

éloignée de la chlordécone, et deux minoritaires, la monohydrochlordécone A1 et le composé B3 ($C_9Cl_4H_4$), similaire à B1 à un atome de chlore près. Avec la chromatographie liquide, nous avons observé deux couples de produits de transformation supplémentaires de mêmes formules brutes : d'un côté C1 et C2 ($C_{10}Cl_4H_4O_2$), de l'autre C3 et C4 ($C_{10}Cl_3H_5O_2$).

Cependant, ces techniques d'analyse n'étaient pas suffisantes pour établir la structure complète des produits de transformation détectés. Nous avons alors eu recours à la RMN (résonance magnétique nucléaire). Cela nécessitait de produire et d'isoler des quantités de chaque produit de transformation. La dégradation microbiologique de la chlordécone à grande échelle (plusieurs litres de milieu de culture contenant 50 milligrammes par litre de chlordécone) s'est révélée beaucoup trop lente (deux ans pour atteindre une disparition complète de la molécule) pour produire les quantités requises. Nous nous sommes donc tournés vers une autre stratégie utilisant des réactifs chimiques pour dégrader plus rapidement la chlordécone et obtenir les produits de transformation désirés.

Dès lors, trois familles de produits de transformation de la chlordécone, initialement observés au cours des dégradations microbiologiques, ont été caractérisées par RMN. La famille A regroupe les hydrochlordécones (dont A1), la famille B est celle des polychloroindènes (B1, B3 et B4) et la famille C est composée d'acides polychloroindène-carboxyliques (C1, C2, C3 et C4). L'objectif ultime du projet, biodégrader intégralement la chlordécone n'est donc pas encore atteint. La recherche continue pour découvrir les conditions propices à la dégradation de ces huit produits de transformation.

Ces résultats très prometteurs en milieu liquide nous ont aussi incités à mener des expériences plus proches des conditions de terrain. Nous avons ainsi travaillé avec Gwenaél Imfeld et Stéphane Vuilleumier, de l'université de Strasbourg, qui ont réalisé des expériences en utilisant de la terre des Antilles naturellement contaminée en chlordécone et mélangée à un milieu de culture aqueux, le tout placé plusieurs mois en anaérobiose. Cette fois encore, les familles A, B et C ont été retrouvées, accompagnées de deux autres familles baptisées D et E, correspondant respectivement à des méthylpolychloroindénecarboxylates et des éthylpolychloroindénecarboxylates.

Ces résultats suggéraient que des bactéries indigènes antillaises étaient, sous les bonnes conditions, capables de transformer la chlordécone. Était-il possible qu'une dégradation naturelle de la chlordécone ait déjà lieu aux Antilles ? Pour répondre, Thierry Woignier et son équipe ont réalisé en 2018 une campagne

d'échantillonnage de différents compartiments (sol, sédiment, eau) de Martinique. Les analyses que nous avons réalisées ont montré la présence quasi systématique de chlordécone. Plus surprenant, la totalité des échantillons contaminés contenaient aussi le produit de transformation B1, avec des concentrations souvent du même ordre de grandeur que la chlordécone elle-même. Le CLD-OH ainsi que la monohydrochlordécone A1 ont été trouvés plus rarement, mais à des taux parfois élevés (supérieurs à 1 milligramme par kilogramme). Au total, sur les 14 échantillons environnementaux analysés, 17 produits de transformation ont été détectés pour la première fois aux Antilles lors de cette campagne d'analyses.

DE L'ESPOIR ET DES QUESTIONS

Pour confirmer ces résultats surprenants, nous avons réalisé de nouvelles expériences microbiologiques en utilisant comme source de bactéries les échantillons de sol prélevés pour la campagne analytique. Au bout de quelques semaines et ce dans toutes les expériences, la chlordécone ajoutée au milieu avait bel et bien disparu au profit des produits de transformation attendus. L'ensemble des analyses et des expériences menées démontrent de façon indubitable qu'une dégradation naturelle de la chlordécone est déjà en cours aux Antilles. Elle est significative au vu des concentrations de B1 rencontrées et semble relativement répandue du fait de la présence systématique de B1 dans tous les échantillons.

Les résultats de nos travaux contredisent l'idée communément admise de la non-dégradabilité de la chlordécone, puisque la molécule se dégrade naturellement dans l'environnement et engendre une multitude de produits de transformation. Le modèle prédictif de décontamination est à revoir pour prendre en compte ces processus de transformation. Une fois les mécanismes d'action des bactéries compris, il serait possible d'imaginer une stratégie pour stimuler cette dégradation.

La gestion de la crise environnementale doit être modifiée afin d'inclure le suivi des produits de transformation, qui constituent une nouvelle pollution émergente aux Antilles. Ces composés, pour la plupart de structure très différente de la molécule-mère, pourraient contaminer les denrées alimentaires et, par cette voie, atteindre la population. Il faudra mener des études pour évaluer la toxicité de ces molécules, leur possible transfert environnement-alimentation, leur dégradabilité éventuelle. Il est par ailleurs possible que d'autres produits de transformation existent en plus de ceux décrits ici.

Nos découvertes sont donc à la fois une note d'espoir et une source de nouvelles interrogations pour les scientifiques, mais aussi pour la population locale. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. L. Chevallier, O. Della-Negra et al., **Natural chlordécone degradation revealed by numerous transformation products characterized in key French West Indies environmental compartments**, *Environ. Sci. Technol.*, vol. 53(11), pp. 6133-6143, 2019.

L. Multigner et al., **Chlordécone : un perturbateur endocrinien emblématique affectant les Antilles françaises**, *Bulletin Épidémiologique Hebdomadaire*, n° 22-23, pp. 480-485, 2018.

P.-L. Saaidi et al., **Microbial degradation of a recalcitrant pesticide : Chlordécone**, *Frontiers in Microbiology*, vol. 7, article 2025, 2016.

M. Lesueur et al. (éd.), **Crisis Management of Chronic Pollution : Contaminated Soil and Human Health**, CRC Press, 2016.

L'ESSENTIEL

> L'observatoire *Chandra*, de la Nasa, vient de fêter ses vingt ans dans l'espace. Il est en orbite autour de la Terre depuis 1999.

> Ce télescope spatial a contribué à des découvertes importantes relatives aux trous noirs supermassifs, aux restes de supernovæ, etc.

> Alors qu'il entame sa troisième décennie, *Chandra* contribue encore à la science. Ses collaborations à venir avec de nouveaux autres télescopes devraient aider à mieux comprendre l'Univers.

L'AUTRICE



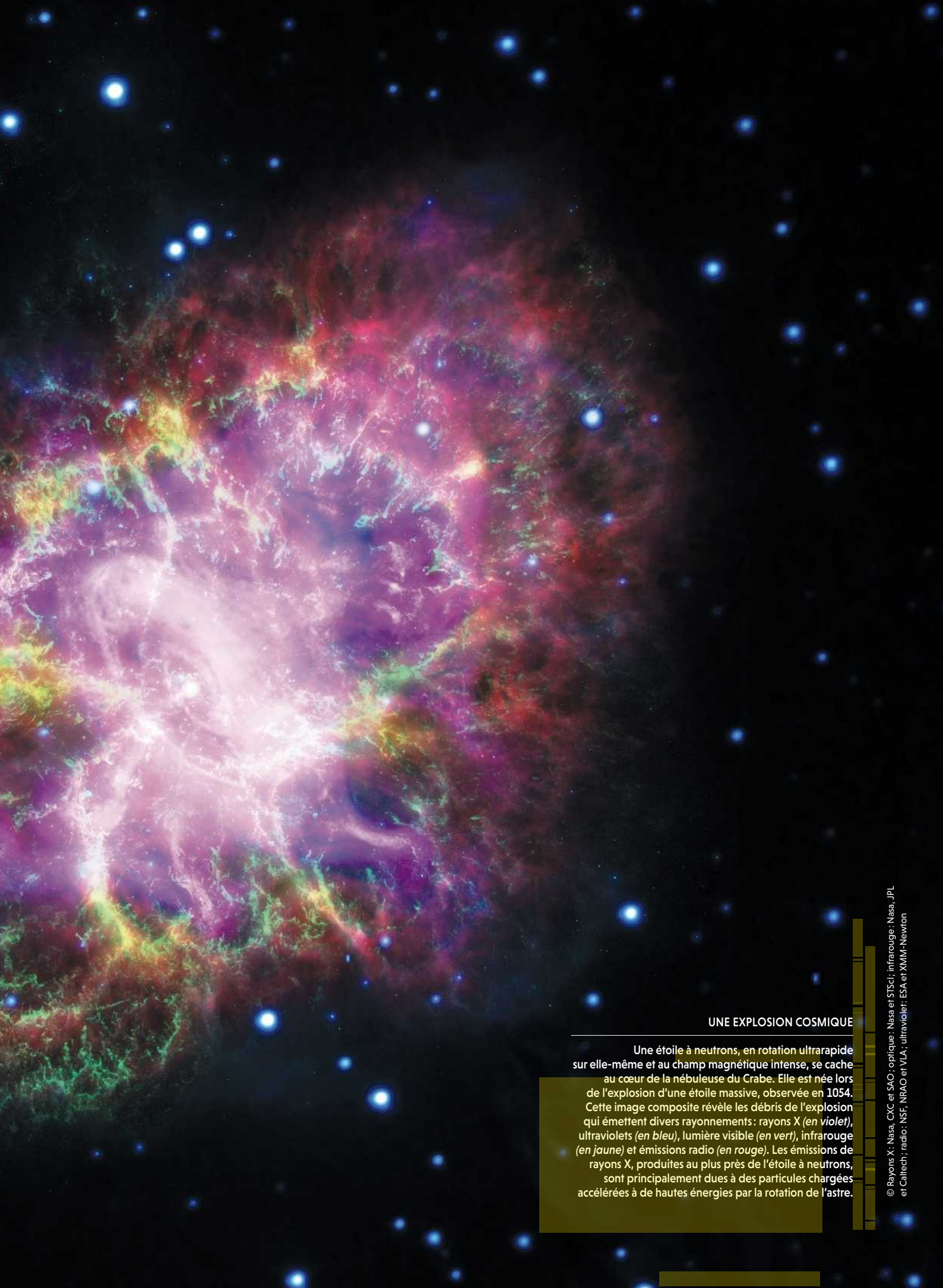
BELINDA J. WILKES
astrophysicienne à l'observatoire
d'astrophysique de l'institut Smithsonian
et directrice du centre Chandra X-Ray,
à Cambridge, aux États-Unis

L'Univers radiographié par Chandra

Cela fait deux décennies que *Chandra*, un télescope spatial sensible aux rayons X, scrute le cosmos. L'occasion de revenir, en images, sur quelques-unes de ses découvertes les plus marquantes.

Depuis son lancement en 1999, l'observatoire spatial *Chandra*, de la Nasa, a plongé son regard dans les cieux. Cet instrument est sensible aux rayons X, la fenêtre de longueurs d'onde idéale pour scruter des trous noirs gigantesques, des amas de galaxies et les restes de violentes explosions stellaires, les supernovæ. Le télescope enregistre la position, l'énergie et l'instant d'arrivée de chaque photon qui atteint son détecteur. Cette capacité, associée à un système d'imagerie d'une rare finesse, a révolutionné notre vision du monde dans la gamme des rayons X. Elle a affiné notre compréhension de quelques grandes énigmes cosmiques, comme la matière noire ou la naissance des étoiles, mais aussi de certaines caractéristiques des planètes du Système solaire.

>



UNE EXPLOSION COSMIQUE

Une étoile à neutrons, en rotation ultrarapide sur elle-même et au champ magnétique intense, se cache au cœur de la nébuleuse du Crabe. Elle est née lors de l'explosion d'une étoile massive, observée en 1054. Cette image composite révèle les débris de l'explosion qui émettent divers rayonnements : rayons X (en violet), ultraviolets (en bleu), lumière visible (en vert), infrarouge (en jaune) et émissions radio (en rouge). Les émissions de rayons X, produites au plus près de l'étoile à neutrons, sont principalement dues à des particules chargées accélérées à de hautes énergies par la rotation de l'astre.

> L'observatoire *Chandra* a été d'abord conçu pour résoudre une question de l'astronomie des rayons X: quelle est l'origine du fond diffus X, ce rayonnement X qui est identique dans toutes les directions du cosmos? *Chandra* a aussi été conçu pour être un «observatoire généraliste», dont une grande partie de son temps d'observation est répartie entre des chercheurs du monde entier pour étudier des sujets très différents et sélectionnés à la suite d'un appel à projets annuel. Après vingt ans de mission, *Chandra* continue de recevoir entre 500 et 650 requêtes de temps d'observation chaque année, ce qui, au total, correspond à environ 5,5 fois le temps pouvant être attribué. Le processus de sélection est donc très sévère.

Sur le plan scientifique, *Chandra* a été très productif. L'observatoire a atteint son objectif initial en révélant que presque tout le fond diffus X provient des milliers de trous noirs supermassifs situés au centre de galaxies peuplant l'Univers. Il a aussi observé de nombreuses choses étonnantes associées à divers objets célestes: une forte émission X par des jets de matière naissant aux pôles de trous noirs supermassifs pendant que ceux-ci engloutissent du gaz et de la poussière de leur voisinage; des aurores magnifiques dans l'atmosphère de Jupiter; la lumière émise par la coalescence de deux étoiles à neutrons, un événement également observé par les détecteurs d'ondes gravitationnelles *Ligo* et *Virgo*; et des trous noirs stellaires particulièrement brillants, nommés à juste titre sources X ultralumineuses. Près de 8000 articles scientifiques s'appuient sur les observations de *Chandra* et pas moins de 4000 chercheurs à travers le monde ont utilisé ses données.

L'an dernier, l'observatoire *Chandra* a fêté son vingtième anniversaire dans l'espace, et il est toujours aussi actif. Et avec l'arrivée de nouveaux télescopes, comme le télescope *Event Horizon* ou le télescope spatial *James-Webb*, de nouvelles collaborations se profilent. Les astrophysiciens pourront combiner les données d'observatoires toujours plus performants pour défricher de nouveaux territoires et accroître notre connaissance des régions les plus chaudes et les plus extrêmes de l'Univers. ■

