

## 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



## 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.

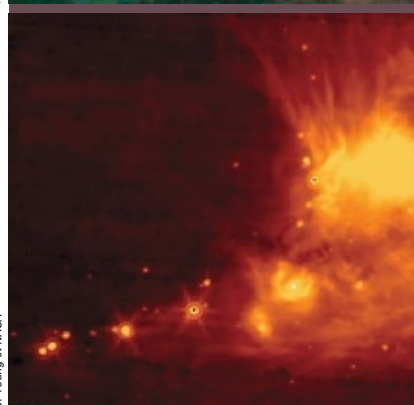
NASA, JPL/Caltech et Harvard Smithsonian Center for Astrophysics



**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 éparses 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

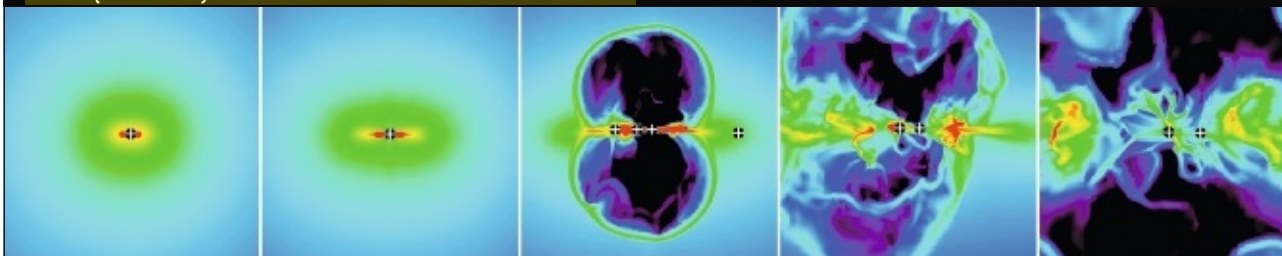


## DÉPASSER LA MASSE LIMITE

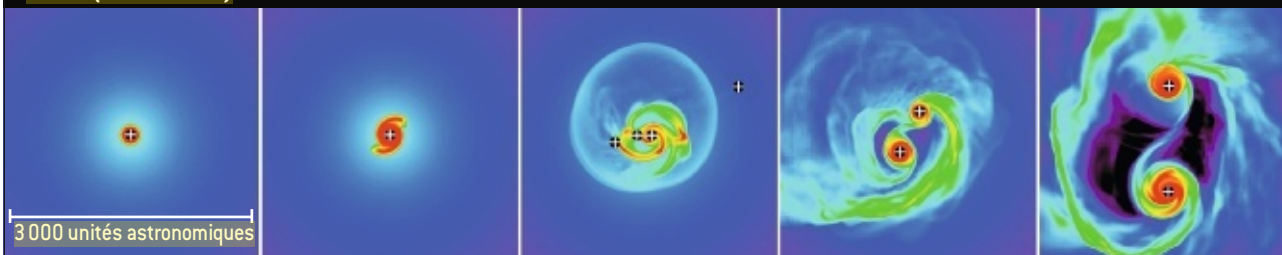
Des simulations numériques récentes montrent qu'une étoile peut atteindre une masse élevée. Comment ? Grâce à une croissance non uniforme. Le rayonnement émis par la pro-

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-