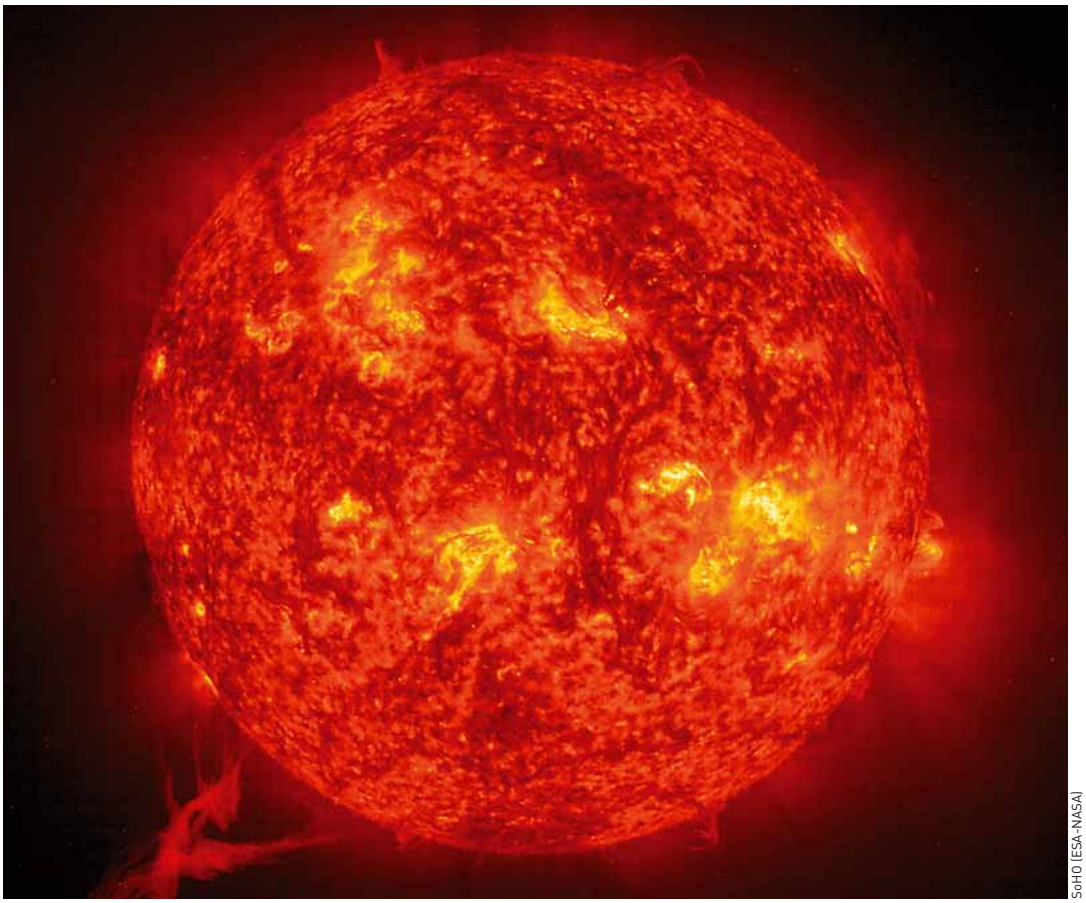
Bien qu'elles nous paraissent éternelles, les étoiles naissent, vivent et meurent. Dès sa naissance dans les nuages moléculaires interstellaires, la masse du nouvel astre détermine son destin : durée de vie, couleur et devenir final. Durant leur vie « adulte », les étoiles se comportent comme d'immenses réacteurs thermonucléaires « brûlant » de l'hydrogène pour synthétiser des éléments chimiques plus lourds, jusqu'au fer pour les plus massives. Objets en rotation, sièges de courants de convection, arborant pour la plupart une intense activité magnétique, les étoiles mènent une existence agitée. Les étoiles moyennes et petites finissent leur vie comme des naines blanches. Les plus grosses s'effondrent en une gigantesque débauche d'énergie, produisant des supernovae avant de se transformer en étoiles à neutrons ou en trous noirs. Ces explosions disséminent leurs couches extérieures. Paradoxalement, c'est donc lors de leur mort que les étoiles fécondent l'espace interstellaire en éléments nouveaux. Comprendre le scénario de leur naissance et l'origine de leur masse, c'est donc approcher l'origine de la composition de l'Univers.

Les **étoiles** ensemencent l'Univers

Les enseignements du Soleil

Le Soleil est sans doute une étoile « banale ». Sa proximité lui confère cependant un statut particulier : celui de laboratoire de physique stellaire et de plasmas denses. Il est maintenant étudié comme une étoile magnétique en interaction avec la Terre.



SoHO (ESA-NASA)

Source de la vie sur Terre, longtemps divinisé, le Soleil est devenu ces dernières années un véritable laboratoire de physique. Les scientifiques l'auscultent pour mieux comprendre l'évolution des étoiles, mais aussi le comportement des plasmas denses.

Il y a un siècle, personne ne savait ce qu'était une **étoile**. Étant donné ce qu'ils connaissaient de la **masse** et de la composition du **Soleil**, les scientifiques pensaient que sa température interne atteignait 15 millions de degrés, et sa densité plus de cent fois celle du solide. Des conditions totalement inaccessibles sur Terre. Toutefois la **thermodynamique** des gaz et la **gravité** conduisaient à une durée de vie de quelques millions d'années seulement pour notre étoile, contre quelques milliards d'années pour la Terre ! Ce n'est qu'avec l'avènement de la physique nucléaire – qui s'intéresse aux **noyaux** des **atomes**, à leurs constituants et leurs **interactions** – qu'a été découverte la source d'énergie interne qui compense l'effet inévitable de la gravité.

Le Soleil et l'atome

Très vite, ce domaine fascinant a fait progresser notre compréhension des étoiles. Les réactions nucléaires, qui transforment des **noyaux légers** en **noyaux** plus **lourds**, constituent donc la source d'énergie manquante. En ce qui concerne le Soleil, il s'agit essentiellement de la **fusion** de noyaux d'**hydrogène** (le plus simple de tous les noyaux puisqu'il ne comprend qu'un **proton**) pour donner de l'**hélium** (le plus petit des autres : deux protons et deux **neutrons**). Le premier à relier ce monde de l'infiniment petit à celui de l'infini grand, en 1920, fut l'astrophysicien anglais Arthur Eddington. En 1929, les physiciens britannique Robert d'Escourt Atkinson et allemand Friedrich Houterman publient un article conjoint, expliquant qu'aux températures régnant au centre des étoiles, les atomes sont généralement dépouillés de tous leurs **électrons**, et donc chargés positivement. Il se forme alors un **plasma**, sorte de « soupe » constituée d'**ions** positifs et d'**électrons libres** négatifs. La température, donc l'agitation, y est telle que deux charges électriques de même signe, au lieu de se repousser comme dans le monde ordinaire, peuvent surmonter la **barrière coulombienne** pour interagir. À la même époque, George Gamow, un physicien d'origine ukrainienne, montre que cette interaction requiert une énergie supérieure à l'énergie thermique. C'est pourquoi seul un petit nombre de protons est concerné. Il ne se produit en fait qu'une réaction par centimètre cube et par an dans le Soleil. Cette « rareté » explique la longévité de l'astre. Il faut en effet environ 10 milliards d'années pour transformer près de la moitié de la masse du Soleil d'hydrogène en hélium. Autre enseignement essentiel : cette interaction, dite *faible*, remet en cause l'idée que le proton et le neutron sont des particules fondamentales puisque l'un se transforme en l'autre. Elle nécessite l'intervention d'une nouvelle particule imaginée par l'Autrichien Wolfgang Pauli en 1930, le **neutrino**, dont la masse n'est toujours pas connue.

Après cette phase de transformation d'hydrogène en hélium, le cœur du Soleil va se contracter et sa température centrale augmenter. Elle sera alors suffisante pour que les noyaux d'hélium surmontent la barrière coulombienne (2,5 fois plus forte que dans le cas de l'hydrogène) et interagissent à leur tour.

University of Colorado

George Gamow, connu pour sa participation à la théorie du **big bang**, a joué un rôle crucial dans la compréhension des réactions nucléaires intervenant dans les étoiles. Il a démontré qu'à cause de la répulsion coulombienne, elles ne peuvent avoir lieu que si les vitesses relatives des réactants sont très élevées. Ainsi la réaction proton-proton, base de la transformation d'hydrogène en hélium ($4\,p + 2\,e^- \rightarrow {}^4He + 2\,\nu_e + 27$ **MeV**), se produit-elle à 5 **keV** et non pas à 1,3 keV (correspondant aux 15 millions de degrés régnant au cœur du Soleil). C'est pourquoi elles sont plus rares que prévu, ce qui explique la longévité du Soleil.

De la théorie à l'expérience

Pendant longtemps, ces résultats sont restés purement théoriques car impossibles à tester au laboratoire. Il fallait donc les confronter à la réalité en « sondant » le Soleil lui-même. C'est devenu possible très récemment, avec le lancement en 1995 du satellite SoHO (*Solar and Heliospheric Observatory*), placé au **point de Lagrange L1**. Il emporte une douzaine d'instruments, dont GOLF (*Global Oscillations at Low Frequencies*) et MDI (*Michelson Doppler Imager*), deux appareils de mesures **héliosismiques** – ils observent la propagation des **ondes** acoustiques au sein de l'astre, les « tremblements de Soleil » en quelque sorte. Leurs données, confrontées au CEA avec des **modèles numériques** de l'étoile, ont confirmé des prévisions comme la distribution maxwellienne[1] des vitesses des particules. Elles ont également permis de déterminer avec une précision de 1 % la probabilité d'interaction entre deux protons. Cette valeur était jusque-là estimée théoriquement, en s'appuyant sur la durée de vie du neutron.

(1) Distribution maxwellienne : les particules n'ont pas toutes la même vitesse mais des vitesses réparties aléatoirement autour d'une moyenne.

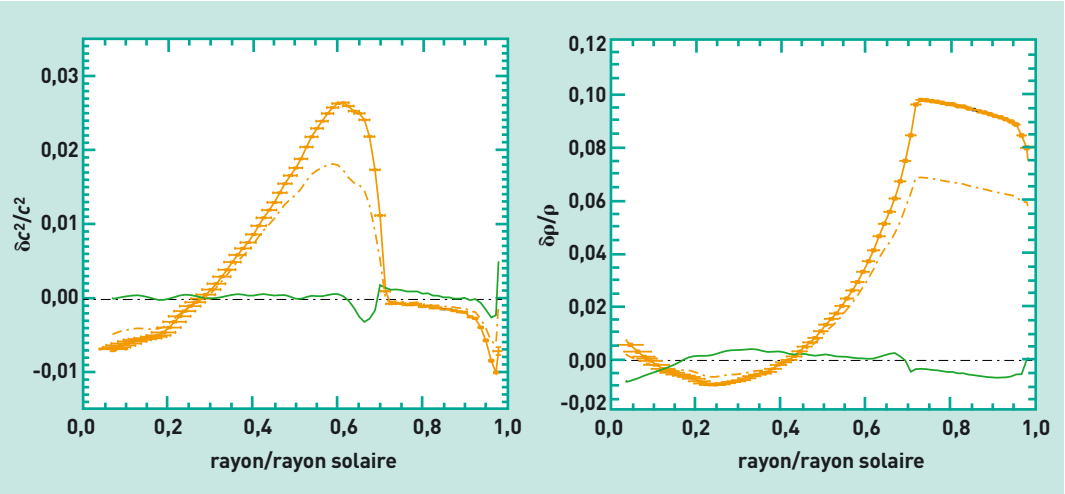
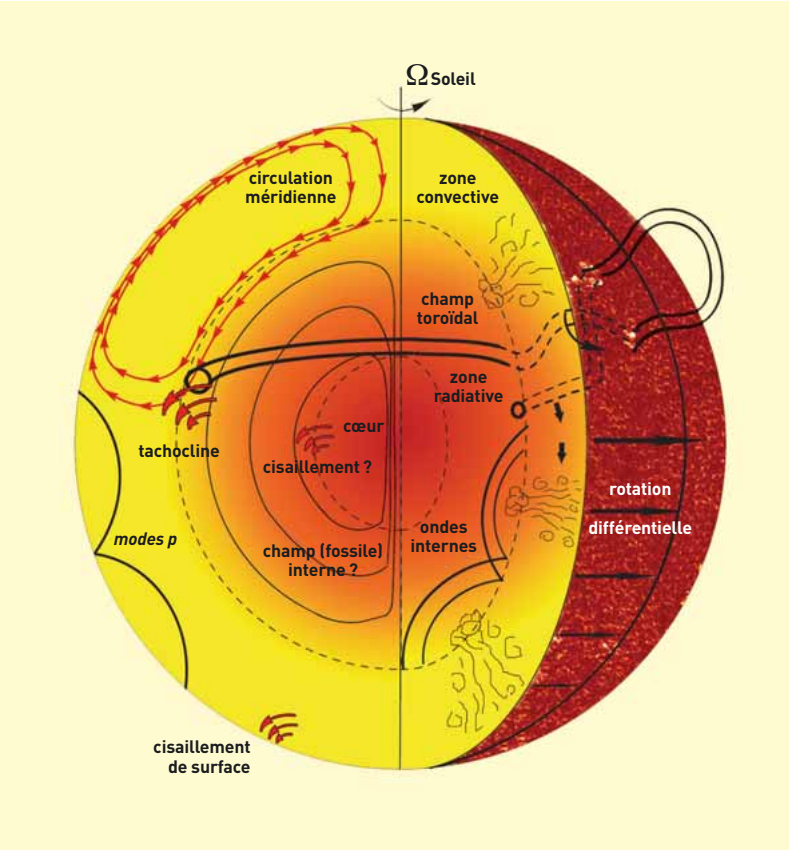


Figure 1.
À gauche, différence radiale du carré de la vitesse du son (*c*) extraite des modes acoustiques détectés par les instruments GOLF et MDI, et celle obtenue avec un modèle sismique du Soleil (en vert) ou avec un modèle classique basé sur les abondances solaires déterminées par les raies d'absorption dans la photosphère (en orange, deux valeurs de composition sont ici montrées). À droite, différence obtenue pour la densité du plasma (ρ) qui varie entre 150 g/cm^3 au cœur et 10^{-7} g/cm^3 dans l'atmosphère solaire.

Les mesures sismiques confirment également des hypothèses générales sur l'évolution des étoiles. En effet les équations qui régissent cette évolution (**équilibre hydrostatique**, transfert d'énergie par rayonnement ou **convection**, conservation de la masse, évolution temporelle des abondances[2]…) permettent de calculer le profil actuel de la vitesse du son dans le Soleil et de le comparer à ce qui est extrait de la mesure des nombreux modes acoustiques (figure 1). En introduisant les résultats des mesures sismiques réelles dans ces modèles numériques, les chercheurs prédisent le flux de neutrinos émis par les réactions nucléaires[3]. Or des installations de détection des neutrinos solaires mesurent ce flux au Japon, au Canada, en Italie et en Russie. L'accord remarquable entre l'héliosismologie et la détection des neutrinos, après 30 ans de recherche, souligne la complémentarité de ces deux disciplines. Les processus régissant les grandes étapes de l'évolution des étoiles de masse comparable au Soleil semblent donc aujourd'hui bien compris.



A. S. Brun/CEA

Figure 2.
Vision dynamique de l'intérieur solaire montrant les deux zones classiques : en rouge la région radiative et en jaune la région où le transport d'énergie est dominé par la convection. Se surimposent des circulations méridiennes, des ondes acoustiques (*modes p*) et des ondes internes, ainsi que des champs magnétiques avec des composantes poloïdales et toroïdales.

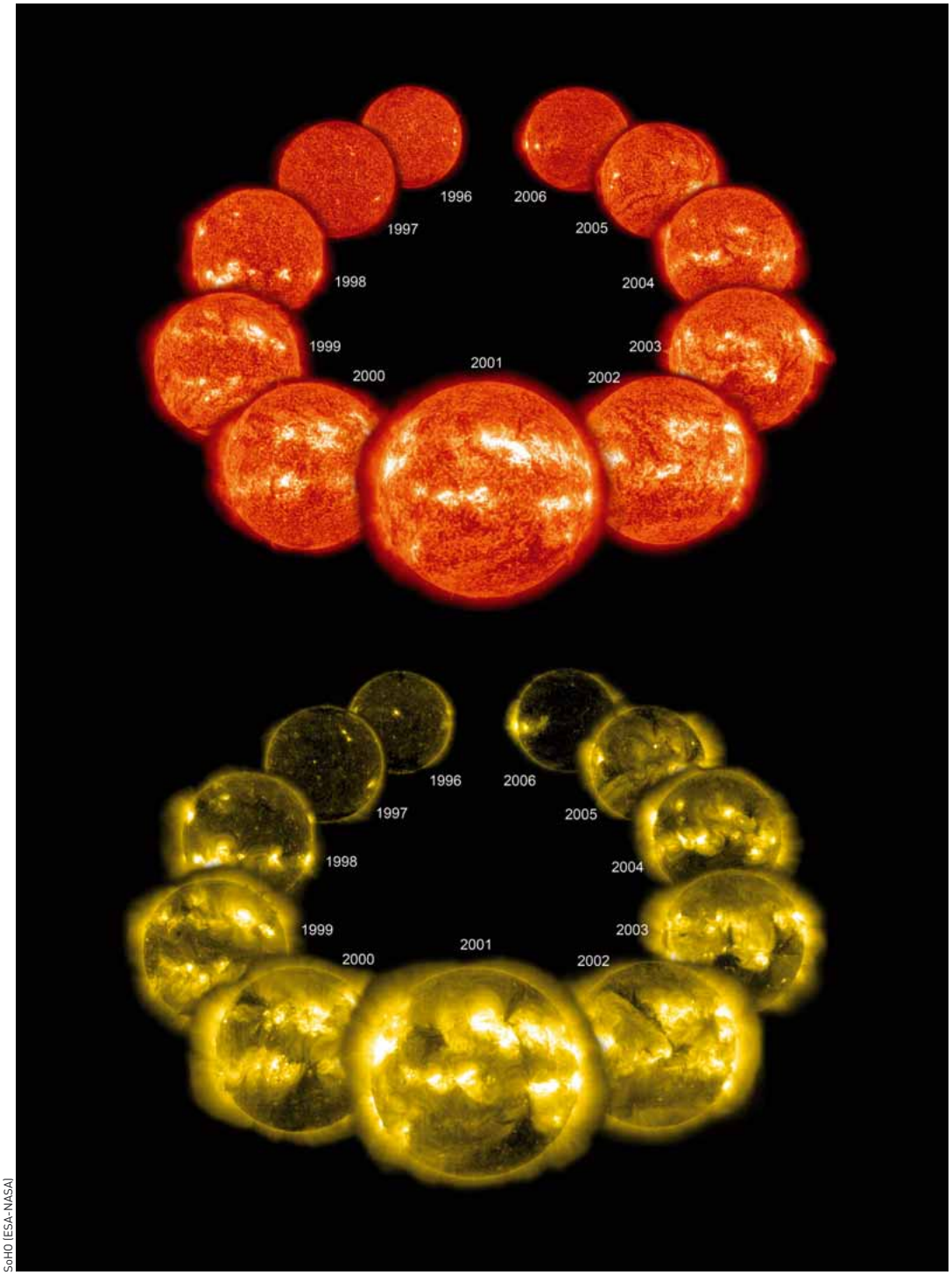
Dépasser le cadre classique

De nombreuses questions restent cependant sans réponse. Par exemple, des mesures récentes de la composition solaire conduisent à des désaccords très importants entre le modèle classique du Soleil et celui déduit des observations sismiques (figure 1). Des expériences en laboratoire devraient permettre de tester le rôle d'un deuxième ingrédient fondamental de l'évolution stellaire : le transport d'énergie par les **photons**. D'autre part, les phénomènes comme les **taches**, protubérances, courants, ou éruptions solaires ne sont pas décrits dans le cadre conceptuel classique de l'évolution des étoiles. L'origine de cette **activité solaire** reste mystérieuse, et il est impossible de prédire exactement la durée et l'amplitude des **cycles d'activité**. Les équations classiques de l'évolution stellaire négligent en effet des faits essentiels : les étoiles tournent, éjectent de la matière et sont en général actives (voir *Du Soleil aux étoiles*, p. 16). Cette « impasse » est

(2) Les proportions relatives des différents éléments.

(3) Il s'agit des réactions proton-proton (dites pp) et du **cycle CNO** (carbone-azote-oxygène).

(4) D'après l'astronome américain George Ellery Hale (1868-1938).



SoHO (ESA-NASA)

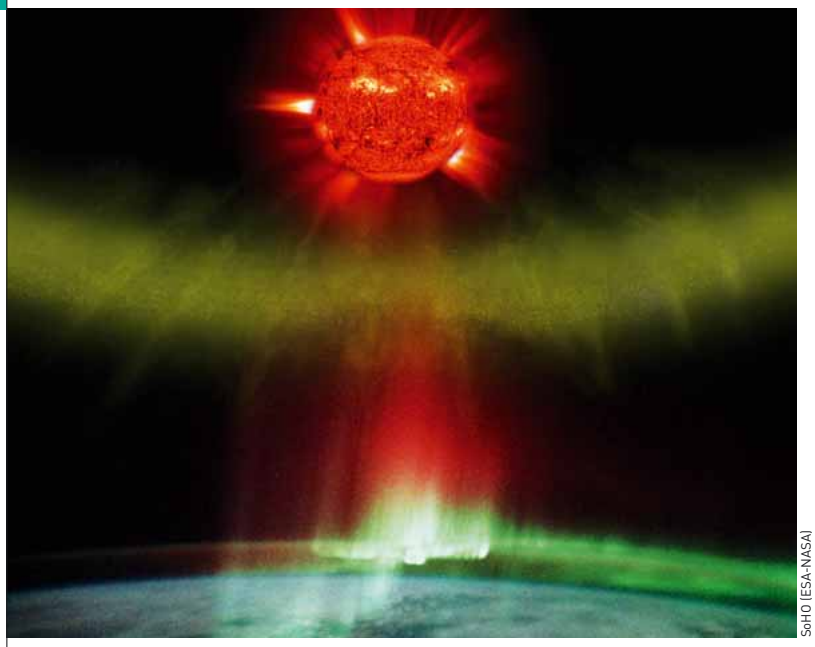
Figure 3.
Le satellite SoHO a observé le Soleil à plusieurs hauteurs de l'atmosphère (en haut à 60 000 - 80 000 K et, en bas, à 2 000 000 K) entre la photosphère (la surface visible de l'astre) et la couronne. Ceci permet de suivre l'évolution de son magnétisme entre deux minima (1996-2006). Clairement, les variations du champ magnétique prennent de plus en plus d'importance avec l'éloignement de la photosphère.

d'ailleurs justifiée car la rotation ou le **champ magnétique** interne n'ont qu'un faible impact sur la structure interne… que veulent précisément décrire ces équations.

Pour dépasser ce cadre conceptuel et aller vers une vision complète et unifiée du Soleil, il faudra là encore exploiter les mesures de SoHO, qui observe toutes les manifestations de la dynamique solaire, qu'elles soient internes ou externes (figure 2). En utilisant les **raies d'absorption** du fer et de l'hélium dans l'atmosphère solaire, le satellite explore des températures très différentes allant de quelques dizaines de milliers de degrés à plusieurs millions de degrés entre la **photosphère** et la **couronne** (figure 3). La longévité de ce satellite permet de suivre l'évolution de tous les indicateurs au cours du cycle d'activité solaire. D'une durée d'environ onze ans, ce cycle dit *de Hale*[4] est connu depuis Galilée. Il est caractérisé par la migration des taches solaires d'une latitude de 60° vers l'équateur. Lorsque le champ magnétique dipolaire s'inverse, le nombre de taches s'amenuise ou disparaît, puis un deuxième cycle s'amorce. Le retour aux polarités initiales demande environ 22 ans.

Un astre bien agité

Les astrophysiciens du CEA veulent aujourd'hui comprendre la ou les sources internes d'activité du Soleil, pour mieux en apprécier la variabilité. En effet un Soleil très actif éjecte des particules qui



SoHO (ESA-NASA)

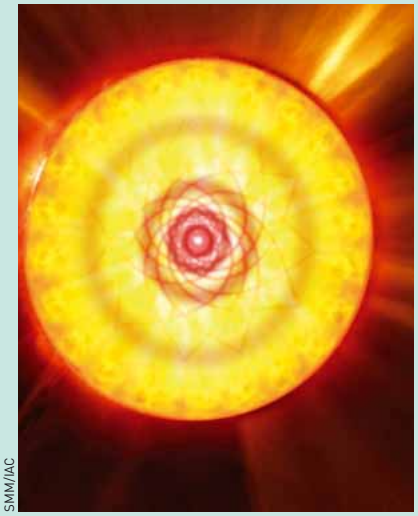
Une aurore boréale. Ce phénomène est dû à la pénétration dans la haute atmosphère terrestre d'un flux de particules en provenance du Soleil.

s'échappent de la couronne solaire. Ces flux de particules réguliers ou épisodiques – pour les phénomènes les plus violents – arrivent jusqu'à la **magnétosphère** qui protège notre planète. Toutefois, une partie de ces particules contourne la Terre et pénètre les hautes couches atmosphériques par les pôles, donnant naissance aux **aurores boréales**. Ce phénomène entraîne parfois des perturbations atmosphériques, et soumet les pilotes ou les astronautes à des flux conséquents de particules. Il a donc été décidé de suivre ces événements de leur création, au niveau de la couronne solaire, à leur arrivée dans l'environnement de la Terre. Selon l'énergie de ces particules, ce trajet dure quelques jours.

En fait, le cycle de Hale n'est pas très régulier. SoHO a clairement montré que les phénomènes dynamiques internes du Soleil déterminent son activité. Un ensemble de processus magnétiques et mécaniques interfèrent de manière complexe. Le phénomène de **dynamo** – la création d'un champ magnétique par la circulation de particules électriquement chargées – régénère cette activité et implique l'ensemble de la **région convective**.

Sonder l'intérieur des étoiles

Jusqu'à la deuxième moitié du 20e siècle, les astronomes ne disposaient d'aucune donnée expérimentale provenant directement de l'intérieur des **étoiles**. Ils devaient se contenter de paramètres globaux ou de surface : rayon, masse, **luminosité**, **spectre électromagnétique**... La détection des **neutrinos** solaires, porteurs d'une information sur les conditions **thermodynamiques** régnant au centre du **Soleil**, a repoussé quelque peu ces limites. Les astrophysiciens restaient cependant sur leur faim : comment « pénétrer » à l'intérieur du Soleil – et des étoiles – pour connaître les phénomènes physiques se déroulant à toutes les profondeurs ?



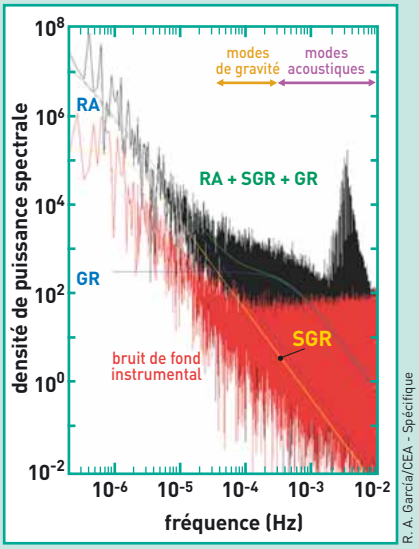
SMM/JAC

Vue d'artiste de l'intérieur du Soleil montrant les trajectoires des modes de gravité pendant leur propagation dans la **zone radiative**, partie la plus interne du Soleil (70 % en rayon).

Une nouvelle approche expérimentale, l'**astérosismologie**, a apporté une réponse. Elle s'inspire de la sismologie terrestre, qui analyse la propagation souterraine des **ondes** acoustiques générées par les tremblements de terre ou des explosions contrôlées. De la même manière, l'astérosismologie – dite **héliosismologie** lorsqu'elle s'applique au Soleil – étudie la propagation d'**ondes** acoustiques ou **de gravité** (figure 1) à l'intérieur des étoiles, pour en déduire une information sur leur structure et leur dynamique internes. Contrairement à la Terre, le Soleil – ainsi qu'une multitude d'étoiles du même type – « vibre » en permanence sous l'effet des mouvements **convectifs** de la région extérieure. Ces mouvements, similaires à ceux observés dans de l'eau qui bout dans une casserole chauffée par le fond, évacuent l'énorme quantité d'énergie créée par les réactions centrales de **fusion thermonucléaire**.

La musique du Soleil

Les cellules convectives[1] frappent la surface du Soleil et engendrent des ondes sonores qui se propagent ensuite à l'intérieur de l'étoile, de la même manière que des chocs sur la peau d'un tambour créent des ondes dans l'instrument. Le Soleil joue donc le rôle d'une énorme caisse de résonance (figure 2).



R. A. García/CEA - Spécifique

Figure 1.
Densité de puissance spectrale du Soleil, obtenue à partir du **déplacement Doppler** mesuré par GOLF (en noir) et du bruit de fond instrumental (en rouge). Pour les ondes acoustiques (fréquence supérieure à 5.10^{-4} Hz), le spectre solaire présente un maximum autour de 3.10^{-3} Hz. La forte puissance vers les fréquences basses provient des **turbulences** associées essentiellement aux mouvements granulaires (GR), supergranulaires (SGR) et au passage des régions actives (RA).

(1) Une cellule convective correspond à une « bulle » de matière chaude (moins dense) qui monte, puis se refroidit et donc redescend, pour se réchauffer et remonter.

(2) Une octave correspond à un doublement de fréquence.

La zone de transition entre les **régions radiative** et convective joue aussi un rôle important. C'est en effet une zone très **turbulente**, siège de cisaillements transverses. Cette zone stocke et amplifie la **composante toroïdale** du champ magnétique solaire. Ce dernier crée ainsi des boucles dont certaines s'élèvent jusqu'à la surface, alors que d'autres contribuent à reformer le **champ poloïdal**. Par ailleurs la zone équatoriale tourne plus vite que les pôles – la différence, d'environ 30 %, est visible à la surface de l'astre. Cette différence de rotation se propage dans toute l'épaisseur de la région convective, et contribue à la composante toroïdale du champ magnétique. La région radiative, elle, semble tourner quasiment de façon rigide : elle tourne « en bloc ». Son profil de rotation est de mieux en mieux établi. Par contre les premières observations des **modes de gravité** semblent montrer que le cœur nucléaire de l'étoile tourne plus vite ! Ceci pourrait représenter un vestige de la formation du système solaire. En effet, le jeune Soleil tournait sans doute très vite lorsqu'il s'est découplé du disque gazeux (reste de la nébuleuse initiale) qui l'entourait. Au cours de cette phase, le Soleil a pu être très actif et un fort champ magnétique s'est alors créé dans la région radiative. Or sa diffusion est très lente : quelques milliards d'années. Ce champ fossile ainsi que les ondes internes générées par la convection peuvent influencer le magnétisme sur des temps plus longs que le cycle de 11 ans. Cette histoire de l'interaction magnétique du Soleil avec la Terre reste encore à écrire.

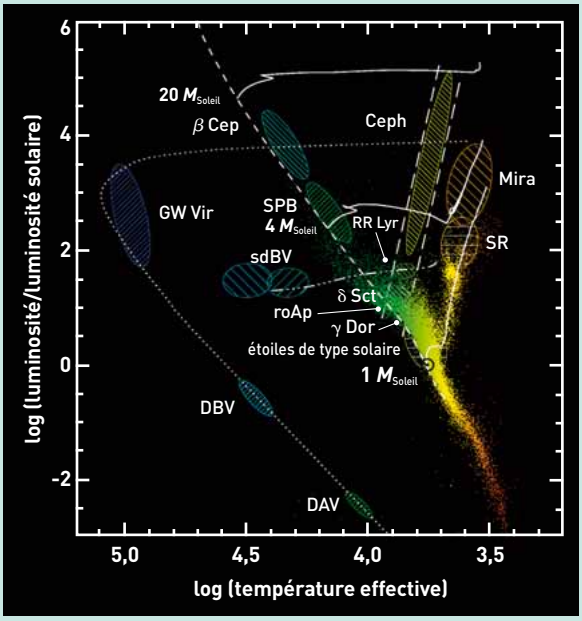
> Sylvaine Turck-Chièze
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

POUR EN SAVOIR PLUS

Clefs CEA, N° 49, Printemps 2004, Le Soleil et la Terre.
S. Turck-Chièze, R. A. García, S. Couvidat *et al.*, *Astrophysical Journal*, vol. 604, p. 455, 2004.
R. A. García, S. Turck-Chièze, S. J. Jimenez-Reyes *et al.*, *Science*, numéro 316, p. 1537, 2007.
A. S. Brun et L. Jouve, *IAU Symposium* 247, p. 33, 2008.

Dans tout instrument de musique, le son produit est d'autant plus grave que la caisse de résonance est de dimensions importantes : que l'on songe à une contrebasse et un violon, par exemple. Le Soleil ayant un volume un million trois cent mille fois supérieur à celui de la Terre, on comprend instinctivement que ses ondes acoustiques auront des fréquences très basses. Et de fait, le Soleil produit des ondes sonores décalées de 17 octaves[2] par rapport au « La naturel », qui vibre à 440 **Hz**. La fréquence des ondes solaires est centrée autour de 0,003 Hz, ce qui correspond à une période de cinq minutes.

Bien que récente, l'héliosismologie a déjà apporté une ample moisson de connaissances sur la globalité de notre étoile : profondeur de la base de la **zone convective**, abondance de l'**hélium** en surface, profil de densité, profil de rotation interne, diffusion des **éléments**... (voir *Les enseignements du Soleil*, p. 10 et *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90). Actuellement se développe une sismologie locale, qui s'intéresse aux phénomènes dynamiques de « courte » durée dans des régions proches de la surface. Les champs de vitesse et de température du **plasma** solaire sous la surface révèlent, par exemple, la structure sous-jacente des **taches solaires**. Avec le lancement du satellite franco-européen CoRoT (Convection, Rotation et Transits planétaires – **Cnes**, **ESA**), le 27 décembre 2006, l'astérosismologie est en plein essor. CoRoT a déjà observé des centaines d'étoiles de **types spectraux** bien différents, à divers stades de leur évolution. Autant de données qui affineront la théorie de l'évolution dynamique des étoiles (voir *L'origine des éléments lourds*, p. 22).



D'après J. Christensen-Dalsgaard et L. P. Rasmussen

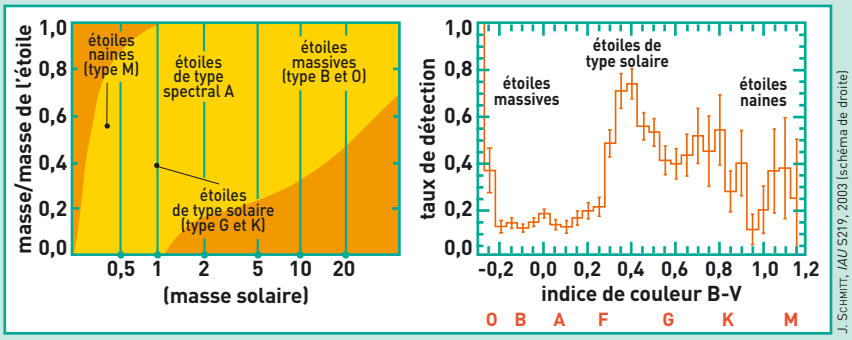
- β Cep : étoiles variables de type Beta Cephei
- SPB : étoiles faiblement variables de type B
- RR Lyr : étoiles variables de type RR Lyrae
- δ Sct : étoiles variables de type delta Scuti
- γ Dor : étoiles variables de type gamma Doradus
- roAp : étoiles de type Ap (chimiquement particulières) rapidement variables
- Ceph : **céphéides** classiques
- Mira : étoiles variables de type Mira
- SR : **variables semi-régulières**
- sdBV : étoiles sous-naines variables
- GW Vir : étoiles de type GW Virginis
- DBV : naines blanches variables de type spectral DB
- DAV : naines blanches variables de type spectral DA

Figure 2.
Diagramme de Hertzsprung-Russell, montrant la relation entre la **température effective** et la **luminosité** des étoiles, où sont indiquées les principales familles d'étoiles pulsantes dans les bandes d'instabilité. Les lignes continues correspondent à des chemins d'évolution pour des étoiles de différentes masses solaires (1, 4 et 20 masses solaires de bas en haut). Sont également représentées les étoiles dans la **séquence principale d'âge zéro** (– – – –), les étoiles dans la branche horizontale (–···–···) et la séquence de refroidissement des **naines blanches** (·····).

> Rafael A. García
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)

Du Soleil aux étoiles

Le **Soleil** est une **étoile** parmi des centaines de milliards d'autres dans la **Voie lactée**. Le nombre d'étoiles de type solaire (**type spectral** G) est évalué à trois milliards, dont un milliard du sous-type G2V, qui est précisément celui du Soleil, situées sur la **séquence principale** du **diagramme de Hertzsprung-Russell**. La température de surface de ces astres est comprise entre 5 700 et 5 800 **K**. La population stellaire est en fait très diverse, et chaque type d'étoile est doté d'une structure interne et de propriétés dynamiques propres. Les astres massifs (plus de deux fois la **masse solaire**) ont un cœur nucléaire **convectif** et une enveloppe **radiative**. Les étoiles de type solaire possèdent au contraire une enveloppe convective **turbulente** et un intérieur radiatif. Enfin les étoiles de faible masse se caractérisent par des zones convectives très profondes, qui peuvent même représenter la totalité de l'astre (figure 1 gauche). Il en résulte des comportements dynamiques, des régimes de rotations et des caractéristiques magnétiques fort différents.



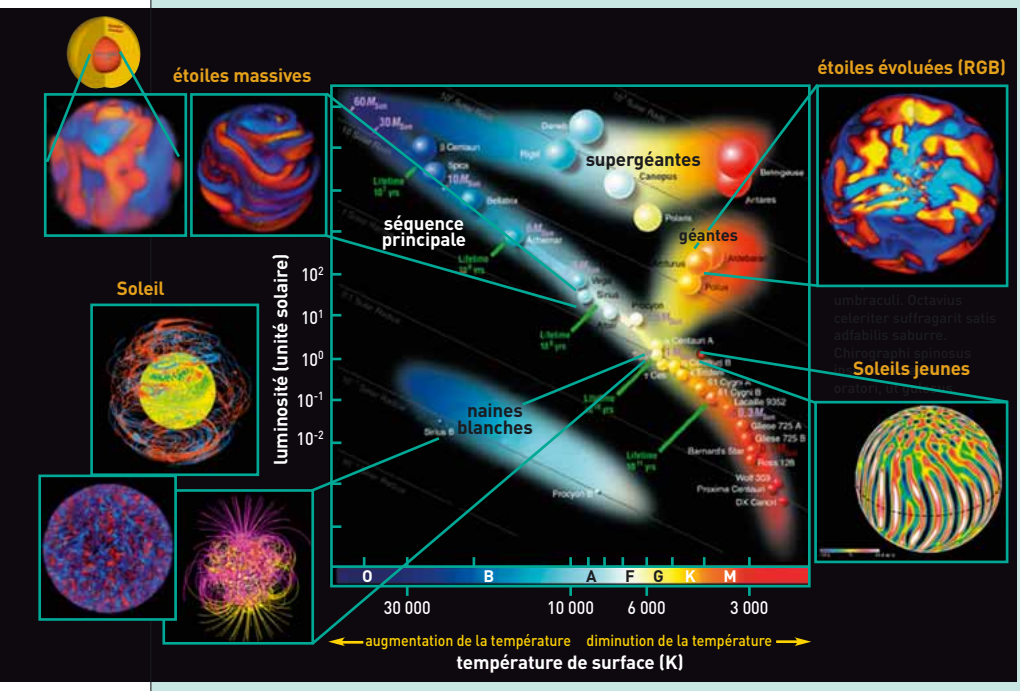
J. Schmitt, IAU S219, 2003 (schéma de droite)

Figure 1.
À gauche, distribution spatiale et en masse des zones convectives en fonction de la masse de l'étoile (cœur convectif pour les massives, enveloppe pour les petites masses). La transition entre une convection principalement à la surface ou dans le centre des étoiles se situe vers 1,3 masse solaire. À droite, taux de détection en rayonnement X d'une activité magnétique dans les étoiles. Une quasi-absence de rayonnement, donc de champ, est observée pour les étoiles de type A et B possédant un cœur convectif. Il convient de noter que l'orientation sur l'abscisse va des naines aux massives (type M jusqu'à O) dans le schéma de gauche et inversement, ce qui est plus classique, dans le schéma de droite.

À chaque étoile son activité

Depuis la fin des années 1970, la rotation et le magnétisme de plusieurs centaines d'étoiles ont été étudiés. Il en ressort que les astres pourvus d'une zone convective externe – à l'instar du Soleil – sont magnétiquement actifs et possèdent en général une **couronne** chaude émettant des **rayons X**, ce qui est un bon indicateur d'activité (figure 1 droite). Le **champ magnétique** des étoiles de type solaire présente souvent des variations cycliques, d'une période allant de 7 à 25 ans (le demi-cycle du Soleil dure 11 ans). Il existe une corrélation entre le taux de rotation et l'activité, les étoiles tournant rapidement étant souvent très actives, avec un champ magnétique principalement horizontal (**toroïdal**). Cette activité atteint un plateau pour les très forts taux de rotation, à des vitesses de 35 km/s, 10 km/s et 3 km/s, respectivement, pour les étoiles de type G (le Soleil tourne à 2 km/s), K et M. Le mécanisme de **dynamo** explique cette corrélation entre rotation et champ magnétique. Ce dernier dépend en effet des écoulements (courants, cisaillements, turbulences) qui se produisent dans la zone convective. Des **simulations numériques** effectuées au CEA ont mis en évidence les processus physiques à l'origine de l'effet dynamo et de ces écoulements à grande échelle, ainsi que la variation de ces processus physiques en fonction du taux de rotation de l'étoile (figure 2).

En revanche, l'immense majorité (90 %) des étoiles massives ne possède pas de champ magnétique ni de couronne chaude. Les étoiles de type A et B, en particulier, ont une activité très faible (figure 1 droite). Toutefois, lorsqu'elles sont dotées d'un champ magnétique, celui-ci est souvent très intense (plusieurs milliers de **gauss**), et semble oblique par rapport à l'axe de rotation. Il s'agit probablement d'un champ fossile datant de la formation de l'étoile, car le temps de **diffusion ohmique** des champs magnétiques stellaires est très long. Le cœur convectif de ces astres constitue certes une dynamo très efficace pouvant créer un champ de plusieurs millions de gauss, comme l'ont montré des simulations numériques (figure 2), mais ces champs n'émergent pas, arrêtés par l'enveloppe radiative très étendue.



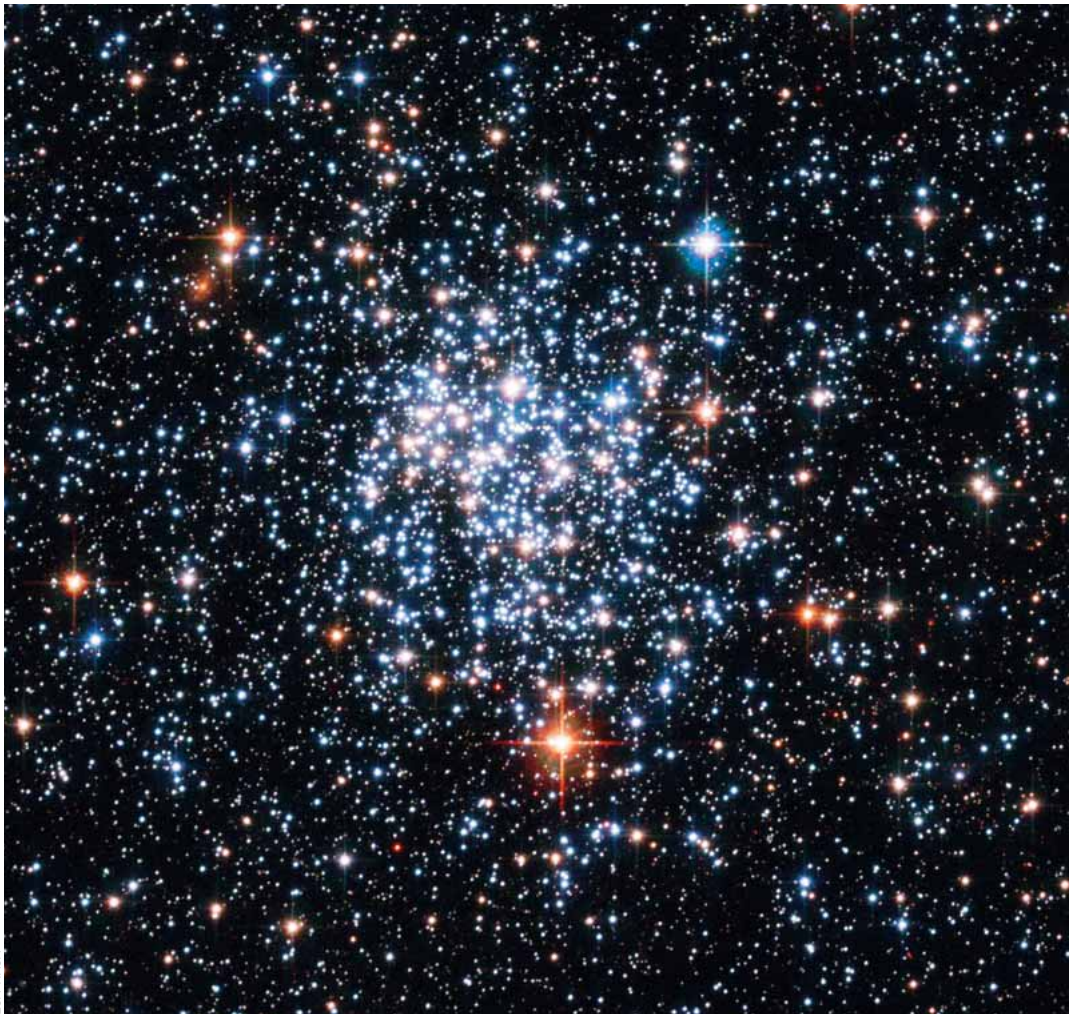
Brun et al. 2002, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, Ballot et al. 2007, Browning et al. 2004, 2006, Jouve & Brun 2007 a, b, Zahn, Brun & Mathis 2007, Brown et al. 2007

Figure 2.
Simulations numériques tridimensionnelles de la **magnétohydrodynamique** de divers types d'étoiles repérées sur le diagramme de Hertzsprung-Russell, effectuées dans le cadre du projet européen STARS2 (www.stars2.eu). RGB signifie branche des **géantes rouges**.

> Allan Sacha Brun
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)

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.



ESA-NASA

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

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

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.

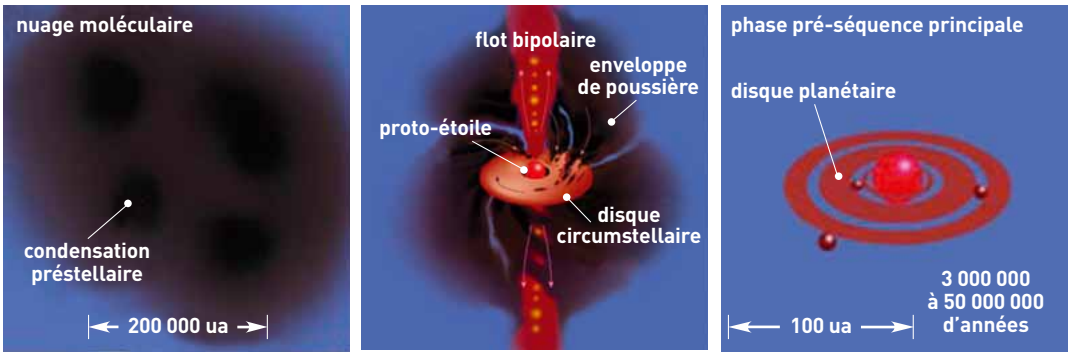
moléculaire se transforment-elles en véritables « populations » d'étoiles ? Quelles sont les grandes étapes de la gestation des étoiles ? Pourquoi les petites étoiles comme les **naines rouges** et les étoiles de type solaire sont-elles toujours plus nombreuses que les étoiles massives dans une population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

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



D'après T. Greene

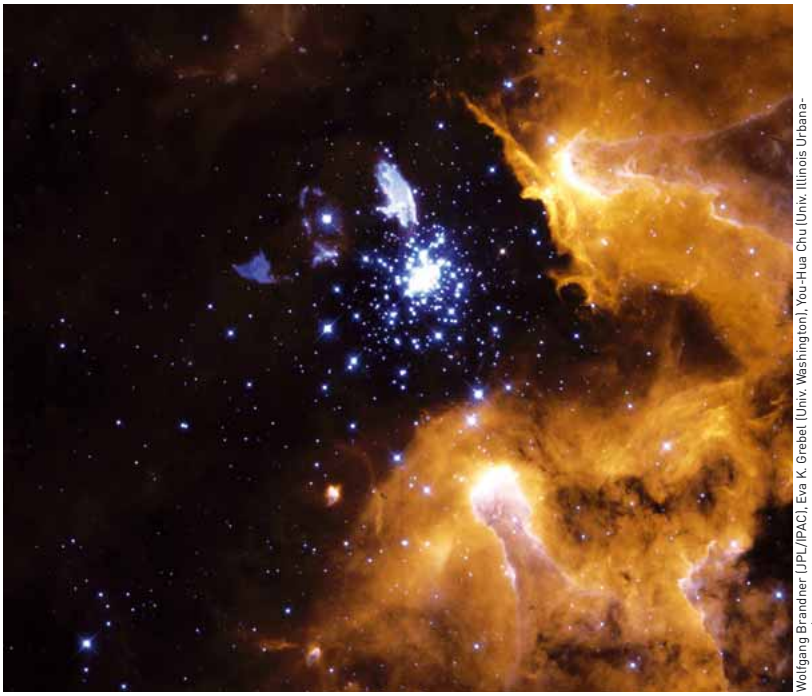
Figure 1. Des considérations théoriques et des observations indiquent que le processus de fabrication d'une étoile de type solaire comprend au moins trois phases distinctes : la phase préstellaire (à gauche), la phase proto-stellaire (au milieu) et la phase pré-séquence principale (à droite). 1 **ua**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

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.

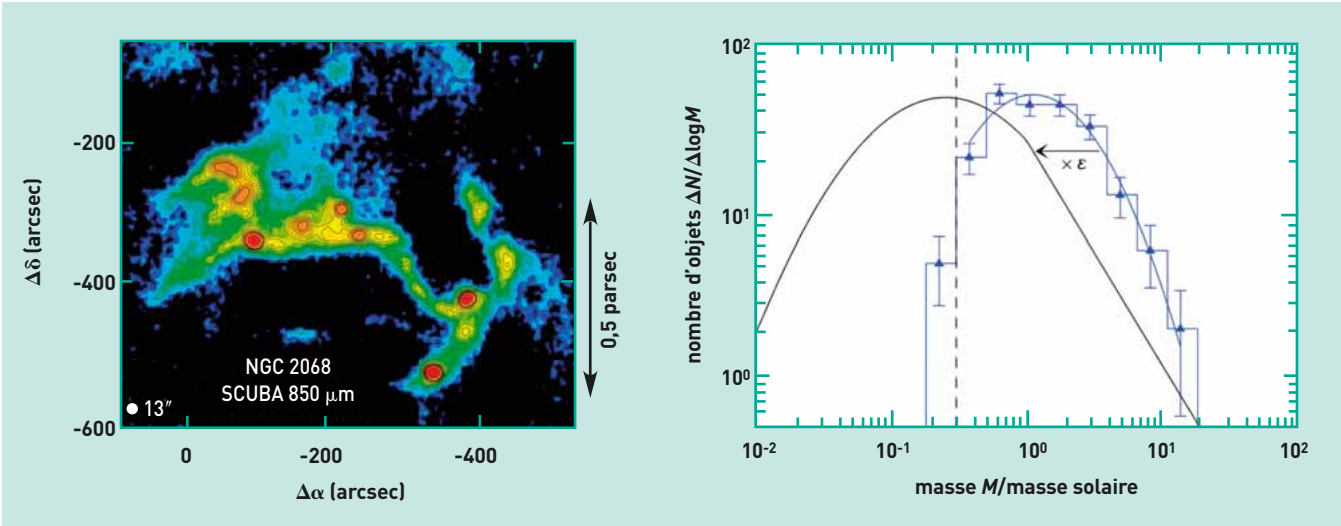
Une autre grande question, portant sur les étoiles, taraude les scientifiques. Quand et comment se détermine la masse d'un astre particulier au sein d'un amas ? Pour y répondre, les astrophysiciens du CEA mènent une véritable étude démographique des populations d'étoiles, de la gestation à la naissance. 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 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.



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

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.

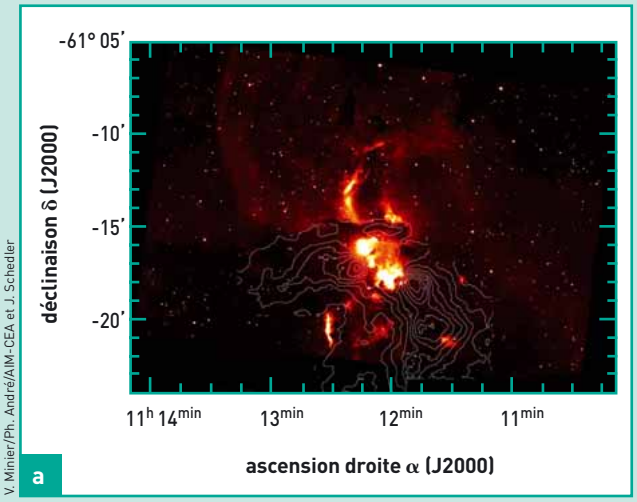


F. Motte/Ph. André/AIM-CEA

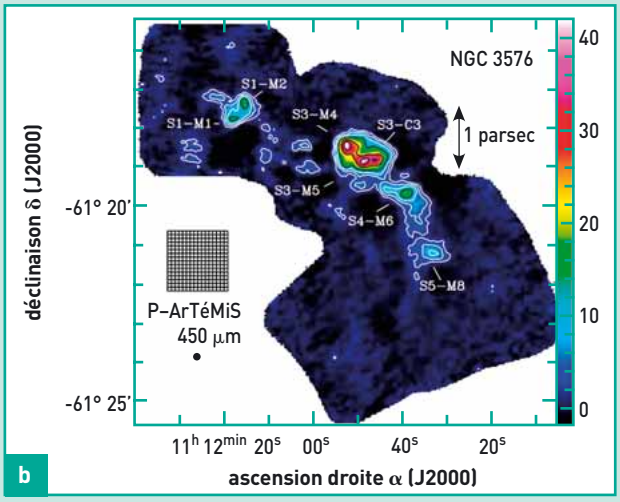
Figure 2.
À gauche, image des condensations préstellaires au sein de NGC 2068, une région de formation d'étoiles dans la constellation d'Orion. Les observations ont été réalisées avec la caméra de bolomètres SCUBA – installée sur le *James Clerk Maxwell Telescope* situé à Hawaii – aux longueurs d'onde 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 $\varepsilon \approx 25\,\%$ 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

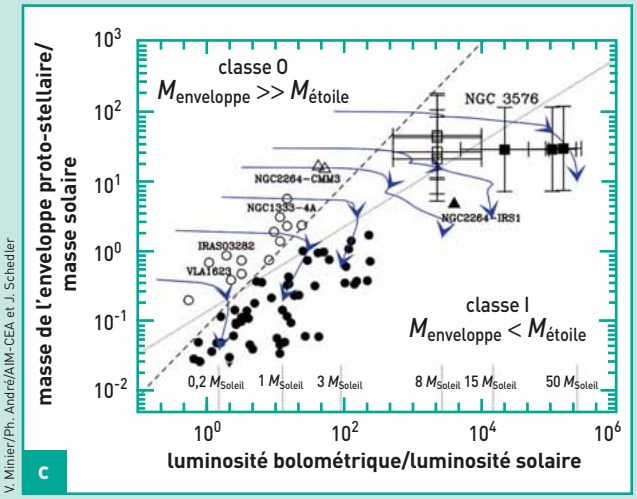
L'approche de l'astronome consiste à trouver, par l'observation, une séquence d'objets intermédiaires entre la fragmentation du nuage **moléculaire** et un type de jeune **étoile** afin de reconstituer le film de sa fabrication. Les scientifiques sondent les nuages moléculaires à la recherche des condensations 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.



V. Minier/Ph. André/AIM-CEA et J. Schedler



V. Minier/Ph. André/AIM-CEA et J. Schedler



V. Minier/Ph. André/AIM-CEA et J. Schedler

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.

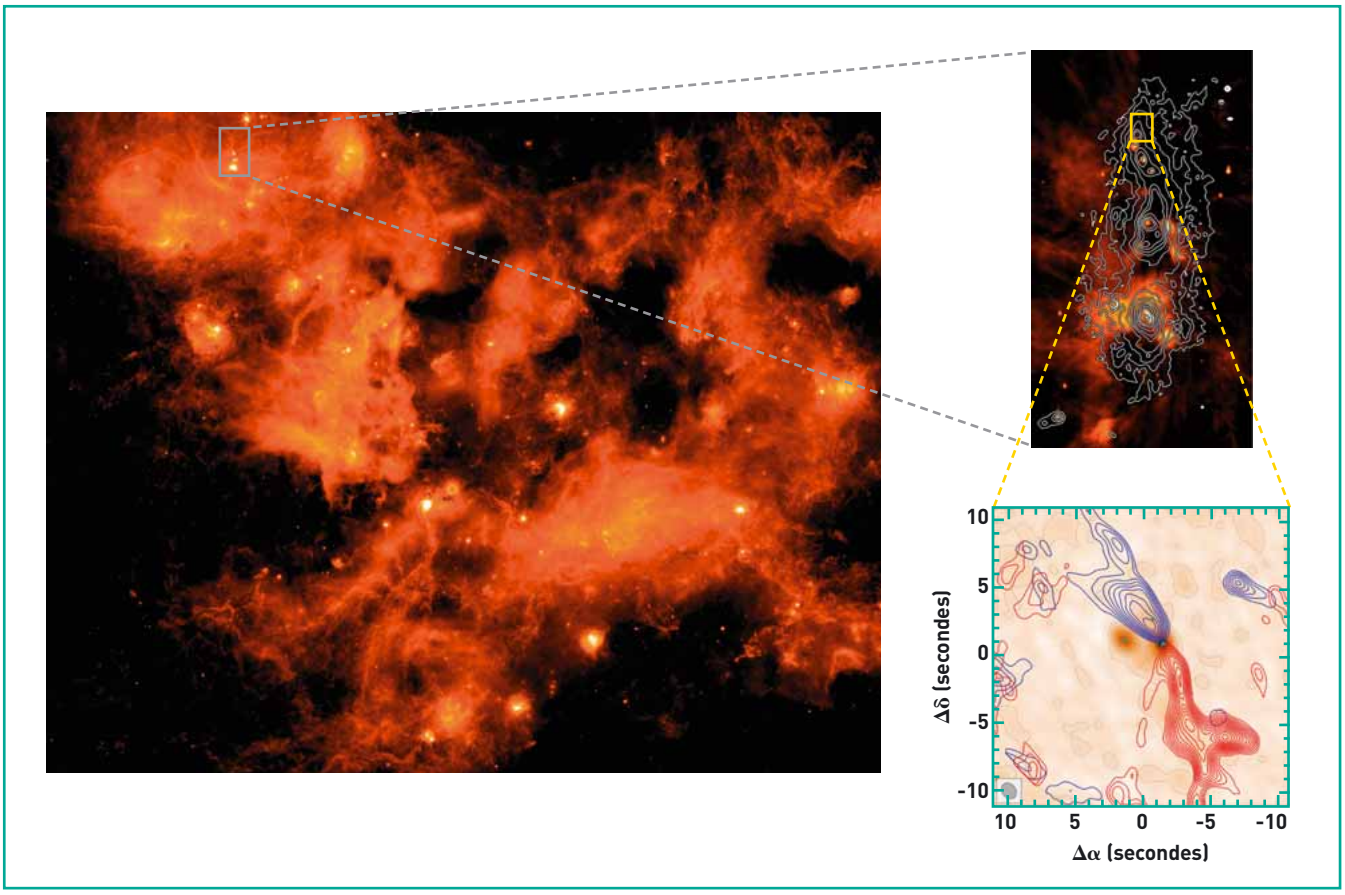
c. Ce diagramme représente la masse du cocon de poussière d'une proto-étoile et sa luminosité, qui déterminent dans quelle phase précoce (classe 0 ou classe I) se trouvent les proto-étoiles de NGC 3576. La classe I est une phase plus évoluée que la classe 0. À partir de modèles théoriques, il est possible 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



F. Motte/N. Schneider/AIM-CEA

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.

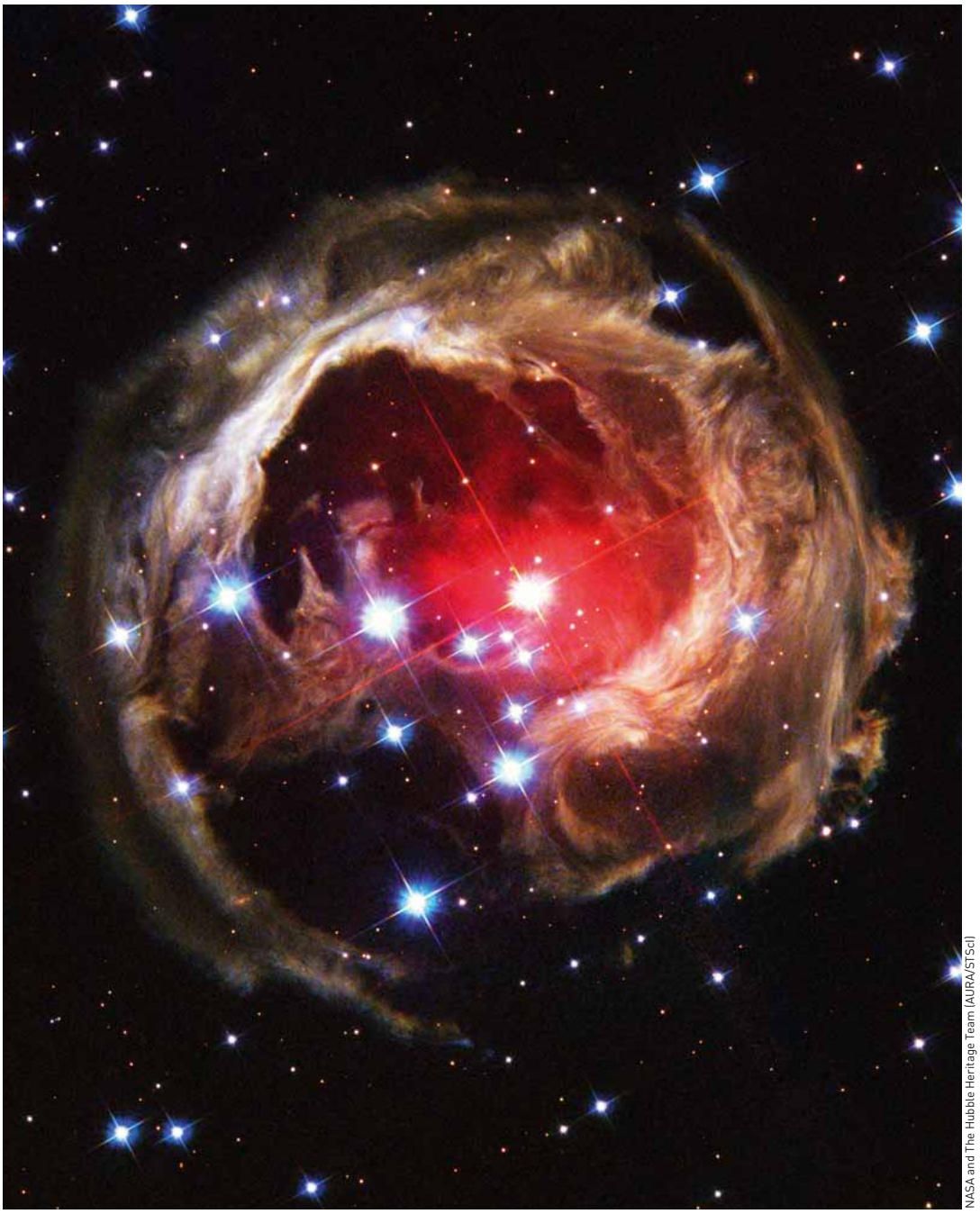
ESO

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)

L'origine des éléments lourds

La plupart des éléments présents dans l'Univers ont été créés par synthèse nucléaire au cœur des étoiles, puis dispersés à la mort de celles-ci... avant de contribuer à la formation des générations ultérieures d'astres. L'évolution des étoiles est donc un élément clé de celle de l'Univers, à toutes les échelles.



NASA and The Hubble Heritage Team (AURA/STScI)

V838 Monocerotis supergéante rouge de la constellation de la Licorne, photographiée par le télescope spatial Hubble, est située à environ 20 000 **années-lumière**. Le 6 janvier 2002, elle a produit un éclat très intense qui a illuminé le cocon de poussière l'entourant. La compréhension de la formation des étoiles – constituants élémentaires de notre Univers – de leur évolution dynamique et de leur fin de vie est une des briques de base de l'astrophysique moderne.

Véritables réacteurs **thermonucléaires**, les **étoiles** fabriquent des **noyaux lourds** à partir des **éléments primordiaux** créés au moment du **big bang** : **hydrogène**, **hélium** et **deutérium**. Lorsque l'astre arrive en fin de vie, ces éléments enrichissent les couches externes puis le **milieu interstellaire**. Cela modifie la composition chimique des **galaxies** et donc les sites potentiels de formation des générations ultérieures d'étoiles. Pour comprendre comment ce qui était à l'origine essentiellement une boule d'hydrogène peut, à la fin de son existence, disperser des **éléments lourds** dans l'espace, il faut remonter le « film » de cette évolution. Quand une étoile a achevé sa phase de formation (voir *Voyage dans les nurseries stellaires*, p. 17), elle entre dans sa **séquence principale**, très longue période durant

laquelle la **fusion** de l'hydrogène produit au moins 99 % de l'énergie rayonnée. Durant cette phase, la **luminosité** (ou puissance rayonnée) et la **température effective** de surface changent relativement peu. Dans les étoiles de masse inférieure à 1,3 fois celle du **Soleil**, la fusion de l'hydrogène pour former de l'hélium s'effectue par interaction de **protons** (réactions p-p). Dans les astres plus massifs, à la température centrale plus élevée qui permet de franchir la **barrière coulombienne**, le processus suit le **cycle CNO** (**carbone-azote-oxygène**). Pendant toute cette séquence, les réactions nucléaires sont régulées par l'**équilibre hydrostatique** entre le gradient de la pression du gaz et la **gravitation**. Si les réactions s'emballent, l'étoile se dilate. Par contre, lorsque le **combustible** s'épuise, le cœur se contracte et sa température augmente, allumant ainsi les réactions, jusqu'à ce que l'hydrogène resté intact dans les couches supérieures puisse aussi se transformer en hélium. Cette combustion « en couche » s'accompagne de la dilatation des régions externes, qui de ce fait sont de moins en moins retenues par la **gravité**. À la fin de cette évolution, l'étoile devenue une **géante rouge** perd une partie de son enveloppe.

Comment les étoiles ensemencent l'espace

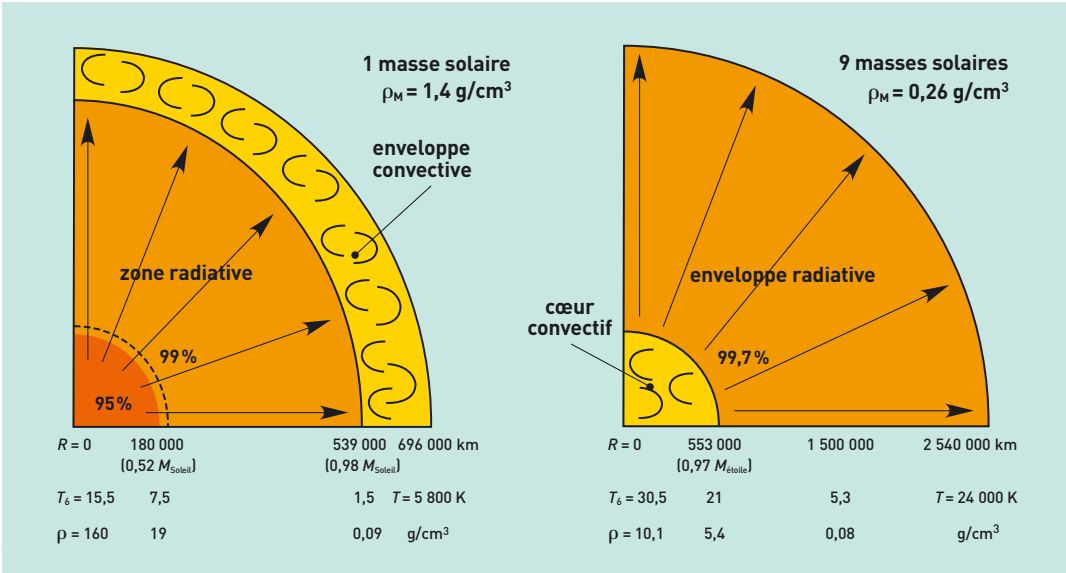
La suite de l'histoire dépend alors de la masse initiale de l'étoile. Les astres de faible masse (entre 0,07 et 0,5 fois la **masse solaire**) terminent leur vie comme des **naines blanches** formées d'hélium. Au-delà de la moitié de la masse solaire, au contraire, l'hélium fusionne pour donner du carbone et de l'oxygène. L'évolution s'accélère et l'hélium est rapidement consommé. Les astres de moins de 8 fois la masse solaire donnent ainsi naissance à des naines blanches, mais cette fois-ci composées de carbone et d'oxygène. Toutes les naines blanches sont des astres compacts dégénérés, d'une densité d'environ une tonne par centimètre cube. Ces « restes d'étoiles », de masse généralement inférieure à celle du Soleil du fait de la dispersion des couches externes, peuvent accumuler de la matière par **accrétion**. Certains atteignent alors une **masse critique**, dite **de Chandrasekhar**, et explosent en une **supernova** thermonucléaire (voir *L'explosion des supernovae*, p. 26).

Les étoiles massives (de 9 à 120 fois la masse solaire) évoluent différemment. Leur température centrale étant plus élevée, les réactions de fusion peuvent aller au-delà de la création de carbone et d'oxygène, synthétisant successivement le néon, le silicium et ainsi de suite jusqu'au fer, qui est l'élément le plus stable. L'étoile est alors à court de combustible nucléaire et elle s'effondre en libérant une quantité énorme d'énergie sous forme de **photons** et de **neutrinos**. En quelques minutes, elle devient un milliard de fois plus lumineuse : c'est l'explosion d'une supernova gravitationnelle (voir *L'explosion des supernovae*, p. 26). Les couches externes sont alors éjectées et enrichissent le milieu interstellaire en éléments lourds. Le cadavre stellaire qui en résulte est un objet extrêmement compact d'une dizaine de kilomètres de rayon, constitué de **neutrons**, d'une densité de plus d'un million de tonnes par centimètre cube, qui s'effondre en un **trou noir stellaire** lorsque sa masse dépasse trois fois celle du Soleil.

Le milieu interstellaire est donc constamment enrichi en éléments lourds en provenance d'anciennes étoiles (on dit que sa métallicité augmente), qui entreront à leur tour dans la composition des astres futurs. Cependant, si ce scénario régi par l'équilibre hydrostatique et la physique microscopique explique les grandes lignes de l'évolution des étoiles, il ne prend pas en compte les processus dynamiques internes, ni les interactions des astres avec leur environnement.

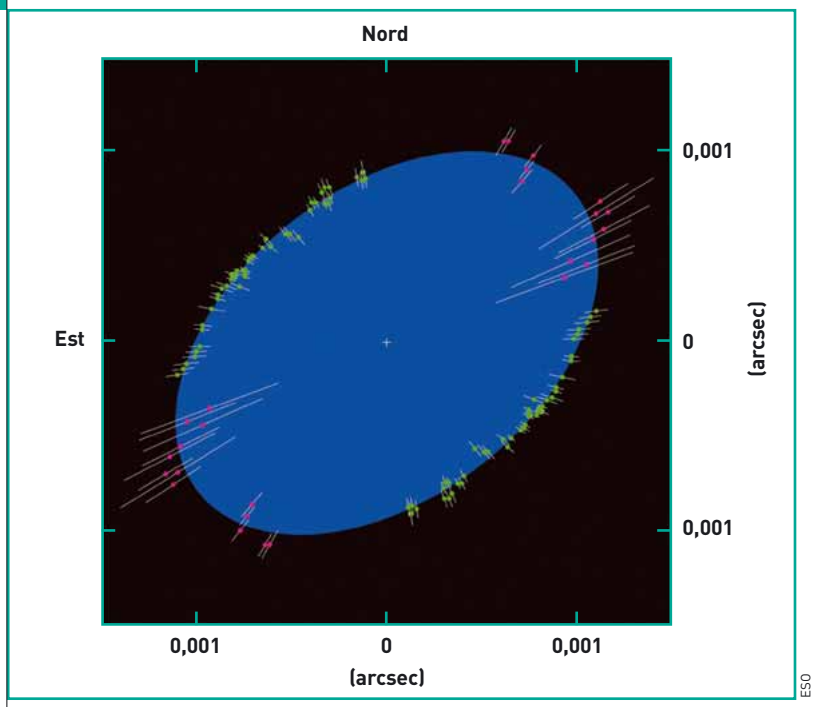
Des astres très agités

Les étoiles sont en effet des objets dynamiques en rotation, dotés d'un **champ magnétique**, où divers types d'**ondes** se manifestent (voir *Les enseignements du Soleil*, p. 10 et *Du Soleil aux étoiles*, p. 16). De plus,



(adapté de André Maeder, 2009)

Figure 1.
Structures d'une étoile de même masse que le Soleil (à gauche) et d'une étoile neuf fois plus massive (à droite). Les rayons R, les températures T (en K) ou T_6 (en millions de K) ainsi que les densités ρ sont indiqués pour le centre et les limites des régions radiatives et convectives. ρ_M représente la densité moyenne de l'étoile. Les pourcentages correspondent à la fraction de l'énergie totale produite.



ESO

Figure 2.
Achernar, une étoile de **type B** de 6,07 fois la masse solaire. Elle est très aplatie du fait de sa rotation très rapide : en surface, sa vitesse de rotation vaut 150 fois celle du Soleil.

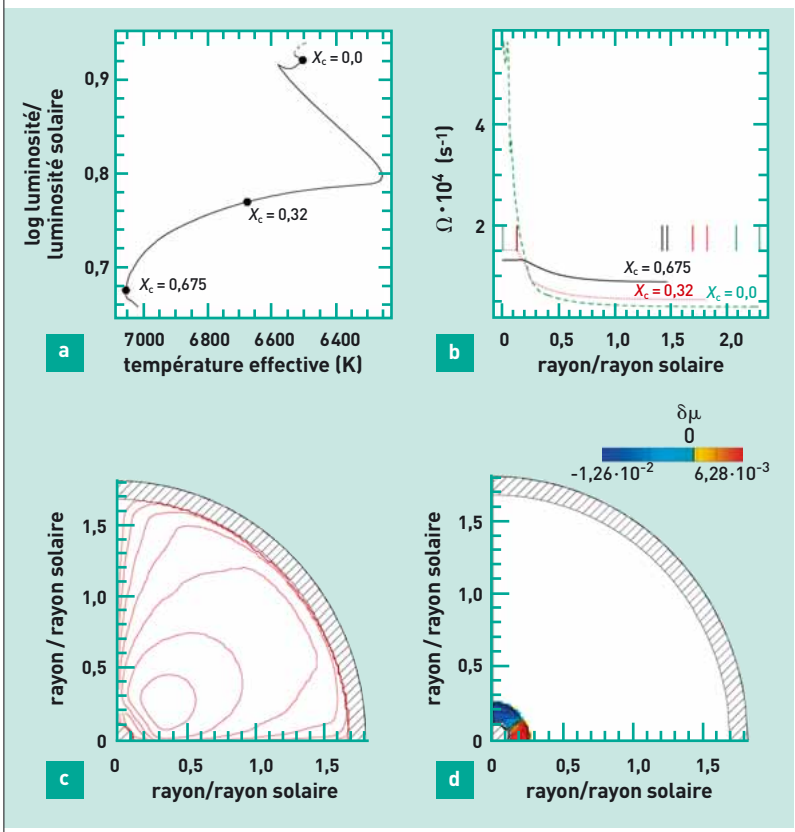


Figure 3.
Modèle dynamique d'une étoile en rotation de 1,5 fois la masse solaire. En a, chemin évolutif dans le **diagramme de Hertzsprung-Russell** ; X_c désigne la fraction de masse en hydrogène au cœur de l'étoile. En b, profil de rotation interne à trois instants de sa vie. Le rayon de l'étoile augmente au cours de son évolution. Les barres verticales indiquent les positions des zones convectives. En c, lignes tangentes aux champs de vitesse induits par la rotation différentielle dans le plan méridien de l'étoile pour $X_c = 0,32$. Les boucles tournent dans le sens inverse des aiguilles d'une montre signifiant que le moment cinétique est transporté vers l'extérieur. Les zones hachurées correspondent aux régions convectives. En d, pollution chimique provoquée par la rotation pour $X_c = 0,32$. μ représente le poids moléculaire moyen qui permet de décrire le mélange des éléments dans le plasma stellaire. Dans le cas d'un plasma pur d'hydrogène ionisé, il vaut 1/2.

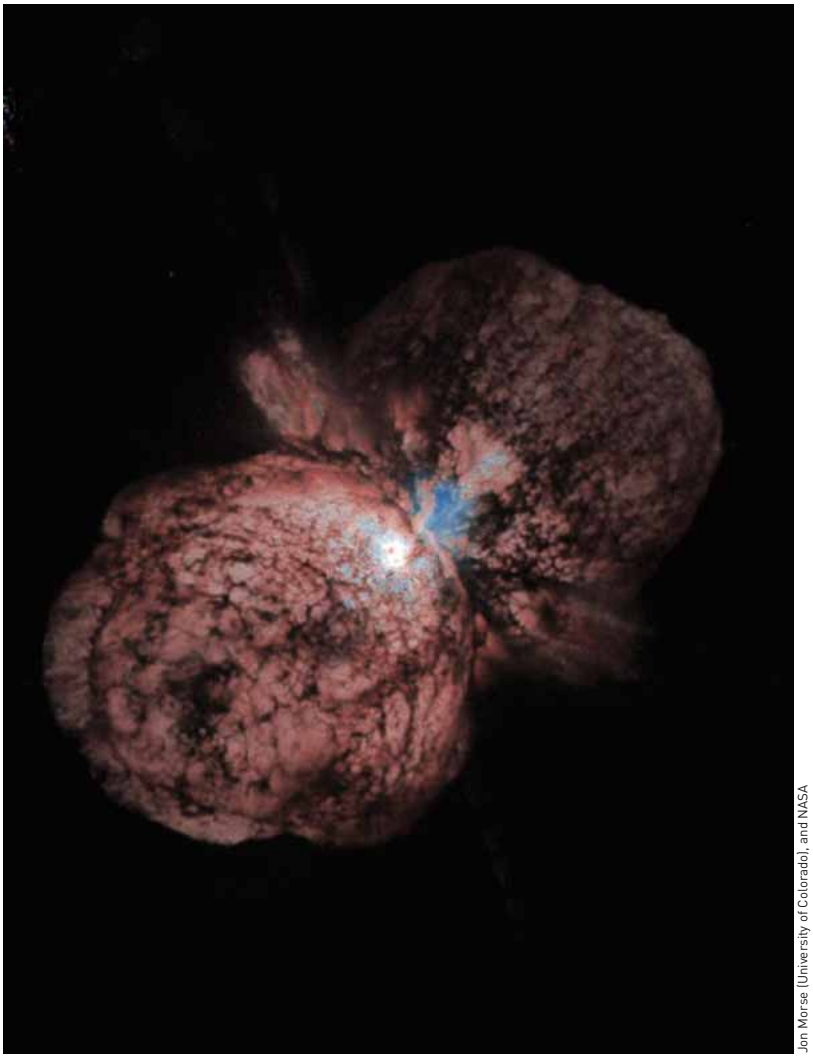
elles émettent dans l'environnement des **vents stellaires** (conduits par le magnétisme dans le cas des étoiles de type solaire et par la pression de radiation pour les étoiles massives). Durant leur phase de pré-séquence principale, elles sont couplées à des **disques d'accrétion**, et peuvent aussi interagir, par transfert de masse ou **effet de marée**, avec un astre compagnon si elles appartiennent à un **système binaire**. Décrire l'évolution stellaire en considérant tous ces phénomènes exige de prendre en compte simultanément des phénomènes physiques microscopiques et macroscopiques, dont les échelles spatiales et temporelles diffèrent de plusieurs ordres de grandeur. Par exemple, l'évolution nucléaire des étoiles se déroule durant des millions ou des milliards d'années, alors que des processus hydrodynamiques – tels que la **convection** ou les instabilités conduisant à la **turbulence** – prennent place sur des échelles de temps de l'ordre du mois, voire moins. Pour relever un tel défi, le CEA s'est fortement investi dans la **modélisation** et la **simulation** des processus **magnétohydrodynamiques** internes. Ce que l'on sait aujourd'hui des mécanismes de transport du **moment cinétique** et de la matière à l'intérieur des étoiles peut se décrire comme suit. Dans les **régions radiatives** des étoiles, l'énergie créée par les réactions nucléaires est transportée par l'interaction entre les photons et la matière. Le **plasma** stellaire est en effet peu **opaque**, et les photons sont **absorbés** et réémis des millions de fois au cours de leurs collisions avec les **atomes ionisés**. Dans les **régions convectives**, la matière chaude monte des couches profondes vers les régions supérieures où elle dépose sa chaleur avant de redescendre. Ces grands mouvements d'ensemble, dits convectifs, sont dus au fort gradient de température et au fait que la densité de la matière diminue quand sa température augmente (figure 1). Les étoiles de type solaire ont un cœur radiatif et une enveloppe convective (où le plasma est opaque du fait d'une ionisation seulement partielle des atomes), alors que la situation est inversée dans les astres massifs – de masse supérieure à 1,3 fois celle du Soleil – où les photons ne peuvent évacuer l'énergie produite près du centre (voir la figure 1 de *Du Soleil aux étoiles*, p. 16).

Une histoire complexe

Le mélange des éléments formés par **nucléosynthèse** s'effectue dans les régions radiatives, sur de très longues durées. Les mécanismes de transport entrant en jeu se répartissent en deux grandes familles selon leur échelle, microscopique ou macroscopique. Les mécanismes microscopiques comprennent le triage gravitationnel et les forces dues au rayonnement, qui influencent le déplacement de chaque particule ou atome. Les processus magnétohydrodynamiques, eux, agissent à l'échelle macroscopique.

Ainsi, les régions radiatives sont en rotation, parfois très rapide (figure 2). Celle-ci n'est ni constante ni uniforme au cours de l'évolution de l'étoile. En fait, chacune des différentes couches de l'étoile a sa propre vitesse angulaire. Cette rotation différentielle crée des champs de vitesse à grande échelle (équivalents des grandes circulations des atmosphères

planétaires) et de la turbulence associée au cisaillement (équivalente à celle observée dans l'atmosphère terrestre ou les océans). Ceux-ci transportent le moment cinétique et provoquent un mélange qui modifie la structure de l'étoile.
D'autre part, les étoiles ont vraisemblablement piégé un champ magnétique, appelé « fossile » car il remonte à l'époque de leur formation, dans leurs régions radiatives. Ce champ interagit avec les processus précédents, engendrant un transport de moment cinétique supplémentaire qui modifie le couplage entre les différentes couches de l'étoile. Qui plus est, sous l'influence opposée de la poussée d'Archimède (qui pousse la matière vers le haut) et de la gravité (qui l'attire vers le centre), les régions radiatives sont également parcourues de phénomènes oscillatoires appelés « ondes internes de gravité ». Pour mieux se représenter ces ondes, qu'il ne faut pas confondre avec l'onde gravitationnelle chère à Einstein, il suffit d'évoquer les vagues à la surface de l'océan. Excitées par les mouvements convectifs turbulents, ces ondes transforment le profil de vitesse angulaire. L'interaction de ces différents acteurs, évidemment non linéaire, modifie la dynamique et la structure de l'étoile.
Pour compliquer encore le tableau, les étoiles sont couplées, parfois de manière violente, à leur environnement par l'intermédiaire des vents stellaires, des phénomènes d'accrétion ou d'autres transferts de masse, voire d'effets de marée dans le cas des **systèmes binaires serrés**. Ces couplages modifient à leur tour les processus internes, ce qui rend encore plus complexe l'évolution de l'étoile.
La modélisation de cette évolution dynamique constitue aujourd'hui l'axe central du travail des physiciens stellaires du CEA et de leurs partenaires. Ils mettent ainsi au point, pas à pas, les outils théoriques nécessaires à l'élaboration de modèles de nouvelle génération (figures 3 et 4) ainsi que les simulations numériques des processus magnéto-hydrodynamiques (sur les échelles de temps qui leur sont propres). D'autre part, ils participent simultanément au développement et à l'exploitation des instruments d'observation qui fournissent les contraintes introduites dans les modèles (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90 et *Scruter le Soleil avec GOLF-NG*, p. 130). Fort de ces différentes expertises et grâce au développement simultané des expériences auprès des grands lasers, le CEA s'investit donc dans la mise en place de l'étude de l'évolution dynamique des seuls réacteurs à fusion thermonucléaire naturels que sont les étoiles.


Jon Morse (University of Colorado), and NASA

L'étoile Eta Carina, photographiée par le télescope spatial Hubble, est située à environ 8 000 années-lumière dans la nébuleuse de la Carène. Très massive, plus de 100 fois la masse du Soleil, elle est sans doute très proche d'une explosion imminente. Un petit astre compagnon gravite autour d'elle avec une période de cinq ans, leur interaction provoquant des échanges violents de gaz et de matière.

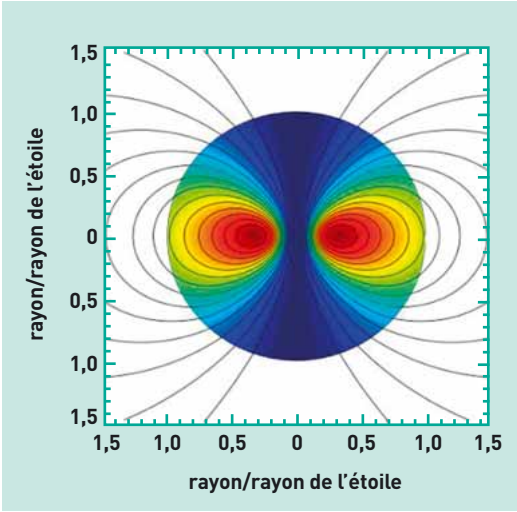


Figure 4.
Champ magnétique fossile d'une étoile de **type A** (de 2,37 fois la masse solaire et trois fois le **rayon solaire**).

> Stéphane Mathis
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)

POUR EN SAVOIR PLUS

« Physics, Formation and Evolution of Rotating Stars » par André Maeder, *Astronomy & Astrophysics Library*, Springer (2009).

L'explosion des supernovae

ESO

La nébuleuse du Crabe a été découverte en 1731 par le physicien britannique John Bevis. Il s'agit des restes de l'explosion d'une supernova qui s'est produite en 1054, et a été observée par des astronomes d'Extrême-Orient.

Certaines **étoiles** finissent leur vie dans une gigantesque explosion, projetant dans le **milieu interstellaire** la matière qu'elles ont synthétisée pendant des millions d'années. Ces phénomènes, appelés **supernovae**, sont tellement lumineux que certains ont été vus à l'œil nu. En 1054, les astronomes chinois ont ainsi observé une « étoile supplémentaire », en fait l'explosion qui a donné naissance à la nébuleuse du Crabe. Environ deux supernovae explosent chaque siècle dans **notre Galaxie**, mais les télescopes automatiques en détectent plusieurs centaines par an dans l'ensemble des autres **galaxies**. Les **cosmologistes** les recherchent activement car elles permettent de mesurer les distances dans l'Univers. De plus, elles stimulent la formation de nouvelles étoiles et représentent une source majeure de **rayons cosmiques**.

On sait que les étoiles comparables au **Soleil** n'explosent pas : elles finissent leur vie en se dispersant lentement tandis qu'une **naine blanche** se forme en leur centre. Quelles sont donc ces étoiles dont la mort est si violente ? Les supernovae observées se répartissent en deux catégories, thermonucléaire et gravitationnelle, selon que leur progéniteur est une naine blanche ou le cœur de fer d'une étoile au moins neuf fois plus massive que le Soleil.

Lorsqu'une naine blanche parvient à capter suffisamment de matière d'une étoile voisine pour grossir jusqu'à la **masse critique de Chandrasekhar** (environ 1,4 fois la **masse du Soleil**), les réactions nucléaires en son centre s'emballent. La **fusion** du carbone et de l'oxygène en **éléments** plus **lourds**, comme le fer, libère alors assez d'énergie pour pulvériser intégralement l'astre. Une supernova thermonucléaire est née.

En revanche, le fer synthétisé au cœur d'une **étoile massive** ne peut libérer d'énergie nucléaire, ni par fusion, ni par **fission**. Lorsque sa masse atteint la limite de Chandrasekhar, le cœur de fer s'effondre sous son propre poids jusqu'à la formation d'une **étoile à neutrons**. Son diamètre diminue d'un facteur cent en moins d'une seconde, libérant une énergie **gravitationnelle** considérable essentiellement sous forme de **neutrinos**, et aussi de **photons** (figure 1). En 1987, les observatoires terrestres ont capté les neutrinos provenant de la supernova gravitationnelle SN1987A, confortant ainsi la compréhension théorique de ce phénomène.

Une instabilité créatrice

Certaines questions demeuraient cependant sans réponse. Comment expulser rapidement les couches successives de carbone, oxygène, **hélium** et **hydrogène** qui entourent le cœur de fer effondré, avant que la masse de l'étoile à neutrons centrale n'atteigne le seuil critique de formation d'un **trou noir** (environ 3 masses solaires) ? Ce trou noir engloutirait en effet rapidement toute l'étoile, sans explosion spectaculaire. En 1985, les physiciens américains Hans Bethe et James Wilson proposaient un scénario d'explosion retardée, selon lequel les neutrinos déposent suffisamment d'énergie dans l'enveloppe pour l'expulser. Les **simulations numériques** semblaient infirmer ce scénario, jusqu'à la découverte en 2003 des effets bénéfiques d'une nouvelle instabilité hydrodynamique. Celle-ci se développe à moins de 200 kilomètres du centre de l'étoile à neutrons, pendant quelques dixièmes de seconde après sa formation. Les travaux théoriques conduits au Service d'astrophysique du CEA/Irfu ont élucidé son mécanisme par l'interaction entre **ondes** acoustiques et tourbillons de matière (figure 2). Les mouvements **turbulents** qu'elle induit ont pour effet de retarder la chute de l'enveloppe vers l'étoile à neutrons, et de l'exposer ainsi plus longtemps au flux de neutrinos. Cet effet décisif semble être la clé d'une explosion réussie.

Cette instabilité est déterminante pour le mécanisme d'explosion et le destin de l'étoile à neutrons résiduelle. D'après les simulations numériques, elle est en particulier responsable du caractère asymétrique de l'explosion. Cette asymétrie propulse l'étoile à neutrons dans l'espace, à des vitesses pouvant dépasser 1 000 kilomètres par seconde, en bon accord avec les observations.

Les travaux futurs doivent permettre de mieux comprendre la diversité des explosions de supernovae, en particulier leur lien avec les **sursauts gamma**.

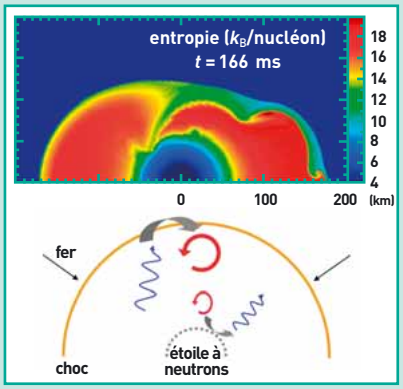


Figure 2.
Simulation numérique de l'instabilité - définie par l'**entropie** exprimée en k_B par **nucléon** - qui déforme le choc de façon asymétrique (collaboration **MPA** Garching). Son mécanisme est fondé sur l'interaction entre ondes acoustiques (flèches bleues) et tourbillons (flèches rouges), qui forment un cycle instable.

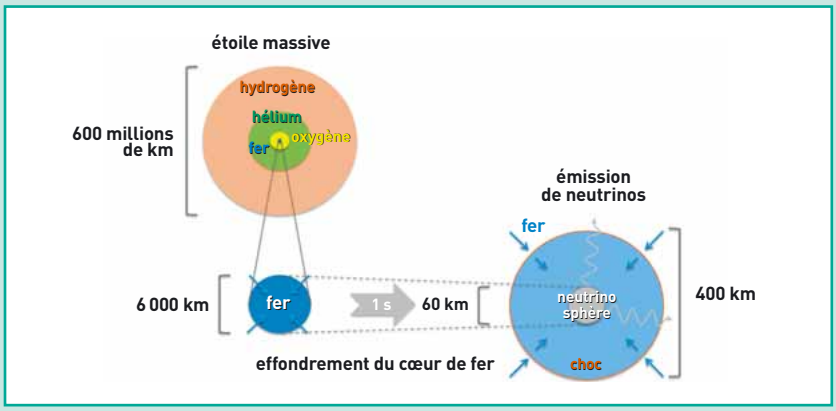


Figure 1.
Vue schématique d'une supernova gravitationnelle. L'effondrement du cœur de fer d'une étoile massive est ralenti par une onde de choc stationnaire, à environ 200 kilomètres du centre.

> Thierry Foglizzo
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)

Les restes de supernova

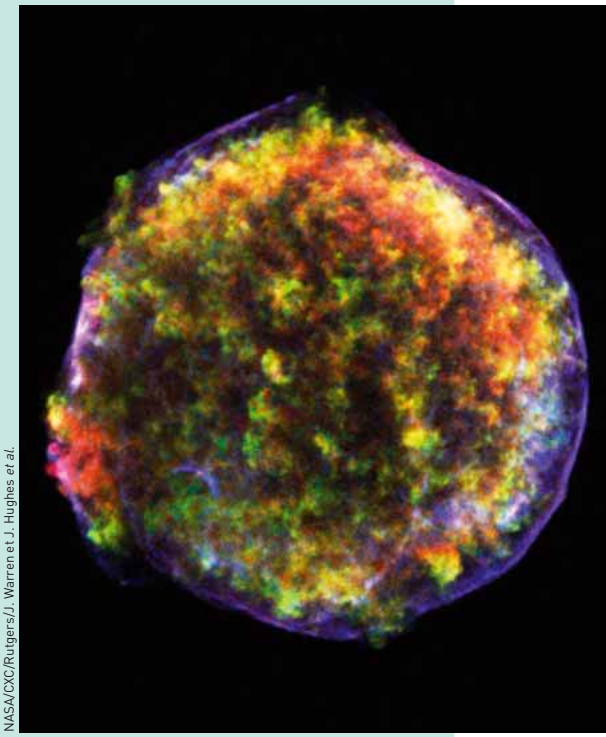
L'explosion d'une **supernova** libère une énergie énorme (de l'ordre de 10^{44} **J**), dont seule une petite fraction sous forme de **lumière visible**. Au moment de l'explosion, une supernova **brille** autant qu'une **galaxie** entière, mais sa lumière visible décroît ensuite assez rapidement et disparaît en quelques années. Dans la **Voie lactée**, les plus récentes observations de supernovae datent de la fin du 16e et du début du 17e siècle. Bien que des instruments exceptionnels soient maintenant à la disposition des astronomes, que ce soit au sol ou dans l'espace, aucune nouvelle supernova n'a pu être observée dans notre Galaxie ! Or il se produit en moyenne 2 ou 3 explosions par siècle dans une **galaxie spirale** telle que la nôtre. Une dizaine de supernovae ont donc dû exploser durant les quatre derniers siècles, mais cela a vraisemblablement eu lieu dans des régions obscurcies.

Les **éléments lourds** synthétisés durant la phase finale de la vie de l'**étoile** sont dispersés par l'explosion et enrichissent le **milieu interstellaire** et intergalactique. Les restes de l'astre détruit perdurent plusieurs milliers d'années dans l'espace et les **rayons X** émis fournissent de précieux indices sur la nature et la physique de telles explosions.

Un reste de supernova est une structure complexe. La matière stellaire, éjectée à très grande vitesse (quelque 10 000 km/s) par l'explosion, percute le milieu interstellaire environnant et, comme un piston, le repousse. Dans une première phase, qui dure moins de mille ans, deux chocs opposés façonnent la structure. D'une part le choc de l'explosion, qui se propage vers l'extérieur dans le milieu environnant, d'autre part le choc en retour, lié à la décélération des débris stellaires par le milieu, qui se propage vers l'intérieur dans la matière éjectée. Plus tard, le milieu interstellaire prend le dessus et la matière fraîchement synthétisée ne domine plus. Comprimés et chauffés à des dizaines de millions de degrés par les chocs, les débris stellaires et le milieu environnant deviennent de puissants émetteurs de rayons X. C'est ce qui permettra de les détecter. L'atmosphère terrestre constituant un écran à ces rayons, les observations depuis le sol sont impossibles : il faut placer les instruments en orbite. Les satellites européen XMM-Newton (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90) et américain Chandra ont apporté une moisson de résultats nouveaux dans ce domaine.

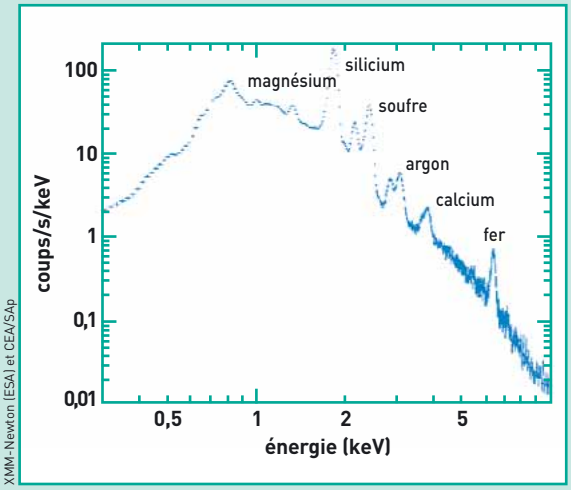
Des rayons très instructifs

Les deux télescopes ont notamment pointé dans la direction de la supernova observée en 1572 par l'astronome danois Tycho Brahé (supernova dite de Tycho). La figure 1 montre l'image en rayons X du reste de cette supernova, prise 432 ans après l'explosion. Son **spectre** global (figure 2) dénote la présence d'éléments lourds très **ionisés** comme le silicium, le soufre, l'argon et le fer. La composition du spectre permet par exemple de distinguer les explosions thermonucléaires des explosions gravitationnelles (voir *L'explosion des supernovae*, p. 26). La répartition spatiale des éléments dans les éjectas apporte un nouvel éclairage sur les processus de mélange des couches dans la supernova ou sur l'asymétrie de l'explosion. L'émission en rayons X fournit aussi des renseignements sur des processus physiques tels que les instabilités hydrodynamiques se développant à l'interface entre la matière éjectée et le milieu ambiant. Des **simulations numériques** à trois dimensions sont ensuite confrontées aux observations. Les instruments X peuvent aujourd'hui réaliser de la **spectroscopie spatialement résolue** (permettant la production d'images dans des bandes d'énergie étroites, comme des **raies d'émission**, et la spectroscopie dans des régions spatiales de petite extension), ce qui a ouvert l'étude de la physique des chocs dits « non collisionnels ». Cela a en particulier apporté une meilleure compréhension de l'accélération des **rayons cosmiques** par les restes de supernova (voir *Élucider le mécanisme d'accélération des rayons cosmiques*, p. 50).



NASA/CXC/Rutgers/J. Warren et J. Hughes *et al.*

Figure 1.
Image en rayons X du reste de la supernova de Tycho observé par le satellite Chandra plus de 400 ans après l'explosion. La matière éjectée (en rouge ou en vert selon sa composition chimique) apparaît grumeleuse du fait d'instabilités hydrodynamiques. L'onde de choc se propageant dans le milieu interstellaire ambiant est signalée par un fin filament d'émission synchrotron (en bleu) produite par des électrons accélérés à des vitesses proches de celle de la lumière.



XMM-Newton (ESA) et CEA/SAp

Figure 2.
Spectre en rayons X du reste de la supernova de Tycho, obtenu par l'une des caméras du satellite XMM-Newton plus de 400 ans après l'explosion. Il montre d'intenses raies d'émission provenant d'éléments lourds synthétisés juste avant et lors de l'explosion. Ces éléments, chauffés à des dizaines de millions de degrés par le choc se propageant dans la matière éjectée, sont fortement ionisés. L'étude de ces raies renseigne sur la nature de la supernova (explosion thermonucléaire ou effondrement gravitationnel).

> **Anne Decourchelle** et **Jean Ballet**
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)

Astres de haute énergie : des sources de surprises

Les « cadavres » d'étoiles, objets peu visibles et d'une extrême densité, peuvent devenir de puissantes sources de rayonnement s'ils sont associés à une étoile compagnon. Grâce aux nouveaux moyens d'observation, le bestiaire de ces astres de haute énergie n'en finit pas de s'enrichir.

S. Chaty/ESA

Vue d'artiste d'un système binaire de grande masse, composé d'une étoile à neutrons orbitant autour d'une étoile supergéante. L'étoile à neutrons accrète de la matière du vent stellaire, dense et inhomogène, éjecté par l'étoile supergéante. L'étude des astres de haute énergie permet non seulement d'accéder à la physique de la matière condensée mais aussi à celle des plasmas de très haute température. Ces objets sont idéaux pour mieux comprendre les phénomènes d'accrétion-éjection et, dans certains cas, les vents stellaires d'étoiles massives.

À la fin de leur évolution, certaines **étoiles** se transforment en objets extrêmement compacts : **naines blanches**, **étoiles à neutrons** ou **trous noirs stellaires**. Ces trois types d'astres se distinguent par leur densité. Une naine blanche contient typiquement la **masse du Soleil** dans une sphère d'environ 6 000 km de rayon. Une étoile à neutrons confine une masse comparable dans une sphère de seulement 15 km de rayon. Enfin un trou noir de 10 masses solaires aurait un « rayon » de 30 km (correspondant à l'**horizon des événements**). Ces étoiles « mortes » n'émettent que peu de rayonnement lorsqu'elles sont isolées, ce qui les rend peu visibles ou même invisibles à nos yeux. En revanche, ces objets peuvent devenir extrêmement **brillants** s'ils sont l'une des composantes d'un **système binaire**, c'est-à-dire s'ils sont liés par **gravité** à une étoile compagnon dont ils attirent la matière. Un tel système s'appelle « variable cataclysmique » si l'objet compact est une naine blanche, ou « binaire X » dans le cas d'une étoile à neutrons ou d'un trou noir. Cet article s'intéresse aux binaires X.

De puissants émetteurs

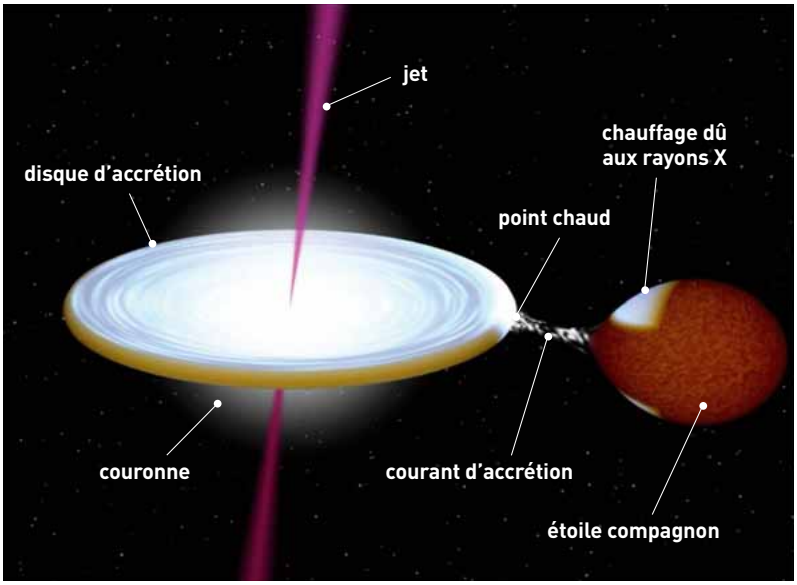
La chute de matière transforme une partie de l'énergie potentielle de **gravitation** en énergie rayonnée. Étant donné l'extrême densité de l'objet, la matière atteint des températures très élevées (environ 10 millions de degrés) et émet des **rayons X**. D'où le nom de ces systèmes. Lorsque le compagnon est une **étoile massive** (de masse supérieure à une dizaine de fois celle du Soleil), il engendre un **vent stellaire** intense que l'objet compact intercepte et **accrète** directement. De tels objets brillent peu, et peuvent même être enfouis dans le vent stellaire. Si au contraire l'astre compagnon est moins massif que le Soleil, l'objet compact arrache de la matière à ses couches externes. En raison de la conservation du **moment cinétique**, cette matière en provenance d'une étoile en rotation dans un système binaire ne peut pas tomber directement sur l'objet compact. Un **disque d'accrétion** se forme donc : la matière parcourt une spirale, se rapprochant peu à peu de l'objet compact tout en s'échauffant… et en émettant un copieux

flot de rayons X. De plus, une couronne d'**électrons relativistes** englobe l'objet central et émet des **rayons** X et **gamma** par **effet Compton inverse** (figure 1). Pour caractériser ces astres de haute énergie et leur environnement, les astronomes utilisent donc des télescopes à rayons X et gamma, comme XMM-Newton et INTEGRAL auxquels le CEA/Irfu a largement contribué (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90), mais aussi des détecteurs d'**ondes radio** et de **rayonnements infrarouges/visibles**.

La découverte de microquasars

Au-delà de l'image du trou noir accrétant de la matière d'une étoile compagnon, des astrophysiciens du CEA/Irfu ont montré dans les années 1990 que de tels objets pouvaient éjecter massivement du **plasma** sous forme de jets à des vitesses apparemment supérieures à celle de la lumière (figure 1). Ces astres furent appelés microquasars par analogie avec les **quasars**, noyaux actifs de **galaxies** contenant en leur centre un trou noir supermassif (d'une masse de l'ordre de quelques millions à quelques milliards de fois celle du Soleil). Cette découverte révolutionna les recherches dans ce domaine. En effet, il pourrait exister une universalité des mécanismes physiques entre ces deux populations de trous noirs. Or les manifestations physiques au sein des microquasars se déroulent sur des échelles de temps réduites (de la milliseconde à l'année). Cela permet enfin d'étudier, même indirectement, des phénomènes similaires à ceux se produisant au sein des noyaux actifs de galaxies… mais sur des durées tellement longues qu'elles sont inaccessibles à l'échelle humaine. Diverses propriétés du flot (ou courant) d'accrétion se firent alors jour, et il devint évident que le disque était fortement couplé aux jets relativistes par l'intermédiaire d'une couronne d'électrons chauds qui alimente ces derniers (figure 1). En outre, la présence de matière **ionisée** au sein du disque d'accrétion induit la formation de **raies** de matériaux comme le fer. Les effets gravitationnels dus à l'objet compact modifient le profil d'émission de la matière du disque en rotation. À l'avenir, grâce entre autres à XEUS (*X-ray Evolving Universe Spectroscopy mission*)/IXO (*International X-ray Observatory*), ces **raies d'émission** renseigneront les astronomes sur la vitesse de rotation des trous noirs, un de leurs trois paramètres fondamentaux avec la masse et la charge électrique.

La découverte de diverses corrélations (flux dans différentes bandes d'énergie, fréquences d'oscillations quasi périodiques, caractéristiques spectrales, etc.) démontra de plus que ces jets de matière peuvent émettre dans les domaines X et gamma, soit bien au-delà de leur domaine classique de rayonnement en ondes radio. En quelques années, les jets relativistes se sont donc révélés comme de puissants émetteurs multi-longueurs d'onde. La découverte directe d'une émission de rayons X lors de leur interaction avec le **milieu interstellaire** le confirma (figure 2). Elle prouva en effet sans ambiguïté que ces jets contiennent des particules de très hautes énergies (> **TeV**). Une émission jusqu'aux rayons gamma est possible : des observatoires tels que Fermi ou HESS pourraient alors les détecter (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90).

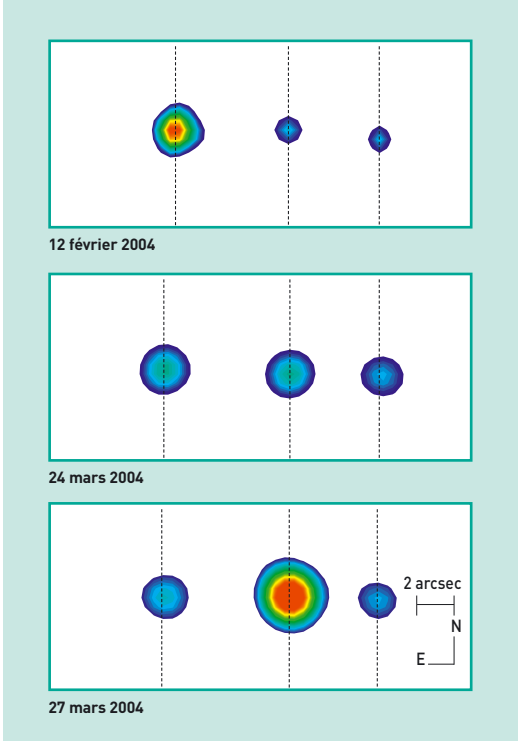


Rob Hynes

Figure 1.
Vue d'artiste d'un microquasar. La matière arrachée de l'étoile compagnon tombe dans le trou noir dans un mouvement en spirale. Un disque se forme autour de l'astre dense et des jets de matière apparaissent.

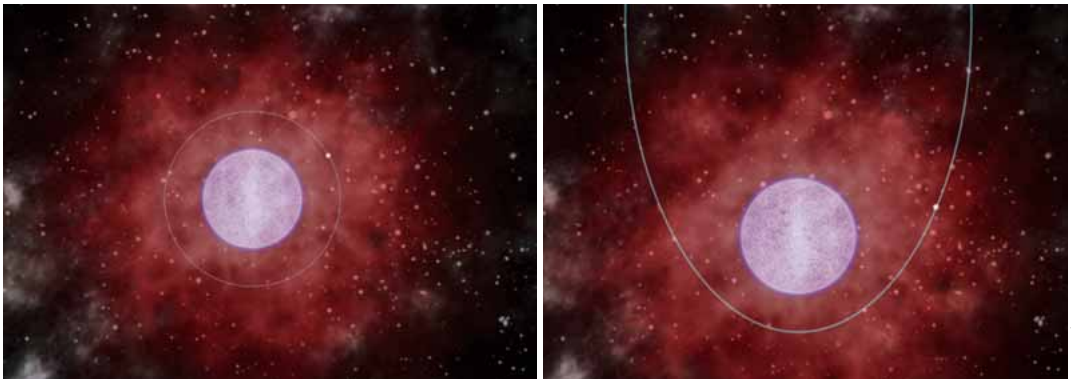
Des quasars « intermédiaires » ?

Un nouveau mystère est apparu ces dernières années. Les puissants observatoires actuels, comme XMM-Newton, ont détecté des sources très importantes de rayons X dans de nombreuses galaxies proches de la **Voie lactée**. Or ces objets semblent bien trop **lumineux** pour être assimilés à des systèmes binaires X. D'où l'idée qu'il pourrait s'agir de trous noirs d'une masse intermédiaire entre celle des microquasars et celle des noyaux actifs de galaxies, soit de quelques centaines à quelques milliers de fois celle du Soleil. Néanmoins, les théories actuelles expliquent difficilement la



S. Corbel

Figure 2.
Image de l'émission X autour du microquasar H 1743-322. De part et d'autre de la source centrale, on observe deux sources X mobiles dues à l'interaction de bulles de plasma relativiste avec le milieu interstellaire.



S. Chaty/CEA

Figure 3.
À gauche, un astre enfoui, où l'étoile à neutrons orbite près de l'étoile supergéante, constamment à l'intérieur du vent stellaire.
À droite, une « transitoire rapide », où l'étoile à neutrons, sur une orbite excentrique, pénètre régulièrement dans le vent de l'étoile.

formation de tels trous noirs. Les observations multi-longueurs d'onde apporteront un nouvel éclairage sur ces astres. Soit elles prouveront l'existence d'une nouvelle classe d'objets exotiques, soit il faudra revoir certaines théories admises concernant les disques d'accrétion.

Des sources mystérieuses

À l'intérieur même de la Voie lactée, l'observatoire INTEGRAL a lui aussi découvert, en janvier 2003, un nouveau type de sources de rayons X. Elles sont concentrées dans le plan galactique, et principalement dans la direction des bras. Un programme intensif d'observations a alors été lancé, et les observatoires XMM-Newton, Chandra et Swift ont localisé précisément une trentaine des sources découvertes par INTEGRAL. Les informations spectrales ont révélé que beaucoup d'entre elles présentent une forte **absorption** intrinsèque, inhabituelle pour des astres de haute énergie. Cela constitua une première surprise, mais d'autres allaient suivre…

En plus de ces observations des rayons X, les astrophysiciens du CEA/Irfu ont entrepris un programme multi-longueurs d'onde afin de révéler la nature de ces sources. Cette étude combine, pour un échantillon de ces objets, une **astrométrie** précise, une **photométrie** et une **spectroscopie** en **lumière visible** et **infrarouge** (**proche** et **moyen**). Ici survint la deuxième surprise : la majorité de ces objets sont des systèmes binaires de grande masse comprenant des étoiles **supergéantes** – étoiles très évoluées sorties de la **séquence principale** – alors qu'avant le lancement d'INTEGRAL, la plupart des systèmes binaires massifs connus contenaient des étoiles Be – étoiles de la séquence principale de **type spectral** précoce, en rotation tellement rapide sur elles-mêmes qu'elles créent un disque de matière les entourant.

De surprise en surprise

Ces nouveaux astres de haute énergie semblent intrinsèquement obscurcis, c'est-à-dire qu'eux-mêmes absorbent une partie de leur rayonnement. L'astre IGR J16318-4848 en constitue un exemple extrême : il s'agit d'une étoile à neutrons orbitant autour d'une étoile supergéante d'un type spectral très rare, noté sgB[e] à cause de la présence de raies d'émission « interdites »[1]. Les observations dans l'infrarouge moyen ont montré que ces objets apparaissent obscurcis à cause de la présence de matériau absorbant (poussière et/ou gaz froid) entourant le système binaire dans son ensemble. L'étoile à neutrons orbite donc à l'intérieur d'un cocon de gaz froid formé par le vent de l'étoile supergéante.

Enfin, une troisième caractéristique révélait une sous-population encore plus inhabituelle parmi ces objets. Certaines de ces sources présentent en effet des sursauts d'activité très rapides, de l'ordre de l'heure, et se produisant de manière apparemment anarchique. Ces astres ont été nommés « transitoires rapides de rayons X à supergéante ». L'archétype en est IGR J17544-2619.

L'échantillon de sources étudiées s'amplifiant, il apparaît maintenant que les différences entre les astres enfouis et les transitoires rapides proviennent essentiellement de caractéristiques orbitales (figure 3). En effet, les astres enfouis s'apparentent aux systèmes binaires de grande masse classiques, contenant une supergéante avec une étoile à neutrons parcourant une orbite très proche, à 2 ou 3 rayons stellaires seulement. L'accrétion de matière – à partir du vent de l'étoile – se fait donc en permanence, et l'émission en rayons X est persistante. Les « transitoires rapides » sont des systèmes où l'étoile à neutrons se trouve loin de l'étoile compagnon, sur des orbites circulaires ou excentriques. C'est lorsque l'objet compact traverse le vent de l'étoile, inhomogène et parsemé de grumeaux, que se produisent les sursauts rapides d'activité. Quand il se trouve loin de l'étoile, en revanche, il n'y a pas ou peu d'émission de rayons X.

Finalement, il semble qu'il existe dans la nature un continuum de ces systèmes binaires de grande masse, dont les caractéristiques d'émission dépendent de la proximité entre objet compact et étoile compagnon, et de la nature de l'orbite. C'est donc l'interaction entre les deux composants du système qui régit les propriétés de ces astres de haute énergie.

> **Sylvain Chaty, Stéphane Corbel** et **Jérôme Rodriguez**
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)

(1) Raies spectrales émises par un **atome** se désexcitant selon un mode très peu probable.