

pour le développement), ont publié en 2009 un modèle prédictif de contamination. À partir des registres d'utilisation de la chlordécone et des premières cartes de contamination, les chercheurs ont estimé que l'élimination de la chlordécone des sols se faisait uniquement par des phénomènes de transfert (ruissellement et surtout infiltration dans le sol). À l'époque, en l'absence de dégradation naturelle avérée, l'équipe a conclu à des durées de contamination allant de plusieurs décennies à sept siècles selon la nature des sols et du niveau de contamination initial.

Devant ce bilan, deux grandes questions se posent : comment mieux protéger la population locale ? N'y a-t-il réellement aucune stratégie de remédiation applicable au cas de la chlordécone ? Alors qu'une partie des chercheurs, aidés des autorités et d'associations, répondent à la première interrogation *via* des actions aux Antilles (études épidémiologiques, contrôle des aliments, campagnes d'information, analyse des sols des particuliers, incitation au « zéro chlordécone », etc.), d'autres scientifiques ciblent la pollution des sols, source primaire de la contamination.

Nos expériences montrent qu'une dégradation naturelle de la chlordécone est déjà en cours aux Antilles

Dans le cas d'une contamination industrielle, la dépollution d'une friche peut être réalisée de différentes façons (traitement chimique *in situ*, excavation du sol contaminé et traitement *ex situ*, phytoextraction...), mais le site, même décontaminé, pourra rarement servir pour un usage agricole, soit à cause de la détérioration du sol due aux traitements, soit du fait des normes drastiques à atteindre qui n'autorisent aucune trace de produits toxiques.

Le cas des Antilles est un défi colossal : au-delà de la superficie à traiter (de l'ordre de 15 000 hectares) et des difficultés techniques à surmonter (les bananeraies ayant été souvent

plantées sur des terrains en pente, peu propices au travail agricole classique), la stratégie de remédiation choisie doit rendre ces terres pleinement cultivables. En effet, on considère qu'un quart environ des surfaces agricoles utiles aux Antilles sont aujourd'hui contaminées par la chlordécone ; s'en priver, pour ces territoires insulaires, serait tout autant catastrophique. Aujourd'hui, ces terres sont toujours exploitées pour les cultures de la banane et de la canne à sucre, cultures qui ne présentent *a priori* aucun risque de contamination (car le polluant se propage peu dans les plantes et reste principalement dans les racines).

En 2013, le BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières) a réalisé un essai de traitement chimique. Les résultats, assez positifs pour certains types de sols, sont à contrebalancer avec le coût des réactifs, leur difficile application, les conséquences agronomiques pour le sol et l'évaluation du risque lié aux produits de transformation obtenus. Les équipes de Magalie Lesueur Jannoyer, du Cirad, de François Laurent, de l'Inra, et leurs collègues ont mené diverses études de transfert de la chlordécone du sol vers les plantes, à la fois pour repérer les cultures les plus à risque d'être contaminées mais aussi pour rechercher des espèces indigènes capables d'extraire le pesticide avec efficacité.

À ce jour, aucune plante ne présente les caractéristiques requises pour qu'un protocole de phytoextraction soit envisageable. En revanche, Thierry Woignier, de l'Institut méditerranéen de biodiversité et d'écologie, et ses collègues ont entamé des études prometteuses sur la séquestration de la chlordécone dans le sol : l'amendement de compost réduit temporairement le transfert sol-plantes et l'ajout de certains types de charbon (charbon activé et biochar) diminue beaucoup la contamination des animaux exposés. Cette stratégie reste malgré tout une solution de repli, car elle maintient une épée de Damoclès sur la population dès lors que la chlordécone est toujours présente dans le sol.

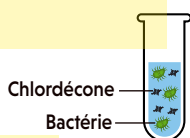
UN PROJET AMBITIEUX

En 2009, le Genoscope a lancé un pari scientifique un peu fou, porté par Jean Weissenbach et Denis Le Paslier : essayer de biodégrader intégralement la chlordécone pour obtenir des composés inorganiques non toxiques (chlorures, carbonates ou dioxyde de carbone) ou des nutriments pour les organismes vivants (source de carbone par exemple). Nous avons d'abord émis l'hypothèse que le nombre élevé d'atomes de chlore de la molécule était à l'origine de sa très faible réactivité. Nous avons donc cherché à favoriser des processus microbiologiques de déchloration. Le plus souvent, ceux-ci se produisent en anaérobiose et conduisent au remplacement d'un atome de chlore par un atome d'hydrogène ; on parle alors de déchloration réductrice. Il faut ➤

ÉLUCIDER LA STRUCTURE DES PRODUITS DE TRANSFORMATION

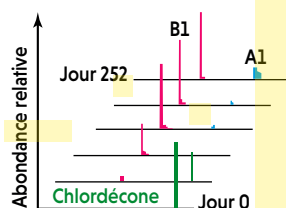
1 DÉGRADATION MICROBIOLOGIQUE

Mise en culture
La chlordécone est mise en présence de bactéries qui induisent sa dégradation.

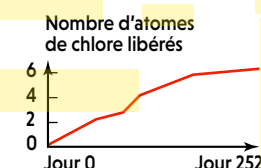


2 DÉGRADATION CHIMIQUE

Synthèse chimique ciblée
Les différents produits de transformation sont obtenus à l'aide de différents couples catalyseur-réducteur

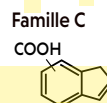
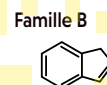


Chromatographie en phase liquide ou gazeuse et spectrométrie de masse
Par cette analyse, on sépare les différents composés, on obtient la formule brute de chaque produit de transformation et des indices sur la présence de certaines fonctions (acide carboxylique -COOH)

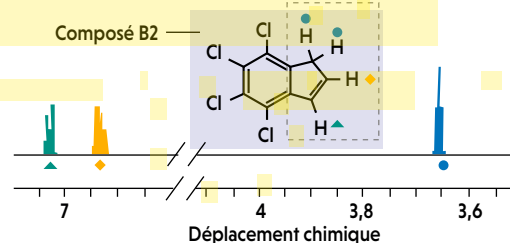


Chromatographie ionique
Cette technique permet de suivre la dégradation de la chlordécone via la quantité d'ions chlorures libérés et donne des informations sur le nombre d'atomes de chlore encore présents sur les produits de transformation

Modifications chimiques des produits de transformation
Elles permettent de déterminer la structure du squelette carboné des familles B et C et de la position de la fonction acide carboxylique de la famille C.



Spectroscopie par résonance magnétique nucléaire
Cette méthode utilise les propriétés magnétiques des atomes. On mesure la fréquence de résonance des noyaux des atomes d'hydrogène. Cette fréquence varie selon la position dans la molécule (on parle de déplacement chimique). Ces données permettent de placer les atomes d'hydrogène sur la structure carbonée.



> rappeler qu'en l'absence de dioxygène, la croissance bactérienne est généralement plus lente : n'ayant plus de dioxygène pour respirer, les bactéries basculent souvent en mode fermentatif et d'autres respirent sur des oxydants alternatifs. La conséquence immédiate de cette approche est l'allongement de la durée des expériences microbiologiques, qui peuvent s'étendre sur plusieurs mois, voire quelques années.

Nous avons choisi de travailler en milieu de culture liquide défini afin de mieux contrôler les paramètres expérimentaux. Les bactéries testées provenaient d'échantillons environnementaux très variés (terres contaminées des Antilles, sites pollués en organochlorés et boues de stations d'épuration). Un grand nombre d'expériences ont été nécessaires pour sélectionner des bactéries résistantes à de fortes concentrations en chlordécone. En 2014, nous avons isolé des mélanges de bactéries conduisant à une disparition complète de la chlordécone en quelques mois. Puis nous avons montré que deux d'entre elles, du genre *Citrobacter*, étaient chacune capables d'induire une disparition intégrale de la chlordécone. Cependant, l'analyse du génome de ces bactéries n'a, à ce stade, pas permis de déceler les éventuelles enzymes responsables de la dégradation de la chlordécone.

Après avoir étudié le volet microbiologique, nous nous sommes intéressés aux aspects chimiques. S'agit-il d'une minéralisation complète de la molécule ou bien y a-t-il des produits de transformation générés ? Pour y répondre de la façon la plus exhaustive, nous avons utilisé plusieurs outils associant un système de séparation (chromatographie gazeuse et chromatographie liquide) et un dispositif de détection (spectromètre de masse). Avec la chromatographie en phase gazeuse, nous avons détecté trois produits de transformation : un majoritaire, le composé B1 ($C_9Cl_5H_3$), de structure très