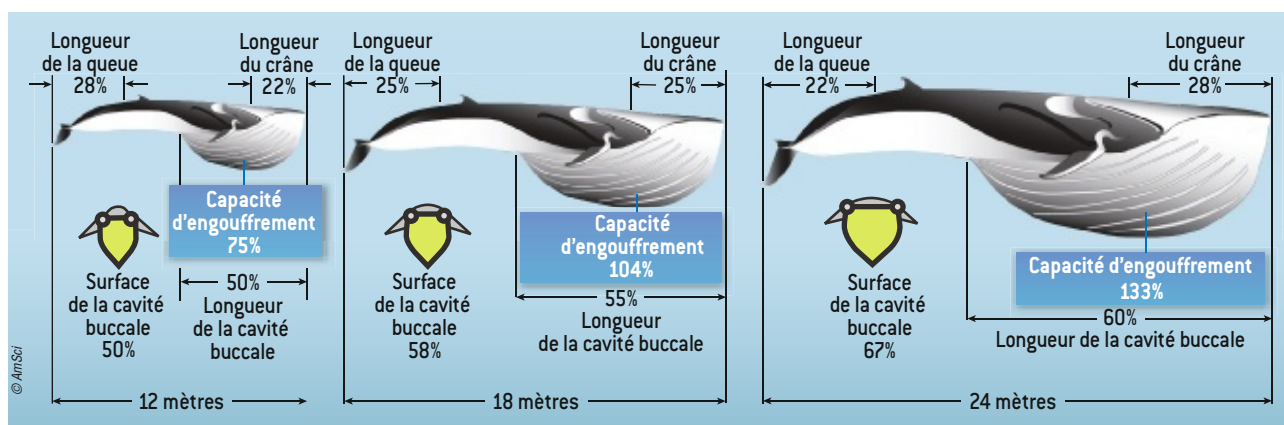




8. QUAND UN RORQUAL COMMUN GRANDIT, sa cavité buccale ne s'accroît pas de façon linéaire, mais son rapport à la taille du corps augmente. La longueur de la cavité buccale par rapport à celle du corps passe de 50 à 60 pour cent, celle du crâne de 22 à 28 pour cent, tan-

dis que la part de la queue diminue de 28 à 22 pour cent. La surface de la cavité buccale augmente de 50 à 67 pour cent de la surface totale projetée du corps, et la capacité d'engouffrement augmente de 75 à 133 pour cent de la masse du corps.

rorquals communs et de rorquals bleus représentant ces gammes de taille.

Résultat : les baleines les plus grandes ont des mâchoires et des cavités buccales surdimensionnées par rapport à leur taille, tandis que la région située entre l'aile dorsal et la nageoire caudale devient relativement plus petite. Les auteurs de l'étude n'expliquaient pas cette morphologie, probablement parce que leurs données ont été recueillies avant que nous connaissions son importance sur les performances alimentaires.

Avec l'aide de mes collègues, j'ai repris les données britanniques concernant le rorqual commun, afin d'estimer sa capacité d'engouffrement en fonction de la taille. Comme nous l'avions prévu, la masse relative d'eau engloutie augmente avec la taille du rorqual, puisque l'appareil d'engouffrement devient plus grand.

Une question d'échelle

Question connexe : pourquoi la queue des baleines de grande taille est-elle relativement plus petite ? Peut-être parce que toutes les ressources liées à la croissance sont consacrées à la partie antérieure du corps, avons-nous suggéré. Lorsque les rorquals communs grandissent, leur capacité d'engouffrement augmente. Effectivement, le crâne devient relativement plus long et plus large par rapport au corps, et la surface d'ouverture de la cavité buccale est aussi plus grande en proportion chez les rorquals de grande taille (voir la figure 8). De plus, la longueur de la graisse ventrale à sillons augmente proportionnellement, ce qui accroît la capacité de la cavité

buccale. Étant donné que d'autres grandes baleines engouffreuses présentent aussi ce type de croissance relative, ces configurations morphologiques représentent vraisemblablement une adaptation liée à l'alimentation par engouffrement.

La taille de leur queue n'affecte pas la nage des grandes baleines, car la surface de propulsion qui engendre la poussée est généralement proportionnelle à la taille du corps. Cependant, l'accroissement de la capacité buccale a un coût. L'engouffrement étant actif, des masses d'eau plus importantes doivent être accélérées. Ainsi, les grandes baleines doivent dépenser plus d'énergie en proportion pour chaque phase de capture.

Si l'on considère que ces coûts énergétiques restreignent le temps de plongée, en comparaison d'autres animaux plongeurs, le temps de plongée des plus grandes baleines serait davantage limité que celui de leurs congénères plus petits. Une telle conséquence pourrait être préjudiciable, car les bancs de proies suffisamment denses tendent à se trouver en profondeur. En théorie, la dépense d'énergie pour se nourrir s'accroît plus rapidement avec la taille du corps que le gain d'énergie apporté par ce mode d'alimentation.

Extrapolons ce scénario à une « méga-baleine » hypothétique, une baleine beaucoup plus grande qu'un rorqual bleu. Un tel cétacé ne serait pas capable de soutenir son métabolisme en se nourrissant uniquement par engouffrement. Autrement dit, si l'évolution a sélectionné la taille de ces mammifères jusqu'à ses valeurs actuelles, il existe indiscutablement une limite supérieure que les baleines engouffreuses ne peuvent dépasser. ■

✓ BIBLIOGRAPHIE

J.A. Goldbogen *et al.*, *Mechanics, hydrodynamics and energetics of blue whale lunge feeding : efficiency dependence on krill density*, *J. Exp. Biol.*, vol. 214, pp. 131-146, 2011.

J.A. Goldbogen *et al.*, *Skull and buccal cavity allometry increase mass-specific engulfment capacity in fin whales*, *Proc. Roy. Soc. B*, vol. 277, pp. 861-868, 2010.

J. Potvin *et al.*, *Passive versus active engulfment : verdict from trajectory simulations of lunge-feeding fin whales *Balaenoptera physalus**, *J. Roy. Soc. Interface*, vol. 6, pp. 1005-1025, 2009.

J.A. Goldbogen *et al.*, *Foraging behavior of humpback whales : Kinematic and respiratory patterns suggest a high cost for a lunge*, *J. Exp. Biol.*, vol. 211, pp. 3712-3719, 2008.

J. Calambokidis *et al.*, *Insights into the underwater diving, feeding and calling behavior of blue whales from a suction-cup attached video-imaging tag (CRITTERCAM)*, *Marine Technol. Soc. J.*, vol. 41, pp. 19-29, 2007.

L.S. Orton *et P.F. Brodie*, *Engulfing mechanics of fin whales*, *Can. J. Zool.*, vol. 65, pp. 2898-2907, 1987.

Astronomie

Étoiles : une naissance obscure

UNE RÉGION DE FORMATION STELLAIRE
intense près du noyau de la galaxie M83, observée par le télescope spatial *Hubble*. Les théories classiques ne rendent pas compte de façon satisfaisante de l'émergence des étoiles bleues massives, ni de la façon dont elles restituent de l'énergie aux nuages de gaz à partir desquels elles se forment.



Les étoiles naissent de l'effondrement d'un nuage de gaz et de poussière. Mais si les grandes lignes de ce scénario sont connues, plusieurs questions restent ouvertes.

Erick Young

S'il y a bien un scénario solidement établi en astronomie, c'est comment se forment les étoiles. L'idée générale a été proposée par Emmanuel Kant et Pierre-Simon Laplace, au XVIII^e siècle. La source de leur luminosité et leur évolution ont été élucidées par les physiciens de la première moitié du XX^e siècle. Aujourd'hui, les principes qui gouvernent la vie des étoiles sont enseignés au collège, et ce sont les objets exotiques tels que la matière noire ou l'énergie sombre qui attirent la curiosité du public. La formation des étoiles serait donc une question réglée. C'est pourtant loin d'être le cas. La naissance des étoiles reste un des sujets les plus brûlants de l'astronomie contemporaine.

Pour simplifier, le processus se résume à la victoire de la gravité sur la pression. Cela commence par un énorme nuage de gaz et de poussière flottant dans l'espace interstellaire. Si le nuage – ou plus exactement, une petite région dense, nommée cœur – est suffisamment froid et dense, sa propre gravité l'emporte sur la pression du gaz, et il commence à s'effondrer sous son propre poids. Le cœur devient de plus en plus dense et chaud, jusqu'à ce que la fusion nucléaire s'amorce en son sein. La chaleur dégagée par la fusion augmente la pression à l'intérieur de l'objet ; laquelle s'oppose à l'effondrement. La nouvelle étoile s'installe dans un équilibre dynamique qui peut durer des millions à des milliards d'années.

Ce scénario est cohérent et concorde avec un corpus d'observations toujours plus fourni. Mais il est loin d'être complet. Si l'on y regarde de plus près, chaque phrase du paragraphe précédent appelle une explication... qui se fait attendre. Quatre questions en particulier tracassent les astronomes. Tout d'abord, si les cœurs denses sont les « œufs » des étoiles, où sont les « poules » cosmiques ? Les nuages doivent eux-mêmes venir de quelque part, et leur formation est mal comprise. Deuxièmement, pourquoi le cœur dense commence-t-il à s'effondrer ? Le mécanisme

d'amorce détermine le taux de formation stellaire et la masse finale des étoiles.

Troisièmement, comment les embryons d'étoiles influent-ils les uns sur les autres ? La théorie standard décrit les étoiles indépendamment, mais pas ce qui se passe lorsqu'elles se forment en groupe, comme c'est le cas pour la plupart d'entre-elles. Des découvertes récentes suggèrent que le Soleil est né au sein d'un amas, dispersé depuis. En quoi grandir dans une pouponnière bondée est-il différent d'être enfant unique ?

Enfin, comment les étoiles massives parviennent-elles simplement à se former ? La théorie standard explique la formation des étoiles dont la masse n'excède pas 20 fois celle du Soleil, mais achoppe sur les plus massives, dont l'intense rayonnement devrait souffler le nuage avant que l'étoile naissante n'ait atteint sa masse définitive. De plus, le rayonnement ultraviolet, l'éjection de matière à grande vitesse et les ondes de choc supersoniques associés aux étoiles massives dévastent leur environnement et perturbent fortement le nuage ; ce que la théorie classique ne prend pas en compte.

Cachées dans la poussière

Répondre à ces questions se fait de plus en plus pressant. La formation stellaire sous-tend presque tous les autres domaines de l'astronomie, depuis l'avènement des galaxies jusqu'à la genèse des planètes. Tant qu'ils ne comprendront pas parfaitement la formation des étoiles, les astronomes ne peuvent pas espérer expliquer celle des galaxies lointaines ou l'existence des planètes dans d'autres systèmes stellaires.

Même si les détails nous échappent encore, une certitude se dégage : une théorie plus précise de la formation stellaire passe par la prise en compte de l'environnement de l'étoile en devenir. L'état final de la nouvelle étoile dépend non seulement des conditions initiales dans le nuage, mais aussi de l'influence ultérieure de son environnement et de ses voisins

L'ESSENTIEL

✓ Les étoiles se forment à partir de nuages de gaz qui s'effondrent ; mais d'où viennent ces nuages, et pour quelle raison s'effondrent-ils ?

✓ En outre, la théorie envisage des étoiles isolées et néglige leurs interactions et leur rétroaction sur le nuage qui leur a donné naissance.

✓ Les astronomes ont observé comment des étoiles massives peuvent déclencher l'effondrement de nuages, et comment les nouvelles étoiles interagissent.

MESA, ESA, the Hubble Heritage team

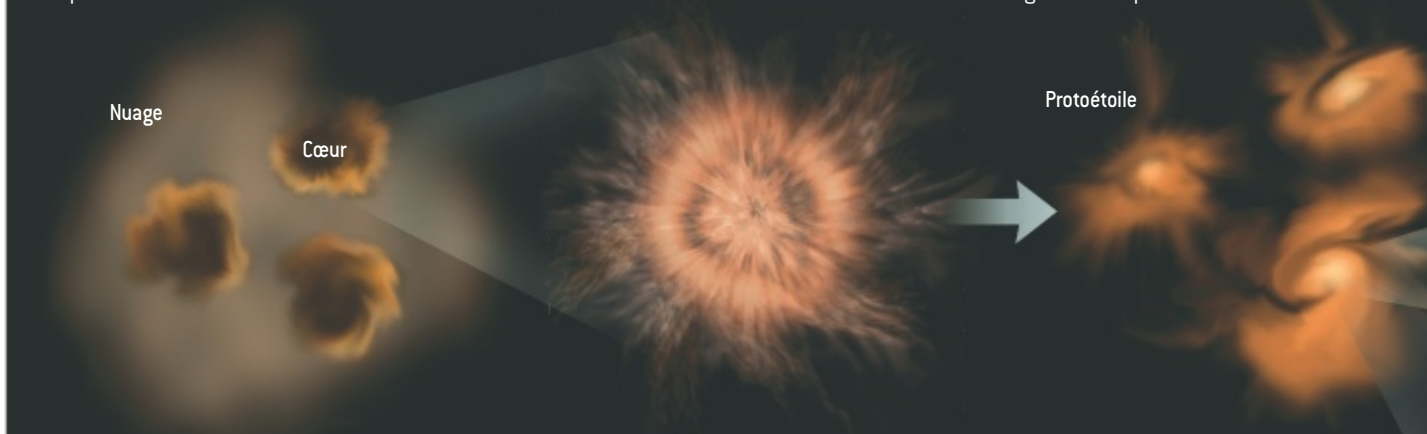
UNE ÉTOILE EST NÉE... NON SANS MAL

La théorie classique de la formation stellaire explique parfaitement la naissance des étoiles isolées de masse faible à moyenne, mais les lacunes conceptuelles y sont encore nombreuses.

1. Le point de départ de la formation stellaire est un nuage moléculaire géant, c'est-à-dire une masse froide de gaz et de poussière.

2. Au sein du nuage, une région particulièrement dense (un cœur) s'effondre sous son propre poids.

3. Le cœur se fragmente en de multiples embryons stellaires. Dans chacun d'eux, une protoétoile forme un noyau et attire du gaz et de la poussière.



PROBLÈME N° 1 : D'où vient le nuage ? Un mélange de matériaux produits lors du Big Bang ou éjectés par les étoiles doit se condenser d'une façon ou d'une autre.

PROBLÈME N° 2 : Pourquoi le cœur s'effondre-t-il ? Le modèle ne dit pas comment l'équilibre des forces qui maintiennent le nuage dans un état stable est perturbé.

PROBLÈME N° 3 : Comment les embryons interagissent-ils ? La théorie classique traite les étoiles isolées, une par une.

L'AUTEUR



Erick YOUNG, astronome à l'Université d'Arizona jusqu'en 2009, dirige la mission SOFIA (*Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy*).

stellaires. C'est l'éternel débat de l'inné et de l'acquis, à l'échelle cosmique...

Si vous regardez le ciel par une nuit bien noire, vous pourrez voir la traînée de lumière diffuse de la Voie lactée sur la voûte céleste. Elle est interrompue par des zones sombres : des nuages interstellaires, dont les particules de poussière interceptent la lumière des étoiles et les rendent opaques à la lumière visible.

C'est dans ces nuages de poussière et de gaz que naissent les étoiles. Par conséquence, ce phénomène est caché et donc très difficile à observer. On peut voir où le processus démarre – dans les nuages opaques – et comment il prend fin – par l'apparition d'une étoile –, mais ce qui se passe entre les deux reste obscur. Le peu de rayonnement qui filtre se situe dans le domaine de l'infrarouge lointain et des ondes submillimétriques, où les capacités d'observation sont assez rudimentaires par rapport à d'autres plages du spectre électromagnétique.

La formation des nuages de poussière et de gaz est une étape du cycle du milieu interstellaire : les nuages engendrent des étoiles, qui recyclent les éléments en leur sein, avant de les relâcher dans le milieu interstellaire à leur mort, et ainsi de suite. Le milieu interstellaire est constitué aux

trois quart d'hydrogène et d'un quart d'hélium ; tous les autres éléments représentent à peine quelques pour cent. Une partie de ce matériau est de la matière primordiale à peine altérée depuis le Big Bang, une part est rejetée par les étoiles au cours de leur vie, et une autre est formée de débris d'explosions stellaires.

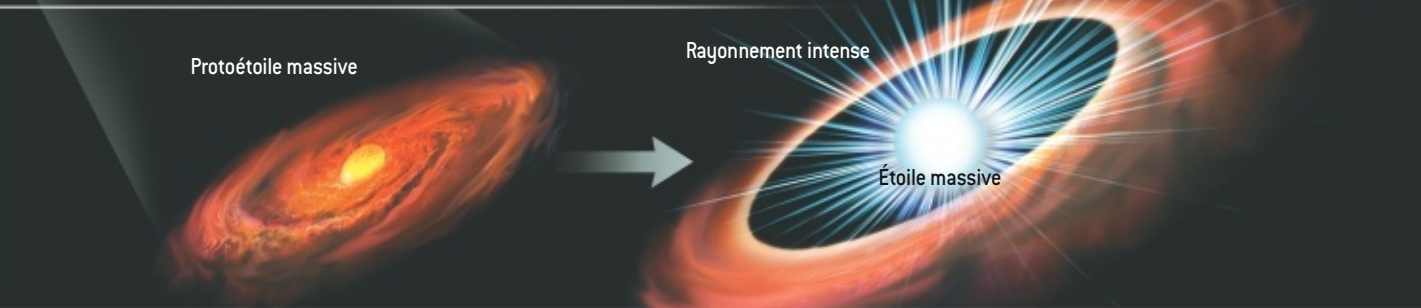
Au départ, le gaz se trouve sous forme d'atomes, car le rayonnement énergétique des étoiles casse les molécules. Il est diffus, avec environ un atome d'hydrogène par centimètre cube. En se refroidissant, le gaz se condense néanmoins en nuages, comme la vapeur d'eau dans l'atmosphère. Ce faisant, il libère de l'énergie. Le milieu étant très peu dense, cette énergie ne peut être évacuée par collisions. Le moyen le plus efficace est l'excitation et la réémission dans l'infrarouge lointain de certains éléments, tel le carbone ionisé qui émet à la longueur d'onde de 158 micromètres. La basse atmosphère terrestre est opaque à ces longueurs d'onde, si bien qu'elles doivent être étudiées depuis l'espace (par exemple par l'observatoire spatial *Herschel*, lancé en 2009 par l'Agence spatiale européenne) ou la haute atmosphère, par des télescopes embarqués sur des avions (mission SOFIA).

À mesure que les nuages se refroidissent, ils deviennent plus denses. Quand ils

4. La protoétoile voit sa taille diminuer et sa densité augmenter. Elle devient une étoile quand la fusion nucléaire s'amorce en son centre. Des planètes émergent du matériau restant qui gravite autour d'elle.



PROBLÈME N°4 : Comment des étoiles massives peuvent-elles se former ? En atteignant une vingtaine de masses solaires, les étoiles deviennent tellement lumineuses qu'elles chassent le gaz environnant, bloquant leur propre croissance, ainsi que celle des étoiles voisines.



atteignent environ 1 000 atomes par centimètre cube, ils sont assez épais pour bloquer le rayonnement ultraviolet énergétique des étoiles environnantes. Les atomes d'hydrogène peuvent alors se recombinaison et former des molécules, par un processus complexe faisant intervenir la catalyse des grains de poussière présents dans le nuage. Les observations en ondes radio ont montré que ces nuages dits moléculaires contiennent des composés allant de l'hydrogène moléculaire aux molécules organiques complexes, qui auraient pu jouer un rôle dans l'apparition de la vie sur Terre.

Le chaînon manquant

Mais au-delà de ces étapes, la piste s'efface. Les observations infrarouges ont débusqué des étoiles naissantes profondément enrobées dans la poussière, mais n'ont pu révé-

ler l'étape précédente, le passage des nuages moléculaires à ces protoétoiles.

Au milieu des années 1990, le satellite MSX et l'observatoire spatial infrarouge ISO ont découvert des nuages si denses (plus de 10 000 atomes par centimètre cube) qu'ils sont opaques même à l'infrarouge thermique qui pénètre d'habitude la poussière. Ces «nuages sombres dans l'infrarouge» sont beaucoup plus massifs (100 à 100 000 fois la masse du Soleil) que les nuages moléculaires standards. Ces dernières années, ces nuages ont été recensés dans deux relevés en infrarouge du plan de la Galaxie réalisés avec le télescope spatial *Spitzer* (relevés GLIMPSE et MIPS GAL, voir l'encadré page 52, en haut). Ils pourraient être le chaînon manquant entre les nuages moléculaires et les protoétoiles.

En fait, les nuages sombres et les cœurs denses représentent peut-être l'étape

cruciale de formation des étoiles : la masse de l'étoile serait déjà déterminée à ce stade par celle du nuage. Il existe des nuages de toutes masses ; les petits étant plus courants que les grands. Cette distribution de masse ressemble beaucoup à celle des étoiles, si ce n'est que les nuages sont trois fois plus massifs, ce qui suggère que seul un tiers de la masse d'un nuage se retrouve dans la nouvelle étoile. Le reste se perd dans l'espace d'une façon ou d'une autre.

Les mesures de la masse des nuages moléculaires ne sont cependant pas encore assez fiables pour que l'on puisse dire si ce parallèle entre la distribution de masse des étoiles et celle des nuages moléculaires est une vraie relation de cause à effet, ou une simple coïncidence. Mais, quel que soit le mécanisme qui fixe la masse d'une étoile, il détermine toute son histoire : étoile massive qui mourra jeune et explosera dans un

Don Dixon

L'ORIGINE DES NUAGES INTERSTELLAIRES

Les astronomes ont identifié les étapes par lesquelles les nuages se condensent à partir du gaz interstellaire et deviennent progressivement plus denses. L'étape précédant la formation d'une protoétoile est représentée par les « nuages sombres dans l'infrarouge ». Opaques même à la lumière infrarouge, ils apparaissent sous forme de bandes noires sur cette image du relevé GLIMPSE, réalisée par le télescope spatial infrarouge *Spitzer*. Leur taille et leur masse correspondent à ce qui est nécessaire pour former des étoiles.

The glimpse team, University of Wisconsin-Madison



Nuage sombre dans l'infrarouge

UN EFFONDREMENT PROVOQUÉ

Les manuels d'astronomie restent vagues sur les mécanismes de déstabilisation et d'effondrement des nuages moléculaires. Des images infrarouges de *Spitzer* révèlent que des étoiles massives proches en sont souvent responsables.

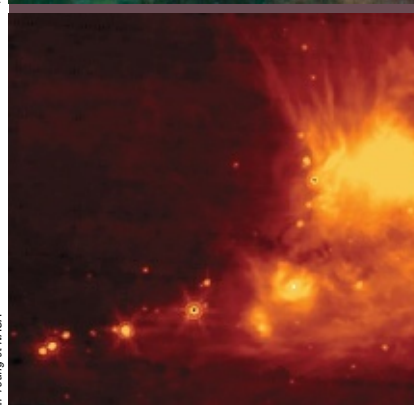
NASA, JPL/Caltech et Harvard Smithsonian Center for Astrophysics



Ci-dessus. Dans la région W5, des étoiles massives (*en bleu*) ont « nettoyé » une cavité dans le nuage moléculaire. Sur le bord se trouvent des protoétoiles (*dans le gaz blanc-rose*) qui ont toutes le même âge. Cette synchronicité résulterait de l'influence des étoiles massives.

À gauche. Dans l'amas NGC 2068, des protoétoiles sont alignées comme des perles sur un collier. Bien qu'éparses, elles se sont formées presque simultanément. Le responsable est sans doute aussi un groupe d'étoiles massives voisines.

E. Young et NASA



cataclysme, ou étoile plus modeste qui vivra plus longtemps et disparaîtra en douceur.

Les astronomes font aussi des progrès sur la cause de l'effondrement d'un nuage ou d'un cœur dense. Dans le modèle classique, un cœur se trouve au départ en équilibre; la gravité et la pression extérieure exactement équilibrées par la pression interne thermique et magnétique, ou la turbulence. L'effondrement commence quand cet équilibre est perturbé au profit de la gravité. Mais quelle est la cause de ce déséquilibre? Les astronomes ont proposé de nombreux mécanismes. Une force extérieure telle que l'onde de choc d'une explosion de supernova pourrait comprimer le nuage. La pression interne pourrait aussi diminuer à mesure que la chaleur ou les champs magnétiques se dissipent.

Spontané ou provoqué ?

Charles Lada, du Centre Harvard-Smithsonian d'astrophysique, et ses collègues privilégient la lente dissipation de la pression thermique. En cartographiant les nuages moléculaires aux longueurs d'onde millimétriques et submillimétriques, à cheval sur les bandes radio et infrarouge, ils sont parvenus à identifier un grand nombre de cœurs isolés relativement calmes dans des nuages proches. Certains présentent des signes de mouvements lents vers l'intérieur et pourraient s'apprêter à produire des étoiles. Un bon exemple en est Barnard 355, situé dans la constellation de l'Aigle. Son profil de densité correspond exactement à ce que l'on attendrait si la pression thermique du nuage était pratiquement à l'équilibre avec la pression extérieure. Une source infrarouge repérée au centre serait une protoétoile à un stade très précoce, suggérant que l'équilibre s'est récemment rompu dans le sens d'un effondrement.

D'autres études appuient l'hypothèse d'une cause extérieure. Thomas Preibisch, de l'Institut Max Planck de radioastronomie de Bonn, et ses collègues ont montré que des étoiles éparées de la région supérieure de la constellation du Scorpion se sont presque toutes formées en même temps. Cela serait une coïncidence extraordinaire que la pression interne des différents cœurs diminue au même moment. Une explication plus vraisemblable est qu'une onde de choc provoquée par une supernova aurait balayé la région et entraîné

l'effondrement des cœurs. Mais les preuves sont ambiguës, parce que les étoiles massives perturbent leur environnement natal, si bien qu'il est difficile de reconstruire les conditions dans lesquelles elles se sont formées. Une autre limite est la difficulté de confirmer que les étoiles de plus faible masse de la région, qui sont moins brillantes, se sont formées en même temps.

Le télescope *Spitzer* a permis de progresser sur cette question. Lori Allen, de l'Observatoire national pour l'astronomie optique (NOAO), et ses collègues ont découvert un exemple frappant de cause externe d'effondrement dans une région nommée W5 (voir l'encadré page 52 en bas). Les images montrent de jeunes protoétoiles enchâssées dans des poches de gaz denses qui ont été comprimées par le rayonnement d'une génération précédente d'étoiles. La compression étant environ dix fois plus rapide que l'effondrement spontané, ces objets disséminés doivent s'être formés presque simultanément. Pour résumer, le déclenchement de la formation stellaire n'est pas une situation binaire, comme on le pensait auparavant. Il existe tout un spectre de processus.

Naissances en groupe

En dehors du cas des effondrements provoqués, le modèle classique explique assez bien les observations de cœurs isolés formant des étoiles. Mais beaucoup d'étoiles, peut-être la plupart, se forment dans des amas, et le modèle ne rend pas compte de la façon dont cet environnement encombré perturbe leur naissance. Ces dernières années, les chercheurs ont développé deux théories concurrentes, qui ont pu être précisées grâce aux progrès considérables réalisés en termes de puissance de calcul. Les observations en infrarouge aident les astronomes à trancher.

La première théorie, dite concurrentielle, portée par Ian Bonnell, de l'Université de St Andrews en Écosse, et d'autres, est la plus étonnante. Les interactions entre cœurs adjacents au sein du nuage sont importantes. Il se forme de nombreuses protoétoiles très petites, qui se déplacent ensuite rapidement dans le nuage et entrent en compétition pour accréter le gaz restant. Certaines deviennent beaucoup plus grosses que d'autres, et les perdantes sont purement et simplement éjectées de l'amas, créant une classe « d'avortons stellaires » qui errent dans la Galaxie.

L'autre classe de modèles, dits du cœur turbulent, développés notamment par Christopher McKee, de l'Université de Californie à Berkeley, est directement dérivée du modèle classique, mais avec un rôle accru de la turbulence. Plusieurs cœurs s'effondrent dans le nuage, mais, à cause de la turbulence, ils sont de tailles différentes dès le départ. La distribution de masse des étoiles résultantes reflète le spectre de la turbulence initiale, et non une compétition ultérieure pour le matériau.

Les observations semblent pencher en faveur du modèle du cœur turbulent, mais le modèle concurrentiel pourrait être valable dans des régions de densité stellaire très élevée. Un cas intéressant est celui de l'amas du Sapin de Noël (NGC 2264) dans la constellation de la Licorne (voir ci-dessous). En lumière visible, cette région présente un grand nombre d'étoiles brillantes et une abondance de poussière et de gaz, caractéristiques de la formation stellaire. Les observations de *Spitzer* y ont révélé la présence d'un amas dense avec des étoiles à divers stades de développement. Cet amas permet de visualiser avec précision les étapes où la turbulence ou l'accrétion concurrentielle laisseraient leur marque.

Les étoiles les plus jeunes, et donc les plus froides, qui rayonnent plus aux grandes longueurs d'onde, sont rassemblées en

À voir dans l'infrarouge

✓ Les nuages moléculaires sont des taches noires en lumière visible, mais ils s'éclairent dans l'infrarouge. Ces longueurs d'onde traversent en effet mieux la poussière. Les protoétoiles et les nuages rayonnent la majeure partie de leur énergie dans ce domaine.

✓ Le rayonnement infrarouge correspond à des longueurs d'onde de 1 à 1 000 micromètres. La matière dont la température est comprise entre 3 et 3 000 kelvins rayonne en infrarouge.

✓ Le proche infrarouge, entre un et cinq micromètres, correspond à de la lumière stellaire un peu atténuée par la poussière. La plupart des observations infrarouges sont concentrées dans ce domaine.

✓ L'infrarouge moyen et lointain, jusqu'à 200 micromètres, est surtout émis par la poussière. Ces longueurs d'onde sont bloquées par l'atmosphère terrestre.

✓ Le rayonnement submillimétrique, de 350 à 1 000 micromètres, caractérise le matériau froid.

DES CRÈCHES D'ÉTOILES SURCHARGÉES

Bien que le modèle classique de formation stellaire n'en tienne pas compte, les étoiles naissantes peuvent interférer avec la formation de leurs voisines. Le télescope *Spitzer* a trouvé dans l'amas du Sapin de Noël (NGC 2264) un amas dense d'étoiles d'âges variés. Certaines des « étoiles » les plus jeunes s'avèrent être des groupements serrés de protoétoiles, parfois jusqu'à une dizaine dans un rayon de 0,1 année-lumière, et donc assez proches pour interagir.



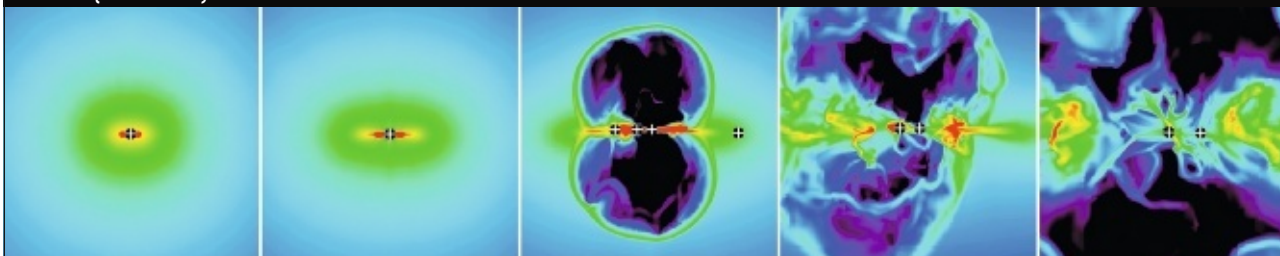
NASA, JPL-Caltech et P. Teixeira, Harvard Smithsonian Center for Astrophysics

DÉPASSER LA MASSE LIMITE

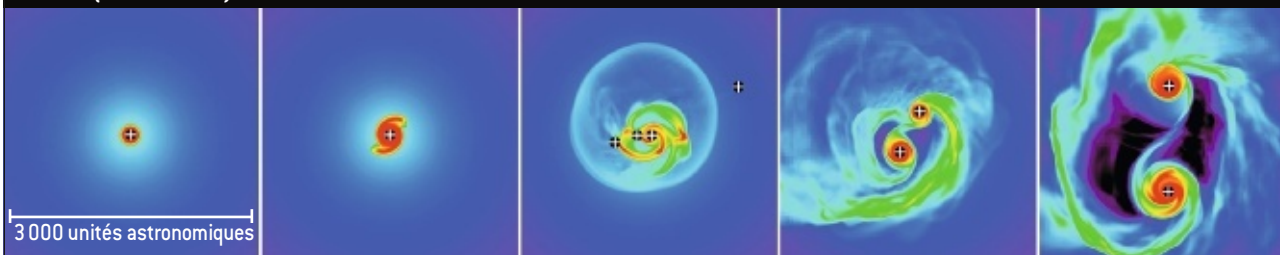
Des simulations numériques récentes montrent qu'une étoile peut atteindre une masse élevée. Comment ? Grâce à une croissance non uniforme. Le rayonnement émis par la pro-

toétoile repousse le gaz, créant des vides géants au sein du gaz. Toutefois, il ne tarit pas complètement le flux rentrant, qui se rassemble sous forme de filaments entre ces vides.

Densité (vue de côté)



Densité (vue de dessus)



3 000 unités astronomiques

17 500 ANS : Une protoétoile s'est formée, et du gaz tombe dessus de façon quasi uniforme. L'énergie potentielle gravitationnelle libérée fait briller faiblement la protoétoile.

25 000 ANS : Quand la protoétoile a atteint environ 11 masses solaires, le disque qui l'entoure devient gravitationnellement instable et forme une spirale.

34 000 ANS : au-delà de 17 masses solaires, le rayonnement de la protoétoile chasse le gaz, créant une bulle. Du gaz continue à tomber par les côtés. D'autres protoétoiles se forment.

41 700 ANS : Une petite protoétoile croît plus vite que la protoétoile centrale et rivalise bientôt de taille avec elle. L'accrétion est inégale dans l'espace, mais aussi irrégulière dans le temps.

55 900 ANS : À la fin de la simulation, l'étoile centrale atteint 42 masses solaires et son compagnon, 29. Il reste quelque 28 masses solaires de gaz, qui finiront sans doute par être absorbées.

M. Krumholz et al., Science, vol. 323, 15 janvier 2009

À quelle vitesse se forment les étoiles ?

✓ C'est une question qui donne du fil à retordre aux astronomes. Le point crucial est l'étape finale de l'effondrement, après la formation du noyau de la protoétoile, mais avant qu'elle ait grossi en accrétant de la masse. L'équipe de Neal Evans, de l'Université du Texas à Austin, a observé des complexes de formation stellaire proches avec le télescope spatial *Spitzer* et trouvé que l'accrétion se fait à un rythme très irrégulier. L'étoile grossit très rapidement jusqu'à la moitié de sa masse finale, mais sa croissance ralentit ensuite ; il lui faut dix fois plus de temps pour accumuler le reste de sa masse. L'ensemble du processus est donc plus long que ce que l'on estimait auparavant : deux millions d'années en moyenne pour une étoile de type solaire.

un groupe serré. Paula Teixeira, de l'Observatoire européen austral, et ses collègues ont montré qu'elles sont espacées d'environ 0,3 année-lumière. Ce motif régulier est ce que l'on attendrait si les cœurs denses s'effondrent sur place, à partir des conditions initiales dans le nuage moléculaire global, comme ce que décrit le modèle turbulent. Dans le modèle concurrentiel, *a contrario*, la répartition des étoiles devrait être aléatoire. Pourtant, les images plus détaillées montrent que certaines protoétoiles apparentes ne sont pas des objets uniques, mais des groupes compacts d'objets. L'un d'entre eux regroupe dix sources dans un rayon de 0,1 année-lumière. C'est une densité telle que l'accrétion concurrentielle doit entrer en jeu, au moins à petite échelle.

Par conséquent, comme pour l'effondrement, l'effet de l'environnement sur la taille des étoiles n'est pas exclusif. La turbulence et l'accrétion concurrentielle peuvent toutes deux opérer.

Les étoiles massives sont rares et ne vivent pas longtemps, mais elles jouent un rôle très important dans l'évolution des

galaxies. Elles injectent de l'énergie dans le milieu interstellaire à la fois par leur rayonnement et par le flot de matière qu'elles éjectent, et, à la fin de leur vie, elles explosent en supernovae, restituant de la matière enrichie en éléments lourds. La Voie lactée est criblée de bulles et de vestiges de supernovae créés par ces étoiles.

Prendre du poids : pas si simple

Cependant, la théorie classique peine à expliquer leur formation. À partir du moment où une protoétoile atteint le seuil d'environ 20 masses solaires, la pression exercée par son rayonnement devrait l'emporter sur la gravité et l'empêcher de poursuivre sa croissance. En plus de la pression du rayonnement, le vent stellaire d'une étoile massive disperse son nuage natal, limitant davantage sa croissance, tout en interférant avec la formation d'étoiles dans les environs.

Des travaux théoriques récents de Mark Krumholz et ses collègues offrent une piste pour sortir de cette impasse. Leurs simu-

lations en trois dimensions montrent la croissance stellaire dans toute sa complexité. L'afflux de matériau n'y est pas uniforme ; les régions denses alternent avec des bulles où la lumière stellaire peut s'échapper. Ainsi, la pression radiative pourrait finalement ne pas faire obstacle à la croissance. Des étoiles compagnons se forment aussi facilement à partir du matériau dense en accretion, expliquant pourquoi les étoiles massives sont rarement solitaires. Les astronomes cherchent maintenant la confirmation de ces simulations en observant avec le télescope *Spitzer* des régions de formation d'étoiles massives. La vérification sera cependant délicate : la rareté et la brièveté de ces étoiles rendent leur formation difficile à observer.

Heureusement, de nouveaux équipements vont permettre de progresser sur les questions liées à la formation des étoiles. *Herschel* et *SOFIA* observent depuis peu les longueurs d'onde submillimétriques et de l'infrarouge lointain, domaines où la formation stellaire est la plus facile à voir. Ils ont la résolution spatiale et spectrale nécessaire pour car-

tographier la répartition des vitesses dans les nuages interstellaires. Aux plus grandes longueurs d'onde, l'interféromètre ALMA, en construction dans les Andes chiliennes, permettra de cartographier les protoétoiles avec un luxe de détails.

Avec ces nouvelles observations, les astronomes espèrent déterminer le cycle de vie complet du milieu interstellaire, des nuages atomiques aux nuages moléculaires, jusqu'aux cœurs prestellaires et aux étoiles, et enfin le retour au gaz diffus. Ils espèrent également observer les disques protostellaires avec une résolution angulaire suffisante pour suivre la chute de matériau issu du nuage, ainsi que comparer les effets de différents environnements sur la naissance des étoiles.

Les réponses auront des répercussions dans d'autres domaines de l'astrophysique. La théorie actuelle de la formation stellaire n'est pas mauvaise, mais ses lacunes nous empêchent d'expliquer certains des aspects les plus importants de l'Univers. La formation stellaire est un processus plus riche que ce que nous avions anticipé. ■

✓ BIBLIOGRAPHIE

M. Krumholz *et al.*, **The formation of massive star systems by accretion**, *Science*, vol. 323, pp. 754-757, 2009.
arxiv.org/abs/0901.3157

S. P. Zwart, **Les frères perdus du Soleil**, *Pour la Science* n° 387, janvier 2009.
<http://bit.ly/pls387-soleil>

M. Heydari-Malayeri, **L'énigmatique formation des étoiles massives**, *Pour la Science* n° 359, septembre 2007.
<http://bit.ly/pls359-etoiles-massives>

S. Mohanty et R. Jayawardhana, **La naissance tragique des naines brunes**, *Pour la Science* n° 340, février 2006. <http://bit.ly/pls340-naines-brunes>

E. Young *et al.*, ***Spitzer* and Magellan observations of NGC 2264 : a remarkable star-forming core near IRS-2**, *Astrophysical Journal*, vol. 642, n° 2, pp. 972-978, 2006.
[Arxiv.org/abs/astro-ph/0601300](http://arxiv.org/abs/astro-ph/0601300)



LES {Partagez les savoirs} RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

AU JARDIN DES PLANTES

2011, Année internationale des Forêts.
Dans le cadre de cet événement, le Muséum vous propose des cycles de conférences et de films.

ENTRÉE LIBRE
DÉTAILS SUR [WWW.MNHN.FR](http://www.mnhn.fr), DANS "ÉVÉNEMENTS"

LES LUNDIS DU MUSÉUM, 18H

Cycle de conférences « La forêt : son rôle, son état, ses habitants » :

Lundi 7 mars : Forêt, climat et cycle du carbone, Denis Loustau, INRA

Lundi 14 mars : La dynamique et l'architecture des arbres en forêt guyanaise, Bernard Riéra, CNRS - **Lundi 28 mars** : Quelle(s) forêt(s) en France en 2100?, Vincent Badeau, INRA - **Lundi 4 avril** : Des forêts et des hommes sous les tropiques : une vieille cohabitation, Serge Bahuchet, Muséum.

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution
36 rue Geoffroy Saint-Hilaire, Paris 5^e
Métros : Gare d'Austerlitz - Jussieu

LES COURS PUBLICS, LES JEUDIS À 18H

Assurés par les chercheurs du Muséum, ils s'adressent à tous.

Cycle « Anatomie comparée » P.-H. Gouyon, Muséum.

Jeudi 24 mars : Formes et diversité - **Jeudi 31 mars** : Sélection et optimalité - **Jeudi 7 avril** : La forme et l'information

Grand Amphithéâtre du Muséum
57 rue Cuvier, Paris 5^e - Métro : Jussieu

LE BAR DES SCIENCES

Mercredi 16 mars à 19h30 : De la destruction des forêts à la reforestation

Café/Restaurant de la Baleine
47 rue Cuvier, Paris 5^e - Métro : Jussieu



Les attaques de circuits intégrés

John Villasenor

Des microcomposants peuvent être introduits à des fins malveillantes dans les circuits intégrés avant leur sortie d'usine. Tout dispositif électronique est une cible potentielle.

Votre téléphone portable ne répond plus ; le clavier est inactif et vous n'arrivez plus à envoyer ni à recevoir d'appels ou de messages textuels. Après avoir sans succès tenté d'éteindre l'appareil, vous retirez la batterie, la réinsérez, mais le téléphone demeure inerte. Manifestement, la panne est inhabituelle. Quelques heures plus tard, vous apprenez que votre cas est loin d'être isolé : le mobile de millions de personnes s'est figé de façon aussi soudaine qu'inexplicable.

Voilà comment pourrait se manifester une attaque matérielle à grande échelle. Cette menace augmente à mesure que les circuits intégrés qui contrôlent de nombreux équipements de la vie courante se perfectionnent. Chaque circuit, ou puce électronique, est devenu si complexe qu'aucune équipe d'ingénieurs ne connaît tous ses composants ; au contraire, ses différentes parties sont conçues un peu partout dans le monde, puis réunies pour la première fois lorsque la puce est gravée dans

du silicium. Le produit final est si complexe que les tests fonctionnels qu'il subit ne peuvent tout vérifier. Aussi, une pièce qui serait insérée dans la puce avec une intention malveillante restera indétectée... jusqu'au moment où elle sera activée par un événement déclencheur. Tel un cheval de Troie, elle ne passera à l'attaque qu'après avoir pénétré dans sa cible.

La nature des attaques matérielles les rend potentiellement bien plus pernicieuses que les vers, virus et autres logiciels malveillants. Même si un virus informatique peut se déplacer de machine en machine, il est en principe possible, à l'aide d'un antivirus, de l'éradiquer du système qu'il a infecté. En revanche, le seul moyen de remédier à une attaque matérielle consiste à changer les circuits infectés. Du moins pour l'instant.

La question tracasse tous les experts de la cybersécurité. En effet, tout ce qui contient un microprocesseur – c'est-à-dire tout ce qui est électronique – est vulnérable. Les circuits intégrés sont au cœur de nos systèmes de communication et de distribution d'électricité. Ils positionnent les volets des ailes des avions de ligne et modulent la puissance du système antiblocage des freins des voitures. Ils contrôlent l'accès aux coffres des banques, aux distributeurs de billets, la fonctionne-

L'ESSENTIEL

✓ De plus en plus complexes et puissants, les circuits intégrés, ou puces électroniques, sont aussi plus vulnérables aux attaques dites matérielles.

✓ Un « cheval de Troie » matériel peut bloquer le fonctionnement d'une puce des années après sa fabrication.

✓ Toutefois, la protection des équipements contre ces attaques matérielles ne relève pas de l'utopie.