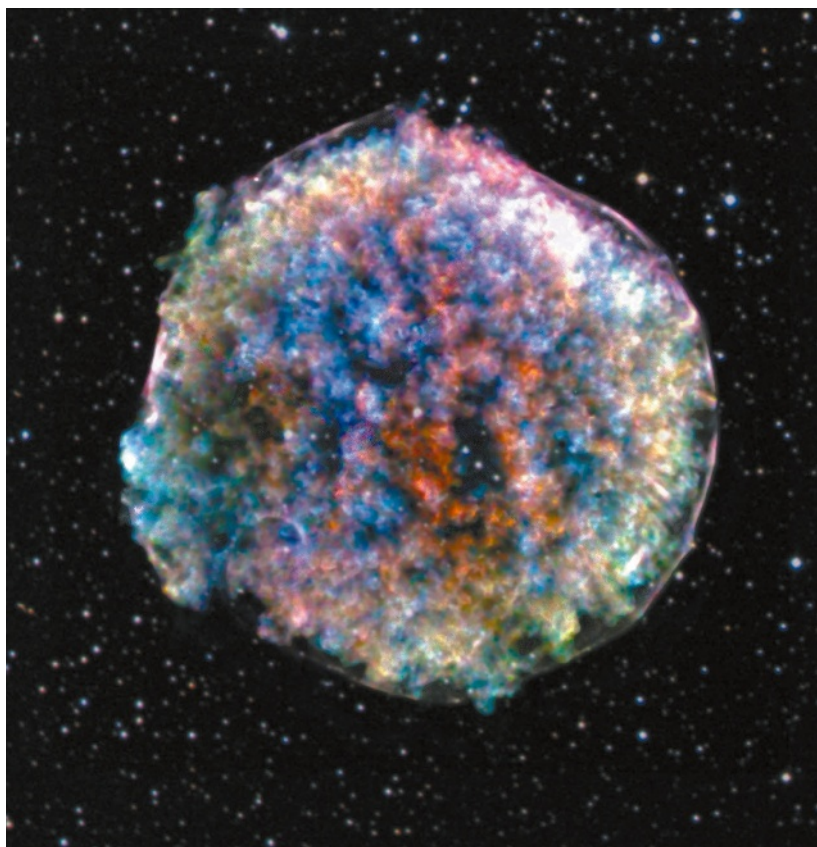




né il y a plus de 4 milliards d'années et brûle encore son hydrogène. Les étoiles plus massives présentent une pression gravitationnelle plus forte et une température plus élevée. Elles consomment rapidement leur carburant nucléaire et ont une vie très courte, de l'ordre de 10 millions d'années. Ces fourneaux stellaires ont cependant une chaîne de fusion nucléaire riche et synthétisent des éléments «lourds» (oxygène, carbone, néon, fer, etc.).

La masse d'une étoile détermine aussi comment elle mourra. Les étoiles de moins de huit masses solaires environ connaissent une fin relativement paisible. Une fois la réserve de combustible nucléaire épuisée, s'y amorce la fusion d'éléments plus lourds. Ces réactions étant plus énergétiques, l'étoile enflé et expulse dans l'espace ses couches externes, formant une magnifique nébuleuse planétaire. Puis, faute d'une température suffisante pour que les processus de fusion se poursuivent, le noyau de l'étoile se contracte et devient alors une naine blanche: un objet chaud et dense d'environ une demi-masse solaire pour une taille à peine supérieure à celle de la Terre.

Les étoiles massives, en revanche, connaissent une fin violente en raison des températures et des pressions énormes régnant dans leur cœur. Quand elles atteignent le stade de production du fer, la chaîne de combustion nucléaire se brise. Le fer est si stable qu'il ne

En 1572, l'astronome Tycho Brahe a observé à l'œil nu la supernova SN1572. Les restes de l'étoile (le «rémanent») sont encore visibles aujourd'hui, mais pas à l'œil nu. En 2019, les astronomes ont étudié la distribution tridimensionnelle et hétérogène du gaz et de poussière expulsés lors de cette explosion. L'image en fausses couleurs a été prise par le télescope spatial *Chandra*. On y voit le silicium qui se déplace vers la Terre (en bleu) ou s'en éloigne (en rouge). Les autres couleurs correspondent à d'autres éléments.

fusionne pas pour former des éléments plus lourds. Conséquence: la pression qui s'opposait à la gravité disparaît, et le cœur de l'étoile s'effondre sur lui-même. Sous l'effet de la pression extrême, les atomes sont alors si proches les uns des autres qu'une nouvelle force entre en scène: l'«interaction forte». Une forme de pression inédite rétablit un équilibre. Le cœur devient alors une étoile à neutrons, c'est-à-dire un état très dense où la matière est essentiellement constituée de neutrons.

Si l'étoile est assez massive (à partir de 20 masses solaires environ), la gravité l'emporte même sur l'interaction forte et l'étoile à neutrons s'effondre encore davantage jusqu'à former un trou noir. Dans un cas comme dans l'autre, quand le cœur périclite, une partie de l'énergie libérée provoque une violente éjection des couches externes de l'étoile dans l'espace. Cette explosion spectaculaire, une supernova, est si lumineuse que, pendant quelques jours, elle brille plus que l'ensemble de toutes les autres étoiles de sa galaxie.

Depuis des millénaires, les humains ont remarqué à l'œil nu ce phénomène de supernova. Notamment, en 1572, l'astronome danois Tycho Brahe a ainsi constaté la formation d'une «nouvelle étoile» dans la constellation de Cassiopée. Elle était aussi brillante que Vénus, un éclat qu'elle a conservé pendant plusieurs mois avant de s'estomper. Le vestige de l'explosion est encore visible aujourd'hui (voir l'image ci-contre).

## AU-DELÀ DE LA VOIE LACTÉE

Pour qu'une supernova soit visible à l'œil nu, elle doit se produire dans la Voie lactée, comme la supernova de Tycho, ou dans l'une de ses galaxies satellites. Cet événement est rare. Il ne sera peut-être pas donné de voir un jour une telle explosion sans l'aide d'un télescope, mais l'espoir est permis. Au cours du xx<sup>e</sup> siècle, les astronomes ont commencé à utiliser des télescopes pour chercher des supernovæ au-delà de la Voie lactée. La méthode est simple: en faisant des observations régulières de certaines galaxies, nous traquons des objets qui s'allument puis s'éteignent, des «événements astronomiques transitoires». Avec la robotisation des télescopes et le développement de caméras très performantes, nous sommes capables de repérer des milliers de supernovæ chaque année.

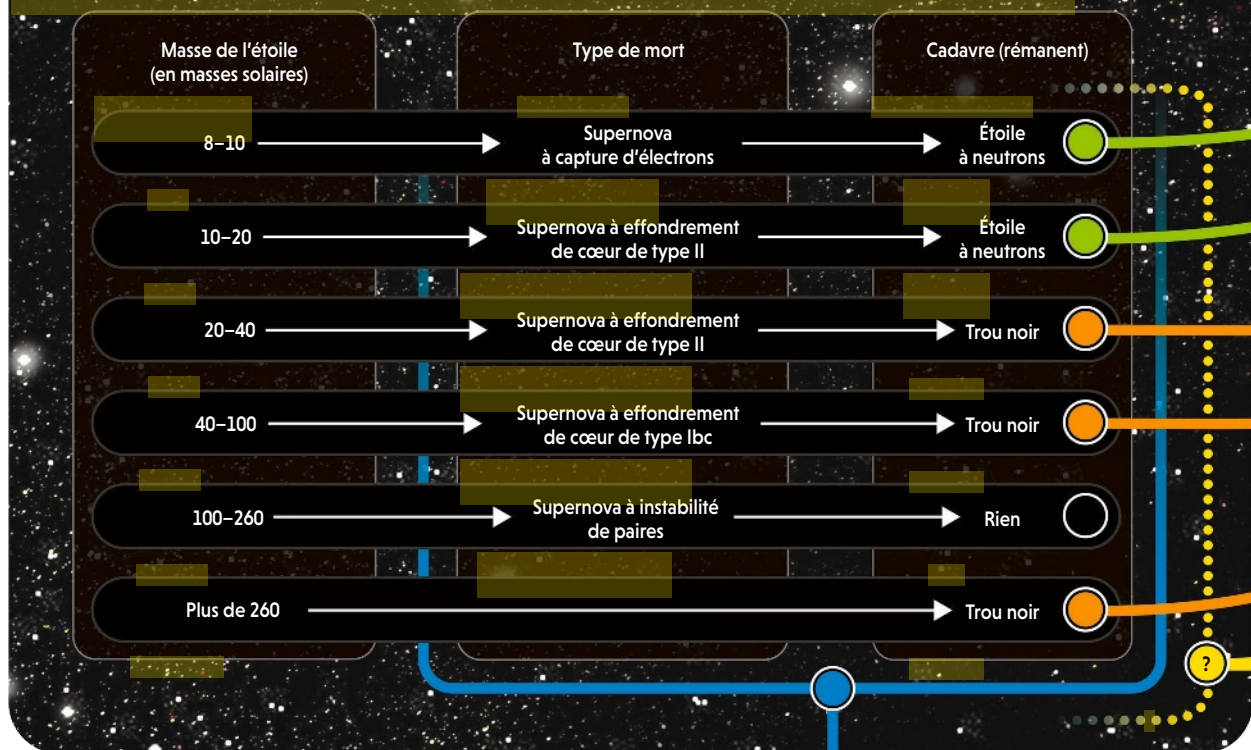
Dans les années 1960, grâce au développement de télescopes spatiaux, les astronomes ont découvert des événements astronomiques transitoires particuliers, les sursauts de rayons gamma (ou GRB, pour *gamma-ray burst*), de brèves bouffées de rayons gamma. C'est seulement dans les années 1990 que les chercheurs ont compris que ces sursauts gamma sont associés à la mort violente de certaines étoiles massives qui s'effondrent en étoiles à neutrons ou

## DES SUPERNOVÆ ÉTONNANTES

Les scénarios de mort stellaire ont longtemps été simples : on pensait que la vie et le destin ultime d'une étoile dépendaient uniquement de sa masse. Mais, ces dernières années, la découverte de supernovæ atypiques a montré que l'histoire est beaucoup plus complexe que cela. Parfois, le cœur d'une étoile mourante devient un moteur qui propulse un jet puissant ou un vent qui fait exploser l'étoile avec un supplément d'énergie. Dans d'autres cas, les étoiles évacuent de la matière juste avant l'explosion fatale.

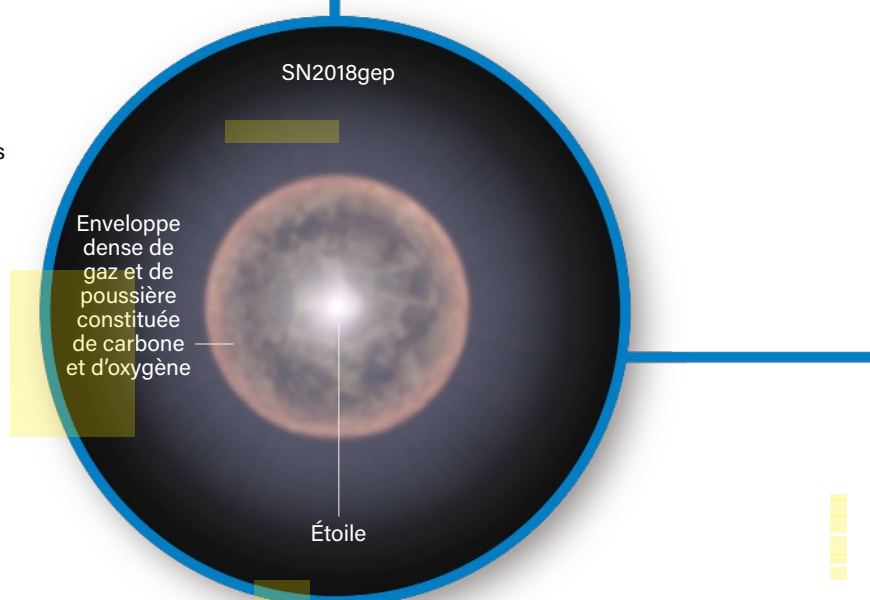
### A Scénarios classiques

Jusqu'à présent, on pensait que la masse d'une étoile déterminait son destin. En fonction de ce paramètre, le type d'explosion en supernova varie et produit un vestige différent. Bien que cette représentation reste en grande partie valable, le processus s'en écarte dans quelques cas rares et produit des issues différentes (présentées dans les cercles vert, orange, bleu et jaune).



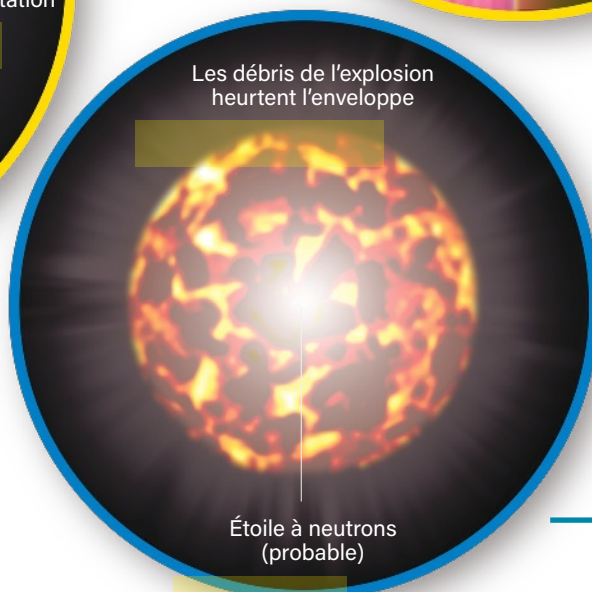
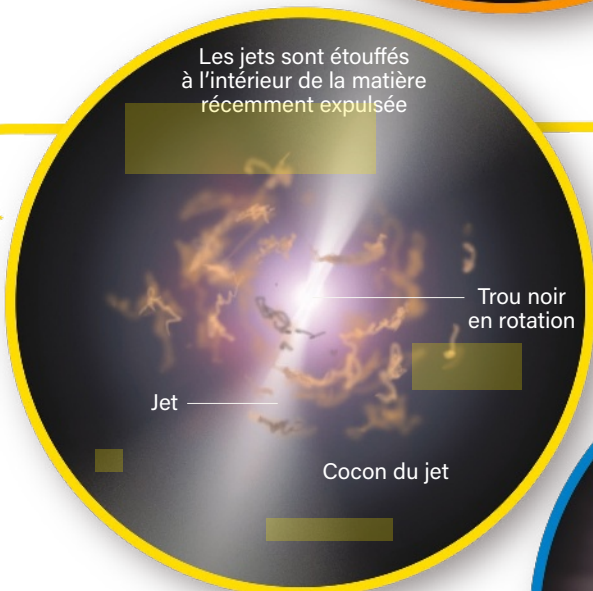
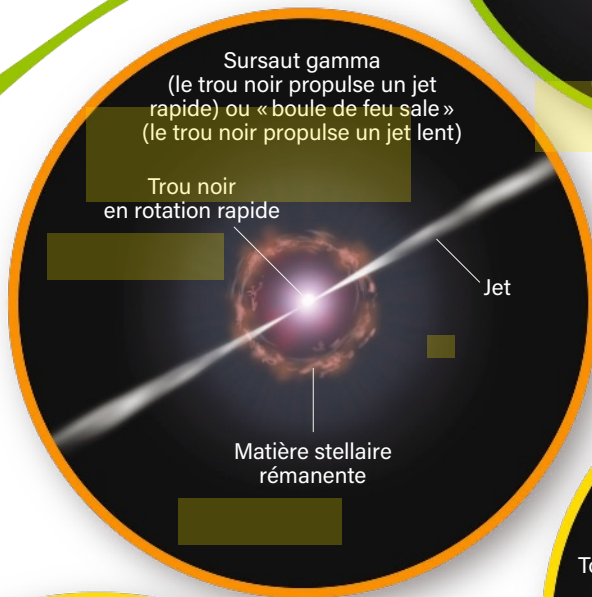
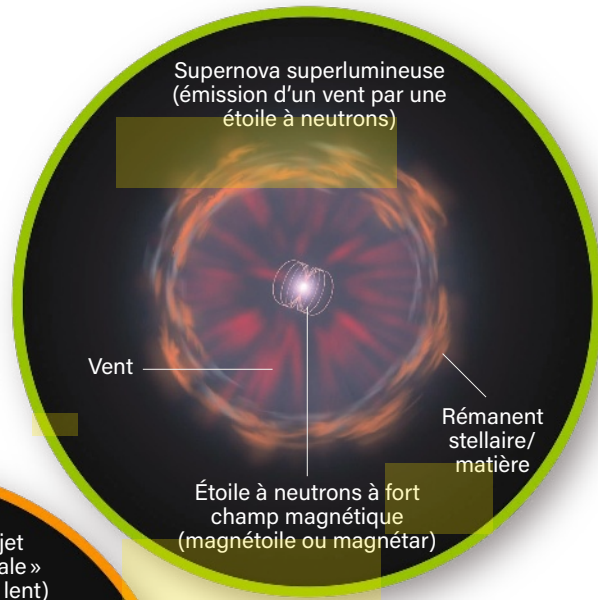
### C Signes annonciateurs d'une mort imminente

Certaines étoiles massives se délesteraient d'une fraction importante de leur gaz dans les derniers jours ou dernières semaines de leur vie. Quand l'étoile explose finalement, les débris de l'explosion entrent en collision avec la matière récemment éjectée, ce qui produit un spectacle éclatant. On ignore pourquoi certaines étoiles se comportent ainsi. Peut-être est-ce le résultat d'une rotation rapide ou d'une interaction avec une autre étoile ? Peut-être cela résulte-t-il de changements dans les profondeurs de l'étoile pendant les dernières étapes de la combustion nucléaire ? L'exemple présenté ici (cercle bleu) est fondé sur la supernova récemment observée SN2018gep.



## B Moteurs à explosions

Parfois, l'objet compact (une étoile à neutrons ou un trou noir) engendré par l'étoile en fin de vie reste actif et forme un moteur qui propulse un jet ou un vent puissant. Cela se produit probablement quand le cœur de l'étoile est en rotation extrêmement rapide au moment de l'effondrement. Peut-être l'étoile était-elle déjà en rotation rapide, ou bien a-t-elle pris de la vitesse par le biais d'une interaction avec un compagnon binaire ? Des exemples d'explosions de cœur sont présentés ici (cercles vert, orange et jaune).



en trous noirs. L'objet compact nouveau-né engendre un jet de matière très étroit, qui se fraie un chemin depuis le cœur à travers ce qui reste de l'étoile. Et nous pouvons observer ce jet si, par chance, il est dirigé vers la Terre.

Or la plupart des étoiles massives ne produisent pas de sursauts gamma. Des conditions particulières semblent nécessaires à la formation des jets. La plupart du temps, les étoiles épuisent leur combustible, leur cœur s'effondre en une étoile à neutrons ou un trou noir, et c'est tout. Mais dans un sursaut gamma, selon certaines théories, l'objet compact central resterait actif et deviendrait une sorte de «moteur».

plus éphémère: elle disparaît quelques heures après être apparue. Ainsi, la stratégie mise en place pour détecter une émission rémanente consiste d'abord à détecter un sursaut gamma grâce à un satellite puis à diriger différents télescopes adaptés dans la direction du sursaut.

L'inconvénient de cette approche est que nous manquons de nombreux événements. En effet, par cette méthode, nous ne voyons que des événements particuliers, où un jet s'est formé, a percé l'enveloppe stellaire et est orienté vers la Terre. Pour de nombreuses raisons, nous pourrions manquer le sursaut gamma. Par exemple, même si le jet se forme, les photons gamma émis par celui-ci n'arrivent pas toujours à s'échapper de l'étoile mourante. Ils restent piégés si la vitesse du jet est inférieure à 99,995% de la vitesse de la lumière. Mais pour atteindre de telles vitesses, le jet doit traverser l'étoile sans entraîner avec lui trop de matière.

Or, même si le jet ne perce pas l'enveloppe stellaire, il devrait malgré tout produire des émissions rémanentes. Ce type de rayonnement devrait donc être visible sans la présence de sursaut gamma, soit parce que le jet était trop lent, soit parce qu'il n'était pas dirigé vers la Terre, soit parce qu'aucun télescope ne surveillait cette partie du ciel, etc. De nombreux travaux ont été menés pour observer les émissions rémanentes sans sursaut gamma, mais avec un succès limité.

Avec les progrès des techniques d'observation, les chances de détecter ces émissions rémanentes ont augmenté. Dans le cadre de ma thèse de doctorat, entamée en 2018, j'ai entrepris de dénicher de tels événements en utilisant le *Zwicky Transient Facility* (ZTF), qui venait d'être inauguré. Ce télescope robotisé installé à l'observatoire Palomar, en Californie, est conçu pour surveiller l'apparition de points lumineux très brillants et fugaces. Mes encadrants m'avaient alors avertie que je risquais de ne pas trouver ce que je cherchais. Ils m'ont conseillé de garder l'œil ouvert, que peut-être d'autres objets atypiques se manifesteraient en chemin. Et c'est exactement ce qui s'est produit. Quand j'ai soutenu ma thèse, son contenu était très différent de ce que j'avais prévu.

## LA «VACHE», UN ÉVÉNEMENT TRANSITOIRE TRÈS BIZARRE

Au début de mes travaux de recherche, j'ai écrit un programme pour repérer des phénomènes célestes dont la luminosité changerait plus rapidement que celle des supernovæ ordinaires. En une journée, mon code isolait entre 10 et 100 candidats, mais aucun ne correspondait à ce que je cherchais.

En juin 2018, quelque chose a néanmoins retenu mon attention. Un rapport du relevé astronomique robotisé Atlas (auquel participe le ZTF) faisait état d'un événement étrange noté AT2018cow. «AT» est le préfixe



# AT2018cow était 10 à 100 fois plus brillant qu'une supernova ordinaire

Par exemple, le trou noir naissant pourrait se retrouver entouré d'un disque d'accrétion contenant d'importantes quantités de gaz. Ce disque aurait une durée de vie très courte et tomberait rapidement sur le trou noir, formant un jet de matière animée d'une très grande vitesse. Autre possibilité, l'effondrement pourrait donner naissance à une étoile à neutrons présentant un fort champ magnétique et une rotation rapide; on parle dans ce cas de magnétar. Le ralentissement d'un tel objet, freiné par son propre champ magnétique, libérerait aussi de l'énergie sous la forme d'un faisceau de plasma brûlant. Ce jet partirait du cœur de l'étoile et traverserait le reste de la matière stellaire qui n'a pas fini sa chute, et émettrait un rayonnement gamma intense dans l'axe du jet.

Le passage du jet à travers l'étoile entraîne son explosion en une supernova d'un type particulier, noté Ic-BL, qui est dix fois plus énergétique que les supernovæ classiques. Ensuite, le jet percute le gaz et la poussière du milieu interstellaire au voisinage de l'étoile et produit ainsi de la lumière dans tout le spectre électromagnétique; on parle d'émission rémanente. Cette dernière ne se propage pas uniquement dans l'axe des jets: elle est quasi isotrope, ce qui donne *a priori* plus de chances de la voir. Cependant, l'émission rémanente est difficile à observer car, bien que mille fois plus brillante que les supernovæ typiques, elle est cent fois

# SURSAUTS GAMMA: UN FUTUR PROMETTEUR

Propos recueillis par Sean Bailly



**SYLVAIN GUIRIEC**

professeur à l'université George-Washington, à Washington, et chercheur au centre Goddard de la Nasa

## Avec quelle fréquence détecte-t-on des sursauts gamma ?

Le télescope spatial *Fermi* détecte un sursaut tous les deux jours en moyenne. On a observé plus de 8 000 sursauts gamma depuis leur découverte dans les années 1960.

## Quelles sont les sources des sursauts gamma ?

L'explosion initiale des sursauts dure typiquement de quelques millisecondes à quelques dizaines de secondes. On les classe en deux familles. Les « sursauts longs » durent plus de deux secondes et sont associés aux effondrements d'étoiles massives. Les « courts » sont déclenchés par la coalescence d'objets compacts (des paires d'étoiles à neutrons, ou un trou noir et une étoile à neutrons).

Mais, début 2021, avec mes collègues, nous avons mis en évidence que des explosions géantes de magnétars – des étoiles à neutrons en rotation rapide et à champ magnétique intense – dans des galaxies proches produisent parfois des sursauts gamma courts.

## Comment les distinguer d'un sursaut de coalescence ?

Leur spectre en fréquence a une signature un peu différente de celui d'une coalescence. Mais nous n'avons pas toujours des données couvrant tout le spectre électromagnétique. Quand un événement est repéré par un satellite, l'alerte est aussitôt transmise à d'autres observatoires pour étudier l'objet dans d'autres fréquences. Mais un sursaut gamma est si bref qu'il est souvent impossible de réorienter les télescopes assez vite pour voir l'explosion initiale. Nous n'avons ainsi que quelques dizaines de sursauts observés dans le visible.

## Quelle est la solution ?

La solution est d'avoir des télescopes à grand champ, qui voient à tout instant une grande portion du ciel. C'est le cas du *Zwicky Transient Factory*. Et ça sera aussi le cas du télescope *Vera-Rubin* en cours de construction. Le défi pour ce futur observatoire sera la quantité d'information collectée.

Avec quelques millions d'événements transitoires par nuit, les capacités de traitement et de stockage sont limitées. Il faut donc mettre au point des algorithmes efficaces pour sélectionner les objets les plus intéressants.

Une autre voie est la complémentarité avec les détecteurs d'ondes gravitationnelles. Par exemple, l'onde gravitationnelle GW170817 captée par les interféromètres *Ligo-Virgo* a été associée à un sursaut, ce qui indique clairement que celui-ci était le résultat d'une coalescence. Les expériences de neutrinos astrophysiques nous apporteront aussi des informations précieuses.

Enfin, de nouveaux projets d'observatoires gamma, X et infrarouge sont en préparation, tels *Gamow Explorer* (dont je suis responsable principal adjoint) du côté de la Nasa ou *Theseus* pour l'ESA. Ils permettront d'étudier les sursauts des premières étoiles de l'Univers. L'observatoire spatial franco-chinois *SVOM* prévu pour 2022 sera aussi un instrument capital pour l'étude des sources transitoires.

automatiquement accolé à tous les événements astronomiques transitoires, «2018» correspond à l'année de la découverte, et «cow» est une suite unique et aléatoire de lettres d'identification qui, ici, formait un mot, «vache» en anglais (il n'en fallait pas plus pour surnommer l'événement). Au début, les observations semblaient indiquer des similitudes entre cet événement et un sursaut gamma, sauf qu'il n'y avait pas eu de détection de rayons gamma. «Enfin! Je tiens une émission rémanente!» ai-je pensé. Mais la situation a rapidement changé. Parce qu'AT2018cow était si brillant (10 à 100 fois plus brillant qu'une supernova ordinaire) et si proche (à 200 millions d'années-lumière), l'objet a suscité un grand intérêt dans le monde entier. Les astronomes l'ont observé dans tout le spectre électromagnétique.

## UNE EXPLOSION ATYPIQUE

AT2018cow a surpris toute la communauté. Le déroulé de l'événement était complètement différent de toutes les explosions cosmiques jamais observées. Et nous étions dans la même situation que les aveugles de la célèbre fable indienne: lorsque ces individus rencontrèrent un éléphant, ils en tâtèrent chacun une partie différente de l'animal, mais ne s'accordèrent pas sur une description commune. Ainsi, le premier en touchant la trompe la comparait à un serpent, le deuxième palpant l'oreille pensait à un éventail, pour un troisième la patte rappelait le tronc d'un arbre. De la même façon, nos diverses observations de la Vache étaient difficiles à combiner en une vision cohérente. L'explosion présentait des caractéristiques de plusieurs types de phénomènes différents. Diverses explications ont été rapidement proposées, mais sans toujours convaincre.

Mes collègues et moi avons travaillé dur pour compiler les données, afin de comprendre comment les interpréter. Certains de ces moments restent parmi mes meilleurs souvenirs de thèse: quand nous avons calculé ensemble au tableau noir les propriétés de l'onde de choc, quand un membre de l'équipe a déboulé dans le couloir en agitant une feuille avec de nouveaux résultats, ou encore quand nous avons échangé des regards ébahis à l'annonce d'une nouvelle mesure extraordinaire.

Finalement, nous avons conclu qu'il y avait deux composantes majeures dans AT2018cow. La première était un moteur central, comme dans un sursaut gamma. Mais sa longévité était bien supérieure, de l'ordre de plusieurs semaines plutôt que quelques jours, car les rayons X émanant du cœur de l'explosion ont brillé bien plus longtemps que prévu. La seconde composante était un cocon de gaz et de poussière d'environ un millième de masse solaire dont, pour une raison inconnue, l'étoile était entourée au moment de son explosion. Nos preuves de