



© Alain Harzog, en haut : Simon Henein

imbriqué dans un chariot secondaire, les deux soutenus par des systèmes de lames. Un déplacement Δx du chariot primaire dans la direction X se traduit par une force de rappel proportionnelle à Δx et entraîne aussi le chariot secondaire; de même, le déplacement Δy du chariot secondaire dans la direction Y perpendiculaire à X se traduit par une force de rappel proportionnelle à Δy (voir l'encadré page précédente). Ces lames sont dimensionnées de telle sorte que le chariot secondaire est rappelé avec la même force par unité de longueur (la même constante de ressort) dans la direction X et dans la direction Y , de sorte qu'il parcourt les ellipses attendues.

Le système ainsi construit est linéaire et isotrope : il respecte les conditions du cahier des charges et constitue une matérialisation du système solaire isochrone imaginé par Newton suffisamment fidèle pour constituer une base de temps horlogère. Le concept d'isotropie est à l'origine du nom *IsoSpring* que nous avons donné à cet oscillateur, par contraction des mots anglais *isotropic* (« isotrope ») et *spring* (« ressort »).

Le mouvement des chariots est une pure translation, donc ils ne changent pas d'orientation durant leur déplacement : le système se comporte comme si la « planète » (la masse mobile centrale, c'est-à-dire le chariot primaire) était une masse ponctuelle. Les lames sont en outre naturellement très rigides dans

LA BASE DE TEMPS *IsoSpring* a été mise à profit pour réaliser le prototype d'un mouvement d'horloge énergétiquement beaucoup plus efficace qu'un mouvement d'horloge à échappement. Il reste à le miniaturiser pour le faire entrer dans le boîtier d'une montre-bracelet.

■ BIBLIOGRAPHIE

L. Rubbert et al., **Isotropic springs based on parallel flexure stages**, *Precision Engineering*, vol. 43, pp. 132-145, 2016.

S. Henein et al., ***IsoSpring : vers la montre sans échappement***, actes de la Journée d'étude de la SSC (Société suisse de chronométrie), pp. 49-58, 2014.

C.-P. Sesin, **Mesure du temps**, *Dossier Pour la Science* n° 37 [« La science au Moyen Âge »], pp. 114-115, octobre-janvier 2003.

L. Defossez, **Les savants du XVII^e siècle et la mesure du temps**, éditions du Journal Suisse d'Horlogerie et de Bijouterie, 1946.

la direction verticale, de sorte qu'elles contraignent le mouvement à rester dans le plan d'oscillation. Ainsi, lorsque le mécanisme est placé horizontalement, la gravité reste toujours perpendiculaire au mouvement et n'affecte donc pas la dynamique du système.

Par ailleurs, le mouvement de l'oscillateur est entretenu par une manivelle télescopique reliée au ressort de barillet, c'est-à-dire au ressort moteur du mécanisme d'horlogerie. Ce dispositif remplace l'échappement en restituant de manière continue à l'oscillateur l'énergie qu'il perd par frottement. La consommation énergétique du mouvement est considérablement réduite pour deux raisons. D'une part, l'utilisation de ressorts à lames, qui évite l'emploi d'axes susceptibles de frotter, augmente le facteur de qualité d'un ordre de grandeur (c'est-à-dire le multiplie par 10). D'autre part, le remplacement de l'échappement par une simple manivelle télescopique (voir l'encadré page précédente) se traduit par un rendement de cet étage de transmission de l'ordre de 80 % à 95 %, à comparer aux 35 % des échappements classiques...

Un mécanisme horloger continu et silencieux

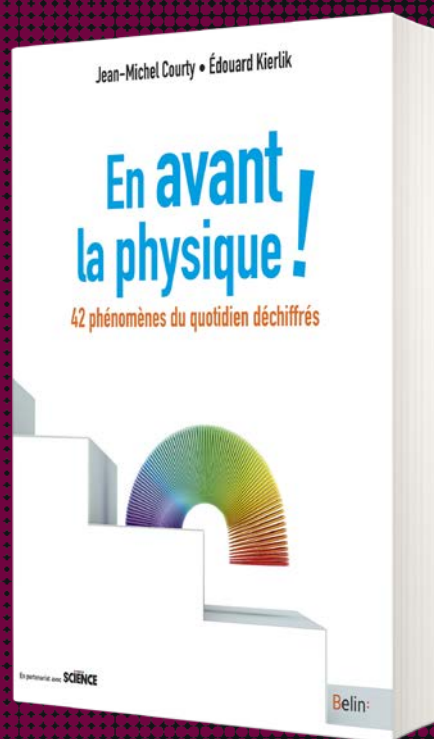
En 2015, notre équipe a construit un prototype d'horloge fonctionnelle dotée d'un oscillateur *IsoSpring* à deux chariots oscillants dont la performance chronométrique et le rendement sont prometteurs (voir la figure à gauche ci-dessus). Sur le plan conceptuel, le projet *IsoSpring* se résume à passer des oscillateurs horlogers classiques, tous à un degré de liberté (l'oscillation porte sur une seule variable angulaire), à des oscillateurs à deux degrés de liberté (l'oscillation porte sur deux variables indépendantes). Ceux-ci produisent des trajectoires cycliques, unidirectionnelles et continues, et rendent ainsi l'échappement caduc.

Nous poursuivons le projet en testant diverses architectures. Nous avons par exemple construit un prototype d'horloge dont l'oscillateur est une sphère, dont le mouvement promet d'être moins sensible à la gravité. Tout cela présage un saut quantitatif de la réserve de marche et de la précision chronométrique des horloges, grâce à l'univers isochrone de Newton qui nous a inspiré un microcosme horloger continu et silencieux. ■

Le nouvel opus de deux vulgarisateurs hors pair !

Une bouteille qui chante. Un verre de chocolat soluble qui tinte. Un carillon dont les cloches homothétiques couvrent toute la gamme. Un escalier qui joue du clairon. Une sculpture qui filtre certains sons... Et en avant la physique !

18,5 x 24,5 cm - 192 pages - 24 euros



Séismes et tsunamis, comment les expliquer ? Et pourra-t-on un jour les prédire ?

Une découverte passionnante de la lente évolution de nos connaissances sur les séismes, qui se lit comme un roman !

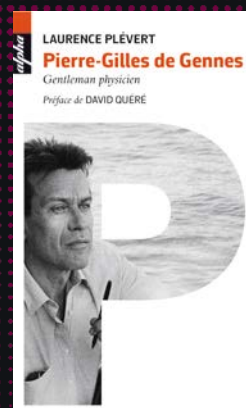
15 x 22 cm - 288 pages - 19,50 €

Et aussi...

Dans notre collection de livres de poche



10 x 17 cm - 304 pages - 9,90 €



10 x 17cm - 392 pages - 9,90 €

Des kilonovæ aux ultranovæ

Daniel Kasen

De nombreuses étoiles achèvent leur vie en de formidables explosions : les supernovæ. Or celles-ci se sont révélées d'une intrigante diversité. Quels sont les mécanismes susceptibles d'en rendre compte ?

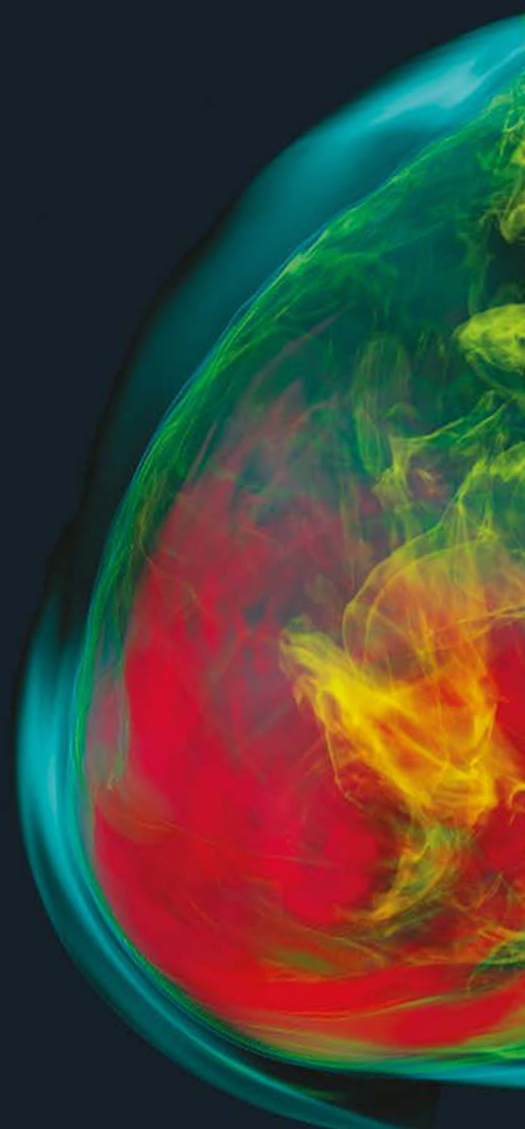
À peu près chaque seconde, quelque part dans l'Univers observable, une étoile meurt à la suite d'une catastrophe cosmique : collision avec une autre étoile, effondrement de l'astre sur lui-même éventuellement suivi de la formation d'un trou noir ou d'une explosion en supernova. Ainsi, l'Univers est bien plus dynamique que ne le laisse penser le calme apparent du ciel nocturne. Et alors que les chercheurs reconstituent depuis près d'un siècle les grandes lignes de l'évolution cosmique, c'est seulement depuis quelques années que les astronomes ont les moyens d'étudier des événements à l'échelle des étoiles qui se produisent en quelques jours voire quelques heures, ceux-là même qui correspondent à la mort de ces astres.

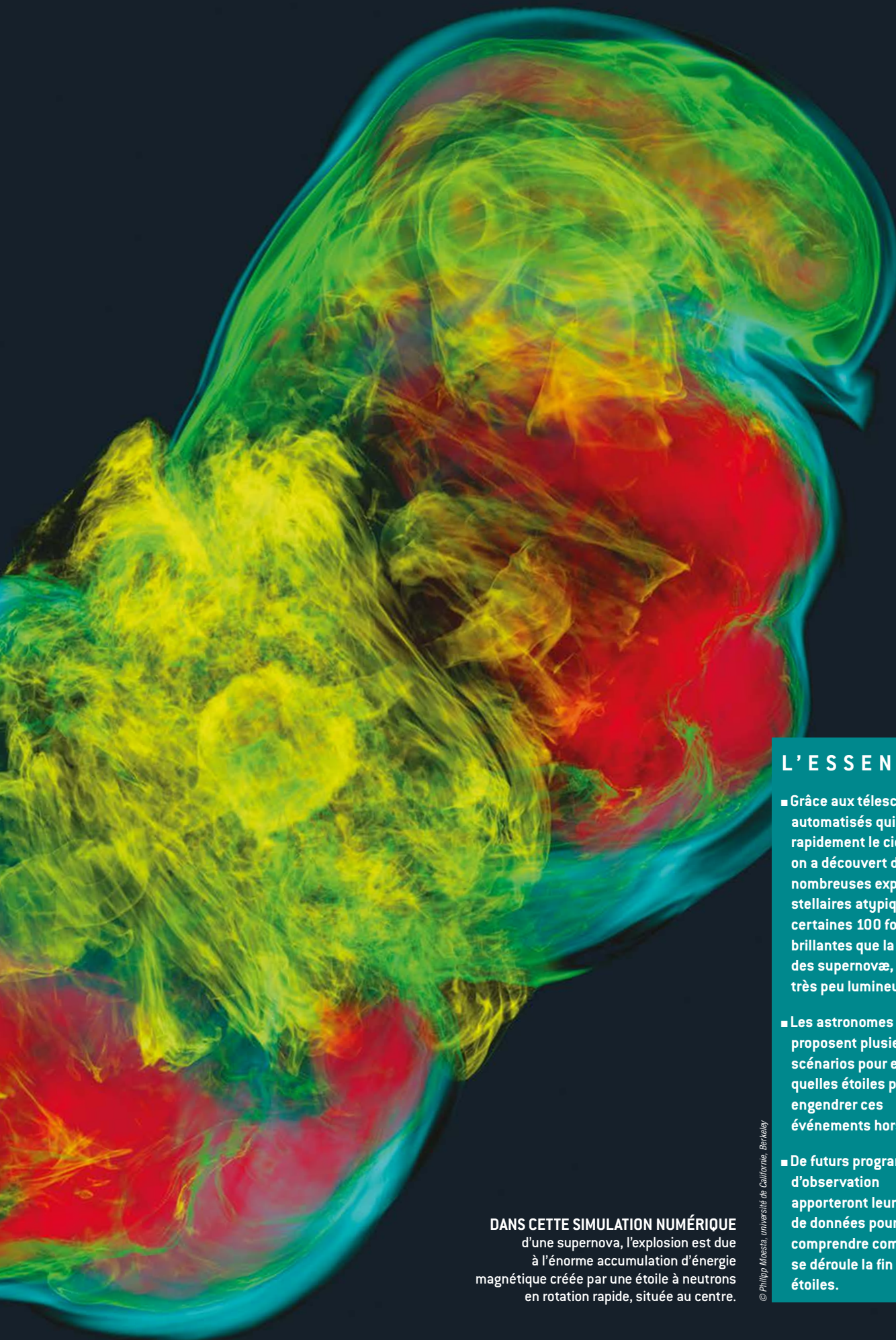
Pourtant, l'homme a été à maintes reprises témoin du caractère fragile de la vie des étoiles. En 1006, par exemple, les Chinois ont observé une « étoile invitée » visible à l'œil nu pendant quelques semaines. Tycho Brahe a consigné un événement similaire en 1572, et Johannes Kepler un autre, trente ans plus tard. Nous savons aujourd'hui que ces apparitions correspondaient à des explosions d'étoiles

en supernovæ. À leur pic de luminosité, ces supernovæ brillent plus intensément que un milliard de soleils. Néanmoins, la plupart se produisent très loin de nous et nous apparaissent comme de simples points lumineux qui passent souvent inaperçus dans l'immensité du ciel.

Les techniques modernes ont révolutionné l'étude de l'Univers. Les télescopes sont désormais robotisés et équipés de caméras numériques de haute résolution. Les données qu'ils recueillent sont analysées automatiquement par des logiciels de traitement d'image et de reconnaissance de motifs. Ces systèmes font un suivi régulier de vastes régions du ciel, à l'affût de tout ce qui explose dans la nuit. Depuis une décennie, grâce à ces outils, les astronomes découvrent chaque année des milliers de nouvelles explosions stellaires : chaque semaine, on découvre autant de nouvelles supernovæ que l'on n'en avait vu tout au long du XX^e siècle.

Les astronomes observent davantage de supernovæ, mais ils en découvrent aussi des cas atypiques. Certaines explosions stellaires sont anormalement brillantes, une centaine de fois plus lumineuses





DANS CETTE SIMULATION NUMÉRIQUE
d'une supernova, l'explosion est due
à l'énorme accumulation d'énergie
magnétique créée par une étoile à neutrons
en rotation rapide, située au centre.

L'ESSENTIEL

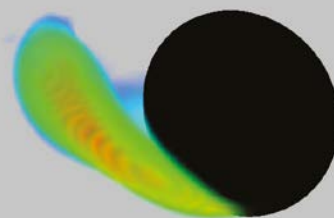
- Grâce aux télescopes automatisés qui balaient rapidement le ciel, on a découvert de nombreuses explosions stellaires atypiques, certaines 100 fois plus brillantes que la majorité des supernovæ, d'autres très peu lumineuses.
- Les astronomes proposent plusieurs scénarios pour expliquer quelles étoiles peuvent engendrer ces événements hors norme.
- De futurs programmes d'observation apporteront leur lot de données pour comprendre comment se déroule la fin des étoiles.

© Philipp Moesta, université de Californie, Berkeley

1



2



© François Foucart, Lab. américain Lawrence-Berkeley, université de Californie, Berkeley

UNE ÉTOILE À NEUTRONS (*en vert*) fusionne avec un trou noir dans cette simulation numérique. L'étoile à neutrons est d'abord déformée par l'attraction du trou noir [1 et 2] jusqu'à créer une queue [3]. Elle finit par s'enrouler autour du trou noir [4] avant d'y être engloutie. Le processus s'apparente au scénario qui décrit la fusion de deux étoiles à neutrons et qui pourrait expliquer certaines supernovæ peu lumineuses.

■ L'AUTEUR



Daniel KASEN est astrophysicien à l'université de Californie à Berkeley, aux États-Unis, ainsi qu'au laboratoire américain Lawrence-Berkeley.

que les supernovæ ordinaires, tandis que d'autres sont cent fois moins brillantes. Certaines sont rouge foncé, d'autres ultraviolettes. Certaines brillent fortement des années durant, d'autres disparaissent en quelques jours. Les morts d'étoile sont infiniment plus variées que les chercheurs ne l'avaient pensé.

Pour comprendre cette diversité d'explosions stellaires, les astronomes tentent de déterminer les mécanismes en jeu. En étudiant ces événements, ils en sauront plus sur la vie et la mort de ces étoiles, ainsi que sur les processus physiques à l'œuvre dans les conditions les plus extrêmes de température, de densité et de gravité.

Les supernovæ ont aussi quelque chose à nous apprendre sur nos origines. Après le Big Bang, l'Univers ne contenait essentiellement que les plus légers des atomes : de l'hydrogène et de l'hélium. D'après la théorie de la nucléosynthèse stellaire, tout le reste (le calcium de nos os, le fer de notre sang, etc.) a été engendré par la fusion nucléaire se déroulant au cœur des étoiles, puis expulsé lors de l'explosion de celles-ci. On pensait que les supernovæ ordinaires créaient les éléments les plus lourds, mais la découverte de tant d'explosions hors norme suggère à présent que diverses cases du tableau périodique des éléments pourraient avoir des origines différentes. En observant un grand nombre de supernovæ très variées, nous devrions être en mesure de déterminer plus précisément

comment toute une gamme d'explosions stellaires a pu contribuer à produire le mélange d'éléments dont sont constituées notre planète et toute la vie qu'elle abrite.

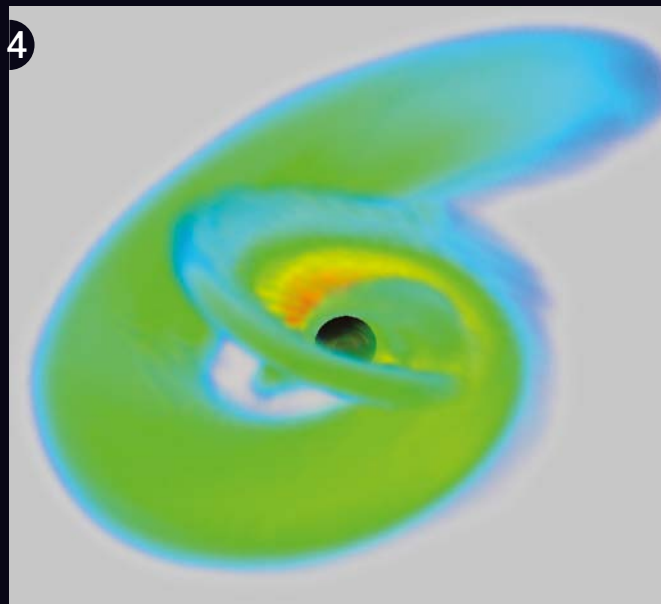
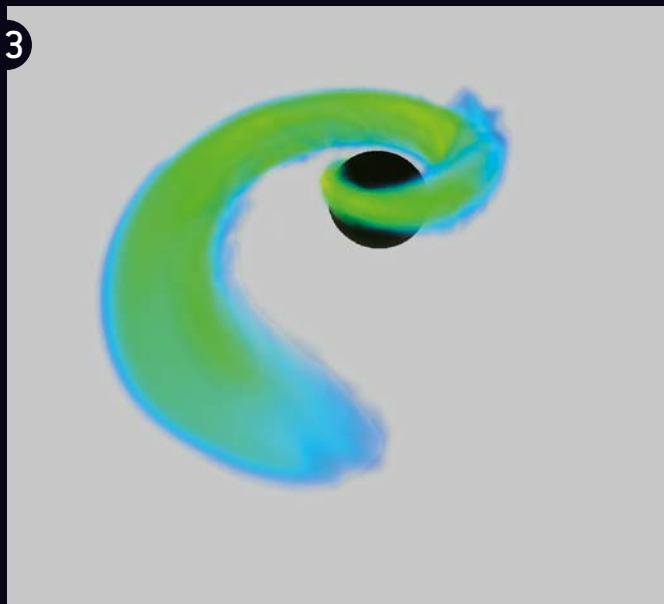
Pour comprendre à quel point certaines des supernovæ que nous découvrons sont étranges, commençons par nous intéresser aux supernovæ classiques, qui sont déjà en elles-mêmes des phénomènes extraordinaires.

Catastrophe stellaire

Une étoile est une sorte de réacteur nucléaire stable : une énorme boule de plasma (c'est-à-dire un gaz chaud de particules électriquement chargées), liée par la gravité et alimentée par la fusion nucléaire au sein de son cœur comprimé. La chaleur issue de la fusion contrecarre la gravité et maintient l'étoile dans un état d'équilibre. Une explosion de supernova résulte d'une instabilité catastrophique dans cet équilibre des forces, quand la gravité l'emporte sur la combustion nucléaire, ou l'inverse.

Parmi les supernovæ classiques, on distingue différentes catégories. Nous laisserons ici de côté les « supernovæ de type Ia », importantes pour les cosmologistes et qui impliquent des naines blanches (des étoiles de masse comparable à celle du Soleil et de taille du même ordre que celle de la Terre).

Les supernovæ les plus répandues sont dites à effondrement de cœur. Elles concernent des étoiles de taille modérée



et faisant 10 masses solaires ou plus. Ces astres vivent des millions d'années pendant que leur hydrogène subit des réactions de fusion et forme des éléments de plus en plus lourds (hélium, carbone, oxygène, etc.). Une fois que tout a été transformé en fer, la fusion ne produit plus d'énergie mais en requiert. Elle ne peut donc plus se poursuivre. Il n'y a alors plus de force pour contrebalancer la gravité. La partie la plus profonde du cœur de l'étoile s'effondre sur elle-même et voit son volume comprimé d'un facteur un million, se transformant en un noyau ultradense, nommé étoile à neutrons: une boule de seulement quelques kilomètres de diamètre, mais de masse supérieure à celle du Soleil. L'énorme quantité d'énergie libérée lors de l'effondrement gravitationnel souffle le reste de l'étoile en un gigantesque feu d'artifice.

Pour se faire une idée de la puissance d'une explosion de supernova typique, disons qu'elle est comparable à celle qui serait libérée si le Soleil consommait toutes ses réserves d'hydrogène (de quoi entretenir sa combustion nucléaire pendant plus de 10 milliards d'années) en quelques secondes. Quand une supernova explose, la température interne de l'étoile monte à environ 3 milliards de degrés. Cela déclenche une onde de choc supersonique qui laisse dans son sillage un mélange d'éléments lourds fraîchement fusionnés, tels que du silicium, du calcium, du fer et des isotopes radioactifs du nickel, du cobalt et du titane.

En quelques minutes, l'étoile est soufflée en un nuage de cendres et de débris radioactifs, éjectés à une vitesse de 30 millions de kilomètres par heure, soit quelques pour cent de la vitesse de la lumière.

Le Soleil est trop peu massif pour finir en supernova, mais si c'était le cas, la première manifestation sur Terre en serait un bref éclair de rayons X intenses qui tuerait toute vie sur la planète. En quelques minutes, le nuage de débris solaires doublerait de taille et deviendrait un millier de fois plus brillant que le Soleil, mais il resterait trop opaque pour libérer toute la lumière piégée. Au bout de quelques heures, le nuage engloberait la Terre. Après quelques semaines, les cendres du Soleil auraient envahi tout le Système solaire. À ce stade, le nuage de débris deviendrait translucide et la lumière s'en échapperait, atteignant un pic d'environ un milliard de fois la luminosité solaire avant de pâlir définitivement.

Les astronomes n'observent presque jamais le bref éclair de rayons X émis par une supernova, et ils ne sont que rarement en mesure de retrouver une image d'archive de l'étoile telle qu'elle était avant son explosion. En général, on n'enregistre que la suite du processus: le nuage géant de débris radioactifs en expansion qui luit pendant des semaines, voire plus longtemps. En examinant cette lumière et les cendres, les astronomes tentent de reconstituer le passé de cette étoile, quel était son type et pourquoi elle a été détruite.

Parmi les supernovæ insolites récemment découvertes, les plus spectaculaires sont peut-être les explosions hyperénergétiques (ce que j'appelle des ultranovæ) qui sont au moins 100 fois plus lumineuses que les supernovæ ordinaires. Ce sont les supernovæ les plus brillantes, de sorte qu'elles sont visibles pratiquement jusqu'aux frontières de l'Univers observable. De tels événements sont très rares: il s'en produit peut-être un pour mille supernovæ ordinaires. Les astronomes n'ont pas encore assez d'éléments probants pour expliquer pourquoi ces explosions sont si brillantes, mais ils ont esquissé trois scénarios possibles. L'un d'eux explique peut-être toutes les ultranovæ que nous voyons, mais il est plus probable que les trois processus coexistent.

Des supernovæ ultrabrillantes

L'idée la plus naturelle est d'associer les ultranovæ aux étoiles extrêmement massives. Ces étoiles très grosses sont sensibles à toute une série d'instabilités. En particulier, le cœur des étoiles pesant entre 150 et 250 masses solaires pourrait devenir tellement chaud qu'un déluge de paires de particule matière-antimatière (plus précisément, des électrons et des positrons) s'y formerait. La production de ces particules a un coût énergétique qui saperait la force de pression s'opposant à la gravité

de l'étoile et entraînerait l'effondrement de son cœur, alors que son combustible nucléaire n'est pas totalement épuisé. Le résultat serait alors désastreux. La compression du cœur accélérerait la fusion qui s'emballerait, brûlant presque tout instantanément. Cette brusque libération d'énergie renverserait l'effondrement et ferait exploser l'étoile. Elle ne laisserait même pas d'étoile à neutrons derrière elle.

Ces explosions nucléaires géantes produiraient des nuages de débris 1000 fois plus radioactifs que ceux des supernovæ ordinaires. Et puisque ces nuages sont supposés extrêmement massifs et opaques, la lumière mettrait une année ou plus à s'en échapper. Les astronomes s'attendent donc à ce que les suites de ces explosions soient particulièrement brillantes et durables. Quelques-unes des ultranovæ récemment découvertes présentent ces caractéristiques. Il n'est pas encore clair pour les astronomes si ces observations confirment ce scénario ou si d'autres explications sont possibles. De futures observations d'autres événements aussi brillants et prolongés permettront peut-être de mieux identifier la composition et la vitesse du nuage de débris stellaires, et ainsi de confirmer ou d'infirmer ce scénario.

Une autre idée pour expliquer les ultranovæ est qu'elles auraient leur origine dans des étoiles de masse légèrement plus faible que les précédentes (autour de 70 à 150 masses solaires). On pense que ces étoiles sont sujettes à des instabilités comparables à celles de leurs sœurs plus massives, mais les conditions sont souvent moins sévères. Quand l'étoile commence à s'effondrer et que la fusion rapide de son carburant nucléaire s'enclenche, la force s'opposant à la gravité pourrait reprendre le dessus. L'étoile rebondirait, se dilaterait et mettrait un frein aux réactions nucléaires avant qu'elles ne soient hors de contrôle. L'astre retrouverait l'équilibre. Mais dans le processus, il aura probablement soufflé une bonne partie de ses couches externes, produisant une supernova « imposteur » : un sursaut qui ressemble à une pâle supernova.

Les étoiles de cette gamme de masses pourraient subir plusieurs de ces hoquets, perdant à chaque fois un peu plus de matière, jusqu'à ce qu'elles finissent par

épuiser leur combustible nucléaire. Elles exploseraient alors comme des supernovæ ordinaires, en expulsant leurs débris dans un environnement déjà encombré par la matière rejetée lors des crises précédentes. La collision violente du nuage de débris de la supernova avec ces restes devrait produire des feux d'artifice extrêmement brillants, qui expliqueraient certaines des ultranovæ.

En 2009, les astronomes ont remarqué ce qui ressemblait à une supernova assez ordinaire, quoique pâle. Nommée SN2009ip, elle a disparu en quelques semaines et a ensuite été essentiellement oubliée. Un an plus tard, à la surprise générale, on

Certaines
explosions stellaires
sont anormalement brillantes,
**100 fois plus
lumineuses que
les supernovæ
ordinaires**

observait une autre « supernova » pâle exactement au même endroit. Apparemment, l'étoile n'était pas encore morte. En 2012, les astronomes ont repéré une troisième bouffée, puis un mois plus tard une autre, très lumineuse cette fois-ci.

Certains chercheurs pensent que l'avant-dernier événement correspondait à la mort réelle de l'étoile, et que le dernier éclat, le plus lumineux, résultait du choc entre le nuage de débris de la supernova et le matériau laissé par les précédents hoquets. D'autres pensent que l'étoile est encore en vie et continuera à nous offrir son spectacle épisodique. Ce qui est certain, c'est que nous venons d'assister à un type d'instabilité violente dont souffrent certaines étoiles massives.

Enfin, une troisième théorie des ultranovæ considère que leur luminosité inhabituelle a moins à voir avec la masse énorme des étoiles qu'avec leur vitesse de rotation extrême. Des astres de 10 à 60 masses solaires produisent vraisemblablement des supernovæ ordinaires, laissant en leur cœur une étoile à neutrons. Mais si l'étoile initiale était en rotation rapide, l'effondrement accélérerait cette rotation jusqu'à des vitesses extrêmes, de la même façon qu'un patineur déjà en rotation tourne plus vite quand il ramène ses bras près du corps. En principe, une étoile à neutrons peut atteindre des vitesses de rotation de l'ordre de 1000 tours par seconde ; au-delà, la force centrifuge la disloquerait.

L'énergie cinétique emmagasinée dans une « toupie » aussi massive est énorme.

Comment pourrait-elle déclencher une ultranova ? Les étoiles à neutrons ont des champs magnétiques très intenses qui peuvent transporter cette énergie. Pour comprendre comment, imaginez que vous fassiez tourner un aimant de réfrigérateur dans la paume de votre main. Ce faisant, vous tordez le champ magnétique qui l'entoure. Même si vous ne pouvez pas le voir ni le sentir, une petite partie de l'énergie que vous avez dépensée pour faire tourner l'aimant est emportée dans l'espace sous la forme d'ondes électromagnétiques.

Nous pensons que le même processus se produit aussi, à bien plus grande échelle, autour des étoiles à neutrons. On en aurait un exemple spectaculaire avec la nébuleuse du Crabe (voir la figure page 62), qui correspond aux vestiges d'une supernova consignée par les astronomes chinois en l'an 1054 de notre ère. Aujourd'hui, la lumière qui nous parvient de la nébuleuse est alimentée par une étoile à neutrons en rotation qui engendre un tourbillon de plasma aimanté. Depuis un millier d'années, le champ magnétique déformé a extrait de l'énergie de rotation de l'étoile à neutrons et chauffé le gaz environnant, alimentant ce magnifique spectacle.

En 2010, Lars Bildsten, de l'université de Californie à Santa Barbara, et moi avons suggéré qu'une version extrême de ce processus expliquerait la forte luminosité de certaines ultranovæ. L'étoile à neutrons devrait dans ce cas présenter un champ

LA MÉNAGERIE DES SUPERNOVÆ

Les explosions en supernova, qui marquent la mort des étoiles, présentent une variété beaucoup plus grande que ne le pensaient les astronomes. Des observations récentes ont révélé des supernovæ 100 fois plus brillantes que d'habitude, ainsi que des explosions mineures qui émettent 100 fois moins de lumière que la normale. Les théoriciens ont élaboré plusieurs hypothèses pour expliquer quels types d'étoiles donnent lieu à certaines de ces explosions hors norme.

ORDINAIRE

Dans une supernova typique, le cœur d'une étoile de masse au moins 10 fois supérieure à celle du Soleil s'effondre en laissant un vestige dense, une étoile à neutrons. Les couches externes explosent en créant une onde de choc supersonique.

COLLISION D'ÉTOILES À NEUTRONS

Les astronomes suggèrent que, lors de la fusion de deux étoiles à neutrons, l'essentiel de leur masse crée un trou noir, mais qu'une petite partie peut s'en échapper et créer ainsi une « kilonova » faiblement lumineuse.

MAGNÉTOILE

L'effondrement d'une étoile en rotation rapide peut produire une étoile à neutrons dotée d'un fort champ magnétique : une magnétoile. L'énergie de rotation, transmise à la matière environnante par ce champ, produirait une supernova ultraluminaire.

FAUSSE ALERTE

Une étoile peut amorcer le processus de supernova mais retrouver l'équilibre, soufflant juste une partie de ses couches externes. Quand l'étoile finit par exploser vraiment, les débris heurtent les couches éjectées auparavant, créant un éclair ultrabrillant.

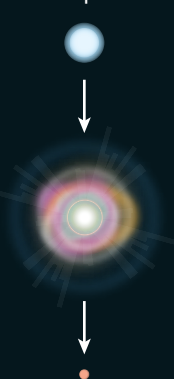
PAIRES DE PARTICULES

Le cœur brûlant d'une étoile très massive produirait des paires particule-antiparticule. L'étoile deviendrait alors instable et exploserait prématurément, et si vite qu'elle ne laisserait ni étoile à neutrons ni trou noir derrière elle.

EFFONDREMENT TOTAL

Les étoiles les plus massives de toutes ne produiraient, de façon paradoxale, qu'une faible lueur : leur gravité extrême conduirait à concentrer presque toute leur masse dans un trou noir, dont très peu de matière s'échapperait.

Étoile de départ : 10 masses solaires ou plus



Étoile à neutrons

Étoile à neutrons



Étoile à neutrons



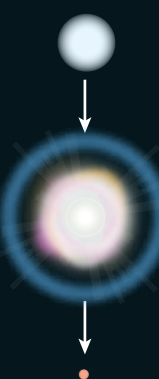
Trou noir

Étoile de départ : 10 masses solaires ou plus



Magnétoile

Étoile de départ : 70 à 150 masses solaires



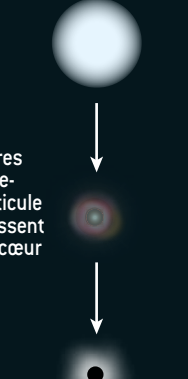
Étoile à neutrons

Étoile de départ : 150 à 300 masses solaires

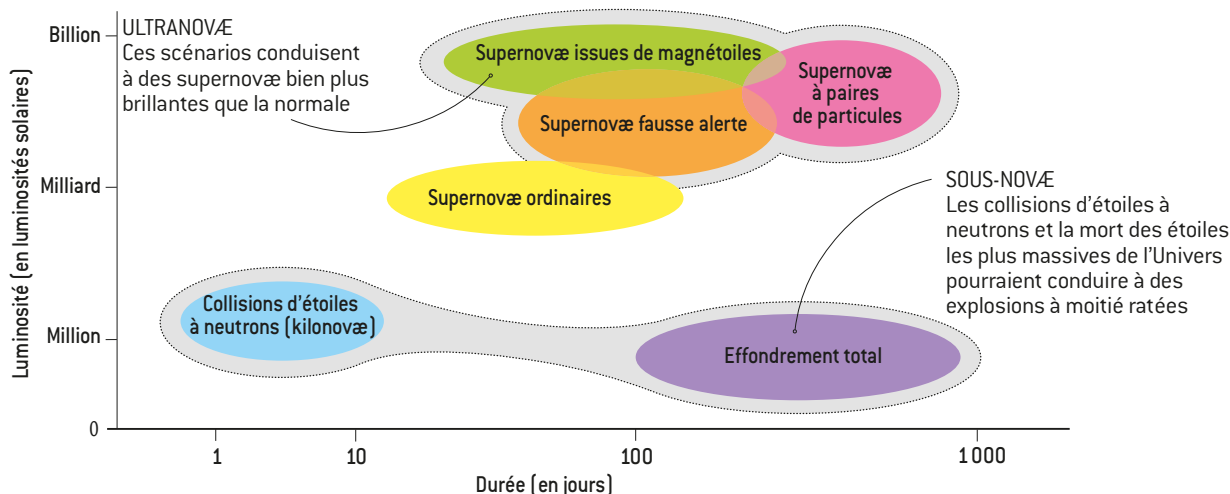


Pas d'étoile résiduelle

Étoile de départ : 300 à 1 000 masses solaires



Trou noir



magnétique 100 à 1 000 fois plus intense que celui de la nébuleuse du Crabe et tourner à une vitesse proche du seuil de dislocation. Pour une telle étoile, presque toute l'énergie de rotation serait siphonnée en un mois, et le nuage de débris de supernova serait en conséquence un million de fois plus brillant que la nébuleuse du Crabe. Les chiffres semblent extrêmes, mais on connaît déjà des étoiles à neutrons dotées de champs magnétiques comparables. On les nomme des magnétoiles (ou magnétars), et elles présentent les champs magnétiques les plus puissants que nous connaissions dans l'Univers. Ainsi, les ultranovæ seraient parfois la marque de la naissance et du brusque ralentissement d'une magnétoile en rotation rapide.

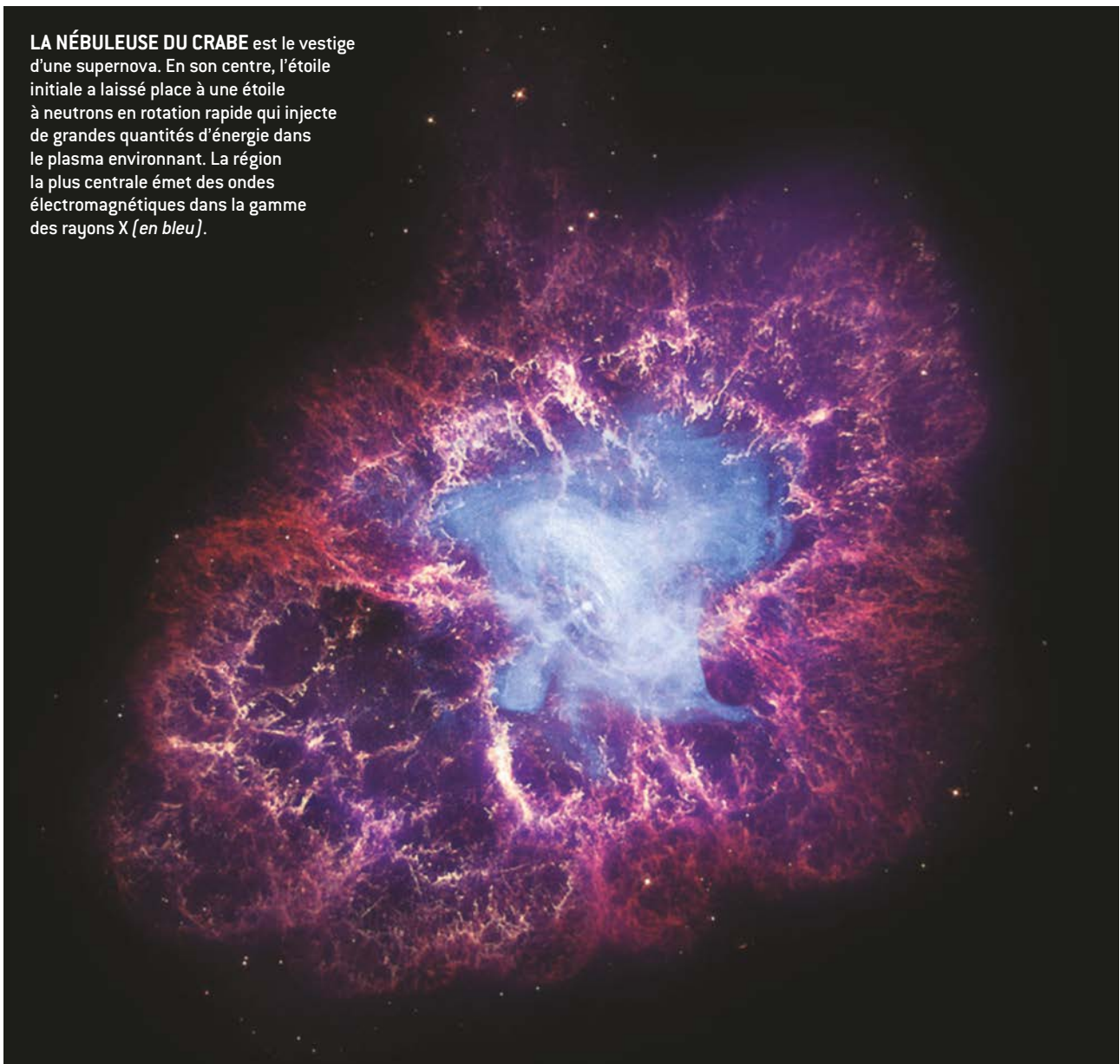
À l'autre extrémité du spectre des supernovæ, les astronomes ont récemment découvert un autre phénomène étrange, celui des supernovæ contre-performantes, 100 fois moins brillantes que les supernovæ ordinaires. La cause possible de ces explosions mineures est débattue, mais les chercheurs soupçonnent que certaines d'entre elles seraient, étonnamment, les derniers souffles étouffés des étoiles les plus massives ayant jamais existé.

On ne connaît pas vraiment la masse maximale qu'une étoile peut atteindre, mais on pense que certaines pourraient atteindre 300 à 1 000 fois la masse du Soleil. De telles géantes ne produiraient-elles pas les explosions de supernovæ les plus spectaculaires

de toutes ? Peut-être que non. En fait, elles donnent probablement lieu à des explosions ratées. La gravité d'une telle étoile est si forte qu'une fois que l'astre devient instable, l'effondrement total est inévitable. Il se formerait alors un objet plus dense qu'une étoile à neutrons : un trou noir.

Des modèles théoriques montrent que la majeure partie de l'étoile tombe dans le trou noir et disparaît brutalement de notre vue. En effet, la gravité d'un trou noir est si forte que même la lumière est incapable de s'en échapper. Pour traquer de tels événements, les astronomes et leurs suivis automatisés ne cherchent pas une lumière soudaine dans le ciel, mais une étoile brillante qui s'éteint d'un seul coup.

LA NÉBULEUSE DU CRABE est le vestige d'une supernova. En son centre, l'étoile initiale a laissé place à une étoile à neutrons en rotation rapide qui injecte de grandes quantités d'énergie dans le plasma environnant. La région la plus centrale émet des ondes électromagnétiques dans la gamme des rayons X (en bleu).



© NASA/CXC/SO/F. Seward (composite), NASA/ESA/M.S.U. Hester et A. Loll (optique), NASA/JPL-Caltech/université du Minnesota/R. Gehrz (infrarouge)

Bien qu'elles ne parviennent pas à produire une détonation, certaines de ces étoiles formant des trous noirs peuvent au moins émettre un murmure. Le cœur de certaines étoiles géantes est entouré d'un halo diffus d'hydrogène gazeux. Quand le trou noir se forme, une majeure partie de l'étoile tombe dedans, mais une fraction du halo pourrait s'échauffer et être soufflée, produisant une faible lueur. La mort d'une très grosse étoile produirait donc, paradoxalement, une supernova remarquablement faible et pâle.

Un ballet cosmique discret

Un autre type d'explosion à luminosité inférieure à la normale pourrait découler d'un événement d'un tout autre type: la collision de deux étoiles à neutrons. Les étoiles massives naissent souvent sous la forme de paires, tournant autour du centre de masse du système ainsi formé. Ces étoiles évoluent normalement et explosent en supernovæ classiques l'une après l'autre. Et si la paire n'est pas dissociée, ce qui reste est un système binaire formé de deux étoiles à neutrons (ou une étoile à neutrons et un trou noir, ou deux trous noirs). Au fil du temps, les deux objets compacts se rapprochent, finissent par entrer en collision et fusionnent pour donner éventuellement un trou noir (voir les figures pages 58 et 59). Lors d'une telle rencontre, les forces gravitationnelles extrêmes (environ 10 milliards de fois supérieures à l'attraction qu'exerce la Terre sur notre corps) peuvent arracher environ 1 % de la couche supérieure des étoiles et l'expédier dans l'espace (les 99 % restants finissent dans le trou noir).

Cette petite quantité de matière qui échappe au trou noir se présenterait sous une forme assez exotique (un nuage dense de particules, surtout des neutrons, avec quelques protons et électrons). À mesure que la pression baisse dans ce gaz, les particules se lient en noyaux de plus en plus lourds par l'ajout progressif de neutrons, ce qui produit de l'or, du platine et du mercure, mélangés à des éléments radioactifs, dont l'uranium et le thorium. Les collisions d'étoiles à neutrons seraient l'un des rares événements cosmiques permettant à ces éléments lourds de se former.

L'abondance de matériau radioactif devrait faire briller le nuage de débris comme une supernova. Mais à cause du peu de masse en jeu, la lumière serait environ

100 fois plus faible qu'une supernova ordinaire, et ne durerait que quelques jours. Avec mon étudiante Jennifer Barnes, de l'université de Californie à Berkeley, nous avons montré qu'en théorie, du fait de la composition particulière en métaux lourds de ces nuages, la lumière émise devrait avoir une «couleur» caractéristique, rouge foncé ou infrarouge. Pour désigner ce phénomène, nous parlons de kilonova.

En juin 2013, une émission de rayons gamma, observée par le satellite *Fermi*, indiquait probablement une fusion de deux étoiles à neutrons. Les astronomes ont pointé le télescope spatial *Hubble* dans cette direction et ils ont enregistré une faible lueur infrarouge. Quelques semaines plus tard, elle avait disparu. Les données sont peu nombreuses, mais en accord avec les prédictions relatives à une kilonova. Si cette identification est correcte, c'est la première fois que nous avons assisté directement à la production de métaux lourds. En observant davantage de ces kilonovæ, nous pourrions déterminer la quantité de métaux synthétisée par ces explosions, et savoir si elles rendent compte de l'abondance de l'or, du platine et d'autres éléments lourds dans l'Univers.

D'ici quelques années, de nouveaux télescopes automatisés tels que le *Zwicky Transient Facility*, près de San Diego et opérationnel dès cette année, le *Large Synoptic Survey Telescope*, en cours de construction au Chili, et le *Wide Field Infrared Survey Telescope*, que la Nasa projette d'envoyer dans l'espace, balaieront la majeure partie du ciel à intervalles de quelques jours avec une extrême sensibilité, en accumulant les données sur les supernovæ. De même, les superordinateurs seront assez puissants pour effectuer des simulations tridimensionnelles détaillées de ces événements et permettront de visualiser ce qui peut se passer au plus profond des explosions d'étoiles.

Les indices recueillis dans les années à venir mettront à l'épreuve nos théories sur les nombreuses formes que peut prendre la mort d'une étoile. Chaque scénario décrit ici est physiquement plausible, mais il reste à être prouvé. Avec des observations supplémentaires de supernovæ inhabituelles, nous espérons déterminer lesquelles de ces possibilités explosives sont effectivement réalisées. Et très probablement, l'Univers se révélera encore plus étrange que nous ne l'avions imaginé. ■

De façon paradoxale,
la mort des plus grosses
étoiles produirait des
supernovæ
faibles

■ BIBLIOGRAPHIE

J. Barnes et D. Kasen, *Effect of a high opacity on the light curves of radioactively powered transients from compact object mergers*, *Astrophysical Journal*, vol. 775(1), pp. 18-26, 2013.

J. C. Mauerhan et al., *The unprecedented 2012 outburst of SN2009ip: a luminous blue variable star becomes a true supernova*, *MNRAS*, vol. 430(3), pp. 1801-1810, 2013.

A. Gal-Yam, *Les super-supernovæ*, *Pour la Science*, n° 417, juillet 2012.

D. Kasen et L. Bildsten, *Supernova light curves powered by young magnetars*, *Astrophysical Journal*, vol. 717(1), pp. 245-249, 2010.

Les robots devront parfois désobéir

Gordon Briggs et Matthias Scheutz

**Faut-il s'inquiéter des machines qui refuseraient d'obéir ?
Pas forcément. Il y a davantage à craindre des maîtres humains retors et des instructions ambiguës.**

HAL 9000, l'ordinateur sensible du film *2001, l'Odyssée de l'espace*, nous offre un aperçu inquiétant de ce que pourrait être un avenir où des machines dotées d'une intelligence artificielle rejettent l'autorité humaine. Après avoir pris le contrôle du vaisseau spatial et tué presque tout l'équipage, HAL répond d'une voix calme à l'astronaute, de retour d'une sortie dans l'espace, qui lui intime l'ordre d'ouvrir le sas : « Je suis désolé, Dave, je crains de ne pas pouvoir faire cela. »

Dans le récent film de science-fiction *Ex Machina*, la séductrice humanoïde Ava amène par la ruse un malheureux jeune homme à l'aider à détruire son créateur, Nathan. Ses machinations confirment les sombres prédictions de Nathan, qui affirmait : « Un jour, les IA [intelligences artificielles] nous considéreront de la même manière que nous considérons les squelettes fossilisés des plaines d'Afrique : un singe dressé vivant dans la poussière et doté d'un langage et d'outils rudimentaires, voué à l'extinction. »

Bien que la possibilité d'une apocalypse orchestrée par les robots soit la première préoccupation de l'imagination populaire,

L'ESSENTIEL

■ **À l'heure où les machines intelligentes gagnent en autonomie, c'est la faillibilité humaine qui représente encore les plus grands risques et les plus grands défis.**

■ **Les chercheurs commencent à enseigner à des robots dotés de capacités rudimentaires en matière de langage et d'intelligence artificielle quand ils doivent dire « non » aux humains et comment.**

■ **Pour ce faire, on intègre des conditions dites de félicité aux processus de raisonnement du robot.**

notre équipe de recherche est plus optimiste sur l'impact qu'aura l'intelligence artificielle dans notre vie quotidienne.

Nous voyons arriver à grande vitesse un futur où des robots utiles et coopératifs interagiront avec des humains dans des cadres très divers. Il existe déjà des prototypes d'assistants personnels robotiques activés par la voix, capables de contrôler et mettre en relation des appareils électroniques personnels, de gérer les serrures, l'éclairage et les thermostats de votre domicile, et même de lire aux enfants des histoires quand ceux-ci sont couchés.

Suivront bientôt des robots capables de faire le ménage et de s'occuper de malades et de personnes âgées. Des prototypes de robots faisant l'inventaire parcourent déjà les allées de certains magasins d'amélioration de l'habitat. Des robots industriels humanoïdes capables de réaliser des travaux simples tels que le chargement, le déchargement et le tri de matériaux sont également en cours de développement. Des voitures autopilotées à divers degrés ont déjà parcouru des millions de kilomètres sur les routes, et Daimler a introduit l'année