

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



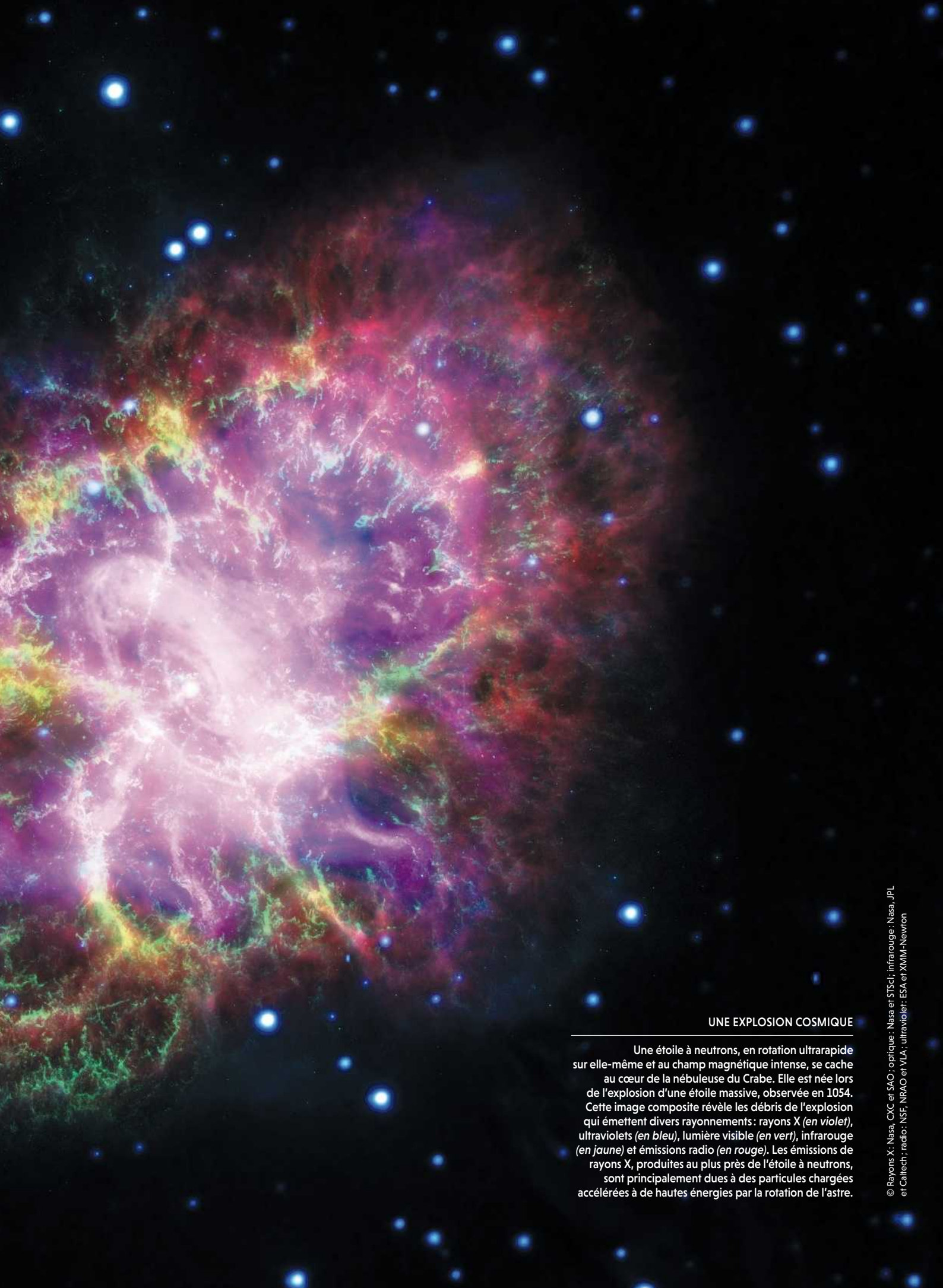
BELINDA J. WILKES
astrophysicienne à l'observatoire
d'astrophysique de l'institut Smithsonian
et directrice du centre Chandra X-Ray,
à Cambridge, aux États-Unis

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.

>



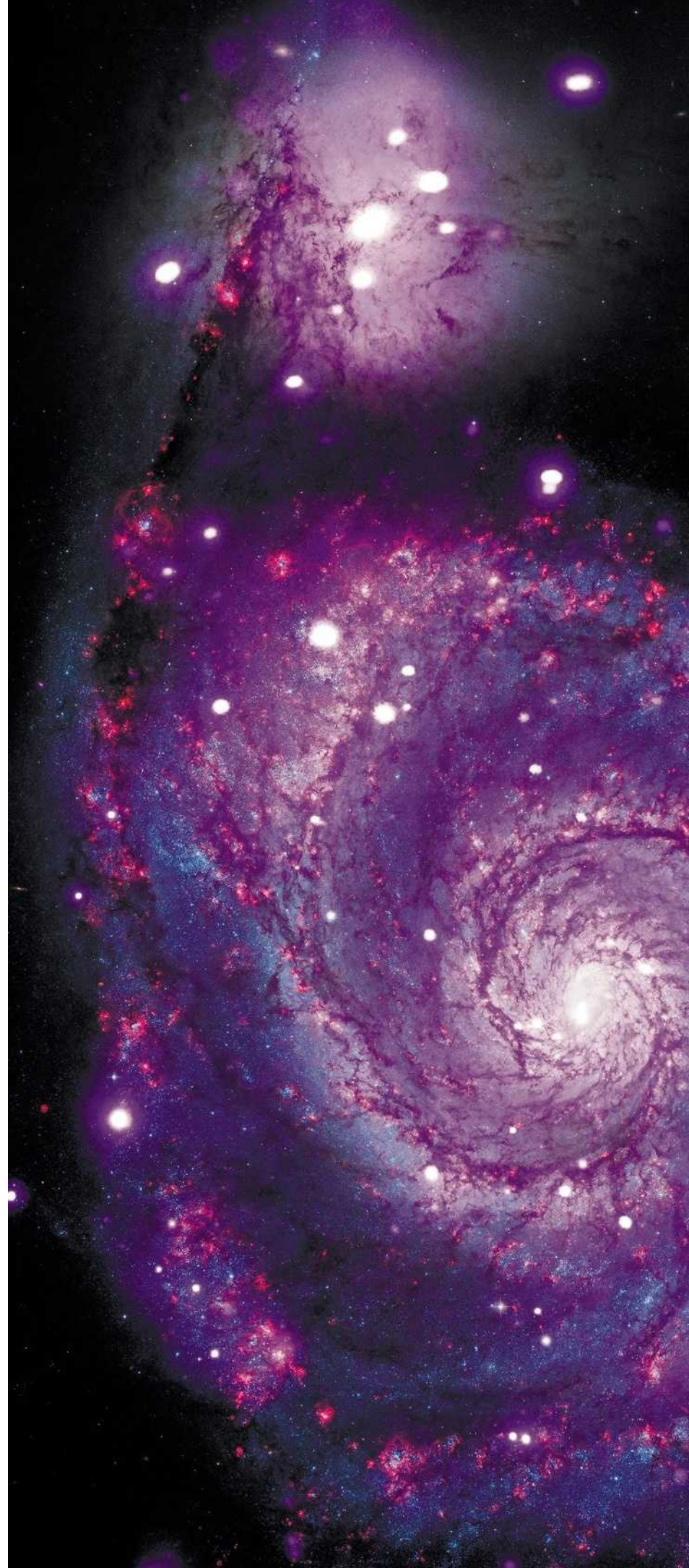
UNE EXPLOSION COSMIQUE

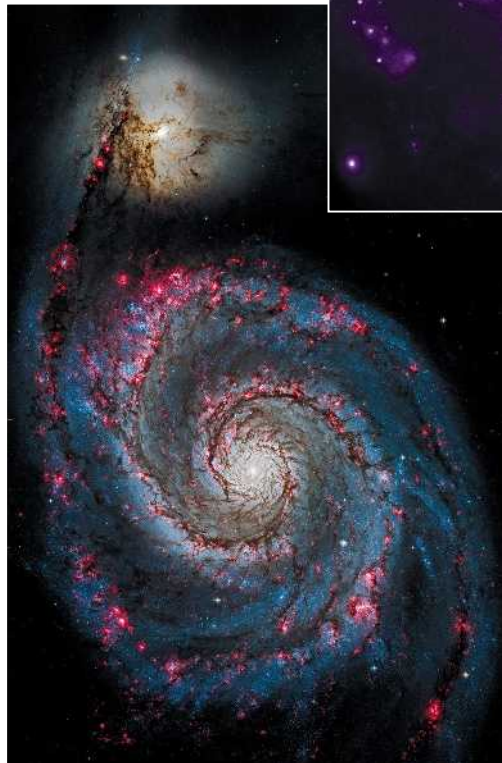
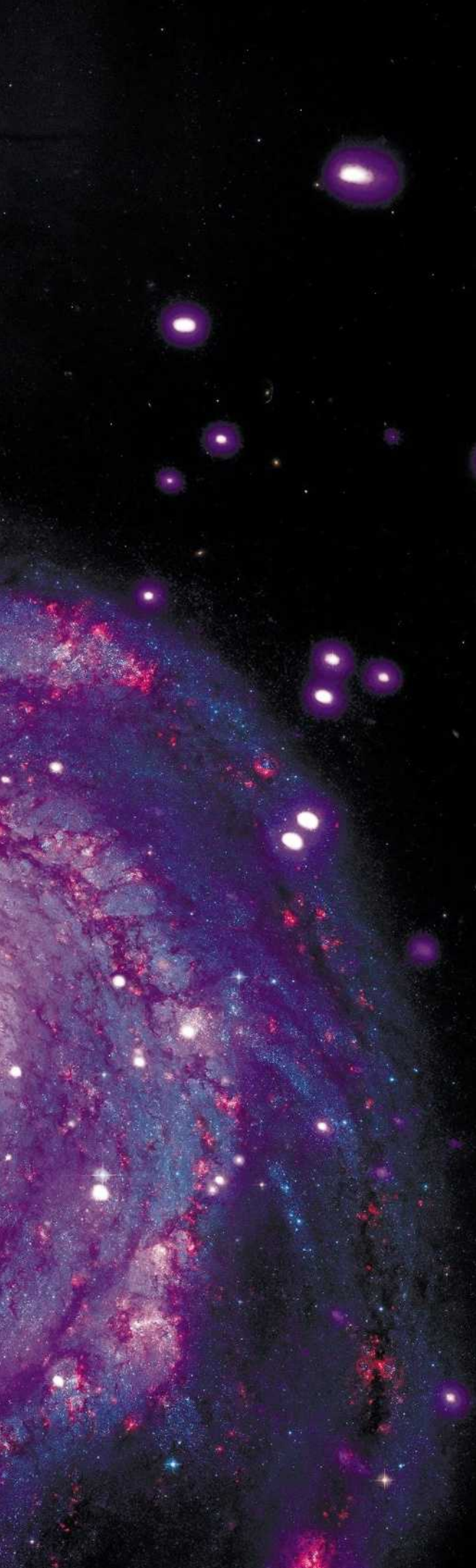
Une étoile à neutrons, en rotation ultrarapide sur elle-même et au champ magnétique intense, se cache au cœur de la nébuleuse du Crabe. Elle est née lors de l'explosion d'une étoile massive, observée en 1054. Cette image composite révèle les débris de l'explosion qui émettent divers rayonnements : rayons 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. ■



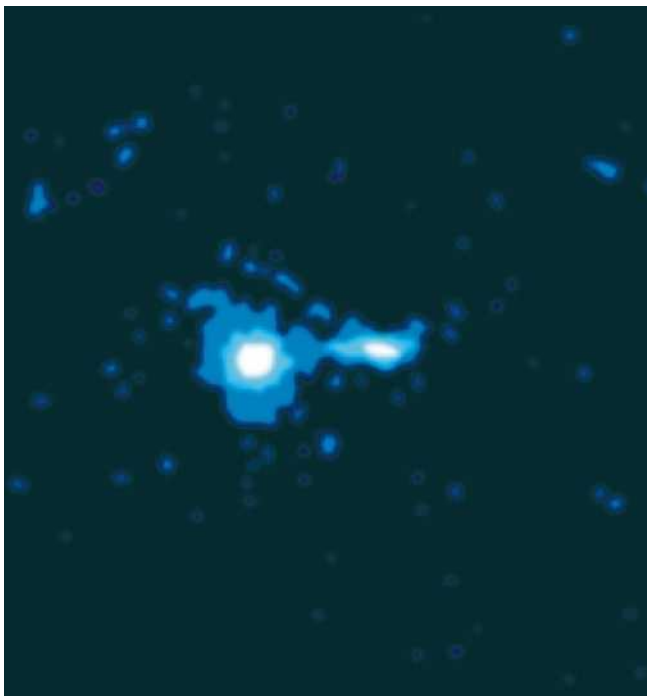


◀ ▲ UNE SPIRALE GALACTIQUE

La collision de deux galaxies, collectivement nommées M51 et surnommées la galaxie du Tourbillon, présente de magnifiques bras caractéristiques d'une galaxie spirale. Près de 400 sources de rayons X, principalement des étoiles binaires, sont visibles sur cette image. Elles sont situées à proximité des régions de formation d'étoiles. Les chercheurs pensent que les interactions des deux galaxies ont déclenché une vague de formation d'étoiles, ce qui expliquerait le nombre élevé de binaires X dans ce système. Les pulsations d'un système X impliquent que l'un des compagnons est une étoile à neutrons absorbant de grandes quantités de matière de son partenaire. Ce phénomène expliquerait la luminosité élevée de ces systèmes binaires.

L'image principale (*ci-contre*) est composée des données en rayons X de *Chandra* (*en haut*) et de la lumière visible collectée par le télescope spatial *Hubble* (*ci-dessus*). En combinant les informations de plusieurs télescopes, à diverses longueurs d'onde du spectre électromagnétique, les chercheurs ont une vision plus complète des différents phénomènes observés.

© Rayons X : Nasa, CXC, université Wesleyenne et R. Kilgard et al. ; optique : Nasa et STScI



▲ UN JET PUISSANT

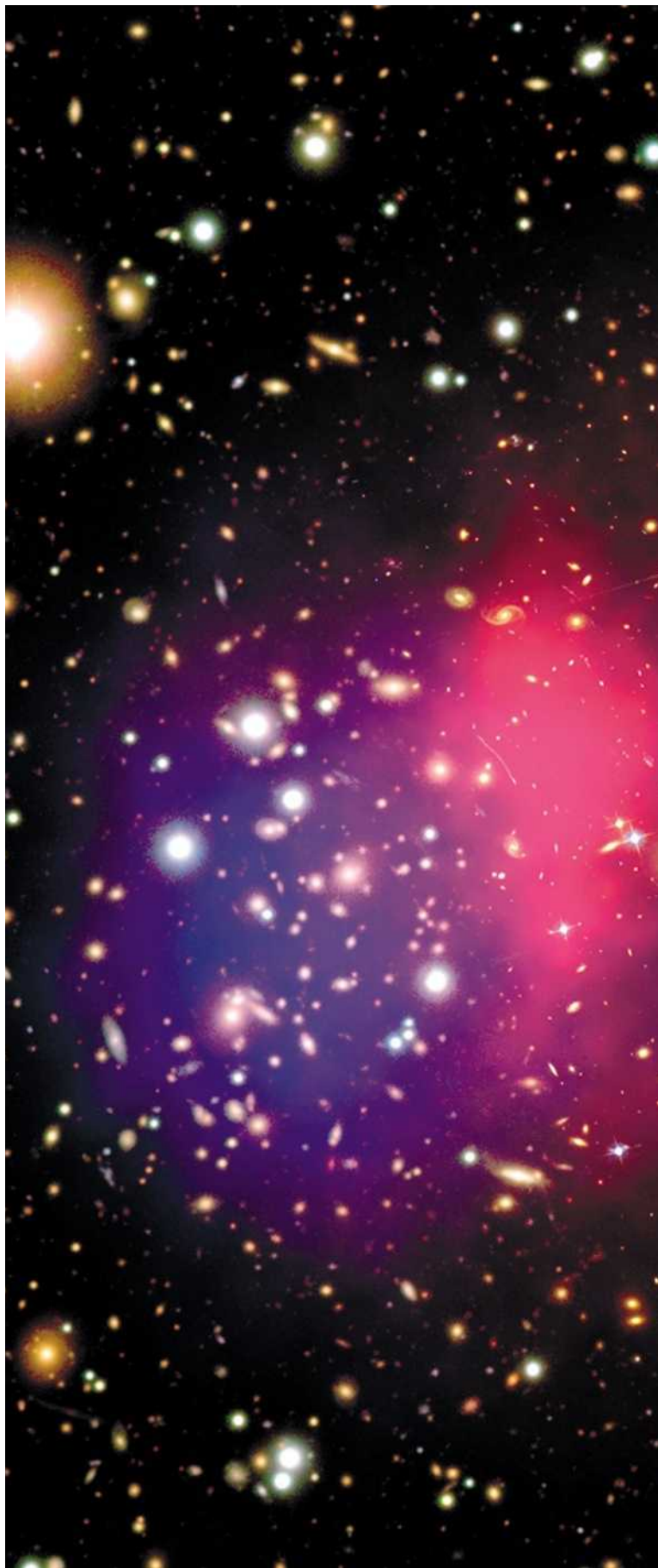
Vers le début de sa mission, *Chandra* a observé le quasar PKS 0637-752, un trou noir supermassif au cœur d'une galaxie éloignée, que j'avais étudié dix ans plus tôt en utilisant les données de l'observatoire *Einstein* de la Nasa. Le trou noir engloutit de gigantesques quantités de matière de sa galaxie hôte. Lors de sa chute, le gaz s'échauffe au point de briller plus intensément que les 100 milliards d'étoiles de la galaxie. L'excroissance lumineuse (à droite du centre) a été une surprise au point que l'équipe a soupçonné un problème dans le système optique du télescope. Mais *Chandra* avait en fait découvert les émissions X d'un jet de plasma propulsé en dehors de la matière en chute libre. Ce jet avait déjà été observé en radio, mais les astrophysiciens ne s'attendaient pas à une composante en rayons X. Grâce à cette observation, les chercheurs ont mieux compris ce qui se passe dans ces jets et en particulier comment ils prennent naissance au niveau des pôles du trou noir.

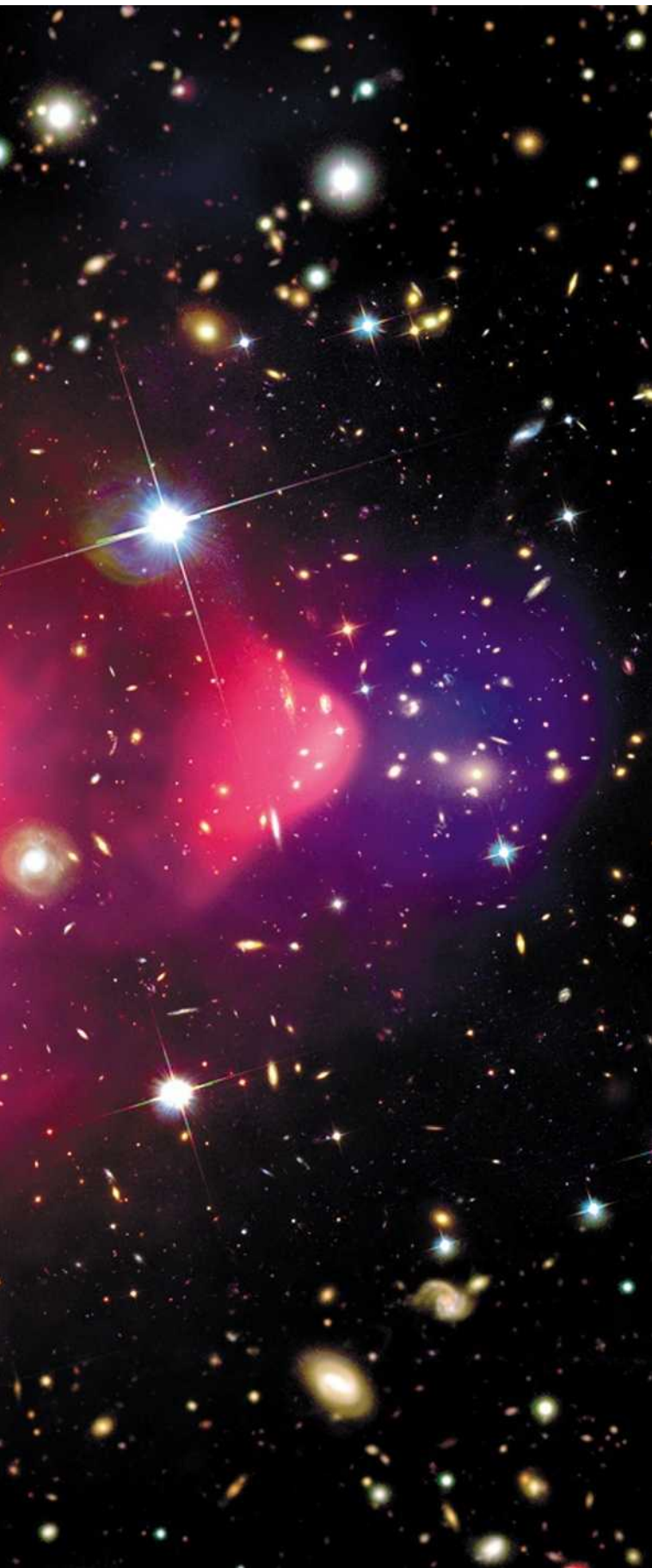
© Nasa, CXC et SAO

UNE PREUVE IRRÉFUTABLE ►

L'un des résultats les plus connus de *Chandra* est certainement l'image composite de l'amas de la Balle, le résultat de la collision de deux amas de galaxies. Cette image associe les données de *Chandra*, de *Magellan* et du télescope spatial *Hubble*. Le gaz contenu dans les amas s'est échauffé lors de la collision et émet des rayons X (en rose), il a aussi été ralenti et a pris une forme qui fait penser à un impact de balle. Les galaxies se sont croisées sans subir de collision et ont continué à la même vitesse; elles émettent en lumière visible (en blanc). Les astrophysiciens ont aussi étudié la distribution de masse du système. Ils ont utilisé le phénomène de lentille gravitationnelle, prédit par la relativité générale: en déformant l'espace-temps, la masse dévie la lumière émise par des objets en arrière-plan. En analysant les distorsions dans les images de galaxies, les chercheurs ont montré que la distribution de masse (en bleu) est incompatible avec celle du gaz. Cela s'expliquerait par la présence de matière noire. Cette dernière n'interagissant ni avec la matière ordinaire ni avec elle-même, elle a continué son mouvement sans ralentir durant la collision.

© Rayons X: Nasa, CXC, CFA et M. Markevitch et al.;
Optique: Nasa, STScI, Magellan, Université de l'Arizona
et D. Clowe et al.; carte de lentilles gravitationnelles:
Nasa, STScI, ESO WFI, Magellan, université de l'Arizona et D. Clowe et al.





PLUS PRÈS DE CHEZ NOUS ▼

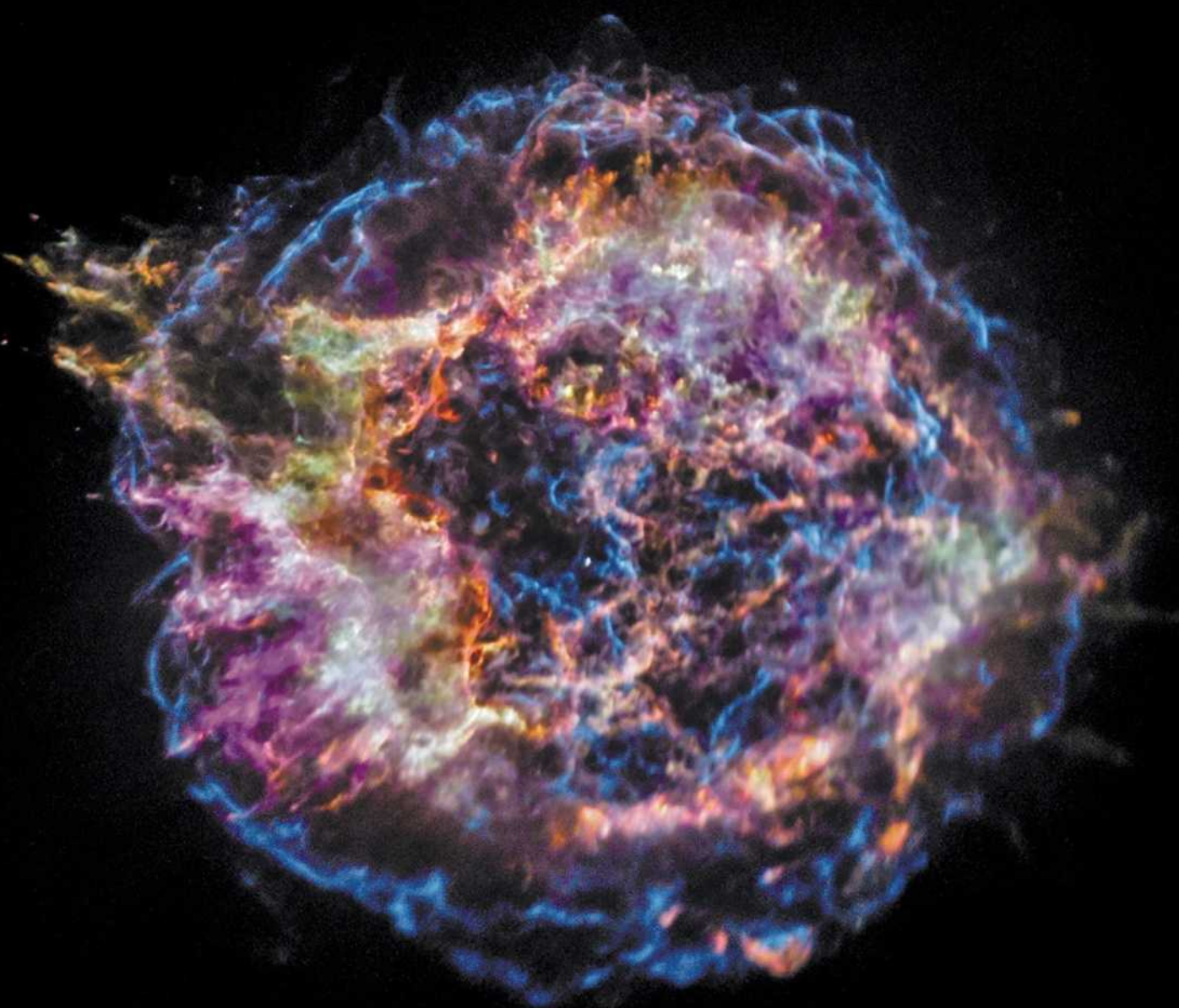
En plus de découvrir des trous noirs supermassifs et des amas de galaxies lointains, *Chandra* a fait des découvertes étonnantes dans le Système solaire.

Ces images de Jupiter montrent des émissions en rayons X d'aurores aux pôles Nord (*en haut*) et Sud (*en bas*). Ces rayons X sont probablement produits par des particules chargées canalisées par le champ magnétique de la planète. Les observations conjointes en 2019 de *Chandra* et de la sonde *Juno* de la Nasa, actuellement en orbite autour de Jupiter, devraient fournir plus de détails sur ce phénomène.

© Rayons X : Nasa, CXC, UCL, W. Dunn et al. ; optique : Nasa, JPL-Caltech, SwRI, MSSS, G. Eichstädt et S. Doran (pôle Sud), Nasa, JPL-Caltech, SwRI et MSSS (pôle Nord)







PREMIÈRE IMAGE ▲

La première image officielle de *Chandra* est celle du rémanent de la fameuse supernova Cassiopée A. Cette nébuleuse de gaz et de poussière est née de l'explosion d'une étoile massive en fin de vie il y a environ 340 ans.

Lors de la mort de l'étoile, son cœur s'est effondré sur lui-même en formant une étoile à neutrons, qui n'avait jusque-là jamais été détectée au sein du rémanent. La découverte de cette étoile à neutrons grâce à *Chandra* a démontré la puissance de cet observatoire capable de prendre des images à haute résolution. Cette image utilise des données que *Chandra* a enregistrées sur plusieurs années pour obtenir un grand nombre de détails de la structure du rémanent. Les chercheurs ont utilisé les mesures en énergie de l'observatoire pour identifier différents éléments chimiques formés dans l'étoile et expulsés lors de l'explosion : silicium (en rouge), soufre (en jaune), calcium (en vert) et fer (en violet). Les nuances de bleu sont associées à des émissions de particules de haute énergie accélérées par l'onde de choc de l'explosion – un autre phénomène découvert pour la première fois par *Chandra*.

© Nasa, CXC et SAO

◀ UNE POUPONNIÈRE D'ÉTOILES

Sur ce cliché, les plus de 1400 points de lumière bleus et orange sont des étoiles qui viennent de naître au sein d'une nébuleuse riche en gaz. Si ce nuage est visible à l'œil nu au niveau de l'épée de la constellation d'Orion, il n'en est pas de même de ces étoiles. Cachés à la vue des télescopes sensibles à la lumière visible, ces nouveaux astres ne se dévoilent que par les rayons X qu'ils émettent et qui sont capables de traverser le nuage dense de gaz et de poussière. Seul un instrument comme *Chandra* permet donc de contempler et d'étudier ces étoiles jeunes. Ces dernières sont très chaudes et font preuve d'une grande activité. Elles attirent à elles, par gravitation, de grandes quantités de matière, mais leur champ magnétique intense et les vents stellaires confèrent à cette matière une dynamique complexe.

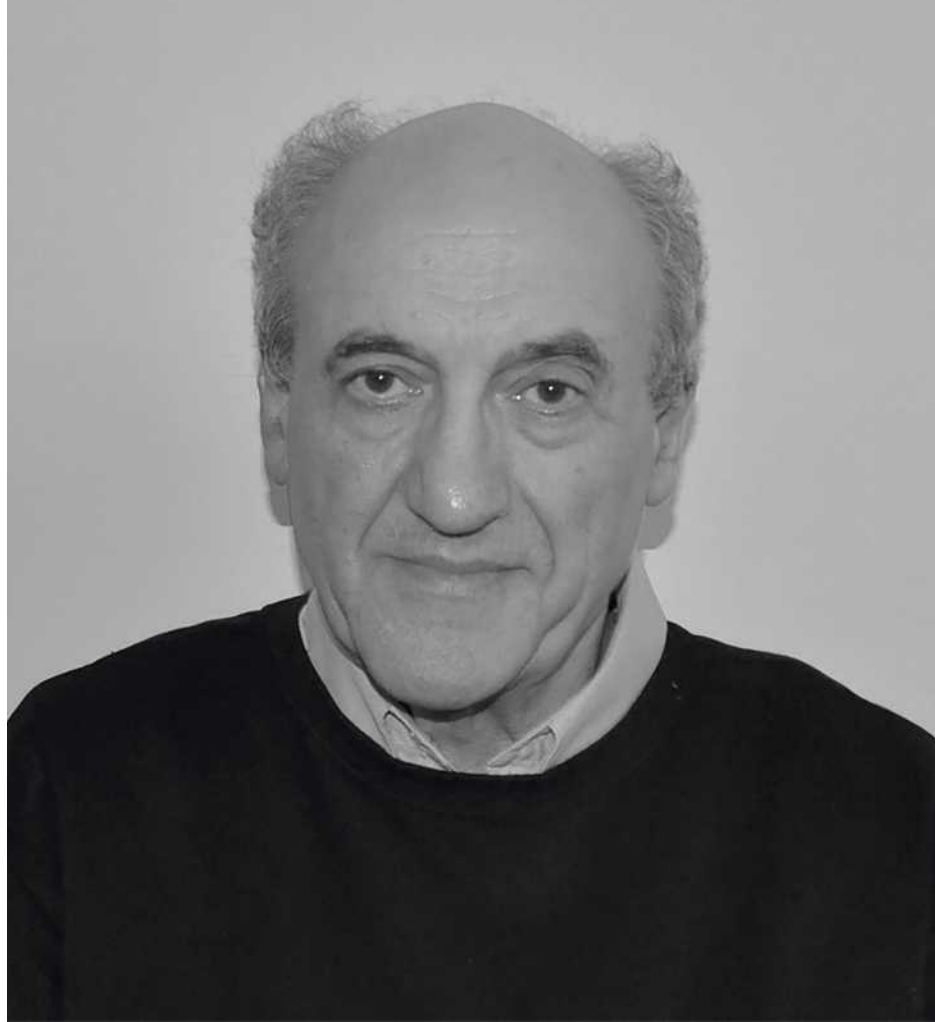
© Rayons X: Nasa, CXC, université d'État de Pennsylvanie, E. Feigelson, K. Getman et al.; visible: Nasa, ESA, STScI, M. Robberto et al.

BIBLIOGRAPHIE

A. Domínguez et al.,
**Détecter la lumière de
toutes les étoiles disparues,**
Pour la Science, n° 459,
pp. 42-49, janvier 2016.

Centre Chandra X-Ray,
**Exploring the extremes :
20 years of Chandra**
<https://chandra.si.edu/20th>

JEAN-JACQUES KUPIEC est biologiste titulaire d'une habilitation à diriger des recherches et ancien membre du centre Cavaillès (École normale supérieure, Paris). Il a signé de nombreux articles de biologie, d'épistémologie et d'histoire des sciences. Auteur de plusieurs livres, il développe dans quatre d'entre eux une théorie qui accorde une place centrale au hasard en biologie.



Il faut renoncer aux lois de Mendel



Et si le vivant naissait d'un comportement aléatoire des molécules et des cellules ? Voilà une quarantaine d'années que Jean-Jacques Kupiec défend ce principe avec force arguments théoriques et expérimentaux. Les explications de ce biologiste hors norme à l'occasion de la sortie de son dernier livre, *Et si le vivant était anarchique*.