

d'un second Dryas récent qui, à l'image du premier, aurait pu logiquement suivre le second épisode de fonte accélérée après 9500 avant notre ère. Nous avons vu que les refroidissements qui se développent dans le Jura et les Alpes de -8000 à -7000 et -6000 à -5000 pouvaient être les équivalents – en termes de structure, mais bien affaiblis en termes quantitatifs! – du Dryas récent.

Modèles et prévisions

Les simulations numériques réalisées par les Allemands C. Schäfer-Neth et K. Statteger suggèrent qu'à volume égal le contrecoup climatique d'un brusque afflux d'eau douce dans l'Atlantique Nord est nettement plus important si cet afflux provient des côtes européennes que s'il se développe au large des côtes groenlandaises. Combiné avec la diminution progressive du volume d'eau douce mis en jeu dans les trois étapes successives de la déglaciation, ce modèle confirme le violent contrecoup climatique qu'a pu avoir la première phase de la déglaciation, mettant en œuvre un énorme volume d'eau douce arrivant dans l'Atlantique à la fois depuis les côtes européennes et celles d'Amérique du Nord.

Au contraire, la deuxième étape de la déglaciation, où les eaux douces d'origine européenne constituaient un apport secondaire par rapport aux eaux d'origine américaine, et la troisième étape, constituée principalement par de l'eau douce provenant d'Amérique du Nord et de l'Antarctique, sans apport européen, ont eu un contrecoup climatique de plus en plus affaibli.

En définitive, le système climatique semble avoir répondu à la déglaciation par une série d'oscillations dont l'amplitude s'apaise à mesure que la déglaciation s'achève, c'est-à-dire que le volume des afflux d'eau douce dans l'océan se réduit et que la source de ces afflux se déplace et s'éloigne des côtes européennes. La parenté de structure de chacun des cycles climatiques associées aux étapes successives de la déglaciation traduit sans doute le même mode de réponse de l'océan aux perturbations répétées qu'il subit tout au long de cette histoire. Vers 5000 avant notre ère, la déglaciation achevée, le système climatique s'équilibre enfin, ses oscillations étant désormais plus régulières et de moindre amplitude.

Refroidissement lié à l'effet de serre?

Quelles applications pouvons-nous tirer de cette histoire de la déglaciation pour le futur de notre climat? On sait aujourd'hui que la forte augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, liée aux activités humaines («effet de serre additionnel»), est un puissant facteur de déséquilibre du système climatique de la Terre. L'analyse des bulles d'air piégées dans les glaces du Groenland et les observations directes à partir de l'île de Mauna Loa dans les Hawaï montrent en particulier un accroissement accéléré de la teneur en gaz carbonique depuis la révolution industrielle. Elle laisse envisager un doublement de la valeur préindustrielle de cette teneur aux environs de 2030. Dans cette hypothèse, les simulations numériques prévoient un réchauffement allant de 1,9 à 5,2 °C.

Au regard de l'histoire que nous venons de parcourir, il est possible d'envisager la menace que fait peser sur notre climat l'effet de serre additionnel. De nombreux paléoclimatologues craignent que la fonte des glaces polaires entraînée par le réchauffement global ne perturbe et ne ralentisse la circulation thermohaline. Un accroissement des précipitations aux hautes latitudes, corollaire du réchauffement du climat et des eaux océaniques, pourrait renforcer le processus. Certes, si l'on en croit les simulations numériques évoquées plus haut et le modèle grandeur nature offert par les variations du climat pendant la déglaciation, l'absence actuelle de calotte glaciaire sur la Scandinavie écarte le danger de retour d'un épisode identique au Dryas récent. Cependant, un coup de froid du même type que l'événement 8200 n'est pas impossible. Le modèle mis au point par S. Rahmstorf, de l'Université de Postdam, montre la grande sensibilité de la circulation océanique : un brusque apport de 60 000 mètres cubes d'eau douce suffirait à perturber cette circulation. La circulation thermohaline est bien le talon d'Achille de notre système climatique.

Nous voici donc, du fait de la pollution de notre atmosphère, exposés aux mêmes menaces que nos ancêtres de la préhistoire. À cause des phénomènes associés à la déglaciation, ceux-ci ont subi de brusques coups de froid,

alors même que la Terre bénéficiait d'un maximum d'insolation! Le réchauffement global pourrait, à terme, conduire aussi à un refroidissement sensible de notre climat.

Avons-nous au moins le temps de voir venir le danger? La réponse que l'on peut apporter à cette question n'est pas rassurante, car les courbes climatiques les plus précises dont disposent les paléoclimatologues montrent que, le plus souvent, les changements climatiques associés à la déglaciation sont survenus brusquement, en moins d'un demi-siècle. On observe de véritables basculements du climat d'un état d'équilibre à un autre. Ces basculements, vraisemblablement à l'échelle d'une génération humaine, ont dû laisser nos ancêtres préhistoriques pour le moins perplexes.

Les paléoclimatologues s'efforcent depuis plus de vingt ans d'attirer l'attention de l'opinion publique et des politiques sur les menaces que fait peser sur nous l'effet de serre additionnel. Il s'agit d'une question complexe, encore loin d'être entièrement résolue par les scientifiques. Les résultats de simulations numériques réalisées récemment par l'Anglais R. Wood sont plutôt alarmants : ils suggèrent que le site de formation d'eaux profondes du Labrador pourrait se désamorcer au cours des trente prochaines années, c'est-à-dire avant 2029. Dès 1987, W. Broecker posait ouvertement la question de savoir si «nous ne jouons pas à la roulette russe avec le climat sans que personne sache vraiment ce qu'il y a dans le barillet»...

Michel MAGNY est directeur de recherches au Laboratoire de chrono-écologie (UMR 6565), à Besançon.

J.-C. DUPLESSY, *Quand l'océan se fâche. Histoire naturelle du climat*, Odile Jacob, 277 pages, 1996.

M. MAGNY, *Une histoire du climat. Des derniers mammoths au siècle de l'automobile*, Errance, 176 pages, 1995.

S. JOUSSAUME, *Climat, d'hier à demain*, CNRS Éditions, 1993.

U. VON GRAFENSTEIN et al., *A Mid-European Decadal Isotope Climate Record from 15 500 to 5 000 Years BP*, in *Science*, n° 284, pp. 1654-1657, 1999.

R.A. WOOD et al., *Changing Spatial Structure of the Thermohaline Circulation in Response to Atmospheric CO₂ Forcing in a Climate Model*, in *Nature*, n° 399, pp. 572-575, 1999.

Les magnétoiles

KEVIN HURLEY

Depuis 20 ans, des éclairs de rayonnement gamma répétitifs déchirent le ciel. Ce rayonnement émanerait d'étoiles à neutrons au fort champ magnétique, sujettes à des séismes analogues aux tremblements de terre, mais autrement plus puissants.

Le 27 août 1998 à 5 heures 22 en temps universel, la plus intense bouffée de rayonnement gamma jamais enregistrée atteint la Terre. Elle a commencé par un intense pic de rayonnement, puis s'est éteinte graduellement dans les cinq minutes suivantes, envoyant, comme un phare, un éclair de rayonnement gamma d'intensité décroissante toutes les 5,16 secondes. Les seuls témoins de cet extraordinaire phénomène furent les sondes spatiales qui voyageaient en silence à travers le Système solaire et des chercheurs qui surveillaient l'ionosphère ; diffusé et absorbé par cette couche de l'atmosphère terrestre, le rayonnement gamma n'a donc pas atteint le niveau de la mer.

Ce rayonnement provenait d'un objet de notre Galaxie qui intriguait les astronomes depuis des années, mais qui n'avait pas encore laissé entrevoir sa puissance phénoménale. L'étude de cet objet, ainsi que sa ressemblance avec plusieurs autres objets étudiés depuis une vingtaine d'années, nous a permis de conclure à l'existence d'un nouveau type d'étoile, que l'on a nommée «magnétoile», ou étoile magnétique (en anglais *magnetar*, contraction de *magnetic* et de *star*). Malgré leur rareté – jusqu'ici quatre d'entre elles ont été repérées –, les magnétoiles intéressent vivement les astronomes, car elles recèlent les champs magnétiques les

plus intenses de l'Univers (voir la figure 1).

Bien qu'elle n'ait pas été identifiée comme telle à l'époque, la première magnétoile a été observée le 5 mars 1979. Une flottille de neuf satellites avait été équipée de détecteurs de rayonnements gamma, afin d'étudier le phénomène nouveau des sursauts gamma. Aujourd'hui, les astronomes savent que ces «sursauts», de brefs éclairs de rayonnement gamma qui illuminent le ciel plusieurs fois par jour, résultent d'événements catastrophiques, coalescences d'étoiles à neutrons ou supernovae très puissantes, qui se produisent dans les milliards de galaxies entourant la nôtre. Cependant, à l'époque, le mystère était entier : les astronomes ignoraient si ces sursauts provenaient d'autres galaxies, de notre Galaxie, ou même du Système solaire.

Le sursaut gamma enregistré ce jour-là était le plus intense jamais observé (il détint ce record jusqu'au 27 août 1998). Connaissant les instants d'arrivée sur les sondes spatiales, les astronomes calculèrent le lieu d'émission du sursaut gamma avec précision. À la surprise générale, l'émission semblait provenir du vestige de supernova N49 situé dans le Grand Nuage de Magellan, une galaxie proche de la nôtre, à environ 150 000 années-lumière.

Ce sursaut semblait n'être qu'une version extrêmement intense d'un sursaut gamma classique, mais c'était la première fois qu'on pouvait rattacher un sursaut à un objet précis, tel un vestige de supernova, déjà observé à d'autres longueurs d'onde. C'était aussi le premier sursaut gamma périodique : l'intensité du rayonnement gamma augmentait et décroissait toutes les huit secondes. Enfin, dans les jours suivant ce sursaut majeur, les astronomes observèrent d'autres sursauts plus faibles de même provenance. La situation était totalement nouvelle.

Les sursauts gamma émanaient-ils des vestiges de supernovae, auquel cas leur origine était établie ? Ou bien avait-on découvert, au hasard d'un enregistrement de routine des sursauts gamma, un nouveau type de sursaut ? Le débat allait durer près de 20 ans.

Des étoiles à neutrons par milliards

Lorsqu'une étoile massive ordinaire a épuisé son combustible nucléaire, elle s'effondre avant d'exploser, en éjectant 90 pour cent de sa masse dans l'espace sous forme de gaz. Les dix pour

1. UNE MAGNÉTOILE est une étoile à neutrons dont le champ magnétique est des milliards de fois plus intense que les champs magnétiques que l'on parvient à créer en laboratoire. De temps à autre, lors de tremblements d'étoiles, ces objets émettent des bouffées périodiques de rayonnement gamma.

cent restants continuent de s'effondrer et forment un noyau dense de particules : une étoile à neutrons. Cette étoile possède une surface solide. Sa masse est à peu près équivalente à celle du Soleil, mais elle est comprimée à l'intérieur d'une sphère de dix kilomètres de rayon, de sorte que l'intensité de la force gravitationnelle à sa surface est cent milliards de fois celle de la surface terrestre.

À sa naissance, l'étoile à neutrons est un objet extrêmement chaud, mais sa température baisse en quelques années jusqu'à environ dix millions de degrés. Sa rotation est très rapide, jusqu'à 500 tours par seconde, et son champ magnétique est intense, car le champ magnétique stellaire initial est densifié lors de l'effondrement de la supernova. En partant d'une étoile dont le champ magnétique est initialement de un ou deux gauss (10^{-4} tesla), du même ordre de grandeur que celui de la Terre ou du Soleil, l'effondrement comprime ce champ jusqu'à 10^{12} gauss (10^8 teslas).

Notre Galaxie contient environ un milliard d'étoiles à neutrons, résidus des explosions de supernovae. Toutefois, comme les étoiles à neutrons rayonnent peu d'énergie décelable, seules quelques-unes sont détectées directement. Les étoiles à neutrons émettent essentiellement des ondes radio focalisées. Comme un phare qui éclaire à intervalles fixes un navire, certaines étoiles à neutrons éclairent la Terre de leur rayonnement radio régulier. Les astronomes connaissent environ un millier de telles étoiles, que l'on nomme pulsars. Plusieurs centaines d'entre elles sont aussi des sources de rayonnement X, qu'on ne détecte pas du sol, en raison de l'absorption atmosphérique, mais que des satellites enregistrent.

De nombreuses étoiles à neutrons sont dans des systèmes binaires, où

leur compagnon est une étoile ordinaire. La force gravitationnelle colossale de l'étoile à neutrons attire lentement le gaz de son compagnon et l'accélère à grande vitesse (une fraction notable de la vitesse de la lumière). Ce gaz s'écrase alors à la surface de l'étoile, libérant son énergie cinétique sous forme de rayonnement X. Dans de nombreux cas, cependant, on observe seulement un vestige ténu de supernova, c'est-à-dire les restes des couches externes de l'étoile qui a explosé, projetés dans l'espace à des vitesses supersoniques. Quand cette enveloppe de gaz rencontre des atomes du milieu interstellaire, elle est excitée et émet une faible lueur X qui peut persister 10 000 ans, voire davantage.

Ainsi, comme le sursaut du 5 mars 1979 semblait provenir du vestige de la supernova N 49, il était plausible que la source en soit une étoile à neutrons. La période de pulsation de huit secondes du sursaut sur le déclin restait cependant une énigme : en général, dès leur formation, les étoiles à neutrons sont en rotation très rapide, en raison de la conservation du moment cinétique de l'étoile mère. De la même façon qu'une patineuse accroît sa vitesse de rotation en rapprochant les bras de son corps, l'étoile à neutrons, très petite, tourne beaucoup plus vite que son étoile mère. Certes, à mesure que l'étoile à neutrons perd de l'énergie par émission de rayonnement radio, elle ralentit, mais trop lentement pour expliquer la vitesse de rotation observée : avec l'intensité des champs magnétiques estimés pour les étoiles à neutrons ordinaires, il faudrait cent millions d'années pour que la période de rotation initiale ralentisse à huit secondes, et l'âge de N49 n'est que de 5 000 ans.

Nouvelles sources, nouveaux déboires

Toujours en 1979, Evgueny Mazets et ses collègues de l'Institut Ioffe, à Saint-Petersbourg, annoncent la découverte d'une autre source de sursauts à répétition, qu'ils nomment 1900+14, d'après ses coordonnées célestes. La source est plus discrète : elle n'émet que trois courts sursauts de rayonnement gamma avant de se taire. Cette source se situe dans le plan de notre Galaxie, mais sa position exacte reste mal définie. De surcroît, la grande quantité de poussières et de gaz du plan galactique absorbe la lumière visible et rend impossible l'identification de cette source dans le visible.

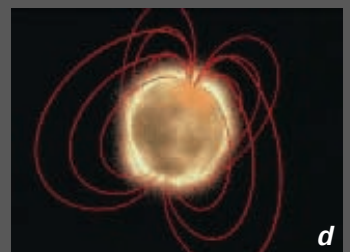
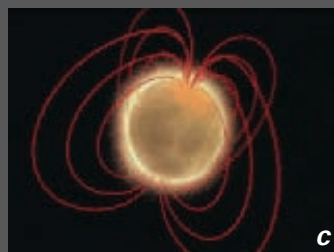
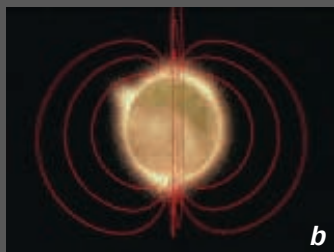
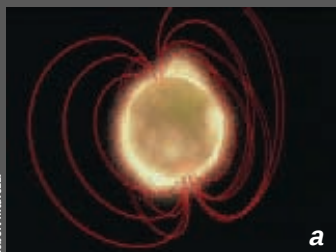
Après ces observations, les astronomes avaient encore du mal à préciser en quoi ces sources à répétition diffèrent des sources non répétitives de sursauts. S'agit-il de deux manifestations d'une même catégorie d'objets ?

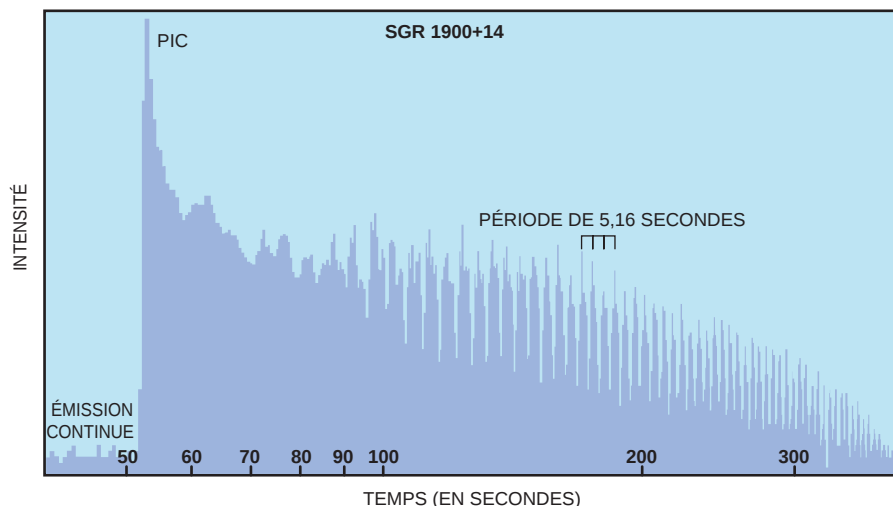
Sept ans sont nécessaires à la découverte d'une autre source à répétition : en 1986, Jean-Luc Atteia, du Centre d'études spatiales des rayonnements de Toulouse (CESR), et moi-même découvrons une nouvelle source, que nous nommons SGR 1806-20. Le sigle SGR signifie ici *Soft Gamma Repeater*, soit «source à répétition de rayonnement gamma mou».

Cette source, située dans une direction proche de celle du centre galactique, émet des rayonnements gamma de moindre énergie qu'une source ordinaire de sursauts gamma (d'où l'adjectif mou). Cette fois, les sursauts arrivent à une fréquence étonnante : en quelques mois, une centaine de sursauts sont enregistrés. Au moment de son maximum d'activité, la source émet jusqu'à dix sursauts par jour. Bien que

2. LE SPECTACLE D'UNE MAGNÉTOILE est figuré sur cette simulation. Situé à quelques centaines de kilomètres de l'étoile à neutrons, un observateur verrait une sphère en rotation avec des zones plus ou moins brillantes selon la température de la croûte de l'étoile (a, b, c) ; l'axe de rotation est vertical et on a représenté en rouge les lignes de champ magnétique, normalement invisibles. La période de rotation est de quelques secondes. Dans la suite, on fige la rotation (d). En raison de contraintes qui s'exercent sur la croûte, celle-ci craque. Après ce tremblement

d'étoile, la croûte est chauffée et fond par endroits, d'où l'apparition de nouvelles zones brillantes (e, f, g). Les électrons émis par les zones chaudes de la croûte se déplacent le long des lignes de champ magnétique et ils rayonnent une lueur orangée (h). De plus en plus d'électrons sont émis (i, j, k, l, m). La croûte se réarrange et les lignes de champ, attachées à la croûte, se déplacent (n, o, p). Ces oscillations des lignes de champ accélèrent les électrons qui perdent leur énergie en émettant un intense rayonnement gamma.





3. L'ÉMISSION GAMMA DU SURSAUT DU 27 AOÛT 1998, le plus intense sursaut jamais observé, a été enregistrée par la sonde *Ulysse*. Après un pic d'intensité qui a duré quelques secondes, l'émission a décro avec de brefs sursauts qui revenaient toutes les 5,16 secondes.

relativement intenses, aucun de ces sursauts n'atteint l'ampleur de l'événement observé en 1979, et la source cesse ses émissions en novembre 1986. Tout comme 1900+14, la source se trouve dans une direction du plan galactique très obscurcie par les poussières, et n'a pas d'homologue visible évident.

Avec trois sources gamma à répétition connues, les astronomes soupçonnaient l'existence d'une nouvelle classe d'objets. Quelles étaient leurs caractéristiques communes ? D'abord, elles étaient répétitives. Ensuite, leur spectre (la quantité d'énergie en fonction de la fréquence) différait de ceux des sursauts gamma : le rayonnement des sursauts gamma à répétition est d'énergie moindre que celui des sursauts classiques. Enfin, les sursauts étaient généralement très courts, de l'ordre de 100 millisecondes.

Ces ressemblances n'étaient toutefois pas suffisantes pour unifier cette classe d'objets. Par exemple, le spectre de l'émission particulièrement intense du 5 mars 1979 se rapprochait de celui des sursauts gamma classiques, avec une grande proportion de rayons gamma de haute énergie. Les sursauts n'étaient pas tous courts, certains durant plusieurs secondes. Enfin, la cadence des répétitions était très variée,

et apparemment chaotique : certaines sources sont restées actives quelques jours, d'autres ont duré plusieurs mois.

Pour expliquer ces phénomènes, les théoriciens ont avancé une multitude de théories, dont certaines étaient carrément farfelues, invoquant par exemple des monopôles magnétiques ou des étoiles composées de matière sous forme de quarks. Aucune de ces théories n'a pu être vérifiée par l'observation : avec trois sources seulement, les données étaient insuffisantes.

Vers l'unification

En 1990 et 1991, on lança deux sondes spatiales équipées de nouveaux détecteurs destinés à étudier les sursauts gamma et les sources gamma à répétition. La première au départ, la mission *Ulysse*, mise au point par l'Agence spatiale européenne, avait pour objectif l'étude de l'héliosphère. Pour mener à bien cette mission, elle devait sortir du plan de l'écliptique, le plan de rotation de la Terre et des planètes, ce qui est coûteux en énergie. Aussi, avec mes collègues du CESR et de l'Institut Max-Planck de Garching, nous avons construit un instrument très léger, nommé GBR (pour *Gamma-Ray Burst*, ou «sursaut de rayonnement gamma»).

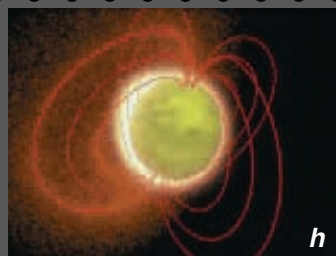
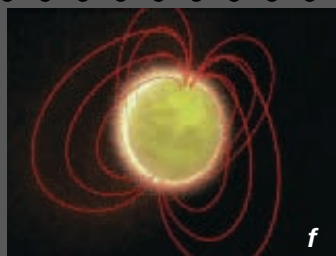
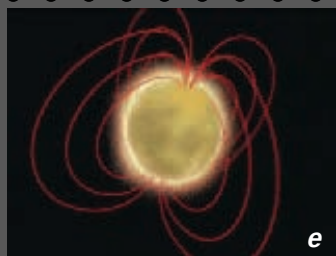
L'instrument ne pesait que deux kilogrammes avec une surface sensible de 20 centimètres carrés.

À l'opposé, l'Observatoire *Compton* (GRO), mis au point par la NASA, était la plus lourde sonde spatiale scientifique jamais mise en orbite. Elle emportait notamment huit détecteurs qui traquaient les sources gamma transitoires (BATSE), dont chacun avait une surface de collecte cent fois plus grande que celle d'*Ulysse* (pour des raisons d'orientation, chaque sursaut était reçu sur un ou deux de ces détecteurs).

Malgré leurs différences de conception, les deux instruments étaient complémentaires. La spécialité de BATSE était la détection des sursauts très faibles, mais avec une incertitude de plusieurs degrés sur la localisation. En raison de sa petite taille, le détecteur d'*Ulysse* était peu sensible et n'enregistrait que les sursauts les plus intenses. Toutefois, comme *Ulysse* était loin de la Terre, lorsque les deux engins détectaient un même sursaut, la comparaison des temps d'arrivée du signal sur les deux détecteurs autorisait la localisation de la source avec une excellente précision, parfois inférieure à la minute d'angle. Cette complémentarité fut cruciale dans l'étude des sources gamma à répétition. Ainsi, en 1992, lorsque SGR 1900-14 s'est brièvement manifesté par quatre sursauts, après de longs mois de silence, nous avons déterminé sa position avec une bien meilleure précision (voir la figure 4).

L'observation multi-longueurs d'onde

En 1993, Shrinivas Kulkarni et ses collègues de l'Institut de technologie de Californie ont déterminé qu'un bon moyen de trouver la nature des sources gamma à répétition serait de les rechercher aux longueurs d'onde radio. Contrairement à la lumière visible, les ondes radio traversent sans trop d'absorption les zones de poussières de notre Galaxie. De surcroît, les électrons de haute énergie, présents dans les restes de supernovae, émettent dans



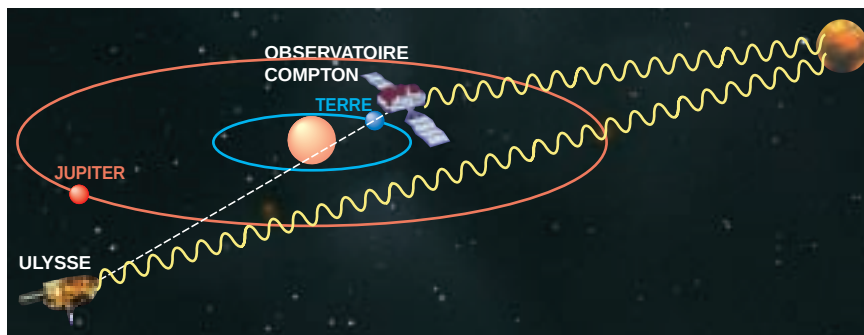
le domaine radio : si les vestiges de supernovae correspondaient aux sources gamma à répétition, ils seraient faciles à repérer en radio.

Pour étayer leur hypothèse, les astrophysiciens ont cherché, dans un catalogue qui recense les restes de supernovae qui émettent des ondes radio, un objet dont la position coïnciderait avec celle de SGR 1806-20. La source radio G 10.0-0.3 était à l'endroit visé (son nom correspond aux coordonnées de la source radio, exprimées dans le système de coordonnées galactiques). Cette correspondance indique que la source de rayonnements gamma est dans le vestige de la supernova, mais elle n'en constitue pas une preuve absolue : les deux sources pourraient être alignées dans le ciel par pure coïncidence.

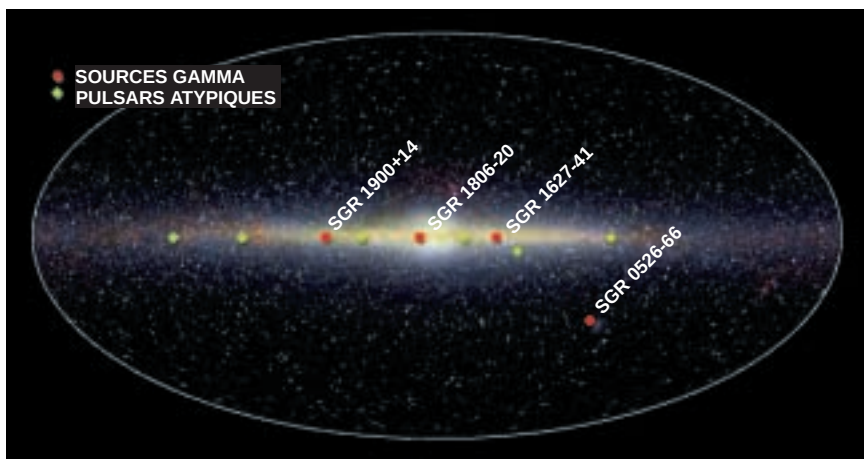
Par chance, en 1993, après un sommeil de sept ans, SGR 1806-20 se réveilla. Cette fois, les scientifiques étaient prêts. Les sursauts furent enregistrés non seulement par BATSE et par *Ulysse*, mais également par le satellite japonais ASCA dont la caméra, sensible aux rayons X, fut pointée en direction de la source. Par un autre hasard heureux, la source émit un sursaut alors même que cette caméra X l'observait, ce qui permit la détermination de sa position à une minute d'arc près environ. Le sursaut émanait bien du vestige radio de la supernova, et leur lien fut définitivement établi.

De surcroît, la source continua à émettre des rayons X alors qu'elle n'émettait plus de rayonnement gamma. Or, une source X ponctuelle dans un reste de supernova est la signature de la présence d'une étoile à neutrons. D'après le spectre X enregistré, les astronomes établirent que la source du sursaut était une étoile à neutrons dans un état d'activité lente, mais continue.

Après la localisation de SGR 1806-20 dans un vestige de supernova, plusieurs astronomes ont recherché un reste de supernova qui pourrait être associé à SGR 1900+14. Chryssa Kouveliotou et ses collègues du Centre Marshall de la NASA proposèrent plusieurs candidats, mais, bien que tous soient



4. PAR TRIANGULATION, on a localisé la source du sursaut gamma du 27 août 1998 à moins d'une minute d'angle près. Deux détecteurs, BATSE et GRB, respectivement à bord de l'Observatoire Compton et de la sonde Ulysse, ont enregistré le sursaut. Comme Ulysse était alors loin de la Terre, en comparant les temps d'arrivées du sursaut sur les deux détecteurs, les astronomes déduisent précisément la position de la source.



5. POSITION DES SOURCES GAMMA À RÉPÉTITION (SGR) et des pulsars atypiques par rapport à la Voie lactée. Excepté SGR 0526-66, située dans le Grand Nuage de Magellan, toutes ces sources sont dans notre Galaxie et proche du plan galactique.

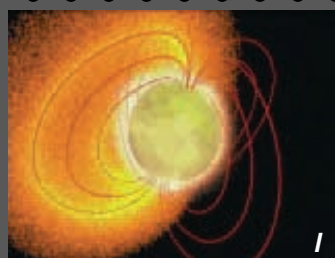
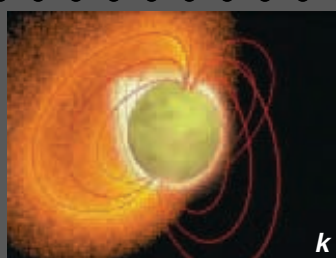
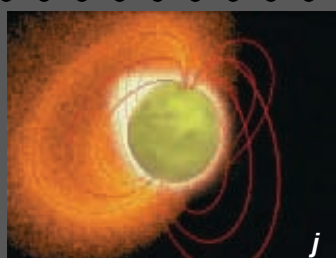
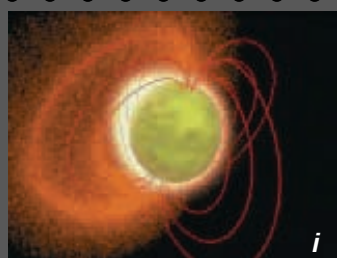
proches de la source, aucun ne correspondait exactement à sa position.

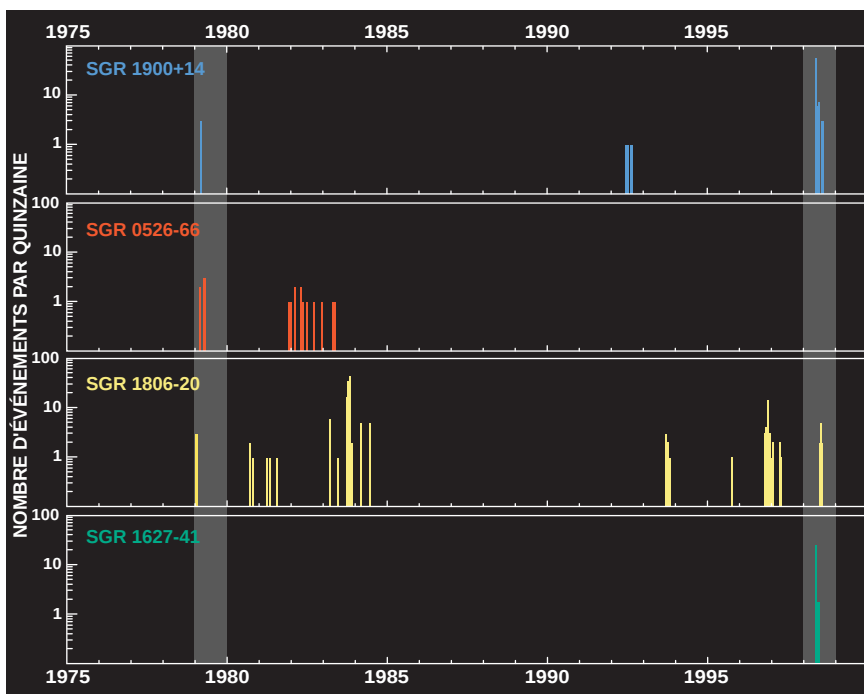
L'observation à une autre longueur d'onde serait-elle plus efficace ? Comme les ondes radio, les rayons X traversent des régions où la lumière visible est absorbée. En raison des électrons de haute énergie qu'ils contiennent, les restes de supernovae émettent parfois des rayons X. De même, les étoiles à neutrons que l'on trouve au cœur des restes de supernovae sont de bonnes sources de rayons X.

La recherche de l'homologue de la source gamma a alors repris, mais dans le domaine X. Gautham Vasisht et ses collègues de l'Institut de technologie de Californie ont compilé un catalogue

de sources de rayonnement X. Ils ont trouvé plusieurs sources pouvant correspondre à SGR 1900+14, mais, comme cela avait été initialement le cas pour SGR 1806-20, ces sources pouvaient simplement être sur la même ligne de visée que la source gamma. Pour le vérifier, il fallait observer la source avec un instrument de meilleure résolution.

Mes collègues et moi avons fait une demande d'observation prolongée de SGR 1900+14 en rayons X avec le satellite allemand ROSAT. Cet observatoire en orbite autour de la Terre est équipé d'une caméra à rayons X très sensible, capable de déterminer la position des émetteurs célestes de rayons X avec une précision meilleure que la minute





6. L'HISTOIRE DE LA DÉCOUVERTE DES MAGNÉTOILES commence à la fin des années 1970 avec la découverte de la première source de sursauts gamma à répétition. À la fin des années 1980, on connaissait trois telles sources, mais on ignorait leur origine. En 1992, la théorie des magnétoiles a unifié ces observations en un modèle cohérent, corroboré par l'observation récente d'une quatrième source gamma à répétition.

d'angle. Nous avons alors confirmé la présence d'une source X à la position de la source gamma, mais il n'était toujours pas exclu qu'il s'agisse d'une coïncidence. Néanmoins, nous étions alors enclins à penser que deux des sources gamma à répétition connues émettaient des rayons X en continu.

Peu de temps après, Richard Rothschild, de l'Université de San Diego, ajouta la troisième source à répétition à cette liste : à l'aide de ROSAT, il montra que SGR 0525-66, d'où nous était parvenu le puissant sursaut du 5 mars 1979, était également une source continue de rayonnement X.

Outre leur caractéristique d'émission de rayonnement gamma, ces sources gamma à répétition avaient deux autres propriétés communes : elles émettaient du rayonnement X, et elles semblaient localisées dans des restes de supernovae. Vraisemblablement, ces émissions gamma émanaient d'étoiles à neutrons, mais d'un type

nouveau. La question s'imposait : par quel mécanisme des étoiles à neutrons émettraient-elles des sursauts de rayonnement gamma ?

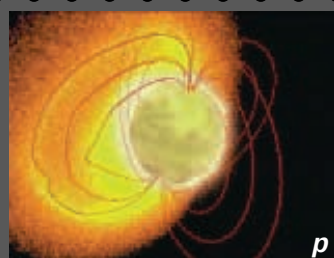
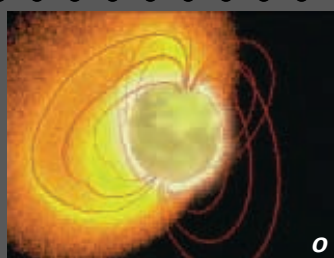
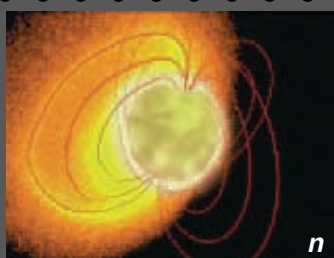
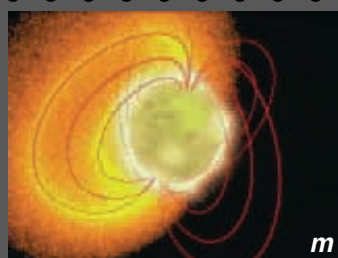
Les séismes émetteurs

En 1992, Bohdan Paczynski, de l'Université de Princeton, émit une hypothèse audacieuse : la source de l'émission très énergétique du 5 mars 1979 serait bien une étoile à neutrons, mais dont le champ magnétique serait mille fois plus intense que celui des étoiles à neutrons ordinaires. Un tel champ constituerait un vaste réservoir d'énergie où l'étoile puiserait l'énergie des sursauts. De plus, avec un champ magnétique intense, le phénomène de diffusion est réduit. Or, dans la diffusion entre les photons du rayonnement gamma et les électrons ambiants, l'énergie des photons qui s'échappent de l'étoile est transférée aux électrons. Ainsi, avec un intense champ magné-

tique, la diffusion est faible, et le flux de rayonnement gamma s'échappe sans perte d'énergie.

Si cette hypothèse proposait une source d'énergie pour les sursauts, elle n'expliquait pas leur cause. En 1995, Chris Thompson, de l'Institut canadien d'astrophysique théorique, à Toronto, et Rob Duncan, de l'Université du Texas, publièrent un long article faisant le lien entre la théorie des champs magnétiques intenses et les nombreuses années d'observation des sources gamma à répétition. Dans ce modèle qu'ils nommèrent «magnétoïles», l'intense champ magnétique de l'étoile à neutrons, ancré dans sa croûte solide (comme le champ magnétique d'un aimant est ancré dans ce dernier), exerce sur celle-ci une contrainte. Sous l'effet de cette force, la croûte de l'étoile à neutrons craque de temps à autre, ce qui réduit la contrainte. Bien que ce tremblement de croûte reste confiné à une région de la surface de l'étoile et bien qu'il ne représente qu'une faible fraction de l'énergie interne de l'étoile à neutrons, il est extrêmement puissant à l'échelle des tremblements terrestres. L'énergie libérée lors d'un tremblement de croûte typique correspondrait à un tremblement de terre de magnitude 14, d'une intensité un million de fois supérieure aux séismes terrestres de magnitude 8 qui détruisent des villes entières.

Ces tremblements de croûte secouent violemment les lignes de champ magnétique attachées à la surface de l'étoile. De la même manière que le champ magnétique terrestre piège des particules chargées, comme dans les ceintures de Van Allen, le champ magnétique de l'étoile à neutrons se comporte comme un piège à particules. Dans le cas de la magnétoïle, les violentes secousses subies par les lignes de champ magnétique accélèrent des électrons créés dans les champs intenses jusqu'à des énergies très élevées qu'elles perdent par émission de rayonnement synchrotron : les sursauts gamma (le rayonnement synchrotron est émis par toute particule



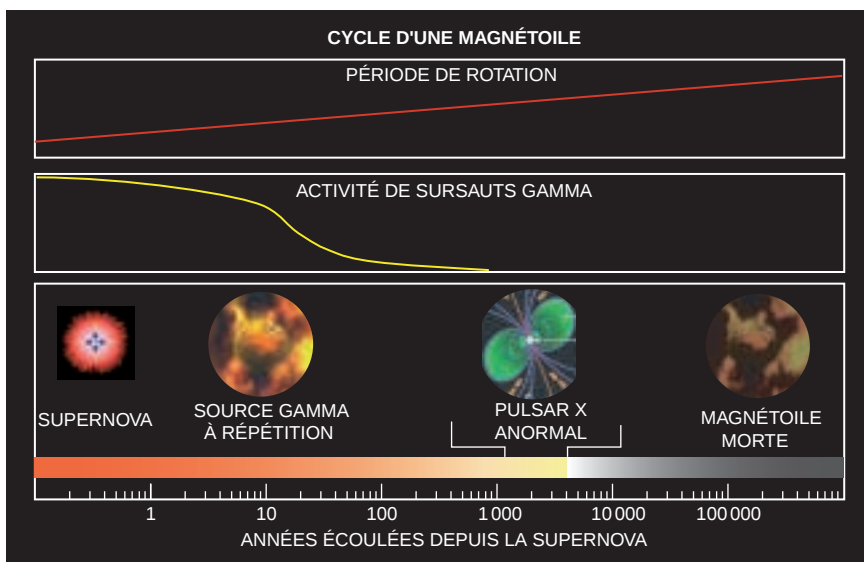
chargée accélérée). Ce mécanisme explique la majeure partie de l'activité observée, y compris les sursauts moins énergiques, mais pas les phénomènes plus rares de sursauts majeurs, tels que ceux du 5 mars 1979 et du 27 août 1998, car l'énergie libérée par ces tremblements de croûte superficiels n'est pas suffisante.

Un mécanisme plus global intervient alors. Les forces exercées à la surface de l'étoile à neutrons par le champ magnétique ne sont pas totalement éliminées par les craquements localisés de la croûte. Sur une période d'une centaine d'années, les contraintes résiduelles s'accumulent sur toute la surface de l'étoile, et un tremblement de croûte ne suffit pas à les réduire. À cette étape, un séisme stellaire d'une violence inouïe survient : l'ensemble de la croûte de l'étoile se fracture en profondeur, et l'énergie engendrée équivaut à celle d'un séisme de magnitude 22.

Suite à cet événement catastrophique, la surface de l'étoile se réaménage, des régions d'où partent des lignes de champ magnétique de polarités opposées sont entraînées avec la croûte vers de nouveaux sites. Lorsque des lignes de champ de polarités opposées se rencontrent, elles s'annihilent et libèrent l'énergie qu'elles renferment. Cette énergie peut être directement utilisée pour l'accélération d'électrons à de grandes énergies ; ceux-ci se désexcitent alors en émettant des rayons gamma de haute énergie dans un sursaut important. Certaines portions de la surface sont échauffées, peut-être jusqu'au point de fusion de la croûte de l'étoile à neutrons, essentiellement constituée de fer. Cette fusion crée des points chauds qui subsistent longtemps après le sursaut initial. Eux aussi se refroidissent en émettant des rayons gamma, et comme l'étoile tourne, les points chauds en rotation apparaissent et disparaissent : le rayonnement gamma apparaît sous forme d'une émission périodique.

Déplacement rapide et rotation lente

La force du modèle de magnétoile réside dans le fait que non seulement il explique la plupart des caractéristiques des sources gamma à répétition, mais qu'il prévoit aussi certaines caractéristiques vérifiables. Entre autres, il prévoit que les étoiles à neutrons à l'origine des sources gamma à répétition sont éjectés



7. UNE MAGNÉTOILE COMMENCE SA VIE en tant que supernova, une explosion d'étoile. Durant l'explosion, l'étoile à neutrons se transforme en une puissante source de rayonnement gamma à répétition. Cette phase dure 10 000 ans environ, après quoi, durant 40 000 ans environ, l'étoile à neutrons devient un pulsar X «anormal», une étoile à neutrons à la rotation particulièrement lente. Finalement, la magnétoile n'émet plus de rayonnement décelable et devient un objet sombre.

de leur lieu de naissance. Les astrophysiciens supputent que le fort champ magnétique des magnétoiles, 1 000 fois plus intense que celui des étoiles à neutrons ordinaires, focalise les neutrinos émis juste après l'explosion. Comme un tuyau d'arrosage qui part dans la direction opposée à celle du jet d'eau, par réaction, l'étoile à neutrons résultante est accélérée jusqu'à 1 000 kilomètres par seconde. Les observations confirment la mobilité des magnétoiles : on ne les observe pas au centre des vestiges de leur supernova, mais assez décentrées, voire très éloignées.

Autre caractéristique attendue : les magnétoiles perdraient leur énergie de rotation assez vite par émission d'ondes radio, car le freinage de la rotation est proportionnel au carré du champ magnétique et à l'inverse de la période. La vérification de cette prédiction n'était pas chose aisée, car l'allongement prévu n'est que de deux millisecondes par an. Grâce au satellite X de la NASA Rossi, Ch. Kouveliotou et ses collègues ont observé ce ralentissement.

Le modèle semble en mesure d'expliquer un autre mystère de l'astrophysique, celui des prétendus pulsars atypiques à rayons X. Ces derniers sont des étoiles à neutrons en rotation lente, sans compagnon apparent. Ils sont anormaux, dans le sens où ils sont plus lents que ce que l'on attendrait d'une étoile à neutrons isolée et que leur spectre X est plus mou. S'agit-il de vieilles magnétoiles ? La lenteur de leur

rotation corrobore cette idée, puisque la période de rotation des magnétoiles est supérieure à celle des étoiles à neutrons ordinaires.

Combien y a-t-il de magnétoiles ? Une supernova sur dix donnerait naissance à une magnétoile, c'est-à-dire environ une tous les mille ans (dans une galaxie comme la nôtre, il y a une nouvelle supernova par siècle). La raison n'en est pas très claire, mais cette fréquence est vraisemblablement liée aux détails de l'explosion. L'étoile à neutrons nouvellement formée commence son existence en rotation très rapide, ce qui engendre à l'intérieur de l'étoile un mécanisme qui multiplie son champ magnétique par un facteur compris entre 100 et 1 000. Pendant les 10 000 premières années de sa vie, la magnétoile est une source gamma à répétition, et connaît des périodes d'activité au cours desquelles elle émet soit une succession de sursauts courts et relativement faibles (à des intervalles de quelques années), soit un sursaut majeur (à peu près un par siècle). Elle évolue ensuite en un pulsar à rayons X anormal et reste observable sous cette forme pendant environ 40 000 ans environ. Après cette période, la magnétoile sombre dans l'inactivité et l'obscurité. Elle cesse d'évoluer et rentre dans les rangs des milliards d'objets sombres de notre Galaxie (voir la figure 6).

Si ces estimations sont justes, il devrait y avoir, à un moment donné, environ dix sources gamma à répétition

dans notre Galaxie. Jusqu'à aujourd'hui, nous en avons trouvé trois, dont deux dans notre Galaxie. Ces derniers mois, Ch. Kouveliotou, E. Mazets et moi-même avons analysé les données de nos expériences et en avons conclu à la présence d'une troisième magnétoile au sein de notre Galaxie. Cet objet, SGR 1627-41, a les mêmes caractéristiques que les trois autres magnétoiles, à savoir la répétition, le spectre énergétique mou, les sursauts courts et une localisation près d'un reste de supernova avec une émission de rayonnement X associée.

Nous avons peut-être ainsi identifié le tiers des magnétoiles de notre Galaxie, mais il est également possible que la théorie surestime légèrement le nombre d'objets de ce type en activité à un moment donné. En astrophysique, un résultat exact à un facteur trois près constitue déjà une approximation satisfaisante.

Des prédictions vérifiables sont souvent le talon d'Achille d'un modèle par ailleurs solide. Faute de prévisions, un modèle peut être impossible à vérifier, mais, dans le cas où des prédictions sont possibles, elles conduisent souvent à l'abandon du modèle, quand les observations les mettent en défaut. Jusqu'à présent, le modèle de la magnétoile a passé avec succès les tests qu'on a pu lui faire subir.

À mesure que le temps passera et que nous en apprendrons davantage sur ces étranges objets grâce à une instrumentation spatiale plus élaborée, nous devons peut-être ajuster la théorie pour incorporer de nouvelles données. Ce modèle constitue pour l'instant la meilleure explication d'une énigme astronomique vieille de vingt ans, en invoquant les champs magnétiques les plus intenses connus de l'Univers.

Kevin HURLEY est astronome à l'Université de Berkeley.

K. HURLEY et al., *Precise Interplanetary Network Localization of a New Soft Gamma Repeater SGR1627-41*, in *Astrophysical Journal Letters*, vol. 519, pp. L143, 1999.

K. HURLEY et al., *ASCA Discovery of an X-ray Pulsar in the Error Box of SGR1900+14*, in *Astrophysical Journal Letters*, vol. 510, pp. L111, 1999.

K. HURLEY et al., *A Giant Periodic Flare from the Soft Gamma Ray Repeater SGR1900+14*, in *Nature*, vol. 397, p. 41, 1999.
