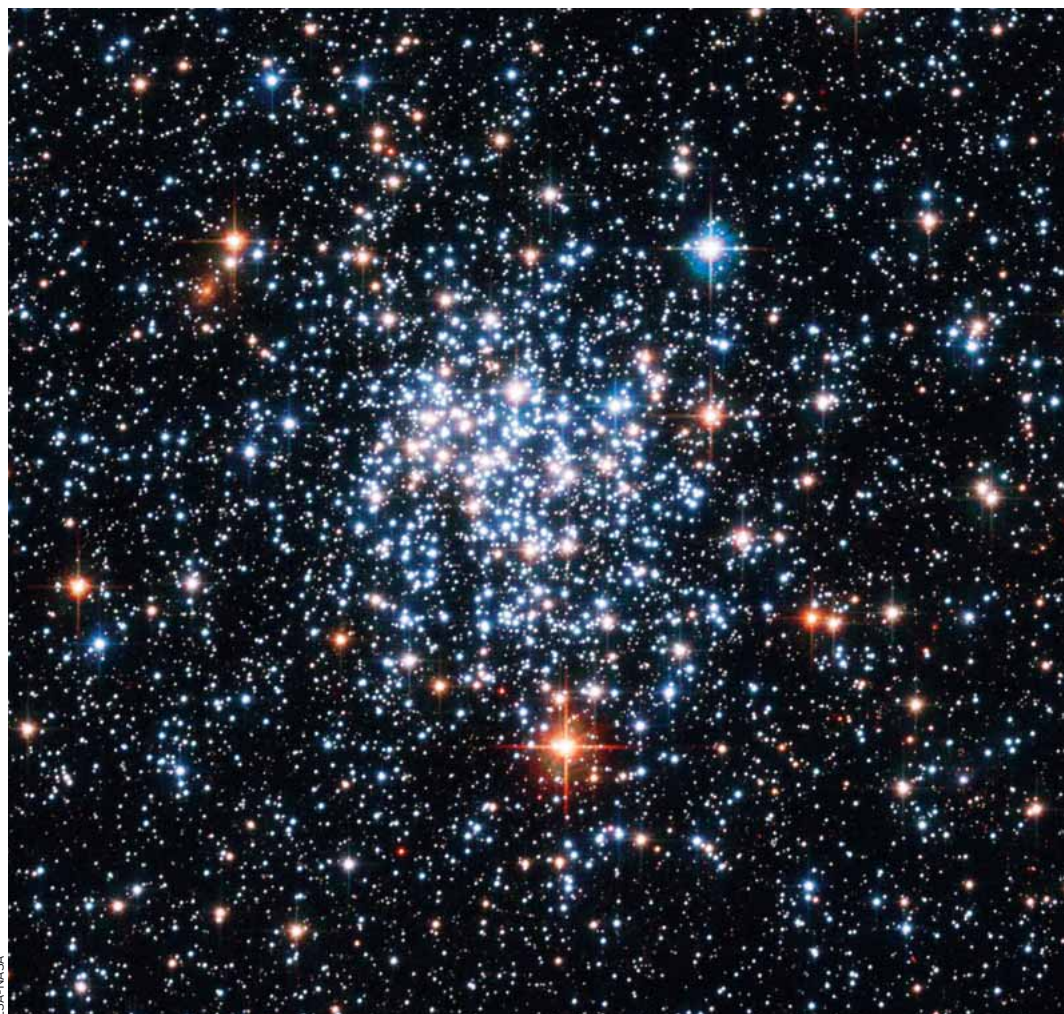


Voyage dans les nurseries stellaires

Toute la vie d'une étoile est déterminée par sa masse. C'est pourquoi les astrophysiciens s'intéressent maintenant aux moments de la naissance des astres, recherchant ce qui définit leur masse. De nouveaux instruments d'observation, comme le télescope spatial Herschel, vont participer à cette étude démographique.



Amas d'étoiles NGC 265 dans le Petit Nuage de Magellan, une galaxie proche de la nôtre. Les étoiles ne naissent pas isolées mais en groupes au sein d'un grand nuage de poussière et de gaz. La lumière des amas d'étoiles est généralement dominée par les étoiles massives bleues, extrêmement lumineuses, mais ayant une vie courte. L'âge d'un amas peut alors être estimé en recensant sa population d'étoiles bleues, jaunes ou rouges.

À notre échelle, les **étoiles** paraissent inaccessibles et éternelles. Et pourtant elles naissent, vivent et meurent. Chacune des centaines de milliards d'étoiles qui composent une **galaxie** est en effet une « simple » boule de gaz – principalement de l'**hydrogène** – où se produisent et s'entretiennent des réactions de **fusion thermonucléaire**, accompagnées d'un dégagement de chaleur et de lumière. Plus une **étoile** est grosse ou **massive**, plus elle a de **combustible**, donc plus elle **brille**, plus elle fabrique des **éléments lourds** comme de l'oxygène, du carbone ou du fer... et plus vite elle épuise ses réserves (voir *L'origine des éléments lourds*, p. 22). Les plus massives – de 10 à 100 fois la **masse du Soleil** – sont très chaudes (de 10 000 à 30 000 **K** en surface) et émettent essentiellement des **ultraviolets**. Elles nous apparaissent bleues et disparaissent après quelques dizaines de millions d'années. À l'opposé, les petites étoiles brillent peu, nous apparaissent rouges et mènent une vie tranquille. Ne dispersant que très

peu d'énergie dans l'espace puisque leur température ne dépasse pas les 1 300 K en surface, elles peuvent exister durant des milliards d'années. Le Soleil, étoile moyenne s'il en est, devrait vivre environ 10 milliards d'années. Le lecteur l'a compris : c'est la masse d'une étoile qui dicte son destin. Elle détermine sa durée de vie, son intensité lumineuse ou sa capacité à créer des éléments lourds. Elle préside aussi à sa mort, par exemple sous forme de **supernova**, et donc à l'impact de cette disparition sur l'*écologie galactique* (dispersion de matière recyclable dans le **milieu interstellaire**).

La naissance des étoiles

Le destin d'une étoile serait ainsi scellé dès sa naissance. Or cet épisode est encore mal connu. Comment le milieu interstellaire, ce gaz raréfié contenant quelques centaines d'**atomes** et **molécules** par litre, peut-il engendrer des objets aussi massifs ? Comment certaines parties d'un nuage



Région de formation d'étoiles N11B du Grand Nuage de Magellan, observée par le télescope spatial Hubble. Les étoiles naissent dans les zones noires et opaques des nuages moléculaires. Cette image montre un amas d'étoiles dans le milieu interstellaire et de nouvelles étoiles dont la lumière s'échappe des fragments rougeâtres et noirâtres du nuage.



NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (AURA/STScI)

moléculaire se transforment-elles en véritables « populations » d'étoiles ? Quelles sont les grandes étapes de la gestation des étoiles ? Pourquoi les petites étoiles comme les **naines rouges** et les étoiles de type solaire sont-elles toujours plus nombreuses que les étoiles massives dans une population donnée ?

Les étoiles ne naissent pas dans le milieu interstellaire à proprement parler. Les « pouponnières d'étoiles » sont en fait d'immenses – de l'ordre d'une centaine **d'années-lumière** de diamètre – nuages moléculaires contenant de l'alcool, de l'ammoniac, de l'eau, du monoxyde de carbone et surtout de l'hydrogène sous forme moléculaire (H_2). Comprenant en moyenne mille molécules par cm^3 (un dé à coudre), soit un million par litre, ces nuages sont beaucoup plus denses que le milieu environnant⁽¹⁾. Malgré un nombre limité de molécules par unité de volume, le réservoir de matière est en fait très important sur ces immenses volumes. Là se forment des milliers d'étoiles, souvent en « **amas** », qui sont des ensembles d'astres nés dans la même région et liés par **gravitation**. Les observateurs du ciel nocturne connaissent par exemple l'amas des Pléiades, situé dans la constellation du Taureau.

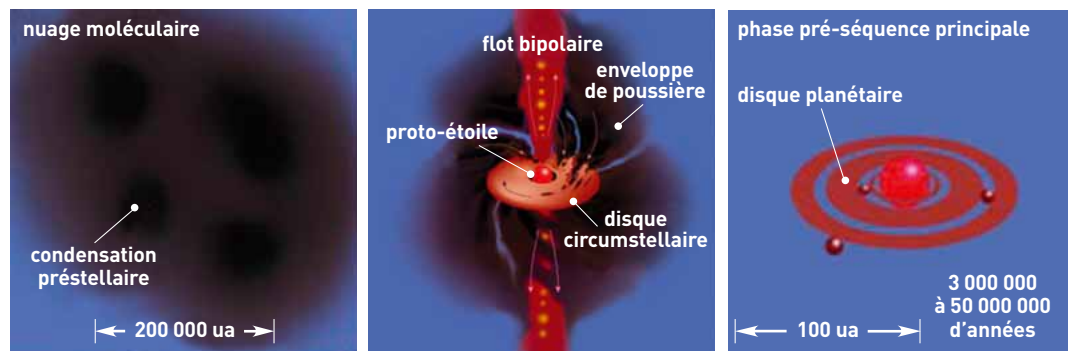
Histoire en trois épisodes

La mutation d'un nuage moléculaire en un amas d'étoiles se déroule en trois grandes phases. Durant la première, dite « pré-stellaire », le nuage initial se fragmente en morceaux sous l'influence de mouvements **turbulents** à grande échelle. Les fragments se condensent ensuite sous l'effet de leur propre **gravité**. La pression interne du gaz, d'origine thermique,

turbulente et magnétique, ralentit toutefois cette contraction, et maintient tout d'abord un certain équilibre. À un certain point, pour des raisons encore mal comprises, l'équilibre se rompt soudain et chaque fragment de nuage pré-stellaire s'effondre rapidement sur lui-même sous l'action de son propre poids. Les astrophysiciens ne savent pas encore si cet effondrement résulte de forces extérieures ou de la dissipation des résistances internes (turbulences ou magnétisme). Quoi qu'il en soit, un noyau central de taille et de densité stellaires se forme alors. Cela marque le début de la deuxième phase, dite « proto-stellaire » puisque ce noyau constitue l'embryon de la future étoile. Il grossit alors en dévorant une grande partie de la matière (gaz, poussière) du nuage condensé qui l'enveloppe. Lorsque toute cette matière est consommée, la phase proto-stellaire s'achève. L'étoile entre dans la troisième phase de sa naissance, dite « pré-séquence principale », en se contractant sous l'effet de son propre poids. Sa température interne augmente jusqu'à amorcer les réactions nucléaires de fusion de l'hydrogène en **hélium**. Une étoile de la **séquence principale**, comme notre Soleil, est née (figure 1). Si ce scénario en trois phases est relativement bien établi pour les étoiles de taille moyenne, la formation des astres de masse beaucoup plus petite, ou beaucoup plus grande, reste un sujet de débat. Les astrophysiciens ne savent pas encore s'ils se forment à partir de condensations pré-stellaires individuelles.

(1) Une densité toute relative cependant puisque, sur Terre, elle correspond au vide créé en laboratoire !

Figure 1. Des considérations théoriques et des observations indiquent que le processus de fabrication d'une étoile de type solaire comprend au moins trois phases distinctes : la phase pré-stellaire (à gauche), la phase proto-stellaire (au milieu) et la phase pré-séquence principale (à droite). 1 **ua** (unité astronomique) = 150 millions de km.



D'après T. Greene

L'inné et l'acquis

La très grande majorité des étoiles naissent en grandes fratries, les amas. Les observations d'amas jeunes montrent que les astres massifs (8 fois ou plus la masse solaire) y sont minoritaires. Il en va de même pour les étoiles très petites (un dixième de la masse solaire ou moins). La majorité des étoiles nouveau-nées ont donc une masse de l'ordre de celle du Soleil. Cette répartition des masses au sein d'un amas, que les astrophysiciens appellent « fonction de masse initiale », est-elle universelle? Autrement dit, les populations d'étoiles ont-elles toutes la même composition, où qu'on les observe dans l'Univers? La question est aujourd'hui posée.

Une autre grande question, portant sur les étoiles, taraude les scientifiques. Quand et comment se détermine la masse d'un astre particulier au sein d'un amas? Pour y répondre, les astrophysiciens du CEA mènent une véritable étude démographique des populations d'étoiles, de la gestation à la naissance. Ils testent par les observations deux **modèles**, reposant sur des calculs analytiques et des **simulations numériques**, pour expliquer la répartition des masses dans un amas. Dans le premier, la masse de chaque étoile est innée. Les nuages moléculaires se fragmentent en un certain nombre de condensations préstellaires qui se libèrent de leur environnement turbulent. Elles s'effondrent sur elles-mêmes pour donner chacune naissance à une proto-étoile. La masse de chaque étoile formée dépend donc directement de celle de la condensation préstellaire qui l'a engendrée. Dans ce cas, la répartition des masses stellaires dans la population résulte du processus de fragmentation du nuage au stade préstellaire. La masse des étoiles est donc déterminée avant l'effondrement des condensations individuelles (figure 2).

Dans le deuxième modèle, la masse de l'étoile est acquise, et quasiment indépendante de celle du cœur préstellaire initial produit par fragmentation. Chaque proto-étoile issue d'une condensation préstellaire se déplace à l'intérieur du nuage parent et accumule



Wolfgang Brandner (JPL/PAAC), Eva K. Grebel (Univ. Washington), You-Hua Chu (Univ. Illinois Urbana-Champaign), and NA-SA

La nébuleuse NGC 3603 observée par le télescope spatial Hubble. Un amas de jeunes étoiles massives (en bleu) brille dans l'ultraviolet à 20 000 années-lumière. Il s'est extrait du nuage voisin de gaz moléculaire et de poussière.

progressivement de la masse en « balayant » et en attirant une plus ou moins grande quantité de la matière qu'elle traverse. Or plus une étoile est grosse, plus elle attire de matière au détriment des plus petits objets. Dans ces conditions, des objets de tailles initialement comparables – bien que pas strictement identiques – vont peu à peu se différencier. Les astronomes appellent ce phénomène l'*accrétion compétitive*. Dans ce modèle, la répartition des individus en fonction de leur masse n'est déterminée qu'après le stade préstellaire, c'est-à-dire après l'effondrement des condensations en proto-étoiles.

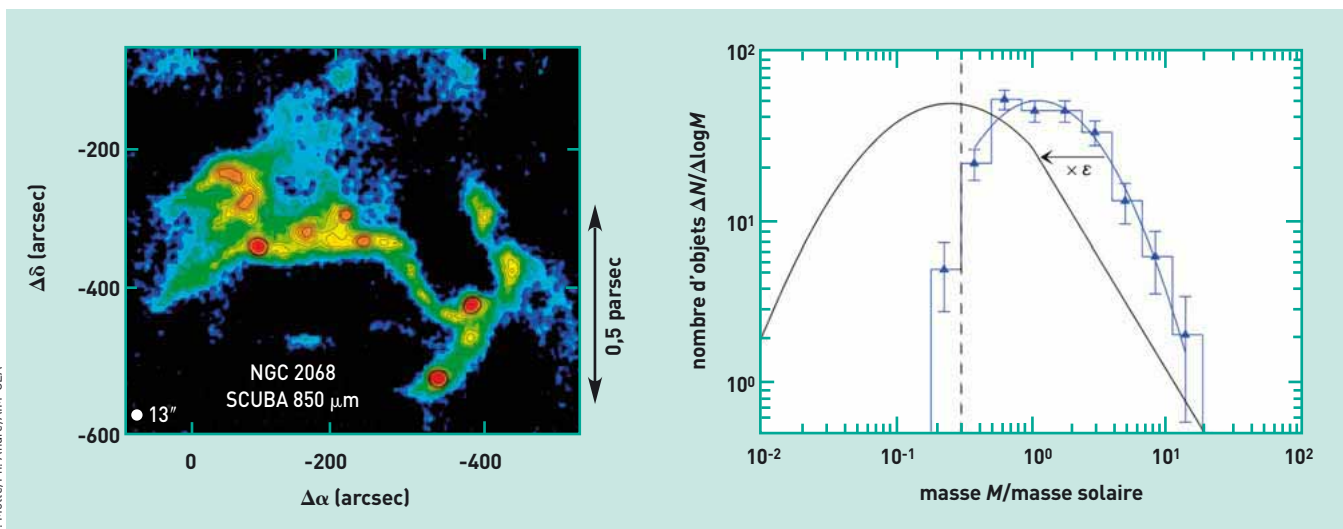


Figure 2.

À gauche, image des condensations préstellaires au sein de NGC 2068, une région de formation d'étoiles dans la constellation d'Orion. Les observations ont été réalisées avec la caméra de bolomètres SCUBA – installée sur le *James Clerk Maxwell Telescope* situé à Hawaii – aux longueurs d'onde submillimétriques à 850 microns. Chaque fragment pourrait donner naissance à une ou deux étoiles. 1 parsec [pc] = 206 265 ua.

À droite, nombre de condensations préstellaires en fonction de leur masse. La distribution de masse des condensations (en bleu) reproduit globalement la forme de la fonction de masse initiale estimée aujourd'hui pour les étoiles de notre Galaxie (en noir) avec un décalage d'un facteur $\epsilon \approx 25\%$ vers les grandes masses. Cela signifie que toute la masse contenue dans une condensation n'est pas totalement transformée en masse stellaire. Ce résultat suggère que les masses des étoiles de type solaire sont déterminées principalement par le processus de fragmentation du nuage moléculaire au stade préstellaire.

Lumière sur les cocons d'étoiles

L'approche de l'astronome consiste à trouver, par l'observation, une séquence d'objets intermédiaires entre la fragmentation du nuage **moléculaire** et un type de jeune **étoile** afin de reconstituer le film de sa fabrication. Les scientifiques sondent les nuages moléculaires à la recherche des condensations glacées dans lesquelles naissent les étoiles, des **naines brunes** aux **étoiles massives**. Ces astres en devenir, très froids, émettent de l'énergie principalement dans le domaine **infrarouge submillimétrique** de

la lumière. Plus la condensation est froide, plus sa couleur, et donc son énergie, se décale vers l'infrarouge et les longueurs d'onde submillimétriques (0,1 à 1 mm). En mesurant l'énergie émise par ces fragments à différentes longueurs d'onde, il est possible de déterminer leur **luminosité**, c'est-à-dire leur puissance lumineuse. Cette méthode est illustrée par les figures ci-dessous, qui concernent une région de **notre Galaxie** dénommée NGC 3576. C'est un réservoir de gaz dans lequel se forment des étoiles.

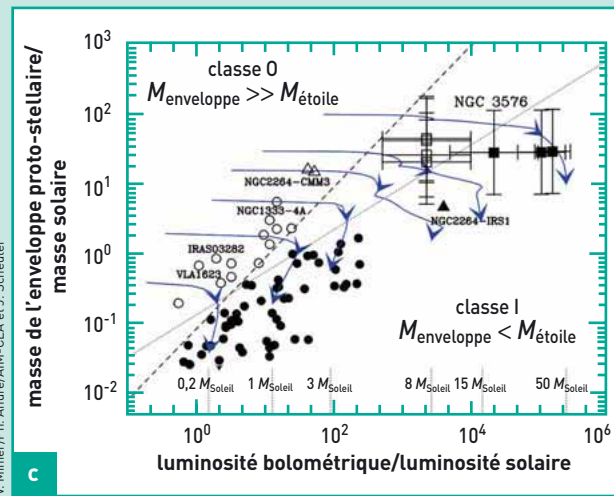
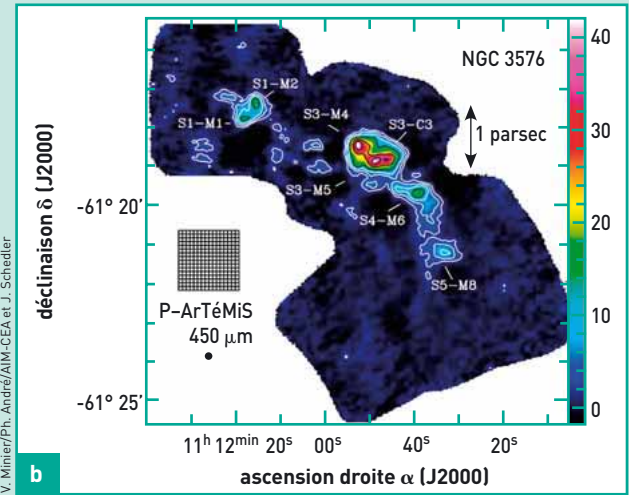
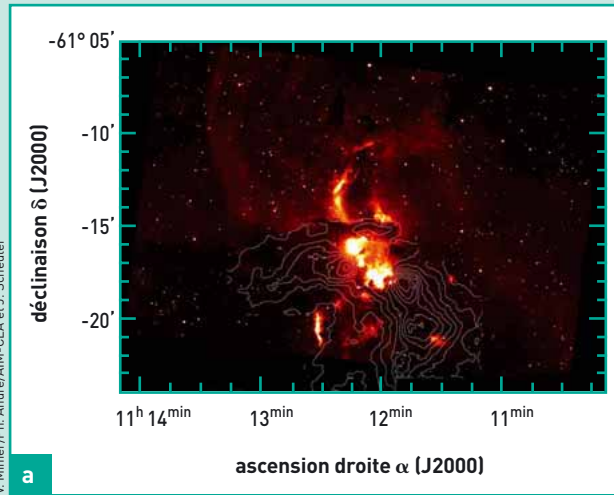


Figure.
 a. Le gaz froid et les cocons des embryons d'étoiles sont des zones totalement **opaques**, apparaissant comme des régions très sombres dans la **Voie lactée**. L'observation de l'émission du monoxyde de carbone (CO) montre que ces bandes sombres sont les plus denses en gaz (contour blanc traçant la distribution de rayonnement émis par le CO).
 b. Pour « percer » ces condensations préstellaires, les astronomes réalisent des observations en infrarouge submillimétrique, à la longueur d'onde de 450 **microns** sur cette image prise par la caméra P-ArTéMiS sur le télescope APEX. Le télescope recueille la lumière émise par les grains de poussière, qui ne représentent qu'un pour cent de la masse totale du gaz avec lequel ils cohabitent. Ils **absorbent** l'intensité lumineuse émise autour d'eux et la restituent dans l'infrarouge, et pour les plus froids dans l'infrarouge submillimétrique. La mesure de leur énergie a révélé huit fragments à l'intérieur de NGC 3576.
 c. Ce diagramme représente la masse du cocon de poussière d'une proto-étoile et sa luminosité, qui déterminent dans quelle phase précoce (classe 0 ou classe I) se trouvent les proto-étoiles de NGC 3576. La classe I est une phase plus évoluée que la classe 0. À partir de modèles théoriques, il est possible de prédire la masse finale du futur astre, soit entre 8 et 50 fois la masse du Soleil pour ces étoiles.

Observer les étoiles naissantes

Pour trancher entre ces deux scénarios, et introduire les bonnes conditions initiales dans les simulations numériques, la meilleure façon reste d'observer directement des populations d'étoiles en phase précoce. Les astronomes recherchent donc des objets intermédiaires représentant toutes les étapes de la séquence allant du nuage moléculaire aux très jeunes étoiles, et ce pour tous les types de masse. Ils réalisent l'étude quantitative de ces populations en déterminant leurs caractéristiques comme la **luminosité**, la température, la densité et la masse des cocons. Toutes données qui nourriront les modèles des astrophysiciens (encadré). Cependant les condensations préstellaires et les plus jeunes proto-étoiles

sont des objets trop froids pour émettre aux longueurs d'onde **visibles**, et les observer requiert des instruments à haute **résolution angulaire** dans les domaines **infrarouge** et **submillimétrique** (figure 3). Plusieurs grands télescopes sont très attendus au cours des prochaines années pour approfondir et peut-être révolutionner les connaissances actuelles sur les premières étapes de la formation stellaire.

L'observatoire spatial Herschel⁽²⁾ (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90), une mission scientifique de l'**ESA**, mesurera, pour la première fois, la quantité d'énergie émise par les cocons stellaires.

(2) Voir <http://herschel.cea.fr>

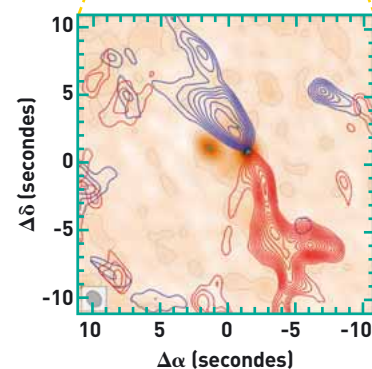
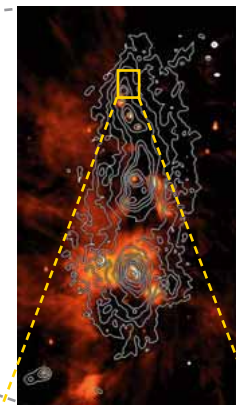
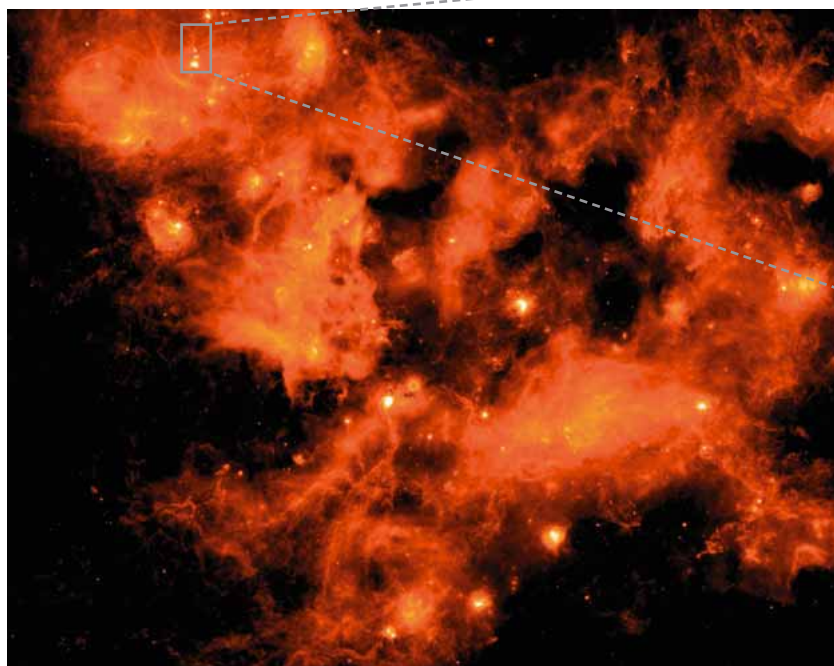


Figure 3.

À gauche, image en infrarouge d'un ensemble de nuages moléculaires formant des étoiles massives dans la constellation du Cygne. Le rayonnement infrarouge est émis par les grains de poussière. En haut à droite, zoom sur une zone du nuage dans laquelle des condensations proto-stellaires sont observées grâce au rayonnement émis par les poussières très froides aux longueurs d'onde millimétriques. En bas à droite, une étoile massive naît à l'intérieur d'une condensation proto-stellaire en **accrétant** de la matière et en rejetant une partie à travers des flots moléculaires (contours en rouge et en bleu). Ces études exigent de combiner des cartographies de grandes zones avec des observations fines.

Herschel, lancé le 14 mai 2009 par une fusée Ariane 5, sondera les nuages moléculaires à la recherche des condensations glacées dans lesquelles naissent les étoiles, des **naines brunes** aux étoiles massives. Il part donc à la recherche des fragments de nuages moléculaires susceptibles de s'effondrer. À partir de la mesure de leur luminosité, les

astronomes déduiront la répartition des masses des fragments préstellaires. Ils construiront ainsi des courbes démographiques représentant la répartition des condensations préstellaires et des embryons d'étoiles. En comparant ces courbes à celles constatées dans les populations d'étoiles matures de **notre Galaxie**, les astronomes pourront conclure sur l'origine de la masse des astres : innée (si les courbes sont comparables) ou acquise (si elles sont différentes). Herschel travaille dans une « gamme » comprise entre un centième et une dizaine de masses solaires. Le télescope APEX (*Atacama Pathfinder Experiment*) situé au Chili, et qui sera équipé en 2011 de la caméra de **bolomètres** ArTéMiS du CEA/Irfu (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90), prêtera main-forte à Herschel. En effet, avec l'augmentation de la taille des télescopes, et donc de la finesse des observations, les scientifiques peuvent sonder des condensations plus lointaines dans lesquelles naissent les étoiles massives.



Le télescope APEX, une antenne parabolique de 12 mètres de diamètre placée à 5 100 mètres d'altitude sur le haut plateau de Chajnantor dans le désert d'Atacama au Chili, accueillera la caméra de bolomètres ArTéMiS du CEA/Irfu en 2011. Des observations concluantes ont déjà été réalisées avec le prototype de cette caméra, P-ArTéMiS, à la longueur d'onde de 450 microns. Ce télescope est géré par un consortium composé du **MPIfR** en Allemagne, **OSO** en Suède et **ESO** pour l'Europe.

> **Vincent Minier, Philippe André**
et **Frédérique Motte**

Service d'astrophysique (SAP)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)