



 **ZOOM** | James LEQUEUX | Observatoire de Paris-PSL



LA NAISSANCE ET L'ÉVOLUTION DES ÉTOILES

De grands progrès ont été faits depuis une quinzaine d'années dans la compréhension de la formation des étoiles, surtout de celles de faible masse. Ils sont résumés dans cet article, qui décrit aussi l'évolution ultérieure de ces étoiles.

(Rosette - Heber Pontes)

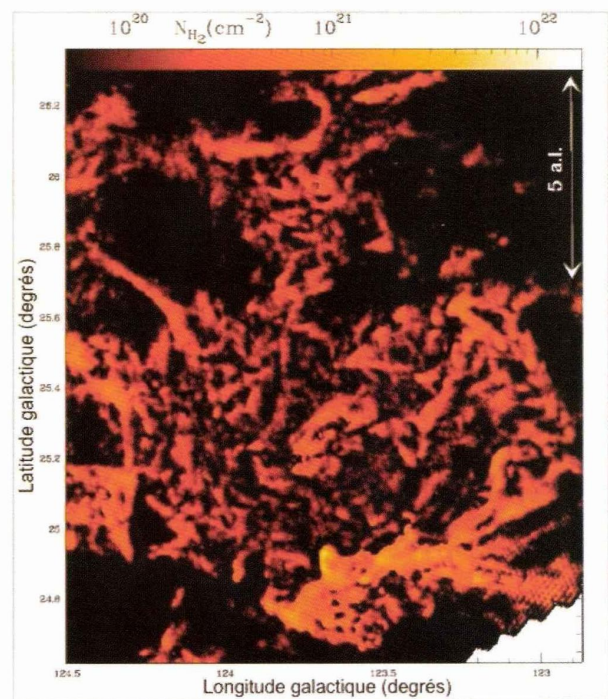
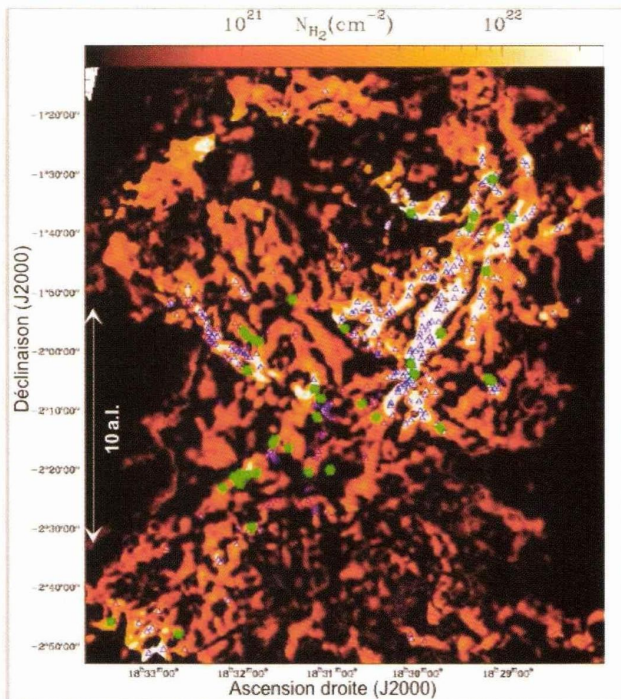
Les étoiles résultent de l'effondrement, sous l'effet de leur propre gravité, de nuages de gaz et de poussières interstellaires. Cela pose plusieurs questions : où cet effondrement se produit-il ? Est-il spontané ou déclenché par une cause extérieure, et laquelle ? Comment se passe-t-il ? Comment est-il affecté par des facteurs physiques comme les mouvements dans le nuage initial et le champ magnétique qu'il contient ? Quelles sont les étapes qui conduisent à l'étoile « adulte » ? C'est à ces questions que nous allons tenter de répondre.

Où les étoiles se forment-elles ?

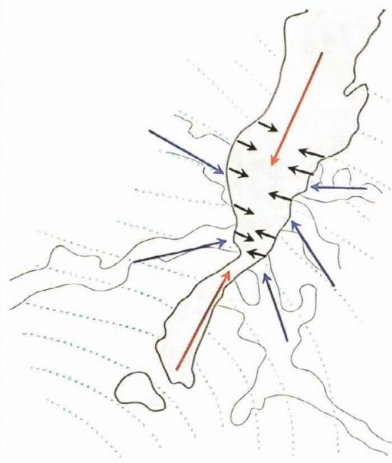
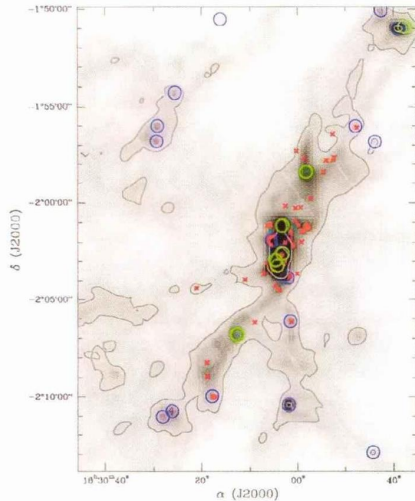
L'observation montre que les nuages interstellaires les plus froids sont le siège de la formation d'étoiles de faible masse (infé-

rieure à quelques masses solaires), que l'on observe d'abord en infrarouge lorsqu'elles sont encore à l'intérieur du nuage, puis qui apparaissent en lumière visible lorsque celui-ci se dissipe. Les nuages géants, comme celui qui se trouve derrière la nébuleuse d'Orion, sont plus chauds et forment des étoiles de toutes masses. On peut y observer les étoiles en formation les plus massives, encore immergées dans leur nuage parent, comme des sources infrarouges très brillantes : un exemple est l'objet de Becklin-Neugebauer (du nom de ses découvreurs en 1967), qui est l'astre le plus lumineux du ciel après le Soleil dans l'infrarouge moyen ; c'est une étoile en formation, une protoétoile, d'environ 15 masses solaires. Ces protoétoiles massives se manifestent également par des phénomènes secondaires, dont les plus remarquables sont les émissions radio très intenses des molécules OH à 18 cm de longueur d'onde et H₂O à 1,35 cm.

Regardons de plus près ces nuages interstellaires. Ce ne sont pas en général des structures plus ou moins sphériques : ceux où ne se forment que des étoiles de petite masse sont plutôt des filaments irréguliers. La *figure 1* en montre deux exemples et la *figure 2* est une vue plus détaillée de la formation d'étoiles dans une partie du champ de la *figure 1*. La théorie, bien vérifiée par l'observation, montre que l'effondrement sur elles-mêmes de portions de ces filaments pour former des étoiles devient possible lorsque leur masse par unité de longueur du filament est supérieure à une valeur critique, telle que la gravité devient supérieure à la force de pression qui maintenait le filament à l'équilibre. Cette valeur critique est estimée à $M_{crit} = 2Gc_s^2$, où G est la constante de la gravitation et c_s la vitesse du son dans le gaz du filament, laquelle dépend de sa température. Celle-ci est de l'ordre de 10 K (degrés absolus), et on trouve que la masse critique par année-lumière de longueur est de l'ordre de 4 masses solaires.



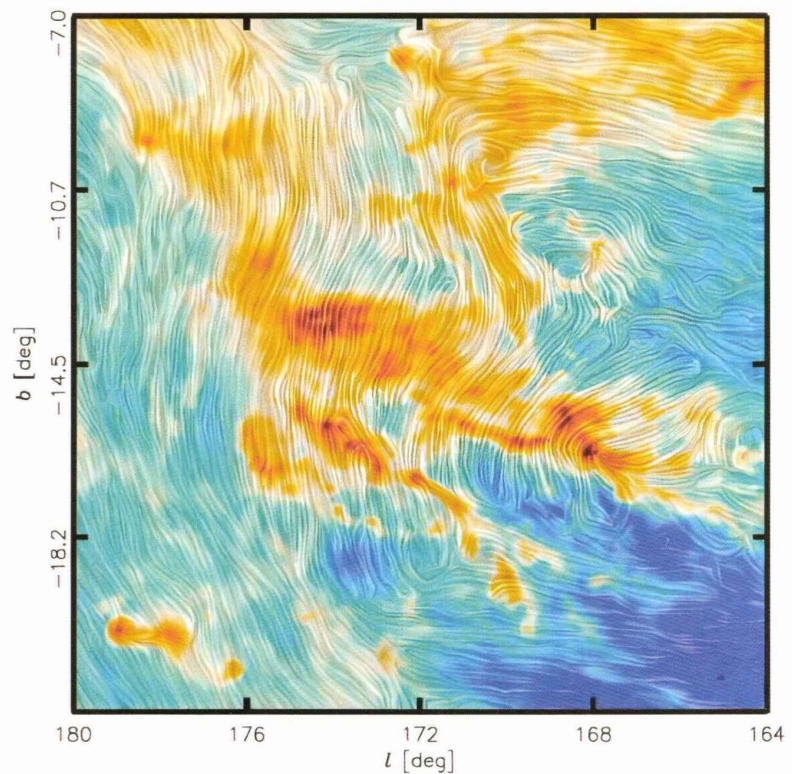
1. Matière interstellaire et formation d'étoiles dans deux champs (Aquila-Serpens à gauche et près de l'étoile Polaire à droite). La distribution de la matière interstellaire (ici surtout de l'hydrogène moléculaire H₂) a été obtenue à partir d'observations dans l'infrarouge lointain de l'émission de la poussière qu'elle contient également, par le satellite *Herschel*. Le contraste a été artificiellement augmenté dans ces images pour bien faire apparaître les filaments. Les étoiles en formation sont indiquées par des cercles verts, et les condensations qui vont bientôt former des étoiles par des triangles bleus. L'échelle de couleur au-dessus des images donne le nombre de molécules d'hydrogène dans une colonne de 1 cm² de section. Comme les filaments ont un diamètre assez constant, de l'ordre de 10 000 années-lumière, on peut estimer leur masse par unité de longueur, et on constate que la formation d'étoiles dans Aquila-Serpens est possible là où cette quantité est supérieure à une certaine valeur critique. Cette valeur n'est pas atteinte dans la région de la Polaire, où les étoiles ne peuvent donc pas se former. (D'après André P. *et al.*, *Astronomy & Astrophysics* 518, 2010, L102)



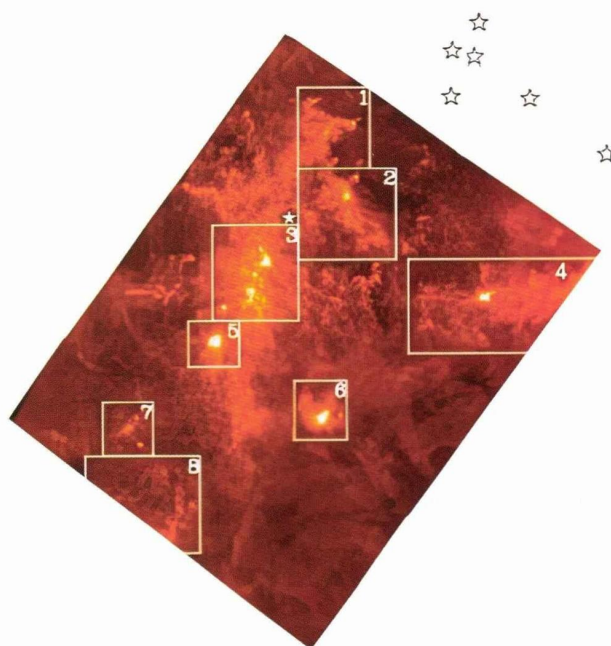
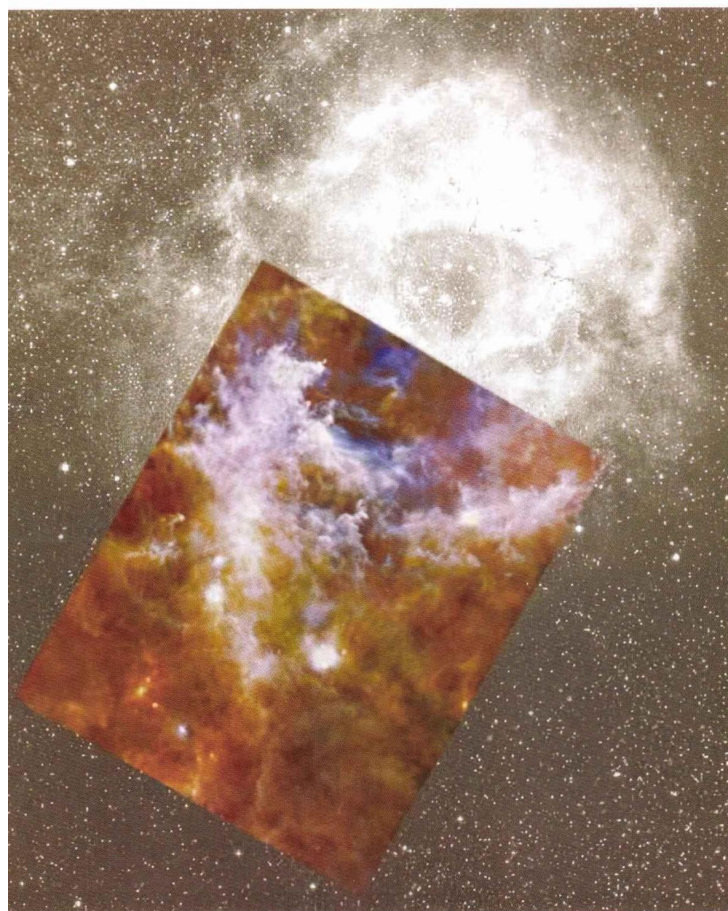
2. Formation d'étoiles dans le filament central de la figure 1 de gauche (voir p. 33). Ci-contre, à gauche, la distribution de la matière interstellaire est obtenue par la mesure avec le satellite *Herschel* de l'émission de la poussière dans l'infrarouge lointain, à 350 micromètres. Les cercles verts sont des protoétoiles certaines, les cercles bleus des protoétoiles candidates et les croix rouges des étoiles très jeunes. Tous ces objets ne sont visibles que dans l'infrarouge. À droite, les flèches indiquent les mouvements de matière observés par l'effet Doppler-Fizeau sur des raies moléculaires en ondes radio ; les lignes de force du champ magnétique sont marquées en traits pointillés. (D'après Bontemps S. et al., *Astronomy & Astrophysics* 518, 2010, L85 et Nakamura F. et al., *Astrophysical Journal* 737:56, 2011)

Le champ magnétique joue-t-il un rôle dans ce processus ? On peut aujourd'hui tracer le champ magnétique dans le milieu interstellaire, grâce à une propriété de très petits grains de poussière interstellaire magnétiques ou paramagnétiques : ils se comportent comme de minuscules aimants, qui tournent comme des toupies autour des lignes de force du champ magnétique et émettent dans l'infrarouge lointain un rayonnement thermique, partiellement polarisé perpendiculairement à la direction du champ magnétique. En observant cette polarisation (et les satellites *Planck* et *Herschel* étaient équipés pour cela), on obtient donc la direction du champ magnétique. La figure 3 en montre un exemple. On constate que le champ magnétique est plutôt perpendiculaire aux filaments lorsque ceux-ci sont assez denses, ce qui favorise l'écoulement de la matière interstellaire (laquelle est toujours partiellement ionisée et donc conductrice de l'électricité) le long des lignes de force du champ : cela alimente les filaments, comme on peut le voir figure 2 à droite. Cependant, le champ magnétique ne semble pas affecter beaucoup l'effondrement lui-même qui conduit à la formation des étoiles, car les observations sont en bon accord avec la théorie où on ne le fait pas intervenir.

Alors que la formation des étoiles de petite masse qui vient d'être décrite a surtout lieu dans les filaments interstellaires et est spontanée, celle des étoiles de grande masse, qui est toujours accompagnée de formation d'étoiles moins massives, se produit dans de grands nuages plus chauds et semble généralement nécessiter une action extérieure. On a cité plus haut le cas du nuage situé à l'arrière de la nébuleuse d'Orion, chauffé par le



3. Le champ magnétique dans la région du Taureau, observé par le satellite *Planck*. Les coordonnées sont la longitude galactique l et la latitude galactique b . Les couleurs représentent la densité de colonne de la matière interstellaire, obtenue à partir de l'observation de l'émission de la poussière en ondes submillimétriques. La « draperie » superposée montre l'orientation du champ magnétique. On constate qu'aux faibles densités, le champ magnétique est plutôt aligné avec les structures, tandis que dans les filaments plus denses, il est plutôt perpendiculaire aux filaments, ce qui favorise la chute de matière sur ces filaments. (D'après *Planck* Collaboration, *Astronomy & Astrophysics* 586, A138, 2016)



rayonnement des étoiles O, jeunes et massives, du Trapèze, et où se forment des étoiles de toutes masses. Un autre exemple est celui d'un nuage associé à la nébuleuse de la Rosette (fig. 4). L'augmentation de pression qui résulte de l'ionisation et des vents produits par les étoiles chaudes, ou de l'onde de choc qui borde le reste en expansion des supernovæ, ou même à plus grande échelle le passage d'un bras de spirale, pendant lequel le gaz est comprimé, sont les déclencheurs de l'effondrement des parties les plus denses du milieu interstellaire.

L'effondrement du nuage initial

Les condensations dans le gaz interstellaire peuvent s'effondrer spontanément sous l'effet de leur propre gravité lorsque leur masse est supérieure à une certaine quantité, nommée masse de Jeans, du nom de

4. Formation contagieuse d'étoiles dans la nébuleuse de la Rosette (NGC 2244), observée avec le satellite Herschel.

À gauche, image en infrarouge lointain de l'émission des poussières interstellaires à 70 µm (bleu), 160 µm (vert) et 500 µm (rouge), superposée à une image visible en noir et blanc. À droite, image du même champ à 250 µm montrant les zones de formation stellaire, où des concentrations de matière de 20 à 160 masses solaires sont visibles comme des points brillants. C'est là que se formeront les étoiles. Les étoiles O qui ionisent la nébuleuse sont indiquées au-dessus. (D'après Schneider N. et al., *Astronomy & Astrophysics* 518, L83, 2010)

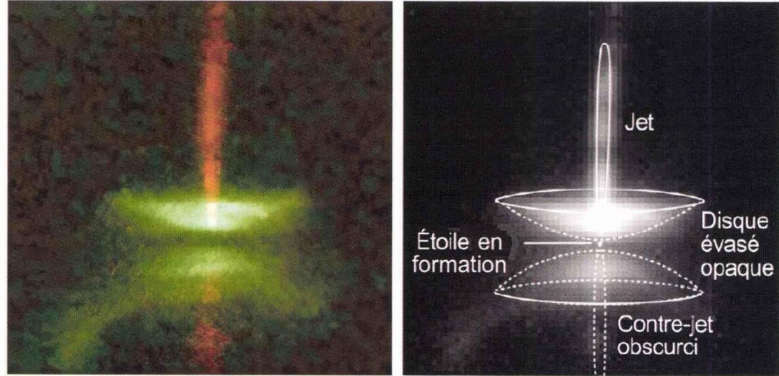
l'astronome anglais James Jeans (1877-1946), qui a le premier étudié ce problème : par exemple, dans un nuage moléculaire à la température de 10 K avec une densité de 5 000 molécules d'hydrogène par centimètre cube, la masse de Jeans est de l'ordre d'une dizaine de masses solaires. Mais, comme nous venons de le voir, une augmentation de la pression extérieure peut

favoriser cet effondrement. Le nuage peut aussi se fragmenter, si bien que dans ce cas l'étoile finale n'a pas la masse de Jeans. Ces phénomènes ne sont pas très bien compris, car la présence de turbulence ou d'un champ magnétique vient compliquer la situation. Une fois l'instabilité déclenchée, tout se passe rapidement... à l'échelle astronomique : par exemple, le nuage que nous venons d'évoquer s'effondrerait complètement en 400 000 ans, si deux phénomènes ne venaient pas ralentir et même arrêter la chute.

Tout d'abord, la contraction produit une augmentation de pression qui chauffe le gaz dont est constitué le nuage. Au début, la chaleur peut être évacuée par rayonnement, mais cela ne dure guère, car ce rayonnement a de plus en plus de mal à sortir : le nuage devient vite complètement opaque dans le visible et même dans l'infrarouge proche et moyen. Ensuite, même l'émission des raies moléculaires radio, en particulier celles de la molécule CO, et dans l'infrarouge

lointain l'émission de la poussière qui accompagne le gaz ne peuvent plus guère sortir du nuage. Celui-ci est donc de plus en plus chaud : la pression augmente et stoppe l'effondrement de la partie centrale du nuage, le cœur. Celui-ci continue cependant à croître grâce à la chute de la matière qui l'entoure. Si la masse du cœur ainsi alimenté est suffisante, plus de 0,08 fois celle du Soleil, les réactions nucléaires peuvent s'amorcer : une étoile est née. Si elle est plus petite, on a affaire à une étoile avortée, une naine brune. Il apparaît cependant que les fragments opaques ne peuvent aboutir à une étoile, qu'elle soit normale ou avortée, que si leur masse est supérieure à 0,007 masse solaire, soit 7 fois la masse de Jupiter : sinon, ils finissent par se disperser. Ainsi, les planètes ne peuvent généralement pas être formées par l'effondrement d'un nuage interstellaire, sauf peut-être les plus grosses d'entre elles (la distinction entre très grosses planètes et naines brunes n'est d'ailleurs pas claire).

Un autre phénomène, que nous avons négligé jusqu'ici mais qui affecte profondément l'effondrement, est la rotation du nuage qui s'effondre : cette rotation, qui paraît être presque toujours présente en raison des mouvements dans le nuage initial et surtout de sa turbulence, produit une force centrifuge qui s'oppose à la contraction sauf le long de l'axe de rotation, et l'objet s'aplatit donc en s'effondrant. S'il tourne trop vite, il peut se scinder et former une étoile double, par un mécanisme

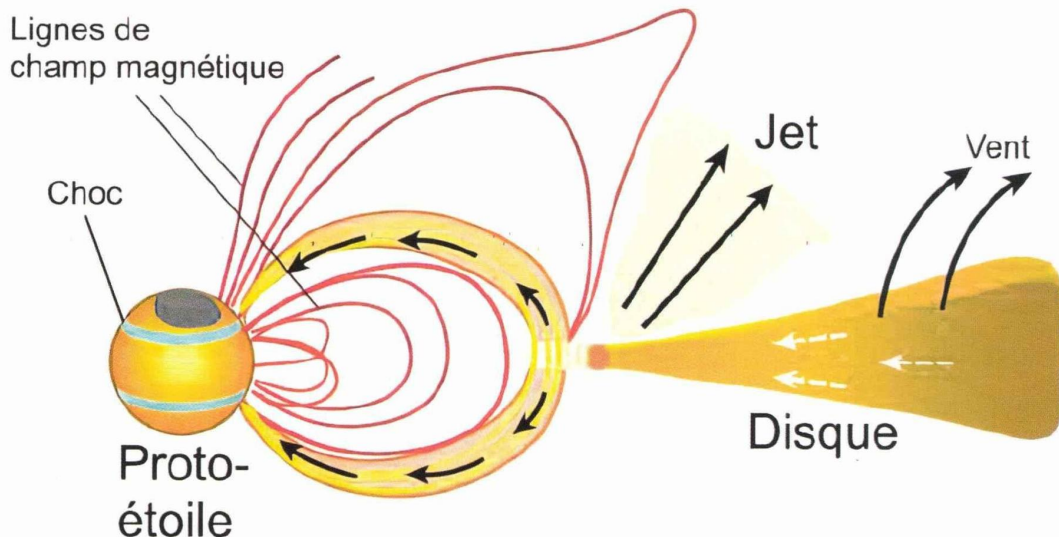


5. Un disque protostellaire et un jet bipolaire observés dans la région d'Orion avec le télescope spatial Hubble. Du disque, on ne voit que les surfaces éclairées par les étoiles de la région, ses parties internes étant très opaques. Les dimensions de l'image correspondent à 900 × 900 années-lumière. (Nasa et dessin de l'auteur)

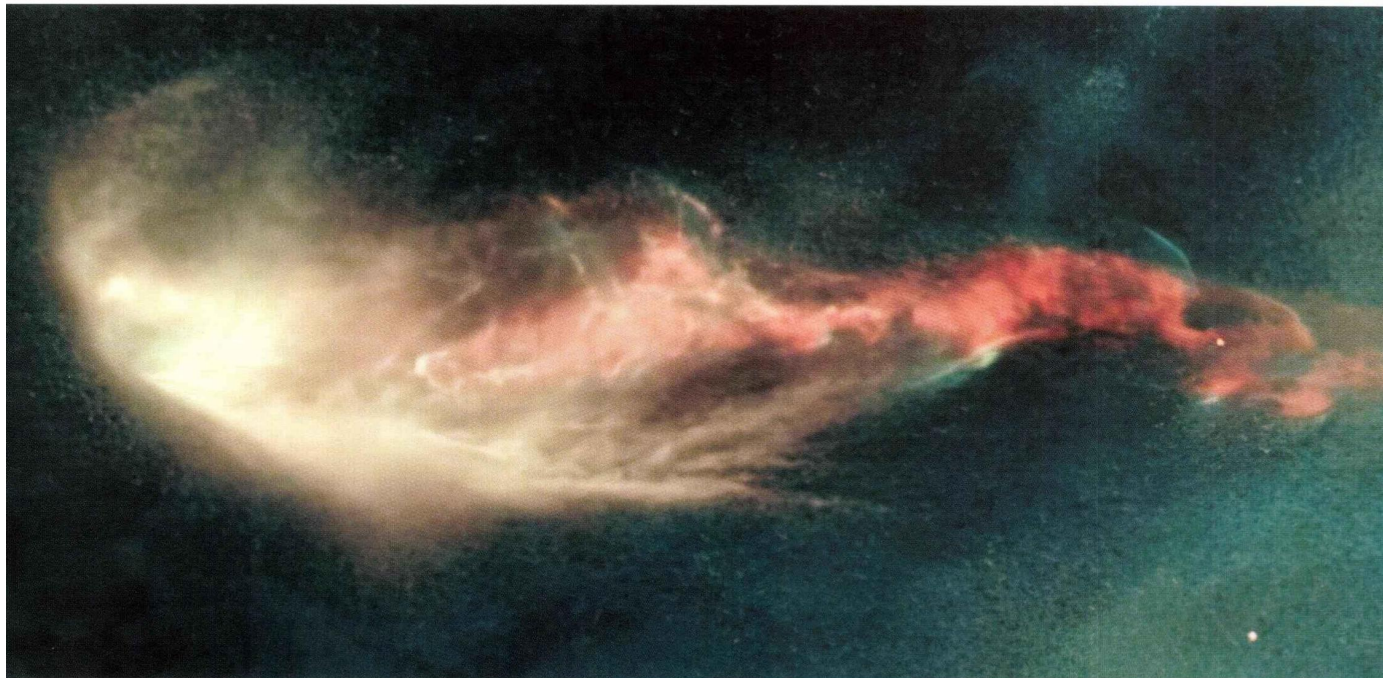
dont les détails ne sont pas encore très bien compris. S'il ne tourne pas trop vite, un disque en rotation se forme autour du cœur. C'est sur ce disque que tombe la matière environnante, tandis que la chute de matière sur le cœur, qui fait grossir la proto-étoile, se fait principalement à partir de l'intérieur du disque. Cependant, cette chute est entravée par la force centrifuge dans le disque en rotation, qui s'oppose à la progression de la matière vers l'intérieur. Il faut donc évacuer de l'intérieur du disque, au moins en partie, le moment cinétique de rotation. C'est bien ce qui s'est passé lors de la formation du Système solaire, où

l'essentiel du moment cinétique se trouve dans la révolution des planètes tandis que le Soleil ne tourne que lentement sur lui-même.

L'observation montre que ce moment cinétique est principalement emporté, avec une partie de la matière, par un jet émis de chaque côté du disque, jet qui est en rotation rapide sur lui-même. De tels jets bipolaires (fig. 5) sont si fréquemment observés qu'ils paraissent être la règle. La théorie montre qu'un champ magnétique est nécessaire pour engendrer le jet (fig. 6). Le jet bipolaire entraîne avec lui une partie du nuage moléculaire résiduel, ce qui ralentit sa propre rotation.

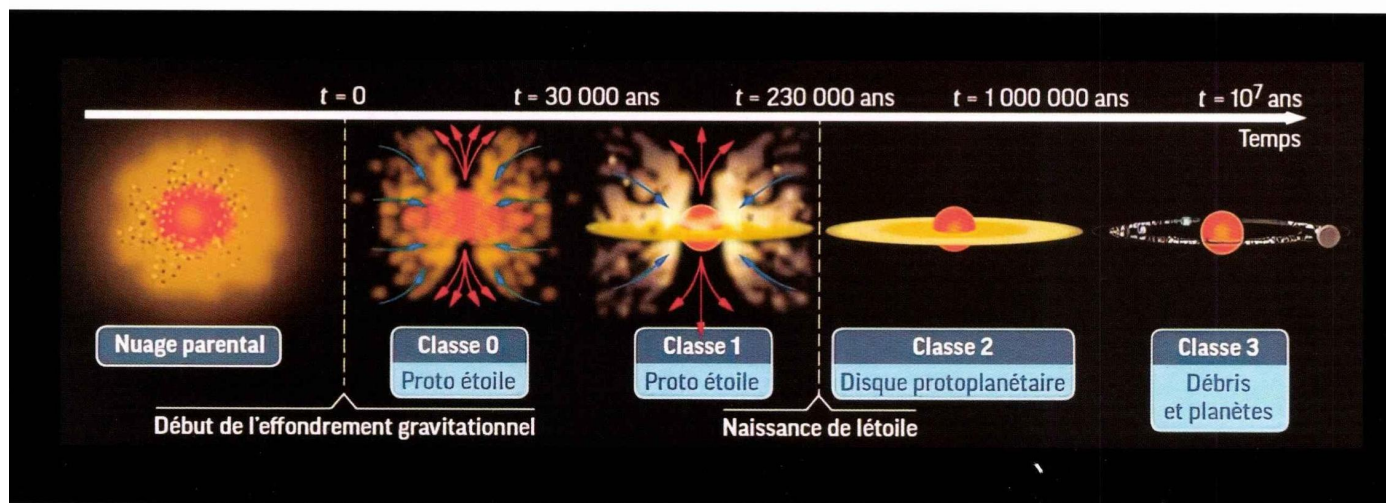


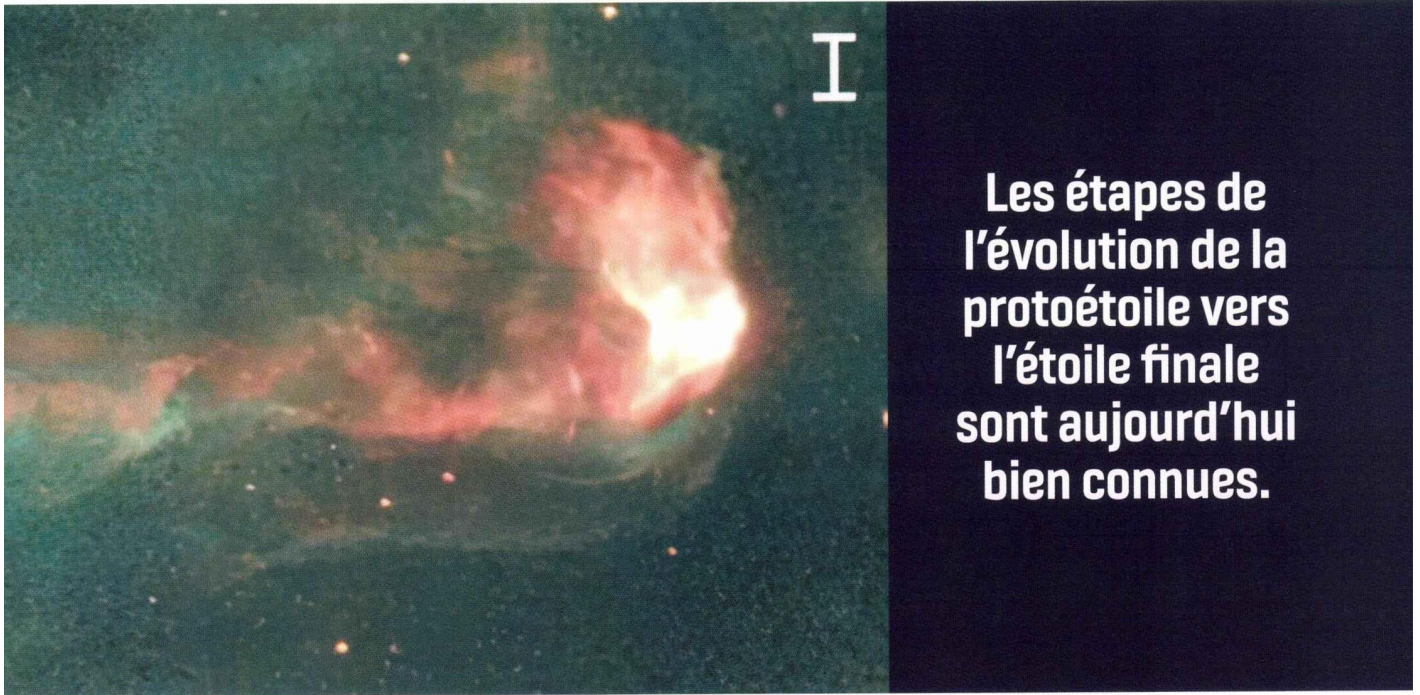
6. Capture de matière du disque par la protoétoile et formation du jet. Le champ magnétique de la protoétoile canalise la matière du disque capturée, qui forme un choc en tombant sur l'objet. Une partie de la matière est expulsée sous la forme d'un jet tournant, qui entraîne avec lui une partie du moment cinétique. Cela diminue donc la vitesse de rotation des parties internes du disque, ce qui permet à la matière de tomber sur la protoétoile, la force centrifuge étant fortement réduite. (Adapté de Hartmann et al., *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, 54, 135, 2016)



Les jets bipolaires sont quelquefois observables dans le visible, quand l'extinction par ce qui reste du nuage initial n'est pas trop forte. On les observe plus facilement dans l'infrarouge et en ondes radio, où l'extinction ne gêne pas, par l'émission de la poussière et des molécules qu'ils contiennent. À leur extrémité, on voit les régions où la matière avoisinante est comprimée par l'arrivée du jet, formant un choc qui excite le rayonnement de petits objets, les objets de Herbig-Haro, du nom de leurs découvreurs (fig. 7).

7. Un jet bipolaire observé par le télescope spatial Hubble, se terminant à ses extrémités par les objets de Herbig-Haro HH 46, à gauche, et HH 47, à droite. Le jet est déformé par son interaction avec le milieu interstellaire environnant. La longueur de la barre verticale correspond à 1 000 unités astronomiques. L'étoile centrale, à peine visible mais très brillante dans l'infrarouge, est la protoétoile qui a émis le jet, affectée par l'extinction. (Nasa)





Les étapes de l'évolution de la protoétoile vers l'étoile finale sont aujourd'hui bien connues.

Les différentes étapes de la formation des étoiles

Les étapes de l'évolution de la protoétoile vers l'étoile finale sont aujourd'hui bien connues, au moins pour les étoiles de masse faible ou moyenne, sous la forme de quatre classes illustrées par la *figure 8*.

La classe 0 correspond au stade où la protoétoile est généralement inobservable dans le visible et même dans l'infrarouge proche et moyen, car elle est cachée par la matière qui s'effondre, qui est très opaque :

on ne détecte en général que le rayonnement de la poussière de cette matière, qui émet en ondes submillimétriques et millimétriques. C'est à ce stade que la protoétoile acquiert l'essentiel de sa masse, et qu'un jet bipolaire se forme. La capture de matière par la protoétoile paraît très fluctuante au cours du temps ; les épisodes où elle est très intense correspondent à des objets qui peuvent être temporairement très lumineux, même dans le visible. On les nomme FU Orionis, du nom de leur prototype dont la magnitude a augmenté de 16,5 à 9,6 en 1937 ; elle s'affaiblit lentement depuis.

La classe 1 correspond à des objets beaucoup plus lumineux en moyenne que ceux de la classe 0. Ils émettent dans tout l'infrarouge. Le nuage primordial est en voie de disparition, révélant la protoétoile et son disque circumstellaire. La chute de matière a beaucoup diminué, ainsi que le jet bipolaire.

Dans **la classe 2**, l'étoile est complètement formée, avec un rayon initial 10 fois plus grand que celui de l'étoile finale et en conséquence une luminosité plus élevée. Elle se contracte progressivement ; la température centrale augmente et les réactions nucléaires s'y amorcent par la fusion du deutérium à 1 million de degrés, puis du lithium

à une température un peu plus élevée. La température de surface varie peu, et la luminosité diminue. Le disque circumstellaire est encore important, mais le jet a disparu. Ce stade correspond aux étoiles dites T Tauri, du nom de leur prototype. Elles sont très variables, et leur spectre montre de fortes raies d'émission, produites par le gaz du disque excité par le rayonnement de l'étoile.

La classe 3 correspond à une étoile qui a presque atteint son rayon final. Sa température de surface croît, et son cœur atteint trois millions de degrés, ce qui va permettre la fusion de l'hydrogène. Elle parvient alors sur la séquence principale, où elle passera l'essentiel de sa vie. Son rayonnement a chassé le gaz des parties centrales du disque, où ne subsistent que des débris solides et où se formeront les planètes rocheuses comme Mercure, Vénus, la Terre et Mars, tandis que les planètes gazeuses comme Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune se formeront plus loin, là où il reste du gaz... Mais cela est une autre histoire que nous ne détaillerons pas ici (voir *l'Astronomie*, juillet-août 2018, p. 28-35).

← 8. L'évolution d'une protoétoile depuis l'effondrement initial jusqu'à l'étoile complètement constituée est décrite sous la forme de quatre classes. L'échelle de temps correspond à une étoile de masse approximativement solaire. (D'après Philippe André)

Pour en savoir plus

Lequeux J. *Naissance, évolution et mort des étoiles*, EDP Sciences, Les Ulis, 2011.