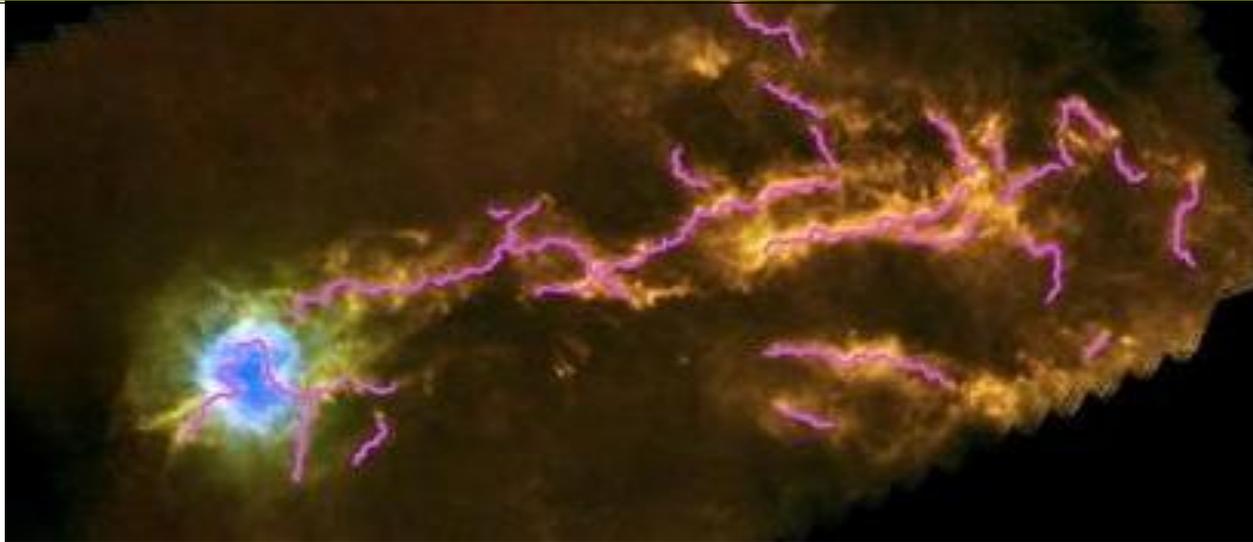




energie atomique • énergies alternatives

DOSSIER DE PRESSE



Bouleversement dans la compréhension des étoiles

Les astrophysiciens du CEA présentent, en images, des résultats scientifiques récents sur la naissance et l'évolution des étoiles

Vendredi 29 avril 2011

CONTACT PRESSE : CEA / Service Information-Media
Coline VERNEAU Tél. : 01 64 50 14 88 - coline.verneau@cea.fr

CEA Saclay / Siège
Direction de la Communication
Service Information-Média
91191 Gif-sur-Yvette Cedex
Tél. : (33) 01 64 50 20 11
Fax : (33) 01 64 50 28 92
www.cea.fr/presse

Sommaire :

Bouleversement dans la compréhension des étoiles

Les astrophysiciens du CEA présentent, en images, des résultats scientifiques récents sur la naissance et l'évolution des étoiles

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Introduction | 3 |
| Les étoiles naissent dans des filaments (Philippe André) | 4 |
| Les caméras SPIRE et PACS d'Herschel, témoins privilégiés de la naissance des étoiles dans les nuages interstellaires | 4 |
| Les chercheurs dénouent les filaments interstellaires et exploitent une nouvelle piste pour expliquer leur origine | 5 |
| L'observation de proto-étoiles le long des filaments les plus denses..... | 7 |
| Les « Piliers de la création » décodés par Herschel et la simulation numérique (Vincent Minier)..... | 11 |
| Analyse de la formation stellaire | 13 |
| Symphonie des étoiles : la sismologie révèle l'intérieur des astres (Rafael A. García) | 15 |
| La sismologie stellaire, une spécialité européenne | 16 |
| Sonder les palpitations des étoiles | 17 |
| Simuler le magnétisme et la dynamique non linéaire du Soleil et des étoiles (Sacha Allan Brun)..... | 21 |
| Etudier et comprendre le Soleil et les étoiles | 21 |
| Modèles 3-D dépendant du temps, du Soleil et des étoiles | 23 |
| L'évolution des étoiles et leur influence sur les planètes (Stéphane Mathis) | 25 |
| Simulation et modélisation théorique | 25 |
| Comprendre les mouvements internes des étoiles..... | 25 |
| Décrypter les effets de marées des étoiles | 27 |

Introduction

Depuis un an, d'importantes observations ont modifié notre connaissance des étoiles et sont aujourd'hui à l'origine d'un véritable changement de paradigme dans les disciplines de l'astronomie et de l'astrophysique. Elles conduisent à un saut qualitatif important concernant les données scientifiques accumulées sur la naissance des étoiles, leurs caractéristiques et leur évolution dans le temps et l'espace. Ce bouleversement est basé sur **deux avancées techniques majeures**.

La première avancée est caractérisée par la récente capacité d'obtenir des images d'une incroyable résolution dans le domaine du rayonnement micro-onde qui offre, de manière inédite, la possibilité de voir la structure du gaz dense au cœur même des nuages interstellaires. Ces images sont obtenues depuis l'espace, à bord du satellite européen Herschel, lancé en mai 2009, avec la camera bolométrique PACS développée sous la maîtrise d'œuvre **du CEA/Irfu**. Avec cet instrument, Herschel a pu apporter des données insoupçonnées : l'intérieur des nuages froids où se forment les étoiles n'est pas habité par des « cocons » d'étoiles séparés les uns des autres, mais traversé par des enchevêtrements de filaments étroits. Ces filaments ont été trouvés dans tous les nuages sondés par Herschel, révélant ainsi un phénomène physique général que les astrophysiciens s'efforcent maintenant de décoder.

La deuxième avancée est liée à l'utilisation d'une technique très particulière d'observation des étoiles, la **sismologie stellaire** ou astérosismologie. Celle-ci consiste à mesurer de très faibles fluctuations périodiques de luminosité qui traduisent la propagation d'ondes à l'intérieur même des étoiles. Cette technique avait déjà été utilisée avec succès sur le Soleil, grâce notamment à l'instrument GOLF à bord du satellite européen SOHO, auquel ont largement contribué les équipes du Service d'Astrophysique (SAP) du CEA/Irfu. Pour la première fois, la même technique a pu être appliquée aux étoiles lointaines : tout d'abord grâce à l'emploi du satellite français CoRoT, puis avec l'utilisation du satellite *Kepler*, destiné originellement à la recherche exclusive de planètes. Le gain en sensibilité obtenu par ce satellite a permis de détecter des ondes sismiques dans des centaines d'étoiles à différents stades d'évolution. Avec la sismologie stellaire, les astronomes possèdent désormais une toute nouvelle méthode pour mesurer la masse et le rayon des étoiles et, également déterminer avec précision leurs caractéristiques internes comme la rotation et leur source d'énergie ; des objectifs encore impossibles à atteindre il y a seulement quelques mois.

Toutes ces informations sur les étoiles peuvent aujourd'hui être exploitées par comparaison à des modèles théoriques de plus en plus détaillés. La précision de ces modèles est due à une **troisième avancée technique déterminante**. Il s'agit de la capacité des grands calculateurs à développer des équations permettant notamment de reproduire les étoiles en trois dimensions. Au sein du **Service d'Astrophysique (SAP) du CEA/Irfu**, également Unité Mixte « Laboratoire d'Astrophysique AIM Paris-Saclay » (CEA/CNRS/Université Paris Diderot-Paris 7), un large groupe de travail est consacré à la simulation numérique en astrophysique, COAST (pour COmputational ASTrophysics à Saclay) laquelle permet ainsi de confronter pour la première fois les équations, et donc les modèles théoriques, aux observations obtenues grâce aux satellites dans les **trois dimensions réelles de l'espace**. Ces confrontations inédites entre observations et simulations de pointe conduisent aujourd'hui à une toute nouvelle approche des étoiles, de leur propriété, et *in fine* de leur histoire.

Les étoiles naissent dans des filaments (Philippe André)

Les images fournies par le télescope spatial Herschel, depuis ces deux dernières années, apportent aux astrophysiciens des enseignements précieux sur le processus de formation des étoiles, l'une des grandes énigmes de l'astrophysique. Au sein du partenariat international créé autour de l'observatoire Herschel, le Service d'Astrophysique (SAp) du CEA-Irfu coordonne un programme d'étude nommé « Relevé des nuages de la ceinture de Gould ». Du nom d'un gigantesque anneau d'étoiles proches du Soleil, ce programme donne de premières clés de compréhension de la naissance des étoiles au sein de réseaux de « filaments » dans les nuages interstellaires.

Les caméras SPIRE et PACS d'Herschel, témoins privilégiés de la naissance des étoiles dans les nuages interstellaires

Herschel est l'observatoire spatial de l'ESA, l'Agence Spatiale Européenne, spécialisé dans le domaine spectral de l'infrarouge lointain et du submillimétrique, une gamme de lumière privilégiée pour observer la naissance des étoiles dans les nuages interstellaires. Parce que ces nuages sont froids (-260°C), ils sont généralement sombres et complètement inobservables sur des images prises en lumière visible. En revanche, les nuages interstellaires deviennent très brillants sur les images obtenues par Herschel dans le domaine de l'infrarouge lointain et du submillimétrique. L'un des programmes coordonnés par le Service d'Astrophysique (SAp) du CEA-Irfu sur l'observatoire Herschel se nomme « Relevé des nuages de la ceinture de Gould¹ » (André, Ph., Mensehchikov, A., Bontemps, S. et al. 2010, *Astronomy & Astrophysics*). Il a pour cible la vingtaine de nuages interstellaires ou sites de formation stellaires les plus proches du Soleil (moins de 500 années lumière), dont les plus connus sont les nuages d'Orion, du Taureau et d'Ophiuchus. Ces nuages proches sont les meilleurs « laboratoires » dont disposent les astronomes pour essayer de reconstituer le « film » de la formation des étoiles et comprendre les mécanismes physiques mis en jeu. L'analyse des images obtenues avec Herschel en direction des trois premiers nuages étudiés en détail par l'équipe du « relevé de la ceinture de Gould », connus sous les noms d'Aquila, IC5146 et Polaris, a déjà conduit à de premiers résultats surprenants.

Avec un diamètre de 3,5 m, Herschel est le plus grand télescope jamais lancé dans l'espace. Equipé notamment de ses deux caméras d'imagerie de pointe, PACS et SPIRE, pour la construction desquels le SAp a beaucoup contribué (conception des bolomètres - les éléments constituant le plan focal - de PACS, et conception des cryoréfrigérateurs équipant les deux instruments), Herschel offre aux astrophysiciens une moisson de nouvelles informations spatiales et spectrales² sur les objets les plus froids de l'univers. Les caméras embarquées à bord d'Herschel ont permis notamment de cartographier de manière complète plusieurs complexes de nuages interstellaires au sein de la « Ceinture de Gould ».

¹ Collaboration internationale, coordonnée par Ph. André (Laboratoire AIM Paris Saclay – CEA/Irfu), qui étudie la formation stellaire au sein des consortia des instruments SPIRE et PACS d'Herschel

² La résolution spectrale qui fournit des informations sur les énergies des phénomènes mis en jeu ; la résolution spatiale qui permet d'obtenir des informations morphologiques des objets observés.

La première surprise est venue de l'observation d'un enchevêtrement de filaments dans chacun des nuages interstellaires étudiés. Avant le lancement d'Herschel en mai 2009, des observations dans l'infrarouge avaient déjà montré la présence de gigantesques réseaux de filaments de gaz dans ces nuages mais le rôle de ces filaments dans le processus de formation stellaire restait mystérieux. Avec Herschel, il a été démontré d'une part que les filaments interstellaires sont beaucoup plus répandus que ce que l'on pensait jusque là et d'autre part que la formation des étoiles a lieu principalement dans les plus denses d'entre eux. Un filament très dense imagé dans le complexe d'Aquila contient, par exemple, un amas d'environ 100 étoiles en formation (Bontemps, S., André, Ph., Könyves, V. et al. 2010, *Astronomy & Astrophysics*). La comparaison de ces résultats d'observation avec des modèles théoriques a mis les astronomes sur la piste d'un scénario « universel » de manière à expliquer la genèse des étoiles dans les galaxies.

Les chercheurs dénouent les filaments interstellaires et exploitent une nouvelle piste pour expliquer leur origine

Avec les images inédites de réseaux de filaments interstellaires livrées par Herschel, ces réseaux de filaments apparaissent comme des éléments omniprésents et constitutifs du milieu interstellaire froid. Un enchevêtrement très riche de filaments est en effet observé dans tous les nuages, aussi bien dans ceux qui ne forment pas du tout d'étoiles comme le nuage de Polaris (Figure 2) que dans ceux qui ont déjà formé un grand nombre d'étoiles comme les complexes d'Aquila (Figure 3) et IC5146 (Figure 1). Polaris est en particulier très filamentaire (Figure 2) alors qu'il s'agit d'une région dans laquelle la formation des étoiles ne s'est pas encore véritablement amorcée. Cette observation fournit un premier indice : l'apparition des filaments dans le milieu interstellaire semblerait *précéder* la formation des étoiles.

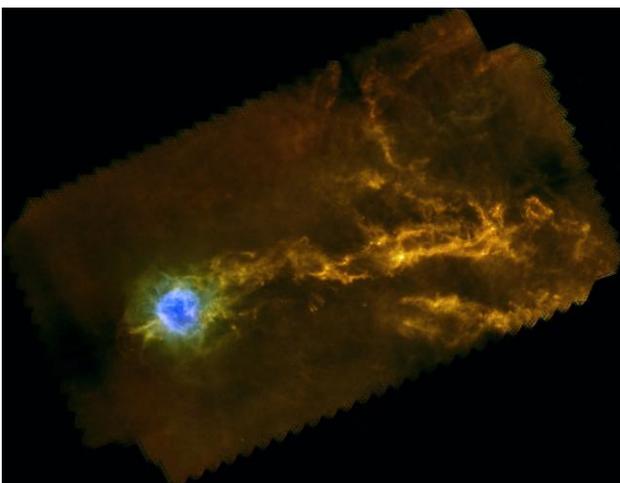


Figure 1 : (photo de gauche) Combinaison des images obtenues avec les caméras SPIRE et PACS d'Herschel. Les « fausses » couleurs correspondent aux différentes longueurs d'onde observées par le télescope (rouge = 500 μm ou micromètres, vert = 250 μm , et bleu = 70 μm). La zone bleue est une nébuleuse éclairée par une étoile massive, plus chaude que le reste du complexe. (photo de droite) Zoom qui montre la structure filamentaire qu'a permis d'observer Herschel. (Crédits: ESA/Herschel/SPIRE/PACS/ « Gould Belt survey » Key Programme)

Grâce au pouvoir de résolution spécifique du télescope Herschel, les astrophysiciens ont pu pour la première fois mesurer précisément les dimensions des filaments interstellaires. 90 filaments dans les trois nuages IC5146, Aquila et Polaris ont ainsi été passés au crible par les chercheurs. Chaque filament peut s'étendre sur des dizaines d'années lumière dans l'espace. La surprise est venue de la largeur uniforme de tous les filaments observés : les chercheurs ont constaté qu'ils s'étaient tous sur une bande de près de 0,3 années-lumière (Arzoumanian, D., Ph. André, Ph., Didelon, P. et al. 2011, *Astronomy & Astrophysics*). Considérée comme petite dans le milieu interstellaire, cette largeur correspond néanmoins à environ 20.000 fois la distance de la Terre au Soleil.

Ce résultat surprenant sur la largeur des filaments interstellaires fournit un deuxième indice quant à leur origine. Le diamètre uniforme de 0,3 années-lumière des filaments se rapproche en effet d'une autre échelle caractéristique connue depuis le début des années 80 dans le milieu interstellaire : l'échelle en dessous de laquelle les mouvements désordonnés qui correspondent à ce que l'on appelle la « turbulence interstellaire » deviennent plus lents que la vitesse du son. A partir de ce constat et d'une comparaison des observations avec plusieurs modèles théoriques, les astronomes de l'équipe du « relevé de la ceinture de Gould » ont pu conclure que les filaments observés avec Herschel sont probablement le résultat direct de la « turbulence interstellaire ».

Cette turbulence correspond à des mouvements de gaz désordonnés se propageant dans les nuages interstellaires. Elle est observée depuis les années 70 par les radioastronomes. Les chercheurs s'interrogent encore sur son origine; elle ferait suite aux explosions d'étoiles massives en fin de vie - ou supernovae - qui injectent une quantité énorme d'énergie dans le milieu interstellaire.

Les mouvements de gaz désordonnés qui en résultent ont lieu à des vitesses supersoniques³. A l'image du 'bang' d'un avion passant le mur du son, ils produiraient donc des chocs qui compriment la matière interstellaire, jusqu'à transformer celle-ci en des filaments plus denses que leur milieu environnant.

Lorsqu'on observe ces nuages interstellaires à grande échelle, les vitesses des turbulences interstellaires sont élevées, supersoniques. En revanche, si on cible les observations sur de petites régions interstellaires, les vitesses sont plus faibles, jusqu'à devenir inférieures au mur du son. La largeur observée des filaments correspond justement à l'échelle intermédiaire où les mouvements turbulents sont proches de la vitesse du son. Certains modèles théoriques prédisent d'ailleurs que l'épaisseur caractéristique des structures - telles que des filaments - comprimées par chocs dans les nuages interstellaires doit correspondre à l'échelle « sonique » de la turbulence. Couplé à l'observation d'une profusion de filaments dans des nuages ou cirrus très ténus comme Polaris où les forces de gravité ne peuvent pas être invoquées pour former la texture filamentaire, il s'agit là d'une indication très forte quant à la connexion entre la turbulence interstellaire et l'origine des filaments vus par Herschel.

³ Dans le milieu interstellaire froid (-260°C), la vitesse sonique est de l'ordre de 0,2 km/s – dans notre atmosphère, la vitesse sonique est de 0,34 km/s.

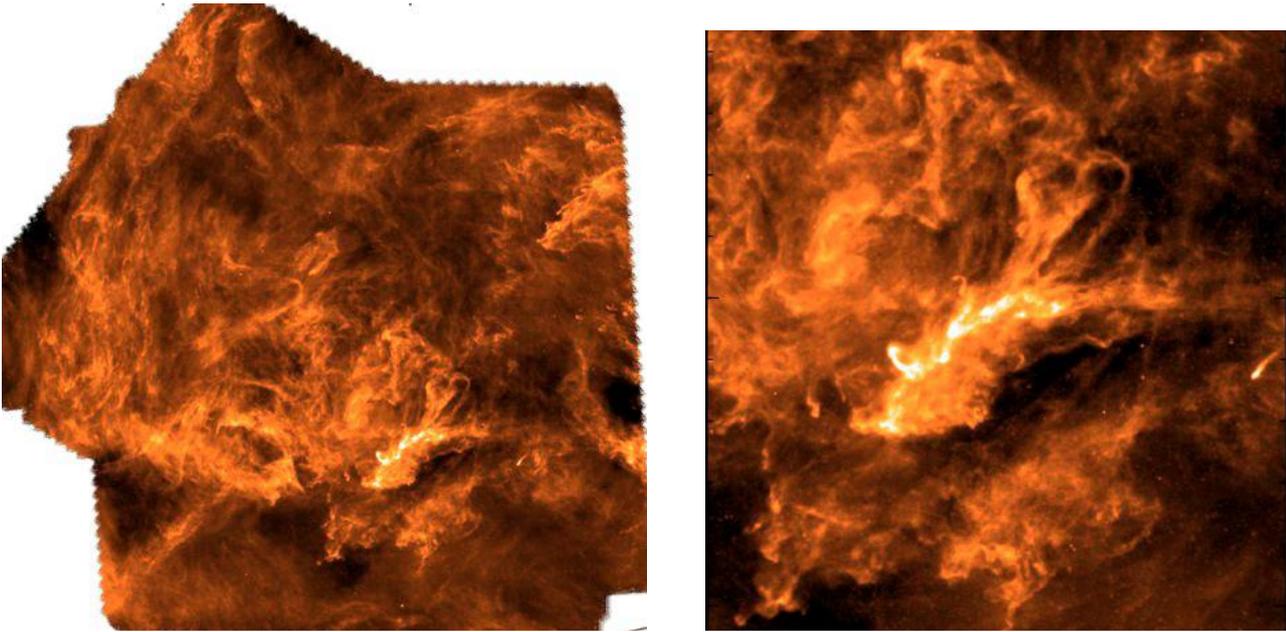


Figure 2 : (photo de gauche) Image obtenue avec la caméra SPIRE d'Herschel en direction du nuage interstellaire de Polaris qui ne montre aucune formation d'étoiles. (photo de droite) Zoom qui montre des détails de l'enchevêtrement de filaments observés avec Herschel. (Crédits: ESA/Herschel/SPIRE/« Gould Belt survey » & « Evolution of interstellar dust » Key Programme)

L'observation de proto-étoiles le long des filaments les plus denses

Le pouvoir de résolution d'Herschel a aussi permis aux astronomes d'établir, pour la première fois, un lien direct entre la texture filamentaire du milieu interstellaire et le mécanisme de formation de ce que l'on appelle les « cœurs pré-stellaires » (André, Ph., Menshchikov, A., Bontemps, S. et al. 2010, *Astronomy & Astrophysics*). Ces cœurs pré-stellaires sont des globules ou condensations de matière froide dans les nuages interstellaires qui sont sur le point de s'effondrer sur elles-mêmes sous l'effet de leur propre poids jusqu'à donner naissance à des embryons d'étoiles. Les embryons d'étoiles ou proto-étoiles grossissent ensuite et s'échauffent progressivement jusqu'à s'allumer en véritables étoiles comme notre Soleil. L'un des objectifs principaux du « relevé de la ceinture de Gould » avec Herschel consiste justement à obtenir un recensement complet des cœurs pré-stellaires et proto-étoiles dans les nuages interstellaires les plus proches afin d'étudier leur courbe démographique et d'essayer de mieux comprendre l'origine de la distribution en masse des étoiles.

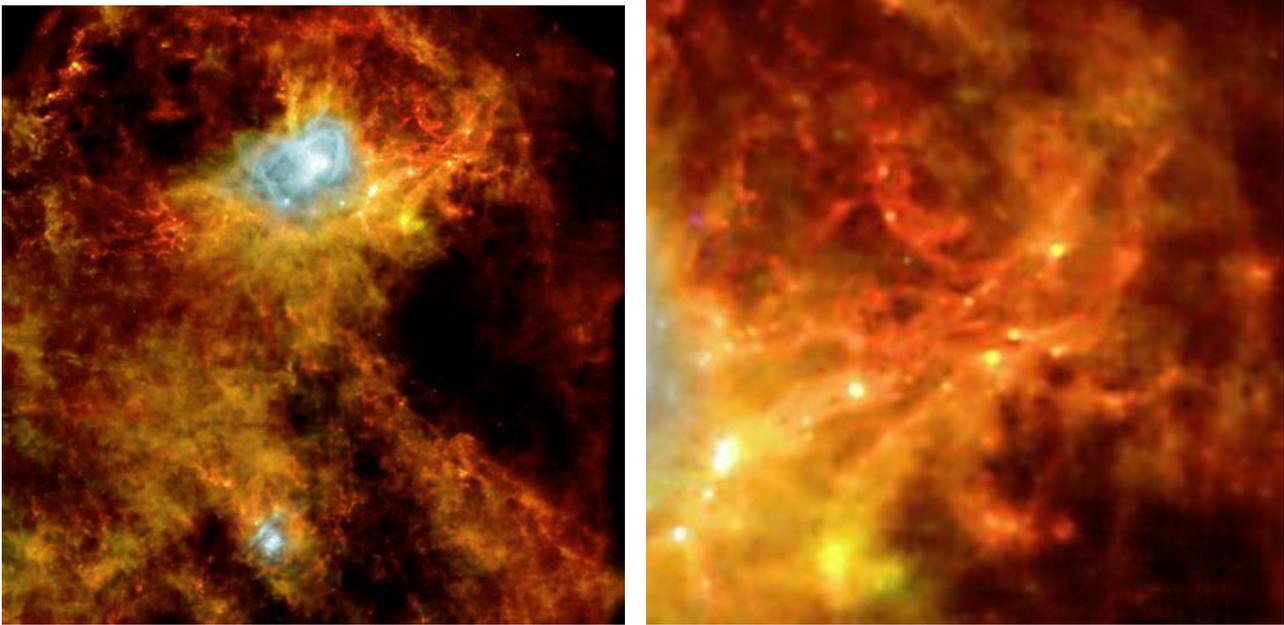


Figure 3 : (photo de gauche) Combinaison des images obtenues en direction du complexe d'Aquila avec les caméras PACS et SPIRE d'Herschel. Les « fausses » couleurs correspondent aux différentes longueurs d'onde observées par le télescope (rouge = 500 μm , vert = 160 μm , et bleu = 70 μm). La zone bleue est une nébuleuse éclairée par une étoile massive, plus chaude que le reste du complexe. (photo de droite) Zoom qui montre plusieurs globules pré-stellaires et proto-étoiles qui correspondent à des embryons d'étoiles. Ces points brillants en lumière submillimétrique ne sont pas des étoiles déjà allumées mais de simples condensations de gaz en train de s'effondrer sur elles-mêmes et de s'échauffer pour finir par former de véritables étoiles. (Crédits: ESA/Herschel/SPIRE/PACS/ « Gould Belt survey » Key Programme)

Dans le seul complexe d'Aquila, les images obtenues avec Herschel ont mis en évidence environ 500 cœurs pré-stellaires et 200 proto-étoiles (Könyves, V., André, Ph., Men'shchikov, A. et al. 2010, *Astronomy & Astrophysics* / Bontemps, S., André, Ph., Könyves, V. et al. 2010, *Astronomy & Astrophysics*). Les astronomes ont aussi constaté que la grande majorité de ces cœurs pré-stellaires et proto-étoiles sont distribués le long des filaments les plus denses du complexe, au-dessus d'un certain seuil critique en masse (figure 4) (ou plus précisément masse par unité de longueur des filaments). Ce seuil est d'environ 5 M_{Solaire} (ou masse-Solaire) par année lumière lorsqu'on l'exprime en masse par unité de longueur des filaments. Sur le plan théorique, il s'interprète simplement comme le seuil au-dessus duquel les filaments interstellaires deviennent gravitationnellement instables pour une température de gaz d'environ -260°C . Le même seuil est observé dans le complexe d'IC5146 qui contient également un grand nombre de cœurs pré-stellaires. De plus, dans le nuage de Polaris qui lui ne contient aucun cœur pré-stellaire et aucune proto-étoile, tous les filaments observés avec Herschel sont moins massifs que le seuil de 5 M_{Solaire} par année lumière. Les observations des trois complexes Aquila, IC5146 et Polaris montrent donc la turbulence interstellaire n'est pas suffisante en soi pour former des étoiles. Un ingrédient supplémentaire – la force de gravité – est nécessaire pour fragmenter les filaments les plus denses et conduire à la naissance de proto-étoiles dans les nuages interstellaires.

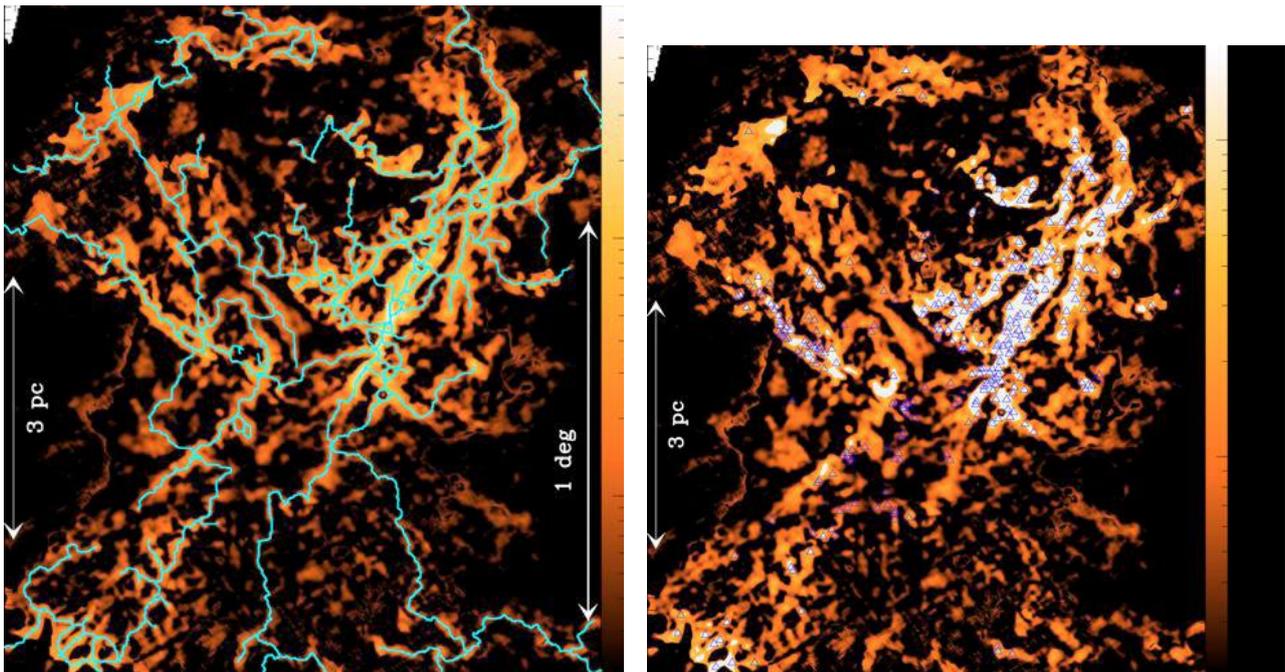


Figure 4 : (photo de gauche) Figure montrant le réseau de filaments identifiés par les astronomes dans le nuage interstellaire d'Aquila à partir des observations obtenues avec Herschel. Le contraste des filaments par rapport au reste du nuage a été accentué par traitement d'image. (photo de droite) Les positions des « cœurs préstellaires » identifiés grâce à Herschel sont indiquées par des triangles bleus sur la même image. Ces cœurs pré-stellaires sont situés principalement le long des filaments les plus massifs du complexe, indiqués en blanc sur l'image, au-dessus d'un seuil d'environ $5 M_{\text{Solaire}}$ par année lumière en masse par unité de longueur des filaments. (Crédits : Herschel « Gould Belt survey » Key Programme / Ph. André & D. Arzoumanian)

En recoupant les premiers résultats d'Herschel obtenus dans le cadre de l'étude systématique des nuages de la « ceinture de Gould » avec des modèles théoriques, les chercheurs ont ainsi pu proposer un scénario pour la formation des étoiles, comprenant deux étapes principales (André, Ph., Mouschikoff, A., Bontemps, S. et al. 2010, *Astronomy & Astrophysics*) :

- Dans un premier temps, les « turbulences interstellaires » engendrent un enchevêtrement complexe de filaments dans chaque nuage interstellaire;
- Puis, dans un deuxième temps, la gravité prend le dessus et fragmente les filaments les plus denses en « cœurs pré-stellaires », qui s'effondrent alors eux-mêmes rapidement en proto-étoiles et finalement étoiles.

Autrement dit, les filaments interstellaires et les cœurs pré-stellaires apparaissent comme les « briques de base » de la naissance des étoiles dans les nuages interstellaires. En particulier, la masse des filaments est identifiée comme le paramètre critique qui contrôle la formation des étoiles. Sous l'effet de la gravité, les plus denses des filaments se développeraient progressivement par accréation de matière, pour ensuite se fragmenter en globules individuels, qui finissent par former des étoiles. Les chercheurs estiment que cette étape critique de fragmentation des filaments en globules correspond à un seuil générique au-dessus duquel les filaments interstellaires sont gravitationnellement instables. De manière remarquable, ce seuil générique s'observe aussi à beaucoup plus grande échelle dans les galaxies. Il se pourrait donc que ces filaments interstellaires jouent un rôle « universel » pour comprendre les mécanismes qui régulent la formation d'étoiles dans toutes les galaxies.

Les observations déjà permises par Herschel vers les trois nuages proches d'Aquila, IC5146 et Polaris ne fournissent pas des preuves directes de ce scénario mais plutôt de très fortes présomptions. L'analyse complète des observations de la vingtaine de complexes de la « ceinture de Gould » avec Herschel ainsi que des observations complémentaires notamment avec des radiotélescopes au sol devront confirmer l'hypothèse des astrophysiciens. Complétés par des efforts de modélisation théorique, ces prochaines observations aideront également les astrophysiciens en vue d'affiner leur scénario sur le processus de formation des étoiles au sein des nuages interstellaires dans les galaxies.

Les « Piliers de la création » décodés par Herschel et la simulation numérique (Vincent Minier)

Les nébuleuses, régions du ciel formées d'énormes réservoirs de gaz interstellaires, regroupent en leur sein des milliers d'étoiles. Certaines jeunes, d'autres en train de naître. Grâce aux derniers observatoires spatiaux pour l'astronomie infrarouge et à l'aide de simulations numériques, les chercheurs sont capables d'appréhender les mystères associés aux cycles de naissance des étoiles. Le rayonnement UV des étoiles les plus massives interagit fortement avec leur environnement, découpe le bord du nuage en formes étonnantes qui seront les cocons des prochaines générations d'étoiles, et ce jusqu'à la consommation et la dispersion complète du gaz (Minier et al. 2009, *Astronomy & Astrophysics*). C'est toute une écologie stellaire qui se met en place pour des millions d'années. C'est dans ce type d'environnement que notre Soleil serait né.

Pourquoi recourir à l'écho métaphysique de l'expression « Piliers de la Création » pour décrire des objets à caractère scientifique ?

Baptiser des morphologies interstellaires par des noms animaliers ou minéraux est assez commun, mais effectuer des références métaphysiques comme l'ont fait les chercheurs qui ont analysé les données d'Hubble paraît plus surprenant. Il est clair que des étoiles sont fabriquées, en un sens, « créées » dans ces colonnes de gaz. Mais en astrophysique, on parle de formation stellaire et non de création stellaire. Avec l'expression des « piliers de la création », n'est-on pas implicitement dans la référence religieuse d'un créateur qui apparaît à son peuple dans des manifestations majestueuses et terrestres, telles les colonnes de nuée de l'Exode ? D'autres voient dans cette image esthétique fournie par le télescope Hubble l'expression d'un grand ouest américain illustré par les Falaises de la rivière du Colorado.



Figure 1 : Nébuleuse de l'Aigle : les « piliers de la création » vus dans le visible (photo de gauche/Crédit : NOAO) et dans l'infrarouge submillimétrique par Herschel (photo de droite/Crédits : HOBYS/HERSCHEL/ESA)

Les images d'Hubble et d'Herschel apportent des éclairages différents. La lumière infrarouge traverse toute la nébuleuse et éclaire ainsi l'anatomie des zones opaques.

En 1996, une étude publiée dans *Astronomical Journal* a ainsi rendu célèbre ces colonnes de gaz interstellaire à travers l'image des « Piliers de la création » prise par Hubble dans la Nébuleuse de l'Aigle (M-16), localisée à 7000 années lumières de la Terre. Les astrophysiciens émettent alors l'hypothèse que la formation d'une nouvelle génération d'étoiles s'effectue au sein de ces « piliers ». Malheureusement ils n'avaient aucun moyen de le vérifier pleinement. Hubble ne permettait de voir que la surface gazeuse et opaque de la colonne de gaz. Très peu de lumière et donc d'information pouvaient s'échapper de l'intérieur des piliers. Ceux-ci sont constitués de gaz mélangé avec 1% de poussière interstellaire qui possède la propriété d'absorber toute la lumière des étoiles.

Mais alors comment espérer détecter la formation des étoiles si elles sont si bien cachées ?

La poussière interstellaire, qui masque ces étoiles, est chauffée par leur lumière ultraviolette à des températures de quelques dizaines de kelvins (soit de l'ordre de - 230 °C). À ces températures, tout corps rayonne de la lumière, et donc émet des ondes dans le domaine infrarouge lointain et submillimétrique. Ce rayonnement traverse sans difficulté les nuages denses où naissent les étoiles (Motte et al. 2010, *Astronomy & Astrophysics*). Le satellite Spitzer permit déjà, en 2001, des mesures dans l'infrarouge, mais la taille réduite de son télescope n'offrait pas le bon pouvoir de résolution dans l'infrarouge lointain. Mais le satellite (Spitzer) n'allait pas jusqu'au domaine submillimétrique. Or c'est précisément ce domaine de rayonnement qui caractérise sans ambiguïté la naissance des étoiles.

C'est avec le lancement en mai 2009 de Herschel, le télescope spatial de l'Agence spatiale européenne (ESA), qu'une étude approfondie des « piliers » a pu être menée. Ce télescope spatial de 3,5 mètres de diamètre est dédié à l'observation du rayonnement infrarouge lointain et submillimétrique (de 60 à 670 micromètres). En captant le rayonnement infrarouge et submillimétrique qui est émis par l'intérieur des nuages interstellaires, les détecteurs du télescope ont pu offrir un regard profond et inédit sur les nébuleuses et sur ces fameux « piliers » (Schneider et al. 2010, *Astronomy & Astrophysics*).

Des programmes d'observation (HOBYS et Pillars), coordonnés par des chercheurs du Laboratoire AIM Paris-Saclay et du Service d'Astrophysique (SAp) du CEA/Irfu, s'intéressent de près aux nuages interstellaires géants et à la formation des étoiles massives en leurs seins. Les observations sont menées plus particulièrement à partir des trois instruments de détection localisés à bord d'Herschel : PACS, SPIRE et HIFI.

Analyse de la formation stellaire

Les clichés fournis par Herschel révèlent ainsi la structure interne des « piliers », leur contenu en étoiles naissantes et permettent de comprendre leur connexion avec l'anatomie « filamentaire » du nuage interstellaire dans lesquels ils sont localisés.

Des simulations numériques démontrent que l'ionisation⁴ du gaz dû au rayonnement UV crée ces « piliers » par compression et « pincement » de poches de gaz plus denses que la moyenne. La forme et la masse des « piliers » varient au cours du temps à l'échelle de centaines de milliers d'années. La simulation produit des « piliers » avec deux zones d'accumulation de la matière : une sorte de bouclier au sommet ; une densification à la base. Les deux zones sont reliées par un filet de gaz très diffus. Et c'est exactement ce qu'Herschel observe !

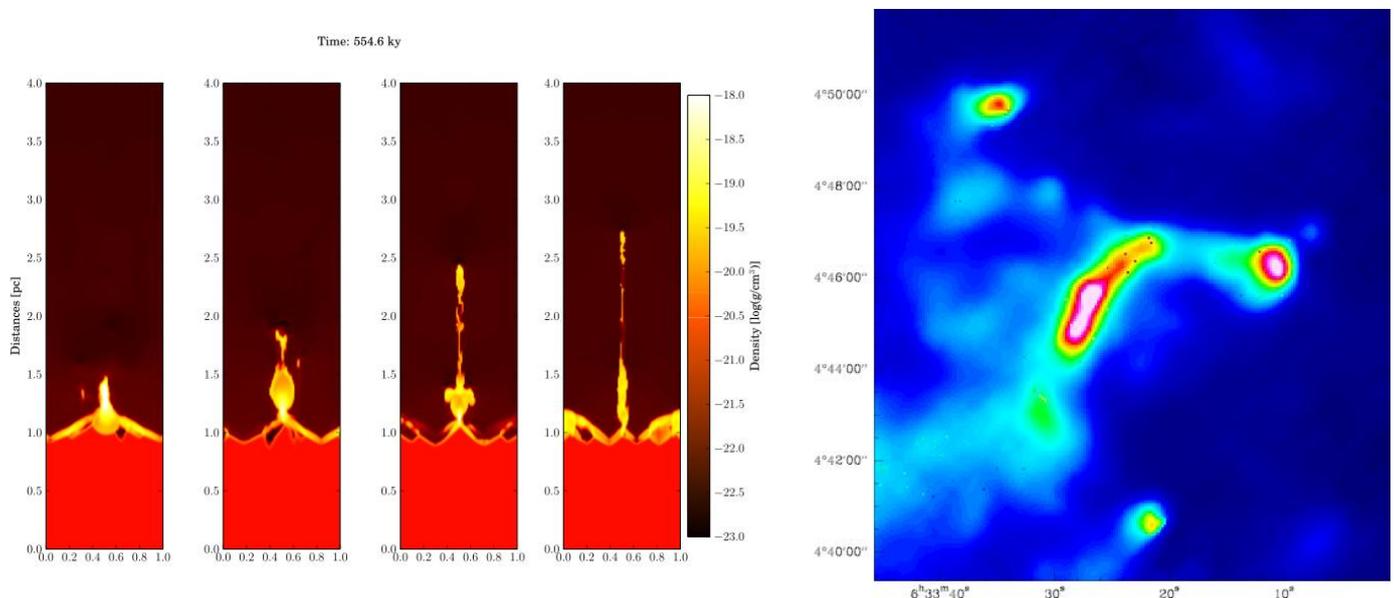


Figure 2 : Simulation numérique montrant la formation et la distribution de matière d'un pilier en fonction du temps sur une période de 500 000 ans (schéma de gauche/Tremblin, Audit, Minier et al. 2011, in préparation). Carte de densité d'un pilier de 9 années lumières⁵ de long dans la Rosette, produite grâce aux données d'Herschel. On observe dans les deux zones plus denses au sommet et à la base (schéma de droite/Schneider et al. 2010, *Astronomy & Astrophysics*).

⁴ Ionisation : un atome d'hydrogène est ionisé quand suffisamment d'énergie permet de lui arracher un électron. Le gaz neutre devient alors un plasma mélangeant essentiellement des protons et des électrons. La température est alors proche de 10 000°C ce qui induit une augmentation de la pression.

⁵ Dans ce cas, le nombre de 9 années lumières équivaut à environ 3 parsec

Plusieurs cartographies d'Herschel en 2010 et 2011 ont porté sur des régions du ciel qui produisent actuellement des étoiles géantes ou dites massives. Il s'agit entre autres des nébuleuses de la Rosette, du Cygne et de l'Aigle. Ces régions ne sont pas vierges d'étoiles déjà bien formées. Capter la première étape de la formation de la première étoile massive est donc illusoire. En réalité ces cartographies à champ large offrent la possibilité de dénicher de nouvelles poches de gaz « accouchant » d'étoiles, d'en mesurer leur masse et leur température, et de déterminer d'éventuelles relations de causalité entre l'activité des amas d'étoiles existant et la formation d'étoiles en cours. Les « piliers » n'échappent pas à cette quantification physique du gaz et de l'activité préstellaire en cours. Alors qu'on imaginait en 1995 ces piliers riches d'étoiles, la formation d'étoile y apparaît plutôt timide et limitée à des étoiles de petites tailles. Ce n'est donc pas dans ces piliers que de nouvelles étoiles massives se formeront, mais de nouveaux soleils s'y développeront sûrement.

Un nouveau programme d'observation avec Herschel (Pillars) et des programmes d'observations au sol vont s'attaquer à la cartographie du gaz moléculaire et atomique dans ces régions pour en déduire des informations sur les vitesses du gaz et les comparer aux simulations numériques réalisées (Tremblin, Audit, Minier et al. 2011, *en cours*⁶). Cette étude permettra d'associer chaque « pilier » à des conditions physiques différentes (température, vitesse, densité, taille, structure interne, masse...) et de décoder le mécanisme de formation. D'autres analyses en cours ont pour objectif d'élaborer une typologie des piliers (Minier, Tremblin, Schneider et al. 2011, *en cours*⁷) de manière à établir notamment s'il existe oui ou non un lien étroit entre ces « piliers » et les filaments interstellaire récemment observés grâce aux dernières images fournies par Herschel. Auquel cas il y aurait alors une véritable corrélation entre la naissance des étoiles, les filaments interstellaires et ces « piliers de la création ».

⁶ Tremblin, Audit, Minier et al. « Numerical simulation of pillar formation » 2011, in preparation

⁷ Minier, Tremblin, Schneider et al. « Typology of interstellar pillars as observed with Herschel », 2011, in preparation

Symphonie des étoiles : la sismologie révèle l'intérieur des astres (Rafael A. García)

La mesure des paramètres essentiels des étoiles comme leurs masses et leurs rayons est en général très difficile à réaliser avec précision. Des évaluations sont possibles à partir de la mesure de la luminosité et de la distance des astres mais les incertitudes associées sont importantes.

Grâce à des instruments récents datant de ces deux dernières années, en particulier les satellites CoRoT (Convection, Rotations et Transits planétaires, du CNES)⁸ et *Kepler* de la NASA, les astrophysiciens exploitent les mesures d'oscillations à la surface des étoiles, des petites vibrations périodiques qui se traduisent par de très faibles variations de luminosité. Leurs fréquences permettent non seulement de sonder l'intérieur des astres mais aussi de mesurer, en connaissant la température effective, leur masse et leur rayon, de façon totalement indépendante des autres méthodes connues jusque là (Chaplin, W.J., Kjeldsen, H., Christensen-Dalsgaard, J. et al. 2011, *Science*); c'est ce qu'on appelle la sismologie des étoiles ou sismologie stellaire.

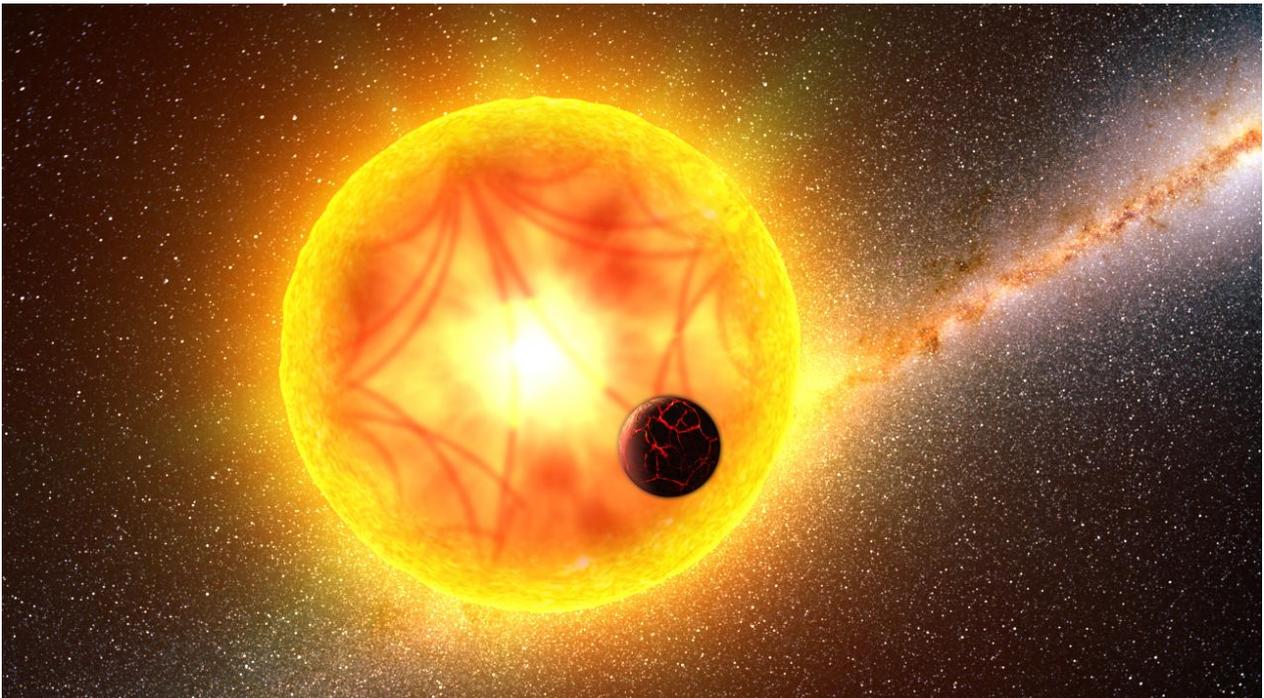


Figure 1 : Vision d'artiste d'une étoile de type solaire avec des modes d'oscillation se propageant en général de la surface vers l'intérieur La mission *Kepler* a pour objet l'étude et la caractérisation des exoplanètes. (Crédits: G. Pérez, IAC (SMM))

⁸ CoRoT a été développé et est exploité par l'Agence spatiale française (CNES) en lien avec ses partenaires nationaux (Observatoire de Paris et CNRS-INSU) et internationaux (Autriche, Allemagne, Belgique, Brésil, Espagne et l'Agence spatiale européenne)

Le Service d'Astrophysique (SAp) du CEA-Irfu participe actuellement à l'exploitation des données de sismologie stellaire du satellite français CoRoT ainsi que celles provenant de *la mission spatiale Kepler*.

Pour ses recherches en sismologie stellaire, le SAp bénéficie également de son expérience à partir de l'instrument GOLF, embarqué sur le satellite SOHO (1995) de l'Agence spatiale européenne. GOLF utilise un spectromètre à résonance pour exploiter les ondes internes pénétrant jusqu'au cœur du Soleil. De fait, l'expérience acquise dans l'étude du Soleil bénéficie largement à l'étude des étoiles par sismologie stellaire. Les télescopes spatiaux permettent d'observer les mêmes étoiles pendant plusieurs mois, voire plusieurs années, et d'enregistrer ainsi une multitude d'informations sur leur comportement.

Lancé en décembre 2006, CoRoT (Convection, Rotation et Transits planétaires) utilise la technique de la photométrie stellaire relative de haute précision. Ce télescope spatial ne fait donc pas d'imagerie ; sa fonction est d'enregistrer les variations lumineuses des objets célestes qu'il cible, des étoiles et surtout des exoplanètes, ces planètes qui orbitent autour d'une étoile mais en dehors du système solaire. Les techniques développées en sismologie pour le Soleil et d'autres étoiles sont également utilisées par le satellite *Kepler* de la NASA, lancé en 2009. L'objectif principal du satellite *Kepler* est de détecter la présence de planètes telluriques, telles que notre Terre, autour d'autres étoiles. Pour cela, il mesure en permanence, avec une grande précision, la luminosité des étoiles dans l'espoir de découvrir des diminutions périodiques, traces d'une "mini-éclipse" lorsqu'une planète passe devant son étoile. Cette surveillance permanente des variations de luminosité est exactement l'objectif que poursuivent aussi les spécialistes de la sismologie stellaire pour étudier les vibrations des étoiles. Les astrophysiciens du CEA/Irfu exploitent les données issues de Kepler *via* un consortium scientifique pour la sismologie stellaire (KASC, pour Kepler Asteroseismic Science Consortium), l'un des plus grands consortiums en astronomie, qui regroupe aujourd'hui près de 440 chercheurs du monde entier, avec une grande majorité européenne.

En effet, la sismologie stellaire est l'étude des vibrations dans les étoiles. Au SAp, les chercheurs s'intéressent plus particulièrement aux astres qui sont analogues au Soleil et qui sont dans notre voisinage. C'est le seul moyen que les astrophysiciens ont aujourd'hui à leur disposition pour percer les couches externes des étoiles et pouvoir sonder leur intérieur. Les informations obtenues permettent de contraindre les modèles numériques de la structure d'une étoile et de son évolution. Le satellite *Kepler* est donc devenu aussi un observatoire privilégié des étoiles.

La sismologie stellaire, une spécialité européenne

Lorsqu'il étudie le cœur des étoiles, l'astrophysicien rencontre un problème similaire à celui des géophysiciens quand ils veulent étudier l'intérieur de notre planète. Les sismologues «terrestres » utilisent les ondes sismiques qui traversent la Terre comme source d'informations sur sa structure interne. Ces ondes sismiques sont de même nature que les ondes sonores : elles se propagent en compressant puis décompressant tour à tour le milieu dans lequel elles évoluent. On parle d'ondes de pression, d'ondes acoustiques ou encore d'ondes sonores. Les ondes acoustiques stellaires sont aussi dénommées « ondes P ». Cependant, il n'y a pas de croûte solide à la surface des étoiles capable de craquer suite aux déformations engendrées par les séismes : la photosphère des étoiles, « de type solaire », oscille localement sous l'action des ondes qui s'y

réfléchissent. Ce sont ces oscillations de la photosphère qui sont détectées. Il y a un autre type d'ondes qui se propagent dans les couches les plus profondes de ces étoiles : les ondes de gravité. Elles sont similaires aux vagues sur la surface des océans et elles pénètrent plus profondément à l'intérieur des étoiles, pratiquement jusqu'au cœur.

Cette technique de sismologie est devenue une véritable spécialité européenne, grâce entre autres aux progrès réalisés à l'aide de l'instrument GOLF à bord du satellite européen SOHO et également grâce à l'utilisation du satellite français CoRoT en orbite depuis fin 2006.

Jusqu'au lancement de CoRoT, le nombre d'étoiles « de type solaire » analysées à l'aide de leurs oscillations était d'une dizaine. Aujourd'hui on les compte par dizaines de milliers.

Sonder les palpitations des étoiles

Grace à l'excellente qualité des données à disposition, le Service d'Astrophysique (SAp) du CEA/Irfu s'intéresse aux études de la rotation des étoiles (interne et de surface), à leur champ magnétique et aux cycles d'activité associés.

Les astrophysiciens ont observé l'année dernière, pour la première fois, le cycle d'activité magnétique dans une étoile en utilisant la technique de sismologie stellaire (García, R.A., Mathur, S., Salabert, D. et al. 2010, Science). L'étude de HD49933 par le satellite [CoRoT](#) a ainsi révélé un cycle d'activité magnétique, identique à celui observé dans le Soleil mais beaucoup plus court. Ce résultat ouvre la voie de l'étude, *via* la sismologie stellaire, de nombreuses étoiles afin de mieux comprendre les mécanismes responsables des cycles d'activité, celui du Soleil inclus. Ces travaux sont publiés dans la revue [Science](#) datée du 27 août 2010.

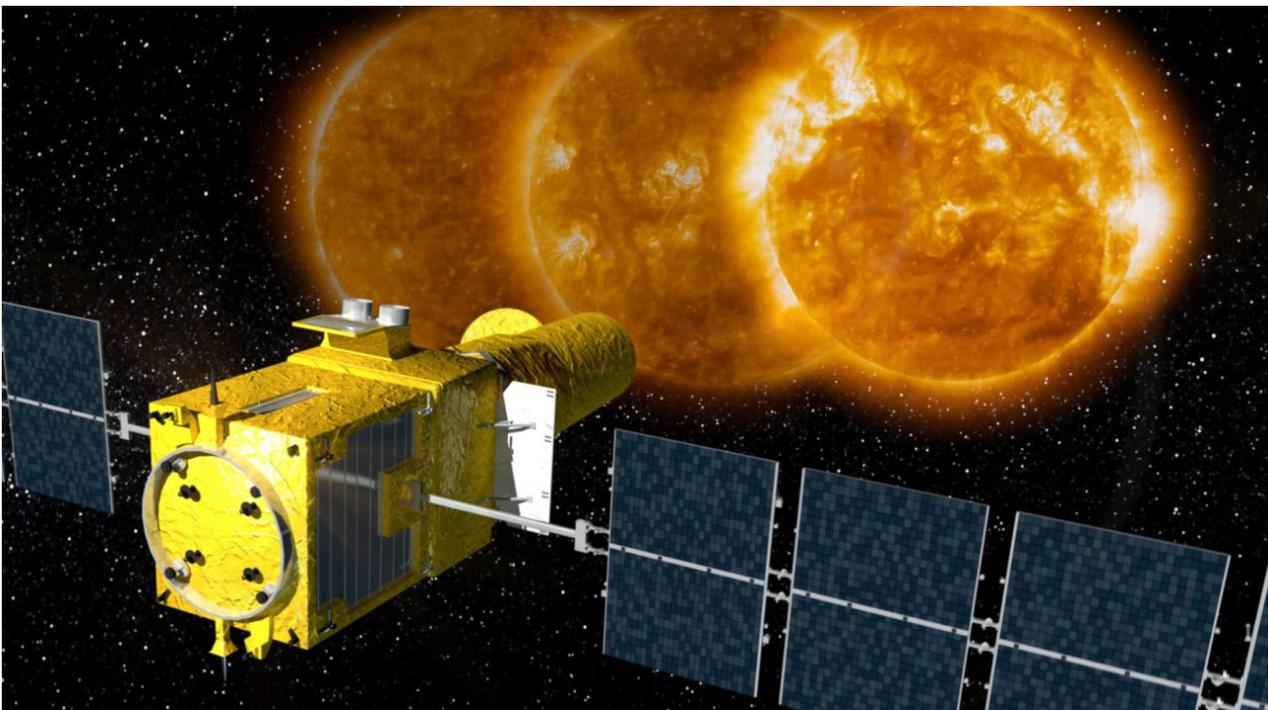


Figure 2 : Vue d'artiste du satellite CoRoT en regardant le changement d'activité d'une étoile (Crédits: G. Pérez, IAC (SMM))

Avec l'utilisation de la sismologie stellaire, l'étude d'un échantillon de 500 étoiles « de type solaire » observée pendant 1 mois par le satellite américain *Kepler*, a permis d'obtenir une mesure indirecte précise de leurs masses et de leurs rayons (Chaplin, W.J., Kjeldsen, H., Christensen-Dalsgaard, J. et al. 2011, *Science*). Cette analyse des ondes sonores qui se propagent à l'intérieur des étoiles a atteint une précision suffisante pour fournir ces paramètres essentiels qui jusqu'ici n'étaient connus qu'avec une grande approximation. Ces résultats ont été publiés dans la revue *Science* du 8 avril 2011.

Les observations effectuées par *Kepler* arrivent jusqu'au centre d'analyse des données sismiques KASOC au Danemark mais celles-ci ne sont pas complètement exploitables pour la sismologie stellaire. De ce fait, ces données sont alors envoyées au Service d'Astrophysique (SAp) du CEA/Irfu qui corrige certains effets instrumentaux en utilisant les mêmes procédures d'étalonnage développées pour l'instrument GOLF sur SOHO (García, R.A., Hekker, S., Stello, D. et al. 2011, *MNRAS*). Les données ainsi traitées sont alors à nouveau envoyées vers le KASOC et redistribuées à tous les chercheurs du monde. Les méthodes employées ont été publiées dans la revue *MNRAS*, 2011, In press.

De plus, une équipe internationale incluant l'équipe de sismologie au SAp a réussi à sonder, pour la première fois, le cœur de plusieurs centaines d'étoiles géantes rouges (Bedding, T.R., Mosser, B., Huber, D. et al. 2011 *Nature*).

Les géantes rouges représentent le stade avancé de l'évolution d'une étoile. C'est le stade qu'atteindra le Soleil dans environ 6 milliards d'années. Dans un premier temps, lorsque l'hydrogène, qui constitue le combustible principal de l'astre, est totalement brûlé au centre, les réactions nucléaires se déplacent vers les couches les plus externes. L'étoile se gonfle alors et devient géante et rouge car les régions les plus externes se refroidissent en se dilatant. Au même moment, les régions centrales sans source d'énergie se contractent. Dans un deuxième temps, lorsque le cœur de l'étoile devient suffisamment dense, c'est l'hélium qui peut entrer en fusion au centre.

L'accès aux couches les plus profondes de géantes rouges a été possible avec la détection des ondes dites mixtes, un mélange d'ondes acoustiques et d'ondes de gravité (Beck, P.G., Bedding, T.R., Mosser, B. et al. 2011, *Science*) Ces ondes mixtes ont une amplitude suffisante à la surface de l'étoile pour être mesurées et permettre néanmoins de sonder le cœur des étoiles.

Dans le large échantillon étudié ici, les astrophysiciens ont pu distinguer où se situaient les réactions de fusion nucléaire selon les cas : soit au cœur même de l'étoile, soit dans des couches plus externes. C'est une découverte majeure pour la compréhension des étoiles, car jusqu'ici rien ne permettait aux astronomes d'isoler ces stades qui correspondent à une étape différente de la vie d'une étoile. Les résultats sont publiés dans la revue (Bedding, T.R., Mosser, B., Huber, D. et al. 2011 *Nature* du 31 mars 2011.

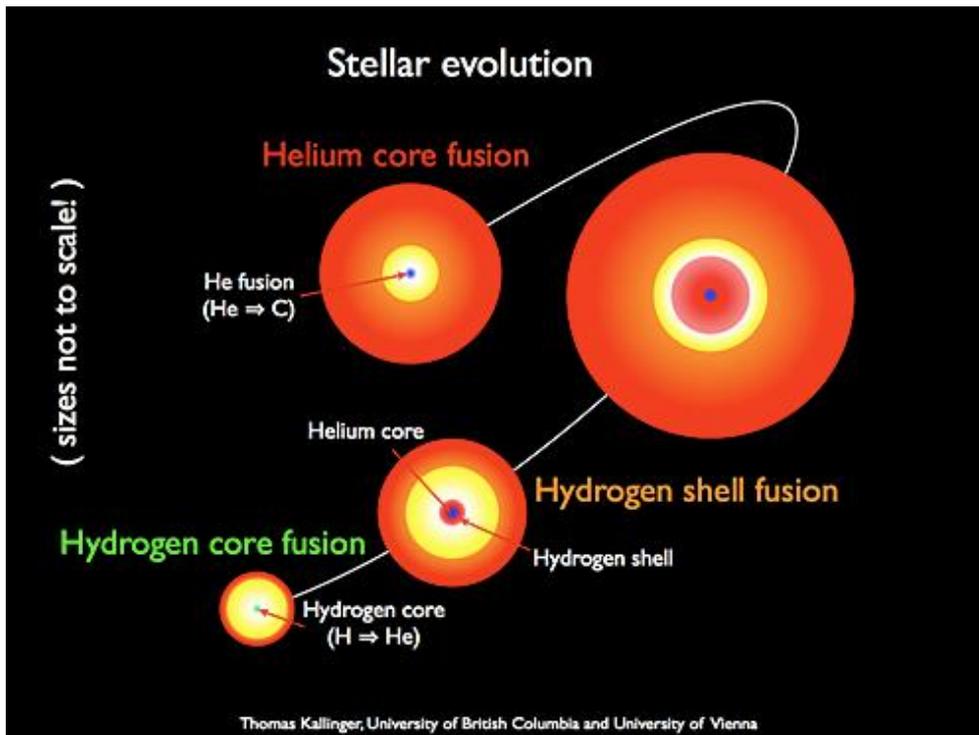


Figure 3 : Vue d'artiste de l'évolution d'une étoile « de type solaire » jusqu'à la phase de géante rouge. (Crédits : T. Kallinger, Université de British Columbia et Université de Vienne)

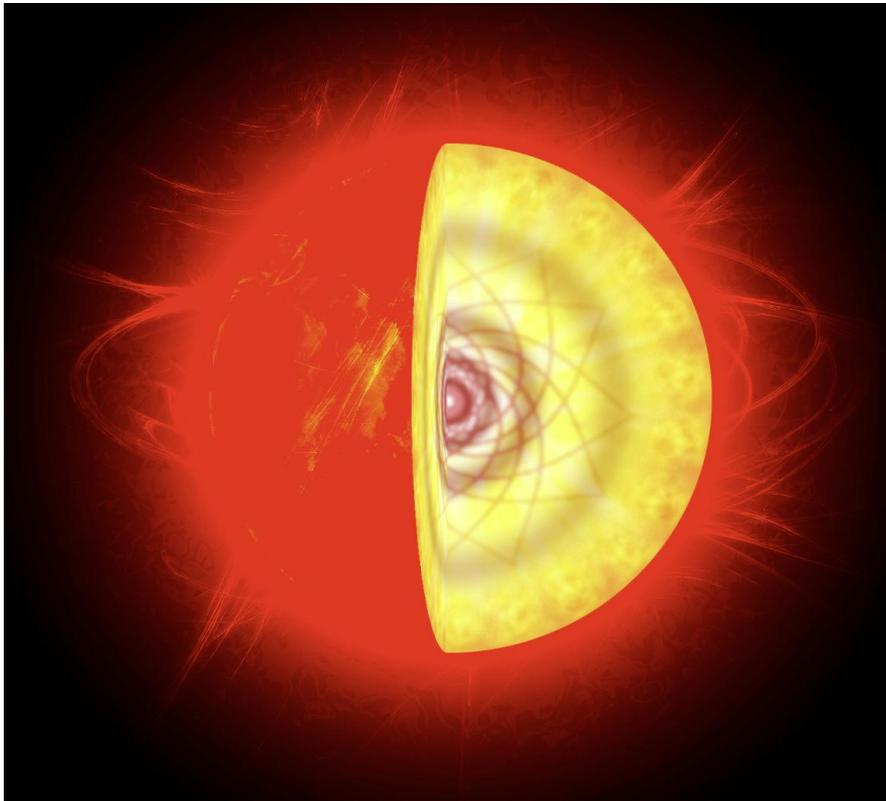


Figure 4 : Vue d'artiste d'une étoile géante rouge dans laquelle des modes de gravité se propagent dans les régions les plus profondes et jusqu'au cœur. (Crédits : R.A. García (SAp) et G. Pérez (IAC, SMM))

Le futur est prometteur. La prochaine étape, pour 2011, consistera à caractériser les périodes de rotation de ces étoiles pulsantes « de type solaire ». En effet, les chercheurs du Service Astrophysique (SAp) du CEA/Irfu dirigent la réalisation d'un premier catalogue rassemblant les étoiles qui tournent vite en surface, avec des périodes de moins de 10 jours pour les étoiles « de type solaire » (3 à 4 fois plus vite que le Soleil) et avec des périodes de moins de 30 à 50 jours pour des étoiles géantes rouges. Pour ces dernières, la théorie prédit des taux de rotation externes plus lents que pour le Soleil.

De plus, grâce à la qualité des données du satellite *Kepler*, il a été possible de déterminer la rotation différentielle en profondeur (les cœurs de ces étoiles tourneraient plus de 2 fois plus vite que la surface) dans plusieurs étoiles géantes rouges. Ce résultat constitue un point tournant dans l'étude des intérieurs stellaires et les cœurs car les chercheurs vont pouvoir imposer de nouvelles « contraintes » aux modélisations de transport de moments cinétiques et de mélange qui ont lieu dans ces étoiles.

Dès la fin de l'année 2011, le SAp espère achever la recherche des modes de gravité purs sur des étoiles analogues au Soleil. Cette recherche sous la direction du Service d'Astrophysique (SAp) du CEA/Irfu, devra permettre de mieux comprendre les processus physiques régnant dans les intérieurs et les cœurs des étoiles légèrement plus âgés que le Soleil.

Simuler le magnétisme et la dynamique non linéaire du Soleil et des étoiles (Sacha Allan Brun)

L'étude du Soleil et des étoiles, de leur structure, de leur composition chimique et de leur magnétohydrodynamique (MHD) est cruciale pour la compréhension globale de l'univers car elles en constituent les briques fondamentales. Le Soleil et les étoiles sont des objets cosmiques possédant une large variété de processus dynamiques allant de la convection turbulente, l'excitation d'ondes de tous types, au magnétisme intense de surface et à l'interaction avec leur environnement *via* des effets magnétiques, des vents de particules ou de marée. Leurs études donnent lieu à de multiples partenariats et programmes internationaux. Dans ce cadre, le projet ERC STARS2⁹ dont le Service d'Astrophysique (SAp) du CEA/Irfu est le principal investigateur a été sélectionné en 2007. Il a pour but d'étudier, par la simulation haute performance, la turbulence et le magnétisme du Soleil et des étoiles à l'aide des derniers super-ordinateurs les plus puissants en France (CCRT, GENCI), et en Europe (PRACE).

Etudier et comprendre le Soleil et les étoiles

Le projet STARS2 (Simulations de la Turbulence, de l'Activité et de la Rotation des étoiles et/ou du Soleil) associé au code ASH (Anelastic Spherical Harmonic), consiste en quelque sorte à comprendre et à modéliser la météorologie de la surface et de l'intérieur des étoiles, en se basant d'abord sur le Soleil, première référence pour la/en sismologie stellaire, afin de permettre aux chercheurs de calibrer leurs calculs pour l'étude des autres étoiles.

Le Soleil est une grosse boule de gaz chaud et ionisé (plasma) tournant sur lui-même en 28 jours environ. Pour les étoiles « de type solaire » les 30% les plus externes en rayon sont animés en permanence de mouvements convectifs. Ces mouvements, sous l'influence des forces de Coriolis et de Laplace, sont turbulents et chaotiques. Cependant un certain ordre existe dans ce chaos, tel que la rotation différentielle (en latitude) de la zone convective, la présence de flot méridien de l'équateur aux pôles et la présence d'un cycle magnétique de 11 ans. Il est donc nécessaire de comprendre comment le Soleil et les étoiles établissent de tels propriétés globales et quels sont les processus physiques à l'origine de ces phénomènes. D'une part, la surface du Soleil possède un aspect granuleux du aux mouvements convectifs turbulents qui se développent dans sa couche externe. Ils sont d'ailleurs responsables du transport de la chaleur et de la redistribution de moment cinétique vers sa surface. Ceci explique son profil particulier de rotation. D'autre part, la granulation apparente observée à la surface du Soleil génère des ondes acoustiques qui sont utilisées par les chercheurs pour analyser sa structure interne. Concernant le magnétisme c'est la présence d'un effet dit « dynamo¹⁰ », localisé dans et à la base de la zone convective, qui est à l'origine de la forte activité magnétique du Soleil. Celle-ci par son influence sur le vent solaire, les éjections de matière et l'apparition de taches à la surface, a une influence

⁹ L'ERC STARS2 www.stars2.eu fait partie des projets soutenus par le Conseil Européen de la Recherche (ERC). Créé en 2007 par l'Union européenne, c'est la première organisation européenne à soutenir des projets de recherche fondamentale sur le seul critère de l'excellence scientifique d'un chercheur et de la force innovante de son idée.

¹⁰ Correspond à la conversion d'énergie mécanique en énergie magnétique

directe sur la Terre, voir sur son climat, en modulant l'intensité du rayonnement dans les gammes UV et X du Soleil.

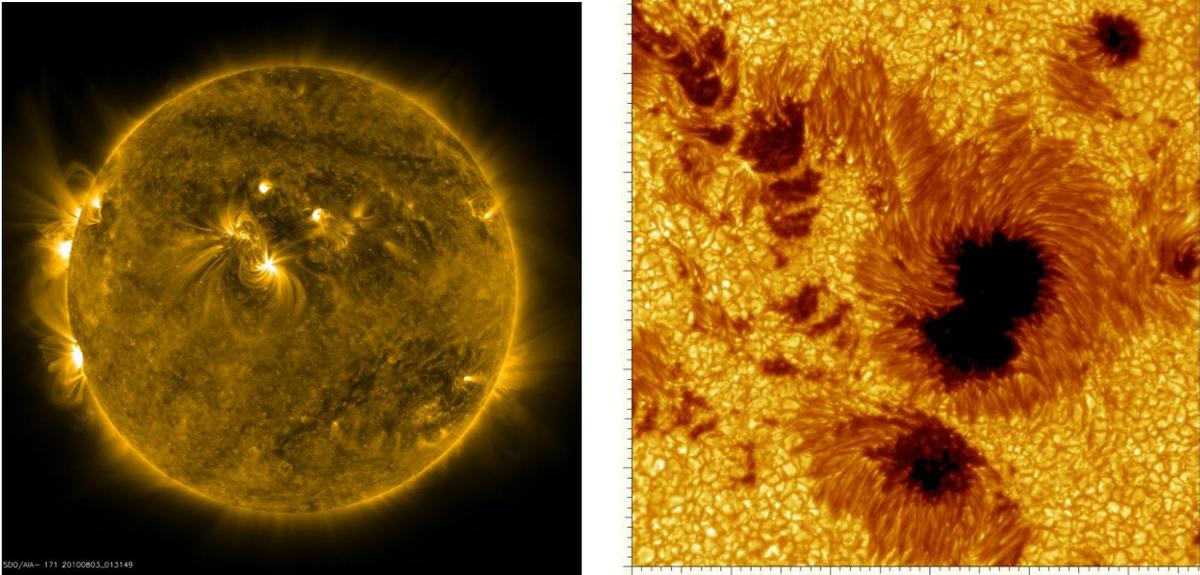


Figure 1 : (Photo de gauche) Observations globales et locales de la surface du Soleil (Crédit : NASA/SDO et SST 1m). (Photo de droite) L'aspect granuleux de la convection solaire est évident ainsi que l'existence de taches solaires. Un large intervalle d'échelles temporelles ou spatiales est clairement visible.

Pour mieux comprendre les interactions entre turbulence, convection, rotation et champ magnétique, les chercheurs du SAp effectuent alors des simulations numériques à l'aide de superordinateurs. Les performances de ces ordinateurs étant perpétuellement améliorées, la résolution utilisée par les codes hydrodynamiques modernes atteint aujourd'hui un maillage de 2000 km de côté et 700 km de profondeur. Ceci permet donc de s'approcher de plus en plus de l'échelle spatiale de la granulation de l'astre étudié. La figure ci-après représente un exemple de résultats de telles simulations numériques et montre à très petite échelle la convection à la surface des étoiles (Figure 2).

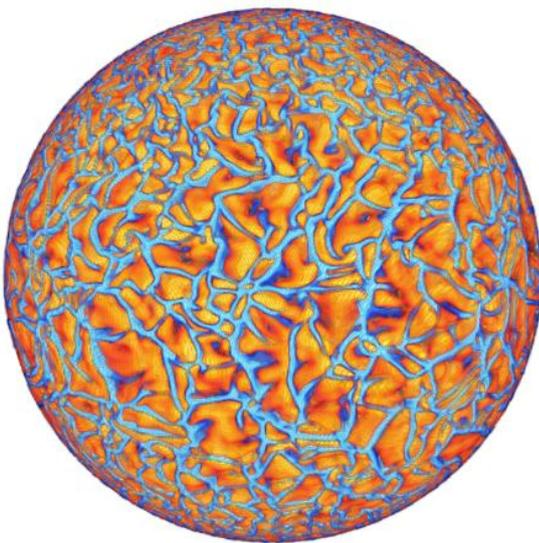


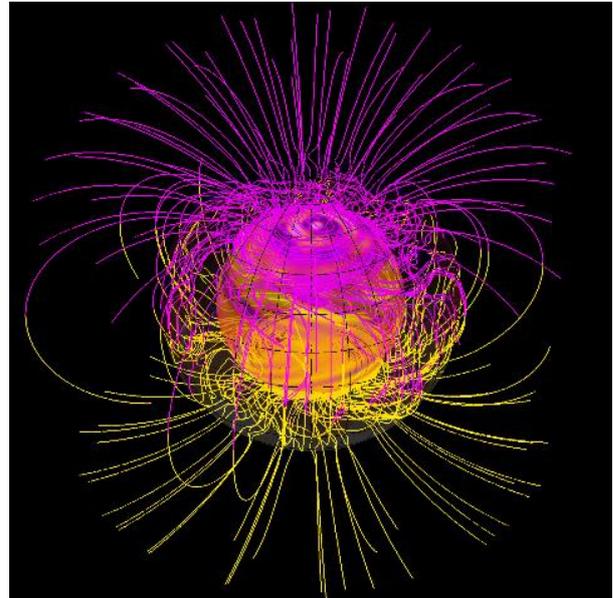
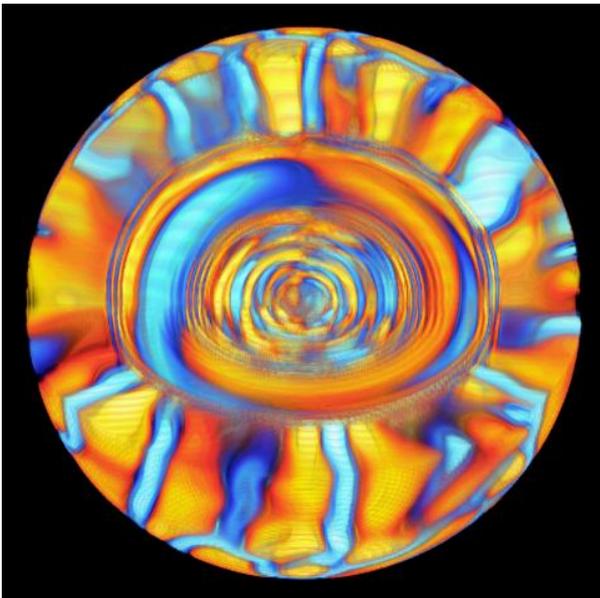
Figure 2 : Structure à très petite échelle de la convection à la surface des étoiles (Crédits : Bessolaz et Brun CEA/Irfu)

Modèles 3-D dépendant du temps, du Soleil et des étoiles

Pour la première fois, un modèle 3-D du Soleil, incluant le champ magnétique et la turbulence simule 90% du volume du Soleil, du cœur nucléaire jusqu'à la surface et permet de reproduire le couplage non linéaire entre son intérieur radiatif et son enveloppe convective.

Ce modèle met en évidence :

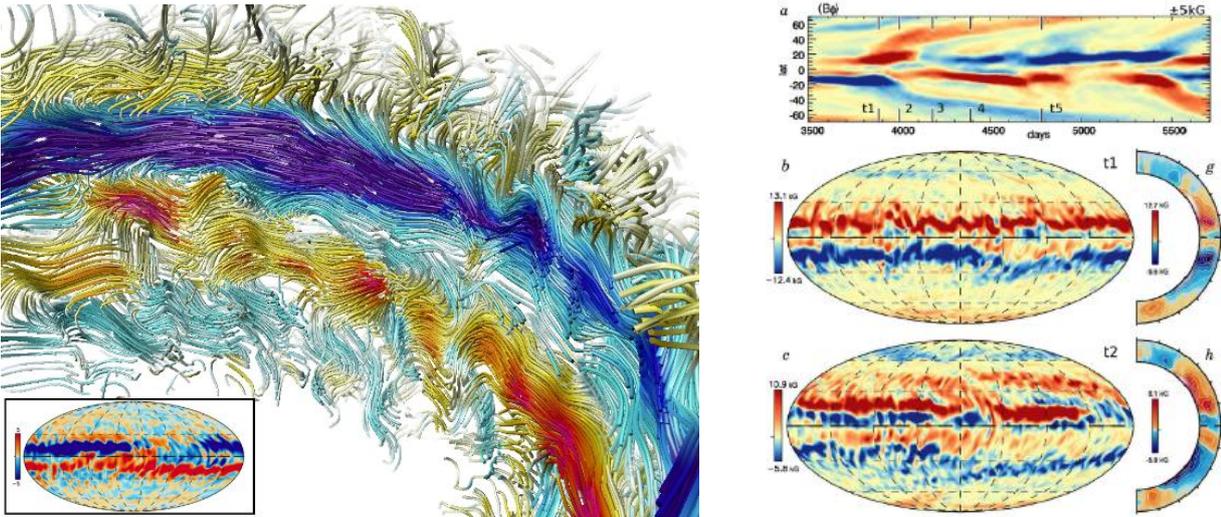
- le rôle clef du couplage thermique et mécanique entre les deux zones radiative-convective pour comprendre le profil de rotation différentielle de la surface du Soleil (Brun, Miesch, Toomre, 2011, ApJ) et la dynamique du Soleil en général, ainsi que l'excitation et la propagation tridimensionnelle des ondes internes de gravité (Figure 3)
- l'établissement de manière cohérente de la tachocline solaire, cette zone de fort cisaillement en vitesse à la base de la zone convective, où le champ magnétique s'organise sous forme de ruban intense à l'origine des taches solaires, ainsi que l'influence d'un champ fossile sur l'intérieur solaire (Strugarek et al. 2011, A&A ; Figure 4)



Figures 3 et 4 : (photo de gauche) Vue globale de la vitesse radiale dans une simulation complète du Soleil (Crédits : Brun CEA/Irfu). (photo de droite) Reconstruction du champ magnétique depuis le cœur jusqu'à la couronne solaire (Crédits : Strugarek et Brun CEA/Irfu)

Pour les étoiles jeunes, les premiers calculs hautes résolutions ont mis en avant :

- le rôle du taux de rotation de l'étoile pour créer des structures magnétiques intenses comme celles observées par spectropolarimétrie et l'existence de solutions dynamos cycliques possédant comme un diagramme papillon (Brown et al. 2011, ApJ ; Figures 5 et 6)
- la structure très petites échelles de la convection stellaire quelle que soit l'épaisseur de l'enveloppe convective de l'étoile jeune durant sa phase de formation, et la présence d'une forte rotation différentielle (en latitude) pour les enveloppes les plus profondes (Bessolaz & Brun 2011, ApJ).



Figures 5 et 6 : (photo de gauche) Structures magnétiques dans une simulation de Soleil jeune (Crédits : Brown et al. Université du Colorado). (photo de droite) Cycle magnétique dans ces simulations (Crédits : Brown et al. Université du Colorado)

Ces travaux permettent de faire le lien entre les phases jeunes de notre Soleil et ses propriétés actuelles, ils permettent de remonter le temps et d'ainsi retracer l'histoire de la rotation interne des étoiles et leur ralentissement au cours de l'évolution. C'est une toute première vision cohérente et tridimensionnelle de l'évolution stellaire et du magnétisme des étoiles. Par exemple, il est dorénavant possible grâce aux calculs des cycles magnétiques des étoiles par effet dynamo de regarder l'impact de ce cycle sur l'héliosphère¹¹ de l'étoile. Il est alors possible de calculer la perte de masse et de moment cinétique par les vents de particules ou effets de marées, extension des couronnes chaudes entourant les étoiles avec une enveloppe convective (Pinto et al. 2011 ; Figure 7).

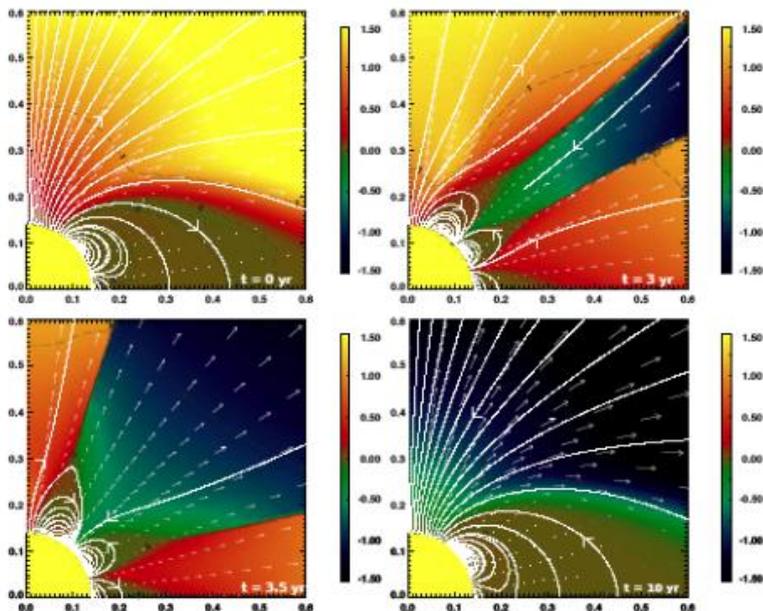


Figure 7 : Evolution du vent solaire au cœur du cycle de onze ans (Crédits : Pinto et Brun CEA/Irfu).

¹¹ Héliosphère : « cocon » magnétique qui entoure la plupart des étoiles

L'évolution des étoiles et leur influence sur les planètes (Stéphane Mathis)

Avec les lancements des missions spatiales CoRoT (le 27 décembre 2006), puis *Kepler* (le 7 mars 2009), auxquelles les équipes du Service d'Astrophysique (SAP) du CEA/Irfu participent activement pour l'exploitation scientifique avec leurs partenaires nationaux et internationaux¹², la physique des étoiles et de leur environnement a franchi un pas important grâce à la sismologie. En effet, comme dans le cas de la sismologie terrestre, la sismologie stellaire, autrement dit l'étude des vibrations des étoiles, est la seule technique permettant de caractériser de manière directe leurs propriétés internes et d'en déduire l'âge, la masse, le rayon, le stade évolutif, la rotation et l'activité magnétique des étoiles considérées. Cette exploration spatiale s'accompagne aussi de l'utilisation d'autres techniques telles que la spectropolarimétrie, la spectrométrie et l'interférométrie aux foyers des grands télescopes au sol. Ces techniques permettent d'étudier la distribution du champ magnétique, les caractéristiques chimiques de surface et la forme des étoiles, manifestations de leur dynamique interne. Cette nouvelle vision des étoiles donne aujourd'hui la possibilité à la communauté astrophysique de mieux comprendre la multitude des nouveaux systèmes planétaires récemment découverts par CoRoT et *Kepler*, car leurs propriétés sont gouvernées par des interactions avec leur étoile, similaires aux effets de marées bien connus sur Terre.

Simulation et modélisation théorique

Les activités de recherche des équipes du Service d'Astrophysique (SAP) CEA/Irfu sont spécialisées dans la modélisation et la simulation de la structure, de la dynamique et de l'évolution des étoiles et de leur environnement. Ainsi, en se basant sur leur expérience de la modélisation théorique et de la simulation de l'hydrodynamique interne des étoiles et de leur magnétisme, ces équipes au sein de collaborations internationales se situent en bonne position pour apporter une compréhension approfondie des propriétés des systèmes observés depuis l'espace et depuis le sol.

Comprendre les mouvements internes des étoiles

Dans ce contexte, la première étape du travail de modélisation a été d'étudier l'évolution hydrodynamique de la rotation interne des étoiles tout au long de leur évolution, depuis leur naissance jusqu'à leurs stades évolutifs finaux. Cette rotation influe sur leur structure, leur temps de vie, et de nombreuses autres propriétés telles que l'abondance des éléments chimiques à leur surface. Une fois modifiées, ces propriétés vont ensuite perturber l'enrichissement du milieu interstellaire, source des futures générations d'étoiles et des systèmes planétaires associés. Les

¹² Les équipes du CEA sont associées pour ces études à l'Observatoire de Paris (Laboratoire d'Etudes Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique, Laboratoire de l'Univers et de ses Théories, Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides, Laboratoire Système de Référence Temps Espace), à l'Observatoire de l'Université de Genève, au Laboratoire Univers et Particules de l'Université de Montpellier, à l'Institut d'Astronomie et d'Astrophysique de l'Université Libre de Bruxelles, à l'Université de Montréal, à l'Argelander Institut de l'Université de Bonn et aux consortiums KASC (*Kepler* Asteroseismic Consortium) et MiMeS (Magnetism in Massive Stars).

équipes du SAp ont ainsi participé de manière active à l'amélioration de la compréhension des processus de transport hydrodynamiques à l'intérieur de l'étoile, mouvements qui modifient la rotation interne des étoiles sur les longues échelles de temps. Il a été ainsi montré l'influence des écoulements à grande échelle dans les régions radiatives des étoiles où le transport de l'énergie est assuré par le rayonnement et la turbulence induite par le cisaillement des couches fluides (Decressin, Mathis et al. 2009).

Cependant, les observations sismiques de notre Soleil avec l'instrument GOLF, localisé à bord de SOHO, et pour lequel le Service d'Astrophysique (SAp) du CEA/Irfu a été l'un des contributeurs principaux, montrent que ces mécanismes seuls ne suffisent pas à expliquer la rotation du cœur radiatif solaire. C'est pour cette raison, que les chercheurs s'intéressent maintenant au transport induit par des oscillations internes dénommées « ondes de gravité » qui sont excitées à la base des couches externes dites convectives des étoiles « de type solaire » et qui se propagent dans leurs régions internes dites radiatives. Sur Terre, des phénomènes semblables sont observés dans l'atmosphère et dans les océans. L'impact sur la rotation interne des étoiles d'un possible champ magnétique dit « fossile », qui aurait été piégé lors de la naissance des étoiles, a aussi été considéré.

Concernant les ondes de gravité, dont la dynamique est conduite par la force de rappel d'Archimède et l'accélération de Coriolis, le SAp a tout d'abord analysé leur impact sur la rotation et de la rétroaction de celle-ci sur la propagation et l'excitation des ondes (Mathis et al. 2008; Mathis 2009). Ensuite, pour les champs magnétiques fossiles, les recherches menées par les astrophysiciens permettent de mieux comprendre leur géométrie et leur stabilité (Duez & Mathis 2010 ; Duez, Braithwaite & Mathis 2011) ainsi que leur action directe sur la rotation sur les grandes échelles de temps (voir aussi la contribution de Sacha Brun dans ce dossier). Enfin, l'étude de l'impact du champ magnétique sur la propagation des ondes de gravité et leur action a été entreprise (Mathis & de Brye 2011).

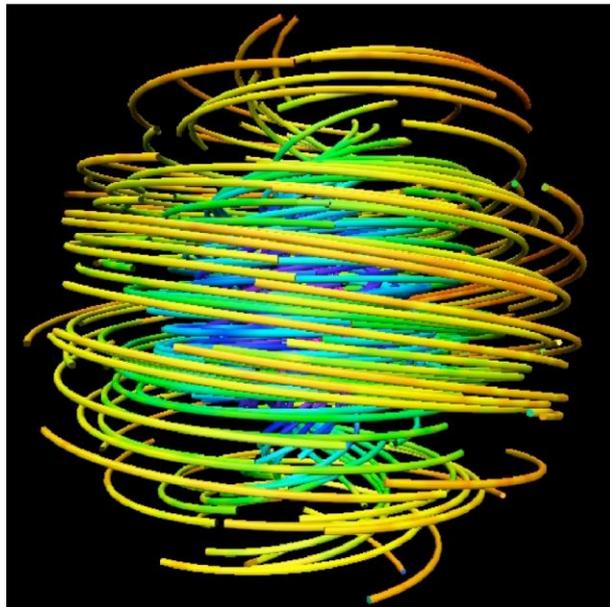


Figure 1 : Reconstitution de la configuration torsadée du champ magnétique fossile dans une région non convective d'une étoile (Crédits : The Astrophysical Journal).

Le travail de modélisation du Service d'Astrophysique du CEA/Irfu allie théorie et simulations numériques pour le traitement des différentes échelles de temps de l'évolution des étoiles. L'objectif est aujourd'hui de construire des modèles de plus en plus raffinés de leur dynamique interne, modèles qui sont maintenant fortement « contraints » par les observations de plus en plus riches que les astrophysiciens obtiennent depuis l'espace et le sol. Cependant, comme nous le voyons dans le cas de notre Soleil, les étoiles ne sont pas des objets isolés et c'est la raison pour laquelle il devient essentiel de comprendre également leur interaction avec l'environnement proche et notamment leur impact sur les planètes.

Décrypter les effets de marées des étoiles

Parmi les interactions des étoiles avec leur environnement, la première est l'interaction gravitationnelle de marée qui va être un des acteurs principaux de la structuration des systèmes planétaires qui entourent les étoiles. Ces marées vont influencer l'orbite des planètes, et donc leur possible position dans une région dite d'habitabilité, où les conditions sont favorables pour la vie. Mais elles vont aussi affecter l'inclinaison de leur axe de rotation et également leur rotation interne qui permet de générer un potentiel champ magnétique à l'origine d'une magnétosphère protectrice¹³. Les effets de marées entre les étoiles et leur cortège planétaire induisent des vitesses au sein des corps célestes. Du fait de la friction interne dans chacun d'entre eux l'énergie cinétique est alors convertie en chaleur. C'est cette dissipation qui va par exemple conduire à la synchronisation¹⁴ des astres avec leur mouvement orbital comme dans le cas de la Lune. Elle constitue un acteur majeur pour l'évolution des systèmes planétaires. C'est à la compréhension de ces mécanismes de dissipation essentiels que participent activement les chercheurs du SAP en calculant les champs de vitesses de marées dans les régions fluides (étoiles et planètes gazeuses) mais aussi rocheuses (planètes telluriques) des corps célestes. L'objectif est de construire les premiers modèles complets de la dissipation de marées dans les intérieurs stellaires et planétaires (Rémus, Mathis & Zahn 2011). Pour tester ces modélisations, les astrophysiciens ont étudié par exemple les manifestations de la dissipation des marées dans notre propre système solaire, Pour la première fois, leur importance dans la structuration du système des satellites de Saturne¹⁵ a été mise en évidence (Charnoz et al. 2011).

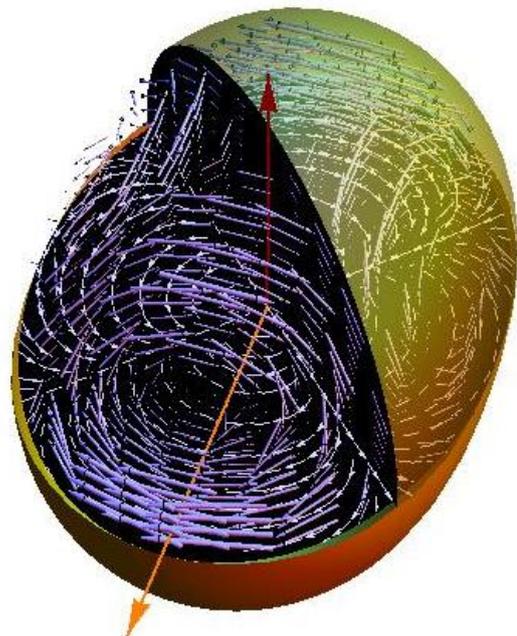


Figure 2 : Champ de vitesse de marée provoqué par une planète à l'intérieur une étoile telle que notre Soleil (Crédits : Rémus, Mathis & Zahn).

¹³ La magnétosphère est la région entourant un objet céleste dans laquelle les phénomènes physiques sont dominés ou organisés par son champ magnétique.

¹⁴ Synchronisation : lorsque la vitesse de rotation propre du corps est égale à sa période de révolution orbitale

L'objectif à terme est de reproduire le plus fidèlement l'interaction « étoile – planète » en couplant ces modèles d'interactions gravitationnelles avec les modèles d'interaction du champ magnétique (comme pour les relations Soleil – Terre; voir la contribution de Sacha Brun dans ce dossier) pour obtenir une vision intégrée des systèmes planétaires et de leur évolution. Ces études s'inscrivent notamment dans la perspective du projet PLATO (pour PLANetary Transits and Oscillations of stars), une mission spatiale en cours de sélection par l'Agence spatiale Européenne (ESA) pour un lancement après 2017, projet conduit par l'Observatoire de Paris auquel collabore activement le CEA.

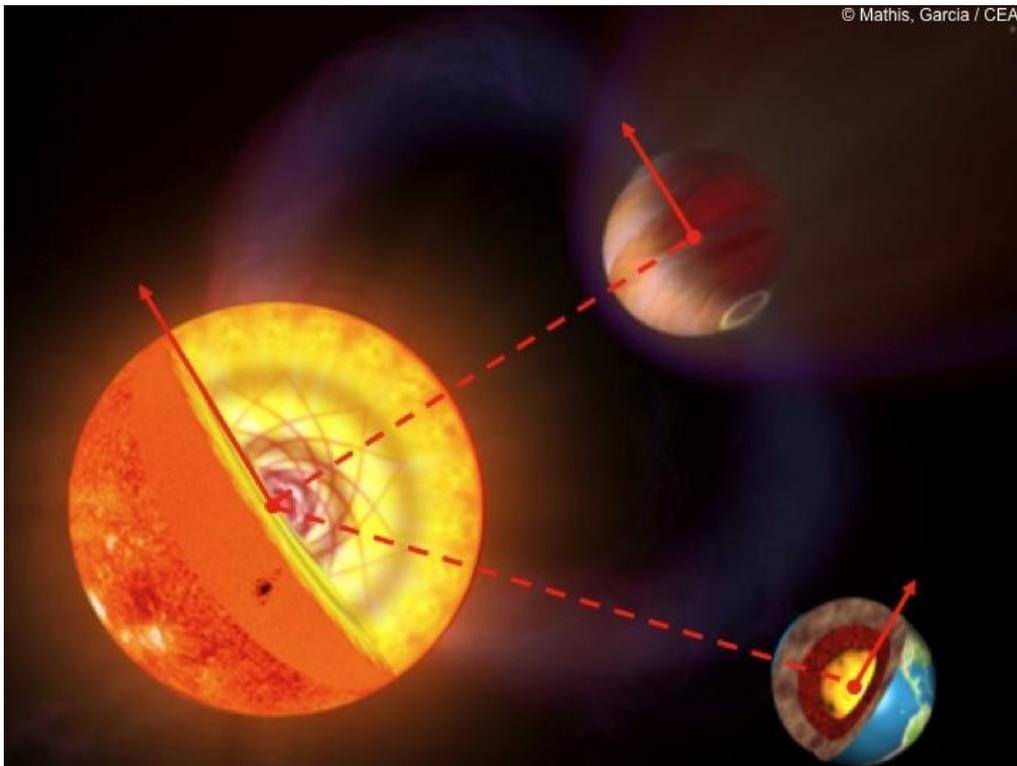


Figure 3 : Interactions dans un système planétaire entre l'étoile centrale et les planètes. L'écorché de l'étoile de type solaire montre la région convective externe et les ondes internes se propageant dans le cœur radiatif. L'écorché de la planète de type terrestre montre les différentes régions fluides et rocheuses où prend place la dissipation des marées.

CONTACT Service d'Astrophysique (SAp) du CEA/Irfu

Jean-Marc BONNET-BIDAUD Tél. : 01 69 08 92 59 - bonnetbidaud@cea.fr