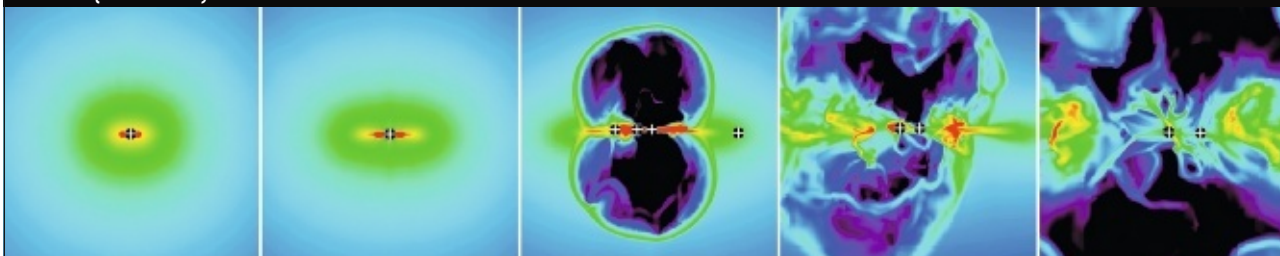


## DÉPASSER LA MASSE LIMITE

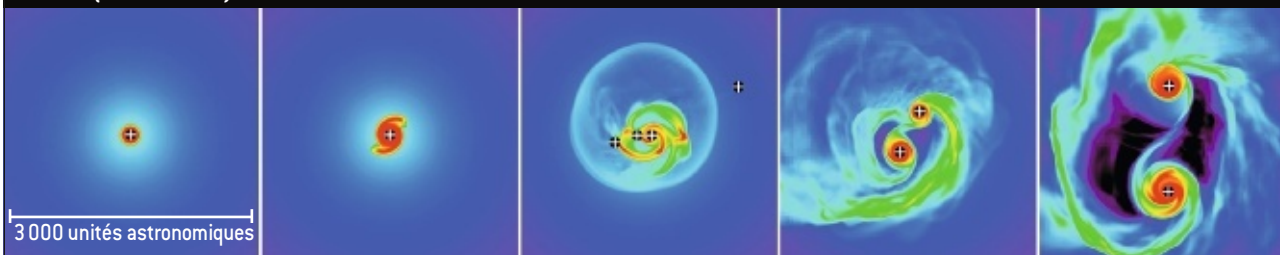
Des simulations numériques récentes montrent qu'une étoile peut atteindre une masse élevée. Comment ? Grâce à une croissance non uniforme. Le rayonnement émis par la pro-

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)



**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](http://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<sup>e</sup>  
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<sup>e</sup> - 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<sup>e</sup> - Métro : Jussieu

