public.

N°	Dates	Processus principaux	Faits marquants
1	1968-1998	Production structurelle d'ignorance et voile d'innocence de la CLD	- Autorisation du CLD (1972, 1981, 1990, 1992-1993) - Hopewell (1975-1977) - IARC (1979)
2	1999-2007	Émergence d'un problème public par la mise en cause de l'environnement (1999-2006)	- Premières campagnes de mesures (eau/sol) - Patates douces de Dunkerque (2002) - Captage et décret de contrôle des sols cultivés
3	2006-2014	Revendication de justice et victimisation	- Affaire Belpomme - Actions en justice - Publications scientifiques sur le lien entre CLD et cancer de la prostate
4	2008-2022	Normalisation et acquittement de la molécule	- Plans CLD - Retrait puis annonce sur CLD et CPa - Déclaration du Président sur le CLD en 2019
5	2018-2022	Démultiplication de la mobilisation sociale, des victimisations et des actions en justice	- Changement de LMR - Mobilisations aux Antilles et en Hexagone (2019) - Nouvelles actions en justice - Affaire Keziah Nussier

CLD : chlordécone ; IARC : Centre international de recherche sur le cancer (*International agency for research on cancer*) ; CPa : Cancer de la Prostate ; LMR : limite maximale de résidus.

date où des recherches systématiques de la présence du chlordécone dans l'eau sont décidées après le rapport de l'inspection générale. Le processus principal marquant cette période est celui de la production structurelle d'ignorance sur les pollutions aux pesticides des écosystèmes et des corps antillais. Par « production d'ignorance », nous ne désignons pas une absence totale d'informations au sujet de la présence de pesticides dans l'environnement antillais, mais bien une construction sociopolitique qui donne l'illusion d'une situation d'ignorance (Henry et Boudia, 2022). En effet, malgré la connaissance de la persistance de la molécule depuis 1968 (reconnue par le premier refus d'autorisation du chlordécone par la commission des Toxiques), les alertes des ouvriers agricoles martiniquais de 1974, de l'affaire de l'usine états-unienne en 1975, des rapports de Snegaroff et Kermarrec respectivement en 1977 et 1980, et celles du rapport de l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (Unesco) en 1993, les services de l'État ont produit pendant 30 ans un récit sur l'eau et l'environnement antillais comme étant non pollués, c'est-à-dire sains. Nous parlons de production structurelle d'ignorance, car les infrastructures en place ne permettaient pas de détecter la présence des pesticides utilisés dans l'agriculture locale. En résultent alors à la fois un voile d'innocence sur la molécule chlordécone et une ignorance sur la qualité des écosystèmes antillais (Ferdinand, 2024 ; p.227-251).

La période de 1999 à 2005 marque l'émergence d'un véritable problème public au sujet de la pollution des Antilles, avec les débuts d'une production d'enquêtes et d'informations par les services de l'État (ARS) et des enquêtes scientifiques visant à caractériser cette pollution aux pesticides — en particulier au chlordécone —, ainsi qu'à en déterminer l'étendue et la durée. Le processus principal qui caractérise cette

période est celui de la mise en cause. Les écosystèmes antillais sont alors suspectés de contenir des molécules de chimie de synthèse dangereuses. Au fur et à mesure de la caractérisation de la pollution, les services de l'État appliquent des mesures visant à protéger les habitants de l'exposition à cette molécule. La (re)découverte de la pollution des captages dès 1999 s'est traduite par la mise en place de filtres à charbon actif, de même que la (re)découverte de la pollution des sols entraîna l'obligation, dès 2003 en Martinique et en Guadeloupe, de tester la teneur des sols en chlordécone, en HCH et ses isomères (dont le lindane) avant la culture de légumes-racines (dachine, igname, patate douce, toloman, manioc, choux caraïbe, carotte, navet, gingembre)<sup>42</sup>. Cette caractérisation de la pollution, accompagnée de mesures de protection, se poursuit encore aujourd'hui.

Il est important de noter que cette mise en cause ne provient pas d'une mobilisation sociale. Elle n'émane pas d'un groupe de personnes ayant des pathologies communes ou se plaignant de certaines nuisances liées à leur milieu. Bien entendu, cela ne veut pas dire qu'il n'y ait pas eu de personnes se plaignant de leur environnement ou ayant des pathologies communes. Pour autant, aucune constitution véritable de groupe de victimes n'est à l'œuvre et les effets sanitaires possibles de cette exposition chronique ne sont pas encore déterminés. Les nombreuses critiques et protestations historiques d'associations écologistes, telles que l'Assaupamar, sur la pollution de l'eau n'ont pas déclenché d'action étatique. La mise en cause de l'environnement vient d'en haut, c'est-à-dire des autorités étatiques, nationale et locale. Elle découle de la mise aux normes françaises de la directive européenne sur l'eau concernant la qualité de l'eau et de l'environnement dans le cadre de l'élaboration des Schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (Balland *et al.*, 1998 ; p. 9). Du fait de cette mise en cause par le haut, comme le décrivait Ulrich Beck, ce sont les experts qui se lancent à la recherche de victimes potentielles (Beck, 2008 ; p. 96), à l'instar de l'étude de l'Inserm sur la fertilité des ouvriers agricoles hommes en 1999 (Multigner *et al.*, 2008).

La période de 2006 à 2014 est caractérisée par la naissance des premières victimisations et revendications de justice face à la pollution de l'environnement antillais par le chlordécone et plus largement par les pesticides. Les Antillais sont alors présentés comme les victimes de cet empoisonnement et en découlent des demandes de justice et de réparation. Plusieurs éléments ont contribué à l'émergence de ces victimisations et demandes de justice à cette période. La production d'informations nouvelles sur l'histoire de l'utilisation du chlordécone, sur l'étendue de la pollution et sur les potentiels risques sanitaires contribua à faire connaître l'affaire au plus grand nombre. On y trouve : le rapport de la mission parlementaire en 2005 ; la publication de livres dénonçant un scandale dont *Chronique d'un empoisonnement annoncé : le scandale du Chlordécone* de Louis Boutrin et Raphaël Confiant (2007), *Pesticides, Révélations sur un scandale français* de Fabrice Nicolino et François Villerette (2007) ; le rapport de Dominique Belpomme de 2007 et la publication d'un entretien dans le journal *Le Parisien* tirant l'alerte sur le lien entre cancer de la prostate et chlordécone ; un second rapport parlementaire en 2009 ; ainsi que les livres *L'île-monde dans l'œil des pesticides* en 2009 et *Du chlordécone comme arme chimique française en Guadeloupe et en Martinique* en 2014 de Philippe Verdol (2009, 2014). Dans le champ scientifique,

42. Préfecture de la Martinique, arrêté n° 30725, 20 mars 2003 ; et Préfecture de la Guadeloupe, arrêté n° 20031496, 20 octobre 2003.

la publication des premiers résultats de l'étude Karuprostate de Luc Multigner *et al.* (2010) établissant un lien entre chlordécone et cancer de la prostate marqua une étape importante de la construction du problème public du chlordécone. On passe alors véritablement d'un problème environnemental à un problème sanitaire.

Ces processus de victimisation prirent plusieurs formes (judiciaire, politique, culturelle et médiatique) et portèrent sur deux aspects différents de la pollution. Le premier concerne le préjudice sanitaire encouru par les Antillais. En 2006, en Guadeloupe, un collectif d'associations et de syndicats dont SOS environnement Guadeloupe, ainsi que l'Union régionale des consommateurs, et le syndicat Union des producteurs agricoles de la Guadeloupe déposèrent plainte contre X au tribunal pénal. En 2007, deux associations martiniquaises Écologie urbaine et Assaupamar en firent de même. Si les revendications des ouvriers agricoles martiniquais de 1974 concernant l'exposition aux produits toxiques ne furent pas considérées comme un problème public, ces actions en 2006 et 2007 marquent la première fois où la victimisation et les demandes de justice des Antillais face aux pesticides sont publiquement reconnues. Cette constitution de victime de pesticides fut aussi à l'œuvre dans les luttes judiciaires au sujet de l'application de l'interdiction de l'épandage aérien aux Antilles de 2011 à 2014. Au cours de ce dernier conflit, mettant en scène de nouveaux collectifs locaux ayant pour objet la santé environnementale, la dénonciation de l'exposition des Antillais aux dangers de l'épandage aérien fut intimement articulée à la dénonciation de l'exposition au chlordécone (Ferdinand, 2018). Le second thème de victimisation et revendication de justice concerne les préjudices économiques encourus par plusieurs agriculteurs, pisciculteurs et pêcheurs, du fait des mesures de restrictions imposées par l'État concernant la pêche et l'agriculture.

La quatrième période de 2013 à 2019, succédant à celles de la victimisation et de la mise en cause, se caractérise par une politique de normalisation de la vie en pays contaminés et d'acquiescement de la molécule de chlordécone. La normalisation de la vie dans un environnement pollué s'illustre par trois processus. Premièrement se trouve la gestion de la pollution au travers du recours à la LMR. Si cette approche, classique en politique publique, fut initiée dès les années 2000, elle semble se stabiliser dans la période 2013-2018. L'État produit un discours de maîtrise de la pollution et de maîtrise de l'exposition de la population au travers de l'adoption de seuils (LMR) qui sont jugés acceptables par ses services. Cela procède d'une normalisation de la vie dans un écosystème pollué avec une contamination minimale des habitants. Autrement dit, le discours étatique consiste à dire qu'il est possible de vivre dans un environnement durablement pollué par une molécule toxique sans que cela n'entraîne une forte contamination de la population et donc sans que cela ne pose de problème sanitaire. Deuxièmement, le système judiciaire français pose un ensemble d'embûches aux dépôts de plaintes des collectifs antillais, c'est-à-dire des obstacles procéduriers à la constitution de groupes antillais en tant que victimes. En effet, il fallut attendre deux ans pour que les dépôts de plaintes soient acceptés aux tribunaux pénaux (après un refus du procureur), un appel des associations et un pourvoi en cassation. Ces plaintes ont été jointes et délocalisées au sein d'une seule procédure au tribunal de Grande instance à Paris en 2008. Cette démarche a abouti à un premier non-lieu au tribunal pénal en janvier 2023. Après 17 ans d'instruction, la justice pénale indique donc que cette situation de contamination est « normale » du point de vue de la loi française. Des appels sont en cours. Enfin, troisièmement, la normalisation se manifeste au

travers d'une reconnaissance paradoxale de l'existence de victimes du chlordécone. Durant sa visite dans la ville du Prêcheur en 2018, le président de la République, Emmanuel Macron, parla non pas d'un problème sanitaire, mais bien d'un « scandale environnemental », et ne reconnut des risques sanitaires que pour les ouvriers agricoles (Pietralunga, 2018). Alors qu'une étude estime que plus de 92 % des Antillais sont contaminés au chlordécone, ce discours officiel, porté par la voix du président, occulte les victimes à l'échelle de la population entière, et poursuit cette normalisation.

L'acquiescement de la molécule de chlordécone se déroule essentiellement par l'introduction politique de doute dans les productions scientifiques qui établissent la dangerosité du chlordécone à l'exposition chronique. Ce doute s'est cristallisé sur le lien entre chlordécone et cancer de la prostate démontré par les recherches de Luc Multigner *et al.* en 2010. Si ce résultat scientifique renforça les processus de victimisation et de revendication de justice des collectifs antillais locaux, il déclencha de la part du gouvernement une posture consistant à mettre en doute ce résultat scientifique. Cette position fut remarquée en 2013 par le retrait de financement d'une seconde étude financée par l'Institut national de recherche sur le cancer (Inca) sur le lien entre cancer de la prostate et chlordécone en Martinique (Madiprostate) qui aurait dû être menée par la même équipe de Karuprostate (avec Luc Multigner et Pascal Blanchet). À la suite d'un premier rapport de faisabilité rendu en 2013, le financement de cette étude fut arrêté de manière unilatérale en 2014 par la présidente de l'Inca de l'époque, Agnès Buzyn, sans avis du collègue d'expert, c'est-à-dire sans avis scientifique préalable (Letchimy et Bénin, 2019b ; p. 34). Lors de son audition dans le cadre de l'enquête parlementaire sur le chlordécone en 2019 dirigée par Justine Benin et Serge Letchimy, Luc Multigner lit des extraits du courrier qu'il reçut de la part de la présidente de l'Inca le 27 janvier 2014, notamment ce passage : « après lecture de votre rapport, j'ai le regret de vous informer que je ne le soumettrai pas au collège d'experts, étant donné que les informations transmises à ce jour ne me permettent pas d'évaluer la pertinence de soutenir un déploiement de cette étude » (Letchimy et Bénin, 2019 b ; p. 34). Le professeur Multigner s'étonne alors que cette décision soit prise par la présidente, et non le collègue d'experts après un avis scientifique. Cet avis n'interviendra qu'en novembre 2014 à l'insistance du directeur général de la Santé, Benoit Vallet, soit neuf mois après la décision de la présidente de l'Inca.

Dans un courrier datant du 22 juillet 2025, adressé indirectement aux auteurs de ce chapitre qui était alors toujours en écriture, l'actuel président de l'Inca, Norbert Ifrah, conteste la version du professeur Multigner arguant que cette décision du retrait aurait été motivée par des avis d'experts en mai 2014 de « l'INVS, l'ISPD (Institut de santé publique, d'épidémiologie et de développement) Bordeaux, l'Inserm Grenoble et Caen »<sup>43</sup>. Cette controverse entre le professeur Multigner et l'Inca sur le financement d'une recherche sur le lien entre chlordécone et cancer de la prostate illustre un des points saillants de l'introduction politique du doute dans les productions scientifiques : l'absence de démocratisation des sciences. Aucun des rapports scientifiques évoqués par le professeur Multigner et par l'Inca n'a été rendu public. Les Antillais, notamment les malades du cancer de la prostate, sont maintenus dans une position de spectateurs des recherches en sciences biomédicales qui sont menées sur leurs corps et sur leurs terres. Ils sont privés, en outre, de la possibilité de participer aux processus

43. Courrier de Norbert Ifrah du 22 juillet 2025 adressé aux coordinateurs de ce chapitre.

scientifiques et d'accéder à certaines informations de la recherche. Une confusion dommageable est ainsi entretenue entre administration d'un territoire et activités scientifiques (Ferdinand, 2024; p. 303-336).

En somme, aucune explication scientifique publique sur les raisons du retrait du financement d'une enquête Madiprostata ou équivalente entre 2010 et 2020 n'a été fournie. Aucune possibilité de soumettre cette décision à une discussion scientifique et donc de contester la politique de recherche adoptée par la Direction générale de la santé (DGS) et l'Inca. Il en résulte que, publiquement, l'acquiescement de la molécule ne provient que des dires de responsables gouvernementaux à l'instar des propos du président de la République qui, lors d'une séance du Grand Débat avec les élus d'outre-mer en 2019, répondit à une question sur le chlordécone posé par Joël Beaugendre, par les propos suivants : « je pense qu'il ne faut pas aller jusqu'à dire "c'est cancérogène", parce qu'à la fois on dit quelque chose qui n'est pas vrai et on alimente les peurs » (Vincent, 2019).

La cinquième période, inaugurée en 2018, période dans laquelle nous sommes, est marquée par un élargissement et une démultiplication de la mobilisation sociale, des processus de victimisations et des revendications de justice prenant la forme de pétitions, de manifestations et d'actions en justice. 2018 marque les débuts de nouvelles formes de publicisation de l'affaire au travers des manifestations en Martinique, à Pointe-à-Pitre et à Paris et de la création des collectifs « Lyannaj pou dépolyé Martinik » en Martinique, « Lyannaj pou dépolyé Gwadeloupe » en Guadeloupe, et « Chlordécone Justice Réparation » en Hexagone. Plus de 80 manifestations, rassemblements et parfois même blocages de centres commerciaux se sont déroulés de 2018 à 2023 — majoritairement en Martinique. Le procès de militants antichlordécone, dont les « sept d'Océanis » — du nom du centre commercial du Robert bloqué —, le 13 janvier 2020, marqua l'ouverture d'un autre front judiciaire de l'affaire. La critique de la contamination se double d'une critique d'un système judiciaire perçu comme inique, en ce qu'il est capable de poursuivre rapidement des militants, mais ne peut statuer sur la contamination en elle-même. Enfin, le non-lieu prononcé dans l'instruction pénale le 5 janvier 2023 n'a fait qu'attiser le sentiment de mépris auprès de plusieurs collectifs locaux.

## ► Luites de cadrage et démonétisation de la parole officielle

La construction de l'enjeu chlordécone aux Antilles en problème public révèle l'âpreté et la persistance des luttes de cadrage. Le concept de « cadrage », ou encore « processus de cadrage », est mobilisé par plusieurs sciences sociales afin de désigner le processus par lequel des individus, des mouvements, des collectifs et des institutions font sens d'une situation et l'interprètent (Benford *et al.*, 2012). Ces luttes de cadrage prennent place dans un contexte de perte de centralité de la parole officielle — scientifique, étatique et, plus largement, politique — concurrencée par de nouvelles formes d'expression citoyenne. L'alliance classique entre science et pouvoir, héritée des Lumières, est dès lors bousculée, voire remise en cause.

Ce constat est loin d'être spécifique aux Antilles : en témoigne la multiplication de travaux et de réflexions sur l'inclusion d'acteurs de la société civile, porteurs de leur propre légitimité, dans les débats publics et dans les processus d'élaboration et de mise en œuvre des programmes d'action. Sans oublier les interrogations sur le rôle de la connaissance dans le fonctionnement de la démocratie (Innerarity, 2015; Blondiaux et Traïni, 2018; Escoubes et Proriol, 2021; Bensaud-Vincent et Dorothée, 2023;

Loisel et Rio, 2024). Force est d'admettre, cependant, que ce constat s'inscrit ici dans l'histoire complexe des relations entre des sociétés insulaires qui se vivent, à bien des égards, comme évoluant en marge de la République; d'autant qu'elles entretiennent, en outre, un rapport non moins complexe à l'État, dont la perception et les représentations, qui ont sensiblement évolué au cours des dernières décennies, se nourrissent de la réactivation de revendications d'inspiration décoloniale.

Outre la persistance de la pollution, les constantes luttes et tensions de cadrage expliquent sans doute la pérennisation de l'inscription du problème chlordécone à l'agenda, l'une des caractéristiques de la crise multiforme liée aux usages de ce pesticide. Aux tentatives d'imposition d'un cadrage technico-sanitaire de la part de l'État, fortement tributaire de la parole délivrée par les autorités scientifiques, répondent celles des acteurs de la société civile. Ces derniers puisent dans un répertoire plus large, allant de la contre-expertise locale visant à briser le monopole étatique en la matière, à une rhétorique dénonciatrice d'un empoisonnement délibéré et d'un passé esclavagiste et colonial « qui ne passe pas ».

Cette polycrise est fréquemment associée à la gestion défaillante et quelque peu erratique du dossier (Le Déaut et Procaccia, 2009; p. 16) de la part de l'État, accusé d'être resté imperméable aux signaux émis dès les années 1970 par les ouvriers agricoles en grève, les associations écologistes à la Martinique et le monde scientifique<sup>44</sup>. Il lui est également reproché de s'être montré, à l'inverse, réceptif à l'action conjuguée d'acteurs œuvrant en faveur de dérogations pour l'emploi du chlordécone (Letchimy et Benin, 2019a; p. 80), mais peu efficace quant au contrôle exercé en matière de reconstitution illégale de stocks du pesticide (Letchimy et Benin, 2019a; p. 47). À une période de relative inaction de sa part a donc succédé une prise de conscience pour le moins tardive de l'ampleur du désastre.

Au demeurant, cette prise de conscience produit ses effets essentiellement à partir des années 2000, d'abord sous la forme de mesures administratives et réglementaires ou d'outils de contrôle visant, par exemple, à protéger les populations de l'exposition au travers des eaux de consommation et à prévenir la consommation de denrées alimentaires contaminées.

Ensuite, elle se traduit par des mesures de coordination de l'action des structures ministérielles et des instituts de recherche concernés par la pollution au chlordécone. On notera la mise en place en 2000 du Grepp en Guadeloupe, et en 2001 du Grephy à la Martinique, ainsi que la nomination en décembre 2006 d'un chargé de mission interrégionale afin de coordonner plus spécifiquement l'action de l'État dans les deux îles.

Dans le domaine de la production des connaissances et de la constitution d'une expertise, les études se succèdent. Il en est ainsi de l'enquête sur la santé et les comportements alimentaires en Martinique (Escal) lancée en 2003 et celle dite « Calbas » sur les habitudes alimentaires des populations dans les communes du sud de la Basse-Terre en Guadeloupe; d'une étude spécifique sur la caractérisation des populations à risque élevé en Martinique menée par la cellule interrégionale d'épidémiologie d'Antilles-Guyane (Cire) et publiée en août 2006; de diverses investigations sur les impacts sanitaires de l'exposition au chlordécone (recherches de l'Inserm sur le

44. L'état des connaissances, notamment à propos des effets de l'exposition prolongée à la molécule, est l'un des arguments convoqués pour expliquer la sous-estimation de l'ampleur de la catastrophe sanitaire.

risque sur la fertilité masculine, de la Cire sur la répartition spatiale et temporelle à la Martinique des cancers suspectés d'être liés à une exposition aux pesticides organochlorés sur la période 1981-2000); de l'étude d'imprégnation Hibiscus concernant les femmes enceintes et leur nourrisson; des enquêtes épidémiologiques comme la cohorte mère-enfant Timoun en Guadeloupe visant à évaluer l'impact des expositions sur le déroulement de la grossesse et le développement cognitif de l'enfant ainsi que le programme Karuprostate portant sur l'occurrence du cancer de la prostate; sans omettre plusieurs recherches sur l'impact agronomique et environnemental afin de caractériser les conditions de la persistance de la molécule dans les sols contaminés et à en mesurer les conséquences.

Enfin, à partir de 2008, l'intervention des pouvoirs publics se décline essentiellement à partir des plans chlordécone I (2008-2011), II (2011-2013), III (2014-2020) et IV (2021-2027). Après une longue période de latence — entre la détection du chlordécone dans les captages d'eau en 1999 et le lancement de la planification s'écoulent huit ans —, les deux premiers plans s'inscrivent incontestablement dans une gestion de l'urgence (Le Déaut et Procaccia, 2009; Blanchard *et al.*, 2011). Ils s'en tiennent, pour l'essentiel, à des réponses de court terme. Capitalisant sur l'expertise précédemment constituée, l'action planificatrice de l'État s'oriente entre 2008 et 2013 vers l'amélioration des connaissances de la pollution et de son évolution, de ses effets sur la santé et de l'exposition des populations. Un volet important est consacré à la protection de celles-ci, grâce au contrôle et au respect des normes de contamination des denrées alimentaires ainsi qu'à la sensibilisation, notamment au travers du programme Jafa. Le plan chlordécone III inaugure le passage de la gestion d'urgence à la gestion du risque dans une perspective de développement durable. Son successeur, le plan IV, entend répondre aux besoins de la population, en l'accompagnant « dans tous les domaines impactés par la pollution, sur la base d'un travail commun — État, collectivités locales et société civile ». Il est structuré autour de trois stratégies transversales — communication, recherche et formation — et trois stratégies thématiques — santé-environnement-alimentation, santé-travail, société-économie.

Tous ces dispositifs recourent, dès le départ, à des instruments d'action publique traditionnels, à caractère législatif et réglementaire (Lascoumes et Le Gales, 2005). Il va sans dire qu'ils ont une fonction prescriptive visant avant tout à cadrer les comportements sociaux. À cela s'ajoute une « fonction symbolique de légitimation de la domination étatique qui s'exerce au nom de l'intérêt général énoncé suivant des procédures de décision formalisées » (Epstein et Pinson, 2021). Cette légitimation se fonde, entre autres, sur le monopole, le contrôle et la circulation des savoirs liés à l'expertise revendiqués par l'État.

Ces outils se complètent, le plus souvent sur un mode mineur, d'instruments moins traditionnels, à caractère participatif cherchant à associer diverses parties prenantes à la définition des objectifs et des actions publiques, ou encore d'instruments communicationnels et informatifs dont le rôle tend à se renforcer, notamment avec le plan chlordécone IV. Il s'agit de répondre aux lacunes observées et aux préoccupations exprimées dans les rapports d'évaluation successifs.

L'analyse de ces différents dispositifs, de leur évolution et de leur mise en œuvre fournit d'utiles indications, à la fois sur le type de ressources mobilisées par les autorités publiques, et sur la conception des rapports État-société qui sous-tend leurs

interventions. Elle renseigne tout autant sur le cadrage étatique du dossier chlordécone. Couplé à un pilotage « par le haut », parfaitement conforme à la tradition étatique française, le rapport État-société s'organise d'emblée sur un mode hiérarchique, même s'il tend désormais à évoluer vers un modèle qui se veut plus horizontal. Encore faudrait-il ajouter qu'il serait sans doute prématuré et audacieux de prétendre, à ce stade de son exécution, que le plan IV tiendra toutes ces promesses de ce point de vue.

Ainsi, la critique majeure adressée aux trois premiers plans concerne d'une part, outre les faiblesses en matière de communication, leur construction trop éloignée du terrain, notamment des populations tenues à distance de leur élaboration et, d'autre part, un pilotage trop vertical sans coordination véritable avec tous les acteurs, ceux de l'agriculture comme de la pêche, ou encore de la santé et de la recherche (Letchimy et Bénin, 2019a). Circonstance aggravante, la disparition du Grepp et du Grephy ainsi que la mise en sommeil entre 2013 et 2018 des comités de pilotage territoriaux présidés par les préfets de Guadeloupe et de Martinique ont largement contribué à nourrir le sentiment d'une gouvernance verticale, parfois déconnectée du terrain. Un tel constat n'est probablement pas étranger au faible engagement des collectivités territoriales, pourtant partenaires financiers en leur qualité de gestionnaires des fonds européens, dans un plan à l'élaboration duquel elles estiment ne pas avoir été suffisamment associées.

Quant au cadrage étatique de la crise, il est très clairement de type technico-sanitaire. Il associe au pilotage vertical une approche faisant de la dimension sanitaire une référence centrale de l'action publique.

Cette approche est largement fondée sur l'alliance classique entre science et pouvoir en vertu de laquelle la légitimité du politique découle logiquement de son lien étroit de coopération avec la raison scientifique (Bensaude-Vincent et Dorthe, 2023). D'où la place essentielle accordée à la connaissance scientifique et aux savoirs experts mobilisés à partir de différents canaux selon, là aussi, des schémas classiques (Le Bourhis, 2021) : production de données et d'informations à des fins de décision grâce, entre autres, aux services des administrations ; études diligentées et programmes de recherche financés permettant de constituer une expertise, en amont et en aval des différents plans chlordécone, mise en circulation des savoirs autorisés dans l'espace public. Cette approche confère un rôle central à l'État, qui cherche à conserver le monopole, le contrôle et la circulation de l'expertise, tout en exposant scientifiques et experts dont la parole, délivrée dans un contexte d'incertitude et d'attentes très fortes de connaissances fiables, revêt assurément une dimension politique. Elle repose sur un modèle d'expertise aujourd'hui battu en brèche selon lequel le pouvoir fonde ses décisions, auxquelles les citoyens se conforment sagement, sur des preuves énoncées par l'expertise scientifique légitime.

Les différentes évaluations ainsi que les rapports officiels ont souligné, de leur côté, le rôle central accordé au volet sanitaire des trois premiers plans au détriment des aspects socio-économiques et environnementaux (Procaccia, 2023 ; Branchu *et al.*, 2020 ; Letchimy et Bénin, 2019a). De manière significative, l'organisation du pilotage des deux premiers plans a été confiée à titre exclusif au directeur général de la Santé, celle du plan III à la DGS et à celle des outre-mer (DGOM), marginalisant le rôle des trois ministères-clés de l'Agriculture, du Développement durable et de la Recherche, et, a fortiori, celui des collectivités territoriales.

Ce cadrage technico-sanitaire, amplement basé sur les savoirs experts mobilisés par l'État, se trouve néanmoins au cœur de luttes concurrentielles qui tentent d'imposer

des modèles alternatifs porteurs de diagnostics différents et d'une vision opposée en matière de solutions. Ces modèles alternatifs se construisent, d'une part, dans les rapports complexes, hérités de l'histoire, entre les territoires insulaires que sont la Guadeloupe et la Martinique et un État perçu de plus en plus comme externe et éloigné, et, d'autre part, dans un contexte caractérisé par l'affaiblissement de la parole publique, propice de surcroît à la réactivation de revendications politico-identitaires ou d'inspiration décoloniale, ces différents éléments se renforçant mutuellement.

C'est ainsi que l'on assiste au déploiement d'une contre-expertise locale qu'incarnent parfaitement, sans pour autant en épuiser toutes les composantes, différentes associations. C'est le cas en particulier de l'Amses-Martinique qui se donne pour objectifs « la défense de la santé de la population martiniquaise et particulièrement celle des travailleurs exposés professionnellement aux polluants environnementaux conformément au serment d'Hippocrate qu'ils ont prononcé », et d'être « une force de proposition reconnue et une force de pression visant à informer le grand public sur toutes les questions environnementales, surtout celles qui ont des conséquences sanitaires importantes », en « développant si nécessaire des contre-expertises scientifiques indépendantes »<sup>45</sup>. D'autres structures, aussi bien en Guadeloupe<sup>46</sup> qu'à la Martinique, développent en leur sein leur propre expertise ou recourent à des expertises scientifiques externes afin de prendre à contre-pied le discours officiel et revendiquer implicitement la reconnaissance de savoirs alternatifs localement enracinés<sup>47</sup>. Il en résulte une situation caractérisée par un éclatement de l'offre informationnelle associé à la multiplication de producteurs d'information, la concurrence des savoirs, la perte de centralité de la connaissance scientifique et le bouleversement des hiérarchies établies. De ce fait, les mesures et recommandations des autorités centrales ainsi que les outils de suivi et de prévention font l'objet d'une appropriation très inégalement répartie au sein des populations, comme tendent à le montrer le succès incontestable des Jafa et, à l'inverse, la montée en puissance très progressive de la chlordéconémie ainsi que des dispositifs d'aide aux agriculteurs et aux pêcheurs qui tardent à être pleinement investis. Elles se heurtent également à des habitudes alimentaires et à des pratiques traditionnelles — qui nuisent à leur efficacité —, telles que le recueil d'eau de source potentiellement polluée ou la consommation d'aliments en dehors de toute traçabilité. Des phénomènes aggravés par les inégalités sociales et une information parfois inaccessible à certaines couches de la population, lorsqu'elle n'est pas perçue ou jugée peu crédible.

---

45. Textes issus du site <http://amses-martinique.com/>. La présidente de cette association conteste, par exemple, le discours officiel sur le dosage du chlordécone dans le sang, estimant que le taux doit être de zéro, car « on ne peut avoir droit à un poison » dans le sang, ainsi que le label zéro chlordécone du Parc naturel régional de la Martinique (PRNM), qui repose sur l'idée d'un taux acceptable dans les denrées alimentaires, sachant que « tous les produits sont contaminés, y compris par diffusion dans la sève des plantes ». Voir <https://www.youtube.com/watch?v=K3JW-INRU90>.

46. On peut citer, par exemple, l'association Vivre en Guadeloupe.

47. À titre d'exemple et pour s'en tenir à la Martinique, huit associations ont écrit, le 12 février 2019, au président de la République, Emmanuel Macron, pour réclamer une tolérance zéro sur le chlordécone aux Antilles. Contestant les LMR de chlordécone admises dans l'alimentation, elles observent que le taux de chlordécone accepté présente des risques pour la santé (cancer de la prostate, du foie, du rein, etc.). Il s'agit des associations suivantes : Amses-Martinique, Assaupamar, Collectif zéro chlordécone-zéro poison, Santé environnement sans dérogation (SESD), Génération Martinique, Pour une écologie urbaine, Alerte médecins pesticides, Association Santé-Environnement France.

Dès lors, le couple formé par l'alliance entre science et pouvoir s'en trouve affaibli. D'autant que l'un de ses éléments constitutifs — le pouvoir — est largement démo-nétisé, et la parole qu'il énonce souvent inaudible à raison d'une communication défaillante. Les suspicions quant à l'origine du problème entre les années 1970 et 1990, la gestion du risque, pour le moins tardive, aléatoire et trop centralisée, mais aussi le vide laissé par les élus locaux frappés pour la plupart d'une forme de mutité, ont conféré à ce problème public, de manière sous-jacente, une dimension politico-institutionnelle. Celle-ci renvoie à la dialectique distance-proximité qui structure de longue date les rapports entre l'État et les territoires insulaires (Daniel et David, 2021). Plusieurs acteurs locaux, dont certains s'expriment en marge de la sphère politique officielle — l'association Vivre en Guadeloupe, le collectif Lyannaj pou Dépolyé Martinik (Rassemblement pour dépolluer la Martinique), le Coadep créé à la fin de l'année 2019 sur la base d'une forme d'épidémiologie populaire —, occupent le terrain : ils considèrent l'autorisation du chlordécone et le maintien de cette autorisation, en dépit de sa toxicité et de plusieurs alertes, comme une faute de la part d'un État réputé imperméable aux réalités locales et au vécu des populations antillaises. Les vagues successives de mobilisation et de protestation à la Martinique — le Forum social zéro chlordécone réunissant divers acteurs de la société civile en mars 2018, le lancement en avril 2018 du collectif Lyannaj pou Dépolyé Martinik qui interpelle l'État au travers d'une plate-forme *ad hoc* de revendications — s'engouffrent dans la brèche ouverte par l'affaiblissement du couple science-pouvoir en disputant à l'État le cadrage du problème. De manière plus générale, la réaction tardive du pouvoir central et les dérogations ministérielles ayant permis l'utilisation du chlordécone malgré son interdiction dans l'Hexagone et une communication peu efficiente induisent l'idée non seulement d'une inaction des autorités centrales, mais aussi d'un traitement différencié de populations évoluant en marge de la République.

D'où le sentiment de défiance exprimé à l'égard de l'État qui s'est exacerbé durant ces dernières années du fait du télescopage du dossier chlordécone avec deux autres situations potentiellement conflictuelles — la gestion (ou pendant longtemps la non-gestion) des conséquences des échouements des Sargasses et la crise socio-sanitaire liée à la pandémie de Covid-19 (Daniel, 2023). Un télescopage qui s'accompagne de la persistance de tensions au sein des sociétés antillaises et d'une addition de colères couronnée par l'annonce le 5 janvier 2023 d'une décision de non-lieu, vécue localement comme un déni de justice, dans le cadre de la plainte déposée par plusieurs associations en 2006 pour empoisonnement, mise en danger d'autrui et administration de substance nuisible.

Il est vrai que les luttes de cadrage se sont aussi déployées sur un autre terrain plus directement politique, celui de la dénonciation de la persistance des effets du passé esclavagiste et colonial. Ce terrain de contestation a trouvé un prolongement dans des mobilisations plus récentes tendant à réactiver des représentations associées à des hiérarchies socioraciales héritées de ce passé. La publication en mars 2007 par les deux auteurs martiniquais, Louis Boutrin et Raphaël Confiant, de l'ouvrage *Chronique d'un empoisonnement annoncé*, ciblant les planteurs locaux et les pouvoirs publics, a été reçue selon un rapport parlementaire comme une forme de « théâtralisation » de la question dénuée de tout contenu scientifique (Boutrin et Confiant, 2007 ;

Le Déaut et Procaccia, 2009 ; p. 11)<sup>48</sup>. Ce dialogue de sourds est typique des échanges qui se déroulent autour des stratégies de cadrage, lesquelles portent des visions différentes, voire opposées, d'un même problème public. Significatif est à cet égard le processus de radicalisation du mouvement de protestation au courant de l'année 2019, sur fond de revendications d'inspiration décoloniale. Les blocages ciblés de magasins dénonçant l'emprise du « lobby béké » et son rôle supposé dans la contamination des sols et l'empoisonnement des populations, les manifestations de rues et le recours à des répertoires d'actions parfois violents témoignent de la persistance de vives tensions autour du cadrage.

Au total, la contamination des sols par le chlordécone et la gestion pour le moins problématique de ses conséquences par les autorités dans un contexte croissant d'éco-anxiété donnent lieu à des batailles d'influence symptomatiques des stratégies de cadrage portées par les différents acteurs impliqués. Ces batailles ont, à l'évidence, contribué à infléchir dans une certaine mesure l'action publique, comme en témoignent les orientations du plan chlordécone IV, du double point de vue de son élaboration et de sa mise en œuvre. Cet infléchissement est perceptible, en particulier, au travers de la volonté désormais affichée d'associer la population et les parties prenantes à la gestion du risque.

En outre, la caractérisation de la situation engendrée par la pollution des sols et ses conséquences sur le plan sanitaire, économique et environnemental reste au cœur des luttes de cadrage. De ce point de vue, les changements intervenus dans les répertoires discursifs des acteurs méritent d'être analysés. Qualifié de simple « accident environnemental » dans un rapport de l'Opecst publié en 2009 (Le Déaut et Procaccia, 2009), érigé au rang de désastre sanitaire comparable « à celui du sang contaminé » par le professeur Dominique Belpomme, le problème public chlordécone a été appréhendé par le président de la République lors de son déplacement en 2018 à la Martinique sous l'angle d'un « scandale environnemental ». Le président Macron a également admis que la reconnaissance de ce « scandale environnemental » doit aller de pair avec une prise de responsabilité de la part de l'État et son engagement en matière de réparation. Désormais repris par les représentants du pouvoir central, le terme « scandale » complété ou non par les déterminants, « sanitaire » ou encore « environnemental », montre à quel point le positionnement de l'État s'est progressivement infléchi, sans pour autant convaincre les populations.

D'un autre côté, perçu dans les espaces publics antillais au travers de grilles multiples — « empoisonnement » plus ou moins délibéré des terres et des populations, « affaire » par référence au volet judiciaire, « scandale » ou « crime » (d'État), « écogénocide », etc. —, le problème public et multidimensionnel chlordécone est au centre d'un foisonnement sémantique qui révèle tout à la fois l'instabilité de son cadrage, en dépit des mutations intervenues dans le registre discursif des acteurs, et la persistance des luttes concurrentielles qui se poursuivent pour sa définition.

---

48. « Sur un terrain social dont on a pu, à nouveau, mesurer l'extrême sensibilité, l'ombre portée de ces contributions [le rapport fait également allusion au rapport d'expertise et d'audit concernant la pollution par les pesticides en Martinique — Conséquences agrobiologiques, alimentaires et sanitaires et propositions de sauvegarde en cinq points du professeur Dominique Belpomme rendu public le 18 septembre 2007] est de nature à introduire des confusions malvenues dans le traitement d'un problème qui commande la recherche de solutions dépassionnées. »

Cette prolifération de sens a pour effet ultime la constitution d'un univers où s'entrechoquent des régimes de vérité concurrents ainsi qu'une pluralité de contenus souvent contradictoires, qui font de l'acceptabilité sociale des dispositifs de politique publique un véritable défi. Certes, la perte de confiance et le rapport de défiance qui touchent désormais l'ensemble des institutions et le personnel politique, central comme local, apparaissent comme un sérieux obstacle à l'adhésion des populations antillaises aux dispositifs de politique publique. Il est non moins sûr que cet univers ainsi constitué est également un défi pour l'acceptabilité sociale. Dans ces conditions, il n'est guère étonnant que la gestion du risque lié au chlordécone révèle un paradoxe : tout semble se passer comme si l'engagement croissant de l'État dans la gestion de ce risque n'avait cessé d'amplifier la résistance envers son acceptabilité sociale (Bérard, 2023).

## ► Conclusion

De tels constats invitent, en guise de conclusion à cette contribution, à réfléchir sur des pistes de sortie de crise et de l'impasse actuelle, sans prétendre apporter des solutions définitives à tous les problèmes soulevés. Cette sortie de crise pourrait passer par une « scénarisation » prenant au sérieux la complexité et le caractère multidimensionnel du problème, le contexte sociohistorique dans lequel il s'inscrit (lequel influe directement sur le jeu des acteurs), ainsi que la place et le rôle que la production et l'utilisation des connaissances peuvent y tenir.

À cet égard, tout cadrage procédant exclusivement par le « haut » et privilégiant un seul des volets du dossier au détriment des autres paraît voué à l'échec, voire au rejet de la part de certaines franges de la population. Le risque, en effet, est de marginaliser des acteurs tentés de se replier sur leur identité et de s'enfermer dans des chapelles distinctes cultivant chacune son régime de vérité. Or la participation et l'implication de la population dans le processus de normalisation du risque sont essentielles. La fragilisation de la parole des experts officiels combinée à l'émergence de savoirs concurrents sonne comme un appel à briser le traditionnel rapport d'extériorité entre science et société, en jouant le triple jeu de la transparence quant au fonctionnement et à la temporalité propre à l'univers scientifique ; de la mise à disposition de connaissances fondées sur une expertise légitime, au moyen de dispositifs de médiation ; et du croisement des différents types de savoirs dans l'espace public, source potentielle d'ambiguïtés fécondes en temps d'incertitudes. Sur ce dernier point, l'enjeu est d'éviter toute exclusion des profanes et des citoyens de la construction de l'expertise scientifique par négation de l'expertise d'usage (Gaille, 2021). Il importe, en effet, de mettre en place un mode de fonctionnement plus ouvert à la diversité des acteurs dans des sociétés insulaires caractérisées par un tissu associatif particulièrement dense et soucieux, on l'a vu, de s'approprier le problème.

À la prise en compte de la diversité des acteurs doit répondre celle non moins nécessaire du décloisonnement des champs de la recherche et de la connaissance. Cela concerne tout à la fois les sciences du sol, les sciences biomédicales et l'univers, encore trop nébuleux, des sciences humaines et sociales. L'apport de ces dernières peut être pourtant décisif, notamment pour réaliser le croisement entre science et politique et traiter, là aussi dans une interaction féconde, les dimensions socio-économiques, anthropologiques et sociologiques du risque.

Cette scénarisation suppose, en outre, la co-construction d'un socle partagé conjurant le danger d'un face-à-face improductif entre les sachants et les autres, en mobilisant au

besoin les ressources des sciences participatives et en se montrant attentif aux attentes s'exprimant localement. À condition, toutefois, d'assumer pleinement les limites de la science « en train de se faire » en situation de crise et d'incertitudes. Il s'agit là d'une condition nécessaire à la formation d'un espace favorisant l'interconnaissance des acteurs et dans lequel se négocie la confiance. Cette entreprise, on en conviendra, est loin d'être aisée au regard du caractère particulièrement sensible du problème et compte tenu de la toile de fond sociohistorique sur laquelle il est projeté. De même, il convient de prendre au sérieux la difficulté à organiser au sein de l'espace public la rencontre et la confrontation des différentes expertises, des scientifiques de toutes disciplines, mais aussi des décideurs, des intervenants, comme des citoyens bénéficiaires des politiques publiques dans le cadre de la gestion de ce risque qui s'inscrit, plus que jamais, dans la durée.

## ► Références bibliographiques

- Balland P., Mestre R., Faggot M., 1998. Rapport sur l'évaluation des risques liés à l'utilisation de produit phytosanitaires en Guadeloupe et en Martinique, 96 p.
- Barthe Y., Akrich M., Rémy C. (coord.), 2010. *Sur la piste environnementale — Menaces sanitaires et mobilisations profanes*, Paris: Presses des Mines, Paris Tech-Presses, 307 p.
- Beck U., 2008. *La société du Risque — Sur la voie d'une autre modernité*, Paris: Flammarion, 501 p.
- Belpomme D., 2007. Rapport d'expertise et d'audit externe concernant la pollution par les pesticides en Martinique. Conséquences agrobiologiques, alimentaires et sanitaires et proposition d'un plan de sauvegarde en cinq points. Association pour la recherche thérapeutique anti-cancéreuse, 54 p. Disponible sur [https://www.artac.info/wp-content/uploads/2023/09/Rapport\\_Martinique.pdf](https://www.artac.info/wp-content/uploads/2023/09/Rapport_Martinique.pdf).
- Benford R.D., Snow D.A., Plouchard N.M., 2012. Processus de cadrage et mouvements sociaux : présentation et bilan. *Politix*, 99(3):217-255. <https://doi.org/10.3917/pox.099.0217>.
- Bensaude-Vincent B., Dorthe G., 2023. *Les sciences dans la mêlée*, Paris: Seuil, 272 p. (coll. La couleur des idées).
- Berard Y., 2023. La politique de laboratoire : les Outre-mer face à la bifurcation écologique. Mémoire, dossier pour l'habilitation à diriger des recherches, Science politique.
- Blanchard P., Femenias A., Gillet H., Renucci A., 2011. Évaluation des plans d'action chlordécone aux Antilles (Martinique, Guadeloupe) — Tome 1. Rapport, 235 p.
- Blondiaux L., Traïni C. (dir.), 2018. *La démocratie des émotions. Dispositifs participatifs et gouvernabilité des affects*, Paris: Presses de Sciences Po, 245 p.
- Boutrin L., Confiant R., 2007. *Chronique d'un empoisonnement annoncé : le scandale du chlordécone aux Antilles françaises 1972-2002*, Paris: L'Harmattan, 240 p.
- Branchu C., Oppelt M.É., Mir C., Renucci A., Thibault H.L., 2020. Évaluation du troisième plan chlordécone et propositions. Rapport conjoint, Igas-Cgedd-Igésr, 122 p. Disponible sur [https://igas.gouv.fr/sites/igas/files/files-spip/pdf/2019-053r\\_.pdf](https://igas.gouv.fr/sites/igas/files/files-spip/pdf/2019-053r_.pdf).
- Daniel J., David C. (coord.), 2021. *75 ans de départementalisation outre-mer. Bilan et perspectives. De l'uniformité à la différenciation*, Paris: L'Harmattan, 567 p.
- Daniel J., 2023. La crise socio-sanitaire aux Antilles. Entre défiance généralisée et exacerbation des affirmations identitaires. *Condition humaine/Conditions politiques*, 5. <https://doi.org/10.56698/chcp.1053>.
- Epstein R., Pinson G., 2021. Chapitre 1. De l'État fort aux régimes de gouvernementalité multiples, in Frinault T. (coord.), *Nouvelle sociologie politique de la France*. Paris: Armand Colin, 21-32.
- Escoubes F., Proriol G., 2021. *La démocratie, autrement. L'art de gouverner avec le citoyen*, Paris: Éditions de l'Observatoire, 332 p.
- Ferdinand M., 2018. L'interdiction de l'épandage aérien en France. Des contestations locales aux Antilles à l'interdiction nationale (2009-2014), in Ambroisine-Rendu A., Vrignon A., Trespeush-Berthelot A. (coord.), *Contestations, résistances et négociations environnementales*, Limoges: Presses Universitaires de Limoges, 207-222.

- Ferdinand M., 2024. *S'aimer la Terre — Défaire l'habiter colonial*, Paris: Seuil, 608 p. (coll. Écocène).
- Gaille M., Terral P. (coord.), 2021. *Pandémie — Un fait social total*, Paris: CNRS Éditions, 232 p.
- Gusfield J., 1984. *The culture of public problems — Drinking-Driving and the Symbolic Order*, Chicago: University of Chicago Press, 263 p.
- Henry E., Boudia S. (coord.), 2022. *Politiques de l'ignorance*, Paris: Presses Universitaires de France, 108 p. (coll. Lavedesidées.fr).
- Innerarity D., 2015. *Démocratie et société de la connaissance*. Grenoble: Presses universitaires de Grenoble, 278 p. (coll. Rien d'impossible).
- Joly P.B., 2010. La saga du chlordécone aux Antilles françaises. Reconstruction chronologique 1968-2008. Document réalisé dans le cadre de l'action 39 du plan chlordécone, Inra/Science en société-Ifris, 82 p. Disponible sur <https://www.anses.fr/system/files/SHS2010etInracol01Ra.pdf>.
- Kermarrec A (coord.), 1980. Niveau actuel de la contamination des chaînes biologiques en Guadeloupe : pesticides et métaux lourds, 1979-1980. Ministère de l'Environnement et du Cadre de vie, Paris, 155 p. Disponible sur [https://hal.inrae.fr/hal-03578841/file/Kermarrec\\_1980\\_Rapport\\_contrat\\_niveau\\_contamination.pdf](https://hal.inrae.fr/hal-03578841/file/Kermarrec_1980_Rapport_contrat_niveau_contamination.pdf)
- Lascoumes P., Le Gales P., 2005, *Gouverner par les instruments*, Paris: Presses de Sciences Po, 370 p.
- Le Bourhis J.P., 2021. Chapitre 4. L'État et les savoirs : entre contestations et recompositions, in Frinault T. (coord.), *Nouvelle sociologie politique de la France*. Paris: Armand Colin (coll. U), 57-68.
- Le Déaut J.Y., Procaccia C., 2009. Impacts de l'utilisation de la chlordécone et des pesticides aux Antilles : bilan et perspectives d'évolution. Rapport d'information, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. Disponible sur <https://www.senat.fr/rap/r08-487/r08-487.html>.
- Letchimy S., Bénin J., 2019a. Rapport fait au nom de la commission d'enquête sur l'impact économique, sanitaire et environnemental de l'utilisation du chlordécone et du paraquat comme insecticides agricoles dans les territoires de Guadeloupe et de Martinique, sur les responsabilités publiques et privées dans la prolongation de leur autorisation et évaluant la nécessité et les modalités d'une indemnisation des préjudices des victimes et de ces territoires, tome 1, Assemblée nationale, 2240, 297 p.
- Letchimy S., Bénin J., 2019b. Rapport fait au nom de la commission d'enquête sur l'impact économique, sanitaire et environnemental de l'utilisation du chlordécone et du paraquat comme insecticides agricoles dans les territoires de Guadeloupe et de Martinique, sur les responsabilités publiques et privées dans la prolongation de leur autorisation et évaluant la nécessité et les modalités d'une indemnisation des préjudices des victimes et de ces territoires, tome 2, Assemblée nationale, 2240, 499 p.
- Loisel M., Rio N., 2024. *Pour en définir avec la démocratie participative*, Paris: Textuel, 192 p. (coll. Petite Encyclopédie critique).
- Multigner L., Kadhel P., Pascal M., Huc-Terki F., Kercret H. *et al.*, 2008. Parallel assessment of male reproductive function in workers and wild rats exposed to pesticides in banana plantations in Guadeloupe. *Environmental Health*, 7:40. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-7-40>.
- Multigner L., Ndong J.R., Giusti A., Romana M., Delacroix-Maillard H. *et al.*, 2010. Chlordecone exposure and risk of prostate cancer. *Journal of Clinical Oncology*, 28(21):3457-3462. <https://doi.org/10.1200/JCO.2009.27.2153>.
- Nicolino F., Villerette F., 2007. *Pesticides, Révélations sur un scandale français*, Paris: Librairie Arthème Fayard, 384 p.
- Pietralunga C., 2018. En Martinique, Macron qualifie la pollution au chlordécone de « scandale environnemental. *Le Monde*, 28 septembre. Disponible sur [https://www.lemonde.fr/planete/article/2018/09/27/chlordecone-macron-reconnait-un-scandale-environnemental-dans-les-antilles\\_5361196\\_3244.html](https://www.lemonde.fr/planete/article/2018/09/27/chlordecone-macron-reconnait-un-scandale-environnemental-dans-les-antilles_5361196_3244.html).
- Procaccia C., 2023. L'impact de l'utilisation de la chlordécone aux Antilles françaises. Rapport n° 360, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques., 170 p. Disponible sur <https://www.senat.fr/rap/r22-360/r22-360.html>.
- Verdol P., 2009. *L'île-monde dans l'œil des pesticides*, Matoury: Ibis Rouge Éditions, 214 p.

Verdol P., 2014. *Du chlordécone comme arme chimique française en Guadeloupe et en Martinique et de ses effets en Europe et dans le monde, plainte et demande de réparations*, Paris: L'Harmattan, 205 p.

Vincent F., 2019. Chlordécone : L'Élysée plaide le « malentendu » après la déclaration polémique de Macron. *Le Monde*, 4 février. Disponible sur [https://www.lemonde.fr/politique/article/2019/02/04/chlordecone-l-elysee-plaide-le-malentendu-apres-la-declaration-polemique-de-macron\\_5419206\\_823448.html](https://www.lemonde.fr/politique/article/2019/02/04/chlordecone-l-elysee-plaide-le-malentendu-apres-la-declaration-polemique-de-macron_5419206_823448.html).

# Quelle évolution de la mise à disposition et de l'utilisation des données pour une approche plus intégrée de l'exposition au chlordécone ?

*Pierre Benoit, Philippe Hunel, Jeanne Garric*

La contamination durable des Antilles françaises par la chlordécone est à l'origine d'une crise environnementale, sanitaire, sociale, économique et politique majeure depuis près de 25 ans (Ferdinand, 2015). Ce chapitre est focalisé sur la gestion des données de surveillance et de recherche et leur utilisation pour évaluer au cours du temps et dans l'espace l'exposition des populations et des écosystèmes à la chlordécone, vue comme une composante de l'exposome et de l'écoexposome\* aux Antilles. La gestion des données d'exposition aux substances et des données sur leurs effets est un enjeu majeur pour les recherches en matière d'amélioration des connaissances, d'interdisciplinarité et d'opérationnalité des solutions proposées pour réduire l'exposition des milieux et des populations. Une gestion efficace des données est aussi indispensable pour assurer transparence, accompagnement, évaluation de l'action publique. Nous présentons un état des lieux de l'existant concernant les différents types de données, sur la contamination comme sur les effets sur la santé des populations et des écosystèmes, et une cartographie des nombreux acteurs qui collectent, produisent, centralisent et utilisent ces données. En portant particulièrement la réflexion sur la question de la caractérisation de l'exposome, une analyse des freins actuels à la mise à disposition des données est présentée. À partir de là, des recommandations visant à améliorer la gestion des données et garantir leur qualité sont proposées, tout comme des premières pistes d'actions pour renforcer les travaux sur l'exposition (évaluation, surveillance et gestion) en accompagnement des politiques publiques, pour développer des recherches plus intégrées notamment en considérant l'écoexposome, pour mieux caractériser, voire anticiper, l'exposition des populations antillaises.

### » État des lieux

#### De quelles données parle-t-on ?

Le concept d'exposome est relativement récent et a évolué depuis la définition proposée par Wild en 2005. Souvent abordé sous l'angle de l'exposome chimique, il considère l'empreinte de toutes les expositions au cours de la vie d'un individu. L'étude de l'exposome fait appel à l'utilisation et la combinaison de données de diverses

natures : données de santé, données toxicologiques, données de concentrations dans l'alimentation et l'environnement, données sur les habitudes et conditions de vie et de travail, etc. (figure 12.1).

De nombreuses données relatives à la pollution par la chlordécone aux Antilles existent. Il s'agit de données d'exposition dans des matrices environnementales, acquises afin de connaître et surveiller le niveau de contamination des différents milieux, mais aussi de données biologiques et sanitaires pour comprendre et surveiller le niveau d'imprégnation et les impacts pour les populations exposées, et enfin de données socio-économiques.

Dans ce chapitre, nous nous attacherons principalement aux données d'exposition en termes de concentration du chlordécone dans les différents milieux.

Comme pour d'autres pesticides, les acteurs impliqués dans la genèse de ces données, dans leur utilisation et dans leur gestion sont nombreux et interagissent au sein d'un écosystème complexe : organismes de recherche, agences de l'État, administrations publiques ; au niveau national, ou déconcentré en Guadeloupe et en Martinique. La figure 12.2 présente plus spécifiquement le réseau d'acteurs impliqués dans la recherche, la surveillance et la gestion du chlordécone.

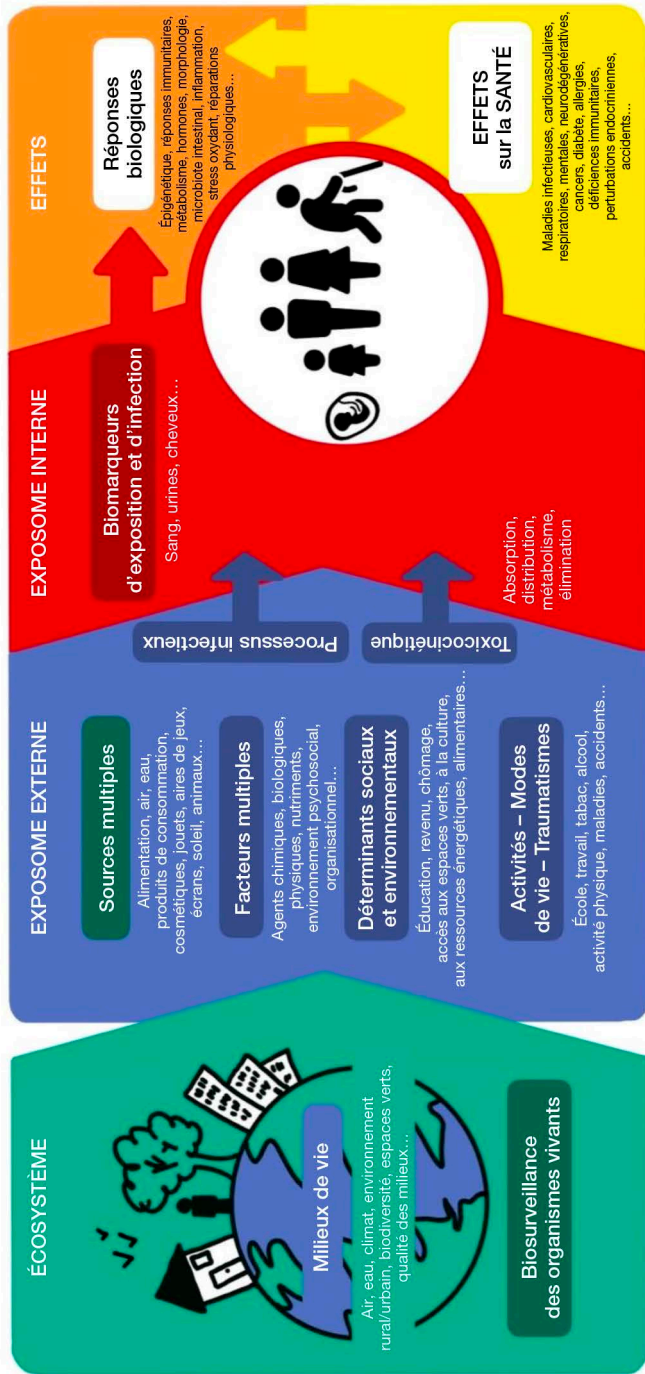
La multiplicité des acteurs impliqués dans la caractérisation de l'exposition (prélèvement des échantillons, analyse chimique), parfois sans méthodologie partagée, est une source de variabilité qui ne permet pas toujours de garantir la qualité des données et leur comparaison. *In fine*, cela peut impacter la fiabilité des analyses globales et la reconstitution de la connaissance, d'autant qu'il est parfois difficile de disposer de métadonnées qualitatives et explicites. De plus, ce tissu d'acteurs dense rend difficile l'accès aux données.

Les principes Fair (pour « faciles à trouver, accessibles, interopérables et réutilisables » ; Wilkinson *et al.*, 2016) sont un ensemble de principes directeurs pour gérer les données scientifiques afin de les rendre Fair pour l'humain et la machine. Comme toutes les données qui concernent l'exposition et les effets (qu'ils soient environnementaux, sanitaires ou économiques), celles sur la chlordécone aux Antilles devraient suivre les principes Fair notamment dans le cadre d'une approche intégrée de l'exposome.

Dans le tableau 12.1, nous présentons l'ensemble des données actuellement identifiées concernant la contamination par la chlordécone en proposant, sur la base de notre analyse, une notation de 0 à 5 (0 : faible ; 5 : fort) de ces données selon les quatre critères Fair (figure 12.3).

## Contamination des sols

Les analyses de sols potentiellement contaminés par la chlordécone ont démarré aux Antilles au début des années 2000. Les prélèvements de sols ont été collectés par le BRGM, la Daaf/INRAE, la Daaf/Cirad, les agriculteurs (volontariat ou Safer/chambre d'agriculture au travers du dispositif du Pnac avec analyse gratuite) ainsi qu'auprès de particuliers au travers du programme Jafa piloté par l'ARS et l'Ireps. L'ensemble des données sont rassemblées dans deux bases de données, l'une gérée par la Daaf-Guadeloupe et l'autre par la Daaf-Martinique, qui regroupent chacune près de 20 000 enregistrements qui correspondent à peu près à 14 000 hectares testés, soit environ 37 % de la surface agricole pour la Martinique ; et à peu près à 8 000 hectares testés, soit environ 29 % de



**Figure 12.1.** Données relatives à l'exposome, origines des expositions, aux réponses biologiques et effets sur la santé, en passant par les niveaux d'expositions externes et internes (source : Anses, 2022, p. 34).

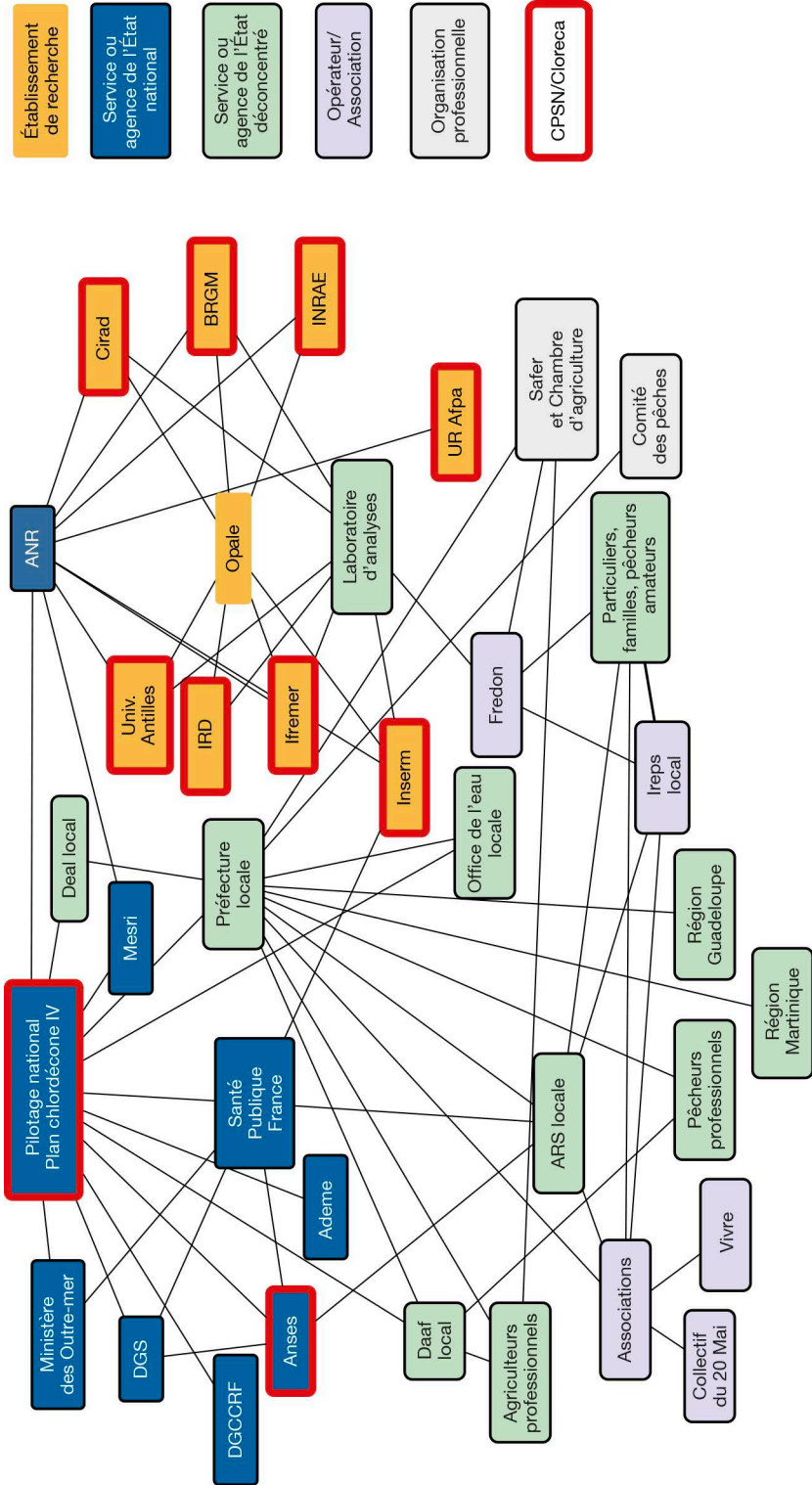
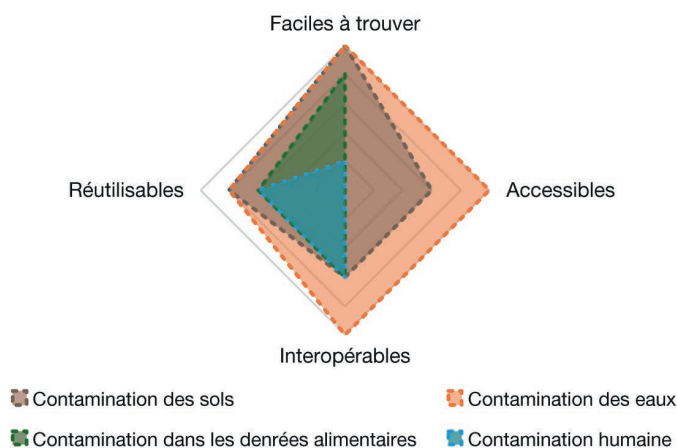


Figure 12.2. Panorama synthétique des acteurs liés à la chlordécone (source : Debricon *et al.*, 2022).



**Figure 12.3.** Analyse Fair des données identifiées.

la surface agricole pour la Guadeloupe. La plupart des analyses ayant été conduites par le même laboratoire, les résultats ont été restitués au format Edilabo (GIE Sesam-Vitale, 2020), qui est un format standardisé pour échanger des données entre laboratoires, ou entre un laboratoire et d'autres entités, comme les hôpitaux, les centres de recherche, ou les agences de régulation. L'objectif de l'utilisation d'un tel format est de garantir la précision, l'interopérabilité des données de laboratoire ainsi que leur capacité à être réutilisées (encadré 12.1). Cependant, même réalisées par le même laboratoire (ici, le LDA26), les performances des méthodes analytiques évoluent et les données de concentrations dans les sols ne sont pas forcément comparables dans le temps. Ceci doit être bien précisé et connu avant toute exploitation des chroniques sur plusieurs années — voir la controverse autour des conclusions sur la persistance du chlordécone dans les sols antillais (Comte *et al.*, 2022; Saaidi *et al.*, 2023).

Ces données ont essentiellement permis de réaliser des cartographies de la contamination des sols accessibles depuis 2020 à destination du grand public au moyen des SIG KaruGéo et GéoMartinique.

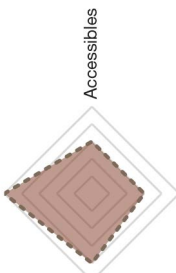
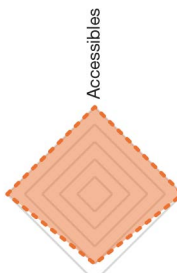
### Encadré 12.1. Exemple d'exploitation croisée des données

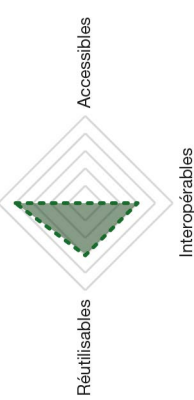
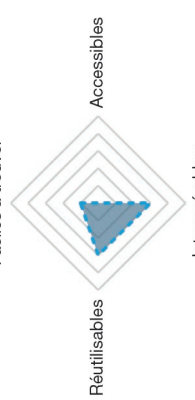
Une étude conduite sous l'égide de la Cire Antilles a analysé la répartition spatiale des cancers et la pollution des sols par les pesticides organochlorés en Martinique (Dieye, 2009). Les résultats de cette étude mettent en exergue l'existence d'une association possible entre l'exposition aux pesticides organochlorés et le risque de survenue de myélome multiple. Ces résultats démontrent toutefois l'absence d'épidémie de cancers ou de phénomène de grande ampleur en Martinique en rapport avec une exposition aux organochlorés dont la chlordécone.

## Contamination des eaux

La qualité des eaux superficielles continentales (cours d'eau, plans d'eau, eaux souterraines) est surveillée par des établissements publics locaux, les offices de l'eau de Guadeloupe et de Martinique. Toutes les données récoltées localement sont

**Tableau 12.1.** Catégories de données et notation sur les critères Fair.

Type de données	Producteurs	Bancarisation*	Usage
Contamination des sols	<p>Guadeloupe</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Daaf Guadeloupe/INRAE</li> <li>- Safer et chambre d'agriculture</li> <li>- agriculteurs (initiatives propres)</li> <li>- ARS/Ireps Guadeloupe (programme Jafa/particuliers)</li> </ul>	<p>KaruGéo (<a href="http://www.karugeo.fr">www.karugeo.fr</a>)</p> <p>GeoMartinique (<a href="http://www.geomartinique.fr">www.geomartinique.fr</a>)</p> <p>Pas d'accès aux données brutes</p> <p>Accès aux résultats d'interprétation par une cartographie</p>	<p><b>Information du public</b></p> <p>Cartographie des zones contaminées</p> <p>Faciles à trouver</p>  <p>Reutilisables</p> <p>Accessibles</p> <p>Interopérables</p>
	<p>Martinique</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Daaf Martinique/Fredon</li> <li>- chambre d'agriculture</li> <li>- agriculteurs et particulier (initiatives propres)</li> <li>- ARS/Ireps Martinique (programme Jafa/particuliers)</li> </ul> <p>Deal / BRGM</p>		
Contamination des eaux	<p>Guadeloupe</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Office de l'eau de Guadeloupe</li> <li>- Cirad/INRAE/BRGM</li> <li>- université des Antilles (BOREA)</li> <li>- ARS</li> </ul>	<p>Naiades (<a href="http://www.naiades.eafrance.fr">www.naiades.eafrance.fr</a>)</p> <p>Quadrige (<a href="http://www.quadrige.eafrance.fr">www.quadrige.eafrance.fr</a>)</p> <p>Ades (<a href="http://www.ades.eafrance.fr">www.ades.eafrance.fr</a>)</p> <p>Accès aux données brutes et <i>open data</i></p>	<p><b>Support aux actions de recherche :</b></p> <p>Projets ChlEauTerre,</p> <p>Opale (observatoire sur 2 bassins versants des pollutions aux Antilles)</p> <p><b>Information du public</b> sur l'état des stations de captage, qualité de l'eau au robinet</p> <p>Faciles à trouver</p>  <p>Reutilisables</p> <p>Accessibles</p> <p>Interopérables</p>
	<p>Martinique</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Office de l'eau de Martinique</li> <li>- Cirad/IRD/BRGM</li> <li>- Ifremer</li> <li>- ARS</li> </ul>		

Type de données	Producteurs	Bancarisation*	Usage
Contamination dans les denrées alimentaires	<ul style="list-style-type: none"> <li>- CIRE Antilles</li> <li>- Direction générale de la Concurrence, de la Consommation et de la Répression des Fraudes (DGCCRF) mise en œuvre par les Daaf Martinique et Guadeloupe</li> <li>- Direction générale de l'Alimentation (DGAL) mise en œuvre par les DEETS Martinique et Guadeloupe</li> <li>- Ifremer/université des Antilles (contamination de la faune halieutique)</li> </ul>	<p>Anses</p> <p>Archimer</p> <p>Bases de données internes, voire fichiers Excel</p> <p>Non-accessibilité des données brutes</p> <p>Accès à des rapports annuels</p>	<p><b>Appui aux politiques publiques :</b></p> <p>Avis de l'Anses</p> <p>Rapport annuel dans les Copil chlordécone</p> <p>Faciles à trouver</p> 
Contamination humaine	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Santé publique France</li> <li>- Inserm</li> <li>- ARS Guadeloupe et Martinique</li> <li>- CHU Guadeloupe et Martinique</li> </ul>	<p>Pas d'accès aux données (considérant qu'il s'agit de données personnelles liées à la santé)</p>	<p><b>Appui aux politiques publiques et actions de recherche :</b></p> <p>Étude Kannari</p> <p>Chlordéconémie</p> <p>Chlordécone et cancer</p> <p>Cohorte historique de travailleurs du secteur bananier : chlordécone et mortalité des travailleurs de la banane</p> <p>Cohorte Timoun</p> <p>Cartographie visant à corréler cancers et zones contaminées</p> <p>Faciles à trouver</p> 

Les formes développées des sigles et acronymes de ce tableau sont consultables dans la liste des sigles et acronymes en fin d'ouvrage.

centralisées dans les bases de données nationales Naiades<sup>49</sup> et Ades<sup>50</sup>, selon le référentiel du service d'administration nationale des données et référentiels sur l'eau (Sandre), et servent notamment à rendre compte de la qualité des eaux auprès de l'UE dans le cadre de la Directive cadre sur l'Eau, avec un état des lieux à réaliser tous les sept ans. Toutefois, avant leur exploitation, il est nécessaire de procéder à un « nettoyage » des données. Il s'agit notamment d'identifier les incohérences, les valeurs manquantes, incomplètes, incertaines, aberrantes ou peu fiables. Par exemple, concernant les données de concentration de la chlordécone mesurée à la station « Pont RN sur Rouge » en Martinique entre 2007 et 2023, et reportées dans la base Naiades, plusieurs mois sont absents pour certaines années. Certaines valeurs retranscrites, telle qu'une concentration de 15,36 µg/l le 12 décembre 2017 pour cette même station, sont loin des valeurs observées sur l'ensemble de la période (en moyenne autour de 2,88 µg/l).

Ces données de contamination des eaux sont utilisées dans des rapports annuels lors des comités de pilotage (Copil) chlordécone organisés dans les préfectures de Guadeloupe et de Martinique, essentiellement dans un but d'information des populations, et sont également exploitées pour établir des arrêtés, tels que ceux d'interdiction des zones de pêches ou d'interdiction de consommation des eaux de source. Ces données sont toutefois très utiles aux chercheurs, et leur ont permis de construire des cartographies des risques de contamination des milieux aquatiques et des eaux souterraines en modélisant le transfert de la chlordécone par bassin versant (Charlier *et al.*, 2011; Crabit *et al.*, 2016; Cattan *et al.*, 2019; Voltz *et al.*, 2023).

## Contamination dans les denrées alimentaires

Les données de contamination alimentaire sont issues des plans de surveillance et de contrôle réalisés par les administrations ou des organismes de recherche comme l'Ifremer. Elles sont également acquises dans le cadre d'études scientifiques menées par l'Ifremer, l'université des Antilles, l'INRAE, le Cirad, les offices de l'eau, et proviennent des campagnes de surveillance conduites par la DGS et l'Anses ainsi que des campagnes de l'ARS Martinique. Ces données sont toutefois très peu accessibles pour la recherche et le public, et ne sont restituées que globalement dans des rapports de l'Anses, tels que les études Sapotille<sup>51</sup>, Calbas ou Chlorexpo, des rapports de recherche ou des publications scientifiques, dans des présentations lors des Copil chlordécone en préfecture.

## Contamination humaine

Le niveau de contamination à la chlordécone d'une personne peut se mesurer à l'aide d'un dosage sanguin appelé chlordéconémie, qui donne une indication, à un instant t, du niveau d'imprégnation d'un individu. Dans le panorama global des données de contamination par la chlordécone, la chlordéconémie a la particularité de rentrer dans le champ des données de santé humaine, couvertes par des règles très strictes de protection de l'anonymat. Cela explique l'absence de données en accès libre.

L'étude Kannari<sup>52</sup> I comportait un volet imprégnation, dans le cadre duquel Santé publique France a réalisé des chlordéconémies de participants volontaires. Avec leur

49. [www.naiades.eaufrance.fr/](http://www.naiades.eaufrance.fr/).

50. [www.ades.eaufrance.fr/](http://www.ades.eaufrance.fr/).

51. <https://www.anses.fr/fr/system/files/RCCP2009sa0350Ra.pdf>.

52. [www.anses.fr/en/system/files/ERCA2014SA0029Ra.pdf](http://www.anses.fr/en/system/files/ERCA2014SA0029Ra.pdf).

accord, les données ont été intégrées à la base globale de Santé publique France. Depuis 2020, les analyses de chlordéconémie sont gratuites et les résultats devront être intégrés dans le système national des données de santé (SNDS). L'étude Kannari II qui a débuté en 2024 doit permettre d'évaluer, de manière statistique, l'évolution de l'imprégnation de la population antillaise, 10 ans après l'étude Kannari I.

En résumé de cette première partie, depuis les premières études ayant pour objet la mesure du chlordécone, les données concernant les contaminations environnementales, animales, végétales et humaines sont multiples, collectées par différents acteurs, et pas toujours accessibles et réutilisables, tant pour la recherche que pour l'information du public.

## ► Freins à l'utilisation des données

### Partager, mettre à disposition, utiliser les données : pour quoi faire ?

La prise en compte de l'exposome dans les travaux en santé-environnement implique de s'intéresser à toutes les molécules auxquelles est exposée une personne, et les différentes voies d'exposition. Ceci reste un véritable défi, tant sur le plan analytique, qu'en matière de collecte, d'interprétation et de gestion des données. Il s'agit en effet d'agréger des données d'exposition à de nombreux contaminants chimiques, d'accéder et de disposer de données concernant des compartiments différents, tels que l'eau des rivières ou des nappes, les sols, les denrées alimentaires, ainsi que dans les matrices humaines pour l'imprégnation des populations. Toutes ces données sont aujourd'hui gérées de manière indépendante et cloisonnée. Nous avons souligné l'importance et parfois la difficulté d'identifier des jeux de données existants, fiables et accessibles, issus d'activités de recherche ou de surveillance, qu'il s'agisse de données toxicologiques, de concentrations dans l'alimentation et l'environnement, de données sur les modes et conditions de vie et de travail, etc.

Afin d'utiliser ces données, et de les combiner dans le cadre d'études de l'exposome, il est nécessaire de leur attribuer des identifiants informatiques et des métadonnées permettant leur recherche et l'évaluation de leur pertinence pour leur exploitation (Anses, 2022). Cette utilisation peut concerner tout autant la surveillance de la contamination des milieux dans le temps, l'évaluation de l'exposition à la chlordécone, que le suivi et le pilotage d'actions visant à réduire cette exposition. Pour atteindre de tels objectifs, il est nécessaire de sécuriser le stockage des données dans la durée, et de les rendre accessibles dans le cadre de la politique de données ouvertes pour des utilisations relevant de programmes de recherche, de travaux d'expertise ou des besoins d'information et de communication (Anses, 2022). Il existe aujourd'hui de nombreux freins à l'utilisation optimale des données chlordécone notamment concernant le partage des données existantes et leur ré-exploitation.

### Un premier obstacle de taille : le défaut de gouvernance des données dans un contexte d'action de politique publique

Pour ce qui concerne la connaissance et le suivi de l'exposition à la chlordécone aux Antilles, un premier niveau de difficulté, qui explique en partie la situation décrite précédemment, est le défaut de gouvernance de la donnée acquise au cours des quatre Pnac qui se sont succédés (encadré 12.2). Il n'y a pas de communauté d'acteurs (gestionnaires,

chercheurs) identifiée permettant une réflexion sur les objectifs, l'acquisition et le partage des données. Les divers acteurs (administrations, établissements de recherche ou de surveillance, etc.), qu'il s'agisse des acteurs nationaux ou locaux, ne se connaissent pas toujours entre eux. Ce problème de gouvernance et de coordination de multiples acteurs et actions, déjà identifié dans le rapport conjoint de l'Igas, de l'IGEDD (anciennement CGEDD), de l'Igesr et du CGAAER sur l'évaluation du troisième plan chlordécone et propositions (Branchu *et al.*, 2020), a conduit notamment à la nomination d'une déléguée interministérielle au plan chlordécone IV. Dans la perspective de travaux interdisciplinaires en santé-environnement, sur l'exposition à la chlordécone et son évolution dans le temps et l'espace, de suivis épidémiologiques, comme de la gestion de l'exposition, une utilisation efficace des données nécessiterait en effet une communauté de producteurs et d'utilisateurs de la donnée, qu'il convient d'animer pour faire émerger, par exemple, des normes d'interopérabilité, et pour organiser un accès coordonné et facilité pour tous à la donnée. Il semble aujourd'hui difficile de travailler sur ces normes d'interopérabilité entre bases de données. En effet, sans cette animation et cette gouvernance, il est laborieux de s'accorder sur les standards d'acquisition et de description des données répondant aux besoins de mettre en relation des bases de données différentes.

À l'inverse, une gouvernance sur les données permettrait d'organiser des discussions sur l'harmonisation de méthodes, leur validation sur la base de critères de performance, autour de la mise en relation des données et de reproductibilité dans le temps. Elle permettrait de définir des règles de bonnes pratiques et de respect de standards de description et de format des données et métadonnées. Une gouvernance efficace et transparente permettrait aussi de pousser à l'ouverture des données en aidant à lever les freins, qu'il s'agisse de compétition entre équipes de recherche ou par crainte d'utilisation fallacieuse, dans un contexte de défiance de la population envers les instances d'État. Elle permettrait *in fine* une valorisation renforcée des moyens alloués à l'acquisition des données de contamination, des milieux et des populations aux Antilles, ainsi que de mieux asseoir les actions de politiques publiques visant la réduction de l'exposition, au bénéfice de tous.

### **Encadré 12.2. Spécificité de la « donnée chlordécone »**

Les acteurs sont en demande d'un accompagnement pour leur communication au grand public, confronté à une difficulté d'accès aux connaissances et informations produites sur la chlordécone. En particulier, il y a un manque de cohérence dans la manière de communiquer vers le grand public, entre Martinique et Guadeloupe, et entre les échelles locale et nationale. Il paraît important de communiquer de plusieurs manières complémentaires sur la façon dont les données sont produites et sur leur caractère sensible (Règlement général sur la protection des données [RGPD], données personnelles de santé, données de contrôle réglementaire sur produits alimentaires, données sur le foncier).

## **Des contraintes inhérentes à la science des données**

Afin d'améliorer l'évaluation, le suivi et la qualité des données, des progrès significatifs ont été accomplis dans la conception d'outils permettant d'automatiser ces différentes opérations (Berty-Equille, 2018). Cela est en grande partie lié aux avancées

technologiques en intelligence artificielle, en particulier sur l'apprentissage automatique (*machine learning*). Ces techniques d'apprentissage sont aujourd'hui rendues opérationnelles à grande échelle et largement déployées dans de nombreux domaines. Elles permettent d'automatiser les tâches de prédiction et de classification en aide à la décision, pour de nombreux domaines d'application et notamment celui de la santé.

La création de bases de données et plates-formes en ligne et en accès libre facilite l'accès des chercheurs et des agences sanitaires et environnementales aujourd'hui foisonnantes. Le développement d'espaces communs de données environnementales, de santé et de données sociologiques, portés par diverses structures (ministère, établissements publics, groupements d'intérêt public, tels que *Green Data For Health*<sup>53</sup>, *Gecco*<sup>54</sup>) a pour objectif de permettre la combinaison de ces informations (quantitatives et qualitatives). Associés à une meilleure gouvernance, ces espaces contribueront à accroître la qualité de données disponibles, à augmenter la puissance statistique des analyses et à développer des travaux de modélisation, rétrospectives ou prospectives à partir du croisement de différents jeux de données (Senier *et al.*, 2017).

Assurer la durabilité et la sécurité des conditions de stockage des données est une condition indispensable de réussite des réutilisations futures. La mise à jour des bases de données, leur mise en relation au travers de plates-formes comme le *Green Data For Health* (GD4H) et la capacité à les faire évoluer dans le temps demande des moyens humains et techniques qui doivent être organisés dans la durée et financés de manière pérenne.

## Des freins intrinsèques aux données existantes (qualité, profondeur temporelle, résolution spatiale, harmonisation, métadonnées)

Pour la communauté spécialisée en gestion des données, le « nettoyage » des données a longtemps consisté à corriger et transformer les données par des approches déclaratives de type *Extraction-Transformation-Loading* (ETL; Christen, 2016; Ganti et Das Sarma, 2013) qui pourrait se traduire en français par « extraction, transformation et chargement ». L'extraction consiste à aller récupérer les données à la source, la transformation vise à nettoyer, convertir et harmoniser les données, et le chargement concerne l'intégration des données nettoyées dans la base cible. En pratique, les approches les plus courantes consistent soit à exclure de l'analyse les données erronées, soit à les gérer séparément en utilisant souvent plusieurs méthodes basées sur l'apprentissage automatique pour détecter et corriger les erreurs. Cependant, la qualité des données en entrée des modèles d'apprentissage aura une incidence déterminante sur l'efficacité de ces méthodes correctives (Berty-Equille, 2018).

De façon plus spécifique, certaines données sont décrites comme trop lacunaires. Pour la contamination par le chlordécone aux Antilles, c'est notamment le cas des données concernant les niveaux de contamination dans les sols. Il existe des discontinuités spatiales et temporelles dans les données disponibles (Saaidi *et al.*, 2023; Voltz *et al.*, 2023). Au-delà des discontinuités dans les séries de données et des biais introduits par des changements de méthodes d'échantillonnage ou d'analyse se pose également la question de l'interopérabilité des bases de données. Chaque base de données a

53. <https://gd4h.ecologie.gouv.fr/>.

54. *Global Emergency Care Collaborative*, [www.geccouk.com/](http://www.geccouk.com/).

souvent été constituée de façon autonome selon un cahier des charges censé définir les données qu'elle contient et leurs standards de description (thésaurus). Certaines données ne sont pas accompagnées de métadonnées suffisantes (par exemple, la date de prélèvement, les coordonnées GPS, les conditions physico-chimiques, l'usage du sol, etc.), pour permettre leur exploitation. C'est le cas des données acquises à des fins de contrôle réglementaire, qui peuvent être entachées d'un biais d'échantillonnage et manquer de précision pour être utilisées par la recherche.

Construire l'interopérabilité des bases de données nécessite un travail coordonné autour des démarches de vocabulaires et d'ontologies\*, comme celles entreprises dans certaines infrastructures de recherche au niveau national et européen. Mais lorsque ce n'est pas prévu au départ, cela demande un effort d'harmonisation conséquent. Néanmoins, cette étape s'avère fondamentale pour que les données puissent être plus facilement extraites et utilisées pour des travaux de recherche interdisciplinaire, mais aussi pour des expertises à la demande des pouvoirs publics ou pour communiquer vers le grand public.

Certaines limites d'usage des données sont aussi inhérentes aux études rétrospectives : données anciennes non informatisées (papier, microfiches) qui augmentent fortement le temps de travail, disponibilité et qualité de certaines données de santé dans les départements et régions d'outre-mer (Drom), notamment sur les causes de décès (depuis 1981 contre 1968 dans l'Hexagone) et qualité des données parfois insuffisante avant 2000.

## La question de la protection de la donnée, et de sa complexité

Il existe des freins juridiques, réels ou perçus, à l'ouverture des bases de données. La réglementation RGPD n'est pas maîtrisée par tous les acteurs, il leur est donc difficile d'initier le partage de données, en particulier des données de santé ou de données environnementales géolocalisées, qui sont des données personnelles.

L'étude sur la cohorte des travailleurs agricoles potentiellement exposés au chlordécone en Guadeloupe et en Martinique (Luce *et al.*, 2019; Inma, 2022), dont l'objectif était d'analyser les effets sanitaires à long terme de l'exposition professionnelle au chlordécone et à d'autres pesticides, est une illustration symptomatique des difficultés rencontrées pour exploiter des sources de données diverses et en grande partie sensibles, car personnelles. La reconstitution de la cohorte est basée sur l'identification rétrospective de chefs d'exploitation et de salariés agricoles ayant travaillé entre 1973 et 1993 dans une exploitation bananière en Guadeloupe et en Martinique. Après l'identification des travailleurs, le travail a consisté à recueillir les informations d'état civil nécessaires à la recherche des décès et d'autres événements de santé ainsi que des données sur la carrière professionnelle des travailleurs et sur les exploitations. À ces données issues des recensements généraux agricoles et des caisses de Sécurité Sociale ont été ajoutées des données sur la mortalité, et sur l'exposition aux pesticides issues d'une base de données sur la culture de la banane développée par Santé publique France. Il est prévu à court terme d'intégrer les données des registres des cancers de Guadeloupe et de Martinique, et à plus long terme des données sur les consommations de soins issues du SNDS. Les difficultés tiennent en partie aux aspects réglementaires en lien avec le caractère confidentiel des données personnelles de santé (encadré 12.3). La reconstitution de la cohorte et l'intégration des données

de mortalité ont nécessité une autorisation de la Commission nationale de l'informatique et des libertés (Cnil); l'utilisation des données nominatives des recensements généraux agricoles (RGA) demande une levée du secret statistique auprès du comité du secret de l'Institut national de la statistique et des études économiques (Insee). La réglementation sur les données de mortalité ayant changé, il a fallu, pour respecter le référentiel de sécurité du SNDS, faire héberger la base de données par le Centre d'accès sécurisé aux données (CASD)<sup>55</sup>. L'intégration des données des registres des cancers a nécessité une autorisation Cnil spécifique.

### **Encadré 12.3. Données sensibles**

Le caractère sensible de certaines données nécessite un travail approfondi pour décider quelle est la part des données à rendre accessible. Il ressort également un fort besoin d'accompagner les acteurs et les utilisateurs sur (i) la nature des données, notamment pour des données sensibles, (ii) leurs exploitations, (iii) la façon de les traiter au moyen des outils proposés sur des plates-formes. Un narratif associé aux données permettrait de garantir une utilisation rigoureuse des données. De ce point de vue, il semble donc nécessaire de former et d'informer en retour les producteurs de données par rapport aux demandes des différents utilisateurs. Des accès différenciés en fonction des usages, avec autorisation ou non, et une traçabilité de l'usage sont aujourd'hui réalisés.

## **» Quelle évolution de la mise à disposition et l'utilisation des données environnementales et de santé ?**

### **Des questions génériques au cas de l'exposome**

Traiter la question de l'exposome nécessite tout d'abord de disposer de données de contamination des milieux et de toutes les sources d'exposition humaine par les molécules pertinentes aux Antilles, ou a minima celles qui pourraient être qualifiées de « prioritaires », notamment du fait de leur occurrence dans les milieux et de leur dangerosité pour l'humain et la biodiversité, dont la chlordécone fait partie; et ensuite d'être en mesure de traiter ces données. Au vu de l'ampleur de la crise sanitaire et environnementale causée par la chlordécone, ce contaminant est une composante particulière de l'exposome aux Antilles. Nous présentons ci-après quelques propositions afin de déverrouiller les freins identifiés plus haut et progresser sur la question de l'exposition au chlordécone.

### **Généralisation des plans de gestion des données**

Afin de décrire l'exposome provenant de sources diverses comme l'air, l'eau, l'alimentation, les produits de consommation, les habitudes et conditions de vie, l'environnement local et l'exposition professionnelle, les méthodes déployées concernent à la fois des analyses d'échantillons biologiques par des approches ciblées (déterminées *a priori*) ou

55. Le CASD est un groupement d'intérêt public rassemblant l'État représenté par l'Insee, le Genes, le CNRS, l'École polytechnique, HEC Paris et la Banque de France créé par arrêté interministériel du 29 décembre 2018.

non ciblées (sans *a priori*), des mesures d'exposition externe individuelle avec des outils d'échantillonnage personnels ou bien l'utilisation d'appareils et capteurs portables.

Comme décrit plus haut, des recommandations sur la mise en application de bonnes pratiques pour la description des données et métadonnées sont nécessaires. Sans méthodes harmonisées sur la base de standards et validées pour l'acquisition, mais aussi le stockage et le formatage des données, il n'est pas possible d'envisager une utilisation croisée ni de garantir la performance de traitements reproductibles et comparables dans le temps. Un défi autour des travaux sur l'exposition à la chlordécone — mobilisant de très nombreux acteurs et dans des champs disciplinaires très divers (voir début de chapitre) — est la définition de règles de description précise des données mesurées et des métadonnées associées (référence d'étude, auteurs, période, etc.). Dans cette optique, les plans de gestion de données apparaissent comme des outils appropriés pour formaliser ces règles et les communiquer à tous les acteurs, qu'ils soient producteurs ou utilisateurs de données. Ce type d'approche se généralise aujourd'hui afin de garantir une description suffisante des données acquises ou réutilisées dans les projets de recherche. Il associe métadonnées et documentation sur la méthodologie de collecte et le mode d'organisation des données, informations sur leur stockage, et exigences à respecter en cas de données à caractère sensible (encadré 12.3). Une réflexion collective autour de l'harmonisation des plans de gestion de données d'exposition à la chlordécone aux Antilles, voire de la construction d'un plan de gestion et de valorisation, nous paraîtrait très utile.

## Gouvernance, interconnexion des producteurs de données et interopérabilité des bases de données

Nous avons précédemment souligné un manque de gouvernance de la donnée et le besoin exprimé par tous les acteurs d'une coordination et d'une animation facilitant les échanges pour fluidifier leur partage. En effet, les données sont en silo, stockées par chaque producteur, dans le cadre d'études disparates. Il n'y a pas de centralisation des informations sur les activités des acteurs liés à la chlordécone. Il en résulte l'absence d'un guichet unique bien identifié donnant un accès uniforme et homogénéisé à toutes les données sur la chlordécone.

Afin de rendre les bases de données accessibles et visibles, des dispositifs existent déjà. Ainsi le site gouvernemental [data.gouv.fr](https://data.gouv.fr) met en visibilité les bases de données et les plates-formes disponibles pour faciliter leur identification et leur interrogation. De façon complémentaire, les publications scientifiques récentes (articles, *data paper*) permettent de sourcer et tracer l'origine des données mise en ligne au travers d'un data-verse (plate-forme *open source* permettant de stocker, partager et exploiter des données; Crosas, 2015). Un portail Web, tel que Chlordécone-Infos<sup>56</sup>, fait connaître les avancées des connaissances et des recherches. L'idée d'une « plate-forme inversée » a été proposée, ce qui permettrait en parallèle de rendre visible les utilisateurs potentiels et leurs besoins par rapport aux données pour faire évoluer l'offre sur les données. L'enjeu est bien d'utiliser ce qui existe, d'adapter et de viser la complémentarité entre ces différentes plates-formes en intégrant les besoins sur l'ajout de métadonnées et du narratif autour des données : qualité des données, méthode d'acquisition, robustesse-fiabilité-incertitude.

---

56. <https://www.chlordecone-info.fr/>.

Améliorer la gouvernance permettrait également de mettre en place un accompagnement sur le plan juridique des différents utilisateurs concernant le partage des données, et un accompagnement en médiation scientifique comme le propose aujourd'hui le *Green Data for Health*, une offre de service mise en place dans le cadre du quatrième plan national Santé-Environnement<sup>57</sup>. Au sein de cette initiative, un groupe de travail a été initié sur les données géolocalisées en santé au sein de la commission Besoins et Usages du conseil national de l'Information Géolocalisée (CNIG), afin d'identifier les besoins et usages associés à la mobilisation et au croisement des données environnementales et sanitaires.

## Nouveaux outils à mobiliser

Les outils proposés sur une plate-forme dédiée devraient permettre a minima de visualiser les données et de faire des traitements statistiques simples pour décrire des tendances. Avec les progrès des sciences analytiques, les outils de mesures de l'exposition sont de plus en plus diversifiés et performants. Pour améliorer la qualité et la robustesse des données existantes, deux approches complémentaires sont communément proposées. La première vise à corriger les données en amont des chaînes d'analyse (par nettoyage ou réparation des données) et émane de la communauté de recherche en gestion des données (Berty-Equille, 2018). La seconde cherche à développer des modèles plus robustes au bruit et plus performants en mettant davantage l'accent sur la transformation et la préparation des données en vue d'une tâche prédictive particulière. Elle est plutôt issue de la communauté des chercheurs et praticiens en apprentissage (*data scientists*).

Les bases de données existantes ne sont pas nécessairement conçues dès le départ pour progressivement intégrer de nouvelles données, mais les outils informatiques y donnant accès peuvent permettre de nouvelles connexions entre différentes sources de données. C'est le cas par exemple de la plate-forme Geoss (*Group on Earth observations*, 2015) qui permet l'intégration de données d'observation de la Terre à l'échelle mondiale issues de diverses sources (satellite, capteur, base de données nationale), facilitant ainsi des analyses environnementales transversales. Le consortium Ohdsi (*Observational Health Data Sciences and Informatics*) propose quant à lui un modèle de données standardisé permettant d'intégrer et d'analyser des données de santé hétérogènes issues de multiples sources (Hripcsak *et al.*, 2015). Dans le cahier des charges des portails d'accès aux bases de données doivent aussi figurer les notions d'agilité et de mise à jour tenant compte des évolutions des résultats scientifiques. C'est un enjeu fort pour les politiques publiques et pour adapter la réglementation. Par ailleurs, pouvoir représenter les données d'exposition de manière différente et adaptée selon les publics ciblés (cartes narratives, cartographie des contaminations à différentes échelles et pour différents milieux, évolutions temporelles sur plusieurs dizaines d'années, etc.) serait un progrès d'une portée sans doute très importante.

La géolocalisation des données permet la sélection d'informations spatialisées qui seront converties en données d'exposition personnelle ou sur une zone géographique d'exposition utilisée pour les analyses statistiques (Lakerveld *et al.*, 2020). Ce géo-référencement est intégré dans le projet KMS (*Knowledge Management System*),

---

57. <https://sante.gouv.fr/IMG/pdf/pnse4.pdf>.

une initiative menée par l'université des Antilles (Hunel et Gros-Dessormeaux, 2024). Celui-ci a pour objectif de rendre accessibles de nombreuses données disponibles à ce jour, mais fragmentées, sur la question de la contamination par la chlordécone et d'autres pesticides dans les départements d'outre-mer, au travers d'un moteur unifié de recherche. Ce moteur de recherche est utilisable au moyen d'un portail Web qui réunit l'ensemble des données d'analyses liées aux pesticides présents dans l'environnement de Martinique et de Guadeloupe. Ainsi, chercheurs et usagers peuvent récupérer de manière centralisée l'ensemble des données liées aux pesticides géolocalisées et datées. Mais afin d'exploiter efficacement les données accessibles au moyen de ce portail, il est nécessaire de construire une véritable plate-forme d'accès et d'exploitation des données et plus généralement des connaissances sur la contamination par le chlordécone et d'autres pesticides. Une proposition d'organisation et de structuration de cette plate-forme dédiée à la chlordécone est décrite ci-après.

### Une initiative : vers une *chlordecone data knowledge platform*

Comment construire un système de recherche sémantique et de production de connaissances donnant l'accès aux données et aux initiatives, répondant aux objectifs des différents types de publics? Conformément aux grands axes du plan chlordécone IV, nous proposons de retenir ces premiers publics : la « recherche et développement », les « politiques publiques » et la « sensibilisation et éducation ».

L'architecture générale du système de recherche à concevoir est schématisée dans la figure 12.4.

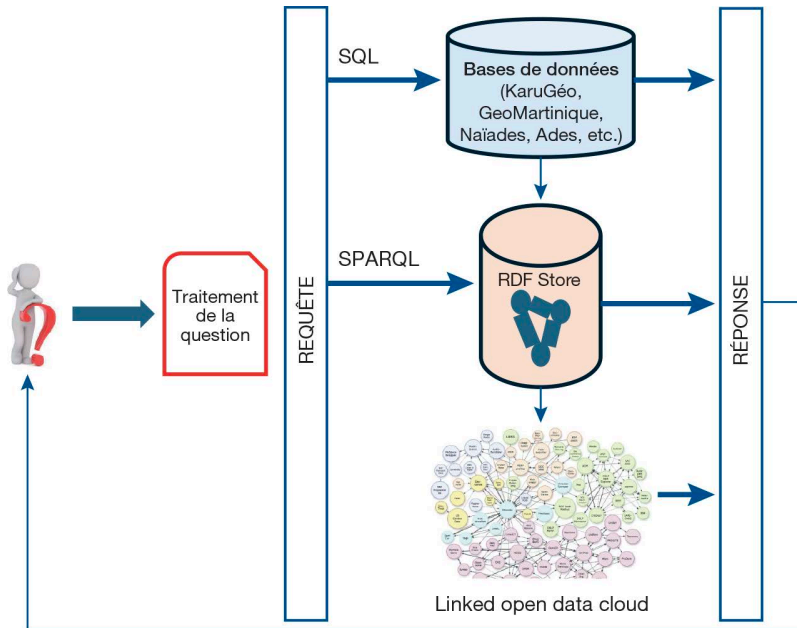


Figure 12.4. Architecture générale du système de recherche.

SQL : *structured query language* (langage de requête structuré); RDF : *resource description framework* (cadre de description de ressources); RDF store : magasin de données RDF; SPARQL : *protocol and RDF query language* (langage de requête et protocole pour RDF).

Une telle architecture revient à structurer une *Chlordécone Data Knowledge Platform* (CDKP), qui est une infrastructure ou un système conçu pour centraliser, organiser, et rendre exploitables des quantités importantes de données à l'intérieur d'une organisation. Son objectif est de combiner des fonctionnalités avancées de gestion de données avec des outils d'analyse et de visualisation, afin de permettre aux utilisateurs de transformer des données brutes en informations exploitables, à la fois pour de la recherche scientifique, de la mise en place de politiques publiques, et du développement technologique.

Il ne s'agit en réalité pas de rapatrier dans une base de données centralisée l'ensemble des données sur la chlordécone, mais d'utiliser les principes du Web sémantique (RDF<sup>58</sup>, SPARQL<sup>59</sup>, URI<sup>60</sup>) (Berners-Lee, 2001) pour accéder aux données stockées dans les différents organismes (figure 12.2). Cela pourra se faire en utilisant le concept de *linked open data cloud* (Bizer, 2009) qui permet de mettre en réseau des données de diverses sources.

Pour arriver à ce résultat, il faudra élaborer une ontologie propre à la chlordécone afin de structurer de manière systématique l'ensemble des connaissances associées à cette molécule, en identifiant leurs différentes caractéristiques ainsi que les relations complexes qui les unissent. Le tableau 12.2 présente un extrait de ce que pourrait être cette ontologie.

**Tableau 12.2.** Extrait d'une ontologie chlordécone.

Élément de l'ontologie	Exemples de connaissances et relations
Molécule chlordécone	Insecticide organochloré, Kepone®, formule chimique, etc.
Usage	Culture de la banane, lutte contre le charançon du bananier, périodes et zones d'utilisation
Contamination	Milieus impactés (sols, eaux de surface, nappes, etc.), mécanismes de transport, persistance
Exposition	Aliments contaminés, voies d'exposition, limites tolérables
Santé	Effets cancérogènes, perturbateur, trouble du neurodéveloppement, fertilité
Politique publique	Plans d'action chlordécone, recherche, organismes concernés

Une fois cette ontologie réalisée, les données chlordécone seront mises sous forme de triplets (sujet-prédicat-objet) selon le principe du RDF (Powers, 2003) afin de faciliter leur interconnexion et le requêtage.

**Tableau 12.3.** Extrait de triplet sur la nature du chlordécone.

Sujet	Prédicat	Objet
Molécule : chlordécone	Chimie : fait partie de	Toxicité : perturbateur endocrinien
Molécule : chlordécone	Agriculture : est utilisée contre	Agriculture : charançon
Molécule : chlordécone	Santé : a des conséquences sur	Santé : neurodéveloppement

58. RDF : *resource description framework* (cadre de description de ressources).

59. SPARQL : *protocol and RDF query language* (langage de requête et protocole pour RDF).

60. URI : *uniform resource identifier* (identifiant de ressource uniforme).

Selon le tableau 12.3, cette forme RDF permet par exemple d'exprimer d'une part que la molécule chlordécone est classée comme un perturbateur endocrinien, d'autre part qu'elle a été utilisée pour lutter contre le charançon.

On aura recours à SPARQL (DuCharme, 2013) pour interroger les bases de données RDF et extraire des informations spécifiques comme les zones contaminées, les niveaux de contamination, ou les effets sur la santé. SPARQL est l'équivalent du SQL (langage de requête) employé dans les bases de données relationnelles.

Une telle approche permettra par exemple de mettre en relation des données sur la qualité des sols et des eaux dans les zones affectées par la chlordécone avec des informations sur les incidences de maladies, ainsi qu'avec les niveaux de contamination par la chlordécone. Elle permet simultanément d'accéder à la réglementation en vigueur sur les valeurs seuils concernant les pesticides et d'autres substances toxiques, et de fournir des références à comparer avec les données sur la chlordécone.

Le déploiement d'un Web des données chlordécone au travers d'une CDKP serait un progrès indéniable en matière d'interopérabilité, d'analyse et de visualisation, d'accessibilité, ainsi que d'accélération de la recherche.

En effet, les chercheurs, en interrogeant les données chlordécone interconnectées au moyen de la CDKP, pourrait plus aisément conduire des études d'impacts environnementaux et sanitaires. De même, l'interconnexion des données permettrait de mettre en place des politiques publiques de gestion et de remédiation plus globales et plus efficaces. Enfin, cela faciliterait la création de ressources pédagogiques enrichies et interactives grâce à l'exploitation des données interconnectées pour éduquer et sensibiliser les populations par rapport aux risques de contamination.

La mise en œuvre d'une architecture de recherche sémantique, telle que la CDKP ouvrirait la voie à la constitution d'un riche réseau de données sur la chlordécone et à l'optimisation de leur gestion. Elle permettrait également de faciliter la compréhension et l'exploitation des informations disponibles, ainsi que les décisions de gestion.

Mais pour cela, il faudrait pouvoir assurer la qualité et de la fiabilité des données sources, leurs actualisations et leur contrôle comme précédemment exposé.

En conclusion, il est nécessaire de mettre en place une véritable gouvernance de la donnée chlordécone, afin de promouvoir l'utilisation de standards uniformes, d'imposer des critères de qualité pour les données publiées, d'impulser les partenariats entre institutions pour la maintenance et l'enrichissement des ensembles de données, de développer des outils pour simplifier l'accès et la manipulation des données par des non-experts, au travers d'interfaces graphiques intuitives. Bien que la CDKP décrite ouvre de nombreuses possibilités pour le partage et la réutilisation des données, ses limites actuelles nécessitent certes des solutions techniques, mais surtout des solutions organisationnelles et juridiques pour maximiser son potentiel et permettre sa mise en œuvre.

## ► Références bibliographiques

- Anses, 2022. Intégration de l'exposome dans les activités de l'Anses. Avis de l'Anses, rapport du conseil scientifique, 197 p. Disponible sur <https://www.anses.fr/fr/system/files/AUTRE2022METH0197Ra.pdf>.
- Berners-Lee T., Hendler J., 2001. Publishing on the Semantic Web. *Nature*, 410(6832):1023-1024. <https://doi.org/10.1038/35074206>.
- Berty-Equille L., 2018. Qualité des données. *Techniques de l'Ingénieur*, 9(5-6):117-143. <https://doi.org/10.51257/a-v1-h3700>.
- Bizer C., Heath T., Berners-Lee T., 2009. Linked Data: The Story so Far. *International Journal on Semantic Web and Information Systems*, 5(3):1-22. <https://doi.org/10.4018/jswis.2009081901>.
- Branchu C., Oppelt M.É., Mir C., Renucci A., Thibault H.L., 2020. Évaluation du troisième plan chlordécone et propositions. Rapport conjoint, Igas-Cgedd-Igésr, 122 p. Disponible sur [https://igas.gouv.fr/sites/igas/files/files-spip/pdf/2019-053r\\_.pdf](https://igas.gouv.fr/sites/igas/files/files-spip/pdf/2019-053r_.pdf).
- Cattan P., Charlier J.B., Clostre F., Letourmy P., Arnaud L. *et al.*, 2019. A conceptual model of organochlorine fate from a combined analysis of spatial and midto long-term trends of surface and ground water contamination in tropical areas (FWI). *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23(2):691-709. <https://doi.org/10.5194/hess-23-691-2019>.
- Charlier J.B., Lachassagne P., Ladouche B., Cattan P., Moussa R., Voltz M., 2011. Structure and hydrogeological functioning of an insular tropical humid andesitic volcanic watershed: a multi-disciplinary experimental approach. *J. Hydrol.*, 398(3-4):155-170. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.10.006>.
- Christen P., 2016. Data scrubbing, in Liu L., Özsu M. (éd.), *Encyclopedia of Database Systems*, New York: Springer, 1-5.
- Comte I., Pradel A., Crabit A., Mottes C., Pak L.T., Cattan P., 2022. Long-term pollution by chlordecone of tropical volcanic soils in the French West Indies: new insights and improvement of previous predictions. *Environ. Pol.*, 303:119091. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119091>.
- Crabit A., Cattan P., Colin F., Voltz M., 2016. Soil and river contamination patterns of chlordecone in a tropical volcanic catchment in the French West Indies (Guadeloupe). *Environ. Pollut.*, 212:615-626. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.02.055>.
- Crosas M., 2015. The Dataverse Network®: An Open-Source Application for Sharing, Discovering and Preserving Data. *D-Lib Magazine*, 17(1/2). <https://doi.org/10.1045/january2011-crosas>.
- Debricon I., Jonville T., Lepage E., Urbina R., 2022. Partager, mettre à disposition et valoriser les données disponibles sur la présence de chlordécone aux Antilles : au service d'une action publique efficace. Rapport de stage M2, GAAP.
- Dieye M., Quénel P., Gorla S., Bateau A., Colonna M. *et al.*, 2009. Répartition spatiale des cancers et pollution des sols par les pesticides organochlorés en Martinique. Bulletin de Veille Sanitaire - Cire Antilles Guyane. <https://hal.science/hal-05204410v1>.
- DuCharme B., 2013. *Learning SPARQL*. Sebastopol: O'Reilly, 386 p.
- Ferdinand F., 2015. De l'usage du chlordécone en Martinique et Guadeloupe : l'égalité en question. *Revue française des affaires sociales*, 1:163-183. <https://doi.org/10.3917/rfas.151.0163>.
- Ganti V., Das Sarma A., 2013. *Data Cleaning — A Practical Perspective*. Morgan & Claypool Publishers, 87 p.
- GIE Sesam-Vitale, 2020. Spécifications techniques du format EDILABO. Disponible sur <https://www.sesam-vitale.fr>.
- Group on Earth Observations, 2015. *GEO Strategic Plan 2016–2025: Implementing GEOSS*. Disponible sur [https://old.earthobservations.org/documents/GEO\\_Strategic\\_Plan\\_2016\\_2025\\_Implementing\\_GEOSS.pdf](https://old.earthobservations.org/documents/GEO_Strategic_Plan_2016_2025_Implementing_GEOSS.pdf).
- Hripcsak G., Duke J.D., Shah N.H., Reich C.G., Huser V. *et al.*, 2015. Observational Health Data Sciences and Informatics (OHDSI): Opportunities for Observational Researchers. *Studies in Health Technology and Informatics*, 216:574-578. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-564-7-574>.
- Hunel P., Gros-Dessormeaux H., 2024. Kms Chlordécone. Rapport de Convention, n°DRRT-2020-05.
- Inma, 2022. Suivi médical et prise en charge des professionnels des bananeraies exposés aux pesticides et en particulier la chlordécone dans les départements français des Antilles. Rapport, Institut national de médecine agricole, 129 p.

Lakerveld J., Wagtendonk A., Vaartjes I., Karssenberg D., Gecco Consortium, 2020. Deep Phenotyping Meets Big Data: The Geoscience and HEalth Cohort COnsortium (GECCO) Data to Enable Exposome Studies in The Netherlands. *Int J Health Geogr.*, 19(1):49. <https://doi.org/10.1186/s12942-020-00235-z>.

Luce D., Dugas J., Vaidie A., Michineau L., El-Yamani M., Multigner L., 2019. A cohort study of banana plantation workers in the French West Indies: first mortality analysis (2000-2015). *Environ Sci Pollut Res Int.*, 27(33):41014-41022. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06481-4>.

Saaidi P.L., Grunberger O., Samouëlian A., Le Roux Y., Richard A. *et al.*, 2023. Is a dissipation half-life of 5 years for chlordecone in soils of the French West Indies relevant? *Environmental Pollution*, 324:121283. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121283>.

Senier L., Brown P., Shostak S., Hanna B., 2017. The Socio-Exposome: Advancing Exposure Science and Environmental Justice in a Postgenomic Era. *Environmental Sociology*, 3(2):107-121. <https://doi.org/10.1080/23251042.2016.1220848>.

Powers S., 2003. *Practical RDF*. O'Reilly, 350 p.

Voltz M., Andrieux P., Samouelian A., Ponchant L., Grünberger O. *et al.*, 2023. Flow patterns and pathways of legacy and contemporary pesticides in surface waters in tropical volcanic catchments. *Science of the Total Environment*, 893:164815. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164815>.

Wilkinson M., Dumontier M., Aalbersberg I.J.J., Appleton G., Axton M., 2016. The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Sci Data*, 3:160018. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>.

## Chapitre 13

# Conclusion : quelles pistes prioritaires pour de nouvelles recherches ?

*Justin Daniel, Aurore Fourcot, Michel Samson, Guido Rychen*

Les pistes prioritaires de recherche s'inscrivent toutes dans la démarche *One Health*. Comme l'indique l'Anses, *One Health*, une seule santé pour les êtres vivants et les écosystèmes, vise à promouvoir une approche pluridisciplinaire et globale des enjeux sanitaires. Les organismes vivants et les écosystèmes sont interconnectés avec la santé des uns qui dépend de celle des autres. *One Health*, ou « une seule santé » en français, tient compte de ces liens complexes dans une approche globale des enjeux sanitaires. Celle-ci inclut la santé des animaux, des végétaux et des êtres humains, ainsi que les perturbations de l'environnement générées par l'activité humaine<sup>61</sup>.

Les pistes de recherche présentées dans ce chapitre résultent à la fois des différents groupes de travail du CPSN et des différents chapitres de cet ouvrage. La première partie de ce chapitre évoque les pistes de recherche visant à lever les verrous relatifs aux aspects analytiques. La seconde partie est consacrée aux pistes de recherche liées à la dégradation de la chlordécone dans les sols contaminés et aux approches permettant de réduire les transferts aux différents niveaux des chaînes trophiques. La troisième partie est positionnée sur les recherches en lien avec la santé des populations. La quatrième partie traite des pistes de recherches spécifiques aux sciences humaines et sociales.

### ►► Pistes de recherche liées à l'analyse de la chlordécone et de ses produits de transformation dans les matrices d'intérêt

Ces priorités concernent principalement le développement d'outils et de méthodes permettant de caractériser précisément, rapidement et à moindre coût les teneurs en chlordécone et de ses produits de transformation (PT) dans les différentes matrices alimentaires, environnementales et biologiques. Elles indiquent également la nécessité de renforcer les activités des laboratoires aux Antilles pour la mise en œuvre des outils et méthodes élaborés.

Ces priorités nécessitent cependant de lever certains verrous techniques et organisationnels que nous indiquons ici. La levée de ces verrous, qui ne mobilisent pas nécessairement des activités scientifiques, permettra de réaliser les analyses de manière optimisée.

61. <https://www.anses.fr/fr/content/one-health-une-seule-sant%C3%A9-pour-les-%C3%AAtres-vivants-et-les-%C3%A9cosyst%C3%A8mes>.

## La disponibilité des étalons pour la chlordécone et les produits de transformation

Ce verrou concerne à la fois les activités de recherche et les activités d'analyse en routine (pour la surveillance, le suivi de l'environnement, des matrices alimentaires des populations). Il s'agit d'assurer la pérennité de la disponibilité et de l'accessibilité des étalons pour la chlordécone ( $^{13}\text{C}$ ) et ses produits de transformation (chapitre 2) pour l'identification des composés lors du processus analytique. À ce jour, le marché de ces étalons reste a priori très étroit, et il nous semble peu probable que des entreprises privées produisent ces étalons de manière pérenne et abordable. La mise en place d'une structure dédiée pour atteindre cet objectif semble impérative. Elle nécessitera la mobilisation de compétences humaines additionnelles et la disponibilité d'équipements analytiques durables. Cette structure pourrait par exemple intégrer des équipes de recherche et des équipes des laboratoires d'analyse déjà en place, et produire les produits de transformation de manière programmée en fonction des besoins identifiés pour la recherche et pour la surveillance.

## La structuration d'une plate-forme d'analyse aux Antilles

Les analyses de proximité sont cruciales, tant pour la recherche que pour les mesures de gestion et de surveillance. Des compétences et des infrastructures sont disponibles aux Antilles, avec une complémentarité, une mutualisation et une mise en réseau possible entre les différentes institutions des deux îles. Des réflexions sont en cours afin de couvrir les besoins d'analyses multimatrices sur chacun des territoires tout en se conformant aux contraintes réglementaires et logistiques (transfert de matrices biologiques entre territoires, cas des sols, par exemple). Cependant, cette capacité analytique stratégique, partagée pour les Antilles, doit être soutenue sur le long terme (besoins récurrents avec un modèle économique original à élaborer), et être élargie à d'autres molécules. Elle devra également être en forte connexion avec les réseaux d'analyses nationaux et internationaux pour assurer sous la forme de tests interlaboratoires récurrents la vérification de la qualité des mesures.

Outre ces verrous techniques et organisationnels, les principales pistes de recherche sont résumées ci-dessous.

## Des efforts sur les processus analytiques à poursuivre afin de les adapter et de les sécuriser pour toutes les matrices et les molécules considérées

Du fait de la diversité des comportements des molécules, les méthodes de dosage de la chlordécone et de ses produits de transformation doivent encore être affinées pour toutes les matrices alimentaires, environnementales et biologiques d'intérêt (sol, eau, végétaux, sang, tissus animaux, fèces, etc.), sans oublier les matrices intégrées dans les essais de dégradation de la chlordécone (digestats de méthanisation, par exemple) ou les filières de traitement des eaux potables (charbons actifs) et usées (boues de station d'épuration) ainsi que des déchets solides (composts). La qualité des futures expérimentations dépendra évidemment de la précision et de la robustesse des données analytiques qui devront résulter de méthodes de dosages validées. Le second enjeu consiste à développer des méthodes d'analyse plus rapides et disponibles *in situ*.

La mise en place d'essais interlaboratoires et de matériaux de référence certifiés est à son tour essentielle pour assurer un contrôle qualité des analyses réalisées (comparabilité des résultats) et pour intégrer de nouveaux acteurs dans le domaine de l'analytique.

## Des innovations technologiques à stimuler

Les approches rappelées précédemment n'excluent pas les innovations prometteuses. Parmi elles, il conviendra de ne pas perdre de vue :

- le développement de méthodes d'analyses plus qualitatives *in situ*, utiles pour une gestion plus individualisée de l'exposition et des pratiques, par exemple ;
- le développement et l'acquisition de données en analyses non ciblées. Les connaissances des processus de dégradation ou d'évolution des molécules n'étant pas stabilisées, cette action permettrait d'identifier des composés non attendus et de ne pas passer à côté de processus importants. Ces données pourraient être intégrées dans une base de données de référence organisée et mutualisée (chapitre 12) ;
- l'utilisation de l'intelligence artificielle en appui à l'exploitation des données et des développements analytiques. Le couplage de l'intelligence artificielle à des explorations systématiques pourrait permettre d'identifier des signaux analytiques faibles, de traiter les données issues d'analyses non ciblées et de compléter des modèles d'évolution dans différents milieux ou matrices de manière beaucoup plus rapide et performante ;
- le développement de méthodes permettant de mesurer l'impact de la chlordécone et de ses produits de transformation sur les communautés et les populations. Il revêt un intérêt majeur ;
- la mise en place de méthodes complémentaires visant à évaluer la biodisponibilité ou la bio-accessibilité ainsi que des bio-essais pour détecter le transfert des molécules dans les végétaux et leurs effets en écotoxicologie.

## ► Pistes de recherche visant à dégrader la chlordécone dans les sols contaminés et à réduire l'exposition humaine au travers des chaînes trophiques

Cette section présente successivement les pistes de recherche prioritaires pour (i) dégrader la chlordécone du sol ou réduire sa disponibilité et (ii) limiter au maximum les transferts dans les chaînes trophiques. En effet, le sol reste le réservoir majeur de pollution pour l'environnement et les communautés, et l'objectif d'élimination n'est pas atteignable actuellement : les efforts de recherche doivent ainsi être poursuivis dans cette voie, recoupant certains verrous indiqués en début de chapitre (connaissance du comportement et des propriétés des molécules — chlordécone et produits de transformation —, analyses fiables et accessibles, etc.).

Puisque la perspective de l'élimination de la chlordécone et des produits de transformation n'est pas pour un horizon proche, l'autre option ou voie est de chercher à limiter les effets de la chlordécone sur les écosystèmes et les territoires, avec pour objectif de limiter l'exposition et donc les transferts du sol vers les compartiments environnementaux et trophiques, jusqu'aux populations humaines. Ces deux orientations globales reposent sur la capacité à mesurer et à continuer à caractériser et suivre la dynamique de l'état de pollution des différents compartiments, en y intégrant les produits de transformation en particulier (chapitre 2).

## Actions visant à agir sur la contamination des sols

L'élimination de la chlordécone dans les sols contaminés reste un enjeu majeur. Si le potentiel de dégradation de la chlordécone par ISCR dans les horizons superficiels de sols contaminés est avéré, plusieurs limites apparaissent, en particulier le manque de données sur l'effet à long terme de l'amendement et sur la formation, la toxicité et le devenir environnemental des produits de transformation. Les résultats expérimentaux concernant la dégradation microbiologique partielle de la chlordécone en produits de transformation proviennent quant à eux exclusivement de travaux menés en laboratoire dans des conditions très éloignées des conditions naturelles. La faisabilité de ces transformations microbiologiques devrait, à présent, être évaluée *in situ*. Les approches de phytoremédiation ne sont actuellement pas mises en œuvre, car les espèces étudiées ne montrent qu'une faible capacité à extraire la chlordécone du sol. Cependant, une combinaison de processus pourrait reposer sur l'action conjointe de plantes et de micro-organismes associés aux systèmes racinaires.

Les priorités de recherche pour agir sur la contamination des sols et quantifier leurs impacts sont résumées ci-dessous.

### Caractérisation de la contamination (chlordécone, produits de transformation) des milieux et dynamique associée

La question de la caractérisation des processus de biodégradation naturelle de la chlordécone dans les sols est cruciale et essentielle pour connaître la demi-vie de la chlordécone dans le contexte antillais. Il conviendra ainsi d'identifier les compartiments tampons relais (sols et nappes) aboutissant à la pollution des eaux terrestres et marines et *in fine* des écosystèmes. Il s'agira donc de caractériser la dynamique du profil de pollution en profondeur dans les sols ainsi que la dynamique de la contribution des nappes à la pollution des rivières et du littoral.

L'établissement de valeurs quantifiées fiables des principaux représentants de chaque famille des produits de transformation dans les sols et les eaux est également déterminant. Bien que différentes familles de produits de transformation aient été mises en évidence dans plusieurs échantillons de sol ainsi que dans l'eau de rivière et de mangrove, il est nécessaire de vérifier s'il s'agit d'une situation généralisée et surtout de quantifier les produits de transformation dans ces différents compartiments (bioconcentration, bio-accumulation), notamment dans les eaux (de surface et souterraines) destinées à la production d'eau potable.

L'étude de la toxicité et de l'écotoxicité pour les produits de transformation (autres que l'hydrochlordécone) devra également être menée au moyen d'organismes cibles qui soient représentatifs de la biodiversité locale ou d'indicateurs adéquats. Des approches *in silico* pourraient également être envisagées.

### Processus et dynamiques de dépollution en conditions réelles

La caractérisation des cinétiques et de l'efficacité de la biodégradation stimulée ou induite en conditions naturelles, seule ou couplée avec d'autres méthodes, nécessite une validation en conditions réelles de terrain. En effet, les voies actuelles de biodégradation requièrent des conditions anoxiques (très réductrices) qu'il faudrait générer dans le sol, impliquant des apports de substances, substrats ou organismes

exogènes et un maintien de la saturation en eau des sols concernés. Pour la phytore-médiation, plusieurs mécanismes seront à considérer, dont la phytoextraction et la stimulation de la biodégradation dans la rhizosphère. Pour la phytoextraction, deux verrous subsistent. Tout d'abord le besoin d'identifier des plantes locales ou non invasives dont le taux de transfert sol-plante permette d'obtenir une extraction significative de la chlordécone. Le second verrou concerne la récolte et la gestion des matières végétales aériennes et souterraines contaminées. Les résultats préliminaires de méthanisation en conditions optimisées (55 °C, 40 jours d'incubation) ouvrent des perspectives intéressantes qui doivent être approfondies.

### Processus de séquestration de la chlordécone dans les sols

La séquestration dans les sols par ajout de composts ou de charbons actifs a montré son efficacité *in vitro* et à court terme. Cependant, la dynamique de séquestration reste encore à décrire afin d'optimiser et de proposer des pratiques de fertilisation organique adaptées à une séquestration efficace (type d'apport, dose, fréquence, etc.).

De manière générale et pour tous les procédés mis en œuvre, il conviendra de réaliser une évaluation des impacts agronomiques et de la faisabilité économique, et cela dès qu'un corpus suffisant de données validées aura été acquis sur l'efficacité en conditions réelles *in situ*.

### Pistes de recherche pour limiter les transferts aux différents niveaux des chaînes trophiques

Parallèlement aux approches visant à dégrader la chlordécone dans les sols contaminés, et au regard de leurs limites, des approches permettant de réduire autant que possible les transferts dans les chaînes trophiques ont été mises en œuvre. Les perspectives de recherche associées peuvent être organisées en fonction de leur temporalité et du caractère réaliste de leur mise en œuvre (mixant les aspects de complexité et de mobilisation de compétences ou de moyens).

### Sécurisation des systèmes d'élevage en zone contaminée

Afin de continuer à développer des outils d'aide à la décision pour les espèces d'élevage d'intérêt, il est essentiel de poursuivre le travail de modélisation toxicocinétique de la chlordécone et de ses produits de transformation. Cette action s'intègre dans la continuité des travaux déjà initiés (projet Inssicca, notamment). Il s'agira de caractériser précisément :

- l'exposition des animaux d'élevage (ovins, porcins, volailles, poissons, crustacés, etc.) en tenant compte des différentes pratiques agricoles et des contaminations des parcelles utilisées,
- la variabilité interindividuelle de contamination et de décontamination des animaux terrestres et aquatiques afin d'affiner la modélisation toxicocinétique et d'ajuster les outils d'aide à la décision,
- l'effet des stades physiologiques (gestation, lactation, croissance) sur les paramètres toxicocinétiques chez les espèces d'intérêt (ovins, caprins, volailles, porcins, crustacés, poissons, etc.).

Ces travaux permettront d'élaborer un modèle intégratif des différentes étapes de l'exposition et du transfert chez les animaux : exposition, absorption, distribution,

métabolisme, élimination de la chlordécone et de certains produits de transformation, traitement des effluents contaminés par méthanisation et estimation des éventuels retours au sol. Ils conduiront à développer des outils d'aide à la décision chez les espèces d'élevage d'intérêt, tel que cela est déjà en place chez le bovin adulte (chapitre 9). Un des défis majeurs de ce travail consiste à réussir les changements d'échelle (laboratoire-*in situ*) pour le traitement des effluents d'élevage, par exemple.

À ces travaux, il convient d'ajouter l'évaluation de l'efficacité (changement d'échelle) et les impacts à long terme associés à l'utilisation de biochars et de charbons actifs pour la séquestration dans le sol (efficacité des amendements *in situ*, production de biochars et charbons actifs à grande échelle, effets des amendements sur la santé du sol, effets à long terme, etc.).

### Caractérisation des processus conduisant à la pollution des eaux

Les mesures d'atténuation (séquestration, dégradation) de la chlordécone dans les milieux continentaux au milieu littoral sont menées principalement à l'échelle des laboratoires. Ils ne permettent pas encore de limiter les transferts de la chlordécone à grande échelle dans les eaux douces et marines pour garantir la qualité de l'eau ni d'atténuer les phénomènes de bio-accumulation et biomagnification dans la faune et la flore du littoral.

Le transport particulaire est encore peu étudié, au regard du transport en phase dissoute. Or, l'érosion lors d'épisodes climatiques pourrait jouer un rôle majeur dans la contamination de certains écosystèmes marins. Aussi, il paraît prioritaire de mieux cartographier les zones polluées, dont le risque érosif est accru par certaines pratiques agronomiques (désherbage chimique, labour en période de pluie, etc.) ainsi que la dynamique des MES rejoignant les rivières et les estuaires. Ces nouvelles données permettraient de préciser leur rôle dans la contamination des organismes aquatiques et d'élaborer des mesures préventives permettant de réduire le transfert de polluants à l'échelle d'un territoire. Un des points-clés est celui du rôle des événements hydrologiques sur les transferts des contaminants. Ainsi, il s'agira de caractériser les phénomènes de mobilisation de la chlordécone en conséquence des premiers épisodes pluvieux après la période sèche, ou en conséquence des dépressions cycloniques. Seul un suivi et des observations sur le long terme et des techniques de mesures intégratives *in situ* pourront permettre d'apporter un éclairage plus précis. Il subsiste également un manque significatif de données de surveillance et d'observation de la dynamique de la chlordécone dans l'environnement selon le *continuum* terre-mer, afin de pouvoir faire le lien entre pollution terrestre et pollution marine et pour mieux envisager d'éventuelles mesures permettant de réduire le transfert vers les sédiments, la flore et la faune (chapitres 5 et 6). La sorption de la chlordécone et des produits de transformation aux MES selon un gradient de salinité serait à étudier plus précisément pour analyser la dynamique du contaminant le long du *continuum* terre-mer.

Pour caractériser plus finement les dynamiques de pollution sur des chroniques long terme, il sera nécessaire de mettre au point des méthodes d'observations plus performantes ou plus intégratives avec l'identification de bio-indicateurs ou l'utilisation d'échantillonneurs passifs. Ces données pourraient alimenter une continuité des activités sur la modélisation du transfert terre-mer avec un point d'attention particulier sur le contexte hydrologique, l'occupation des sols et l'érosion (chapitre 5). À terme, un système d'alerte sur la qualité de l'eau pourrait être envisagé.

En ce qui concerne les ressources alimentaires aquatiques, les recherches devraient être poursuivies sur la dynamique de l'exposition et de la contamination en fonction des stades physiologiques. L'observation à long terme devrait également permettre de poursuivre l'analyse des effets de l'exposition à la chlordécone et aux produits de transformation sur les populations (crustacés, poissons et organismes sentinelles), en particulier au moyen de biomarqueurs (chapitre 3).

### Réduire l'exposition grâce à des pratiques adaptées

La priorité pour agir au plus près des populations sensibles (enfants, femmes enceintes, familles surexposées) serait de mieux connaître leurs pratiques alimentaires (de choix, d'autoproduction et de consommation), ainsi que leurs représentations de la pollution et de ses impacts. Une première action serait dédiée à la construction d'un catalogue des pratiques existantes et au recensement des représentations des consommateurs et des producteurs. Une attention particulière devrait être portée sur l'usage des sources dites « bord de route », souvent captées par les populations défavorisées, ou dans les zones soumises aux coupures d'eau fréquentes. Des données déjà anciennes existent (Kannari et Jafa), il conviendrait de les actualiser régulièrement (tous les cinq à huit ans) et d'ajuster l'accompagnement au changement, que ce soit pour la production agricole alimentaire ou pour la consommation. L'effet à long terme de l'irrigation associé au potentiel transfert de chlordécone sur des zones indemnes est un point souvent questionné, tout comme l'impact à long terme de l'irrigation sur la contamination des sols. Un deuxième volet porte sur l'évaluation des coûts et bénéfices associés à l'évolution des systèmes de production, afin de réduire ou limiter l'exposition au travers des aliments. En troisième lieu, il s'agirait d'analyser l'acceptabilité des solutions proposées dans une logique de réduction de l'exposition des populations. À terme, cela permettrait de disposer d'outils et d'indicateurs permettant d'objectiver l'efficacité des politiques de santé publique conduites et des mesures d'accompagnement mises en place.

Les pistes de recherches évoquées ci-dessus répondent à des attentes sociétales fortes et peuvent être mises en œuvre sur un pas de temps relativement court. D'autres priorités de recherche importantes sont dépendantes de changements d'échelle et semblent plus complexes à mettre en œuvre, elles sont cependant nécessaires et concernent :

- la caractérisation de la contamination des ressources aquatiques. Cette action s'inscrit dans la continuité de la compréhension de la dynamique de la chlordécone et des produits de transformation pour les ressources marines, notamment ses effets sur les populations ou l'effet du stade physiologique (chapitre 6) ;
- la modélisation de la pollution sur l'ensemble de la zone critique, pour mieux caractériser le profil de pollution au-delà du sol agricole (profondeurs de 1 à 50 m). Ces données pourraient permettre d'alimenter des modèles de transfert sur les interactions eaux de surface-eaux souterraines, et l'interface terre-mer (chapitre 5) ;
- la santé des écosystèmes, notamment l'impact direct sur les biodiversités taxonomiques et fonctionnelles (chapitre 6) et plus indirectement sur la santé humaine au moyen d'une approche intégrée des santés (*One Health*).

## ► Pistes de recherches en lien avec la santé des populations : poursuites des recherches en cours et nouvelles perspectives pour la compréhension des impacts sanitaires

L'impact sanitaire de l'exposition à la chlordécone reste une préoccupation majeure des populations habitant aux Antilles (chapitre 7). Commencés il y a plus de 20 ans, de nombreux projets de recherche académique ont permis de révéler l'impact de l'exposition à la chlordécone sur la survenue ou l'évolution d'un certain nombre d'événements de santé et, au contraire, d'écarter un potentiel effet sur d'autres. Les grandes priorités sanitaires concernent la santé des enfants exposés, les pathologies gynécologiques ainsi que les cancers.

### Développement de l'enfant et du jeune adulte grâce à la cohorte Timoun

Concernant le lien entre l'exposition prénatale à la chlordécone et le développement de l'enfant, une cohorte mère-enfant, appelée « Timoun », a été mise en place en Guadeloupe de 2004 à 2007 pour étudier l'impact des expositions à la chlordécone sur le déroulement de la grossesse, notamment les pathologies associées, ainsi que sur le développement pré- et postnatal des enfants. Prochainement, les chercheurs réaliseront le suivi des jeunes adultes (16-20 ans) de cette cohorte Timoun. Les analyses des données recueillies se dérouleront sur plusieurs années et permettront d'étudier, notamment, le lien entre l'exposition prénatale à la chlordécone et l'âge à la puberté, les taux circulants d'hormones stéroïdiennes, la santé cardiometabolique et les caractéristiques des cycles menstruels chez les jeunes femmes ainsi que l'estimation de la réserve ovarienne.

Toujours concernant la cohorte Timoun, celle-ci pourrait servir de support pour des études épigénétiques chez l'humain. La priorité est donc au maintien de la cohorte afin de pouvoir analyser les effets de l'exposition à la chlordécone à différents stades de la vie.

### Recherches en lien avec la santé des femmes

#### Pathologies gynécologiques dont l'endométriose

Compte tenu des hypothèses sur l'origine développementale de pathologies gynécologiques fréquentes (endométriose, syndrome métabolique ovarien polyendocrinien [anciennement syndrome des ovaires polykystiques]) avec pour certaines d'entre elles une forte incidence dans les populations afrocaribéennes (fibrome utérin) et un fort impact sur la qualité de vie et la fertilité féminine, un nouveau suivi chez les jeunes femmes de la cohorte Timoun avec en complément du suivi actuel des examens d'imagerie (échographie endovaginale ou IRM) devrait permettre le diagnostic de ces pathologies gynécologiques.

#### Fertilité féminine

Concernant la fertilité féminine, l'étude Karu-fertil (première inclusion fin janvier 2024 et fin des inclusions prévues en février 2026) permettra d'étudier le lien entre l'exposition à la chlordécone à l'âge adulte et la diminution de la réserve ovarienne, mais aussi la survenue de l'endométriose et du syndrome métabolique ovarien polyendocrinien chez des femmes consultant pour infertilité du couple. Cette étude permettra également d'étudier le lien entre l'exposition à la chlordécone et les issues des prises en

charge en fécondation *in vitro*. Elle inclut aussi un volet visant à documenter la perception des risques, notamment environnementaux. Il s'agit de recueillir les paroles des femmes consultant pour infertilité du couple ainsi que des professionnels de santé les prenant en charge. Il faudra également déterminer la concentration en chlrodécone présente dans de nouvelles matrices biologiques d'intérêt (liquide folliculaire, par exemple) et réaliser des analyses chimiques non ciblées dans différentes matrices (sang, liquide folliculaire) pour mieux comprendre les interactions potentielles de la chlrodécone avec d'autres co-expositions chimiques.

Toujours concernant la santé reproductive des femmes, une troisième priorité est la mise en place des études destinées à étudier le lien entre l'exposition à la chlrodécone et la ménopause. L'étude Karu-Fanm consistera à inclure les mères ayant participé à la cohorte Timoun sur la période 2004-2007, dont l'âge médian en 2025 sera de 51 ans. L'âge à la ménopause naturelle (définie après 12 mois d'aménorrhée sans cause médicale identifiée) sera étudié en relation avec leur exposition à la chlrodécone mesurée lors de leur grossesse Timoun. D'autres aspects de la santé des femmes, impactées par la survenue de la ménopause, seront étudiés, tels que la santé cardiométabolique et la qualité de vie. L'histoire gynécologique des mères depuis leur grossesse Timoun sera aussi étudiée en relation avec l'exposition à la chlrodécone.

## Recherches relatives aux cancers

### Cancer de la prostate

Plusieurs autres travaux épidémiologiques ont montré une association significative entre l'exposition à la chlrodécone et le risque de survenue d'un cancer de la prostate. Actuellement, l'étude KP-Caraïbes en cours vise notamment à identifier des déterminants environnementaux (dont l'exposition à la chlrodécone), mais aussi cliniques, histopathologiques, génétiques, biologiques, anthropométriques et professionnels, qui influencent les différentes évolutions du cancer de la prostate. Cette étude a été mise en place en 2023 et la période d'inclusion se poursuit jusqu'à fin 2028 avec un suivi jusqu'à 10 ans après l'inclusion. Par ailleurs, le projet Cloecapa financé par l'Inca s'intéresse aux liens entre chlrodécone et cancer de la prostate aux Antilles sous l'angle des sciences humaines et sociales (anthropologie, sociologie, sciences politiques) et a pour but de répondre à la question scientifique suivante : quelle est la part du risque d'occurrence de cancer de la prostate et particulièrement de cancers évolutifs liés à la chlrodécone, parmi l'ensemble des facteurs de risque connus ou potentiels ? »

### Autres types de cancers

Pour apprécier l'impact de l'exposition à la chlrodécone sur la survenue d'autres pathologies que celles étudiées jusqu'à maintenant, il conviendra de mettre en place de nouvelles cohortes. Les registres des cancers de la Guadeloupe et de la Martinique mis en place sous l'égide de l'Inca participent à la surveillance épidémiologique des cancers de manière générale. Même s'il faut rappeler que l'incidence globale des cancers est plus faible aux Antilles que dans l'Hexagone, celle-ci présente de fortes disparités dans la distribution de certains cancers (prostate, par exemple). Ces deux registres pointent la nécessité de mesurer l'association entre l'exposition aux pesticides, en particulier à la chlrodécone, et à d'autres facteurs environnementaux et professionnels, et la survenue des myélomes et lymphomes en Guadeloupe et en Martinique,

dans le cadre d'une étude cas-témoins. Ces études analyseront la corrélation entre la cartographie des sols contaminés et la géolocalisation des cas de cancers à partir des données des registres généraux des cancers. Les pistes de recherche sur le lien entre l'exposition à la chlordécone et le risque de cancers pourraient également intégrer les cancers de l'estomac et du pancréas, dont l'incidence est en augmentation et pour lesquels une sur-incidence est observée chez les femmes ayant travaillé dans le secteur agricole et bananier en particulier. Puisque la chlordécone est reconnue comme un perturbateur endocrinien, il conviendra aussi d'étendre ces observations à la survenue du cancer de l'utérus.

## Recherches relatives aux pathologies métaboliques

Comme le rappelle encore le registre des cancers de la Guadeloupe, une attention particulière devra être portée au cancer du foie, et plus largement aux hépatopathies dites « métaboliques ». En effet, les départements d'outre-mer, dont la Guadeloupe et la Martinique, connaissent des prévalences de diabète de type 2 (9%), d'hypertension artérielle (29%) et d'obésité (30%), qui sont parmi les plus élevées de France. Ces pathologies sont des facteurs de risques élevés de survenue de maladies stéatosiques\* hépatiques (maladies dites « du foie gras ») et de cancer du foie. Le lien entre exposition à la chlordécone et maladies stéatosiques hépatiques, et plus largement maladies chroniques comme obésité, pourra être recherché.

Les années futures devraient permettre de réaliser de grandes avancées en prenant en compte de nouveaux champs de recherche que sont la fouille de données dans les bases de données de santé d'une part et l'exposome d'autre part.

## Aller plus loin grâce à l'exploitation de grandes cohortes

### Recherches relatives à la cohorte des travailleurs

Parmi les études marquantes, une cohorte de travailleurs de la banane potentiellement exposés à la chlordécone a été reconstituée rétrospectivement. Cette cohorte comprend plus de 10 000 travailleurs, salariés et exploitants agricoles, employés dans une exploitation bananière en Guadeloupe et en Martinique pendant la période d'utilisation du chlordécone. Les expositions au chlordécone et aux autres pesticides ont été estimées à partir de la matrice culture-expositions de la banane développée par Santé publique France. Les analyses en cours ont pour l'instant concerné la mortalité en fonction de la cause du décès. Les données sur les cancers survenus chez les travailleurs de la cohorte sont maintenant disponibles, grâce à un croisement avec les données des registres des cancers. L'association entre exposition à la chlordécone et l'incidence des différents cancers est en cours d'analyse. Outre la chlordécone, les travailleurs de cette cohorte ont été exposés à un grand nombre de pesticides et les expositions sont fortement corrélées. La priorité est le choix et la combinaison de méthodes statistiques avancées permettant d'évaluer l'effet propre du chlordécone, le rôle d'association et d'exposition multiple de pesticides et la contribution du chlordécone aux effets observés. Enfin, il est envisagé d'apparier les données de la cohorte au SNDS. Cet appariement permettra d'étudier l'incidence d'autres pathologies chez les travailleurs de la cohorte, comme les pathologies neurodégénératives ou le diabète, et leur relation avec l'exposition à la chlordécone.

## Mise en place d'une grande cohorte en population générale dans les territoires ultramarins

Alors que dans le cadre d'une politique de recherche en santé publique ambitieuse et bâtie sur le long terme, soutenue dans des plans d'investissement d'avenir (PIA), la France se dote de nouvelles grandes cohortes en population générale, il conviendra de réfléchir à la richesse et l'opportunité que constitue la singularité des départements et régions d'outre-mer, incluant Guadeloupe et Martinique, pour porter le projet d'une cohorte en population générale dans nos territoires ultramarins. Le suivi longitudinal de ce type de cohorte en population générale permettrait d'évaluer les liens entre des facteurs d'exposition (démographiques, biologiques, comportementaux, environnementaux, génétiques, etc.) et la survenue d'événements de santé (maladie, marqueur biologique, etc.). Ceci serait d'autant plus informatif que comme nous l'avons rappelé, il existe une singularité de la population antillaise avec l'exposition à la chlordécone bien sûr, l'exposition aux émanations des gaz, le sulfure d'hydrogène (H<sub>2</sub>S) et l'ammoniac (NH<sub>3</sub>) issus d'algues sargasses en décomposition, la diversité génétique des populations qui habitent les Antilles, une forte et inquiétante prévalence de surpoids et d'obésité, une exposition au glyphosate importante, pour ne citer que ces facteurs. Ainsi, le suivi longitudinal serait une vraie plus-value pour des actions de prévention et l'accompagnement médical des personnes.

## Des approches à développer

### Recherches utilisant les données nationales de santé et leur croisement avec les bases de données environnementales

Comme pour tous les territoires, les données colligées dans le SNDS constituent une source de connaissance précieuse pour identifier des pathologies sur-incidentes et sur-prévalentes aux Antilles. En effet, élaboré par la Caisse nationale de l'Assurance Maladie (Cnam), le SNDS se base sur le système national d'information inter-régimes de l'Assurance Maladie (Sniiram) qui contient les données de remboursement des régimes d'assurance maladie obligatoires; les données des hôpitaux (base du programme de médicalisation des systèmes d'information [PMSI]); les bases de données sur les causes médicales de décès; les données relatives au handicap et les données relatives à la Covid-19 extraites des bases Vaccin Covid et SI-DEP (système d'information et de dépistage). Les travaux menés dans les plans « chlordécone » successifs ont également permis de collecter une très grande quantité de données de présence et de contamination du chlordécone dans différents milieux (sols, aliments, eau, etc.), notamment — mais pas exclusivement — dans le cadre d'Opale. Plus récemment, les campagnes de biosurveillance (Kannari I et II), et les mesures volontaires de chlordéconémie constituent des données complémentaires.

Aussi, en pleine cohérence, la logique qui a prévalu à la mise en place du GD4H dans le cadre du PNSE4, et sous réserve d'une action de structuration des données environnementales qui pourrait être portée dans le cadre du GD4H, les croisements avec les données du SNDS constituent une opportunité scientifique pour questionner d'une nouvelle manière les liens entre exposition environnementale et survenue d'événements de santé des populations antillaises, alors même qu'il n'a pas encore été suffisamment exploité aux Antilles.

## Recherches à l'échelle de l'exposome chez l'humain

L'exposome est un concept en santé environnementale et épidémiologie qui désigne l'ensemble des expositions aux facteurs environnementaux, biologiques, chimiques, physiques et sociaux que subit un individu tout au long de sa vie, depuis la conception jusqu'à sa fin de vie. Ce concept inclut non seulement les expositions externes (comme la pollution de l'air, l'alimentation, les produits chimiques, etc.), mais aussi les expositions internes (comme les processus métaboliques, les niveaux hormonaux, le microbiome, etc.). La chlordécone est une molécule chimique d'origine anthropique qu'il est nécessaire d'inclure dans l'exposome chimique. Les personnes exposées à la chlordécone sont aussi exposées à un grand nombre de composants de l'exposome chimique et d'autres composants de l'exposome. Ces multiples expositions définissent ce qu'on appelle les effets cocktails qu'il conviendrait d'étudier (pour ne pas prendre en compte uniquement la chlordécone, seule), des pistes précises à ce sujet figurent dans les travaux de l'Anses sur chlordécone et exposome.

## Recherches en sciences humaines et sociales et approches participatives

La compréhension de la crise sanitaire liée au chlordécone et sa gestion ne peut être détachée de son contexte sociopolitique et historique. En ce sens, il apparaît comme évident de développer davantage les recherches dans le domaine des sciences humaines et sociales et d'adopter des méthodes participatives dans le cadre des recherches, pour renforcer l'implication des personnes concernées et permettre une acculturation croisée et des mesures préventives adaptées et adoptées.

### ► Pistes de recherche en sciences humaines et sociales

Longtemps absente des problématiques liées à la chlordécone, la recherche en sciences humaines et sociales en France y trouve désormais toute sa place. Elle le fait d'une part grâce à un dialogue fructueux avec les autres champs disciplinaires, et d'autre part, par la production de connaissances nécessaires à la prise de décision, au dépassement des obstacles qui entravent la mise en œuvre des mesures proposées, et à l'évaluation à diverses échelles des mécanismes de l'action publique. Ces divers défis sont étroitement associés à la réduction de l'exposition à la chlordécone et à ses éventuels produits de transformation, ainsi qu'à la minimisation de leurs effets néfastes. Les aborder avec sérieux implique immédiatement de concentrer l'attention sur les phénomènes complexes de résistance qui peuvent émerger face aux solutions potentielles. Cela souligne également l'importance d'identifier et d'activer des leviers pour vaincre ces résistances. À cet égard, il existe plusieurs voies prometteuses qui devraient être examinées plus en profondeur.

## La contextualisation sociohistorique de la gestion du risque

Les travaux qui ont été menés sur la constitution du chlordécone en problème public, et sur les mobilisations sociales qui y sont associées, montrent bien l'influence du contexte sociohistorique et socioculturel sur les comportements des acteurs. Il semble donc approprié de continuer à analyser le rôle joué par ce contexte dans la formation des représentations collectives et sa contribution aux phénomènes d'élargissement, de démultiplication de la mobilisation sociale, de victimisation et de revendications de justice. Ces derniers, par un effet de retour, contribuent à la pérennisation de l'inscription du problème public à l'agenda institutionnel.

Ce contexte sociohistorique très marqué a pour effet d'atténuer, voire d'abolir, la distinction traditionnelle entre la production de connaissances scientifiques et l'activisme politique. Il est de plus en plus fréquent que ce dernier soit revendiqué comme une composante intégrante de la recherche dans ce cas particulier. Ce constat ne concerne pas seulement les Antilles ni la gestion du risque lié à la chlordécone, mais il offre l'opportunité d'engager une réflexion plus large sur les statuts respectifs de ces deux positionnements et sur les interactions qu'elles entraînent dans le cadre de la « science en train de se faire ». Explorer les tenants et les aboutissants d'un tel constat devrait permettre d'en savoir plus sur les conditions de fabrication de l'expertise, sur son statut dans un contexte où, même si la demande de connaissances scientifiques se fait concurrencer par d'autres types de savoirs, elle reste néanmoins élevée. De même, des interrogations subsistent sur les usages qui peuvent découler des différentes formes d'expertise.

### **La constitution d'une mémoire vive à propos de la manipulation du chlordécone et des pesticides**

Les recherches dans le domaine de la santé, notamment celles relatives à la cohorte des travailleurs et à l'exposome chez l'humain mentionnées précédemment, méritent incontestablement d'être soutenues et complétées par des enquêtes qualitatives auprès des populations directement touchées. En effet, les données actuelles sur l'expérience des ouvriers agricoles ayant manipulé le chlordécone et les pesticides présents dans les sols antillais sont extrêmement limitées. Il est maintenant temps de créer, à partir d'enquêtes anthropologiques, une « mémoire vivante » de ces événements historiques. Cette mémoire permettrait de collecter des témoignages auprès d'ouvriers agricoles actuels ou retraités, tout en les comparant aux données et aux statistiques recueillies par d'autres méthodes de recherche.

### **L'analyse de l'éco-anxiété liée au risque chlordécone et à ses conséquences**

Les premières conclusions des recherches en sciences humaines et sociales montrent l'existence d'une véritable « éco-anxiété » au sein d'une partie de la population. Il s'agit en particulier de la crainte des effets sur la santé de la contamination des sols et du développement possible de certains cancers. Il est crucial de considérer cet aspect pour favoriser la participation de la population à l'élaboration et à la mise en œuvre des mesures. Cela nécessite de dépasser les évaluations purement subjectives en menant des enquêtes sociologiques approfondies pour évaluer l'impact de ce facteur et ses répercussions sur le comportement des populations concernées. Les résultats de ces enquêtes pourraient également nourrir une réflexion sur les modalités de prise en charge de ce préjudice par les autorités.

### **Le poids des inégalités sociales face à l'enjeu de la réduction de l'exposition et de la limitation de l'impact**

Les sociétés antillaises sont caractérisées par d'importantes inégalités sociales. En témoigne le fait qu'un indicateur-clé, soit le pourcentage de personnes vivant sous le seuil de pauvreté, est deux fois plus élevé en Martinique que dans l'Hexagone (27,4 %, contre 13,5 % en moyenne en France) — et encore davantage en Guadeloupe (34 %) —, malgré une légère amélioration ces dernières années. Ces inégalités profondes ont un

impact considérable sur plusieurs aspects de la vie, notamment la santé et l'environnement. De plus, les phénomènes de pauvreté et de précarité se renforcent d'inégalités, notamment en ce qui concerne l'accès à l'éducation et à l'information. Cette dimension sociale doit être prise en compte. Elle influence directement les comportements, notamment en matière de consommation, dans des sociétés où l'économie informelle occupe une place importante et est largement alimentée par les secteurs les plus défavorisés de la population. Cela risque de détourner de leurs objectifs les procédures de traçabilité des produits, d'où l'intérêt d'orienter la recherche vers les effets cumulatifs, mais aussi vers le renforcement mutuel des inégalités sociales, environnementales et sanitaires, en privilégiant différentes pistes :

– la perception du lien entre l'alimentation et la santé en fonction des appartenances sociales, notamment comment les familles à faible revenu perçoivent l'influence de la nourriture sur leur santé;

– la maîtrise des recommandations alimentaires de santé publique par les personnes en situation de précarité;

– l'analyse des habitudes alimentaires des différentes classes sociales, en particulier celles qui sont les plus vulnérables, et leur rapport aux recommandations officielles (voir plus haut);

– l'analyse des perceptions, des représentations de la population et de leur influence sur les comportements. Cette piste s'étend au défi de l'acceptabilité sociale, qui est crucial pour les politiques publiques potentiellement contraignantes. Elle implique une analyse approfondie des perceptions sociales et des valeurs sous-jacentes liées au risque chlordécone dans la mesure où celles-ci influencent les comportements et les pratiques. Il est dès lors essentiel de maintenir un lien entre la production de savoirs et d'informations d'un côté, et le contexte qui leur donne sens, de l'autre. De ce point de vue, il importe, au-delà d'une approche strictement individuelle dont l'efficacité est parfois douteuse, de documenter :

- les facteurs cognitifs, sociaux, économiques et culturels favorisant ou entravant des obstacles à la transmission des messages;
- les phénomènes de dissonance cognitive liés au décalage de perception du traitement de la crise entre les autorités et les représentants de la société civile;
- le rôle de l'environnement (médias, famille, voisinage, amis, etc.) dans l'interprétation du risque;
- la façon dont les représentations sociales sont interconnectées et véhiculées entre les différents groupes d'appartenance;
- le poids des influences sociales, des expériences et des identités sociales (voir le paragraphe «La constitution d'une mémoire vive à propos de la manipulation du chlordécone et des pesticides») dans la production d'explications;
- les mécanismes d'intégration de la connaissance scientifique dans les discours profanes ou, au contraire, les processus par lesquels elle peut être mise en doute ou rejetée;
- les phénomènes de réinterprétation (comment les citoyens reçoivent et réinterprètent les messages et avec quels effets sur leurs pratiques et comportements);
- les logiques et les processus de construction de l'information découlant de l'évolution de l'environnement médiatique, notamment de l'émergence de dispositifs de circulation des savoirs désormais centrés sur les réseaux socionumériques et sur le rôle de nouveaux médiateurs, dans un contexte de controverses et de crises sanitaire et socio-environnementale;

- l'objet et le contenu de la communication à partir d'une connaissance, la plus précise possible, des perceptions, des représentations, des connaissances, des croyances, des valeurs et des pratiques des populations exposées au risque.

## La dimension socio-économique de la gestion du risque

L'évaluation économique des dispositifs d'action publique s'impose comme une nécessité à un moment où, le coût élevé de la vie aidant, les Antilles françaises font face à l'urgence de l'autonomie alimentaire, à l'adoption de stratégies de développement durable et à la gestion continue de la pollution des sols par la chlordécone. Il s'agit donc d'aller au-delà des avis d'experts ou des critères de décision sommaires en évaluant le coût d'une production agricole rendue saine et économiquement viable dans ce contexte difficile.

Cette démarche d'évaluation *ex ante* doit non seulement considérer la perspective des décideurs publics, mais aussi celle de la société. En effet, l'enjeu de l'acceptabilité sociale est ici également un paramètre essentiel eu égard à la possible remise en question des traditions et des comportements établis en matière de production, de consommation et d'alimentation. Une telle approche requiert une variété d'analyses à différents niveaux, allant de la parcelle à la chaîne d'approvisionnement en passant par les producteurs, les consommateurs et les citoyens, tout en tenant compte des interactions entre ces différentes échelles et entre les groupes d'acteurs concernés.

## La dimension juridico-institutionnelle de la gestion du risque

Gérer le risque chlordécone nécessite la mobilisation d'un cadre juridique et institutionnel complexe, impliquant de multiples structures et acteurs, ainsi que l'utilisation de nombreuses normes et procédures juridiques. D'une complexité parfois désarmante pour les citoyens ordinaires, ces dispositifs multiformes montrent parfois leurs limites face aux attentes de ces derniers (chapitre 8). Ils se détournent de la co-construction d'un espace de négociations de risques, tentant plutôt de trouver à qui incombe la faute. En effet, la décision de non-lieu prononcée par le procureur de Paris le 2 janvier 2023, après plus de 16 ans d'enquête, met en évidence l'échec du droit positif à reconnaître les responsabilités dans les conséquences de l'exposition excessive des populations à la chlordécone, malgré la mention du drame sanitaire et humain. Ce verdict soulève des questions sur le cadre juridique et institutionnel régissant l'utilisation des pesticides, allant au-delà des seules règles de responsabilité pénale des parties concernées. Il s'agit également de la réglementation juridique de l'utilisation des pesticides en lien avec les connaissances scientifiques disponibles, ainsi que des aspects du droit de l'environnement, du droit à l'alimentation et du droit de la santé. Plusieurs pistes peuvent être dès lors envisagées :

- la recension, sous la forme d'un tableau détaillé et précis, de l'ensemble des réglementations et des dispositifs juridiques en vigueur au niveau local, national et européen ;
- l'étude de l'articulation entre les mesures nationales applicables aux territoires insulaires et la stratégie européenne « De la ferme à la table »<sup>62</sup>, qui vise à assurer un niveau élevé de sécurité pour tous les produits alimentaires commercialisés dans l'UE, à tous les stades de la production et de la distribution ;

62. <https://www.consilium.europa.eu/fr/policies/from-farm-to-fork/>.

- les voies d'amélioration des principes préventifs (tels que l'examen de la légalité par le juge administratif des responsabilités de prévention des autorités publiques) et pruden­tiels, ainsi que la mise en place de règles sur la forclusion\* plus adaptées aux effets à long terme des pesticides ;
- l'étude des facteurs favorisant une administration efficace des risques ;
- l'analyse des obstacles sociaux et culturels qui entravent l'accès aux dispositifs ainsi que des moyens d'améliorer le cadre légal et politique afin de s'assurer que les popula­tions vulnérables n'en souffrent pas en raison de leur incapacité à y avoir accès.

## Le développement des approches participatives

La crise multidimensionnelle engendrée par la pollution des écosystèmes insulaires par la chlordécone s'inscrit dans la durée, non seulement en raison de la persistance de la molécule dans les sols contaminés, mais aussi de la pérennisation de l'inscription du problème à l'agenda politique et institutionnel. Il est désormais admis que les voies de sortie de cette crise passent par une meilleure implication et participation des citoyens dans la gestion du risque.

Les facteurs sociaux, culturels et contextuels susceptibles de brider la participation citoyenne sont largement documentés dans la littérature sociologique. Compte tenu des connaissances acquises et des apports les plus récents des sciences participa­tives, il est opportun de concentrer la recherche sur la mise au point de dispositifs opérationnels.

Ainsi, la recherche devrait s'engager résolument dans la conception de tels dispositifs, qui devraient permettre :

- de mettre en place, dans une démarche de co-construction de solutions à la crise, un mode de fonctionnement inclusif et ouvert à la diversité des acteurs et des citoyens ;
- de croiser les différents types de savoirs, y compris les savoirs profanes, tout en évitant le triple piège de la posture surplombante du scientifique, du relativisme absolu des connaissances et de la posture des politiques revendicatives des associations très engagées ;
- d'organiser des confrontations entre différents types d'expertise, notamment les sciences du sol, les sciences biomédicales, les sciences humaines et sociales, et l'expertise d'usage des citoyens.

## Le développement d'études comparatives et complémentaires sur la gestion du risque chlordécone

L'expérience de la gestion de la crise du chlordécone peut offrir des enseignements précieux sur des situations similaires, allant au-delà de ce cas particulier de pollution et de son contexte géographique spécifique, permettant ainsi une généralisation. Il serait certainement bénéfique d'examiner comment la gestion du risque chlordécone peut servir de précédent pour d'autres territoires d'outre-mer qui ont connu une utilisation excessive de pesticides pour favoriser des cultures d'exportation, comme c'est le cas à La Réunion. On peut également se demander si la priorité accordée à la lutte contre les effets du chlordécone aux Antilles ne relègue pas au second plan la gestion des autres menaces environnementales et sanitaires dans ces îles, ainsi que dans d'autres territoires ultra-marins, au risque de négliger les effets cocktails des pesticides peu documentés à ce jour.

# Glossaire

---

**Allophane** : minéral aluminosilicaté amorphe (non cristallisé) constitué de nanoparticules sphériques formées d'aluminium, de silicium et d'oxygène, généralement hydraté; type d'argile de structure fractale (pas de feuillet) conférant aux sols qui en contiennent (andosol\*) des propriétés physiques spécifiques (forte capacité de rétention en eau, forte teneur en matières organiques, etc.).

**Andosol** : sol formé à partir de matériaux volcaniques (cendres, ponces, tufs), caractérisé par une forte teneur en minéraux aluminosilicatés amorphes tels que les allophanes\*.

**Aptamère** : oligonucléotide simple brin (ADN ou ARN) capable de se replier en une structure tridimensionnelle lui permettant de se lier avec une haute affinité et spécificité à une cible moléculaire donnée.

**ATPase** : enzyme hydrolase qui catalyse l'hydrolyse de l'ATP en ADP et phosphate inorganique.

**Bagasse** : résidu lignocellulosique fibreux obtenu après extraction du jus de la canne à sucre lors du processus de broyage industriel.

**Bancarisation** : processus qui consiste à intégrer, centraliser et structurer des données éparses au sein d'une banque de données unique, cohérente et exploitable.

**Bio-accumulation** : processus par lequel une substance chimique s'accumule dans un organisme suite à une exposition par l'eau, l'air, le sol, l'alimentation ou les surfaces biologiques conduisant à une augmentation progressive de sa concentration interne au cours du temps.

**Bio-amplification** (ou **biomagnification**) : processus par lequel la concentration d'une substance chimique augmente de manière progressive d'un niveau trophique à un autre depuis le niveau de base (producteurs primaires ou proies) jusqu'au sommet d'une chaîne ou d'un réseau alimentaire (prédateurs).

**Biodisponibilité** : fraction d'une substance présente dans un milieu donné ou administrée à un organisme, qui est effectivement absorbée à travers des membranes biologiques et devient disponible pour la distribution interne, les processus métaboliques ou l'interaction avec des cibles biologiques.

**Bioconcentration** : processus d'accumulation d'une substance chimique dans un organisme vivant résultant exclusivement de son absorption à partir du milieu environnant.

**Biofilm épilithique** : ensemble organisé de micro-organismes se développant à la surface des roches, sans pénétrer le substrat minéral, dans les milieux aquatiques.

**Bio-indicateur** : entité biologique dont la présence, l'absence, l'abondance, l'état physiologique ou le comportement permet de révéler des modifications des conditions environnementales, notamment en lien avec des facteurs de stress chimiques, physiques ou biologiques.

**Biomagnification** : voir **bio-amplification**.

**Bishomocubane** : hydrocarbure polycyclique cage caractérisé par une structure tridimensionnelle très contrainte, composée de cycles carbonés fusionnés formant une géométrie proche d'un cube déformé.

**Chlordéconémie** : concentration de chlordécone mesurée dans le sang (plasma ou sérum) d'un individu, généralement exprimée en unités de masse par volume (par exemple ng/ml ou µg/l).

**Contrefactuel** : situation hypothétique non observée décrivant ce qui aurait pu se produire si une condition initiale, une exposition ou une politique avait été différente, toutes choses égales par ailleurs.

**Curation** : ensemble des opérations par lesquelles la mission chlordécone de l'académie de Martinique repère, sélectionne, vérifie, organise et propose une médiation scientifique et pédagogique des ressources scientifiques, institutionnelles, pédagogiques et territoriales sur le chlordécone,

afin de produire des contenus fiables, compréhensibles et mobilisables par les enseignants, les élèves, les personnels éducatifs et, plus largement, la communauté scolaire (définition proposée par Séverine Ely-Marius).

**Demi-vie** : temps nécessaire pour réduire de 50 % la quantité d'une substance dans un organisme, un compartiment environnemental (sol, eau, air) ou un système écologique.

**Écoexposome** : ensemble des expositions environnementales d'un organisme, d'une population ou d'un écosystème tout au long de sa vie, incluant les expositions chimiques, physiques, biologiques et sociales, ainsi que leurs variations temporelles.

**Élevage de rente** : système d'élevage dont la production animale est principalement destinée à être commercialisée pour générer un revenu économique.

**Épilithique** : voir **biofilm épilithique**.

**Espèce climacique** : espèce constitutive d'un écosystème qui a atteint le stade terminal de son évolution, c'est-à-dire qui a atteint un état d'équilibre.

**Essai interlaboratoire (EIL)** : comparaison organisée des résultats d'analyse de plusieurs laboratoires sur un même échantillon afin d'évaluer la qualité et la reproductibilité des mesures; il s'agit d'un dispositif d'assurance qualité analytique.

**Exposome** : ensemble des expositions non génétiques auxquelles un individu est soumis tout au long de sa vie, incluant les expositions environnementales, alimentaires, professionnelles et comportementales, ainsi que leurs variations dans le temps, et leurs effets biologiques associés.

**Ferralsol** : sol typique des régions tropicales et subtropicales humides très ancien, marqué par une forte altération et un enrichissement en oxydes de fer et d'aluminium, généralement pauvre en éléments nutritifs.

**Fer zérovalent** : forme métallique du fer à l'état d'oxydation 0, utilisée comme agent réducteur notamment en dépollution environnementale.

**Forclusion** : perte du droit d'agir en justice à la suite de l'expiration d'un délai légal.

**Grit** : petites particules minérales ingérées par les oiseaux pour aider mécaniquement la digestion des aliments dans le gésier.

**Incertitude** : quantification de l'intervalle de doute associé au résultat d'une mesure, correspondant à la dispersion des valeurs raisonnablement attribuables à la grandeur mesurée.

**Homéostasie calcique** : régulation physiologique qui permet le maintien de la stabilité de la concentration en calcium dans un organisme.

**Limite de détection (LOD)** : plus faible concentration d'un composé qu'une méthode analytique peut détecter de façon fiable, mais sans garantir une quantification précise.

**Limite de quantification (LOQ)** : plus faible concentration d'un composé pouvant être quantifiée de manière fiable avec une précision et une exactitude acceptables.

**Limite maximale de résidus (LMR)** : seuil réglementaire de concentration des résidus de composés chimiques au-delà duquel la commercialisation d'un produit animal n'est plus autorisée.

**Matrice alimentaire** : matrice solide pouvant être consommée, par exemple des végétaux ou encore de la viande.

**Matrice biologique** : matrice provenant d'un compartiment biologique humain ou animal, par exemple le sang ou encore les urines.

**Matrice environnementale** : matrice provenant de l'environnement, par exemple l'eau, le sol ou encore les sédiments.

**Migration ontogénétique** : migration animale liée aux cycles reproductifs.

**Nitisol** : sol formé sous climat tropical ou subtropical avec des saisons humides et sèches marquées, caractérisé par une forte teneur en argile et en oxydes de fer, bien structuré et bien drainé, présentant une fertilité relativement élevée.

**Ontogénétique** : relatif au développement d'un organisme individuel au cours de son cycle de vie.

**Ontologie** : représentation formelle et structurée des concepts d'un domaine et de leurs relations, utilisée pour organiser et partager les connaissances.

**Pluriversalisme** : conception selon laquelle il existe plusieurs façons légitimes et coexistantes de comprendre et d'interpréter le monde.

**Potentiel métabolique** : quantité d'énergie disponible à un instant  $t$  pour l'organisme.

**Prééclampsie** : maladie de la grossesse associant hypertension et atteinte d'organes, liée à un dysfonctionnement placentaire.

**Proxy** : variable utilisée pour représenter ou estimer une grandeur, un phénomène, difficile à mesurer directement.

**Raid trophique** : déplacement spontané, souvent bref et ciblé, d'un organisme vers une zone d'alimentation avant retour à son habitat principal.

**Santé intégrative** : santé globale tenant compte des différentes dimensions de la santé (culturelle, sociale, économique, politique, etc.) et s'appuyant sur les travaux en sciences humaines et sociales pour les mettre en perspective. La santé intégrative permet d'éviter une communication univoque ne tenant pas compte des réalités individuelles et collectives de la santé, comme celles émises durant la pandémie.

**Stéatosique (maladie)** : pathologie caractérisée par une accumulation excessive de graisses dans les cellules d'un organe, entraînant une altération de son fonctionnement.

**Toximètre dynamique** : dispositif de mesure en continu permettant d'évaluer la toxicité d'un milieu à partir de réponses biologiques (déplacement du poisson, par exemple) ou physico-chimiques.

# Liste des abréviations, sigles et acronymes

---

- ACN** Acétonitrile
- Ademe** Agence de la transition écologique
- ADME** Absorption, distribution, métabolisme et excrétion
- ADN** Acide désoxyribonucléique
- ADP** Adénosine diphosphate
- Afssa** Agence française de sécurité sanitaire des aliments
- Agac** Association guadeloupéenne d'action contre le chlordécone
- Aglae** Association générale des laboratoires d'analyses et d'essais
- Agri-STAMP** *Spatial-temporal model of pesticide use in agriculture* (modèle numérique représentant l'évolution temporelle des usages de pesticides à l'échelle territoriale)
- AMP** Adénosine monophosphate
- Amse** Association médicale de sauvegarde de l'environnement et de la santé
- ANR** Agence nationale de la recherche
- Anses** Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
- ARS** Agence régionale de santé
- ASE** *Accelerated solvent extraction* (extraction accélérée par solvant)
- ATP** Adénosine triphosphate
- ATSDR** *Agency for Toxic Substances and Disease Registry* (Agence du registre des substances toxiques et des maladies)
- Bipea** Association à but non lucratif de laboratoires réalisant des essais interlaboratoires
- BNVD** Banque de données nationale des ventes des distributeurs de produits phytopharmaceutiques
- BRGM** Bureau de recherches géologiques et minières
- Calbas** Enquête sur les habitudes alimentaires des populations dans les communes du sud de la Basse-Terre en Guadeloupe
- Cart** *Center for Analytical Research and Technology* (université de Liège, Belgique; Centre de recherche et de technologie analytique)
- CAS** *Chemical Abstracts Service*
- CASD** Centre d'accès sécurisé aux données (hébergement sécurisé de données sensibles)
- CDKP** *Chlordecone data knowledge platform* (plate-forme de connaissances sur le chlordécone)
- CGAAER** Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux
- CGEDD** Conseil général de l'environnement et du développement durable
- Cirad** Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
- Circ** Centre international de recherche sur le cancer
- Cire-AG** Cellule interrégionale d'épidémiologie d'Antilles-Guyane
- CLD** Chlordécone
- CLDOH** Chlordécol
- CLoReCA** Comités locaux de restitution et de concertation (liés au plan chlordécone)

- Coadep** Collectif des ouvriers agricoles et de leurs ayant droits empoisonnés par les pesticides
- Cnam** Caisse nationale de l'Assurance Maladie
- CNIG** Conseil national de l'information géolocalisée
- Cnil** Commission nationale de l'informatique et des libertés (protection des données personnelles, France)
- CNRS** Centre national de la recherche scientifique
- Cofrac** Comité français d'accréditation
- Copil** Comité de pilotage
- CPSN** Comité de pilotage scientifique national du plan chlordécone
- CV<sub>R</sub>** Coefficient de variation de reproductibilité
- Daaf** Direction de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt
- DCE** Directive-cadre sur l'eau
- Ddass** Direction départementale des Affaires Sanitaires et Sociales
- DDD** Dichlorodiphényldichloroéthane
- DDE** Dichlorodiphényldichloroéthylène
- DDT** Dichlorodiphényltrichloroéthane
- Deal** Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (Guadeloupe/Martinique)
- DEETS** Direction de l'Environnement, de l'Économie, du Travail et des Solidarités (Guadeloupe/Martinique)
- DGAL** Direction générale de l'Alimentation (dépendant du ministère de l'Agriculture)
- DGCCRF** Direction générale de la Concurrence, de la Consommation et de la Répression des Fraudes (organisme national)
- DGOM** Direction générale de l'Outre-mer
- DGS** Direction générale de la santé (dépendant du ministère de la Santé, organisme national)
- DJT** Dose journalière tolérable
- Drass** Direction régionale des Affaires Sanitaires et Sociales
- Drom** Départements et régions d'outre-mer
- DSDS** Direction régionale de la santé et du développement social
- ECD** *Electron Capture Detector* (détecteur à capture d'électrons)
- Efsa** *European Food Safety Authority* (Autorité européenne de Sécurité Sanitaire des Aliments)
- EIL** Essai interlaboratoire
- Eila** Essais interlaboratoires d'aptitudes
- Elisa** *Enzyme-linked immunosorbent assay* (technique immuno-enzymatique sur support solide)
- ENNS** Étude nationale nutrition santé
- EPOC** Unité mixte de recherche Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux (université de Bordeaux)
- EPS** Matrice exopolysaccharidique
- Escal** Enquête sur la santé et les comportements alimentaires en Martinique
- ESI** Ionisation par électrospray
- ETL** *Extraction-Transformation-Loading*
- Fair** Principes pour des données faciles à trouver, accessibles, interopérables, réutilisables
- FIVP** Fonds d'indemnisation des victimes des pesticides
- Fredon** Fédérations régionales de défense contre les organismes nuisibles (Guadeloupe/Martinique)
- GC** Chromatographie en phase gazeuse

**GC-ECD** Chromatographie en phase gazeuse couplée au détecteur à capture d'électrons

**GC-HRMS** Chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse à haute résolution

**GC-MS** Chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse

**GC-MS/MS** Chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse en tandem

**GD4H** *Green Data For Health* (plate-forme de données environnementales et sanitaires)

**Gecco** *Global Emergency Care Collaborative* (ou parfois groupement d'intérêt scientifique pour la gestion des données environnementales)

**Geoss** *Global Earth Observation System of Systems* (système mondial d'observation de la Terre)

**Grephy** Groupe régional phytosanitaire

**Grepp** Groupe régional d'étude des pollutions par les produits phytopharmaceutiques

**GRFI-chlordécone** Groupe de réflexion et de formation interdisciplinaire chlordécone

**GPS** Géo-positionnement par satellite

**HCH** Hexachlorocyclohexane

**HPLC** Chromatographie en phase liquide à haute performance

**IARC** *International agency for research on cancer* (Centre international de recherche sur le cancer)

**Ifremer** Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer

**Igas** Inspection générale des affaires sociales

**Igesr** Inspection générale de l'éducation, du sport et de la recherche

**IGN** Institut national de l'information géographique et forestière

**Inca** Institut national du cancer

**Inma** Institut national de médecine agricole

**Insee** Institut national de la statistique et des études économiques

**Inpes** Institut national de prévention et d'éducation pour la santé

**Inserm** Institut national de la santé et de la recherche médicale

**Inssicca** Projet ANR 2016-2019, *Innovative strategies to secure livestock production in chlordécone contaminated areas* (Stratégies innovantes pour produire des denrées animales saines dans les zones contaminées par la chlordécone)

**INVS** Institut de veille sanitaire

**INRAE** (anciennement **Inra**) Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

**IPG** Institut Pasteur de Guadeloupe

**IRD** Institut de recherche pour le développement (organisme national)

**Ireps** Instance régionale d'éducation et de promotion de la santé (Guadeloupe/Martinique)

**Iris** Îlot regroupé pour l'information statistique

**IRM** Imagerie par résonance magnétique

**ISCR** *In situ chemical reduction* (réduction chimique *in situ*)

**ISO** Organisation internationale de normalisation

**ISPD** Institut de santé publique, d'épidémiologie et de développement

**Jafa** Jardins familiaux (programme de surveillance et d'accompagnement des jardins familiaux aux Antilles)

**Kannari** Étude sur santé, nutrition et exposition à la chlordécone aux Antilles (kannari signifie marmite en créole)

**Laberca** Laboratoire d'étude des résidus et contaminants dans les aliments

**LC** Chromatographie en phase liquide

- LC-MS** Chromatographie en phase liquide couplée à la spectrométrie de masse
- LC-MS/MS** Chromatographie en phase liquide couplée à la spectrométrie de masse en tandem
- LDA** Laboratoire départemental d'analyse
- LDA26** Laboratoire départemental d'analyse de la Drôme (renommé successivement « La Drôme Laboratoire » puis « Terana Drôme »)
- LMP** Limite maximale provisoire
- LMR** Limite maximale de résidus
- LNR** Laboratoire national de référence
- LOD** Limite de détection
- LOQ** Limite de quantification
- LSAI** Laboratoire de sécurité des aliments de l'Anses
- LSM** Laboratoire de spectrométrie de masse de l'université de Liège
- LTA** Laboratoire territorial d'analyses de la Martinique
- LW** *Lipid weight* (poids en lipides)
- MES** Matières en suspension
- MRC** Matériau de référence certifié
- MS** Spectrométrie de masse
- NADH** Nicotinamide adénine dinucléotide réduit
- NIRS** Spectroscopie de réflectance dans le proche infrarouge
- OAD** Outil d'aide à la décision
- Ocils** Organismes de comparaison interlaboratoires
- ODE** Office de l'Eau
- Ohdsi** *Observational Health Data Sciences and Informatics* (consortium pour l'analyse de données de santé)
- OMS** Organisation mondiale de la santé
- Orsag** Observatoire régional de la santé de Guadeloupe
- Opale** Observatoire des pollutions agricoles aux Antilles
- Opecst** Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques
- Paho** *Pan American Health Organization*
- PBPK** *Physiologically based pharmacokinetic* (pharmacocinétique basée sur la physiologie)
- PCB** Polychlorobiphényles
- Pfas** Substances perfluoroalkylées et polyfluoroalkylées
- PF** Poids frais
- PIA** Plan d'investissement d'avenir
- Piegeachlor** Piégeage des composés halogénés lipophiles organiques rémanents
- PMSI** Programme de médicalisation des systèmes d'information
- Pnac** Plan national d'action chlordécone
- PNSE4** Plan national santé environnement 4
- Pocis** *Polar Organic Chemical Integrative Sampler* (échantillonneur intégratif de composés organiques polaires)
- POP** Polluant organique persistant
- PRNM** Parc naturel régional de la Martinique
- PSA** Antigène prostatique spécifique

**PSPC** Plan de surveillance et de contrôle de la chlordécone

**PT** Produit de transformation

**QSV** Question socialement vive

**QuEChERS** *Quick, Easy, Cheap, Effective, Rugged and Safe* (rapide, facile, abordable, efficace, robuste et sécuritaire)

**RCT** Expérience contrôlée aléatoire

**RDF** *Resource description framework* (cadre de description de ressources)

**RGA** Recensement général agricole (national)

**RGPD** Règlement général sur la protection des données (Union européenne)

**RSD** *Relative standard deviation* (écart type relatif)

**Safer** Sociétés d'aménagement foncier et d'établissement rural

**Sandre** Service d'administration nationale des données et référentiels sur l'eau

**SAU** Surface agricole utile

**SCL** Service commun des laboratoires

**SESD** Santé environnement sans dérogation

**SIC** Sciences de l'information et de la communication

**SIG** Système d'information géographique

**SNDS** Système national des données de santé

**Sniiram** Système national d'information inter-régimes de l'Assurance Maladie

**SPE** Extraction sur phase solide

**SPARQL** *Protocol and RDF query language* (langage de requête et protocole pour RDF)

**SPME** *Solid Phase Micro-Extraction* (micro-extraction par phase solide)

**SQL** *Structured query language* (langage de requête structuré)

**SS** Sol sec

**UAG** Université des Antilles et de la Guyane

**UE** Union européenne

**UGTG** Union générale des travailleurs de Guadeloupe

**Unesco** Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture

**Unep** *United Nations environment programme* (programme des Nations Unies pour l'Environnement)

**Urafpa** Unité de recherche animale et fonctionnalités des produits animaux (université de Lorraine), renommée au 1<sup>er</sup> janvier 2025 : Laboratoire animal et agroécosystèmes (L2A)

**URI** *Uniform resource identifier* (identifiant de ressource uniforme)

**US EPA** *United States Environmental Protection Agency* (Agence américaine pour la protection de l'environnement)

**VTR** Valeur toxicologique de référence

**VTRc** Valeur toxicologique de référence chronique

## Liste des auteurs et leurs affiliations

---

**Laurence Amalric**, BRGM, Orléans  
**Sara Angeli Aguiton**, CNRS, Pointe-à-Pitre  
**Valérie Angeon**, INRAE, Avignon  
**Axelle Beniey**, Promotion Santé Guadeloupe, Saint-Martin, Saint-Barthélémy, Basse-Terre  
**Pierre Benoit**, INRAE, Palaiseau  
**Marthe Berthide-Limier**, rectorat de la Martinique, Schoelcher  
**Bernard Bhakkan-Mambir**, CHU Guadeloupe, Les Abymes  
**Vincent Bonnal**, Cirad, Montpellier  
**Audrey Bruneau**, Ifremer, La Tremblade  
**Philippe Cattan**, Cirad, Montpellier  
**Iris Cervenka**, Inca, Boulogne-Billancourt  
**Daniel Césarus**, Promotion Santé Guadeloupe, Saint-Martin, Saint-Barthélémy, Basse-Terre  
**Jean-Baptiste Charlier**, BRGM, Montpellier  
**Mathieu Coulis**, Cirad, Le Lamentin, Martinique  
**Xavier Coumoul**, université Paris Cité, Paris  
**Justin Daniel**, université des Antilles, Schoelcher  
**Pascal Degenne**, Cirad, Montpellier  
**Matthieu Delannoy**, université de Lorraine, Nancy  
**Jacqueline Deloumeaux**, CHU Guadeloupe, Pointe-à-Pitre  
**Jean-Francois Desprats**, BRGM, Montpellier  
**Charlotte R. Dromard**, université des Antilles, Pointe-à-Pitre  
**Victor Dufleit**, Cirad, Capesterre-Belle-Eau  
**Séverine Ely-Marius**, rectorat de la Martinique, Schoelcher  
**Yannick Exilie**, rectorat de la Martinique, Schoelcher  
**Malcom Ferdinand**, CNRS, Paris  
**Jérôme Foucaud**, Inca, Boulogne Billancourt  
**Aurore Fourcot**, Cirad, Le Lamentin, Martinique  
**Agnès Fournier**, université de Lorraine, Nancy  
**Jeanne Garric**, INRAE, Lyon  
**Sarra Gaspard**, université des Antilles, Pointe-à-Pitre  
**Olivier Grünberger**, IRD, Montpellier  
**Philippe Hunel**, université des Antilles, Schoelcher  
**Magalie Jannoyer**, Cirad, Capesterre-Belle-Eau  
**Clarisse Joachim**, CHU Martinique, Schoelcher  
**Patrick Lachassagne**, IRD, Montpellier  
**Jérémy Lavarenne**, Cirad, Le Lamentin, Martinique  
**Lucie Lecat**, Promotion Santé Guadeloupe, Saint-Martin, Saint-Barthélémy, Basse-Terre  
**Rubis Le Coq**, CNRS, Fort de France/Schoelcher

**Raoul Legba**, Promotion Santé Guadeloupe, Saint-Martin, Saint-Barthélémy, Basse-Terre  
**Soazig Lemoine**, université des Antilles, Pointe-à-Pitre  
**Danièle Luce**, INSERM, Pointe-à-Pitre  
**Jonathan Macni**, Registre des Cancers Martinique, Fort-de-France  
**Dominique Monti**, université des Antilles, Pointe-à-Pitre  
**Christophe Mouvet**, BRGM, Orléans  
**Luc Multigner**, INSERM, Rennes  
**Lai-Ting Pak**, Cirad, Le Lamentin, Martinique  
**Célia Perito-Cincinnatus**, rectorat de la Martinique, Schoelcher  
**Guillaume Pompougnac**, Promotion Santé Guadeloupe, Saint-Martin, Saint-Barthélémy, Basse-Terre  
**Aurélie Pourrez**, université de Lorraine, Nancy  
**Guido Rychen**, université de Lorraine, Nancy  
**Pierre-Loïc Saaidi**, Génoscope-Institut François Jacob-CEA-CNRS-université Évry-université Paris-Saclay, Évry  
**Maïlie Saint-Hilaire**, Institut Pasteur Guadeloupe, Les Abymes  
**Anatja Samouëlian**, INRAE, Montpellier  
**Michel Samson**, INSERM, Rennes  
**Anne-Lise Taïlamé**, BRGM, Fort-de-France  
**Jean-Pierre Thomé**, université de Liège, Liège, Belgique  
**Josselin Thuilliez**, CNRS, Rennes  
**Annelise Tran**, Cirad, Montpellier  
**Jacqueline Véronique-Baudin**, CHU Martinique, Fort de France  
**Jean-Luc Volatier**, ANSES, Maison Alfort  
**Marc Voltz**, INRAE, Montpellier

## Remerciements

---

Tous les contributeurs à cet ouvrage sont ici chaleureusement remerciés. Les éditeurs remercient également la confiance accordée ainsi que le soutien financier du Plan national d'action Chlordécone IV, sans lesquels la concrétisation de cet ouvrage n'aurait pas été possible.

Édition : Alice Durand  
Mise en pages : Hélène Bonnet Studio 9



Utilisé massivement entre 1972 et 1993 dans les bananeraies antillaises, le chlordécone, insecticide organochloré aujourd'hui interdit, persiste dans les sols, les écosystèmes et la chaîne alimentaire. Cet ouvrage collectif pluridisciplinaire dresse un état des lieux des connaissances scientifiques les plus récentes. Il analyse les impacts, les enjeux, ainsi que les réponses publiques mises en place pour limiter l'exposition et gérer les risques de cette pollution qui affecte durablement la santé des populations et de l'environnement. Il tire des leçons pour l'avenir, avec l'objectif de promouvoir une approche « Une seule santé » (*One Health*) pour répondre aux défis posés par cette crise sanitaire et environnementale sans précédent.

L'ouvrage s'adresse aux scientifiques, enseignants, décideurs, professionnels ou membres d'associations désirant acquérir une connaissance approfondie des différentes voies d'exposition à cette contamination généralisée, et intéressés par la recherche de solutions visant à protéger à long terme la santé des populations et des écosystèmes aux Antilles.

Pédologue et chercheur INRAE au sein de l'UMR Écologie fonctionnelle et écotoxicologie des agroécosystèmes (EcoSys), **Pierre Benoit** étudie les couplages des processus bio-physico-chimiques impliqués dans le devenir et le transfert de contaminants organiques dans les sols. Il est membre du Comité de pilotage scientifique national (CPSN) du plan national Chlordécone depuis 2020 après avoir coordonné le groupe d'orientation et de suivi scientifique des plans II et III depuis 2011.

Philosophe politique et ingénieur en environnement, **Malcom Ferdinand** est chargé de recherche au CNRS. Ses travaux portent sur les enjeux d'une préservation écologique du monde au sortir des colonisations et esclavages modernes. Depuis 2011, il œuvre à une analyse interdisciplinaire du chlordécone aux Antilles. Il a été membre du CPSN jusqu'en 2025 et copilote plusieurs programmes de recherche sur le sujet.

Chercheuse en écotoxicologie, **Jeanne Garric** a été directrice adjointe scientifique du département EAU à Irstea (aujourd'hui INRAE) jusqu'en 2019. Directrice de recherche émérite et chargée de mission santé-environnement au ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, elle a mis en œuvre la stratégie recherche du plan Chlordécone IV de 2020 à 2023 avec l'installation du CPSN et le suivi de ses travaux.

Agronome et chercheuse au Cirad, **Magalie Jannoyer** travaille depuis 2005 sur la problématique de la pollution au chlordécone avec des contributions sur les outils de caractérisation et de gestion de la pollution à différentes échelles, dans le cadre des plans nationaux d'actions Chlordécone. Afin d'actualiser les priorités et les dispositifs de recherche, elle anime des communautés scientifiques en lien avec les acteurs des territoires antillais (CLoReCA) et est membre du CPSN.

Couverture : dessin de Lucile Wargniez.

Coordonné par le CPSN  
dans le cadre de  
la Stratégie Chlordécone.



éditions  
**Quæ**

Éditions Cirad, Ifremer, INRAE  
[www.quae.com](http://www.quae.com)

 **cirad**  
**INRAE**

30€

ISBN : 978-2-7592-4146-0



Réf. : 03028