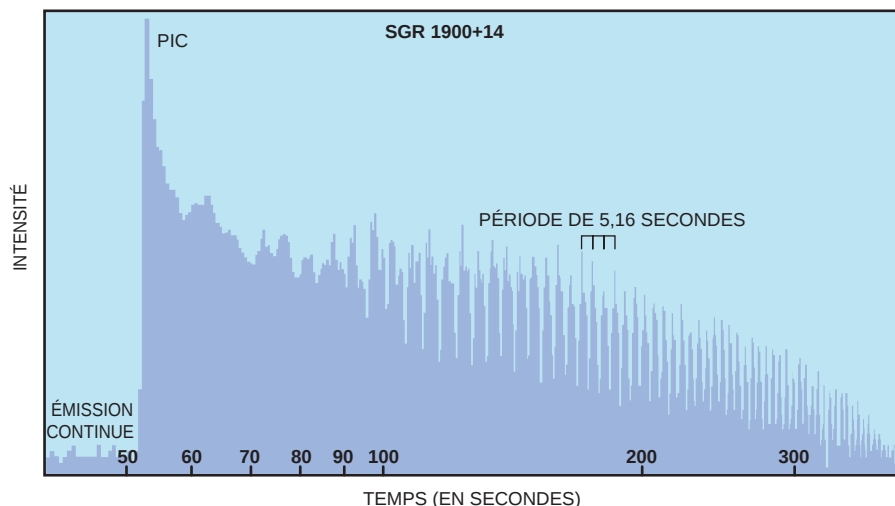




3. L'ÉMISSION GAMMA DU SURSAUT DU 27 AOÛT 1998, le plus intense sursaut jamais observé, a été enregistrée par la sonde *Ulysse*. Après un pic d'intensité qui a duré quelques secondes, l'émission a décro avec de brefs sursauts qui revenaient toutes les 5,16 secondes.

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»).

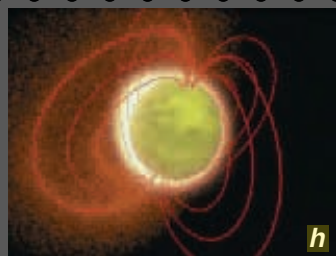
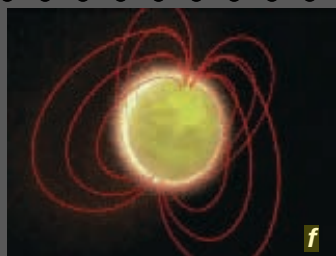
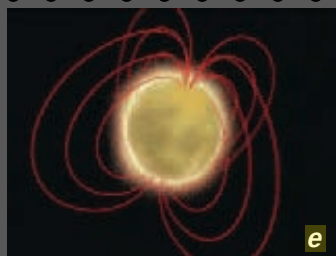
L'instrument ne pesait que deux kilogrammes avec une surface sensible de 20 centimètres carrés.

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



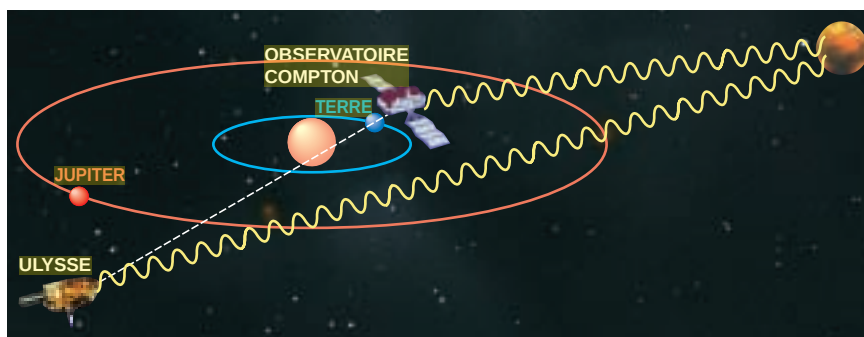
le domaine radio : si les vestiges de supernovae correspondaient aux sources gamma à répétition, ils seraient faciles à repérer en radio.

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.

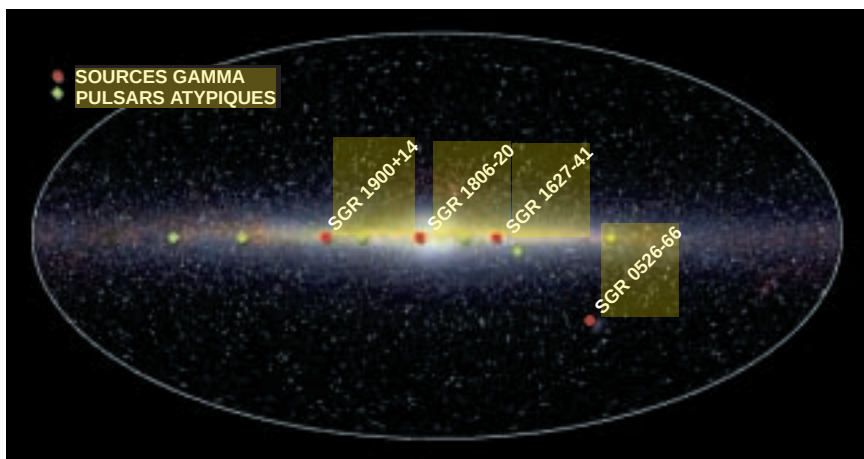
Par chance, en 1993, après un sommeil de sept ans, SGR 1806-20 se réveilla. Cette fois, les scientifiques étaient prêts. Les sursauts furent enregistrés non seulement par BATSE et par *Ulysse*, mais également par le satellite japonais ASCA dont la caméra, sensible aux rayons X, fut pointée en direction 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.

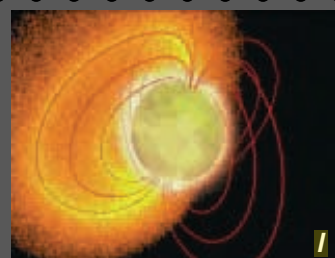
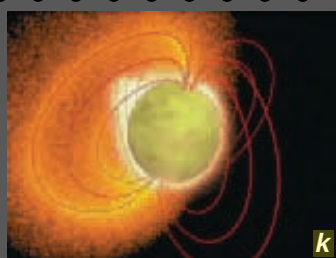
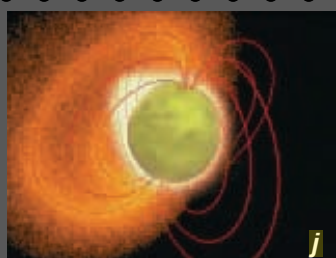
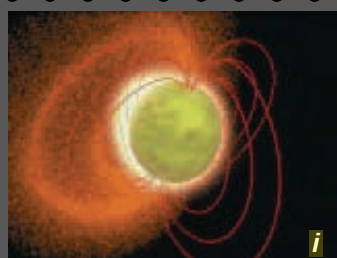
proches de la source, aucun ne correspondait exactement à sa position.

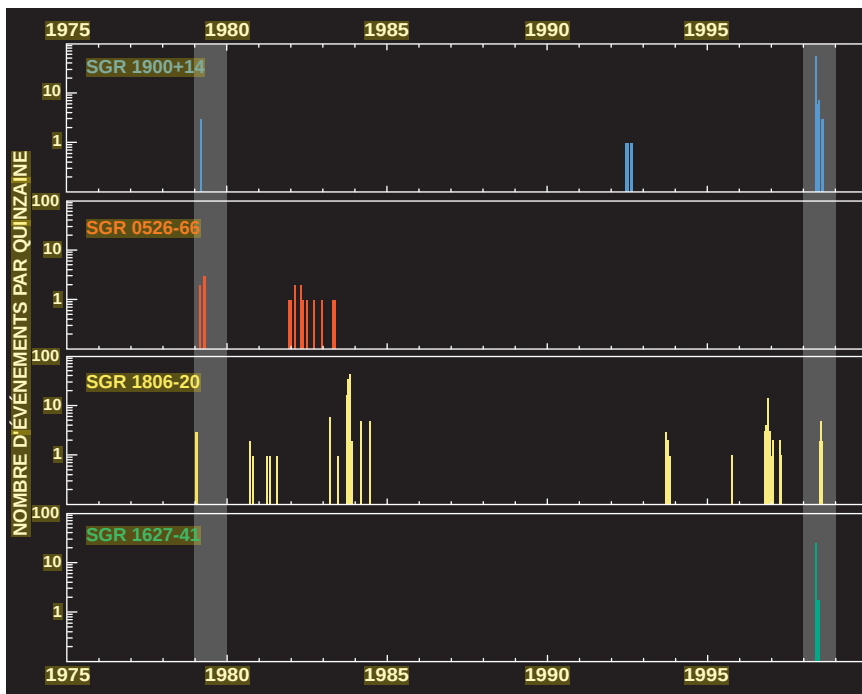
L'observation à une autre longueur d'onde serait-elle plus efficace ? Comme les ondes radio, les rayons X traversent des régions où la lumière visible est absorbée. En raison des électrons de haute énergie qu'ils contiennent, les restes de supernovae émettent parfois des rayons X. De même, les étoiles 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 compulsé 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 «magnétoïle», 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

