

différentes. Elle donne aussi naissance à une sorte d'équation de Wheeler-DeWitt. Avec une différence importante par rapport à la gravitation quantique canonique: l'espace-temps y apparaît discrétisé, et non continu. Quant à la théorie des cordes, où les entités élémentaires ne sont pas des particules ponctuelles mais des cordes unidimensionnelles, elle ne découle pas de la quantification de la théorie d'Einstein, mais plutôt de la tentative d'unifier toutes les interactions fondamentales connues.

Il n'existe pas à ce jour d'indices expérimentaux ou observationnels permettant de départager ces théories. De plus, il n'est pas facile de déterminer ce que des théories comme la gravitation quantique canonique ou la gravitation quantique à boucles prévoient. Tout d'abord, elles héritent du problème de la mesure déjà posé en mécanique quantique non relativiste, ce qui se révèle particulièrement gênant quand on cherche à appliquer la gravitation quantique à la cosmologie. Dans ce cas, en effet, le système d'intérêt est l'Univers entier, et il n'existe alors pas d'observateurs extérieurs effectuant des mesures. De plus, il n'y a qu'un seul Univers, et non un ensemble d'entre eux pour lequel les probabilités des différents résultats pourraient être une notion pertinente.

DES PRÉDICTIONS DIFFÉRENTES EN COSMOLOGIE

Et au problème de la mesure s'ajoute le problème du temps. D'après l'équation de Wheeler-DeWitt, la fonction d'onde de l'Univers n'évolue pas dans le temps. Dès lors, comment l'évolution cosmologique constatée découle-t-elle de cette équation? Comment dire, à partir de cette équation, si l'Univers est en expansion ou en contraction?

Depuis les années 1990, Jeroen Vink, aux Pays-Bas, Nelson Pinto-Neto, au Brésil, et plusieurs autres chercheurs ont développé et étudié une version bohmienne de la gravitation quantique canonique. Et j'ai moi-même élaboré vers 2017 une version bohmienne de la gravitation quantique à boucles. Dans ces versions, on a aussi une géométrie de l'espace-temps, mais la déformation et l'évolution de l'espace-temps sont déterminées par la fonction d'onde. Et cela d'une telle façon que même si cette fonction d'onde est statique, l'espace-temps se déforme au cours du temps.

Généralement, la dynamique bohmienne de l'espace-temps diffère de celle prescrite par la relativité générale. Il est apparu par exemple que, contrairement à ce qui se passe dans cette dernière, il est possible d'éviter les singularités d'espace-temps comme celles du début du Big Bang ou de la fin du Big Crunch (l'inverse du Big Bang). Par ailleurs, plusieurs chercheurs

ont envisagé la possibilité que l'«énergie sombre», une énergie de nature inconnue qui expliquerait l'accélération de l'expansion de l'Univers, n'existe pas et que l'expansion accélérée résulte simplement de la dynamique quantique du cosmos. Dans le développement le plus récent de ce programme, Thibaut Demaerel, Christian Maes et moi, à la KU Leuven, avons montré que l'on peut obtenir, sans introduire d'énergie sombre, une telle expansion de l'Univers dans un modèle simplifié de gravitation quantique canonique intégrant une dynamique bohmienne.

Il s'agit là de pistes intéressantes et prometteuses, tant pour la cosmologie que pour la théorie quantique. Alors que la formulation quantique habituelle ne fournit pas aux cosmologistes d'indications claires, une version bohmienne de la gravitation quantique conduira peut-être à de nouvelles prédictions, par exemple sur les fluctuations de température du fond diffus cosmologique, ce rayonnement micro-onde qui baigne l'Univers et qui est un vestige de ses débuts.

Confrontées aux observations, ces prédictions pourraient nous renseigner à la fois sur l'évolution de l'Univers et sur la validité de la théorie quantique utilisée. Ce qui serait d'un grand intérêt puisque, dans les autres domaines, les prédictions de la théorie bohmienne sont les mêmes que celles de la théorie quantique habituelle. ■

NON-LOCALITÉ

Le physicien nord-irlandais John Bell, qui s'intéressait beaucoup aux fondements de la mécanique quantique, était un fervent partisan de la théorie dBB. Mais le fait que la théorie soit manifestement non locale le gênait. Autrement dit, le mouvement d'une particule peut dépendre du mouvement des autres particules, quelle que soit la distance entre elles. Or cela semblait être une caractéristique indésirable, car on pensait généralement que la nature devait être locale, les interactions ne pouvant pas se propager plus rapidement que la lumière.

Bell a tenté, sans succès, de modifier la théorie pour la rendre locale. Qui plus est, il a pu montrer qu'on ne pouvait pas le faire. Il a même prouvé, en 1964, que si certaines prédictions de la mécanique quantique usuelle sont justes, alors il est impossible de conserver la localité. Dans la nature, les systèmes distants peuvent présenter des corrélations que toute théorie locale est incapable d'expliquer.

Malheureusement, et à la frustration de Bell, ce résultat est souvent mal compris. Par exemple, on trouve facilement des affirmations selon lesquelles, d'après les théorèmes de Bell, une description plus riche (en introduisant des variables «cachées») que celle de la mécanique quantique ordinaire impliquerait la non-localité. Ces affirmations sont fausses. La mécanique quantique orthodoxe est non locale, tout comme l'est la mécanique bohmienne, et les travaux de Bell montrent en fait que toute théorie visant à décrire avec succès la nature est condamnée à être non locale.

W. S.

BIBLIOGRAPHIE

X. Oriols et J. Mompert (éd.), **Applied Bohmian Mechanics**, Jenny Stanford Publishing (2^e édition), 2019.

F. Laloë, **Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?**, CNRS Éditions/EDP Sciences (2^e édition), 2017.

T. Norsen, **Foundations of Quantum Mechanics : An Exploration of the Physical Meaning of Quantum Theory**, Springer, 2017.

J. Bricmont, **Quantum Sens and Nonsense**, Springer, 2017, traduction française à paraître chez Odile Jacob, 2020.

W. Struyve, **Pilot-wave approaches to quantum field theory**, *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 306, article 012047, 2011.

D. Dürr et S. Teufel, **Bohmian Mechanics**, Springer, 2009.

L'ESSENTIEL

> La chlordécone a été utilisée comme insecticide dans les bananeraies de la Guadeloupe et de la Martinique jusqu'en 1993. Elle a notamment contaminé des sols et la population elle-même.

> Cette molécule est reconnue pour sa toxicité depuis les années 1970. Sa stabilité laissait à penser qu'elle persisterait dans les sols antillais pendant des siècles.

> Des études récentes montrent que la dégradation de la chlordécone, probablement induite par des bactéries, se produit déjà aux Antilles.

> Cette dégradation engendre une variété de produits dont la toxicité et le devenir dans l'environnement restent à étudier.

LES AUTEURS



ORIANE DELLA-NEGRA ET PIERRE-LOÏC SAAÏDI
doctorante et maître de conférences
à l'UMR Génomique métabolique
(CNRS, CEA/IBFJ/Genoscope,
université d'Évry-Val-d'Essonne
– université Paris-Saclay)

La chlordécone, un polluant en transformation

On considérait comme indestructible la chlordécone, un insecticide toxique utilisé pendant plus de vingt ans dans les bananeraies des Antilles françaises. On vient de découvrir qu'en fait une dégradation naturelle est à l'œuvre. Reste à étudier les produits de transformation mis en évidence.

Le 2 décembre 2019, la commission d'enquête parlementaire a rendu public son rapport sur l'impact économique, sanitaire et environnemental de l'utilisation de la chlordécone aux Antilles françaises. Ses conclusions aboutissent à la mise en cause de l'État français dans ce « désastre sanitaire et environnemental ». Interdite aux États-Unis dès 1978, la chlordécone, un pesticide organochloré, a été utilisée dans les bananeraies de Guadeloupe et de Martinique jusqu'en 1993.

Ce perturbateur endocrinien persiste aux Antilles et contamine toute la chaîne alimentaire, plus de vingt-cinq ans après son interdiction. L'exposition chronique de la population antillaise à la chlordécone a été reliée à une surincidence de plusieurs pathologies (cancer de la prostate, prématurité et troubles de développement cognitif et moteur chez les nourrissons). La commission souligne d'ailleurs une prise de conscience trop tardive de l'État et la mise en place d'actions publiques trop lentes qui ne répondent pas aux problématiques de cette crise,

où s'invitent des aspects socioéconomiques et politiques liés à l'insularité de ces territoires et à leur passé colonial. L'enjeu est aujourd'hui de trouver des pistes pour faire face à cette pollution persistante. Or nos travaux ont récemment montré qu'une dégradation naturelle de la chlordécone est à l'œuvre aux Antilles, processus qu'il est intéressant d'explorer et qui apporte une note d'espoir.

L'histoire de la chlordécone démarre en 1958, quand la société Allied Chemical lance sur le marché américain le Kepone, constitué à 94,5% de chlordécone. En 1972, après plusieurs refus, l'usage d'une formulation commerciale contenant 5% de chlordécone est finalement accordé de manière provisoire aux Antilles pour lutter contre le charançon du bananier.

Or en 1975, l'usine de Hopewell, aux États-Unis, où le Kepone est produit, subit une grave pollution, un des plus importants et coûteux désastres environnementaux pour l'époque. Des troubles neurologiques sont constatés parmi les ouvriers de l'usine, dont les analyses de sang ont révélé un taux élevé de chlordécone. Des prélèvements ont alors montré une contamination >

Pour lutter contre les charançons, les exploitants des bananeraies de Guadeloupe et de la Martinique ont utilisé jusqu'en 1993 de la chlordécone, un pesticide persistant et reconnu comme toxique, cancérigène probable d'après le Circ, et dangereux pour l'environnement.



> généralisée du site et même du fleuve voisin sur plus d'une centaine de kilomètres en aval. L'usine est fermée la même année. À la suite de plusieurs études confirmant la persistance et la toxicité de la molécule, l'Agence américaine pour la protection de l'environnement interdit en 1978 la production, la vente et l'utilisation du Kepone aux États-Unis, ce qui entraîne l'arrêt complet de la commercialisation au niveau mondial.

Peu après, au début des années 1980, alors qu'elles arrivaient à épuisement de leurs stocks de Kepone, les Antilles ont été confrontées à deux cyclones qui ont entraîné une forte pression parasitaire. Les planteurs de bananes se sont alors retrouvés dans une impasse technique qui a conduit les autorités françaises à accorder en 1981 une autorisation de commercialisation du Curlone, un nouvel insecticide contenant 5% de chlordécone, produit au Brésil. Plusieurs dérogations successives ont prorogé son usage jusqu'en 1993. Au total, on estime que 300 tonnes de chlordécone ont été épandues à la main sur les sols antillais, ce qui aurait contaminé un quart de la surface agricole utile (voir les cartes pages 43).

UN POLLUANT PERSISTANT

En 2009, la chlordécone a été ajoutée à la liste des polluants organiques persistants de la convention de Stockholm. De fait, on la retrouve encore dans de nombreux sols agricoles antillais ayant servi à la culture bananière. Les concentrations sont variables au sein d'une même parcelle et atteignent localement jusqu'à 20 milligrammes par kilogramme de sol. Malgré sa faible solubilité dans l'eau, la chlordécone est aussi présente dans les systèmes hydriques de la Guadeloupe et de la Martinique, notamment certaines nappes d'eau souterraines exploitées pour l'approvisionnement en eau potable de la population. Les concentrations retrouvées sont de l'ordre de 1 microgramme par litre dans les rivières et atteignent jusqu'à 50 microgrammes par litre dans les eaux souterraines. La contamination des systèmes hydriques déplace lentement une partie de la pollution vers le littoral.

Une telle pollution n'est pas sans conséquence pour la faune et la flore exposées. Un phénomène de bioconcentration opère tout au long de la chaîne alimentaire, avec l'homme pour ultime maillon. Dans le cas des plantes, la contamination se fait par contact direct et par absorption au niveau des racines. La faible solubilité dans l'eau et la forte hydrophobicité de la chlordécone conduisent à un transfert limité *via* les flux de transpiration vers les autres compartiments des plantes. On observe ainsi un gradient de contamination décroissant, des racines aux parties aériennes. Les légumes-racines se développant sur les sols pollués ont tendance à

accumuler plus de chlordécone (avec des concentrations qui dépassent 30 microgrammes par kilogramme) que les cucurbitacées poussant au ras du sol (entre 1 et 30 microgrammes par kilogramme), alors que les cultures fruitières et maraîchères sont relativement épargnées (avec des concentrations inférieures à 1 microgramme par kilogramme).

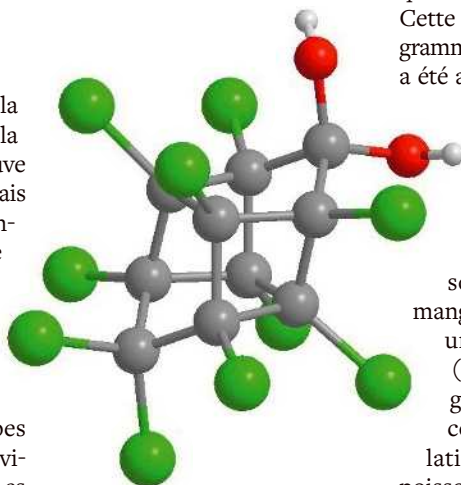
La contamination touche aussi les animaux terrestres. L'équipe de Cyril Feidt, de l'université de Lorraine et de l'Inra (Institut national de la recherche agronomique), a montré que les animaux d'élevage étaient exposés *via* le contact avec le sol, l'alimentation et les eaux d'abreuvement contaminés. Outre la viande, le lait et surtout les œufs présentent parfois des taux importants de chlordécone. Le confinement des animaux (dans des zones non polluées ou des élevages hors-sol) durant plusieurs semaines avec de l'alimentation saine tend à faire chuter le taux de chlordécone et à les rendre ainsi de nouveau propres à la consommation. Le gouvernement français a mis en place des « limites maximales de résidus » à ne pas dépasser pour que le produit puisse être mis sur le marché. Cette limite est de 20 microgrammes par kilogramme pour les denrées végétales. En 2019, elle a été abaissée à cette même limite pour toutes

les denrées animales. Pour l'eau de consommation, les normes de potabilité s'appliquent, la chlordécone étant incluse au titre de pesticide.

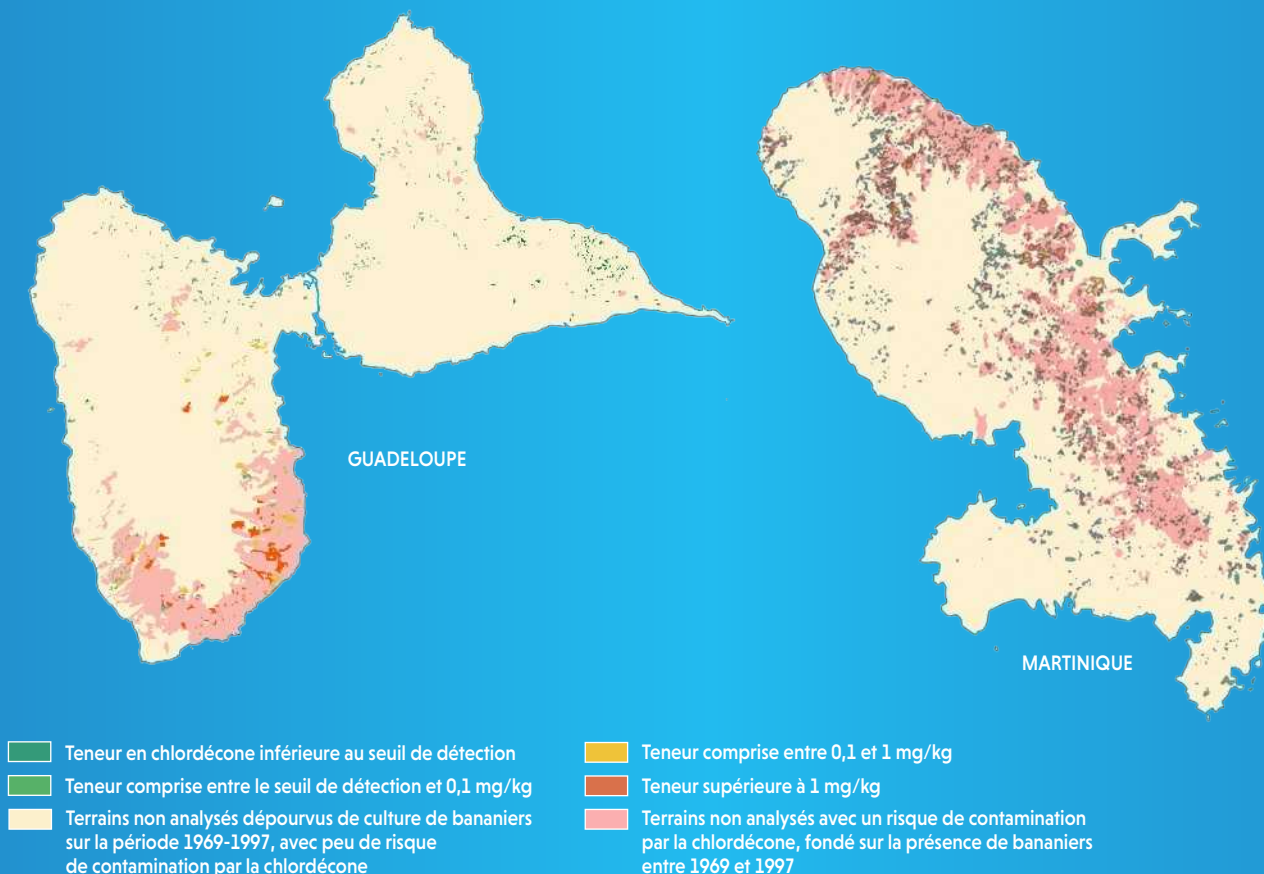
Cette pollution ne s'arrête pas là, puisque la faune et la flore aquatiques sont aussi touchées. Dans les zones de mangrove, les organismes marins présentent une contamination forte et homogène (pouvant être supérieure à 200 microgrammes par kilogramme). Ailleurs, la contamination augmente par bioaccumulation en suivant le réseau trophique, les poissons piscivores présentant les taux les plus élevés (entre 100 et 200 microgrammes par kilogramme).

UNE POPULATION TRÈS TOUCHÉE

Face à l'ampleur de la contamination environnementale, qu'en est-il de la population antillaise? De nombreuses mesures de protection ont été prises au cours des quinze dernières années: traitement additionnel des eaux de consommation, contrôle des filières d'alimentation locales, arrêts d'interdiction de pêche, analyse des sols des particuliers et recommandations alimentaires, filtres à charbon actif pour traiter l'eau potable, etc. Malgré cela, la dernière étude publiée (étude Kannari de l'Anses et d'autres organismes, réalisée entre 2014 et 2016) indique que plus de 90% des Antillais présentent des quantités détectables de chlordécone dans le sang. L'étendue de la



La chlordécone tire sa très grande stabilité de sa structure « bishomocubane »: elle forme une cage comprenant 10 atomes de carbone. Réputée peu dégradable, elle est aussi thermiquement très stable puisqu'elle ne subit aucune décomposition avant d'atteindre son point de sublimation à 350 °C. La chloration de la cage bishomocubane (avec 10 atomes de chlore) lui confère des propriétés hydrophobes et explique sa faible solubilité dans l'eau (de 1 à 3 milligrammes par litre à 20 °C).



Les zones les plus contaminées de la Guadeloupe et de la Martinique sont souvent liées aux bananeraies où le produit a été massivement utilisé. Des prélèvements ont permis d'établir une carte des zones touchées.

contamination dans la population est d'autant plus inquiétante que la molécule possède une toxicité liée à une exposition chronique.

Les premières études des années 1970 jusqu'à celles publiées récemment montrent un potentiel cancérigène chez des modèles animaux, ce qui a conduit le Circ (Centre international de recherche sur le cancer) à classer la chlordécone comme cancérigène probable en 1979. Au cours de la dernière décennie, plusieurs études épidémiologiques ont établi un lien entre l'exposition chronique à la chlordécone aux Antilles et une augmentation du risque de survenue et de récurrence du cancer de la prostate. Le mécanisme d'action reste à préciser. Cependant, grâce à plusieurs résultats *in vitro* et *in vivo* chez la souris, Samuel Legeay et ses collègues de l'université d'Angers ont montré que la chlordécone présenterait des effets proangiogéniques : la molécule stimulerait la vascularisation des cellules tumorales, dont le développement serait ainsi favorisé.

L'exposition prénatale constatée aux Antilles, quant à elle, conduit à un risque accru de prématurité. Les conséquences vont même au-delà puisque les nouveau-nés exposés *in utero* sont aussi statistiquement plus sujets à des retards de développement, à la fois psychomoteur et staturo-pondéral. Dans les suivis à 18 mois, ces troubles sont surtout marqués chez les enfants de sexe masculin.

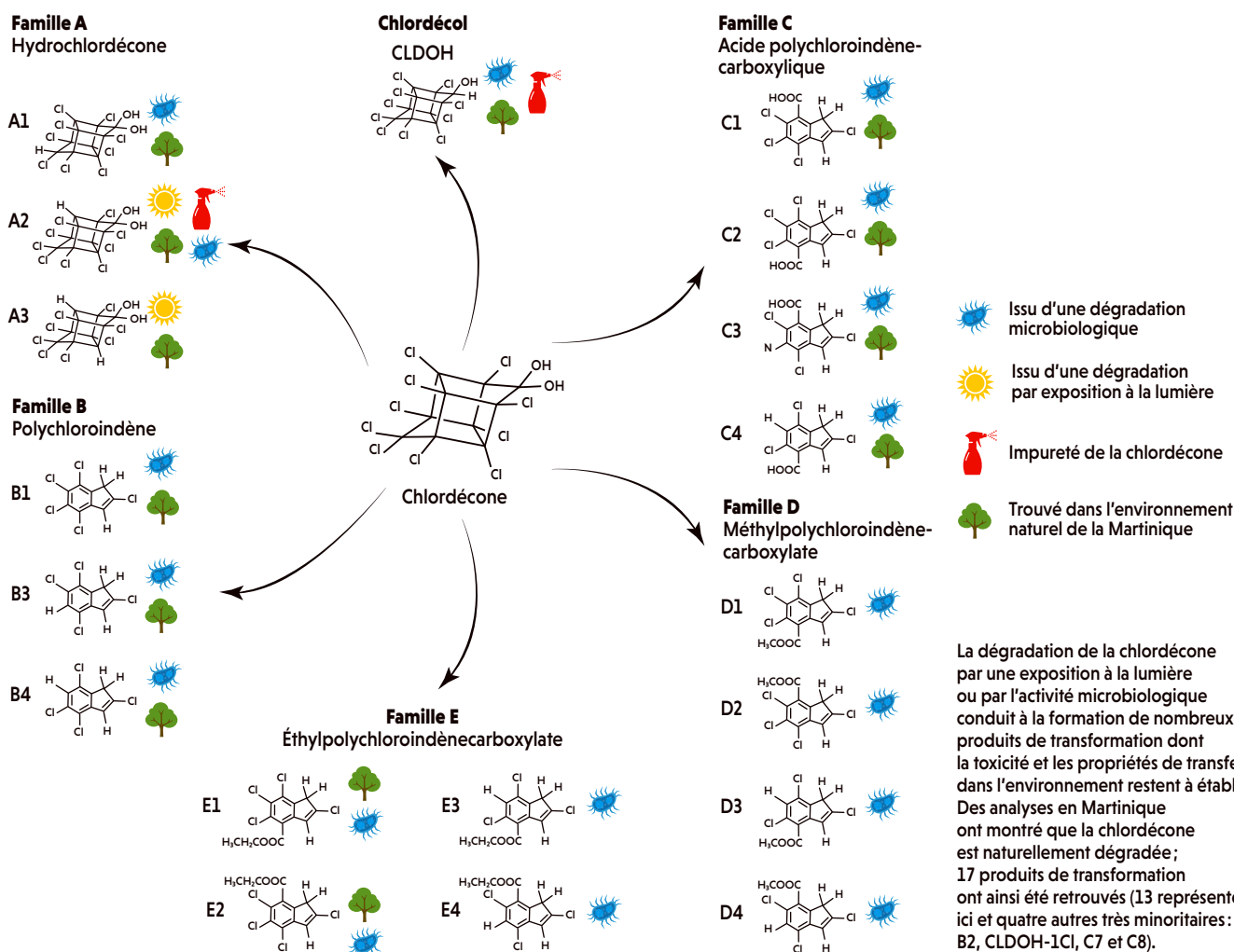
Dès 1979, Bruce Hammond et ses collègues, de l'université de l'Illinois, avaient mis en évidence le caractère de perturbateur endocrinien

de la chlordécone, qui imite notamment l'activité des œstrogènes. Récemment, l'équipe de Luc Multigner, de l'Inserm et de l'université de Rennes, en faisant une synthèse des travaux publiés, a suggéré que ce rôle de perturbateur endocrinien explique une grande part des pathologies liées à la chlordécone.

Il semble donc primordial d'éliminer la chlordécone de l'environnement. Mais plusieurs facteurs contribuent à sa persistance dans les sols antillais : la molécule présente une très faible biodégradabilité intrinsèque ; en raison de sa grande hydrophobicité, elle s'adsorbe bien à la surface des matières organiques, très présentes dans les sols tropicaux ; enfin, certains sols volcaniques antillais ont une structure minérale fractale qui emprisonne la chlordécone dans leurs micropores, ce qui réduit les processus de transfert ou de dégradation de la molécule.

UNE MOLÉCULE PRÉSUMÉE INDESTRUCTIBLE

Grâce à sa structure en forme de cage sur laquelle sont fixés dix atomes de chlore, la chlordécone est une molécule très stable et difficilement dégradable (voir l'illustration page 42), ce qui lui vaut le surnom de « caillou quasi indestructible ». Néanmoins, dès les années 1970, plusieurs équipes américaines, dont celle de Steve Orndorff et Rita Colwell, de l'université du Maryland, ou encore celle de Susan George et Larry Claxton, de l'Agence américaine pour la protection de l'environnement, ont étudié sa ➤



> biodégradabilité (en présence de bactéries). Elles ont suggéré qu'il était possible de transformer la chlordécone en 8-monohydrochlordécone (A2) ou en 2,8-dihydrochlordécone (A3), par perte d'un ou deux atomes de chlore, et en chlordécol (CLD-OH) par perte d'un atome d'oxygène.

Cependant, A2 et CLD-OH sont aussi connus pour être des impuretés présentes dans les formulations commerciales de la chlordécone (Kepone et Curlone). Et les hydrochlordécones A2 et A3 sont aussi produites par photolyse de la chlordécone à l'aide d'un rayonnement ultraviolet ou même après une longue exposition au rayonnement solaire. Comme les méthodes analytiques utilisées dans les années 1970 étaient moins sensibles et moins efficaces qu'aujourd'hui, il est difficile de juger de la pertinence de ces résultats précurseurs.

En 1996, Peter Jablonski, de l'université de l'Illinois du Nord, aux États-Unis, et ses collègues ont observé qu'une archée, *Methanosarcina thermophila* (un microorganisme cellulaire procaryote qui diffère des bactéries), semblait capable de dégrader la chlordécone de façon très significative avec obtention de plusieurs produits de

transformation. Malheureusement, ces résultats n'ont pas pu être confirmés par la suite.

D'un point de vue chimique, il est possible d'attaquer la chlordécone moyennant des conditions relativement dures. Les réactions photochimiques citées plus haut engendrent la perte d'un à deux atomes de chlore, en formant les hydrochlordécones A2 et A3. Un traitement combinant de l'hydrazine, du lithium et du tert-butanol permet une déchloration complète conduisant à la formation du bishomocubane non fonctionnalisé. L'utilisation du tétrahydroborate de sodium mène à la molécule de chlordécol CLD-OH, tandis que le fer génère des hydrochlordécones ayant perdu entre un et sept atomes de chlore. L'utilisation de la vitamine B₁₂ couplée à un réducteur en conditions basiques entraîne la formation d'hydrochlordécones et de polychloroindènes. Pour obtenir une destruction complète, on doit la chauffer à environ 1000 °C. Mais les conditions d'application de toutes ces approches les rendent impraticables pour décontaminer un milieu naturel.

Face à la persistance de la chlordécone aux Antilles, Yves-Marie Cabidoche et ses collègues, de l'Inra et du Cirad (Centre de coopération internationale en recherche agronomique