

Proto-Jupiter immergé dans son disque protoplanétaire. La protoplanète excite un sillage spiral à un bras, et creuse un sillon autour de son orbite. Après l'instrumentation et l'observation, la simulation est la troisième voie de recherche en astrophysique. L'objectif du programme Coast est de modéliser des phénomènes astrophysiques complexes, afin de confirmer les théories actuelles sur la physique des astres et de préparer les futures observations astronomiques. Les principales études qui ont bénéficié de ce programme sont la cosmologie, la physique stellaire, l'étude des disques protoplanétaires et celle du milieu interstellaire. Disques protoplanétaires : les codes Fargo (2D) et Jupiter (3D) décrivent, sur une grille, l'évolution du gaz constituant la nébuleuse protoplanétaire.

F.Masset/CEA

II. DES OUTILS POUR SONDER L'UNIVERS

Comment expliquer la répartition des étoiles selon leur masse ? Comment meurent les galaxies ? Quelle est l'origine de l'accélération de l'expansion de l'Univers ? Pour tenter de résoudre ces questions, les astrophysiciens développent une nouvelle génération de télescopes révolutionnaires capables d'observer plus loin, plus précisément et de façon plus large que leurs prédécesseurs. Ces télescopes, installés au sol ou dans l'espace, collecteront la lumière qui sera analysée, dans ses plus infimes détails, par des instruments à la pointe de la technologie de détection. Capables de produire des images d'une grande finesse, tout en développant de remarquables capacités spectrométriques, ces instruments très sophistiqués, appelés « spectro-imageurs », figurent parmi les domaines d'excellence du CEA.

Leur mission ? Recueillir les informations émises par les sources cosmiques afin de les convertir sous forme de signaux numériques qui feront l'objet de différentes méthodes de traitement de l'information. Celles-ci connaissent aujourd'hui des développements véritablement spectaculaires. Ensuite, il appartiendra aux astrophysiciens d'en analyser les résultats. Pour y parvenir, ces chercheurs recourent à des simulations numériques de l'Univers, et de ses objets, réalisées par des supercalculateurs massivement parallèles.

Ainsi, l'ancestral dyptique scientifique « théorie/observation » s'est-il enrichi d'un nouvel outil – la simulation numérique – venu faire lien entre des modèles théoriques toujours plus complexes et l'indispensable observation. Des résultats de ces travaux, les chercheurs attendent la confirmation, ou l'invalidation, de leurs connaissances actuelles sur l'Univers.

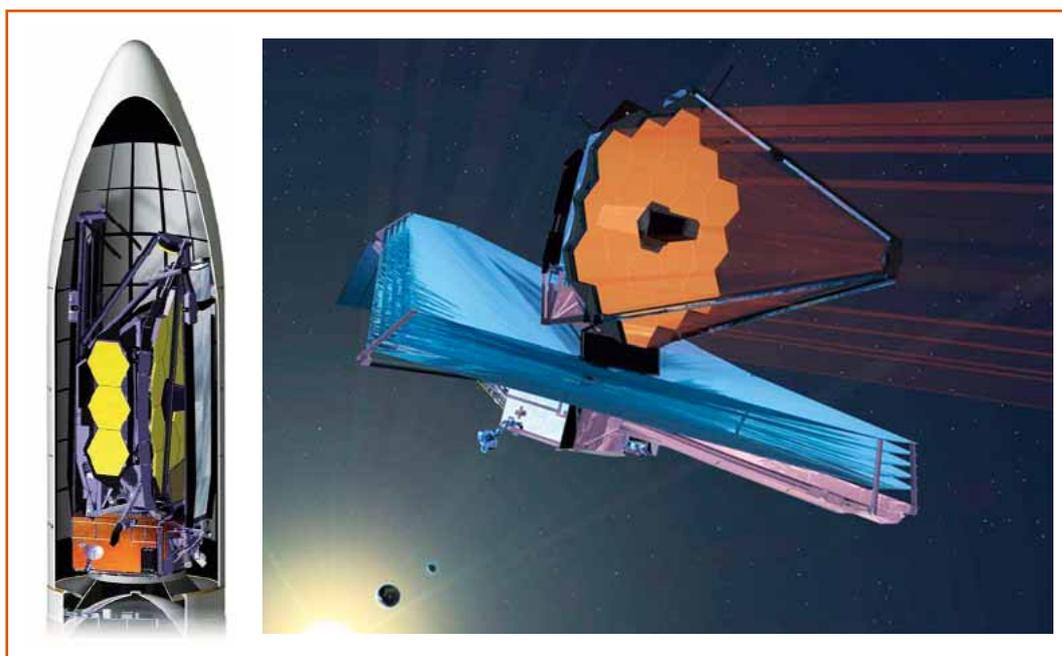
Les télescopes du futur

Même si les astrophysiciens ont complètement renouvelé notre connaissance du système solaire, même s'ils ont décelé quelque 400 exoplanètes, même si l'expansion de l'Univers est bien établie par l'observation, même si les télescopes parviennent à scruter presque jusqu'aux confins de l'Univers, là où naquirent les premières étoiles et galaxies...

Il n'empêche que **de grandes questions demeurent et que de nouvelles se posent comme celle de l'origine de la ré-accélération actuelle de l'expansion de l'Univers qui reste un grand mystère**. D'où la naissance d'une nouvelle génération de télescopes capables d'observer le cosmos plus loin, plus précisément, de façon plus large.

1. Voir plus loin

JWST : regard sur un passé de treize milliards d'années



Vue d'artiste du JWST replié dans la coiffe de la fusée Ariane 5 (image de gauche) et déployé dans l'espace (image de droite) où l'on peut voir, outre le miroir primaire (en doré), les écrans thermiques (en bleu) qui empêchent les rayons du Soleil de venir chauffer le télescope.

Aujourd'hui encore, le télescope spatial Hubble (HST) demeure un des plus fabuleux observatoires à l'origine d'un nombre impressionnant de découvertes. Néanmoins, avec un télescope dont le diamètre n'excède pas 2,4 mètres, il ne peut détecter la faible lueur reçue des objets cosmiques les plus lointains. Y parvenir nécessiterait la conception et la construction d'un télescope d'une surface collectrice plus importante, capable d'observer la **lumière infrarouge (IR)** – la **lumière visible** émise par un objet très lointain dans un Univers en expansion étant décalée vers l'infrarouge pour l'observateur. Ainsi naquit l'idée du télescope spatial *James Webb* (JWST)⁽¹⁾ pour succéder au HST. Grâce à son miroir de 6,5 mètres de diamètre, le nouveau télescope

pourra observer l'Univers tel qu'il existait il y a 13 milliards d'années, époque de la formation des premières **étoiles**.

Il s'agit d'un programme de la **NASA** avec des participations européenne et canadienne. En partenariat avec le **Cnes**, le CEA, à travers le Service d'astrophysique (SAp) de l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu), assumera deux responsabilités importantes : d'abord, le pilotage de la contribution française à MIRI (pour *Mid Infrared Instrument*), l'un des quatre instruments embarqués par JWST et dédié à l'observation du **rayonnement**

(1) Ainsi nommé en hommage au second administrateur de la NASA, James E. Webb.

infrarouge cosmique dans la gamme de longueurs d'onde 5-28 micromètres ; ensuite, la responsabilité du futur Centre d'expertise français consacré à l'analyse des données recueillies par MIRI.

Le JWST sera lancé en 2014 par une fusée Ariane 5, seule capable de mettre en orbite un tel géant. Le volume de la coiffe de la fusée Ariane n'étant pas suffisant pour accueillir le nouveau télescope, celui-ci sera embarqué replié et ne sera déployé qu'une fois dans l'espace. Grâce à d'importants développements technologiques, l'ensemble du dispositif a pu être considérablement allégé. Ainsi, malgré un diamètre presque trois fois supérieur à celui de son prédécesseur HST, le JWST n'aura qu'une masse de 6,5 tonnes, soit deux fois moins que son prédécesseur. Restait aux ingénieurs à résoudre une autre contrainte majeure. Dédié à la détection du rayonnement cosmique infrarouge, le JWST fonctionnera à des températures de l'ordre de $-220\text{ }^{\circ}\text{C}$ afin d'éviter que son émission de lumière ne puisse gêner les observations du cosmos. D'où la décision de placer le JWST au **point de Lagrange L2**, situé à 1,5 millions de kilomètres de la Terre (figure 1) contrairement au positionnement du HST sur une orbite basse à seulement 600 km de la Terre environ. Vu la distance, il ne sera plus question d'aller réparer le télescope en cas de problème !

Trois instruments principaux trouveront leur place au foyer du JWST pour capter la lumière concentrée par le télescope puis la transformer en signal digital envoyé vers la Terre :

- NIRCAM (pour *Near InfraRed Camera*), une caméra pour l'infrarouge proche (1 à 5 micromètres), conçue et réalisée aux États-Unis ;
- NIRSPEC (pour *Near InfraRed Spectrometer*), un **spectromètre** également dédié à l'infrarouge proche, conçu et réalisé par l'industrie européenne sous la responsabilité et avec le financement de l'**Agence spatiale européenne (ESA)** ;
- MIRI (pour *Mid Infrared Instrument*), un spectro-imageur pour l'infrarouge moyen (5 à 27 micromètres), conçu et réalisé grâce à une collaboration réunissant, pour moitié, les États-Unis (**Jet Propulsion Laboratory/NASA**) et, pour l'autre, un consortium de laboratoires spatiaux européens appartenant à dix pays (par ordre d'importance décroissante des contributions financières : Royaume-Uni, France, Belgique, Pays-Bas, Allemagne, Espagne, Suisse, Suède, Danemark, Irlande) conduits par l'**Observatoire royal d'Edimbourg** et financés par les agences nationales.

Il faut savoir qu'initialement, le projet JWST ne prévoyait aucun instrument dédié à l'observation dans l'infrarouge moyen. À la fin des années 1990, seuls quelques rares astrophysiciens américains et européens en défendaient la présence à bord du futur télescope spatial. Parmi les précurseurs, figuraient notamment des astrophysiciens du CEA, conscients des potentialités de ce type d'instrument et déjà fortement impliqués dans l'observation du rayonnement infrarouge moyen – par exemple, avec la caméra ISOCAM envoyée dans l'espace en 1995 ou avec l'instrument VISIR (pour *Very Large Telescope Imager and Spectrometer in Infrared*) de l'**Observatoire européen austral (ESO)** au Chili.



Maquette, à l'échelle 1, du JWST.

Ces circonstances conduiront le SAp à prendre la responsabilité scientifique et technique de l'imager de MIRI⁽²⁾. Outre l'Irfu, trois autres laboratoires français sont impliqués dans ce projet, à savoir le **Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique (Lesia)** de l'**Observatoire de Paris Meudon**, l'Institut d'astrophysique spatiale (IAS), à Orsay, et le **Laboratoire d'astrophysique de Marseille (Lam)**. Quant au Cnes, également partenaire du CEA, il finance le projet à hauteur de 50 % (main-d'œuvre incluse).

(2) Outre le SAp, d'autres services de l'Irfu participent au projet : le Service d'électronique des détecteurs et d'informatique (Sedi), le service d'ingénierie des systèmes (Sis), le Service des accélérateurs, de cryogénie et de magnétisme (Sacm).

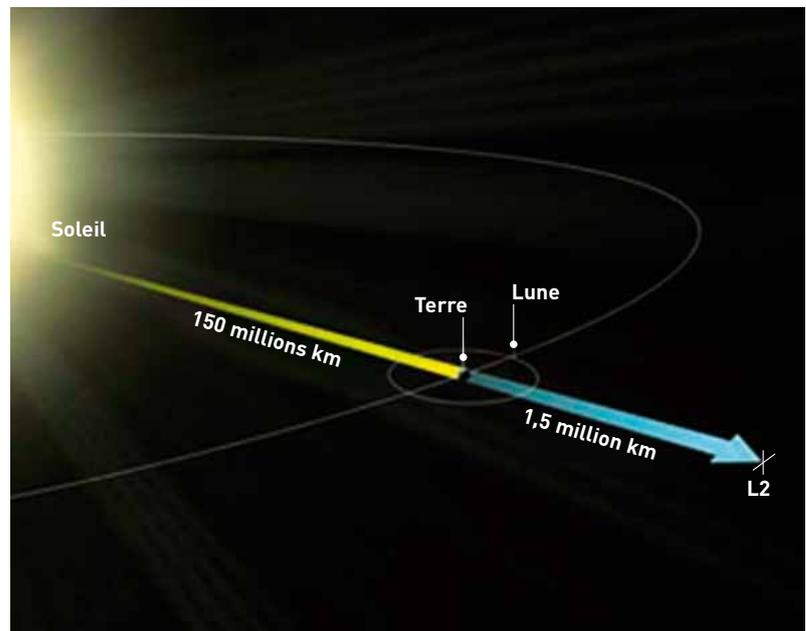


Figure 1. Schéma indiquant la position du point L2 où sera placé le JWST.



La caméra du *Mid Infrared Imager* (MIRIM), destinée au télescope JWST, en train d'être inspectée, sous éclairage ultraviolet, pour vérifier qu'il n'y a pas eu de contamination particulaire.

Une fois en service, le JWST entrera dans la gamme des télescopes infrarouge de deuxième génération. Avec une sensibilité et une acuité angulaire 100 fois supérieure à celle de ses prédécesseurs, ce nouvel instrument va permettre des avancées notables dans différents domaines de l'astrophysique comme l'assemblage des **galaxies**, les premières phases de formation des étoiles ou encore la recherche d'exoplanètes. Concernant ce domaine particulier, un mode d'observation dit coronographique a été introduit dans l'imageur de MIRI. Il s'agit d'une méthode permettant d'« éteindre » une étoile pour sonder ses alentours proches sans être « ébloui » et de pouvoir ainsi rechercher d'éventuelles **planètes**, des « compagnons », des disques de poussière... Ce mode d'observation coronographique a nécessité la fabrication de composants optiques spécifiques jusqu'alors introuvables dans l'industrie. Le Lesia les a conçus et l'Institut rayonnement matière (Iramis) du CEA les a réalisés.

Où en est le projet aujourd'hui ? D'un point de vue technique, les différents modèles de l'imageur de MIRI indispensables à la qualification spatiale de l'instrument sont d'ores et déjà réalisés. Le modèle qui volera se trouve actuellement en phase de tests sur le centre du CEA de Saclay. À la fin de cette opération, prévue en décembre 2009, l'instrument sera livré aux ingénieurs britanniques qui opéreront son assemblage au spectromètre avant d'envoyer le tout à la NASA. Celle-ci procédera à l'intégration du dispositif au sein du JWST en 2011.

La réalisation de l'imageur de MIRI confère désormais aux ingénieurs et aux chercheurs du CEA une excellente connaissance de l'appareil. Elle leur garantit également le temps d'observation nécessaire à la conduite de nouveaux programmes d'observation encore plus ambitieux – autant d'atouts qui vont permettre au SAP de figurer longtemps encore aux avant-postes de la recherche en astrophysique. Cette expertise acquise par le CEA lors de la construction de l'instrument, lors des tests réalisés en laboratoire ou dans l'espace, bénéficiera à l'ensemble de la communauté européenne des astrophysiciens, grâce à la fondation d'un Centre d'expertise implanté à Saclay. Autre avantage du projet, celui de conserver la compétence scientifique et technique du CEA dans le domaine du rayonnement de l'infrarouge moyen, toujours très porteur pour l'astronomie. En effet, la suite se prépare déjà avec, notamment, les études de l'instrument METIS (pour *Mid-infrared E-ElT Imager and Spectrograph*) pour le télescope E-ELT (pour *European Extremely Large Telescope*) : un nouveau géant de 42 mètres de diamètre que l'ESO étudie aujourd'hui en détail (voir *ELT/METIS, un géant de 42 mètres*, p. 110).

➤ **Pierre-Olivier Lagage**
et **Jean-Louis Auguères**

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

Les spécificités du spatial : apprentissage d'un savoir-faire

La réalisation d'engins spatiaux est un domaine de la technique relativement neuf à l'échelle de la science astronomique. En France, les premières expériences embarquées sur des fusées sondes pour récolter quelques minutes d'observation au-dessus de l'atmosphère datent d'à peine un demi-siècle. À cette époque de pionniers, la méthode des essais et des erreurs pouvait répondre aux attentes de la communauté scientifique. Mais, avec l'arrivée des satellites, il a fallu commencer à mettre en place un référentiel de travail commun visant à optimiser les chances de succès et à assurer un retour d'expérience permettant de minimiser les risques des projets futurs.

Ce référentiel de travail permet, *via* des normes d'ingénierie, de qualité et de gestion de projets, de prendre en compte, dès les phases préliminaires de conception, les contraintes spécifiques du spatial. On pense, bien sûr, d'abord aux contraintes techniques fortes : les instruments spatiaux font souvent appel à des technologies en limite de faisabilité utilisées dans des domaines extrêmes de leurs applications. Mais les exigences liées aux programmes spatiaux dépassent largement les besoins fonctionnels en opération. Ainsi les contraintes environnementales spécifiques, vibrations de la fusée au

lancement, ultra-vide, **radiations**, impossibilité d'intervention en cas de pannes, nécessitent-elles une approche particulièrement rigoureuse.

Prenons le cas du télescope spatial JWST pour lequel le CEA/Irfu développe la caméra infrarouge MIRIM (pour *Mid Infrared Imager*) qui permettra de sonder les premières étoiles de l'Univers. Ce projet aura nécessité plusieurs milliards de dollars et mobilisé pas moins de 20 ans d'efforts, de part et d'autre de l'Atlantique, entre les premiers dessins datant du milieu des années 90 et le lancement prévu en 2014. Des composants à l'instrument complet, chaque système subit une campagne de qualification pour démontrer la fiabilité et les performances du concept choisi. Par exemple, avant la réalisation du modèle de vol, la caméra MIRIM aura connu, en cinq ans, quatre modèles d'instrument complet, destinés à vérifier toutes ses performances en conditions opérationnelles, notamment sa tenue au lancement avec des tests de vibration, ou aux températures extrêmes avec des tests cryogéniques en enceinte refroidie à l'**hélium** liquide (4 K). Pareillement, pour les caméras PACS (pour *Photoconductor Array Camera and Spectrometer*) et SPIRE (pour *Spectral and Photometric Imaging Receiver*), destinées au télescope spatial Herschel, il



L. Godart/CEA

Banc de test cryogénique de MIRIM au SAp. Les bancs de tests et campagnes d'essais peuvent atteindre des niveaux de complexité et de coût avoisinant, dans certains cas, ceux de l'instrument.

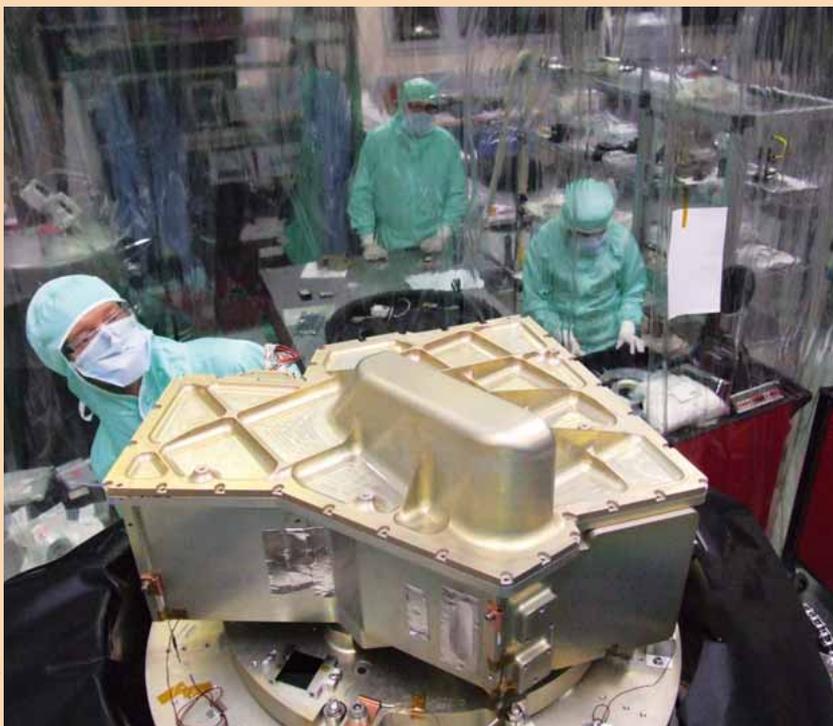
aura fallu 2 500 heures de travail pour contrôler les 65 000 composants électroniques, 900 pièces mécaniques et 50 cartes électroniques.

Ainsi, au fur et à mesure, les concepts s'affinent, les procédures s'améliorent et les anomalies (non-conformité ou erreurs) diminuent jusqu'au niveau de risque jugé acceptable pour la réussite du projet. Dans un environnement politique et international souvent complexe, la gestion des programmes spatiaux demande de savoir doser la gestion des risques face aux contraintes de coût et de planning. Supprimer une campagne de test laisse parfois penser que l'on gagne de précieuses journées de travail, mais les risques associés peuvent se révéler autrement plus coûteux et catastrophiques, comme l'a montré l'exemple de Hubble. Une analyse précise des chemins de criticité est nécessaire pour assurer le bon déroulement de programmes longs, incertains et risqués.

Certaines des contraintes présentées dans cet article se retrouvent dans d'autres domaines de l'instrumentation scientifique. Néanmoins, la grande spécificité des programmes spatiaux, c'est la simultanéité, au sein d'un projet, de toutes ces contraintes particulières, et des méthodes adoptées pour les gérer.

> Jérôme Amiaux, Christophe Cara, Jean Fontignie et Yvon Rio

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



L. Godart/CEA

Modèle de vol de l'instrument MIRIM en cours d'intégration dans l'enceinte cryogénique de test, au SAp. Les contraintes de propreté des instruments spatiaux nécessitent de travailler en environnement contrôlé, ici en classe 100 (moins de 100 particules de taille supérieure à 0,5 µm par pied cube).

La réalisation d'un masque coronographique

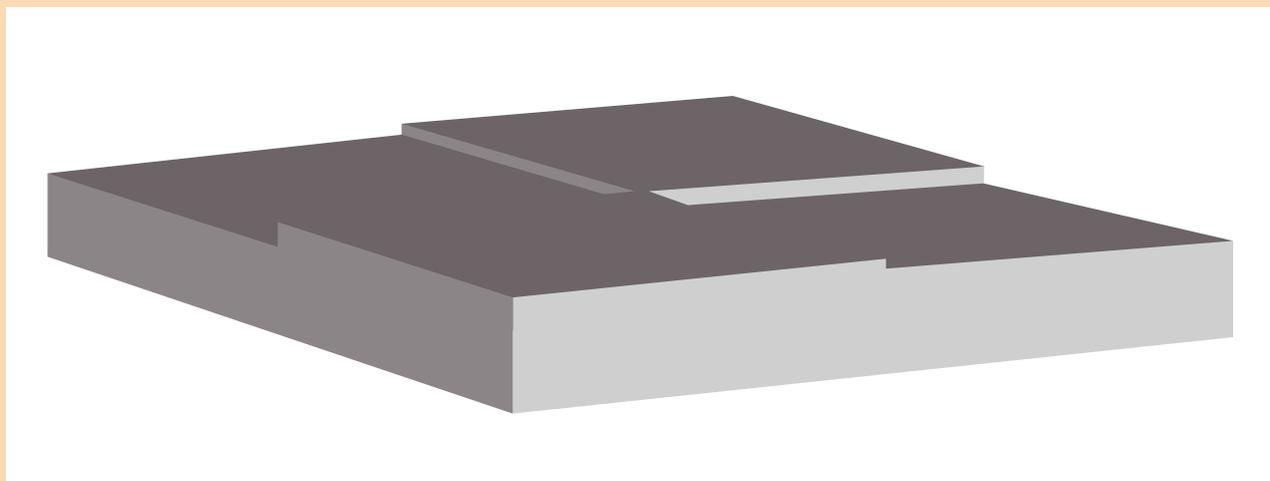


Figure 1. Schéma du masque coronographique en germanium monocristallin (la hauteur de marche n'étant pas à l'échelle).

Inventée par Bernard Lyot (1897-1952) au début des années 30, la coronographie consiste à reproduire une éclipse totale pour observer la **couronne solaire** sans qu'elle se trouve noyée par la luminosité de l'astre. Le principe consiste à placer une pastille opaque sur l'image du **Soleil** formée par une lunette astronomique, afin d'occulter le disque solaire et de ne laisser voir ainsi que la lumière de la couronne solaire. Aujourd'hui, la coronographie est utilisée pour l'observation d'autres **étoiles** que le Soleil et il existe une alternative aux pastilles de Lyot pour réaliser ces observations : ce sont les tout nouveaux masques de phase à quatre quadrants (4QPM), qui permettent de meilleures performances. Leur réalisation consiste

en une lamelle de géométrie quasiment parfaite, présentant deux quadrants de différente épaisseur par rapport aux deux autres, d'une demi-longueur d'onde optique dans le germanium à la fréquence d'observation (figure 1).

L'instrument MIRI (pour *Mid Infrared Instrument*), destiné au futur télescope JWST (pour *James Webb Space Telescope*), utilisera ce principe pour cibler trois longueurs d'**onde** d'observation dans l'infrarouge – d'où le développement de masques de type 4QPM en **germanium**, un matériau qui présente l'avantage de devenir transparent dans ce domaine d'observation. Dans le processus de fabrication, le **Laboratoire d'études spatiales et**

d'instrumentation en astrophysique (Lesia) a fourni des parallélépipèdes, dans un monocristal de germanium, présentant des faces parallèles et planes. L'obtention de la différence de marche dans le germanium doit tout à la grande précision des outils de microfabrication de la salle blanche du Service de physique de l'état condensé (Spec). Deux techniques furent utilisées : la lithographie optique pour la définition des quadrants à protéger et la gravure ionique réactive pour la gravure des quadrants plus fins. Mais pour les chercheurs, la plus grande difficulté de fabrication des masques fut de parvenir à la précision requise :

- une différence de marche établie entre $0,8 \mu\text{m}$ et $2 \mu\text{m}$ en fonction de la longueur d'onde de travail ;
- une erreur de marche inférieure à 0,5 % ;
- une excellente homogénéité malgré une surface totale dépassant le cm^2 ;
- une rugosité de surface maintenue inférieure à 30 nanomètres sur l'ensemble du composant.

Il a fallu réaliser une soixantaine de prototypes et passer par toute une série d'étapes (dépôt de résines, gravure réactive, nettoyage, contrôle de la hauteur de marche etc) pour obtenir enfin les trois masques définitifs qui équiperont MIRI (figure 2).

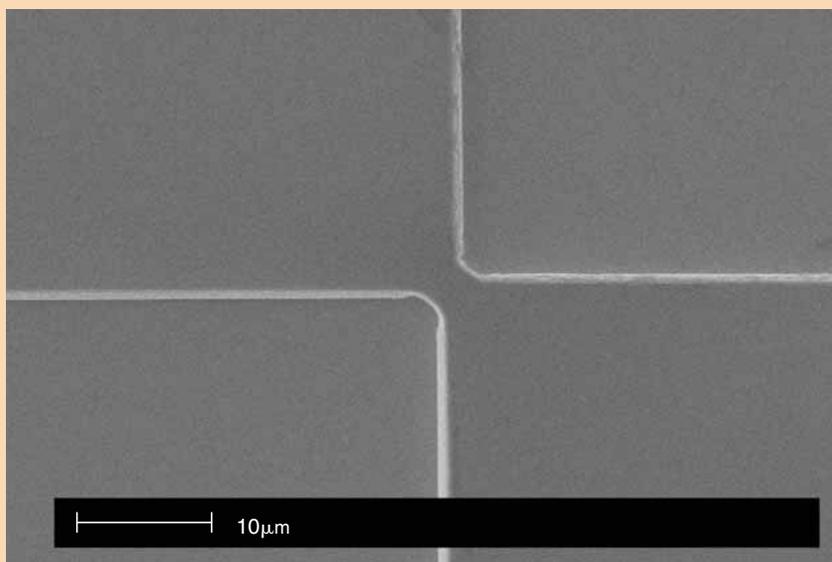


Figure 2. Image en microscopie électronique à balayage montrant le centre de l'élément après gravure. Échelle $10 \mu\text{m}$.

Anne de Vismes/CEA

> **Claude Fermon**
et **Myriam Pannetier-Lecœur**

Service de physique de l'état condensé (Spec)
Institut rayonnement matière de Saclay (Iramis)
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay

> **Anne de Vismes**

Institut de radioprotection
et de sûreté nucléaire (IRSN)
Centre du Bois des Rames (Orsay)

SVOM, un satellite pour détecter l'explosion des premières étoiles formées dans l'Univers



Vue d'artiste du satellite SVOM.

En 2014, sera lancé le satellite SVOM (pour *Space based multi-band Variable Object Monitor*) pour scruter les **sursauts gamma**, autrement dit les événements les plus violents de l'Univers depuis le **big bang**. Leur éclat extrême devrait permettre la détection des premières **étoiles** de l'Univers, ainsi que l'arpentage du cosmos, en les utilisant comme des chandelles astronomiques. Cet éclat leur vient d'une émission en **rayons gamma**, très forte mais également très fugace : de 0,1 à 100 secondes. À cette première émission succède toujours une seconde, celle-ci beaucoup plus faible, décroissante dans le temps et couvrant une large bande allant du **rayonnement X** à celui de l'**infrarouge** en passant par le **rayonnement visible**. Le caractère éphémère du phénomène gamma, et la volonté de l'observer simultanément dans une large bande spectrale, impliquaient des moyens adaptés. D'où la mission SVOM avec sa panoplie de télescopes, installés à la fois dans l'espace et au sol, avec une sensibilité allant des rayons gamma à la lumière infrarouge. Cette complémentarité d'instruments en fait une expérience unique au monde pour l'étude des sursauts gamma, de leur émission prompte à leur émission rémanente. Il s'agit d'une coopération sino-française initiée entre l'**Agence spatiale chinoise**, l'Académie des sciences de Chine et le **Centre national d'études spatiales (Cnes)**.

Au cœur de ce dispositif, figure le télescope ECLAIRS, l'initiateur de toute la chaîne de mesures de la mission. Développé à l'Irfu qui en assure la maîtrise d'œuvre, il s'agit de la principale contribution française à la charge utile du satellite SVOM. La mission d'ECLAIRS consistera à détecter l'apparition d'un

sursaut gamma sur une portion de la voûte céleste et d'en déterminer la localisation avec une précision d'au moins 10 minutes d'arc – il devrait en détecter une centaine par an. L'optique classique ne permettant pas de focaliser les rayons gamma, les chercheurs se sont donc orientés vers l'imagerie par masque codé. Comme son nom l'indique, le principe de cette technique consiste à placer un masque devant un plan de détection en sachant qu'à une position donnée d'une source dans le ciel, correspond une projection unique du motif de masque sur le plan de détection. Reste ensuite à utiliser un outil mathématique pour reconstruire l'image qui permettra de remonter à la direction de la source. Le masque codé se compose d'une plaque de tantale perforée d'un motif choisi, tendue sur un cadre de titane afin de compenser les déformations thermiques – une réalisation du **Laboratoire astroparticule et cosmologie de Paris**. Ce masque est supporté par une structure en carbone rigide et légère, entourée d'un blindage multicouche de plomb, cuivre et aluminium, dont le rôle consiste à arrêter les **photons** ne provenant pas du champ de vue défini par le masque.

Réalisé par le **Centre d'étude spatiale des rayonnements de Toulouse**, le plan de détection associe des cristaux détecteurs de tellurure de cadmium et des circuits intégrés de lecture analogique bas bruit (*Application-Specific Integrated Circuit/ASIC*). L'assemblage réalise un empilement compact de céramiques jusqu'à former une unité de détection de 6 400 **pixels** pour une surface de 1 024 cm². Refroidi par un système performant utilisant des caloducs à conductance variable, sa température d'ensemble se situe à -20 °C. Une attention toute particulière a été



portée à la valeur du seuil bas de détection. Grâce au choix rigoureux des détecteurs élémentaires et à une maîtrise aigüe du bruit de l'électronique, un seuil bas à 4 keV a pu être obtenu. Il s'agit d'un résultat crucial pour le télescope, notamment pour détecter des événements situés à des distances cosmologiques où les photons se décalent vers les basses énergies. L'ASIC a été développé par l'Irfu tandis que l'optimisation du couple détecteur/ASIC vient d'une de ses activités de R&D.

Également développée par l'Irfu, l'unité de traitement scientifique embarquée F-UTS⁽¹⁾ devra déceler et localiser, en temps réel, l'apparition d'un sursaut gamma sur la voûte céleste, puis analyser les données issues du plan de détection concernant les photons. La conception du F-UTS s'opère autour d'un micro-processeur embarqué tolérant aux **radiations** spatiales. L'**algorithme** scientifique embarqué emploie deux méthodes de détection de sursauts. Celle dédiée aux sursauts gamma longs reconstruit des images du ciel toutes les 20 secondes pour y rechercher l'apparition d'une nouvelle source. Sensible aux sursauts gamma plus courts, la seconde scrute tous les intervalles de temps, jusqu'à 10 ms, pour déceler une augmentation du nombre de photons détectés, ce qui lui permettra de reconstruire l'image du ciel et donc de trouver la source. Une fois le sursaut gamma localisé, le satellite SVOM

■ (1) « F » pour Français.

se réoriente de manière à pouvoir observer l'émission rémanente grâce aux télescopes embarqués dédiés aux rayonnements X et visibles à petit champ de vue. En parallèle, le F-UTS prépare un message d'alerte. Rapidement envoyé au sol à l'aide d'un émetteur VHF, couplé à une trentaine de stations de réception réparties au sol sous la trajectoire du satellite, ce message déclenchera l'observation de la rémanence du sursaut gamma par les télescopes terrestres. Grâce à cette observation, il devient alors possible de déterminer la distance de l'événement.

La mise en œuvre de solutions performantes et novatrices témoigne du savoir-faire acquis par les équipes techniques en instrumentation spatiale. Fort de cette expérience, SVOM ouvrira une fenêtre nouvelle sur l'Univers, celle donnant sur la connaissance de ces phénomènes lointains que sont les sursauts gamma. Mais pour cela, il faut attendre 2014.

> Bertrand Cordier

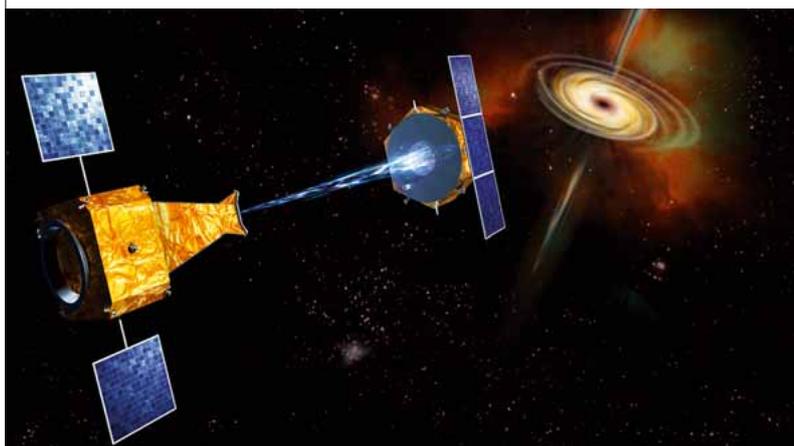
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles
(CEA-Université de Paris 7-CNRS).
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

> Michel Fesquet

Service d'électronique des détecteurs et d'informatique (Sedi)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay

2. Voir plus précis

Simbol-X, pionnier des vols en formation



Vue d'artiste de Simbol-X observant une galaxie active. Le satellite de droite porte le miroir qui focalise les rayons X sur le détecteur placé sur le satellite de gauche, 20 mètres plus loin.

S'il existe dans le ciel des témoins de l'activité des sources extrêmes de l'Univers, ce sont bien les **rayons X** et **gamma** nés de **plasmas** portés à des centaines de millions de degrés ou de particules accélérées à des énergies jusqu'à un milliard de fois supérieures à celles de nos accélérateurs les plus puissants. D'où l'intérêt manifesté par les astrophysiciens pour scruter le ciel dans ce domaine de **rayonnement**. Peut-être pourront-ils ainsi répondre un jour aux questions fondamentales de l'astrophysique moderne – celles

posées notamment sur les **trous noirs** dont on approche l'horizon, au plus près, dans le spectre des rayons X, ou encore, celles de l'origine des **rayons cosmiques**. Ces trous noirs, combien sont-ils dans l'Univers? Qui sont-ils? Influencent-ils leur environnement? Quel rôle jouent-ils dans la formation des **galaxies**? De quelle manière, par ailleurs, fonctionnent les accélérateurs cosmiques? Peut-on expliquer tous les rayons cosmiques?

Le télescope spatial Simbol-X a été conçu pour tenter de répondre à ces questions en observant le ciel, très loin et très précisément. Si aucun instrument n'a pu le faire avant lui, c'est en raison du caractère trop pénétrant des **photons X** et gamma qui empêche l'utilisation de télescopes de facture classique où ils seraient collectés et réfléchis par un grand miroir pour être concentrés sur un petit détecteur. À l'instar de nos tissus, lors des radiographies médicales, ces miroirs sont transparents aux rayons X. Aussi, l'optique des meilleurs instruments imageurs en rayons X et gamma, comme IBIS (pour *Imager on Board the Integral Satellite*) installé à bord d'INTEGRAL (pour *International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory*) se compose d'un masque codé permettant d'obtenir de véritables images avec une **résolution** angulaire encore faible d'une dizaine de minutes d'arc (un tiers de la Lune vue de la Terre). Mais, ne focalisant pas la lumière, ces instruments ne bénéficient pas de l'effet de concentration qui donne leur puissance aux télescopes

classiques. Heureusement, un moyen existe pour focaliser les rayons X. Il s'appuie sur le fait que ces rayons peuvent être réfléchis sur des surfaces très lisses à condition de les aborder de façon quasiparallèle. En combinant plusieurs de ces matériaux réfléchissants, sous forme de coquilles de révolution emboîtées comme des poupées gigognes, on arrive à réaliser des optiques focalisatrices de grande surface que les rayons X « traversent » avant d'atteindre le détecteur au foyer du système. L'énergie maximale à laquelle l'optique peut fonctionner s'avère proportionnelle à la longueur du télescope. La première optique de focalisation X, emportée dans l'espace, en 1978, révolutionna l'astronomie X. Mais elle se limitait à l'observation des rayons X de relativement basse énergie, dits « mous ». Aujourd'hui, la situation demeure inchangée.

La mission *Simbol-X* met en œuvre la technologie émergente du vol en formation pour fabriquer, pour la première fois, un télescope de très grande focale. Ce nouveau concept révolutionnaire consiste à placer l'optique focalisatrice de rayons X sur un premier satellite et le plan focal sur un second, asservi en position par rapport au premier, de façon à former, en quelque sorte, un télescope quasiment rigide mais sans tube. Avec une telle configuration, le télescope peut être sensible aux rayons X dits « durs », c'est-à-dire dix fois plus énergétiques que les rayons X « mous ». Cet instrument à focalisation de nouvelle génération est cent à mille fois plus performant que les meilleurs instruments actuels.

L'idée de *Simbol-X* fut proposée dès la fin 2001, par les astrophysiciens du CEA. Portée par les communautés scientifiques française, italienne et allemande, la phase d'étude de faisabilité du projet a été passée avec succès. Elle a été conduite par les agences spatiales française et italienne ainsi qu'une vingtaine de laboratoires français, italiens et allemands, réunis sous la responsabilité conjointe du CEA et de l'Italie. Parmi les éléments clés de *Simbol-X* figurent notamment :

- l'optique X, placée sous la responsabilité italienne, qui bénéficie du savoir-faire acquis lors des missions d'astronomie X à basse énergie, notamment celle du satellite XMM (pour *X-ray Multi Mirror*) ; ses caractéristiques principales résident dans sa focale de 20 mètres et son excellente résolution angulaire de 20 secondes d'arc ;
- le vol en formation, une première donc, dépend du Cnes ; le défi consiste à pouvoir garder, de façon automatique, le satellite « détecteur » positionné autour du point focal donné par l'optique avec une incertitude de l'ordre du cm^3 ;
- l'ensemble détecteur, fabriqué par la France avec une participation de laboratoires allemands, doit couvrir entre 0,5 et 80 kiloélectronvolts, s'avérer extrêmement sensible et être doté d'une grande finesse d'imagerie.

Pour répondre à son exigeant cahier des charges, l'ensemble détecteur se base sur la superposition de deux plans « spectro-imageurs » de 16 384 pixels couvrant $8 \times 8 \text{ cm}^2$ au total (figure 1).

Pour chaque photon X (comptés un par un à ces énergies), ils en mesurent l'énergie et la localisation sur le détecteur. Le premier plan spectro-imageur, en silicium, fourni par une équipe allemande, détecte les rayons X « mous » avec une vitesse de lecture 20 000 fois plus rapide que ses prédécesseurs. Le

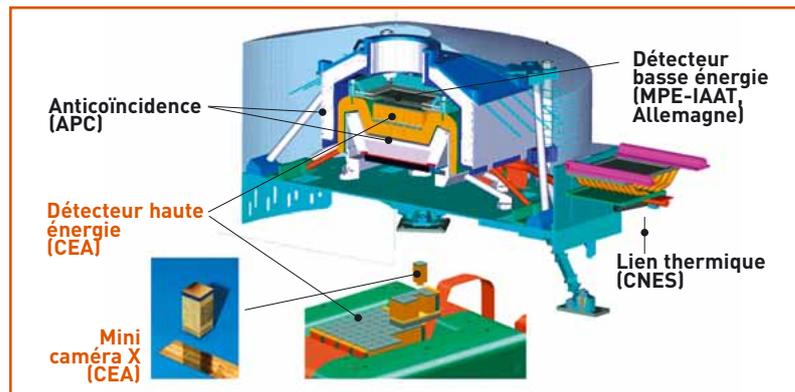


Figure 1. L'ensemble du plan focal de détection, placé sous responsabilité de l'Irfu, avec ses différents éléments et les laboratoires les fournissant : CEA, Laboratoire astroparticule et cosmologie (APC), Max Planck Institut für extraterrestrische Physik, Institut für Astronomie und Astrophysik-Tübingen (IAAT), Cnes. Les différents composants et leur fonctionnement sont décrits en détail dans le texte.

silicium étant transparent aux rayons X de plus haute énergie qui sont bien plus pénétrants, un second plan lui a été adjoint, juste en dessous du premier, de manière à pouvoir arrêter et caractériser ces rayons. Ce deuxième plan est réalisé par le CEA, à base de cristaux de tellure de cadmium (CdTe), matériau ayant déjà prouvé son efficacité dans l'imageur à masque codé d'INTEGRAL. Depuis le lancement de ce satellite, d'importantes avancées ont été enregistrées concernant la miniaturisation (les pixels de *Simbol-X* étant 50 fois plus petits) et la réduction maximale des zones insensibles entre les pixels. Le plan imageur haute énergie est construit en juxtaposant 64 minicaméras X, de 1 cm^2 de côté, avec chacune 256 pixels complètement adjacents et comprenant toute l'électronique critique à leur fonctionnement (figure 1). Un système compact de blindage et de détecteurs de particules entoure les deux plans imageurs. Fourni par le Laboratoire astroparticules et cosmologie (APC) de Paris, il réduit, d'un facteur 10, les bruits parasites engendrés par les nombreux rayons cosmiques peuplant l'espace interplanétaire. Ce plan focal, étudié sous responsabilité de l'Irfu, dispose également d'un traitement de données de bord géré par le Centre d'études spatiales des rayonnements (CESR) de Toulouse.

Les agences spatiales italienne et française n'ayant pu réunir les fonds suffisants pour financer cet ambitieux projet, celui-ci n'a pu entrer dans la phase d'étude détaillée. Étant donné la qualité de la « science à faire » avec ce projet et la large communauté de chercheurs intéressée, il devrait renaître dans un autre contexte.

> Philippe Ferrando

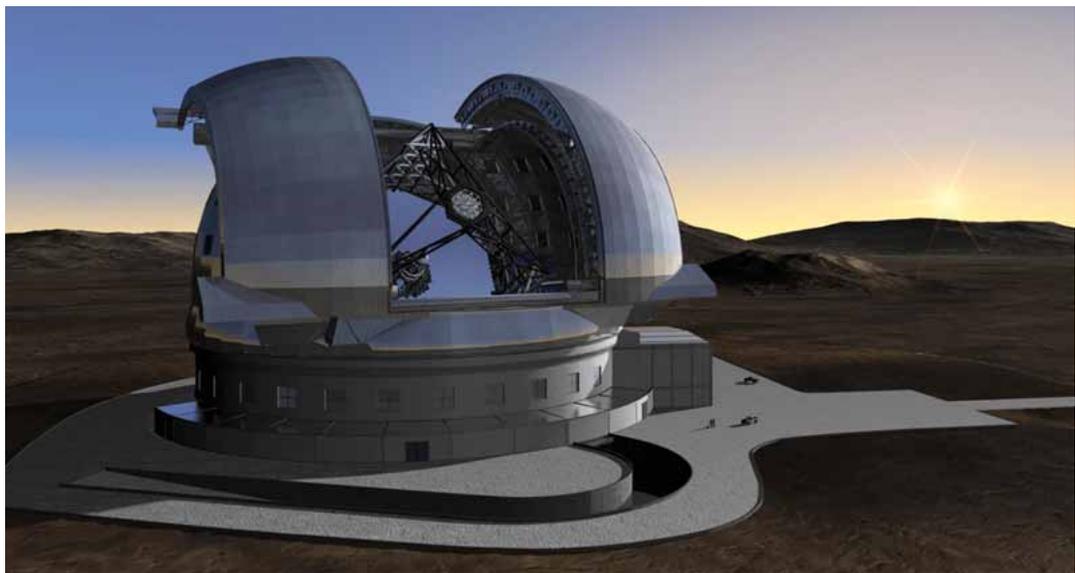
Service d'astrophysique (SAP)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Unité mixte de recherche astroparticule et cosmologie
(CNRS-Université de Paris 7-CEA-Observatoire de Paris)
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

> Martial Authier

Service d'ingénierie des systèmes (SIS)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

ELT/METIS, un géant de 42 mètres

Vue d'artiste de l'E-ELT (pour *European Extremely Large Telescope*), un télescope de 42 mètres de diamètre que l'ESO est en train d'étudier ; à noter, sur la droite de la vue, les deux voitures qui donnent l'échelle de ce télescope géant.



Fort des succès remportés par le programme *Very Large Telescope* (VLT), un ensemble de 4 télescopes de 8 mètres de diamètre, l'**Observatoire européen austral** (*European Southern Observatory/ESO*) relève aujourd'hui un nouveau défi : celui de réaliser un télescope doté d'un miroir de 42 m de diamètre (1 300 m²). Construire un miroir de cette surface et d'un seul tenant est aujourd'hui encore totalement impossible. D'où l'idée d'en segmenter la surface en un millier de pièces hexagonales mesurant chacune 1,4 mètre de large. Lourde de 5 000 tonnes (la moitié du poids de la tour Eiffel), ce géant portera le nom d'*European-Extremely Large Telescope* (E-ELT) et devrait être opérationnel à l'horizon 2018. Son site d'installation ne sera dévoilé que début 2010 : peut-être le Chili, l'Argentine ou encore l'île de La Palma aux Canaries. Comme son prédécesseur VLT, le télescope E-ELT observera le cosmos, à partir du sol, dans la gamme de rayonnements proche des ultra-violets, visibles et infrarouges.

Augmenter la taille d'un télescope présente un double avantage. D'abord, celui de détecter des objets plus faibles ou plus lointains, grâce à une surface collectrice plus grande. Ensuite, celui de voir les objets avec une finesse de détail plus grande. En effet, suivant le phénomène physique de diffraction de la lumière, l'image d'un objet ponctuel à travers un télescope ne donne pas un point, mais une tache, dite « tache de diffraction ». En conséquence, plus le diamètre du télescope s'avère grand, plus cette tache est petite. Ainsi la tache de diffraction d'une étoile, à travers l'E-ELT, aura-t-elle une surface 25 fois plus petite et que celle des images produites jusque-là par VLT. Ces deux avantages combinés permettront de conduire des programmes uniques, notamment celui d'étudier les disques entourant les **étoiles**, lieux de formation des **planètes**, voire d'observer directement l'émission thermique d'exoplanètes géantes.

(1) Il s'agit du rayonnement ayant une longueur d'onde située entre 5 et 25 micromètres.

Parallèlement aux études menées en vue de la réalisation du télescope E-ELT, l'ESO a lancé plusieurs appels d'offre aux laboratoires européens concernant les instruments dédiés aux foyers du télescope. Compte tenu de son expérience exceptionnelle dans le domaine de l'infrarouge dit « moyen »⁽¹⁾, le Service d'astrophysique (SAP) du CEA (Irfu) a rejoint un consortium de laboratoires dirigé par l'**Observatoire de Leiden** (Pays Bas) pour mener les études préliminaires sur le futur instrument METIS (pour *Mid-infrared E-ELT Imager and Spectrograph*) prévu pour équiper l'E-ELT. Outre l'étude des cryomécanismes développés avec le Service d'ingénierie des systèmes (SIS), le SAP a pris en charge l'imagerie d'objets avec un fort contraste d'intensité (par exemple, le cas d'une planète située à côté d'une étoile) qui nécessite des modes d'observation particuliers comme la coronographie ou l'imagerie différentielle.

Le domaine du rayonnement infrarouge moyen s'est développé en trente ans d'une manière impressionnante. Au début des années 1990, le SAP figurait déjà en pionnier en matière d'imagerie du cosmos à partir du sol dans ce type de rayonnement, notamment grâce à des matrices de détecteurs développées par le Laboratoire d'électronique et de technologies de l'information (Leti) – sous-produit des importants développements de matrices de détecteurs réalisés dans le cadre du projet spatial ISOCAM. À l'époque, les images ne dépassaient pas les quelques milliers de pixels et provenaient d'un télescope de quelques mètres de diamètre seulement. Trente ans après, nous allons pouvoir accéder à des images d'un million de pixels obtenues avec un télescope 100 fois plus puissant, soit une progression d'un facteur 100 000 !

> Pierre-Olivier Lagage et Eric Pantin

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

Une centaine de télescopes en réseau pour CTA

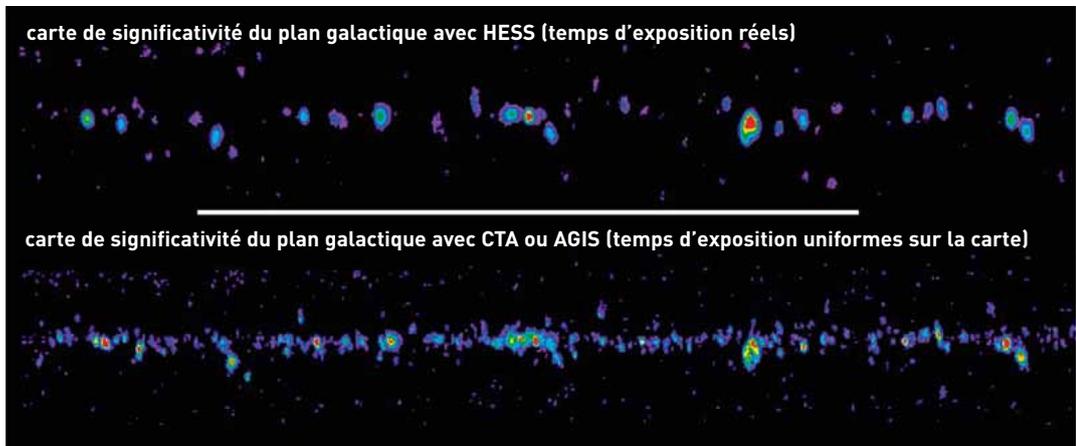


Figure 1
Amélioration de la carte astronomique du plan galactique prédite en passant de HESS au CTA. Le nombre de sources détectées devrait s'accroître de plus d'un ordre de grandeur.

Dans le sillage de l'expérience européenne HESS (pour *High Energy Stereoscopic System*)⁽¹⁾ et de ses succès dans le domaine de l'observation en astronomie gamma de très haute énergie, le futur CTA (pour *Cherenkov Telescope Array*) s'inscrit dans le grand projet de réseau européen de télescopes Cherenkov de nouvelle génération. Son originalité réside dans la position de ses deux réseaux d'imageurs Cherenkov atmosphériques. Le premier, implanté dans l'hémisphère Nord, observera dans la bande de basse énergie allant de 10 GeV à 1 TeV. Son jumeau sera positionné dans l'hémisphère Sud et dédié à la bande d'énergie allant de 10 GeV à 100 TeV. Au cœur du réseau CTA-sud figurent quatre télescopes dotés de miroirs d'environ 20 mètres de diamètre. Un anneau formé par plusieurs dizaines de télescopes de douze mètres de diamètre, semblables à ceux équipant déjà le télescope HESS, formera un premier cercle autour de ces instruments – dispositif complété par un deuxième cercle d'une autre dizaine de télescopes, possédant des miroirs de six mètres de diamètre. Avec ce dispositif complexe,

le CTA observera des flux de rayonnement dix fois plus faibles que ceux détectés actuellement par HESS. Avec l'introduction d'un nombre important de télescopes dans le réseau, le nouveau CTA sera bientôt capable d'obtenir des **résolutions** angulaires de l'ordre de la minute d'arc.

Plusieurs équipes de chercheurs, majoritairement européennes, collaborent à la conception et la construction du CTA. Pour la France, il s'agit du CEA avec l'Irfu et du CNRS avec l'**Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (IN2P3)** et l'**Institut national des sciences de l'Univers (Insu)**. Actuellement en cours, la phase de conception et de construction des prototypes se poursuivra jusqu'en 2011-2012. Le projet CTA figure sur la feuille de route du Forum stratégique européen pour les infrastructures de recherche (*European Strategy Forum on Research Infrastructures/Esfri*) et participe à deux réseaux européens ERANet : Astro Particle ERANet (ASPERA) et Astronet.

> **Jean-François Glicenstein**

Service de physique des particules (SPP)

Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)

Direction des sciences de la matière

CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

(1) En hommage au physicien autrichien Victor Hess (1883-1964), prix Nobel de physique, en 1936, pour la découverte du rayonnement cosmique.

3. Voir plus large

Euclid, cartographe du ciel extragalactique

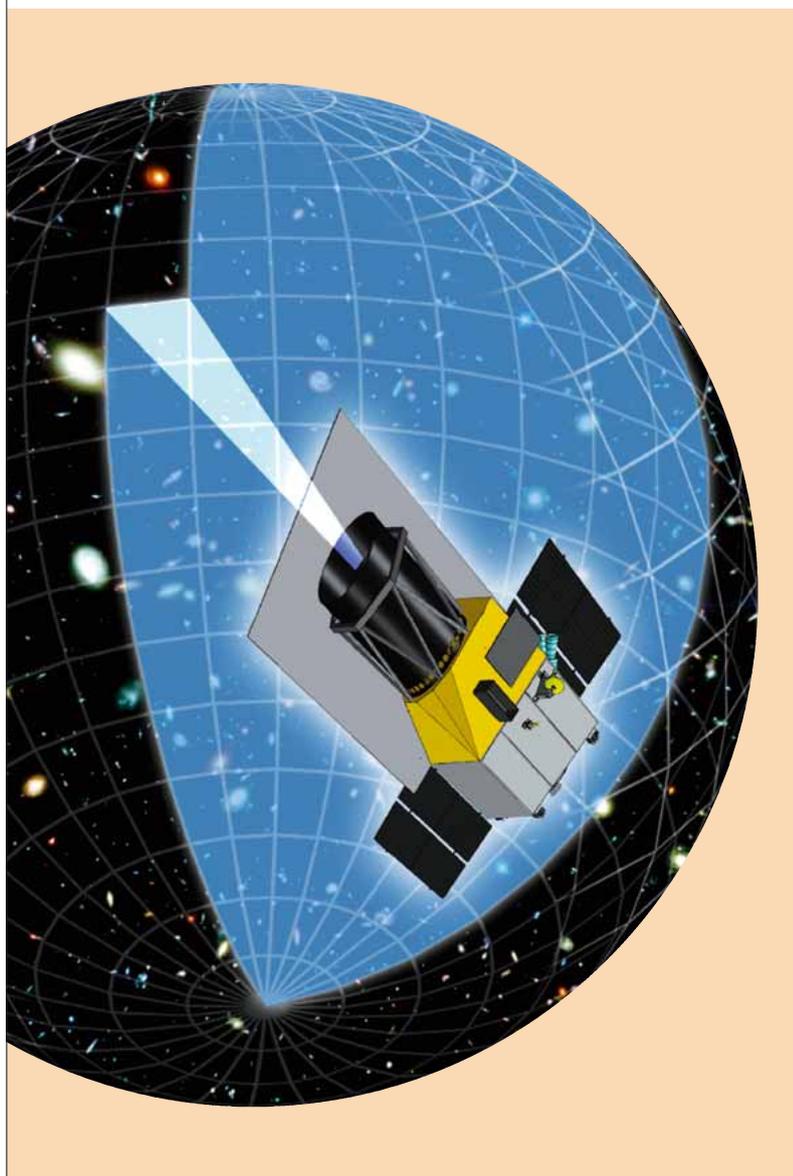
C'est le mathématicien grec Euclide qui a donné son nom au futur télescope chargé d'explorer la part sombre de l'Univers, celle qui échappe encore à l'observation des chercheurs, à savoir, l'**énergie noire** et la **matière noire** – soit près de 95 % de cet Univers. Cette mission d'étude utilisera comme

données la cartographie du ciel extragalactique. Actuellement en cours d'étude de faisabilité, le projet Euclid a déjà été présélectionné par l'**Agence spatiale européenne (ESA)** dans le cadre de son programme *Cosmic Vision 2015-2025*. S'il est définitivement choisi, son lancement pourrait avoir lieu en 2017.

Les observations

Le projet Euclid part d'une constatation : la matière noire peut se détecter indirectement par ses **effets gravitationnels**, c'est-à-dire par les distorsions qu'elle fait subir à la lumière. Depuis Albert Einstein, les physiciens savent que la matière exerce une **attraction gravitationnelle** sur la lumière et peut ainsi fléchir sa trajectoire. En effet, la matière (visible ou noire), située entre l'observateur et la **galaxie** observée, déforme toujours l'image qui nous parvient de cette galaxie, un peu comme pourrait le faire une lentille. Il s'agit d'un effet connu dit de « cisaillement gravitationnel faible ». Ainsi, en observant des images de galaxies lointaines et en mesurant les déformations subies, les chercheurs peuvent-ils en déduire la distribution de la matière noire intercalée entre notre galaxie et des galaxies plus lointaines. Et procédant en cascade, de la distribution de la matière peut alors se déduire la nature

(1) La fonction de corrélation des galaxies consiste, pour chaque paire de galaxies, à mesurer leur distance pour reconstruire une structure en 2D de la distribution des galaxies.



Vue d'artiste du satellite Euclid cartographiant l'Univers extragalactique.

de l'énergie noire, l'un des moteurs de structuration de l'Univers. Ensuite, en appliquant ce raisonnement à des galaxies situées à différentes distances, il devient également possible de mesurer l'évolution de l'énergie noire avec le temps.

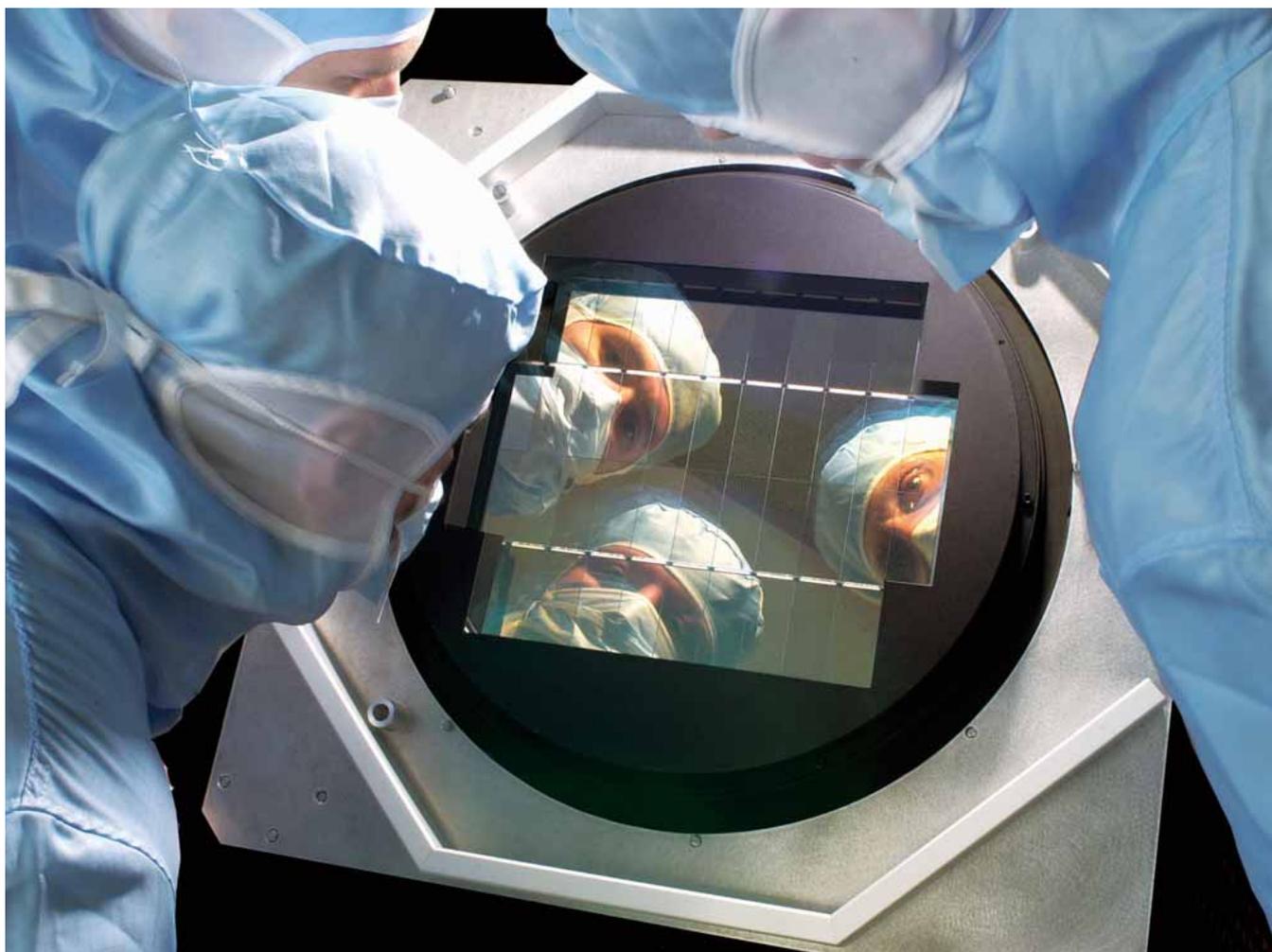
Ce type de mesure a déjà été effectué, depuis l'espace, grâce au télescope Hubble et à ses milliers d'heures d'observation. Il s'agit du plus grand relevé de l'Univers jamais réalisé et il porte le nom de COSMOS (pour *Cosmic Evolution Survey*). Pourtant, ce relevé ne concerne qu'une toute petite partie du ciel avec une taille angulaire de seulement 2 degrés carrés, ce qui correspond, néanmoins, à neuf fois la surface apparente de la Lune. En parallèle, MEGACAM, une des deux plus grandes caméras d'imagerie astronomique au monde, installée au foyer du télescope au sol Canada-France-Hawaii, a réalisé un programme similaire mais sur une surface de ciel couvrant environ 200 degrés carrés. La synthèse des informations obtenues par ces deux observatoires a permis aux astrophysiciens de pouvoir déterminer la distribution spatiale de la matière noire et de la matière visible de cette région du ciel, avec une précision et une étendue inégalées.

Au vu des résultats du télescope Hubble, un double objectif chiffré a été fixé à Euclid. D'abord, il s'agira de déterminer le paramètre de l'équation d'état de l'énergie noire avec une précision de quelques pourcents et ensuite, d'établir la variation de ce paramètre, avec le temps, dans une précision de quelques dizaines de pourcents. Ce résultat suppose d'augmenter considérablement le nombre de galaxies mesurées de façon à limiter les erreurs statistiques. D'où la future mission fixée à Euclid d'observer 20 000 degrés carrés, soit la moitié du ciel, pour un total d'environ 3 milliards de galaxies. Quant à la détermination de la relation entre la distance et le décalage spectral, elle reposera sur la mesure des spectres de plus d'une centaine de millions de galaxies, là encore sur la moitié du ciel. L'évolution de la fonction de corrélation des galaxies⁽¹⁾ au vu du décalage spectral renseignera les chercheurs sur l'histoire de l'expansion de l'Univers et, par conséquent, sur la source de cette expansion. Les informations transmises par les deux sondes qui sont la cartographie de la matière noire et les oscillations acoustiques baryoniques permettront de contraindre très précisément les paramètres de l'énergie noire.

La charge utile d'Euclid

Pour mener à bien ce programme d'observations et de cartographie de la matière noire, Euclid utilisera la technique dite de « l'imagerie grand champ » déjà expérimentée par MEGACAM. Cette technique consiste à réaliser des instruments disposant de détecteurs composés d'un très grand nombre de **pixels**. Chaque observation permet ainsi de prendre une photographie d'une grande surface du ciel, tout en conservant une très bonne résolution spatiale, nécessaire pour mesurer précisément la forme des images des galaxies.

Le satellite Euclid embarquera un télescope doté d'un miroir primaire de 1,20 mètre de diamètre. Au foyer de ce télescope, prendront place deux caméras.



J.J. Bigot/CEA

Caméra MEGACAM : la mosaïque de 40 CCD en fin de montage. Cette caméra, réalisée par l'Irfu, est opérationnelle au foyer du télescope Canada-France-Hawaii depuis 2003.

La première caméra, dédiée à la **lumière visible**, se compose de 36 détecteurs de type *Charge coupled device* (CCD) pour un total de 600 millions de pixels. Elle réalisera la mesure de la forme des images de galaxies. Une deuxième caméra, travaillant celle-là en **lumière infrarouge**, composée d'environ 50 millions de pixels, fera des observations complémentaires pour mesurer la distance des galaxies. Enfin, un troisième instrument, indépendant des deux caméras d'imagerie, obtiendra les spectres de plus de 100 millions de galaxies, destinés à mesurer la relation entre la distance et le décalage spectral de ces objets.

La mission Euclid

La principale difficulté des observations de type « cisaillement gravitationnel faible » provient des erreurs de mesures systématiques. D'où la nécessité d'optimiser la conception des instruments, du télescope et du satellite, de façon à ce que les erreurs instrumentales s'avèrent plus faibles que les erreurs statistiques. Pour cette raison, le satellite Euclid sera placé en orbite autour du **point de Lagrange L2**, situé à 1,5 million de kilomètres de la Terre, dans la direction opposée au **Soleil**, où l'environnement thermique du satellite restera très stable. Les chercheurs espèrent que les instruments d'Euclid, prévus pour cinq à six années d'observation, donneront

une qualité d'image très stable, autant spatialement dans tout le champ de vue du télescope que temporellement, pour que la qualité des données soit homogène. Quant à la conception de la charge utile, elle tient compte de la dégradation des performances des détecteurs du fait des **radiations** dans l'espace. Aujourd'hui, l'Irfu dirige un consortium de laboratoires, composé d'une demi-douzaine de pays européens et d'un laboratoire américain, pour étudier l'instrument d'imagerie en charge des mesures de « cisaillement gravitationnel faible ». L'enveloppe financière actuellement impartie à cette mission spatiale s'élève à 450 millions d'euros apportés par l'ESA, un budget complété par la contribution des différentes agences spatiales nationales. Quatre autres missions demeurent à l'étude, dont deux seront sélectionnées début 2010. Il faudra attendre 2011 pour connaître le projet finaliste et 2017 pour son lancement.

> Olivier Boulade

et Alexandre Refregier

Service d'astrophysique (SAp)

Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)

Unité mixte de recherche astrophysique

interactions multi-échelles

(CEA-Université de Paris 7-CNRS).

Direction des sciences de la matière (DSM)

CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

4. Antarès : le neutrino, un autre messager du cosmos



Immersion d'un étage à trois « yeux » lors du déploiement de la première ligne d'Antarès à 40 kilomètres de la Seyne-sur-Mer.

S'il est un lieu où une personne non initiée n'irait pas chercher un télescope, c'est bien dans les profondeurs marines. Pourtant, l'expérience Antarès (pour *Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch*) observe les cieux par 2 500 mètres au fond de la mer Méditerranée, à 40 kilomètres au large de Toulon. Placer un télescope observant vers le bas, à travers la terre, et donc à l'inverse des instruments tournés vers le ciel, pourrait paraître saugrenu *a priori*. Pour les chercheurs, il s'agit d'un endroit qui pourrait permettre de contribuer à résoudre une énigme encore indéchiffrée de l'astrophysique : l'origine du **rayonnement cosmique** qui pourtant bombarde l'atmosphère en permanence. Pour comprendre l'expérience Antarès, il faut savoir que les rayons cosmiques les plus énergétiques naissent d'événements comme les échanges de matière dans les **étoiles** binaires, l'explosion de **supernovae** dans la **Voie lactée**, les jets des **noyaux** actifs de **galaxies** ou les **sursauts gamma** dans les zones plus éloignées du cosmos. Il faut savoir encore que les **photons** gamma, aux énergies les plus extrêmes, ne permettent de sonder les phénomènes cataclysmiques que dans la proche banlieue de la galaxie. Difficulté supplémentaire : les particules constituant le rayonnement cosmique – pour l'essentiel des **protons** – sont rapidement arrêtées ou, à plus basse énergie,

déviées par les **champs magnétiques** intergalactiques. La solution à l'ensemble de ces problèmes passe par le **neutrino**. Produit dans les objets où le rayonnement cosmique s'accélère, il s'agit d'une particule élémentaire neutre et donc insensible aux champs magnétiques – il n'interagit que faiblement avec la matière et rend donc l'Univers transparent. Il permet de sonder le cœur des objets les plus denses. Mais cet avantage devient un inconvénient : il les rend extrêmement difficile à observer. D'où l'idée de concevoir un détecteur, suffisamment grand pour pouvoir déceler quelques rares interactions de ces particules fugaces, et immergé pour atténuer le flux du rayonnement cosmique. Il recevra le nom d'Antarès. Qu'il soit immergé augmente les chances d'observer les neutrinos en se servant de la Terre comme cible. En effet, un neutrino qui interagit avec la croûte terrestre crée un « **muon** » émis dans la même direction. En arrivant dans le milieu marin, celui-ci produit alors des photons Cherenkov. Antarès peut les observer grâce à son réseau de 900 photodétecteurs installés sur 12 lignes, hautes de 450 mètres, espacées de 65 mètres, dont la surface d'ancrage équivaut à quatre terrains de football (figure 1). Chaque ligne est maintenue verticale par des bouées et comporte 25 étages équipés de trois photomultiplicateurs et d'une électronique embarquée capable de transmettre



L. Fabre/CEA

Ligne d'Antarès en attente d'être déployée.

des signaux, en temps réel, vers la côte. Là, une « ferme » de plusieurs dizaines d'ordinateurs filtre la centaine de photons recueillie pour chaque muon, de la lumière parasite due à la **radioactivité naturelle** et à la faune bioluminescente.

Opérationnel depuis 2006, Antarès a permis d'accumuler un grand nombre de données, notamment des dizaines de millions de muons descendants provenant de l'interaction du rayonnement cosmique dans l'atmosphère, malgré le blindage d'eau placé au-dessus du détecteur. Mais ce sont également des muons montants, un phénomène beaucoup plus rare – seulement quelques milliers par an – induits par des neutrinos dits atmosphériques, les seules particules produites lors de l'interaction du rayonnement cosmique aux antipodes qui soient capables de traverser la Terre. Une fois leur direction déterminée, ces neutrinos peuplent uniformément la carte du ciel et constituent ce que les physiciens des astro-

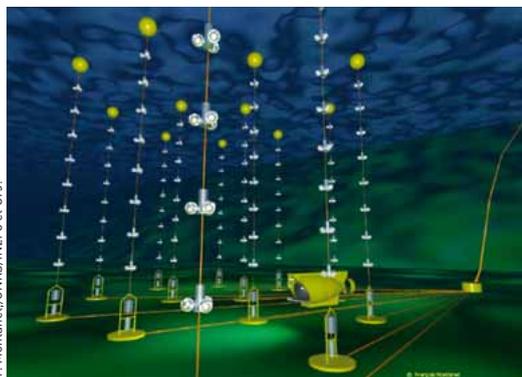
particules appellent « un bruit de fond ». La découverte d'une source cosmique n'interviendra qu'à l'occasion d'une accumulation anormale de quelques neutrinos de haute énergie observée sur cette carte. Mais la détection d'une telle source apportera la preuve irréfutable de la présence d'un accélérateur du rayonnement cosmique.

Compte tenu du très faible nombre d'événements attendus, le développement de l'astronomie neutrinos appelle un détecteur aux dimensions kilométriques, soit 50 fois plus grand qu'Antarès et doté de plusieurs milliers de photomultiplicateurs. L'étude de ce télescope du futur a déjà commencé au sein du consortium KM3NeT (pour *Km³ scale Neutrino Telescope*), un consortium regroupant 40 laboratoires appartenant à 10 pays européens et financé avec l'aide l'Union européenne.

Prévue pour 2012, le début de la construction de l'instrument concrétisera une infrastructure pluridisciplinaire unique au monde dans le domaine des sciences environnementales (océanographie, sismologie, zoologie marine, climatologie...). En l'attente, Antarès continue de scruter le ciel de l'hémisphère Sud, à travers la Terre, à la recherche de l'origine du rayonnement cosmique.

> Thierry Stolarczyk

Service de physique des particules (SPP)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)



F. Montané/CNRS/IN2P3 et UFI.

Figure 1. Vue d'artiste du détecteur Antarès, un réseau de 900 photodétecteurs équipant 12 lignes de 450 mètres de haut à 2 500 mètres de profondeur. Ces lignes délimitent un volume de 20 millions de tonnes d'eau utilisée pour observer la lumière Cherenkov des particules qui la traverse (les échelles et le nombre d'éléments ne sont pas respectés).

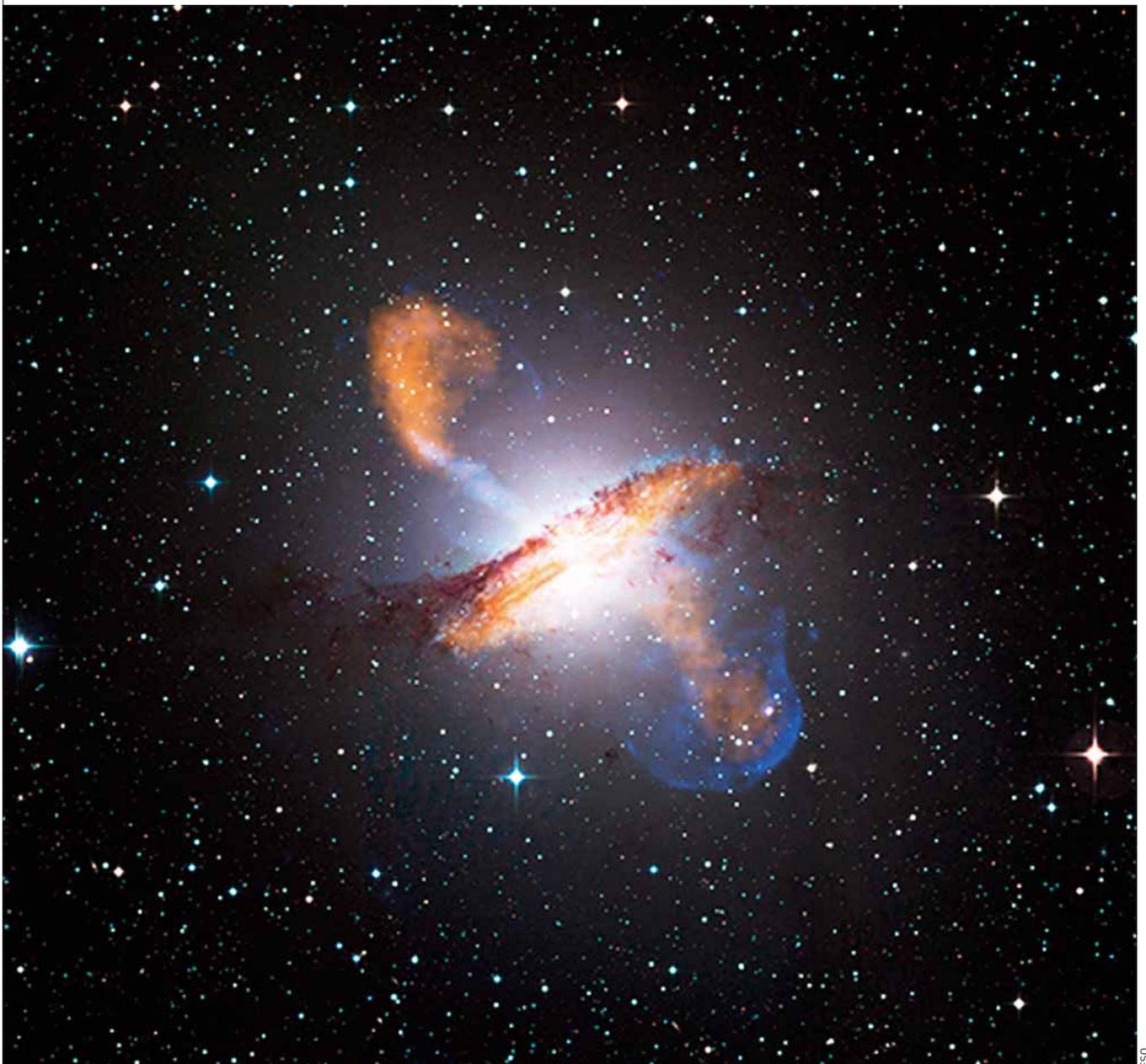
POUR EN SAVOIR PLUS

T. STOLARCZYK, *Le neutrino, particule ordinaire*, Collection Les petites pommes du savoir, Editions du Pommier, 2008.

<http://antares.in2p3.fr> et <http://www.km3net.org>

Des spectro-imageurs de nouvelle génération

En même temps que l'Année mondiale de l'astronomie, 2009 célébrera le 400^e anniversaire des premières observations faites avec une lunette astronomique, par Thomas Harriot et Galileo Galilei, sur les montagnes lunaires, les taches solaires, les phases de Vénus ou encore les satellites de Jupiter. **Aujourd'hui, les astrophysiciens ne se contentent plus de télescopes posés à terre mais envoient leurs observatoires dans l'espace pour mieux scruter l'Univers.** Parmi les instruments embarqués figurent les spectro-imageurs capables de faire, à la fois, de la spectrométrie et de l'imagerie. La contribution du CEA a été particulièrement significative dans la conception, le développement, la construction, la qualification de ces instruments dont une nouvelle génération est en train de naître.



Centaurus A, vue en optique, en ondes submillimétriques (orange) et en rayons X (bleu).

Observer l'Univers dans le domaine de la lumière submillimétrique

Le 14 mai 2009, Herschel et Planck, deux satellites de l'Agence spatiale européenne (ESA) dont le poids avoisine les cinq tonnes, ont été lancés ensemble par une fusée Ariane 5, à partir du Centre spatial guyanais de Kourou, et placés sur une orbite solaire à 1,5 million de kilomètres de la Terre, plus précisément au point de Lagrange L2, considéré comme le meilleur endroit accessible pour observer les rayonnements de longueurs d'onde submillimétriques et millimétriques.

Le CEA, fortement soutenu par le Cnes, a contribué au développement, à la réalisation et à la qualification de deux des trois instruments embarqués par Herschel. Il s'agit de PACS (pour *Photodetector Array Camera and Spectrometer*) et de SPIRE (pour *Spectral and Photometric Imaging Receiver*), deux spectro-imageurs bolométriques de moyenne résolution : le premier efficace dans la gamme spectrale 60-210 μm et le second entre 200 et 650 μm .

Dans le froid des premiers temps galactiques

Herschel, avec son miroir de 3,5 mètres de diamètre, est le plus grand télescope spatial placé en orbite à ce jour. Conçu au profit de l'ensemble de la communauté astronomique mondiale, il embarque un imposant cryostat de 2 500 litres d'hélium, liquide superfluide destiné à refroidir les instruments à des températures inférieures à $-271\text{ }^\circ\text{C}$. Pour les astrophysiciens, il s'agit de minimiser l'émission infrarouge et submillimétrique du nouvel observatoire et donc d'augmenter le contraste des sources observées.

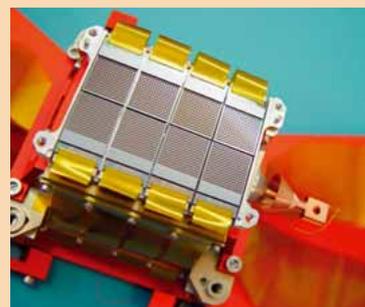
Le télescope spatial Herschel va ouvrir une nouvelle fenêtre d'observation, celle donnant sur l'Univers froid. Là s'initient les phases les plus précoces de la gestation des étoiles mais aussi les étapes les moins connues de l'évolution des galaxies. Il faut dire, qu'à ce jour, les modèles mis à la disposition des chercheurs en matière de formation et d'évolution s'avèrent encore insuffisamment confrontés à la réalité des observations. La première cause en est que ces phénomènes ne sont pas lisibles en lumière visible, mais uniquement dans l'infrarouge lointain et au-delà. Or, ces gammes de longueur d'onde souffrent d'une forte absorption du rayonnement par l'atmosphère. Herschel remédie à cette situation en apportant des mesures de température et de densité de matière, en révélant les espèces moléculaires en jeu, mais aussi en apportant des informations sur la dynamique des objets étudiés. L'autre raison permettant de comprendre l'insuffisance des détecteurs actuels tient aussi à l'opacité atmosphérique. Il aura fallu attendre le début des années 1990 et l'apparition des premiers détecteurs bolométriques pour que les chercheurs disposent enfin d'instruments suffisamment sensibles pour mesurer le rayonnement dans le domaine millimétrique.

L'observatoire Herschel a grandement contribué au développement de ces bolomètres aux longueurs d'onde inférieures au millimètre et à stimuler les recherches technologiques en la matière (voir encadré).



Le 14 juin 2009, le télescope spatial Herschel, alors situé à plus d'un million de kilomètres de la Terre, a porté son premier regard sur une galaxie. Cette image de l'Univers dans l'infrarouge submillimétrique, avec une finesse de résolution inédite, a été saisie par la caméra de bolomètres de l'instrument PACS, conçue et réalisée par le CEA.

Un bolomètre (du grec *bolè* qui signifie « radiation » et *metron*, « la mesure ») est un détecteur thermique de rayonnement. Il s'agit donc d'un dispositif capable de mesurer un flux d'énergie incident, porté par des photons ou des particules massives, et de le convertir en chaleur. Pour une quantité d'énergie donnée, plus la masse (donc la capacité calorifique) du dispositif est faible, plus l'élévation de température s'avère importante. À très basse température, ce phénomène s'amplifie par une forte chute de la capacité calorifique de la matière.



Le bolomètre est une sorte de thermomètre ultrasensible, capable de détecter d'infimes variations de température (quelques millièmes de degré). Ici, le plan focal bolométrique 32x64 pixels de l'instrument PACS.



À droite : une vue d'artiste du satellite Herschel dont le télescope et l'instrumentation ont été placés au-dessus d'un réservoir d'hélium. À gauche : Herschel étudiera les sites de formation d'étoiles dans une gamme d'énergie inexplorée (image de Rho Ophiucius vue par le satellite ISO).



Le cryostat d'Herschel contient 2 500 litres d'Hélium, ce qui assure à la mission une autonomie d'environ 3 ans. Il maintient l'ensemble du plan focal à une température de -271°C . Le télescope est, quant à lui, refroidi passivement à -200°C grâce à une protection thermique.

Défis technologiques en chaîne

La contribution matérielle du CEA a été particulièrement significative concernant le spectro-imageur PACS. D'abord, par une implication pluristructurale incluant l'Institut nanosciences et cryogénie (Inac) et l'Institut de recherches sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu), tous deux faisant partie de la Direction des sciences de la matière, avec le Laboratoire d'électronique et de technologies de l'information (Leti) de la Direction de la recherche technologique. Ensuite, parce que cette coopération

a permis de réaliser une caméra complète, incluant les détecteurs, le **cryoréfrigérateur** $0,3\text{ K}$, la mécanique et l'électronique nécessaire au pilotage ainsi qu'à l'acquisition des données et, bien sûr, les matrices de bolomètres spécialement développées pour les besoins de la mission.

Aujourd'hui, les équipes du CEA ont maîtrisé la réalisation de plans focaux de plusieurs milliers de **pixels** par des procédés de fabrication collective, dérivés de la micro-technologie du silicium développée par le Leti. Il s'agit d'un bond technologique comparé à l'offre des autres laboratoires se contentant seulement de quelques dizaines voire de quelques centaines de détecteurs. Leur limitation résulte des dispositifs mis en place pour capter le rayonnement : cornets en face de chaque détecteur, sphères intégrant, assemblage manuel de chaque pixel, etc. Nos avancées ont bénéficié du contexte exceptionnel des années 1990, marquées par l'essor de la micro-électronique, notamment avec l'avènement de puces capables de contenir différents types de capteurs obtenus par gravure profonde et collective du silicium (micro-accéléromètres pour les *airbags* équipant les véhicules automobiles, détecteurs de méthane destinés à l'habitat...). À cet élan technologique s'ajoutait une circulation de l'information plus détendue que celle qui avait été en vigueur au cours des années précédentes : des idées anciennes concernant l'absorption des ondes **électromagnétiques** sont redevenues au goût du jour. Elles ont été adaptées au problème de la détection par les équipes du Leti pour être compatibles avec les procédés de fabrication collective. Plus rien ne s'opposait à la réalisation de grandes matrices de détecteurs.

Reste, pour les chercheurs, à relever un autre défi, celui de faire en sorte que la sensibilité des nouveaux détecteurs ne soit plus limitée que par les fluctuations de rayonnement émanant du miroir du télescope (pourtant refroidi à près de -200°C). Jusqu'à présent, les détecteurs nus dont la surface n'atteint pas le mm^2 , pouvaient déjà distinguer l'équivalent d'une ampoule électrique de 100 Watt située à 300 km de là. Avec le télescope Herschel, l'observatoire fera bien mieux en détectant une source analogue mais placée, cette fois, à la distance de la Lune ! Parvenir à une telle performance suppose de refroidir chaque bolomètre, véritable détecteur thermique de rayonnement, à une température bien plus basse que celle de l'instrument, soit $0,3\text{ K}$. Pour atteindre cette température dans l'espace, les chercheurs recourent à des cryoréfrigérateurs à évaporation d'hélium (^3He) en circuit fermé, développés par le Service des basses températures (SBT) du CEA. La principale difficulté soulevée par ce type de système réside dans le « budget » de puissance totale disponible sur le plan focal, à savoir $10\ \mu\text{W}$ – puissance indispensable pour la polarisation, la lecture, les connexions électriques et mécaniques des détecteurs. La mise au point d'un **multiplexage** astucieux a permis aux chercheurs de mettre en œuvre 2 560 bolomètres opérationnels sur la caméra de PACS, dans ce « budget » de puissance, alors que l'instrument SPIRE, de facture plus classique bien que pourvu du même cryoréfrigérateur, n'en pilote que 300 !



F. Vigouroux/CEA

Il faut travailler sur la problématique du refroidissement des détecteurs embarqués sur les satellites, pour que ceux-ci marchent parfaitement durant au moins dix ans. Les cryoréfrigérateurs refroidissent les détecteurs à quelques centaines de millikelvins. Ici, essais thermiques sur le cryoréfrigérateur de rechange du satellite Herschel.

Ces détecteurs se répartissent en deux plans focaux dans les gammes respectives de 60 à 130 μm et 130 à 210 μm . Dans la caméra, leur distribution permet de cartographier la même zone du ciel mais à des longueurs d'onde différentes. À plus courte longueur d'onde, la complexité du plan focal s'établit à 64 x 32 pixels, ce qui permet de bénéficier au mieux de la résolution du grand miroir d'Herschel ; en revanche, une complexité de 32 x 16 pixels suffit aux plus grandes longueurs d'onde. Chaque plan focal est formé de modules 16 x 16 pixels « aboutables » sur trois côtés. Et comme les détecteurs présentent une large bande spectrale d'absorption, le montage des modules s'opère indifféremment sur l'une ou l'autre des voies optiques. Seuls les filtres optiques placés devant chaque plan focal définissent alors la gamme de longueurs d'onde. Chaque pixel du module correspond à un bolomètre silicium préalablement hybridé, au moyen d'une bille en indium, à un circuit de lecture et de multiplexage en technologie CMOS (pour *Complementary Metal Oxide Semiconductor*)⁽¹⁾. L'opération d'hybridation conduit à trois fonctionnalités :

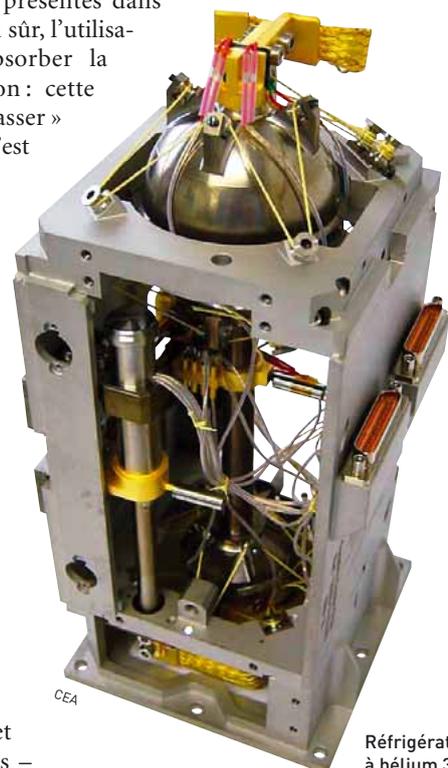
- l'interconnexion électrique habituelle du bolomètre au circuit de lecture ;
- la réalisation d'une cavité optique pour piéger efficacement la lumière incidente ;
- la tenue mécanique et la thermalisation du bolomètre.

La taille des billes d'hybridation a été calculée pour que la cavité résonnante s'accorde à la longueur d'onde à absorber. Cette cavité comprend la grille bolométrique ainsi qu'un réflecteur situé sur le circuit CMOS : elle favorise l'absorption maximale de l'onde incidente, proche de l'unité. L'absorption s'effectue dans un métal déposé sur la grille et dont l'impédance de surface est adaptée à celle du vide.

(1) Succédant aux transistors bipolaires, la technologie CMOS consiste à fabriquer des composants électroniques à faible consommation électrique dédiés à la conception des processeurs.

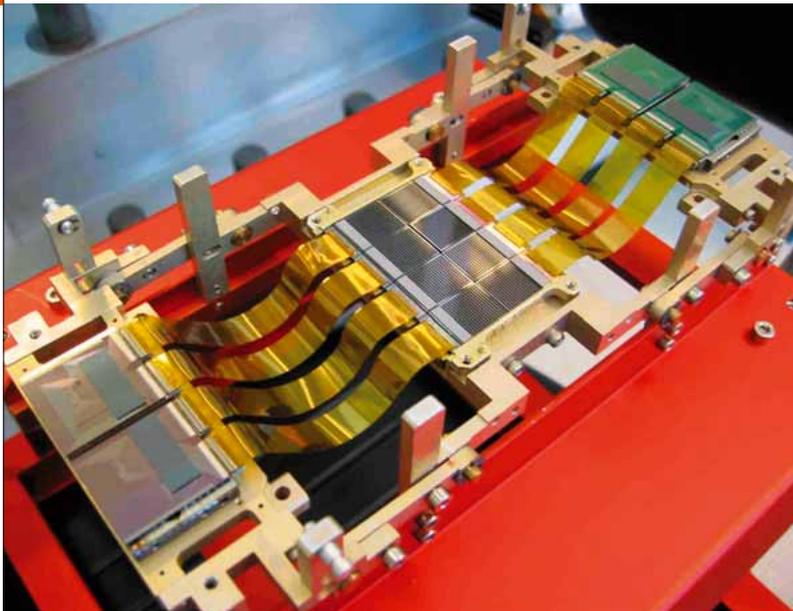
Quant à la grille bolométrique en silicium, elle se trouve suspendue par des poutres très fines ($\approx 2 \mu\text{m}$) et faiblement conductrices de la chaleur. Ce dispositif permet au rayonnement ténu absorbé d'induire une élévation mesurable de sa température. Enfin, un thermomètre en silicium dopé, situé au centre de la grille, réalise la mesure en exploitant une loi exponentielle de la résistance avec la température. Il révèle un coefficient de température de près de 3 000 %/K. Comparée à une surface « pleine », la grille présente un double avantage : d'abord, celui de posséder une masse calorifique plus faible garantissant une vitesse de réponse thermique ; ensuite, celui d'offrir une moindre susceptibilité aux particules cosmiques ionisantes présentes dans l'environnement spatial. Bien sûr, l'utilisation d'une grille pour absorber la lumière peut poser question : cette lumière n'allait-elle pas « passer » par les trous de la grille ? Ce n'est pas le cas pour la bonne raison que la lumière ne « distingue » pas les détails inférieurs à sa longueur d'onde. Il suffit donc de fabriquer une grille d'un pas inférieur à la longueur d'onde à détecter.

Concernant les modules 16 x 16, chacun d'entre eux fut évalué individuellement lors de campagnes de tests réalisées entre 2003 et 2005. Au vu des performances, ils ont été intégrés dans les plans focaux et étalonnés une première fois. Ensuite, une fois la caméra complète intégrée dans l'instrument PACS – cryoréfrigérateur et l'électronique de vol compris –



CEA

Réfrigérateur à hélium 3.



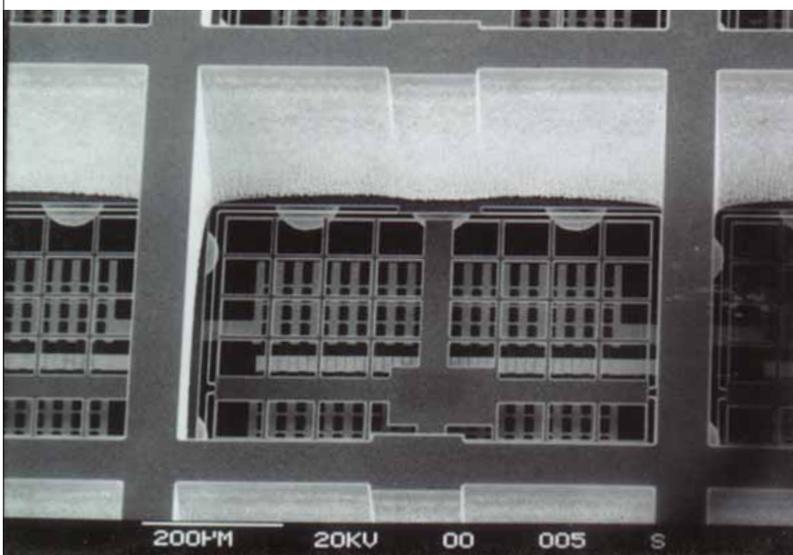
Un des plans focaux bolométriques (32 x 64 pixels) équipant l'instrument PACS.

un étalonnage final a pu être opéré en deux étapes : la première, réalisée sur le centre du CEA de Saclay, en 2006, et la seconde, à Garching (Allemagne), l'année suivante. Au début de l'année 2008, ce fut au tour de l'instrument PACS de prendre place à bord du satellite Herschel avec SPIRE et HIFI (pour *Heterodyne Instrument for Far-Infrared*). Les derniers ajustements réalisés (changement des connecteurs défectueux du satellite, re-routage des câbles pour éviter les perturbations dues aux panneaux solaires...), le satellite fut déclaré « bon pour le service » en décembre 2008.

Perspectives

Actuellement, les équipes ayant développé cette caméra submillimétrique tendent leurs efforts vers deux directions.

- La première consiste à pousser les matrices de bolomètres de PACS vers les plus grandes longueurs d'onde afin de les installer sur de grands télescopes



Photographie au microscope électronique à balayage d'un pixel bolomètre.

au sol. L'opération nécessite l'adaptation préalable de ces matrices aux différentes « fenêtres » atmosphériques, c'est-à-dire aux différentes bandes spectrales étroites où l'atmosphère (en altitude) n'est pas totalement opaque (200, 350, 450 et 865 μm). L'intérêt de ce travail ne réside pas tant dans la sensibilité des mesures (impossible de rivaliser avec le spatial !) que dans l'utilisation de très grands télescopes (12 à 15 mètres de diamètre) capables d'offrir des pouvoirs séparateurs bien plus importants. Leur adaptation aux plus grandes longueurs d'onde se fera surtout par l'augmentation de la taille des billes d'hybridation.

- L'autre voie concerne le développement de détecteurs beaucoup plus sensibles destinés aux futures missions spatiales.

Aujourd'hui, deux projets bénéficient déjà de ces développements. Il s'agit d'ArTeMiS (pour Architecture de bolomètres pour des télescopes submillimétriques au sol), une caméra bolométrique de 5 000 pixels destinée au télescope APEX (pour *Atacama Pathfinder Experiment*), installé au Chili, et de PILOT (pour *Polarized Instrument for Long wavelength Observation of the Tenuous interstellar medium*), expérience dotée de deux plans focaux, montés dans une caméra embarquée sous ballon, pour mesurer l'émission polarisée du rayonnement en provenance de la **Voie lactée**.

Enfin, l'optimisation du bolomètre devrait également pouvoir servir à diverses applications à très faible flux de fond. C'est le cas de SPICA (pour *Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics*), mission spatiale conduite par l'**Agence japonaise (JAXA)** en collaboration avec l'**Agence spatiale européenne (ESA)**, dont le lancement interviendra à l'horizon 2018. Ce télescope spatial utilisera le même miroir qu'Herschel mais refroidi à -268 °C ! Pour optimiser au maximum cette nouvelle configuration, les chercheurs devront augmenter la sensibilité des détecteurs d'un facteur 100 au minimum. Pour atteindre une telle sensibilité (puissance de bruit de 10^{-18} watts), le refroidissement du bolomètre silicium sera abaissé jusqu'à 0,05 Kelvin.

Afin de répondre aux défis lancés par cette nouvelle mission, le CEA s'est engagé dans une phase d'études préliminaires. Par exemple, les chercheurs du SBT travaillent déjà à la conception d'un cryoréfrigérateur à désaimantation **adiabatique** pour l'espace. SPICA devrait ouvrir la voie à d'autres projets passionnants comme les expériences FIRI (pour Interférométrie bolométrique dans l'espace) ou BPOL (pour Mesure de la **polarisation** du fond cosmologique à 3 K).

> Patrick Agnese

Département d'optronique
Laboratoire d'électronique
et de technologies de l'information (Leti)
Direction de la recherche technologique (DRT)
CEA Centre de Grenoble

> Louis Rodriguez

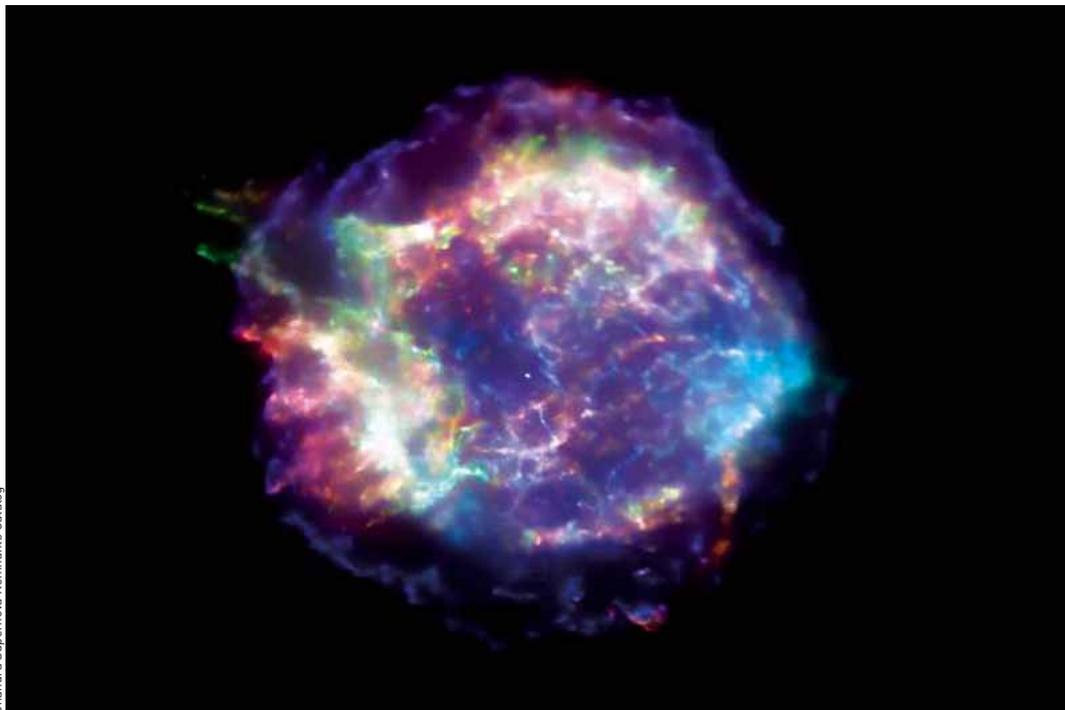
Service d'astrophysique (SAP)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles
(CEA-Université de Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

L'univers des rayons X

S'il doit exister un observatoire pour nous éclairer sur l'astronomie des rayons X dans l'Univers, sans nul doute s'agit-il d'IXO. L'intérêt des chercheurs pour ce rayonnement s'explique parce que la plupart des sources astrophysiques émettent, peu ou prou, en rayons X et que ces derniers sont une véritable mine de renseignements scientifiques sur ces sources, constituant ainsi un merveilleux outil d'observation.

L'atout d'IXO (pour International *X-ray Observatory*; voir encadré) réside dans sa capacité d'observer sur une très longue durée dans un environnement extrêmement stable. Pour mener à bien sa mission, il emportera un

spectro-imageur à base de matrices de micro-calorimètres, possédant la meilleure résolution spectrale jamais atteinte par un spectromètre dispersif en énergie, de 2 eV pour des photons X de 6 keV.



Reste de la supernova (étoile qui explose en fin de vie) Cassiopée A. L'image en rayons X, obtenue par le satellite Chandra, montre en fausses couleurs l'expansion d'une bulle de gaz à plusieurs millions de degrés à l'intérieur d'une enveloppe d'électrons extrêmement énergétiques.

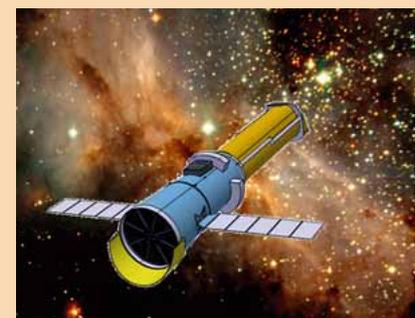
Chandra Supernova Remnants Catalog

Dans les lumières d'IXO

IXO est le projet phare de l'astronomie des rayons X en ce début de siècle. Ce projet est né de la fusion de deux grands projets. L'un américain, Constellation-X, qui devait être une batterie de quatre sondes observant simultanément la même région du ciel et l'autre européen, XEUS (pour *X-ray Evolving Universe Spectroscopy*). Celui-ci était constitué de deux sondes, l'une « miroir » et l'autre « détecteur », volant en tandem à la précision de quelques millimètres dans les trois dimensions. Essentiellement pour des raisons de coût, les deux projets sont en cours de fusion depuis août 2008. Le nouveau projet envisagé consiste en un satellite déployable. C'est-à-dire qu'il partira dans la coiffe de la fusée, replié, et qu'une fois dans l'espace, un mécanisme permettra de l'étendre jusqu'à une dizaine

de mètres de distance focale (un peu à la manière d'une longue-vue de marine). Par ailleurs, le miroir de ce télescope sera d'un type tout à fait révolutionnaire. Jusqu'à maintenant, presque tous les observatoires spatiaux en rayons X ont utilisé la technique des coquilles métalliques à symétrie cylindrique enchâssées l'une dans l'autre pour ces miroirs à incidence rasante. La technique proposée pour le très grand miroir d'IXO sera basée sur les développements des technologies du silicium. L'élément de base de ce miroir est constitué de silicium cannelé et cintré. Chaque élément est collé à son voisin pour former une structure ressemblant à une galette de microcanaux. L'avantage énorme de cette technologie réside tant dans sa légèreté que dans la rigidité de l'ensemble, ce qui rend le miroir

très attrayant pour partir en fusée. Cet observatoire sera placé au **point de Lagrange L2** du système **Soleil-Terre**, ce qui permettra des observations de très longue durée (quasiment sans éclipse) dans un environnement extrêmement stable.



Vue d'artiste d'IXO.

J-L. Sauvageot/CEA

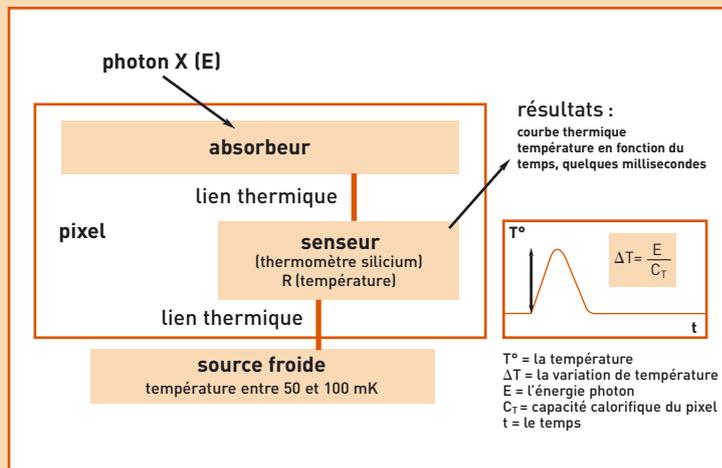
Principe du microcalorimètre X

Réaliser la mesure calorimétrique d'un seul **photon** X suppose de prendre en compte deux notions majeures :

1- La propriété de la grande majorité des matériaux d'avoir une capacité calorifique spécifique dont la valeur diminue avec la température. Cela permet d'obtenir une élévation de température non négligeable avec la seule énergie d'un photon X dissipée dans un **pixel** détecteur, sous réserve qu'il soit de petite dimension (d'où le terme de microcalorimètre) et, surtout, maintenu à basse température (de l'ordre de 0,05 K).

2- L'existence de senseurs (thermomètres) suffisamment sensibles à ces très basses températures, pour mesurer une élévation de température (quelques microkelvins).

Les thermomètres le plus souvent utilisés délivrent un signal électrique sous forme d'une tension (senseur semi-conducteur, silicium ou **germanium**) ou d'un courant (senseur à transition supraconductrice) proportionnel à la température. La mesure de la courbe temporelle (pulse induit par le dépôt d'énergie du photon X) permet de déterminer l'énergie déposée avec une excellente **résolution** spectrale.



Structure d'un pixel microcalorimètre.

Une impédance thermique entre l'absorbeur et le senseur favorise une thermalisation complète de l'énergie dans l'absorbeur avant que la chaleur correspondante ne soit transmise au senseur. Ensuite, la chaleur évacuée lentement vers la source froide mettra le pixel à un niveau qui le rendra sensible au rayon X incident. Entre temps, sera réalisée la mesure fine de la courbe de température, associée par le thermomètre.

Le rayonnement X comme traceur

La quasi-totalité des sources astrophysiques émettent des **rayons X** et certaines n'émettent d'ailleurs que des rayons X. À ces énergies (l'usage veut que l'on s'exprime en énergie pour traiter du rayonnement X), les **photons** se font pénétrants et donc capables de ramener des informations précieuses, notamment sur les processus enfouis au sein des nuages de matière. Le **rayonnement X** fait donc office de traceur, à la fois pour la matière à très haute température (quelques millions de degrés), et pour les **électrons** à haute énergie en interaction avec un **champ magnétique** ou des photons de basse énergie. La matière peut être portée à ces hautes températures par les potentiels de gravitation intenses au sein des **amas de galaxies**, auprès des objets compacts massifs ou encore à l'occasion d'explosions stellaires. En collectant et détectant le rayonnement X, les chercheurs ouvrent une nouvelle fenêtre donnant sur l'Univers « violent ». Parmi les

atouts des rayons X, celui d'être réfléchis sous incidence rasante permet l'utilisation de télescopes à miroir. L'interaction des rayons X avec le milieu détecteur, relativement ponctuelle, débouche sur une imagerie à haute **résolution angulaire**. Il n'en va pas ainsi dans le domaine gamma à plus haute énergie où les optiques par réflexion deviennent inopérantes, faisant que les collimateurs n'autorisent qu'une imagerie à basse résolution angulaire. Quant au dépôt d'énergie d'un photon, essentiellement obtenu par effet photoélectrique, il tient dans un pixel situé à l'intérieur d'un détecteur matriciel de taille raisonnable. Pour toutes ces raisons, la **spectrométrie dispersive en énergie** à haute efficacité **quantique** devient aujourd'hui envisageable pour chaque photon absorbé. Il s'agit d'une avancée notable comparée aux résultats de la spectrométrie dispersive en longueur d'**onde**. Obtenue, à plus grande longueur d'onde, au moyen de dispositifs optiques comme les réseaux, il s'agissait d'une technique très « dépensière » en photons.

Pour les astrophysiciens, l'observation des **raies** de fluorescence X et du **continuum** (émis thermiquement ou par les électrons en interaction avec le **champ magnétique** ou les photons) ouvre une mine d'informations inédites sur la composition, la densité, la température et la dynamique de la matière à très haute température, mais aussi sur le champ magnétique local. Encore faut-il, à ces astrophysiciens, pouvoir disposer d'une plate-forme spatiale équipée d'un instrument spectro-imageur performant, les rayons X étant arrêtés par l'atmosphère !

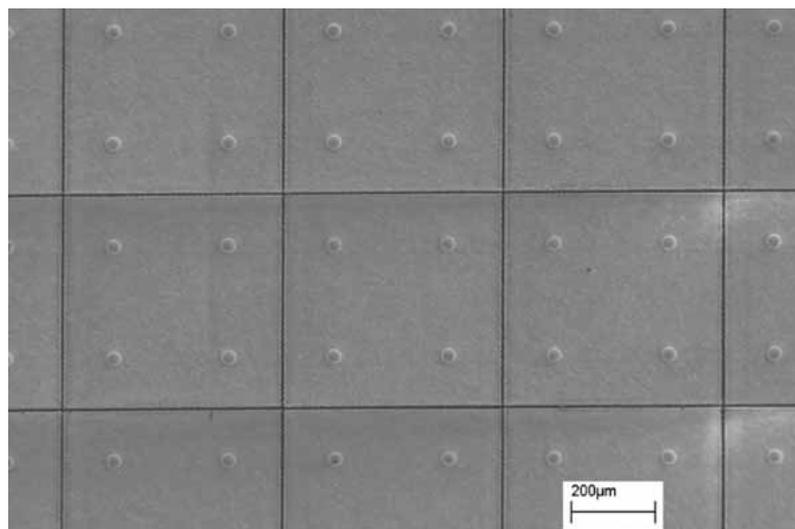
Un savoir-faire virtuose

Lancés en 1999, deux télescopes dédiés à l'astronomie X sont actuellement satellisés en orbite terrestre. Il s'agit de XMM-Newton (pour *X-Ray Multi Mirror*) et de Chandra⁽¹⁾. L'un et l'autre sont équipés de spectro-imageurs à base de CCD (pour *Charge-Coupled Device*), c'est-à-dire de dispositifs à transfert de charge en silicium. Dans leurs détecteurs semi-conducteurs, l'énergie déposée par un photon X se mesure en inventoriant les **paires électrons-trou** créées. La difficulté réside dans le fait que l'énergie de ce photon X est aussi dissipée en chaleur, qui entre en compétition avec la production des paires d'électrons-trou. Dès lors, la quantité d'énergie mesurée fluctue d'un photon X absorbé à l'autre et cela, à énergie incidente équivalente. La résolution spectrale obtenue ne peut alors être meilleure qu'une valeur plancher (120 eV @ 6 keV). Les chercheurs rencontrent là une limite intrinsèque au milieu détecteur (ici, le silicium) et à ce mode de détermination de l'énergie (comptage des paires d'électrons-trou) à laquelle ils ne pourront jamais remédier. Pour que ces fluctuations ne fassent pas obstacle à la réalisation des mesures, la totalité de l'énergie doit se retrouver préalablement sous forme de chaleur et ainsi permettre la mesure de la température associée (c'est de la calorimétrie). Une coopération a été organisée, au sein du CEA, entre le Laboratoire d'électronique et de technologies de l'information (Leti) et l'Institut de

(1) Du nom de l'astrophysicien américain d'origine indienne disparu, en 1995, Subrahmanyan Chandrasekhar.

recherche fondamentale sur les lois de l'Univers (Irfu). Pour ces équipes, il s'agit de développer des matrices de microcalorimètre (voir encadré) en vue d'améliorer la résolution spectrale d'un ou deux ordres de grandeur et ainsi dépasser les détecteurs semi-conducteurs. L'expérience acquise dans le domaine **infrarouge** et **submillimétrique** grâce aux matrices de **microbolomètres** (dans ce domaine de longueur d'onde, il s'agit de la mesure d'un flux) s'est avérée d'autant plus efficace que de nombreuses technologies silicium, déjà utilisées par l'instrument PACS (pour *Photo detector Array Camera and Spectrometer*) se trouvent directement transposables sur les matrices de microcalorimètres. Cette R&D vise à construire des matrices de grande taille (32 x 32 pixels), selon une conception du **pixel** capable d'intégrer les spécifications contraignantes de l'astronomie X (voir encadré *Les lumières d'IXO*). La réalisation des pixels microcalorimétriques ($500 \times 500 \mu\text{m}^2$) par micro-usinage dans une plaque de silicium sur isolant (SOI) appelle un savoir-faire virtuose. Les résultats montrent des senseurs extrêmement fins (moins de $1,5 \mu\text{m}$ d'épaisseur) reliés à la source froide au moyen de poutres de silicium dont la section ne dépasse pas les quelques microns carrés. Autant de performances compatibles avec l'exigence de solidité puisque les senseurs supportent leur assemblage par hybridation, au moyen de billes d'indium, avec des absorbeurs constitués de minces feuilles de tantale. Par ailleurs, il a fallu toute l'expertise du Leti pour réussir l'intégration du thermomètre dans la plaque suspendue. En effet, cet instrument comportant une résistance variable en fonction de la température (de l'ordre du mégohm à 50 mK), le contrôle d'un haut niveau de dopage (à une fraction de pour-cent près) s'imposait, avant de l'homogénéiser par un traitement à haute température. Cette technique de fabrication a permis la réalisation de thermomètres enfin capables d'atteindre les performances requises.

Restait encore à traiter la question des matrices de grande taille. Jusqu'à présent, celles de petite dimension se fabriquaient par assemblage manuel des absorbeurs avec les senseurs, opération réalisée



Matrice d'absorbeur en tantale.

sous microscope. Or, cette technique ne convient pas aux matrices de grande taille. D'où l'idée d'une matrice prototype de 64 pixels hybridés, extrapolable à de plus grandes tailles, que le Leti a réalisée grâce à une technologie de report (absorbeur sur senseur) non plus manuelle mais collective.

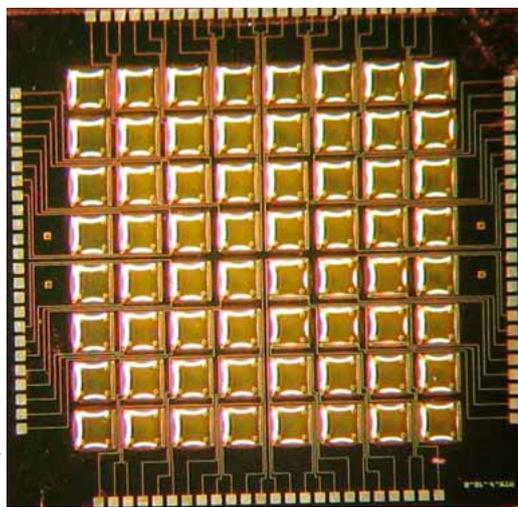
Néanmoins, un obstacle de taille empêche encore la réalisation d'un plan focal à partir d'une mosaïque constituée avec ce type de matrices, à savoir l'inexistence d'une électronique de proximité fonctionnant à basse température. Indispensable à la lecture et au **multiplexage**, cette électronique doit être cryogénique pour trouver sa place dans le cryostat au plus près du détecteur, position qui présente une multitude d'avantages : simplicité, fiabilité, immunité au bruit, augmentation de la bande passante, réduction de la puissance parasite sur les cryoréfrigérateurs de vol (aux performances obligatoirement limitées). Dans cette optique, les chercheurs explorent aujourd'hui des voies originales comme les Transistors à haute mobilité électronique (HEMTs) en GaAlAs/GaAs (arséniure de galium et arséniure de galium-aluminium) ou les ASICs (pour *Application-Specific Integrated circuit*) en silicium-**germanium**. Ces avancées bénéficieront incontestablement à l'amélioration des performances des futurs observatoires dédiés à l'astronomie X, leur surface effective ou leur résolution spectrale notamment. Les chercheurs en sont persuadés : de nouvelles découvertes astrophysiques, aujourd'hui encore imprévisibles, en résulteront.

> **Patrick Agnese**

Département d'optronique
Laboratoire d'électronique
et de technologies de l'information (Leti)
Direction de la recherche technologique (DRT)
CEA Centre de Grenoble

> **Claude Pigot**

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 de Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)



Matrice senseur

Des cryoréfrigérateurs pour l'espace

À l'environnement spatial correspondent des contraintes spécifiques dont la résistance mécanique liée au décollage, l'absence de gravité, la plus critique d'entre toutes concernant la fiabilité d'instruments prévus pour fonctionner 5 à 10 ans sans panne. La solution viendrait de systèmes dotés de pièces mobiles sans frottement, voire dépourvus de pièces en mouvement.



Installation d'un cryoréfrigérateur de vol sur le cryostat de test.

Comment obtenir des températures cryogéniques dans l'espace? Le moyen le plus simple consiste à profiter des ressources naturelles disponibles – par exemple, celles offertes par le vide quasi parfait de l'Univers et le « fond » froid du ciel. L'absence de matière (notamment de gaz) limite les échanges de chaleur aux seuls transferts **radiatifs**. Dès lors, en se positionnant face au fond noir du ciel qui rayonne à environ 2,7 K, il s'avère théoriquement possible de refroidir une surface jusqu'à des températures de seulement quelques kelvins⁽¹⁾. Dommage qu'en pratique, la méthode ne vaille que pour des orbites particulières – les meilleurs systèmes, appelés **radiateurs passifs**, ne permettant pas d'atteindre des températures inférieures à 30 ou 40 K. Une autre solution consiste à prendre un liquide cryogénique, préalablement liquéfié sur terre et stocké dans un réservoir appelé cryostat, puis de profiter du vide intersidéral pour obtenir un refroidissement par évaporation. Cette technique permet

(1) La correspondance entre l'échelle en kelvin (K) avec les degrés Celsius est facile : l'échelle de kelvin prend son origine au zéro absolu (-273,15 °C) et 1 K vaut donc 1 °C.

d'atteindre des températures de 1,5 K en utilisant de l'**hélium** – l'obtention de températures inférieures nécessitant de passer par d'autres solutions technologiques.

Du cryostat au cryoréfrigérateur

Pourtant, les orientations actuelles de la cryogénie spatiale privilégient la suppression de cryostats au profit de systèmes, appelés **cryoréfrigérateurs**, conçus pour refroidir jusqu'aux températures cryogéniques (en dessous de 120 K). En effet, bien que l'utilisation de cryostats soit une technique simple et offrant de multiples avantages, celle-ci n'en présente pas moins deux inconvénients majeurs : une masse et un volume importants qui limitent la durée de mission en raison de l'assèchement du réservoir. En revanche, les cryoréfrigérateurs peuvent fonctionner quasi indéfiniment car leur source électrique s'alimente grâce à l'énergie **photovoltaïque** disponible dans l'espace, ce dont bénéficient déjà presque toutes les missions spatiales.

Le SBT, notamment le Laboratoire cryoréfrigérateurs et cryogénie spatiale, développe depuis plusieurs

années des systèmes de refroidissement adaptés aux différentes contraintes spatiales. Pour les froids extrêmes, la solution consiste à associer plusieurs cryoréfrigérateurs en cascade pour couvrir l'intégralité de la gamme des températures. Ces chaînes cryogéniques peuvent atteindre des températures de 20 mK (-273,13 °C). Actuellement, trois technologies émergent pour obtenir le refroidissement d'un composant destiné à une application spatiale, et à des températures inférieures à 1 K (-272,15 °C) :

- le refroidissement par évaporation utilisant un **isotope** de l'hélium (l'hélium 3) ;
- le refroidissement magnétique par désaimantation **adiabatique** ;
- la dilution, c'est-à-dire les propriétés des deux **isotopes** de l'hélium.

Les équipes du SBT développent toutes ces techniques. La première d'entre elles leur a valu une réputation mondiale depuis son utilisation par les instruments SPIRE (pour *Spectral and Photometric Imaging Receiver*) et PACS (pour *Photo detector Array Camera and Spectrometer*) embarqués sur le satellite Herschel. Pour comprendre le principe du cryoréfrigérateur, il faut savoir que le refroidissement par évaporation répond au même mécanisme physique que la transpiration. Pour l'eau, le passage de l'état liquide à l'état de vapeur requiert de l'énergie ; mais en l'absence de toute source de production extérieure d'énergie, la solution pour en obtenir consiste à ponctionner directement sur l'agitation thermique des **atomes**. Par conséquent, il devient alors possible de procéder au refroidissement. Cette propriété vaut pour tous les fluides ou presque, même la transpiration procède de la sorte pour réguler la température corporelle. Pour l'hélium 3, elle permet d'atteindre des températures de -272,85 °C (300 mK). En revanche, l'hélium 3 ne peut couvrir seul l'intégralité de la gamme depuis la température ambiante. Aussi, pour les besoins de la mission Herschel, a-t-il fallu lui associer de l'hélium 4 (un énorme réservoir d'environ 2 500 litres) indispensable pour obtenir une température d'environ 2 K. Concernant les basses températures, il faut souligner que les avancées ne s'apprécient pas en termes de différence mais plutôt de rapport. En l'occurrence, refroidir de 2 K à 300 mK (rapport 7) s'avère pratiquement aussi difficile que de passer de la température ambiante (293 K) à -230 °C (42 K).

Pour optimiser le taux d'évaporation, les chercheurs procèdent par pompage et, pour gagner en fiabilité, s'appuient sur les propriétés d'adsorption des **charbons actifs**, ce qui leur évite l'emploi de pièces mobiles. Il faut dire que ce matériau offre une surface importante ($\approx 1\,200\text{ m}^2/\text{gr}$) qui, une fois refroidie, « piège » les **molécules** de gaz puis, à l'inverse, les « relâche » lorsqu'elles se trouvent chauffées (phénomène d'adsorption physique lié aux **forces de Van der Waals**). Les températures d'**adsorption** et de désorption dépendent alors de la nature du gaz. Dans le cas de l'hélium, en chauffant le charbon actif à -230 °C (45 K), puis en le refroidissant à -270 °C (3 K), il devient possible d'obtenir les pressions nécessaires à la condensation du liquide, puis à son pompage. Ainsi peut-on alors abaisser la pression et donc la température (figure 1). Entièrement statique, ce processus se révèle très efficace en matière d'amplitude de pression. Dans le cas présent, il permet d'obtenir un taux

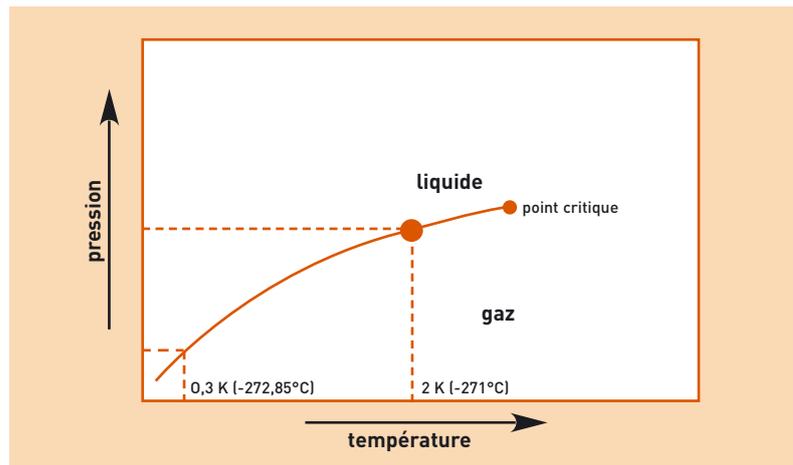
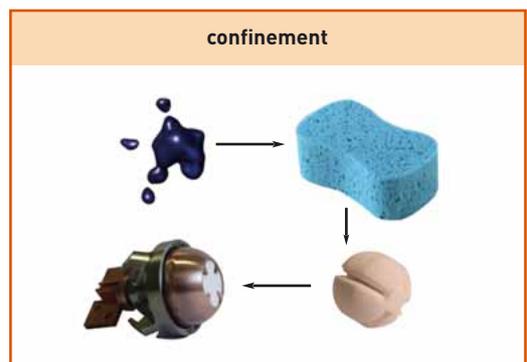


Figure 1. Diagramme de phase de l'hélium 3 avec point extrême du cycle pour le liquide.

de compression/détente de six ordres de grandeur (10^6), ce qui n'a pas d'équivalent avec des systèmes mécaniques.

Un liquide sans gravité

Envoyer des instruments dans l'espace suppose encore de résoudre la question de l'apesanteur. La gestion du liquide se règle par un confinement capillaire au sein d'un matériau poreux jouant le rôle d'éponge. Composé d'une mousse d'alumine, ce matériau présente une porosité ouverte, c'est-à-dire que chaque petite cavité communique avec ses voisines, laissant au liquide la possibilité de se déplacer, et au gaz celle d'être pompé. Le cycle **thermodynamique** ici en vigueur suppose de pouvoir contrôler les gradients thermiques dans le système, c'est-à-dire de maîtriser la répartition des températures. Là encore, le moyen d'y parvenir passe par une technique exempte de toute pièce mobile, à savoir celle des interrupteurs thermiques à gaz d'échange. Dans les systèmes cryogéniques, leur rôle équivaut à celui des interrupteurs électriques : mise en contact thermique de deux composants (écoulement de chaleur) ou, au contraire, isolement de l'un avec l'autre. Le basculement entre la position fermée (*On*) ou ouverte (*Off*) repose sur la présence, ou l'absence, de gaz entre deux pièces concentriques. La gestion du gaz s'opère au moyen d'une minipompe à adsorption, exempte de toute pièce mobile.



Principe du confinement capillaire. L'évaporateur (demi-sphère de titane visible sur la photographie) contient un matériau poreux jouant le rôle d'une éponge.



Essais vibratoires au Centre spatial de Liège. Installation d'un modèle de vol sur la table vibrante.



L. Duband/CEA

Décollage et résistance mécanique

Enfin, parmi les ultimes contraintes liées à l'envoi d'instruments dans l'espace, mais non des moindres, figurent encore l'isolation thermique nécessaire à l'obtention des très basses températures et la tenue mécanique requise pour résister à un décollage de fusée, celui d'Ariane 5 par exemple. Pour les résoudre, les chercheurs utilisent des suspentes en **Kevlar**. Ce matériau présente le double avantage d'une faible conductivité thermique et d'une très forte résistance mécanique (deux fois la résistance d'un fil en acier de même diamètre). Que la durée de vie de ce type de cryoréfrigérateur ne soit pas limitée, *a priori*, découle directement de l'absence de pièce mobile. La preuve en est que plusieurs systèmes fonctionnent en laboratoire, depuis plus de vingt ans, sans que leurs

performances s'en trouvent altérées. En effet, bien qu'utilisant de l'hélium liquide pour leur fonctionnement à basse température, ces systèmes demeurant scellés peuvent se recycler indéfiniment après l'évaporation de la dernière goutte de liquide. La limite vient seulement de la disponibilité de l'étage supérieur. Ainsi, dans le cas de Herschel, le réservoir principal devrait s'assécher après trois ans et demi de fonctionnement.

Les futures missions SPICA (pour *Space Infrared telescope for Cosmology and Astrophysics*) et IXO (pour *International X Ray Observatory*) appelleront des moyens de refroidissement visant des températures plus basses encore (50 mK). Le savoir-faire acquis dans le domaine des systèmes 300 mK à évaporation d'hélium, enrichit le développement en cours d'une architecture originale, associant un système du type d'Herschel avec un ou plusieurs étages de désaimantation adiabatique (refroidissement magnétique). Cette combinaison devrait diminuer, de manière significative, la masse du cryoréfrigérateur et donc augmenter la part de « science » embarquée. Pour ces deux futures missions, la chaîne cryogénique se composera uniquement de cryoréfrigérateurs mécaniques : d'où l'allongement possible de la durée des missions ainsi que l'optimisation de la masse « utile » embarquée. Ces avancées acquises, les chercheurs doivent encore relever plusieurs défis technologiques. Le premier d'entre eux concerne l'association d'un système de type Herschel, qui génère des pics de puissance lors des phases de recyclage, avec les étages supérieurs mécaniques qui, eux, acceptent mal ces pics. L'objectif sera donc d'imaginer et de concevoir une architecture thermique permettant de distribuer aux mieux les rejets thermiques.



CEA

Après le décollage, le satellite se retrouve dans le vide de l'espace, livré à la chaleur du Soleil. Ces conditions peuvent être testées, en salle blanche, sur des modèles d'essais.

> **Lionel Duband**

Service des basses températures (SBT)
Institut nanosciences et cryogénie (Inac)
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Grenoble

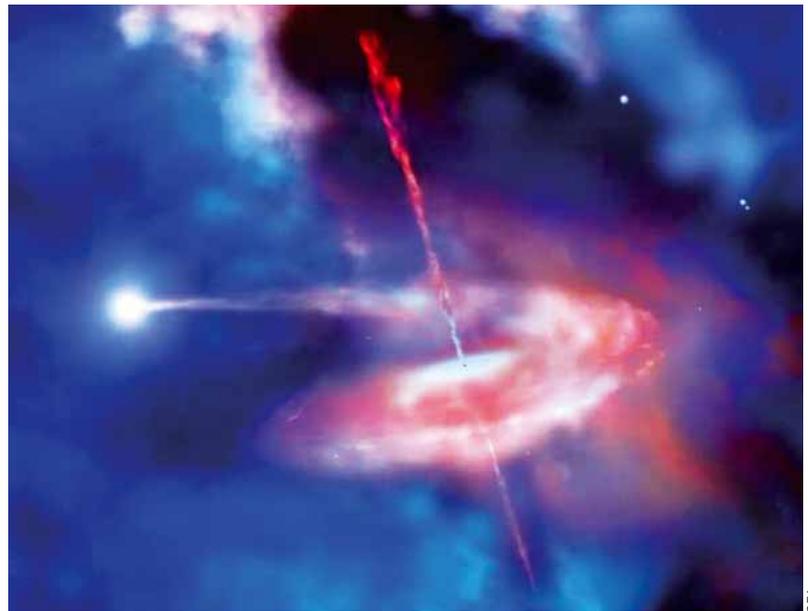
Dans l'Univers extrême et violent

Il est une part encore secrète de l'Univers, celle où se manifestent les trous noirs et les sites d'accélération de particules du rayonnement cosmique. La connaissance de ces phénomènes, parmi les plus énergétiques de l'Univers, suppose d'explorer un domaine particulier du rayonnement cosmique : celui des rayons X durs et des rayons gamma (entre 1 keV et 1 MeV).

Dans le spectre des **rayons X durs** et **gamma**, l'exploration du ciel ne fait que commencer ! Une certitude pourtant : dans cette gamme d'énergie, l'atmosphère oppose une véritable barrière à la progression des **photons**. L'idée sera donc de lancer un télescope spatial pour observer au-delà de cette frontière et qu'il soit doté d'un spectro-imageur. Cet instrument devra détecter les photons gamma, en mesurer la direction d'origine et l'énergie, en déterminer la date d'arrivée (avec une précision d'un millionième de seconde) et si possible encore la **polarisation**. Souvent faibles, parfois lointaines et furtives, les sources recherchées exigent pour leur étude le recensement du plus grand nombre de photons possible. Aussi, les quelques grains de lumière que ces sources émettent, noyés au milieu d'un intense bruit de fond, exigent-ils des instruments d'une très grande sensibilité et de la plus haute efficacité de détection possible pour être observés. Bien que la combinaison de détecteurs performants et innovants avec des technologies spatiales ait permis des avancées spectaculaires, il n'en demeure pas moins que la détection – un par un – des photons gamma dans l'espace figure comme l'un des grands défis lancés aux astrophysiciens.

Révolution dans l'astronomie des hautes énergies

Voilà déjà une vingtaine d'années que les astrophysiciens observant dans la gamme des rayons X durs et gamma, ont troqué leurs scintillateurs pour des détecteurs plus sensibles et plus complexes à base de semi-conducteurs en silicium et en **germanium**, puis surtout en tellurure de cadmium (CdTe), excellent matériau pour la détection des photons gamma. Pour l'astronomie des hautes énergies, ce fut une révolution. En effet, grâce à leur **pixellisation**, ces instruments, véritables appareils photo numériques à rayons gamma embarqués sur des satellites, apportent une finesse d'image, une précision de datation, une sensibilité et une mesure de l'énergie de chaque photon encore jamais atteintes auparavant. Le CEA a joué un rôle majeur dans la conception de cette nouvelle génération de spectro-imageurs semi-conducteurs et dans l'optimisation de leurs performances. Le degré de précision acquis résulte de la détermination des chercheurs à protéger leurs détecteurs, de plus en plus miniaturisés et pixellisés, contre le bruit tant physique (dû aux rayons cosmiques) qu'électronique. La première grande caméra à bénéficier des performances technologiques apportées par l'usage de détecteurs à base de tellurure de cadmium (CdTe) fut ISGRI (pour *Integral Soft Gamma-Ray Imager*) dont la surface de détection atteint un quart de mètre carré. Installée à bord du satellite INTEGRAL (pour



Vue d'artiste d'un trou noir accrétant la matière de son étoile compagnon dans un système binaire.

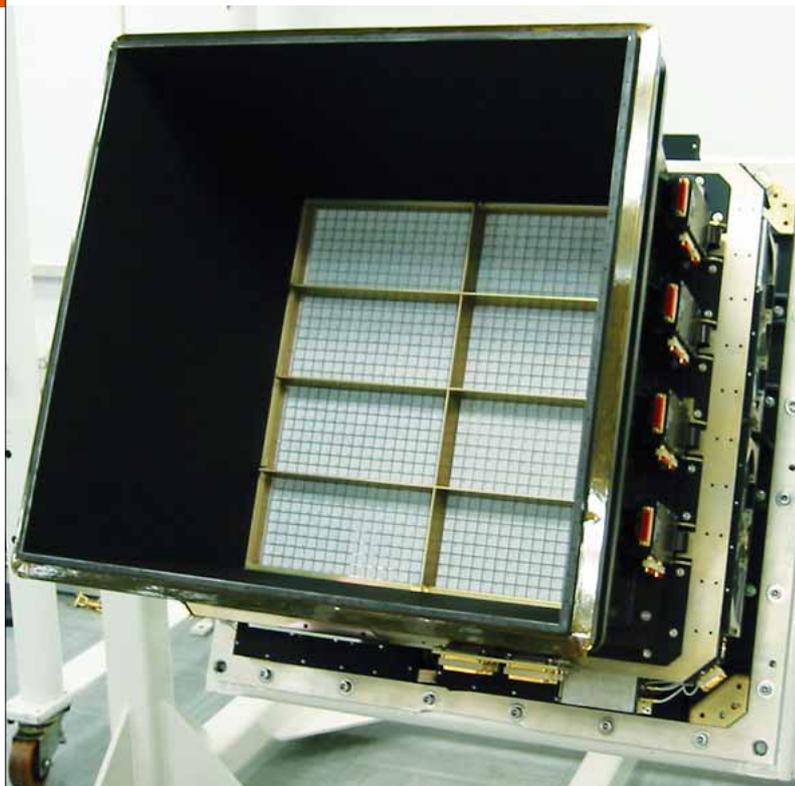
International Gamma Ray Astrophysics Laboratory), il s'agit d'une mission de l'**Agence spatiale européenne (ESA)** lancée en 2002. Le CdTe figure parmi les matériaux les plus efficaces pour la détection des photons gamma. Cette réussite du CEA a impulsé le développement de nouveaux petits « bijoux technologiques » toujours plus performants. Ainsi, les efforts conjoints de R&D conduits par le CEA et le **Cnes** depuis ISGRI (pour *Integral Soft Gamma-Ray Imager*), garantissent aujourd'hui les performances scientifiques du futur télescope spatial ECLAIRS, dédié à la détection des sursauts gamma ou d'un télescope haute énergie de nouvelle génération du type de SIMBOL-X.

De nouveaux instruments pleins d'esprit

Pour filer la métaphore, le portrait des détecteurs de la nouvelle génération dédiés à l'astronomie X dur et gamma spatiale peut se dessiner en quatre traits :

- L'esprit leur vient d'un système de détection composé d'un senseur en CdTe et de son électronique associée placés au sein d'un module de détection miniature complexe, « spatialisable » et optimisé scientifiquement (une caméra gamma se compose d'une mosaïque de ces modules). Les progrès en détection gamma spatiale reposent donc sur des efforts simultanés consentis sur les senseurs (CdTe à électrode Schottky⁽¹⁾ fortement segmentée), leur

(1) L'électrode Schottky est réalisée avec un contact métal semi-conducteur formant une diode polarisée en inverse.



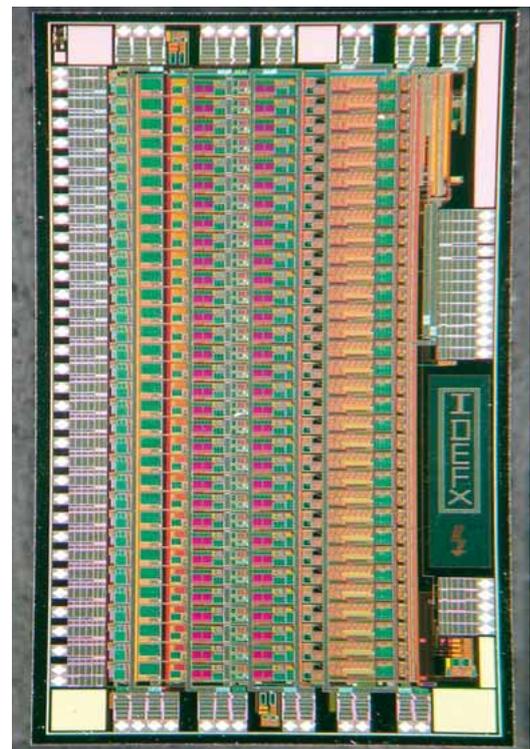
Grâce à sa caméra constituée d'une matrice de semi-conducteurs en tellure de cadmium (CdTe), de 128 x 128 pixels, le télescope IBIS (pour *Imager on Board the Integral Satellite*), observe la voûte céleste avec une résolution angulaire d'une dizaine de minutes d'arc. La caméra ISGRI a été réalisée par le CEA avec le soutien du Cnes (photo réalisée, en 2001, à LABEN/Milan, lors de l'intégration de l'instrument).

électronique de lecture de type ASIC/CMOS (pour *Application Specific Integrated Circuit/Complementary Metal Oxide Semiconductor*) et leur assemblage en composants « hybrides ». Pour pimenter l'affaire, les différents objets doivent être compatibles avec l'environnement spatial (thermique, radiation, fiabilité...) et résistants au lancement par une fusée. Ces dernières années ont vu, à la fois, les progrès notables de l'imagerie par miniaturisation des **pixels** (500 μm de côté) et les performances spectrales. Cette double avancée a favorisé l'extension de la gamme spectrale vers les basses énergies ainsi qu'une meilleure précision dans la mesure de l'énergie de chaque photon. L'extension à basse énergie s'avère déterminante pour l'astronomie gamma. En effet, c'est en étudiant simultanément les photons de basse énergie (quelques **keV**) et les photons de haute énergie que certains astres révèlent enfin leur vraie nature : **trous noirs** ou pas et dans quel état...

- Leur cœur bat grâce au CdTe, un matériau dont les qualités de **spectromètre** sont désormais reconnues pour les températures proches de la température ambiante (entre -40°C et $+20^\circ\text{C}$). Il s'agit d'un cristal lourd (le numéro atomique moyen « Z » vaut 50) et dense (≈ 6) lui permettant de stopper efficacement les photons gamma jusqu'à quelques centaines de keV alors que ces derniers traversent généralement la matière sans interagir. Ainsi, lorsqu'un photon gamma interagit avec un **électron** du cristal, ce dernier se trouvant arraché, emporte avec lui la quasi-totalité de l'énergie cédée par le photon. Quant à l'électron, il termine sa course dans le cristal en produisant des **paires « électron-trou »** en nombre proportionnel à la

quantité d'énergie déposée par le photon incident. Un champ électrique appliqué au cristal accélère les paires en question. La mise en mouvement de ces nouveaux porteurs libres induit un courant transitoire, précieux signal qu'il va falloir « capturer » et traiter. Notons que ces porteurs ne migrent pas à la même vitesse selon qu'il s'agisse de trous ou d'électrons. L'écart est d'ailleurs si grand (un facteur 10 environ) que les porteurs les plus lents sont assujettis au phénomène de piégeage, provoquant « une perte de charge ». Ce phénomène, particulièrement accentué dans le CdTe, suppose un traitement spécifique de son signal. Enfin, la cristallogénèse du CdTe demeurant très complexe, la réalisation de ce semi-conducteur reste difficile et limite la taille des cristaux à quelques centimètres carrés de surface pour quelques millimètres d'épaisseur. Aujourd'hui, les progrès de l'industrie pour la fabrication des cristaux, la réalisation des contacts métal/semi-conducteurs et la stabilité des senseurs ont permis de bouleverser les limites en s'approchant des performances ultimes de ce matériau. En particulier, les cristaux monolithiques les plus récents, équipés d'électrodes segmentées, présentent des **courants de fuite** (source limitant le bruit électronique) 1 000 fois plus faibles qu'il y a 10 ans. Il s'avère désormais possible d'accélérer les porteurs pour limiter le piégeage et traiter ainsi le signal plus aisément. Le traitement du signal est réalisé par les microcircuits IDeF-X (pour *Imaging Detector Front-End*).

- La micro-électronique jouerait le rôle de système nerveux central avec des circuits adaptés aux signaux spécifiques des détecteurs CdTe et aux contraintes de leur intégration physique dans un composant hybride modulaire. Aujourd'hui, la production des circuits IDeF-X s'effectue grâce à une technologie CMOS



Microcircuit IDeF-X V2 pour ECLAIRS. Les 32 structures parallèles, visibles sur l'image, sont des chaînes de spectrométrie indépendantes séparées de seulement 170 μm . Ce circuit à bas bruit et basse consommation est résistant aux radiations de l'environnement spatial.

standard et abordable. Dessinés avec un soin particulier, ils supportent l'environnement **radiatif** selon deux modalités : soit en termes de dose cumulée dont l'effet modifie les propriétés des transistors et altère les performances des circuits, soit au plan d'événements singuliers du **rayonnement cosmique** dont l'effet peut aller jusqu'à la destruction des circuits. Bien que leur surface n'excède pas une vingtaine de millimètres carrés seulement, les puces électroniques IDeF-X permettent d'intégrer 16 ou 32 chaînes de détections indépendantes, selon les versions. Leur mission consiste à collecter les charges délivrées par le détecteur, à réaliser l'amplification et la mise en forme du signal, à mémoriser les données. Ces puces présentent l'avantage de ne produire qu'un niveau de bruit très faible : à peine celui d'une trentaine d'électrons RMS (*Root Mean Square*) lorsque la puce est isolée. Une fois le circuit connecté à un détecteur, le bruit de l'ensemble demeure inférieur à une soixantaine d'électrons rms, soit cinq fois moins qu'avec le circuit équipant la caméra ISGRI. Ces circuits, associés de façon classique à de bons cristaux de CdTe, permettent de détecter des photons de 1,5 keV à 250 keV. Leur seuil bas, à la limite inférieure de la gamme de détection, est environ deux fois et demie plus faible que sur les meilleurs circuits équivalents existant par ailleurs dans le monde. Cette performance offre un atout maître aux futures missions ECLAIRS et SIMBOL-X.

- Les composants hybrides 3D et le *packaging* en formerait l'enveloppe charnelle. Préparer un imageur, avec ses détecteurs CdTe et ses circuits IDeF-X associés, passe par leur assemblage dans un composant hybride. Le plus dense de ces composants se nomme *Caliste 256*. Il est équipé d'un cristal de CdTe d'un centimètre carré, pixelisé au pas de 580 μm , chaque pixel étant connecté à une chaîne IDeF-X. Huit circuits IDeF-X fonctionnent simultanément pour extraire les 256 signaux d'un seul *Caliste*. Spécifiée pour l'observation d'un large champ de vue, la grande surface de l'imageur s'agence avec une mosaïque de composants *Caliste*, chacun aboutable sur ses quatre côtés pour ne laisser subsister aucune zone morte

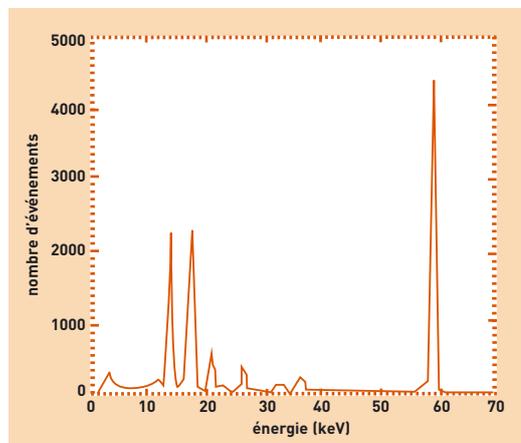
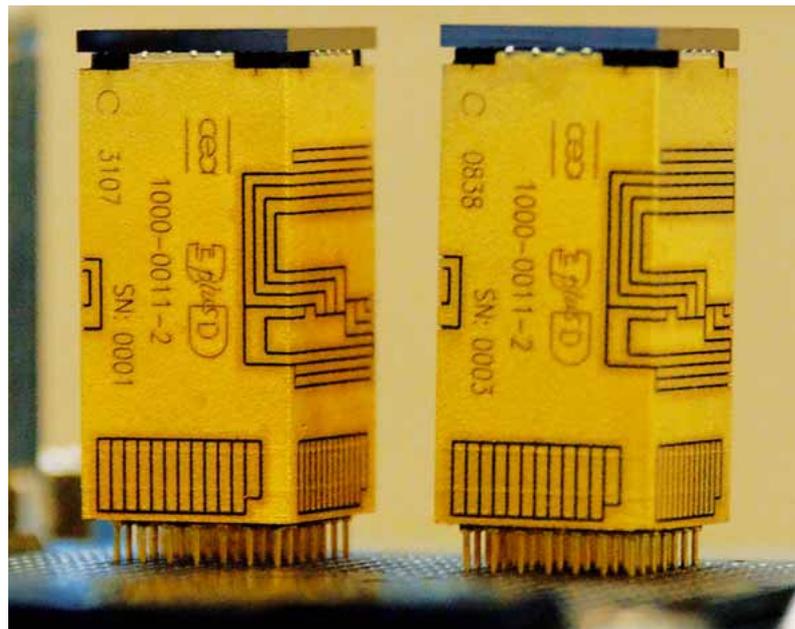


Figure 1. Exemple d'un spectre enregistré avec *Caliste 64*. La figure représente la distribution en énergie des photons émis par une source d'américium 241. Ce spectre est constitué de la somme des réponses de 64 pixels indépendants étalonnée en énergie. La résolution spectrale vaut environ 900 eV fwhm à 60 keV. Le seuil de détection vaut environ 1,5 keV (A. Meuris/CEA).



Modules *Caliste 256*. Chacun des ces deux prototypes est un spectro-imageur miniature de 1 cm de côté et environ 2 cm de haut. Un cristal de CdTe est placé au sommet d'un composant électronique (doré) dans lequel huit circuits IDeF-X sont empilés verticalement.

(figure 1). Ceci implique que les huit circuits IDeF-X puissent être entièrement disposés sous la petite surface de CdTe. Pour y arriver, la solution consiste à empiler les circuits et à les présenter perpendiculairement à la surface du cristal. Cette prouesse technologique a été exécutée par la société française 3D Plus. Pour une utilisation dans l'espace, ces modules unitaires de détection présentent une garantie de fiabilité qui réduit considérablement les risques de panne dans un imageur spectrométrique. Il faut dire que ce composant a été conçu de manière à résister aux stress mécaniques, thermiques et radiatifs inhérents à la mise en orbite.

Aujourd'hui, les chercheurs ne connaissent qu'un mot capable de qualifier ce détecteur de nouvelle génération : impressionnant ! Ses performances en apportent la preuve :

- la résolution spectrale, inférieure à 900 eV FWHM (*Full Width at Half Maximum*) à 60 keV devient six fois plus précise que pour ISGRI ;
 - le seuil bas descend à 1,5 keV contre 15 keV pour ISGRI ;
 - les pixels sont 100 fois plus petits.
- Lorsqu'il sera placé au foyer d'un télescope de type SIMBOL-X, ce modèle de spectro-imageur CdTe pour les rayons gamma apportera, de façon certaine, une quantité extraordinaire de résultats scientifiques.

> Olivier Limousin

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 de Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

> Eric Delagnes

Service d'électronique des détecteurs et d'informatique (Sedi)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay



Scruter le Soleil avec GOLF-NG

Voilà quatre siècles au moins que le Soleil manifeste une activité fortement variable montrant, de manière récurrente, des taches sombres à sa surface. Les incidences de cette variabilité sur l'atmosphère terrestre restent encore mal comprises des chercheurs malgré des corrélations surprenantes avec le climat du passé. L'invention de techniques innovantes permettra seule de maîtriser les processus générant cette variabilité et de prédire l'activité solaire du prochain siècle.

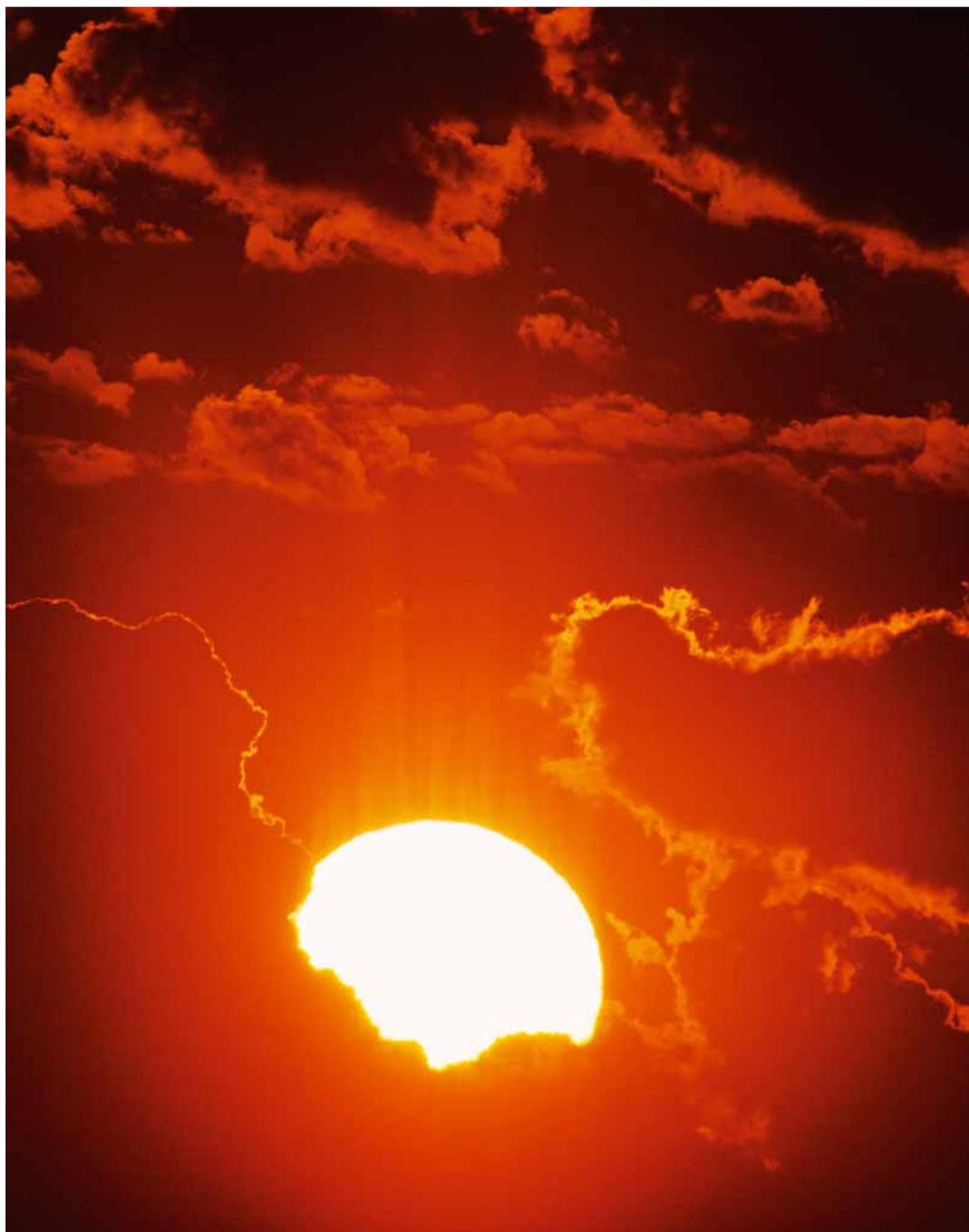


Photo Link

Le CEA, impliqué dans les problématiques d'environnement terrestre, construit un deuxième **spectromètre à résonance** multicanal appelé GOLF-NG (pour *Global Oscillations at Low Frequency et New Generation*). Pour cet instrument, il s'agira d'éclaircir les rôles respectifs joués par le cœur solaire et la région de transition entre la

photosphère et la chromosphère d'où émergent des régions plus sombres appelées « taches solaires » ou plus brillantes appelées « facules » (figure 1).

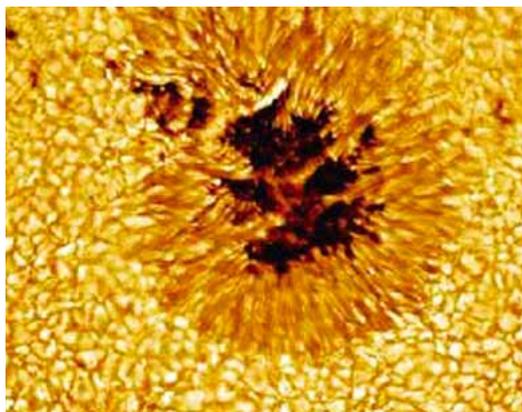
Depuis plus d'une dizaine d'années, le satellite SoHO (pour *Solar and Heliospheric Observatory*) scrute le Soleil interne et externe, en continu, grâce à une dizaine d'instruments capables d'enregistrer

toutes les manifestations de son activité – une collaboration entre l'ESA et la NASA. Ainsi SoHO suit, en permanence, les éjections de matière coronale, l'émission de particules appelée « vent solaire » ou encore des taches sombres apparaissant régulièrement à la surface du Soleil et migrant, au cours du temps, des hautes latitudes vers l'équateur. Les astrophysiciens connaissent bien la source de ce phénomène occasionné par une température locale plus froide associée à une augmentation du champ magnétique. Le mérite revient à ce satellite d'avoir révélé l'origine interne de cette activité magnétique grâce à la mesure d'ondes stationnaires permanentes excitées par la convection. Il suit donc de nouveaux indicateurs d'activité depuis déjà plus de 15 ans.

Le principe des mesures sismiques solaires

La meilleure façon de connaître les ondes internes pénétrant jusqu'au cœur du Soleil consiste à mesurer la variation temporelle de la « vitesse Doppler » du Soleil par rapport à l'observateur et d'en extraire le spectre de fréquence des modes internes. Cette vitesse, d'environ 1 km/s, s'apprécie en fonction du décalage en longueurs d'onde de raies bien connues comme le sodium ou le nickel. Ces raies d'absorption se forment dans l'atmosphère solaire agitée par la turbulence. La raie de sodium est utilisée par GOLF et le nickel par MDI (pour *Michelson Doppler Imager*), deux instruments embarqués sur le satellite d'observation SoHO. C'est l'analyse de la lumière provenant des raies d'absorption de ces éléments dans l'atmosphère solaire qui donne ces vitesses.

L'instrument GOLF offre aux astrophysiciens un concept de spectromètre à résonance extrêmement performant. Il opère par étapes. La première consiste à filtrer les photons solaires dans une gamme de longueurs d'onde correspondant à la raie du sodium. Ensuite, les photons ainsi absorbés sont capturés dans une cellule contenant un gaz pur de sodium, puis réémis dans un mince pinceau de longueur d'onde, sur chaque flanc de raie. Par sa référence atomique, il s'agit d'une méthode de précision unique. Elle permet notamment de mesurer l'interférence constructive des modes générant un signal stochastique dont la vitesse est de l'ordre du



Un zoom sur une tache solaire montre comment la granulation de surface fait place à une matière dominée par le champ magnétique.

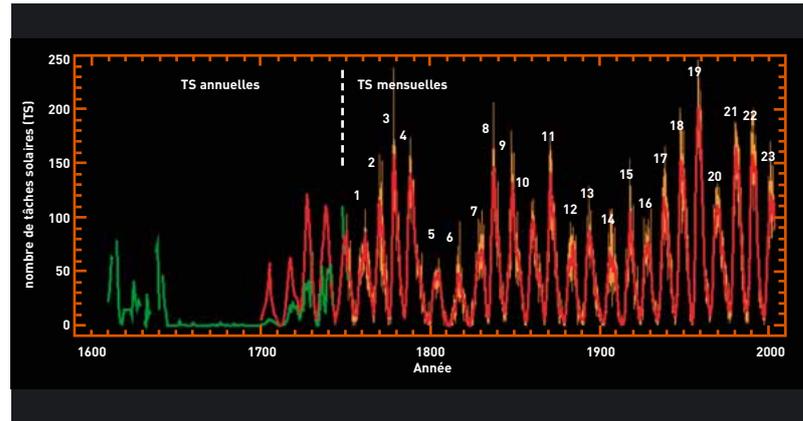


Figure 1. Depuis les premières observations de Galilée, le nombre de taches a varié sur la surface du Soleil, rythmé par un cycle de 11 ans, mais avec une amplitude encore inexplicée.

m/s. Ce signal se surimposant à la vitesse globale du déplacement du soleil, sa mesure temporelle donne le spectre fréquentiel des modes. Pour améliorer la qualité de détection de signaux individuels très faibles, GOLF-NG va extraire le signal à huit hauteurs dans la raie du sodium NaD1 (figure 2).

Les signaux extrêmement faibles d'un Soleil bien turbulent

Depuis plus de dix ans, les sondes spatiales se succèdent : après SoHO viennent les satellites PICARD⁽¹⁾ (microsatellite du Cnes) et SDO (pour *Solar Dynamics observatory*) dont les lancements sont prévus pour fin 2009. Grâce à ces instruments, les

(1) Du nom de l'astronome français Jean Picard (1620-1682) qui fit les premières mesures de précision du diamètre solaire au XVII^e siècle.

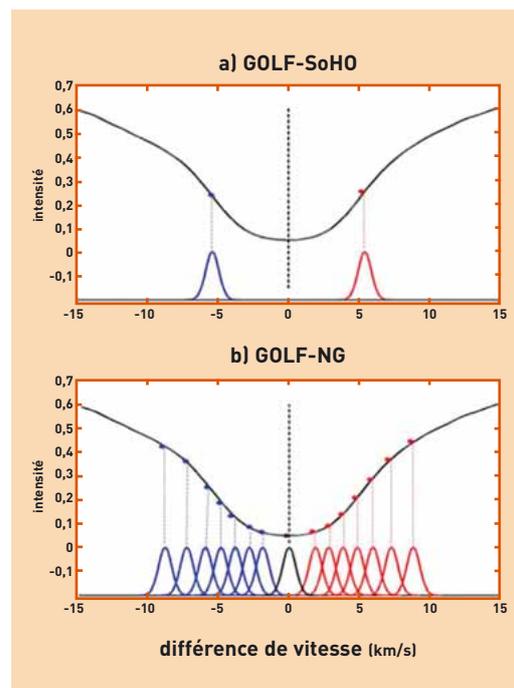


Figure 2. Principe de mesure du spectromètre à résonance multicanal : les huit mesures bleues sont simultanées car la cellule, remplie de gaz de sodium, est placée dans un aimant à champ variable ; l'alternance de mesures bleues et rouges est garantie par un polarisateur à cristaux liquides.



S. Turck-Chièze/CEA

Le satellite SoHo (lors des derniers tests d'intégration) a été lancé par une fusée Atlas-Centaure et scrute le Soleil à 1,5 million de km de la Terre. Ce satellite, lancé en 1995, est toujours en observation avec des instruments qui étudient le Soleil, du cœur à la couronne. L'instrument GOLF est visible à gauche de l'image.

connaissances vont progresser sans pour autant que toutes les problématiques soient résolues. En effet, il faut savoir que les modes acoustiques déplacent les couches atmosphériques selon une vitesse individuelle maximale de 20 cm/s avec une périodicité de quelques minutes. Les **modes de gravité**, sondes indispensables pour atteindre la dynamique du cœur solaire, se manifestent par des signaux périodiques de quelques heures et des vitesses n'excédant pas 1 mm/s, soit des déplacements d'environ 18 mètres à la surface d'un soleil bien turbulent. Ce défi, l'instrument GOLF l'a déjà partiellement relevé en réalisant des mesures à 400 kilomètres au-dessus de la **photosphère solaire**, région plus calme et transparente et en détectant les premières manifestations des modes de gravité. Avec lui les équipes du CEA écrivaient la grande épopée dont GOLF NG contribuera à tourner l'ultime page.

GOLF-NG un spectromètre à résonance multicanal

Avec ce nouvel instrument entièrement réalisé à l'Irfu, il sera notamment possible de mesurer simultanément le spectre des modes d'oscillation solaires à huit hauteurs dans l'atmosphère (figure 3) entre 200 et 800 kilomètres au-dessus de la **photosphère**. Pour les astrophysiciens, ce spectromètre particulier présente une série d'avantages. D'abord, il offre une meilleure détection des signaux acoustiques en raison de leur amplitude croissant exponentiellement, avec la hauteur, dans l'atmosphère. Ensuite, il perfectionne la détection des modes de gravité résultant de la réduction des **effets granulaires**. Enfin GOLF-NG mesure en continu l'évolution du comportement global de l'atmosphère, entre la photosphère et la **chromosphère**, région d'émergence du flux magnétique.

Le champ magnétique, nécessaire pour réaliser l'échantillonnage en huit points de la raie D1 du sodium, n'est autre qu'un champ axial linéairement variable de 0 à 12 **KGauss**. Il s'obtient à l'aide d'un aimant permanent construit avec des aimants en néodyme-fer-bore et des pièces polaires en fer-cobalt de petite taille (20 x 15 x 10 cm³). L'homogénéité transverse du champ, en tout point de sa variation le long de son axe, est meilleure de 2 % dans un volume cylindrique de 10 mm de diamètre. Cette propriété garantit l'uniformité de la réponse en longueur d'onde pour l'ensemble du volume de résonance de la cellule de gaz. Réalisée en pyrex haute température, celle-ci comporte deux parties indispensables au déroulement de l'opération : le

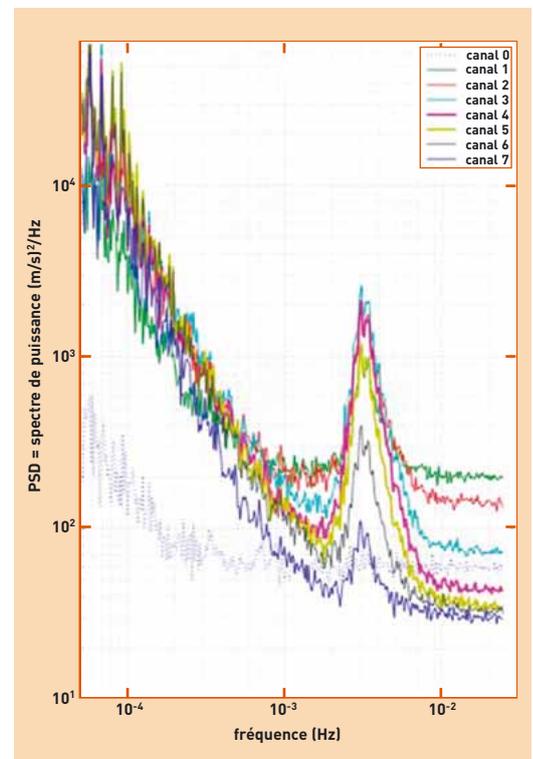


Figure 3. Première lumière d'un prototype du spectromètre à résonance multicanal GOLF-GN. Sur cette figure apparaît le spectre des modes acoustiques, mesuré simultanément à huit hauteurs dans l'atmosphère. L'étape suivante consistera à améliorer la détection à basse fréquence pour affiner la détection des modes de gravité solaires.

sodium pur se trouve à l'état solide dans sa partie inférieure nommée queueot lorsque la cellule est froide; lors du chauffage, celui-ci monte dans l'ampoule supérieure placée dans l'axe du champ magnétique croissant, lieu des processus de résonance (figure 4). L'ampoule de verre laisse libres 31 ouvertures pour les photons réémis, bien qu'habillée d'un masque optique et d'éléments chauffants. Les températures de fonctionnement atteignent 190 °C dans la partie supérieure et 175 °C dans la partie inférieure afin d'éviter toute condensation sur ces fenêtres. La puissance électrique nécessaire pour chauffer la cellule jusqu'aux températures indiquées ne dépasse pas les 2 watts. Aucun dispositif de régulation n'y a été installé – l'objectif étant d'éviter tout bruit périodique, d'ordre thermique ou électrique, dans la gamme de fréquence des ondes à détecter (jusqu'à 50 microhertz environ). La stabilité du dispositif, son homogénéité thermique et sa faible consommation résultent de deux éléments : d'abord, d'isolations thermiques à base d'écrans cylindriques en aluminium placés autour de la cellule; ensuite, de la fabrication des pièces de suspension en chrome-cobalt, matériaux à très faible conductivité thermique.

L'ensemble s'intègre dans une pièce mécanique de haute précision, réalisée en inox amagnétique, placée dans l'entrefer de l'aimant et sans contact direct. Cette pièce assure également le placement et le maintien des éléments optiques composant les 31 voies de mesures des 8 canaux du spectrophotomètre. Constitués de lentilles sphériques traitées antireflet, ces éléments optiques ont été dimensionnés de manière à pouvoir travailler avec des températures atteignant les 80 °C. Ces lentilles captent un maximum de lumière de résonance de l'intérieur de la cellule et, par couplage à une fibre optique en silice, la guident vers la matrice de photodétecteurs. En amont de l'aimant, un sous-ensemble compact assure trois missions : traiter le faisceau solaire incident, garantir un éclairage uniforme dans la cellule et le changement d'état de la **polarisation**. Cette dernière étape nécessite l'utilisation d'un cube séparateur de grande pureté et d'un retardateur de phase pourvu d'une lame à cristaux liquides. C'est le changement de phase qui induit le changement de polarisation circulaire du faisceau, à un rythme pouvant passer sous la seconde pour des durées de commutation inférieures à la dizaine de millisecondes. Ce dispositif à cristaux liquides, développé par des chercheurs de

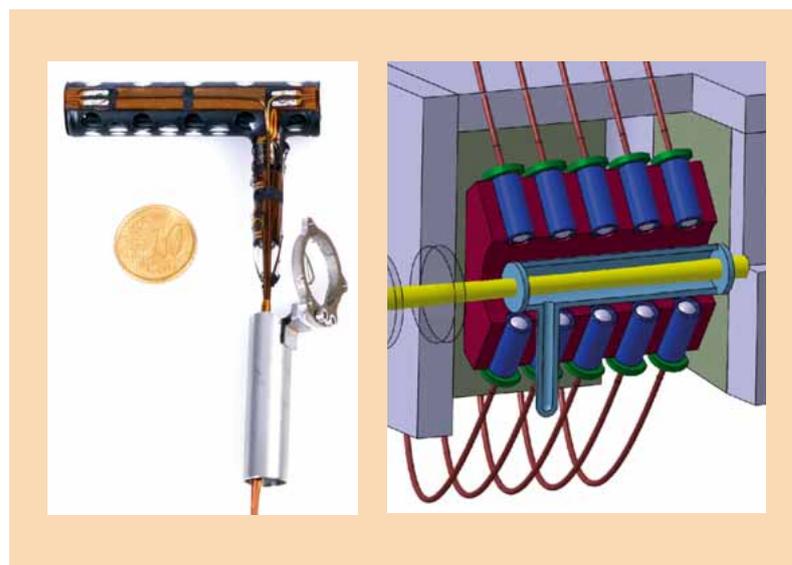


Figure 4.
Cellule et coupe en trois dimensions du schéma d'implantation dans l'aimant.

L'Institut d'astrophysique des Canaries, autorise une pureté de polarisation allant jusqu'à 99,99 %. Fonctionnel depuis janvier 2008, GOLF-NG reste l'unique spectromètre solaire capable d'acquérir, de façon simultanée et rapide, la vitesse Doppler à huit hauteurs dans l'atmosphère solaire. Son optimisation devrait permettre aux chercheurs d'atteindre les performances requises par les missions spatiales et de garantir la fiabilité de l'instrument. Une première campagne d'observations s'est déjà déroulée, en été 2008, à Tenerife (Espagne) qui a permis de qualifier le principe de ce nouveau spectromètre.

Pour les astrophysiciens, GOLF-NG figure déjà comme l'instrument indispensable à la compréhension des manifestations internes de l'activité solaire en région **radiative**. Il suivra d'abord l'activité solaire au sol mais a vocation, à terme, d'intégrer une future mission solaire spatiale. Un grand projet spatial a également été étudié avec l'industriel **Thalès**, pour les prochaines missions de l'ESA. Ce projet ambitionne l'observation globale et locale de l'activité solaire ainsi qu'une étude de la basse couronne. Surveiller la dynamique solaire à court et moyen terme (de l'ordre de la dizaine ou de la centaine d'années) et suivre son impact sur l'atmosphère terrestre, voilà le grand défi des prochaines décades.



Pour succéder à l'observatoire solaire conçu entre l'Agence spatiale européenne (ESA) et la NASA, une mission de vol en formation est proposée pour décrire complètement et continuellement l'impact de l'activité solaire sur l'environnement de la Terre.

> **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 de Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

> **Pierre-Henri Carton**

Service d'électronique des détecteurs et d'informatique (Sedi)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay

MÉMO B

De la lumière à l'image

Nous baignons dans la lumière. Elle nous entoure, paraissant à chacun évidente et familière. Pourtant, l'œil humain n'est sensible qu'à une infime partie du spectre lumineux, la région comprise entre 400 et 700 μm environ. Ainsi, à côté de la lumière visible, existe-t-il une lumière invisible constituant la grande majorité du spectre électromagnétique (voir *mémo A*). Pour connaître et explorer l'Univers de façon aussi complète que possible, les astrophysiciens ont besoin de collecter l'ensemble de ces lumières invisibles pour réaliser des images du ciel « invisible ». Jusqu'à présent, ce type d'images a souvent permis de mettre en lumière un Univers inattendu, comme un Univers variable à l'échelle de quelques heures dans le domaine de la lumière γ .

Comment procéder pour représenter des astres émettant des lumières invisibles sur des cartes visibles ? Cette question pose le rapport entre l'astrophysique et l'image. Par définition, une image est la représentation, analogique ou numérique, en deux voire trois dimensions, d'une réalité appréhendée par la mesure d'une grandeur physique. Une image de l'invisible est donc l'image d'une réalité impossible à observer à l'œil nu. La traduction en une image visible à nos yeux suppose de passer par une série d'étapes. La première d'entre elles consiste à utiliser un détecteur, instrument capable de capter la lumière invisible émise par une source lumineuse, puis à convertir la lumière reçue en courant électrique mesurable – le détecteur faisant office d'interface entre la lumière et le



Image de la galaxie M 51 (galaxie Whirlpool) dans l'infrarouge lointain, en trois couleurs : le rouge, le vert et le bleu correspondent à trois longueurs d'onde : 160, 100 et 70 μm (Photodetector Array Camera and Spectrometer / PACS).

signal. À titre de comparaison, il s'agit d'un procédé similaire à celui convertissant la lumière solaire en électricité au moyen de cellules photovoltaïques. Mais il existe bien d'autres moyens pour transformer la lumière en signal. Par exemple, les **bolomètres** conçus pour scruter le ciel dans le **rayonnement infrarouge** submillimétrique convertissent la lumière en une variation de la température d'un matériau qui l'absorbe. Ce modeste échauffement

induit une variation de résistance électrique de ce même matériau : la mesure de cette variation donne alors accès au flux lumineux incident.

La seconde étape, la digitalisation, consiste à traduire ce signal sous forme numérique pour le rendre apte au traitement informatique. Plus l'intensité de la source lumineuse est élevée, plus l'instrument donnera, « en sortie », un signal élevé. Les images numériques ainsi obtenues se composent de milliers, ou de millions, de carrés qui doivent être aussi petits que possible pour obtenir une image fine. L'image est ainsi formée d'une mosaïque de nombres représentant chacun l'information lumineuse reçue par chaque élément. Dans le vocabulaire de l'informatique, ces petits carrés portent le nom de **pixel** (« px » en abrégé), contraction de l'expression anglaise *picture elements*, c'est-à-dire « éléments d'image ». Il s'agit donc de la plus petite unité de surface permettant de définir la base d'une image numérique. Celle-ci n'est donc rien d'autre qu'un tableau à deux dimensions dont chaque case est un pixel. Pour obtenir informatiquement une image, il suffit

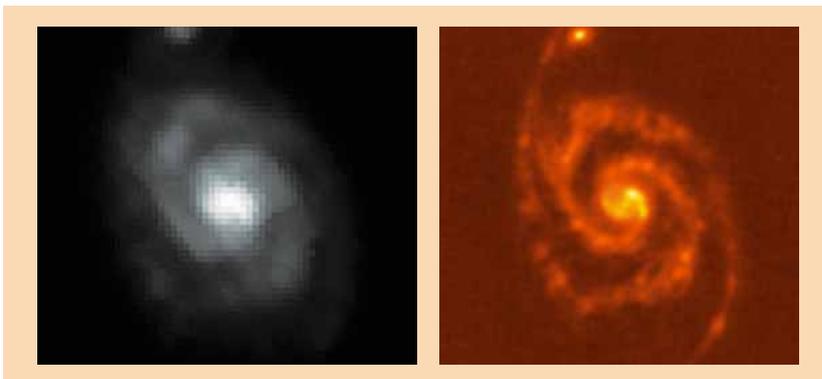
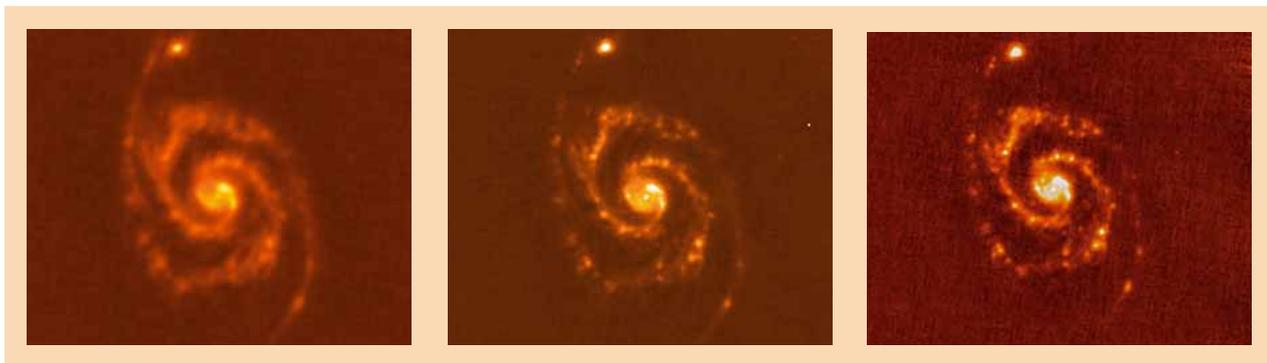


Image de la galaxie spirale M 51 (galaxie Whirlpool) dans l'infrarouge lointain (160 μm) par Spitzer/MIPS (à gauche) et par Herschel/PACS (à droite). Grâce à son miroir de 3,5 m, à comparer à 0,8 m pour Spitzer, Herschel permet des images d'une bien meilleure résolution.

NASA/JPL-Caltech / Spitzer / MIPS et ESA & The PACS Consortium



ESA & The PACS Consortium

Image de la galaxie spirale M 51 (galaxie Whirlpool) données par Herschel/PACS dans trois longueurs d'onde : 160 μm (à gauche), 100 μm (au milieu) et 70 μm (à droite). On peut constater sur ces images que la résolution augmente quand la longueur d'onde diminue.

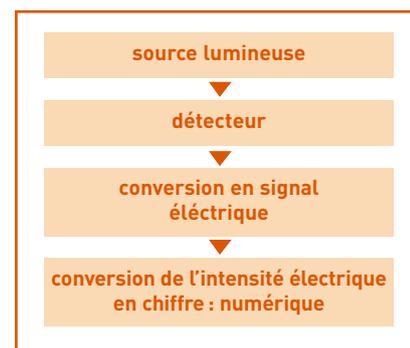
donc de créer un tableau de pixels dont chaque case contient une valeur numérique. La qualité d'une image dépend directement de sa définition, autrement dit du nombre de pixels enregistrés en hauteur (dans l'axe vertical) et en largeur (dans l'axe horizontal). Les spécialistes s'expriment en termes de « dimension informatique », soit le nombre de colonnes de l'image multiplié par son nombre de lignes. L'intervalle de nombres que peut porter un pixel s'avère également très important car il traduit la dynamique lumineuse dont le capteur sera capable de rendre compte.

La valeur stockée dans un pixel est codée sur un certain nombre de bits déterminant la couleur ou l'intensité du pixel. L'ultime étape du processus consiste donc à établir ce code. Dans toutes les disciplines de la communication, qu'il s'agisse de mots ou d'images, un code se définit comme une règle visant à convertir de l'information sous une autre forme de représentation. Un code exprime une idée, un concept. Pour les astrophysiciens qui veulent établir des cartes de l'Univers à partir d'une gamme d'énergie détectée par leurs instruments, il s'agit de définir une convention de couleurs. Chaque discipline possède la sienne : par exemple, sur les cartes de navigation aérienne, la coloration rouge indique la présence d'orages tandis qu'en agriculture, le vert désigne un espace cultivé. Le code de couleurs défini, il faut ensuite établir un *continuum* d'intensité par rapport à l'unité de base : par exemple, pour rester dans le domaine de l'agriculture, un spectre de verts allant de la culture intensive au désert en passant par différents pourcentages de déforestation. Ce spectre peut se définir comme une sorte de faux

arc-en-ciel. En astrophysique, la gamme des couleurs permettant de coder les sources lumineuses s'étend souvent du rouge au bleu indigo ; dans cette discipline, du plus froid au plus chaud, mais aussi du moins énergétique au plus énergétique...

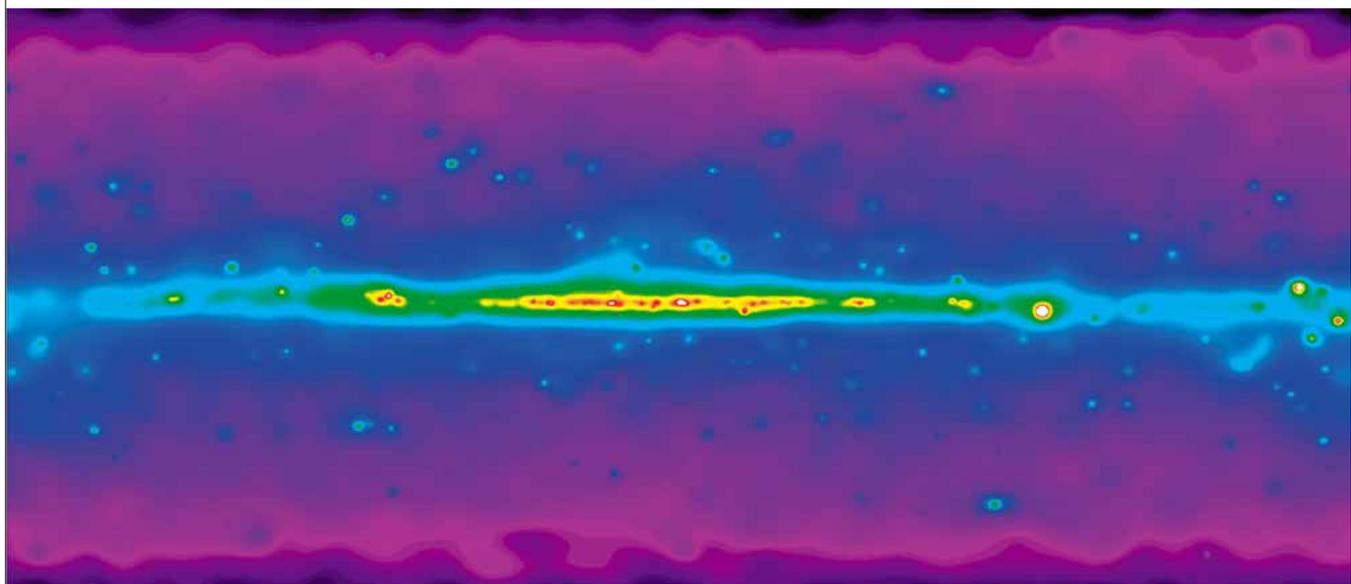
Une fois l'image digitalisée et codée, tous les problèmes ne sont pas résolus pour autant. Pour l'astrophysicien, reste à régler la question de la résolution angulaire qui est égale au rapport entre la longueur d'onde dans laquelle s'effectue l'observation et la taille du miroir du télescope qui collecte la lumière. La résolution angulaire mesure la taille angulaire des plus petits détails perceptibles par le télescope, exprimés en degrés, en minutes, voire en secondes d'arc. Ainsi, à taille de miroir constante, plus la longueur d'onde de la lumière captée s'avère courte, plus les détails de l'image sont fins. Autre solution pour améliorer la finesse de l'image : augmenter le diamètre du miroir. Que se passe-t-il si l'on observe deux sources lumineuses angulairement proches ? Il existe deux cas de figures possibles. Si la séparation des deux sources est supérieure à la résolution angulaire, le télescope distinguera les deux sources. Dans le cas contraire, ces deux sources sembleront n'en former qu'une seule. Même dans l'hypothèse où le télescope a la capacité de séparer ces deux sources, il faut bien choisir son détecteur ! En effet, si les images des deux sources se projettent toutes deux sur le même pixel du détecteur, l'image obtenue ne montrera qu'une seule source. En conséquence, à longueur d'onde fixée, la finesse de l'image dépend à la fois du diamètre du télescope (il doit être aussi grand que possible) et de la taille des pixels (ils doivent être aussi petits que nécessaire).

Dès lors, on comprend pourquoi les astrophysiciens conçoivent et fabriquent des télescopes dont la taille augmente sans cesse : ainsi, entre Galilée qui observait les étoiles avec une lunette dont la lentille ne dépassait pas 6 cm de diamètre, et le télescope spatial Hubble doté d'un miroir de 2,4 m de diamètre, les astrophysiciens ont gagné un facteur 40 en résolution angulaire ($2,4 \text{ m} / 6 \text{ cm} = 40$). Autre exemple, celui d'Herschel, le plus grand télescope envoyé dans l'espace dont le diamètre atteint 3,5 mètres. De cet instrument qui détecte le rayonnement infrarouge et submillimétrique, les chercheurs attendent des informations extrêmement précises sur les systèmes solaires en cours de formation ou les processus physiques conduisant à la naissance d'étoiles et de galaxies. Mais, aussi sophistiqué et performant soit-il, dans cette longueur d'onde, la finesse de résolution de ce télescope ne dépassera pas celle de la lunette de Galilée. En revanche, Herschel va réaliser l'exploit d'observer dans les lumières invisibles du rayonnement infrarouge et submillimétrique, et d'apporter la lumière sur les mondes enfouis de l'Univers. Les astrophysiciens en sont sûrs : ils vivent une véritable révolution.



L'analyse des données en astrophysique

Pour un astrophysicien, le signal traduit l'information émise par une source et qu'il doit interpréter. Grâce à l'informatique, le traitement du signal connaît depuis une dizaine d'années des développements spectaculaires qui permettent aux astrophysiciens de valider, affiner ou remettre en question la compréhension de l'Univers.



Simulation de six jours de données du satellite GLAST (pour *Gamma-ray Large Area Space Telescope*), rebaptisé *Fermi Gamma-Ray Space Telescope*. Bande d'énergie comprise entre 0,1 et 1 GeV, filtrée par l'algorithme MR-filter à base d'ondelettes.

Par suite de l'évolution des détecteurs qui touche toutes les longueurs d'onde, l'analyse des données occupe une place de plus en plus prépondérante en astronomie.

Le flux de données

Si, en 1980, les *Charge Coupled Device* (CCD ou dispositifs à transfert de charge) affichaient une taille de 320 x 512 pixels, les astronomes disposent aujourd'hui de véritables mosaïques de CCD équivalant à 16 000 x 16 000 pixels. Les méthodes ont progressé au point que l'engagement humain et financier pour traiter les données d'un instrument peut atteindre l'ordre de grandeur de la réalisation de l'instrument lui-même. Par exemple, la caméra ISOCAM équipant l'**Observatoire spatial infrarouge (ISO)** a nécessité l'élaboration de logiciels de commande, d'analyse en temps réel et en temps différé : soit 70 hommes.an alors que 200 hommes.an suffisaient pour la construction de la caméra. L'effort consenti pour le projet Planck s'avère encore plus important. De plus, la quantité de résultats – parfois plusieurs centaines de **téraoctets** – fait appel à des bases de données et au développement d'outils sophistiqués (figure 1).

Les connaissances donnent lieu à de nouvelles questions dont la résolution s'appuie sur l'observation d'un objet ou d'une région du ciel. L'analyse de données intervient lors de la calibration de ces données,

de l'extraction de l'information ou de la manipulation des bases de données. Des études statistiques permettent aussi d'enrichir la connaissance : c'est le cas pour les études sur le nombre de **galaxies** d'une **luminosité** donnée par unité de volume. On appelle « connaissance » l'ensemble des théories relatives à l'astronomie (formation d'**étoiles**, de galaxies, cosmologie...), les bases de données d'objets, d'images et les catalogues, autrement dit la liste des objets détectés avec un instrument dans une région du ciel. Cette connaissance, qu'il s'agisse des articles ou des bases de données, se trouve le plus souvent disponible sur l'Internet.

Selon l'instrument, les données se présentent sous forme d'images, de spectres, de mesures **photométriques**. En général, les astronomes disposent d'un ensemble de données d'une région ou d'un objet d'étude – plusieurs images à différentes **longueurs d'onde** par exemple. Mettre en orbite des instruments (Hubble, Rosat, ISO, Soho...) présente l'avantage d'éviter les contraintes atmosphériques. Le processus nécessite plusieurs étapes.

En premier lieu, vient la phase de calibration indispensable pour corriger les effets instrumentaux des données grâce à plusieurs opérations :

- la correction du zéro (*Dark*) : en l'absence de **lumière**, les valeurs renvoyées par le détecteur ne sont jamais nulles à cause des effets électroniques et il faut donc soustraire le niveau « zéro » aux données ;

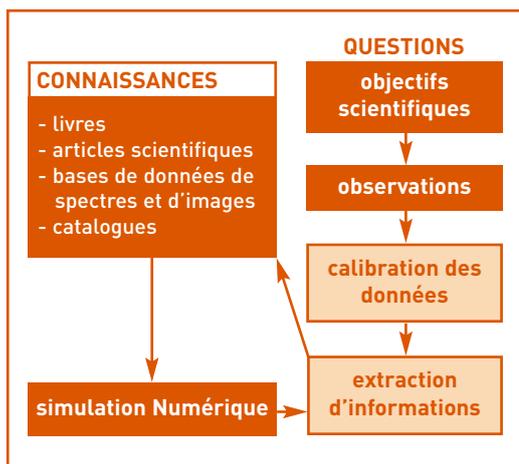


Figure 1.

Le flux d'information situe les niveaux où intervient l'analyse de données. Il permet de mieux comprendre à quels niveaux intervient cette analyse de données. À partir des connaissances, de nouvelles questions se posent et il est nécessaire de procéder à des observations d'un objet ou d'une région du ciel. Les données acquises vont devoir préalablement être calibrées, puis l'information utile à la réalisation de l'objectif scientifique doit être extraite. L'analyse de données intervient lors de la calibration, de l'extraction de l'information, et de la manipulation des bases de données. Il faut noter aussi que des études statistiques des bases de données permettent d'enrichir la connaissance (comme par exemple, les études du nombre de galaxies d'une luminosité donnée par unité de volume). On définit par connaissance l'ensemble des théories relatives à l'astronomie (formation d'étoiles, de galaxies, cosmologie...), les bases de données sur les objets, les bases de données d'images, et les catalogues (liste d'objets détectés avec un instrument sur une région du ciel). Cette connaissance est maintenant le plus souvent accessible par le réseau Internet (qu'il s'agisse des articles ou des bases de données).

- la correction des variations de réponse (*Flat*) : à éclairage égal, le détecteur ne répond pas de la même manière en chaque pixel ; aussi faut-il normaliser les données en les divisant par la réponse du détecteur ; les paramètres du détecteur doivent être bien connus, sinon les erreurs de précision se répercutent sur les mesures.

D'autres effets peuvent également être corrigés lors de cette première phase, comme la suppression des rayons cosmiques ou les effets de rémanence du détecteur ; toutes ces tâches étant plus ou moins ardues (figure 2).

Une fois les données calibrées, la phase d'analyse peut alors commencer. Suivant les objectifs, plusieurs mesures peuvent alors se faire, par exemple, sur la détection des étoiles et des galaxies ou sur la mesure de leur intensité, de leur position, de différents paramètres morphologiques : des résultats à comparer ensuite aux catalogues existants. Il s'avère impossible de citer toutes les opérations réalisables sur une image astronomique et nous n'avons donc cité ici que les plus

(1) Le bruit est une fluctuation d'intensité aléatoire qui se superpose aux données ; il provient en partie du détecteur et, en partie, des données. En plus des erreurs que le bruit peut amener sur les mesures, il gêne énormément lors de la détection d'objet et peut être responsable de nombreuses fausses détections.

(2) L'image d'une étoile n'est pas un point, mais une tache. Cet étalement lié à l'instrument est appelé «réponse instrumentale». Son principal effet consiste en une perte de résolution car les objets proches se mélangent.

courantes. Mener à bien cette extraction d'informations, suppose de surmonter des obstacles comme le bruit⁽¹⁾ et « la réponse instrumentale »⁽²⁾. Lorsque les informations utiles ont été extraites, elles sont confrontées à la connaissance en l'état. Cette étape valide, affine ou remet en question la compréhension de l'Univers. Le résultat final de cette réflexion se matérialise par la publication d'articles scientifiques paraissant dans des revues spécialisées.

Le volume de connaissance croît donc rapidement et nécessite des outils performants pour l'exploiter. Ces outils font office de moteurs de recherche pour aider à rassembler les derniers articles parus, des méthodes pointues d'imagerie ou encore des algorithmes établissant une correspondance entre des objets détectés dans une image et une base de données (sachant qu'il y a des choix à faire quand plusieurs « candidats » se présentent). La difficulté réside, en particulier, dans le volume des bases de données. SIMBAD, un ensemble d'identificateurs, de mesures et de bibliographie pour les données astronomiques, développé par le **Centre de données astronomiques de Strasbourg**, regroupe des informations sur plusieurs millions d'objets, correspondant à des millions de mesures observationnelles, avec des millions de références bibliographiques. La taille des images fournies par les instruments de nouvelle génération rend quasiment impossible l'accès aux archives d'images par le réseau lorsque celles-ci n'ont pas été préalablement comprimées.

La maîtrise et l'exploitation des bases de données représentent donc un enjeu important pour le futur. L'analyse statistique de catalogues amène, en outre, à contraindre les paramètres des modèles cosmologiques et donc à augmenter la connaissance. Par exemple, l'étude statistique des galaxies, individuellement différentes, révèle la présence de trois grandes familles (**spiraales, elliptiques et irrégulières**), un peu comme les grains de sable d'une plage, tous différents, forment une zone homogène.

La théorie du *Compressed Sensing* et le projet spatial Herschel

Dans le cadre de certains projets spatiaux, il s'avère parfois impossible de transférer sur terre un volume important de données sans procéder à une compression de celles-ci. C'est le cas pour l'instrument

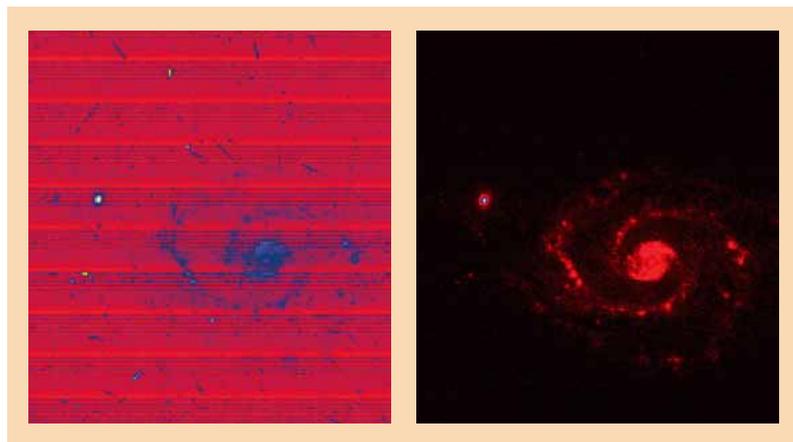


Figure 2. La galaxie M51, vue par ISO, avant et après calibration.

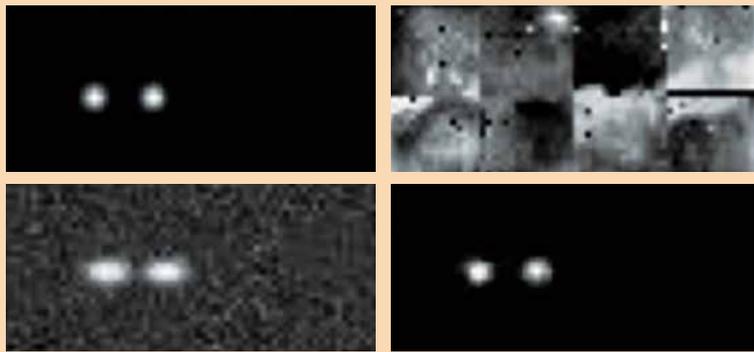


Figure 3. En haut, la simulation d'une image contenant deux sources et la même image vue par Herschel. En bas, à gauche, l'image a été calibrée après une compression classique et, en bas, à droite, la solution obtenue par la technique du *Compressed Sensing*.

PACS Herschel (*Photodetector Array Camera and Spectrometer*) qui nécessite une compression d'un facteur huit avec une puissance de calcul extrêmement faible. Les méthodes standard de compression d'image comme JPEG ne conviennent pas. Heureusement, depuis une dizaine d'années, d'importants développements en analyse harmonique permettent de représenter des images dans des bases de fonctions convenant à certains types d'objets. Par exemple, les ondelettes sont idéales pour détecter des structures, la **transformée ridgelet** est optimale pour la recherche de ligne et les curvelets représentent bien les contours ou les filaments contenus dans une image. Plus généralement, une représentation « parcimonieuse » des données conduit à de meilleures performances pour des applications aussi variées que la compression des données, la restauration d'images ou la détection d'objets. Une nouvelle théorie, *Compressed Sensing*, lie désormais formellement le nombre de coefficients non nuls dans une base donnée et l'échantillonnage nécessaire à une reconstruction exacte du signal. Ce récent concept montre que la contrainte sur le pas

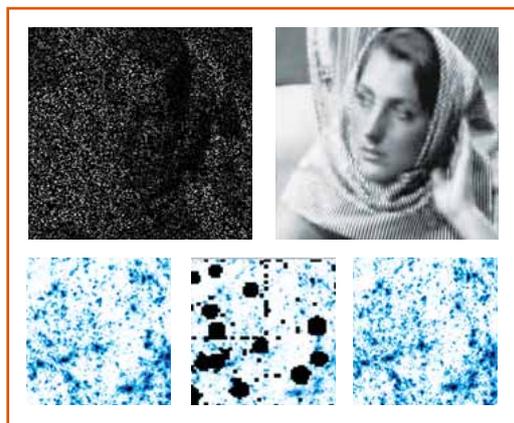


Figure 4. En haut et à gauche, l'image comporte 80 % de pixels manquants ; à droite, elle est restaurée. En bas et à gauche, on trouve la simulation d'une carte de masse de matière noire, au milieu l'image est la même mais avec des zones manquantes et, à droite, l'image est reconstruite. On a montré que l'erreur sur le spectre de puissance et le bispectre de la carte restaurée par *inpainting* est de l'ordre de quelques unités pour-cent. Cette méthode originale dépasse les problèmes d'astrophysique et a été transférée vers l'industrie dans le cadre d'un contrat CIFRE⁽³⁾ avec la Sagem.

d'échantillonnage, fixée par le **théorème de Shannon**, peut être largement dépassée si le signal observé vérifie un « critère de parcimonie », c'est-à-dire s'il existe une base dans laquelle le signal présente peu de coefficients différents de zéro. Une étude préliminaire a montré que cette approche présenterait une excellente alternative aux systèmes de transfert de données actuellement en vigueur pour le satellite Herschel et, qu'à taux de compression constant, un gain de 30 % en résolution s'obtiendrait sur les images décomprimées (figure 3).

L'inpainting au secours des données manquantes

Les données manquantes constituent un problème récurrent en astronomie, dû à des pixels défectueux ou à des zones éventuellement polluées par d'autres émissions et que l'on souhaite masquer lors de l'analyse de l'image. Ces zones masquées occasionnent des difficultés lors de traitements ultérieurs, en particulier pour extraire des informations statistiques comme le spectre de puissance ou le bispectre. L'*inpainting* est la procédure qui va venir combler ces zones. Des travaux récents montrent que l'on peut reconstruire les zones manquantes en recherchant une solution parcimonieuse dans un dictionnaire de formes prédéfinies. Avec un choix judicieux de dictionnaire, on obtient des résultats fantastiques (figure 4).

Planck et l'extraction du fond diffus cosmologique

La mission spatiale Planck, qui a été lancée, le 14 mai 2009, par l'**Agence spatiale européenne (Esa)**, en même temps que la mission Herschel, a pour objectif de cartographier des fluctuations spatiales d'intensité et de **polarisation** de l'émission du ciel millimétrique, en vue notamment de caractériser les propriétés statistiques des **anisotropies** du fond de **rayonnement** cosmologique fossile. Ces mesures permettront de contraindre fortement les **modèles** cosmologiques et, entre autres, de tester le modèle standard du big bang ainsi que de déterminer, avec une précision inégalée, les paramètres cosmologiques décrivant l'ensemble de l'Univers. Planck offre les meilleures perspectives pour comprendre ce modèle, de l'Univers primordial (inflation) à l'astrophysique des émissions galactiques, en passant par la formation des structures, les **amas de galaxies**, la **matière noire** et l'**énergie noire**, ou encore la topologie de l'Univers. Deux instruments sont opérationnels, le *Low Frequency Instrument* (LFI) et le *High Frequency Instrument* (HFI), pour obtenir neuf cartes de tout le ciel entre 30 et 1 000 **GHz**. Ces cartes contiendront le fond cosmologique, mais aussi d'autres composantes liées à des émissions galactiques (poussière) ou intergalactiques (galaxies, amas...). Celles-ci sont également d'un grand intérêt. Chaque carte présentant un mélange des différentes composantes (**fond diffus cosmologique**, poussière galactique...), la difficulté

(3) Conventions industrielles de formation par la recherche (CIFRE) : instruites et gérées par l'Association nationale de la recherche technique (ANRT) pour le compte du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, elles permettent à une entreprise de bénéficier d'une subvention annuelle forfaitaire en contrepartie des coûts qu'elle engage pour employer le jeune doctorant qu'elle a embauché pour trois ans.

consiste donc à retrouver les composantes « ciels » à partir des cartes. On appelle cette opération « séparation de sources » (figure 5).

En pratique, il faut de surcroît tenir compte des effets instrumentaux (le bruit...) venant compliquer encore cette séparation. Un problème de restauration de données se superpose donc à celui de la séparation de sources. En utilisant une méthode appelée *Generalized Morphological Component Analysis* (GMCA), basée sur la **transformée en ondelettes**, il devient possible de reconstruire le fond diffus. Le principe repose sur le fait que mélanger les composantes rend les images plus complexes et que, si on utilise un critère de régularisation basé sur le principe de la « simplicité de la solution » dans le problème de séparation, on peut retrouver des composantes recherchées. Dans cette approche, une image « simple » est représentable sur peu de coefficients en ondelettes ; il s'agit d'une solution dite parcimonieuse (figure 6).

Tests statistiques sur le fond diffus cosmologique

Certaines applications nécessitent des outils statistiques élaborés afin de mettre en évidence des signaux extrêmement faibles, noyés dans le bruit. Parmi les exemples intéressants figure celui de la détection de **sources non gaussiennes** dans le fond diffus cosmologique **micro-onde** (FDCM). Celui-ci résulte d'un

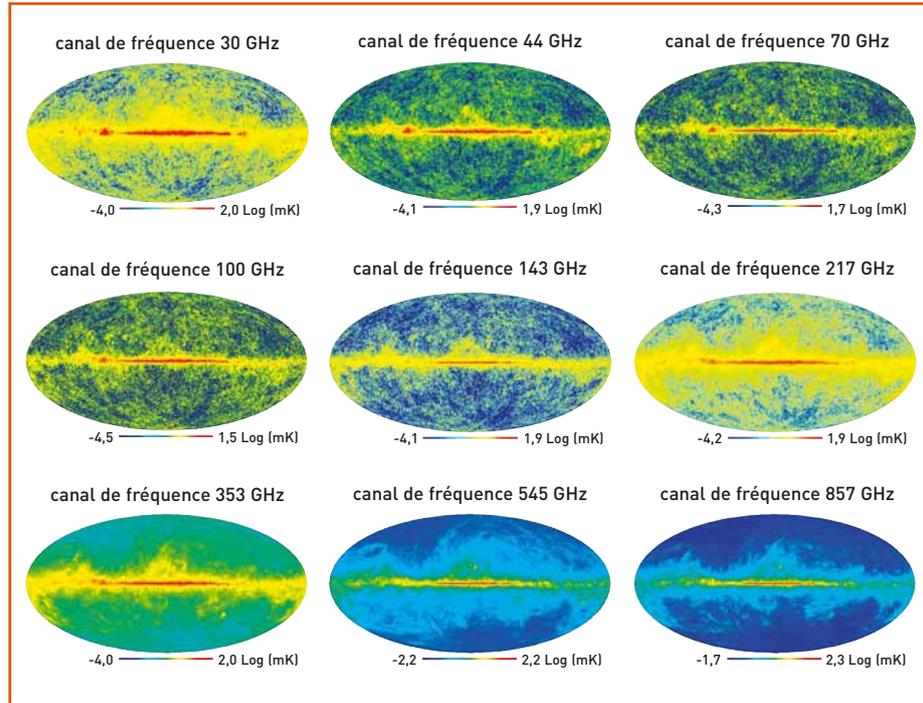


Figure 5. Simulation des neuf cartes de Planck. Par exemple, pour obtenir le fond diffus cosmologique, il faut retrancher la contribution des autres composantes aux observations. Échelle des valeurs : il s'agit de cartes de températures en mK, pour pouvoir avoir un contraste suffisant ; le logarithme des cartes est affiché.

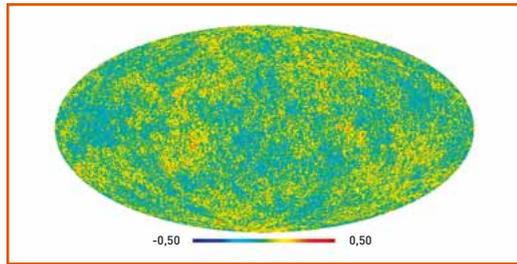


Figure 6. Carte du fond diffus cosmologique obtenue par GMCA à partir des neuf cartes de la figure 5.



Figure 7. Parmi ces quatre cartes, les trois premières sont des simulations du FDCM, de l'effet Sunyaev-Zel'dovich (en haut, à droite) et des cordes cosmiques (en bas, à gauche). La quatrième représente le mélange de ces trois composantes (en bas, à droite), un type de données que pourrait fournir la mission PLANCK. La fonction ondelette est surimprimée en haut, à droite ainsi que la fonction curvelet est surimprimée en bas, à gauche.

découplage de la matière et de la **radiation** à un décalage cosmologique de 1 000. Il est une « relique » des premiers instants de l'Univers et aide à comprendre la formation et l'évolution des structures provenant de l'amplification des fluctuations initiales. Les propriétés statistiques des anisotropies de température du FDCM nous informent donc sur la physique de l'**Univers primordial**. En effet, si leur distribution est gaussienne, elles sont produites par des modèles simples d'inflation. Sinon, elles sont issues de défauts topologiques comme des cordes cosmiques. Des anisotropies peuvent également provenir de l'interaction des photons du FDCM avec des **électrons** libres du gaz chaud intra-amas : c'est l'**effet Sunyaev-Zel'dovich** (figure 7).

Pour trouver des signatures non gaussiennes très faibles, des tests statistiques très sensibles s'imposent. Ils pourraient dériver de l'étude statistique de la distribution des coefficients obtenus par des méthodes multi-échelles. Les ondelettes sont bien adaptées à l'analyse des structures spatialement **isotropes** et contribuent à détecter l'effet Sunyaev-Zel'dovich, tandis que les fonctions curvelets sont optimales pour la recherche de structures spatialement anisotropes. La combinaison de ces deux transformées multi-échelles permet non seulement de détecter au mieux les anisotropies dans le FDCM, mais aussi de déterminer leur origine, éventuellement impossible avec les méthodes traditionnelles.

> Jean-Luc Starck

Service d'électronique des détecteurs et d'informatique (Sedi)
 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)

La simulation numérique en astrophysique

Au dialogue exclusif entre théorie et observation, s'est substitué, depuis quelques années déjà, le triptyque théorie/simulation/observation. Entre des modèles théoriques toujours plus complexes et l'observation qui demeure le test ultime pour la validation des théories, la simulation numérique vient faire office de lien.

Informatique et prédictions théoriques en astrophysique

Pour la plupart, les théories physiques reposent sur des équations complexes et non linéaires. Elles mettent également en jeu des systèmes dynamiques propices au chaos et à l'imprédictibilité. Sans appui informatique, il devient donc quasiment impossible de calculer les prédictions d'une théorie, particulièrement en astrophysique.



Supercalculateur Bull du Centre de calcul recherche et technologie (CCRT) du CEA.

A lors que la plupart des sciences physiques parviennent à simplifier, à l'extrême, leur appareillage expérimental de façon à ne garder que le processus élémentaire à étudier, rien de tel en matière d'observation astronomique. La raison tient à l'impossibilité pour les chercheurs d'intervenir sur leur objet d'étude : ils ne peuvent généralement accéder qu'à des mesures partielles d'objets complexes se trouvant dans des états dynamiques divers et incontrôlables. D'où le rôle fondamental joué par la **simulation** (voir encadré) qui va établir le lien entre théorie et observation. La simulation permet également d'explorer certaines propriétés de modèles en réalisant des expériences numériques : il s'agit alors moins de confronter la

théorie à l'expérience que d'explorer les conséquences de tel ou tel modèle. En astrophysique, la **gravité**, l'hydrodynamique, le **rayonnement** et le **champ magnétique** figurent comme les quatre principaux modèles à décrire.

La gravité

Il s'agit de la principale force intervenant dans la formation des structures cosmologiques quelle qu'en soit l'échelle. Parmi les plus grandes d'entre elles se trouvent les **amas de galaxies** dominés par la **matière noire** dont la gravité reste la seule force d'interaction. Sur la liste des plus petites, figurent notamment les **étoiles** et **planètes** en formation. Là, c'est la matière classique, dite **baryonique**, qui

Des processeurs travaillant avec une précision symphonique pour la simulation numérique

Outil très technique, la **simulation numérique** commence par la traduction, en **algorithme**, du jeu des équations modèles décrivant la théorie à valider. Comme ces algorithmes ne donnent qu'une approximation informatique des équations modèles, il faut ensuite mettre au point des algorithmes stables et précis, dont la solution s'approche de la réalité physique. L'opération relève du domaine des mathématiques appliquées permettant seul de créer et de valider de tels algorithmes. En astrophysique, les principaux phénomènes physiques que l'on cherche à décrire sont au nombre de quatre : **la gravité**, l'hydrodynamique, le **rayonnement** et le **champ magnétique**. Dans ces domaines spécifiques, il faut souvent développer des algorithmes sans équivalent dans d'autres domaines de la physique (notamment la gravité), même si on peut de temps en temps exploiter les travaux réalisés au profit de l'industrie (la mécanique

des fluides par exemple). La simulation numérique impose, de surcroît, une parfaite maîtrise de l'outil informatique, notamment celle des supercalculateurs. En astrophysique, les modèles exigent toujours plus de mémoire et de puissance de calcul pour atteindre un réalisme suffisant. D'où le développement d'applications complexes qui exécutent nos algorithmes sur des architectures parallèles pour lesquelles plusieurs milliers de processeurs travaillent ensemble avec une précision symphonique. Le développement et l'utilisation de ces applications complexes n'est pas sans rappeler les défis de l'instrumentation spatiale. Pour filer la métaphore, les supercalculateurs seraient les nouveaux lanceurs et les applications développées, les nouveaux détecteurs. Aujourd'hui, la simulation n'en est encore qu'à l'ère des pionniers mais il y a fort à parier sur un développement croissant dans les prochaines années.

domine la masse. La **gravité** y demeure la force fondamentale de formation des structures mais viennent s'y ajouter tous les processus hydrodynamiques, magnétiques et de couplage au rayonnement. La **modélisation** de la gravité traverse donc toute l'astrophysique.

Pour représenter une distribution de masse, la méthode classique consiste à utiliser des « particules » numériques, dont chacune possède une masse, une position, une vitesse, et une constitution : matière noire, étoile, nuage de gaz, planète... Selon les problèmes et les calculateurs, le nombre N de ces particules se compte en millions, voire en milliards, dans les simulations modernes. Celles-ci se décomposent en **pas de temps** successifs, une problématique revient couramment, celle de calculer, aussi précisément que possible, la force gravitationnelle subie par une particule, exercée par les $N-1$ autres particules. La technique la plus simple et la plus

précise consiste à calculer cette force pour toutes les paires de particules possibles puis à additionner les résultats. Néanmoins, cette méthode nécessite $N(N-1)$ calculs de distances, ce qui exige un temps de calcul prohibitif lorsque la simulation comporte de nombreuses particules. C'est pourquoi son emploi se restreint à des cas particuliers.

La plupart des codes de simulation calculent en réalité la gravité par des méthodes plus rapides qui, au prix de légères approximations, autorisent un plus grand nombre de particules, donc une haute résolution. Les deux techniques principales, le *treecode* et les « codes sur grille », permettent d'accélérer le calcul des forces gravitationnelles en ne demandant que $N(\log N)$ calculs de distance.

• Le *treecode*, ou « code en arbre », conçu de manière adaptative, sert à résoudre l'interaction d'autant mieux que les particules s'avèrent proches. La figure 1 montre la distribution spatiale de quelques

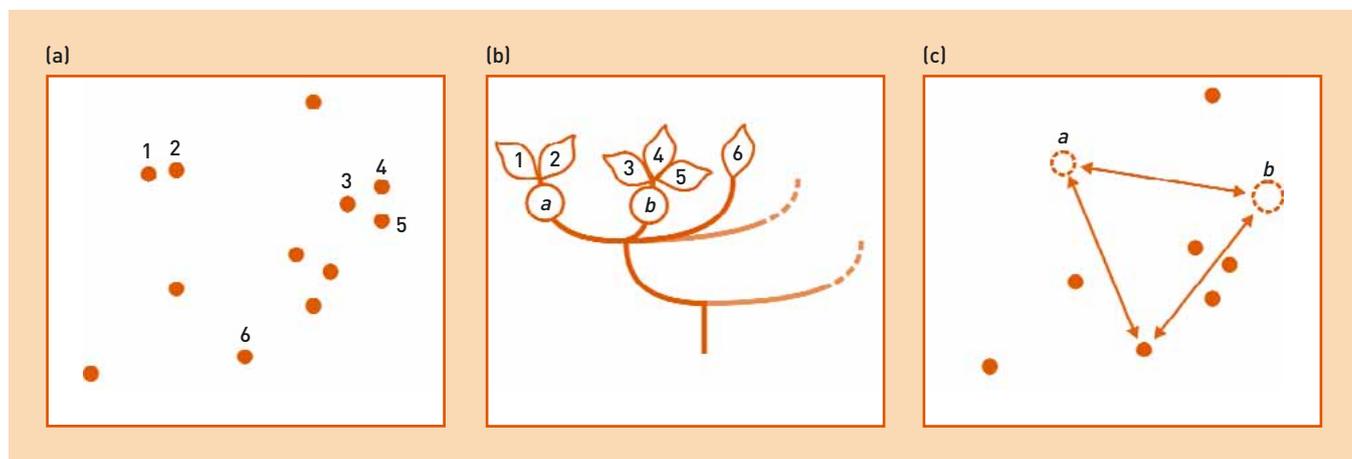


Figure 1.

Les particules représentant une distribution de corps massifs (par exemple des étoiles) sont regroupées en plus proches voisins à l'extrémité de la structure en arbre d'un *treecode*, ici détaillée pour les particules 1 à 6. Leurs interactions mutuelles sont calculées de manière exacte, puis elles sont regroupées en pseudo-particules (ici a et b) pour calculer les interactions à plus grande distance.

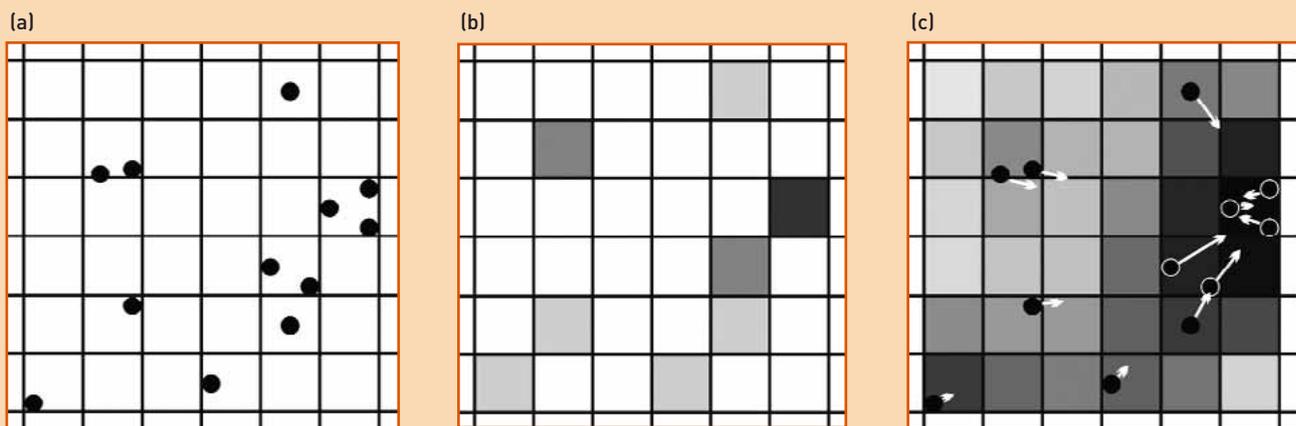


Figure 2.

La même distribution de particules est ici traitée dans un code sur grille (a). L'opération de fusion des particules sur la grille aboutit au calcul de la densité de masse (b, représentée par les niveaux de gris). La résolution de l'équation de Poisson permet de calculer le potentiel gravitationnel (grille c) à partir de la densité, puis la force gravitationnelle subie par chaque particule en fonction de la position sur la grille du potentiel.

particules numériques. Une structure « en arbre » se construit dans la mémoire de l'ordinateur pour regrouper « les plus proches voisins ». Sur cette figure, deux feuilles d'une même branche de l'arbre représentent les particules 1 et 2. Leur interaction gravitationnelle se calcule de manière exacte (aux arrondis informatiques près), c'est-à-dire proportionnellement à chacune de leur masse et inversement proportionnelle au carré de leur distance. L'interaction entre les particules 3, 4 et 5 se traite aussi de manière exacte. En revanche, concernant des particules plus éloignées les unes des autres, l'estimation des interactions se simplifie afin d'accélérer le calcul. Si l'on descend d'un niveau sur l'arbre, les particules 1 et 2 sont remplacées par une seule particule *a*, dont la masse revient à la somme des deux et se place au centre de gravité. La particule distante 6 subit une seule force, celle exercée par la pseudo-particule *a*, au lieu des deux forces exercées indépendamment par les particules 1 et 2. De même, le groupe de particules 3, 4 et 5 est remplacé par une autre pseudo-particule *b*, au même niveau que *a* sur l'arbre. Il suffit donc de calculer une seule force exercée par la particule *b* sur la particule *a*, au lieu des six forces exercées par chacune des particules 3, 4 et 5 sur les particules 1 et 2 individuellement.

Le regroupement des particules selon les niveaux de l'arbre n'entraîne pas forcément une dégradation de précision. Certes, l'interaction gravitationnelle entre les pseudo-particules *a* et *b* reste une approximation de la réalité, cependant elle demeure fiable en cas d'application à des particules suffisamment éloignées. Mais surtout, le gain en temps de calcul permet d'augmenter le nombre de particules entrant dans la simulation et donc la précision du modèle. Ainsi, une **galaxie** spirale contient cent milliards d'étoiles dans un disque de 10 **kiloparsecs** de rayon. Un calcul exact de toutes les interactions limiterait le nombre de particules à environ dix mille et la **résolution** du modèle (distance entre particules proches) ne serait que de 200 parsecs. L'emploi d'un code en arbre permet, à temps de calcul égal, de modéliser le **disque** à

l'aide d'un à dix millions de particules, autorisant des résolutions spatiales de l'ordre d'une dizaine de parsecs.

Le grand avantage du *treecode* réside dans sa conception adaptative. Le calcul des interactions étant plus fin à petite distance, la résolution devient optimale pour suivre les structures denses et massives. En revanche, ce code ne figure pas parmi les meilleurs pour modéliser la formation de nouvelles structures dans des régions qui ne sont pas déjà denses. Pour cette raison, les simulations de formation des structures s'intéressent souvent à d'autres codes, dits de « particules sur grille ».

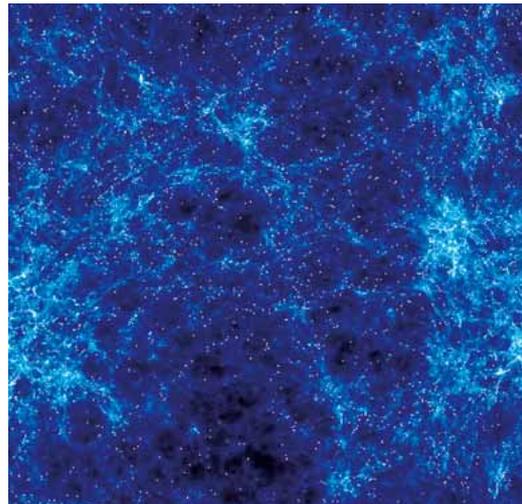
- Les codes dits de « particules sur grille » découpent l'espace simulé à l'aide d'une grille (figure 2). Dans sa version la plus simple, celle-ci se présente comme étant cartésienne et de résolution uniforme, c'est-à-dire que toutes les cellules γ sont cubiques et de même taille. Les particules fusionnant sur cette grille, la première étape de l'opération consiste à compter le nombre de particules présentes dans chaque cellule – en réalité, les particules positionnées au bord d'une cellule sont partiellement attribuées aux cellules voisines pour accroître la précision du calcul. Une fois cette étape réalisée, la grille donne la densité de masse dans l'espace simulé. La résolution de l'**équation de Poisson**⁽¹⁾ indique que le potentiel gravitationnel s'obtient par la convolution de cette densité par la fonction universelle $1/r$, où r représente la distance d'une cellule à une autre. Plusieurs calculs de cette convolution sont possibles en fonction de la forme de la grille. Sur une grille cartésienne, la technique la plus rapide consiste à effectuer la **transformée de Fourier**⁽²⁾

(1) Siméon-Denis Poisson (1781-1840), mathématicien, géomètre et physicien français qui a réalisé d'importants travaux sur l'électricité et le magnétisme qu'il contribua à fonder. En astronomie, il a essentiellement étudié l'attraction des planètes.

(2) Joseph Fourier (1768-1830), mathématicien et physicien français, connu pour ses travaux sur la décomposition de fonctions périodiques en séries trigonométriques convergentes appelées séries de Fourier.

de la densité : dans l'espace transformé, la convolution se réduit à un produit classique, puis la transformée inverse indique la valeur du potentiel gravitationnel dans chaque cellule de la grille. Connaissant, à ce stade, le potentiel gravitationnel sur la grille entière, le code calcule la force gravitationnelle qui s'exerce sur chaque particule puis en déduit l'avancement des particules à chaque pas de temps. La résolution spatiale d'une telle simulation est relative à la taille des cellules. Dans les **algorithmes** élaborés, la grille peut être « raffinée », en recoupant les cellules les plus intéressantes en unités plus petites. Pour « raffiner » les régions les plus denses, il faut procéder comme dans un *treecode*, mais aussi selon tout autre critère lié à la question étudiée (régions les plus froides, présence de **chocs**...).

Les codes sur grille offrent encore un autre avantage, celui de pouvoir incorporer une composante de gaz diffus, par exemple le gaz interstellaire d'une galaxie. Une telle composante suit les équations de l'hydrodynamique et ne se représente plus par des particules mais par une masse diffuse contenue dans chaque cellule. La gravité, calculée sur la grille, s'applique à cette masse tandis que diverses techniques résolvent les équations hydrodynamiques. À titre d'exemple, la formation des plus grandes structures de l'Univers (amas de galaxies et les filaments cosmologiques) s'étudie, avec succès, à l'aide des codes à particules sur grille (figure 3). Les simulations cosmologiques utilisent les fluctuations de densité de l'Univers **primordial**, observées dans le rayonnement fossile à 3 degrés K. Elles calculent l'amplification de ces fluctuations sous l'effet de leur



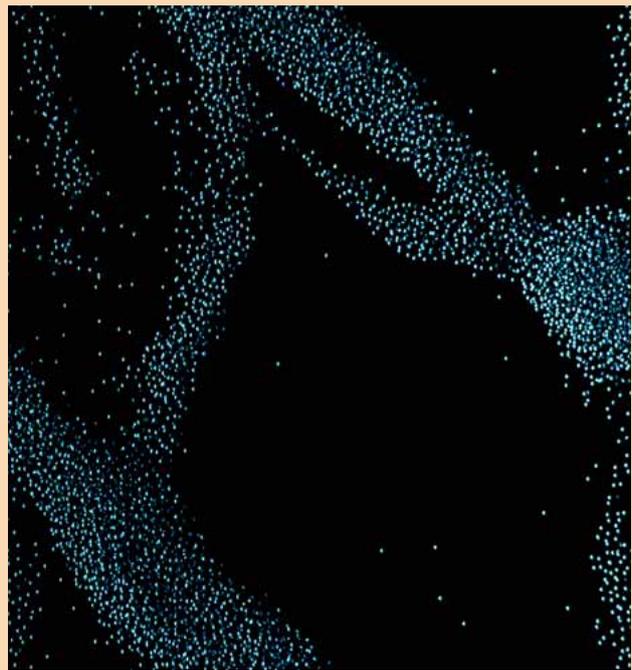
R. Teyssier/CEA

Figure 3. Une simulation cosmologique de la formation des grandes structures de l'Univers. La simulation montre l'état de l'Univers après environ 3 milliards d'années d'évolution dans une boîte de 50 mégaparsecs de côté. À cette échelle, la matière noire domine largement la masse de l'Univers. Son interaction, purement gravitationnelle, est modélisée à l'aide d'un code à « particules sur grille » et une grille raffinée, qui permet de suivre la formation des filaments cosmologiques et des amas de galaxies. Les plus petites structures visibles sur l'image correspondent aux halos de matière noire dont chacun contient une galaxie.

propre gravité et de l'expansion de l'Univers. Ainsi, pour tester le scénario cosmologique standard, on compare les propriétés statistiques des galaxies (distribution spatiale, masse) avec les observations.

Particules et collisions

Les interactions entre les particules de l'Univers se trouvent principalement régies par la gravité. Pour la **matière noire**, il s'agit même de la seule interaction possible. On considère qu'il n'existe pas d'autre force (à courte portée) pour décrire les trajectoires de ces particules étranges. Cette matière noire se présente comme un fluide dit « non collisionnel » tout comme les **étoiles** d'une **galaxie**, tellement éloignées les unes des autres (par rapport à leur taille), qu'elles n'entrent presque jamais en collision. La **modélisation** passe par l'**équation de Vlassov-Poisson**. En revanche, certains systèmes comme les nuages de gaz (**nébuleuses**) d'une galaxie ou les **planétésimaux** d'un **disque** protoplanétaire, montrent des dimensions propres non négligeables par rapport à la séparation de l'un avec l'autre. Ces objets cosmiques entrent en collision mutuelle à un rythme qui modifie la trajectoire de chacun. Ensuite, leur destin varie. Dans une galaxie, les nuages interstellaires rebondissent entre eux selon des collisions inélastiques qui dissipent une partie de l'énergie cinétique ; les planétésimaux d'un disque protostellaire s'agglomèrent en objets de taille croissante. La simulation numérique des anneaux de Saturne (figure 4) illustre l'évolution d'un système de corps gravitants et collisionnels. Les particules numériques modélisent les planétésimaux qui constituent les anneaux. Ils interagissent par gravité, peuvent s'agglomérer par collisions. Ils peuvent aussi fragmenter un gros corps en plusieurs autres plus petits. La gravité façonne des **ondes dites de Jeans** qui se propagent dans les anneaux et engendrent une morphologie filamentaire. Les propriétés observables des anneaux sont modifiées et se prédisent par ces simulations numériques.



S. Charnoz/CEA/Université de Paris Diderot et F. Durillon/Animesa

Figure 4. Une simulation de la structure des anneaux de Saturne à l'échelle de quelques dizaines de mètres. Les particules numériques interagissent par gravité, et par collisions mutuelles.

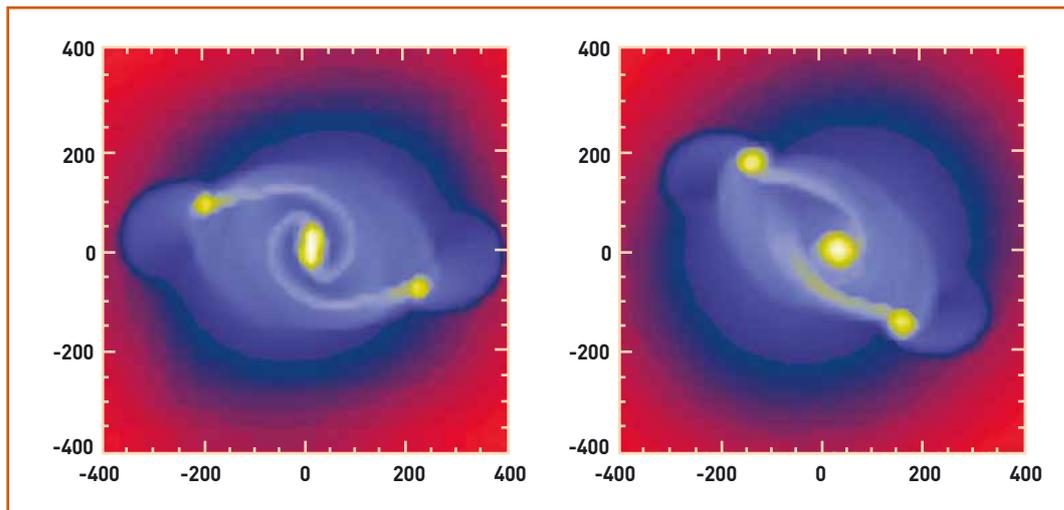


Figure 5.
La formation d'un système protostellaire au sein d'un nuage moléculaire, avec un code AMR à gauche, et un code SPH à droite. (Les distances sont en unités astronomiques : une unité astronomique équivaut à la distance entre la Terre et le Soleil, soit 150 millions de kilomètres).

L'hydrodynamique

La matière ordinaire (environ 15 % de la masse totale dans l'Univers) se spécifie d'être fortement collisionnelle et les interactions à courte portée dominent la dynamique des atomes d'**hydrogène** et d'**hélium**. Les collisions y sont tellement nombreuses que le **plasma** s'établit à un équilibre thermodynamique local. Aujourd'hui, les chercheurs savent décrire ce système grâce aux **équations d'Euler⁽³⁾-Poisson** qui entérinent le règne des chocs et de la mécanique des fluides. Il s'agit des mêmes équations-modèles qu'utilisent les ingénieurs de l'aérospatiale pour étudier l'écoulement des fluides autour des avions ou les climatologues pour la physique de l'atmosphère. Quant aux astrophysiciens, ils ont poussé plus loin l'exercice en proposant une technique originale, baptisée *Smooth Particle Hydrodynamics* (SPH), capable de simuler la mécanique des fluides à l'aide de particules. Son atout réside dans sa nature « **lagrangienne** », c'est-à-dire que les points d'échantillonnage du fluide sont des particules se déplaçant avec l'écoulement.

Par ailleurs, la présence de la gravité dans la matière ordinaire, fait qu'elle se concentre souvent dans de petits volumes très denses. Pour l'étudier, les astrophysiciens utilisent encore les techniques classiques de l'hydrodynamique, même si la résolution du maillage ne leur permet pas d'atteindre les toutes petites échelles. Mais depuis le début des années 1990, une nouvelle technique a révolutionné la discipline. Il s'agit du maillage adaptatif, en anglais *Adaptive Mesh Refinement* (AMR), qui permet à la grille de calcul de s'adapter dynamiquement aux

propriétés de l'écoulement en ajoutant des mailles, aux endroits stratégiques du calcul, notamment dans les régions denses aux petites échelles. L'AMR allie donc deux avantages : l'adaptabilité de la méthode SPH ainsi que la précision et la stabilité des méthodes sur grilles. Des études récentes ont effectivement démontré que la méthode SPH, dans sa version courante, ne peut décrire correctement des processus hydrodynamiques tels que l'**instabilité de Kelvin-Helmholtz⁽⁴⁾**. Les méthodes à base de grilles, par exemple les codes AMR, ne connaissent pas ces limites. En revanche, concernant les écoulements froids en rotation que l'on trouve notamment dans les galaxies, la méthode SPH peut s'avérer plus efficace que les codes AMR. La bonne stratégie consiste donc à utiliser et comparer les deux méthodes aussi souvent que possible. Lorsque les résultats s'accordent, la crédibilité du modèle s'en trouve naturellement renforcée. Ce fut le cas récemment lors de l'observation d'un effondrement de nuage moléculaire (figure 5). En revanche, cette crédibilité devient moins probante en cas d'ajout d'autres processus physiques – par exemple les fluides magnétisés et l'hydrodynamique radiative.

> Frédéric Bournaud et Romain Teyssier

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)

(3) Leonhard-Paul Euler (1707-1783), mathématicien et physicien suisse, qui a fait d'importantes découvertes en matière de calcul infinitésimal, de théorie des graphes, en mécanique et dynamique des fluides pour l'astronomie.

(4) William Thomson, mieux connu sous le nom de Lord Kelvin, (1824-1907), physicien britannique reconnu pour ses travaux en thermodynamique, et Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894), physiologiste et acousticien, professeur d'anatomie et de physiologie, puis de physique à Berlin.

POUR EN SAVOIR PLUS

R. TEYSSIER ; S. FROMANG ; E. DORMY, *Kinematic dynamos using constrained transport with high order Godunov schemes and adaptive mesh refinement*, 2007, JCP, 218, 44.

Le rayonnement

Le transfert **radiatif** est le domaine de la physique qui décrit la propagation et les interactions des photons avec la matière. La presque totalité des informations sur les astres nous parvenant sous forme de lumière, la communauté des astrophysiciens s'implique fortement dans le traitement du transfert radiatif pour comprendre l'émission de photons et leur propagation jusqu'à nous. Il s'agit donc d'un outil puissant, capable de diagnostiquer les conditions physiques au sein des astres (densité, pression, température, composition chimique). Ce qui ne veut pas dire que le **rayonnement** doit être seulement considéré comme un élément passif pour le diagnostic. Il s'agit également d'un acteur dynamique important qu'il faut prendre en compte pour reproduire la formation et l'évolution des systèmes astrophysiques. Aujourd'hui, grâce à la puissance croissante des ordinateurs, de nouvelles méthodes voient le jour, permettant de coupler dynamiquement le transfert radiatif et l'hydrodynamique. Cet article présente, de manière schématique, les méthodes numériques relatives au transfert radiatif. Vu leur nombre, il reste impossible de décrire les photons pris individuellement. Il faut passer par leur fonction de distribution : $I(x,t,n,\nu)$. Dans cette fonction, I correspond au nombre de photons par unité de volume au point x , au temps t , ayant une direction de propagation n et une fréquence ν . L'équation du transfert radiatif détermine l'évolution, dans le temps et dans l'espace, de la fonction de distribution : en l'absence de matière, les photons se propagent en ligne droite mais s'ils rencontrent de la matière, ils peuvent se voir absorbés ou diffusés dans une autre direction tandis que la matière émet alors de nouveaux photons. L'équation du transfert indique alors que la variation du nombre de photons se propageant suivant une direction équivaut au nombre de photons émis ou diffusés par la matière dans cette direction, moins le nombre de photons absorbés ou diffusés dans une autre direction.

En théorie, suivre l'évolution de la fonction de distribution ne présente pas de difficulté. Mais en pratique, il s'agit d'un problème véritablement délicat et coûteux en temps de calcul. En effet, en plus du facteur temps, la fonction de distribution dépend d'autres paramètres : trois pour la position x , deux pour déterminer la direction n et un autre pour la fréquence ν . Échantillonner chaque paramètre avec N points, suppose alors que la grille de simulation comporte N^6 éléments, ce qui devient rapidement impossible pour des valeurs « raisonnables » de N . À titre de comparaison, pour une simulation hydrodynamique, il faut seulement N^3 éléments pour échantillonner chaque variable. Mais au regard de ces difficultés, inhérentes à la résolution de l'équation du transfert, de nombreuses approches simplificatrices se développent. La plus simple d'entre elles suppose un milieu complètement transparent – le cas de nombreux systèmes astrophysiques où la densité de gaz s'avère très faible. Dans cette hypothèse, un photon émis s'échappe du système sans interagir avec la matière. Connaître ou calculer sa trajectoire devient inutile puisqu'il suffit de prendre en compte la perte d'énergie correspondante pour le gaz. Dans ce cas,

les chercheurs parlent plutôt de refroidissement que de transfert radiatif. Sur le plan technique, il faut ajouter, dans l'équation sur l'énergie du gaz, un terme qui permet de prendre en compte tous les processus d'émission du gaz à l'origine de la perte d'énergie. En présence de molécules ayant de nombreuses raies d'émission, il peut s'agir de processus complexes. La figure 1 présente une carte de densité issue d'une simulation du milieu interstellaire. Les petites structures denses (les plus claires) résultent d'un refroidissement plus intense qui a baissé l'énergie interne, et donc la pression, dans ces régions ensuite comprimées par le milieu extérieur. Ce processus de fragmentation par instabilité thermique marque une étape importante dans la formation des cœurs protostellaires, notamment parce qu'il fixe leur masse.

Mais au fur et à mesure qu'elle se densifie, la matière devient opaque au rayonnement, ce qui empêche de partir du postulat de la transparence du milieu – il s'agirait d'une très mauvaise approximation. Une solution existe pour étendre la méthode précédente à des régions optiquement épaisses, tout en conservant une technique numérique simple : elle consiste à supprimer le refroidissement radiatif au-delà d'un certain seuil en densité. C'est notamment ce qui est

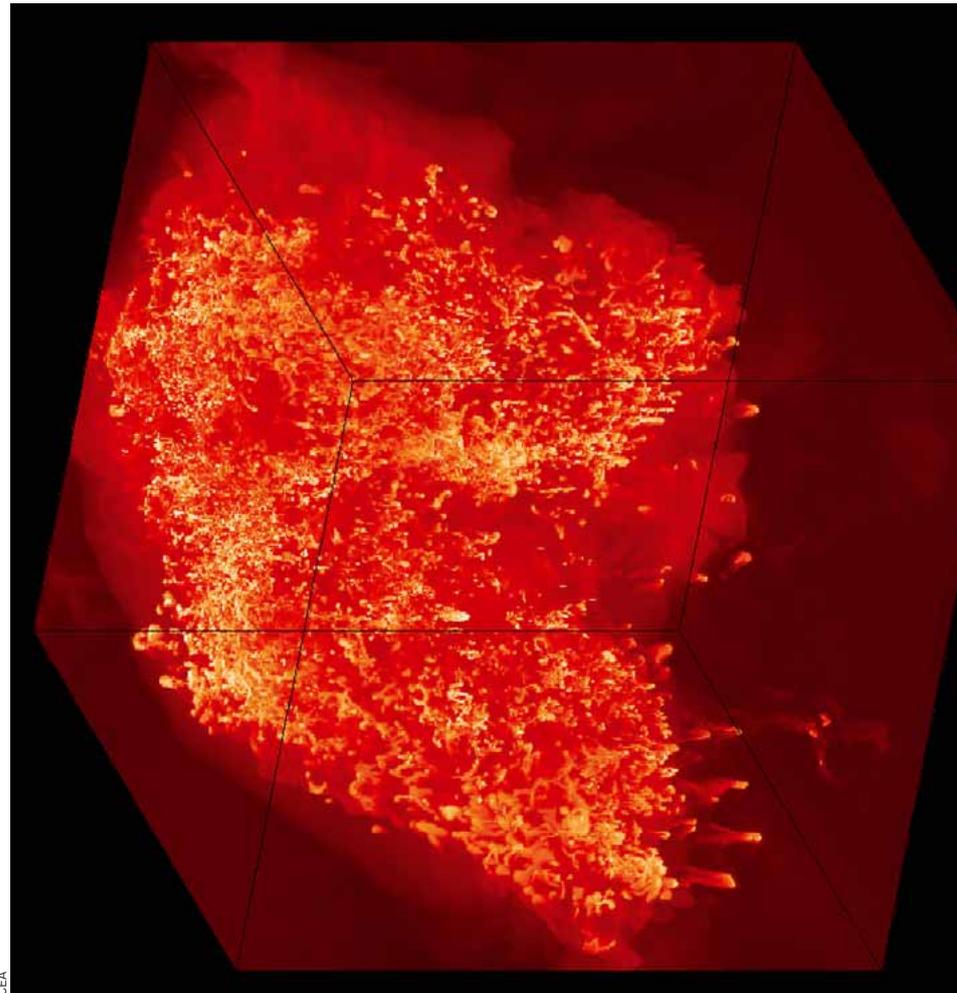


Figure 1. Carte de densité d'une simulation du milieu interstellaire. Le domaine de simulation fait environ 50 années-lumière. Les petites structures denses (les plus claires) se sont formées par l'instabilité thermique due au refroidissement. Ce sont des cœurs denses dans lesquels se forment les étoiles.

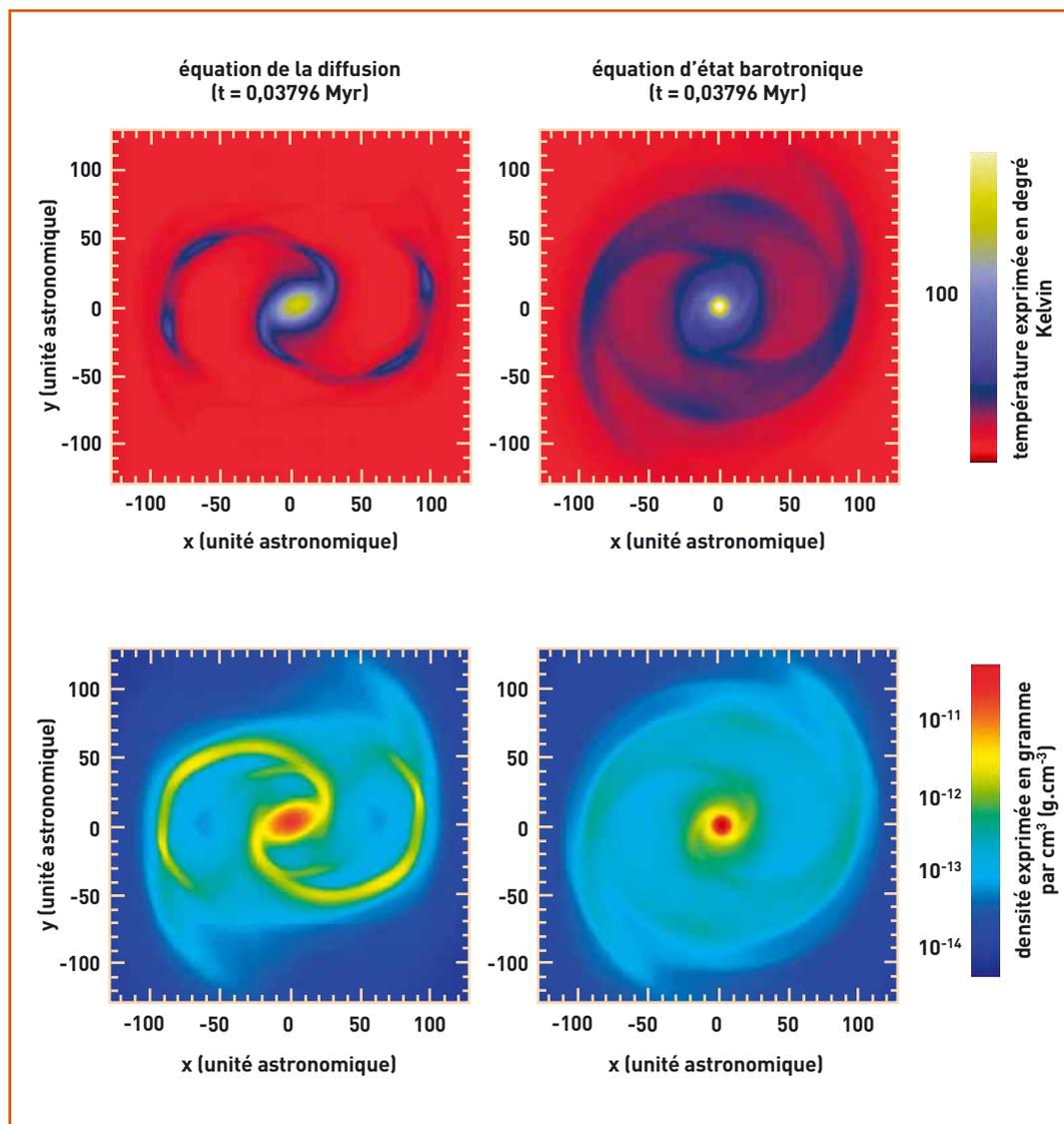


Figure 2. Simulation de la formation et de la fragmentation d'un cœur dense proto-stellaire. Les deux figures de gauche ont été obtenues en utilisant, pour le transfert, l'approximation de la diffusion ; alors que, pour les figures de droite, c'est une équation d'état barotrope qui a été utilisée. Les deux figures du haut montrent des cartes de température et celles du bas des cartes de densité. L'unité astronomique correspond à la distance entre la Terre et le Soleil (150 millions de km) et $t = 0,03796$ millions d'années.

fait quand on utilise une **équation d'état barotrope** où le gaz, isotherme à basse densité, devient **adiabatique** au-delà d'un « seuil en densité ». Généralement, celui-ci se calcule en déterminant, sur des simulations monodimensionnelles avec transfert radiatif, la densité à partir de laquelle la structure devient opaque, ce qui dépend de nombreux paramètres. Les images de la figure 2 (colonne droite) montrent une simulation de la fragmentation d'un **disque protostellaire**, réalisée avec une équation d'état barotrope.

Si elles présentent l'avantage de la simplicité, les approches précédentes laissent néanmoins apparaître une lacune : elles ne transportent pas l'énergie, laquelle, si elle peut rayonner hors du système étudié, ne peut se transporter d'une région à une autre de ce système. Retrouver cet aspect important du transfert radiatif suppose des méthodes, plus complexes et plus proches de l'équation du transfert. Pour éviter l'équation

complète du transfert, trop lourde numériquement, la solution consiste à utiliser des moyennes angulaires de la fonction de distribution des **photons** dites « moments de la fonction de distribution ». Le moment d'ordre 0 correspond à l'énergie radiative, le moment d'ordre 1 au flux radiatif, le moment d'ordre 2 à la pression radiative, etc. À partir de l'équation du transfert, il devient alors possible d'écrire les équations d'évolution de ces moments. Ces équations, proches de celles utilisées par l'hydrodynamique, relient la dérivée temporelle du moment d'ordre n à la divergence du moment d'ordre $n+1$. Il s'avère donc impossible d'intégrer directement cette hiérarchie d'**équations aux moments** puisque, pour déterminer l'évolution temporelle d'un moment, il faut connaître le moment suivant. Il devient donc indispensable d'opérer des approximations physiques et d'introduire une relation de fermeture pour relier un moment à ceux d'ordres inférieurs. Le plus simple

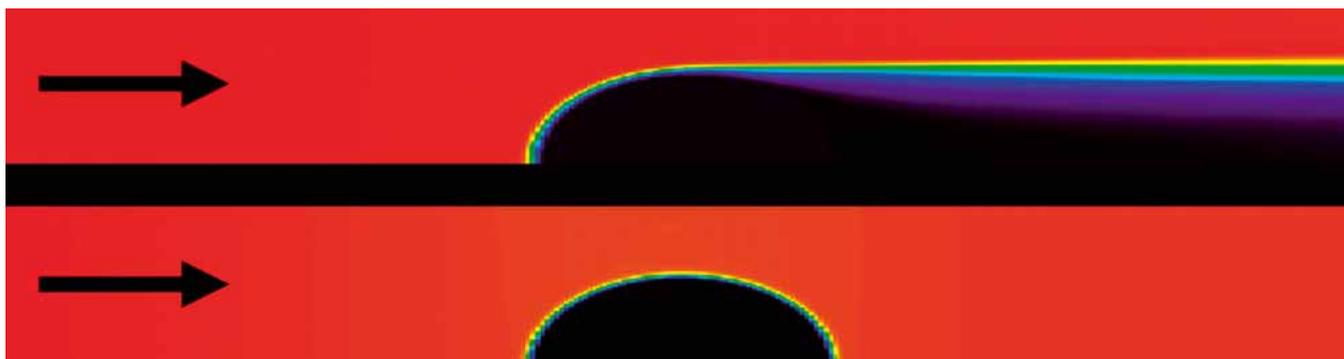


Figure 3. Simulation d'un conduit transparent dans lequel du rayonnement arrive de la gauche (flèche) et rencontre un obstacle opaque (ovale noir). En haut, avec le modèle M1, l'ombre derrière l'obstacle est bien préservée. En revanche, en bas, avec l'approximation de la diffusion, le rayonnement qui se propage selon les gradients de température remplit la zone d'ombre.

des modèles consiste à garder seulement l'équation sur l'énergie radiative (moment d'ordre 0). La relation de fermeture est ensuite obtenue en supposant que la dérivée temporelle du flux soit nulle. Cette opération permet d'obtenir une équation uniquement sur l'énergie radiative. Ce modèle, exact pour les milieux optiquement épais, s'appelle approximation de la diffusion. Avec lui, l'énergie radiative est transportée d'un point à un autre en suivant les gradients de température. Les deux images de la figure 2 (colonne gauche) présentent une simulation de fragmentation d'un disque protostellaire utilisant cette approximation de la diffusion. Celle-ci donne des résultats sensiblement différents à ceux obtenus au moyen d'une équation d'état barotropique : par exemple, les bras spiraux sont plus marqués. L'approximation de la diffusion constitue donc une avancée considérable comparée à l'équation d'état barotropique.

Néanmoins, il peut être utile de recourir à des modèles un peu plus complexes en conservant deux équations aux moments (sur l'énergie et le flux radiatif) au lieu d'une seule. Pour ce type de modèle, il faut une relation de fermeture permettant de calculer la pression radiative en fonction de l'énergie et du flux radiatif. C'est, par exemple, le cas du modèle dit M1 qui calcule la pression radiative en minimisant l'entropie du rayonnement. Le principal intérêt de M1 réside en ce que le flux radiatif ne s'aligne plus systématiquement avec le gradient de température, d'où la préservation des ombres (figure 3).

En simplifiant considérablement l'équation du transfert, ces modèles aux moments ramènent à un système d'équations voisin de celui de l'hydrodynamique. Néanmoins, le fait que la vitesse de la lumière soit élevée (notamment par rapport à la vitesse des fluides étudiés) implique des temps caractéristiques liés au rayonnement extrêmement petits. D'où la nécessité d'intégrer, en temps de manière implicite, le transfert de rayonnement. Il s'agit d'une opération qui impose de résoudre un système linéaire couplant l'ensemble des points de la **simulation numérique**. Outre un coût élevé en calcul, cette résolution nécessite des **algorithmes** dédiés et sophistiqués qui soient efficaces sur des ordinateurs « massivement parallèles ».

Enfin, si nécessaire (et si possible !), l'équation du transfert doit se résoudre par un minimum

d'approximations physiques. C'est notamment le cas lorsqu'il s'agit d'établir des comparaisons fines avec certaines observations. La figure 4 correspond à un calcul de transfert radiatif dans un disque de poussière, autour d'une **étoile** binaire. Afin de résoudre l'équation du transfert exactement, tout

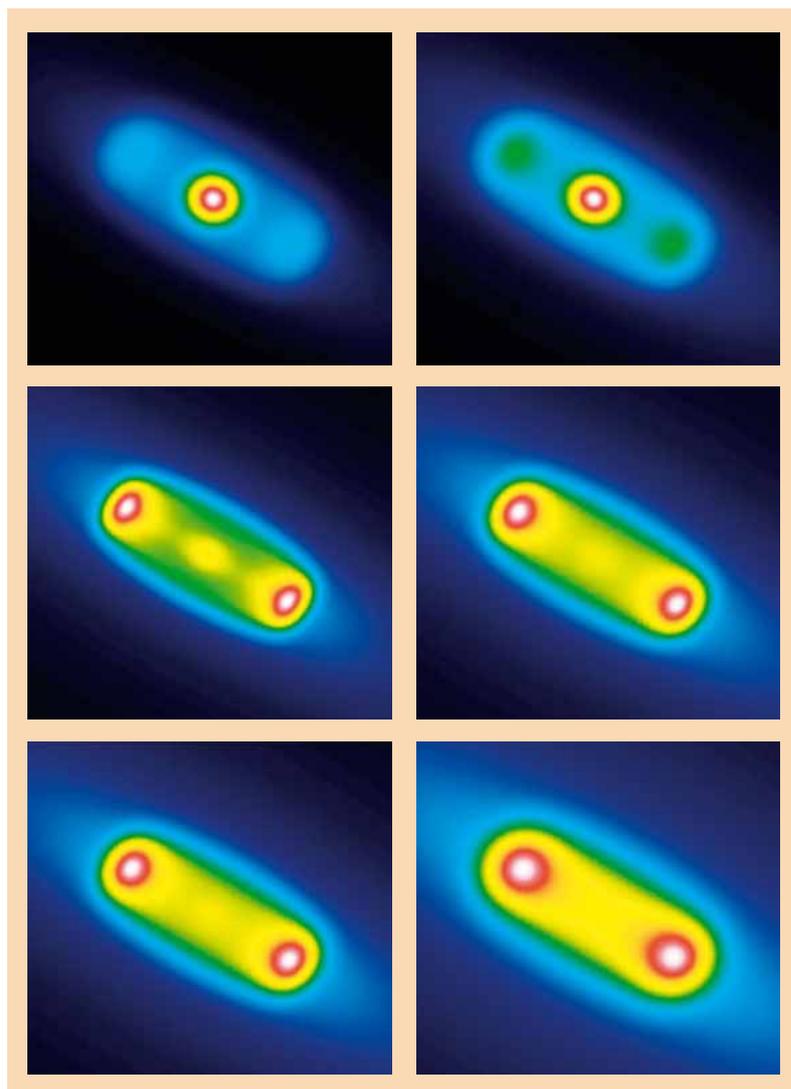


Figure 4. Images simulées dans différentes longueurs d'onde d'un disque de poussière autour d'une étoile binaire. Ces images peuvent ensuite être directement comparées aux observations.



en gardant un coût numérique acceptable, on a supposé que le **disque** était à **symétrie cylindrique**. Avec cette approximation géométrique, il est possible de calculer le transfert radiatif dans le disque, en prenant notamment en compte les propriétés radiatives complexes des poussières qui le constituent.

Qu'elles soient simples ou complexes, il existe donc de nombreuses méthodes de **modélisation** du transfert radiatif. Le rôle du physicien consiste ensuite à cerner, au mieux, les propriétés physiques

essentielles et nécessaires à l'étude de son problème pour, finalement, choisir le meilleur compromis entre les contraintes techniques et numériques, et les nécessités physiques.

> Édouard Audit

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)

Le magnétisme

Dans l'Univers, le **champ magnétique** est omniprésent. Pour en comprendre son origine et son influence sur l'évolution des objets célestes, les chercheurs du CEA développent des programmes numériques performants capables de suivre l'évolution et la génération du champ magnétique dans des objets aussi variés que les **étoiles**, les **disques d'accrétion** ou les **galaxies**. Il s'agit d'un des enjeux majeurs de l'astrophysique du XXI^e siècle.

L'Univers étant principalement constitué de gaz ionisé (autrement dit de plasma, quatrième état de la matière), les effets du champ magnétique se font sentir dans la plupart des objets célestes puisque les courants électriques peuvent y circuler librement. Par exemple, sur Terre, le champ géomagnétique agit sur les aiguilles des boussoles en les orientant vers le Nord géographique qui, en fait, se trouve être le pôle Sud magnétique. Mais dans le **Soleil**, où il s'avère

1000 fois plus intense que sur Terre, le champ magnétique prend, tour à tour, la forme de points brillants, de taches solaires ou de protubérances. Dans les galaxies, on peut également observer un champ ambiant de quelques micro**Gauss**, principalement le long des bras spiraux. Enfin, l'interaction entre deux structures cosmiques magnétisées s'avère également très instructive sur le rôle joué par le champ magnétique dans l'Univers – par exemple, dans le cas d'un système étoile/**planète** ou d'un objet central avec un disque de matière orbitant autour de cet objet. D'où, l'incise d'Eugene Parker⁽¹⁾ dans *Cosmic Magnetic Fields* où il écrit : « *Les champs magnétiques sont communs dans les laboratoires, et même dans les maisons, où leurs propriétés sont bien connues. Avec les grandes échelles présentes dans l'Univers, cependant, le champ magnétique joue un rôle particulier, assez différent de celui qu'il joue dans les laboratoires. Le champ magnétique se comporte dans l'Univers comme un "organisme", se nourrissant des mouvements créés par les étoiles et galaxies.* » C'est donc à cause de l'énorme taille caractéristique des conducteurs cosmiques⁽²⁾ que les courants électriques qu'ils contiennent sont déterminés par le mouvement du plasma plutôt que par la conductivité électrique. La **force de Lorentz**, associée au champ magnétique qui en résulte, agit directement sur les mouvements du plasma. On peut décomposer l'effet de cette force en une composante reliée à un gradient de pression magnétique perpendiculaire aux lignes de champ magnétique, et en une autre, reliée à la tension des lignes, le long desquelles les **ondes d'Alfvén** se propagent. En raison de la longueur de l'échelle de temps cosmologique, la force de Lorentz, bien que petite par rapport à la **gravité** à ces grandes échelles, produit des effets systématiques et importants.

- Origine du magnétisme : batterie de Biermann et effet dynamo.

L'Univers baigne dans un champ magnétique infini-tésimal. Son origine est liée à l'existence de gradients

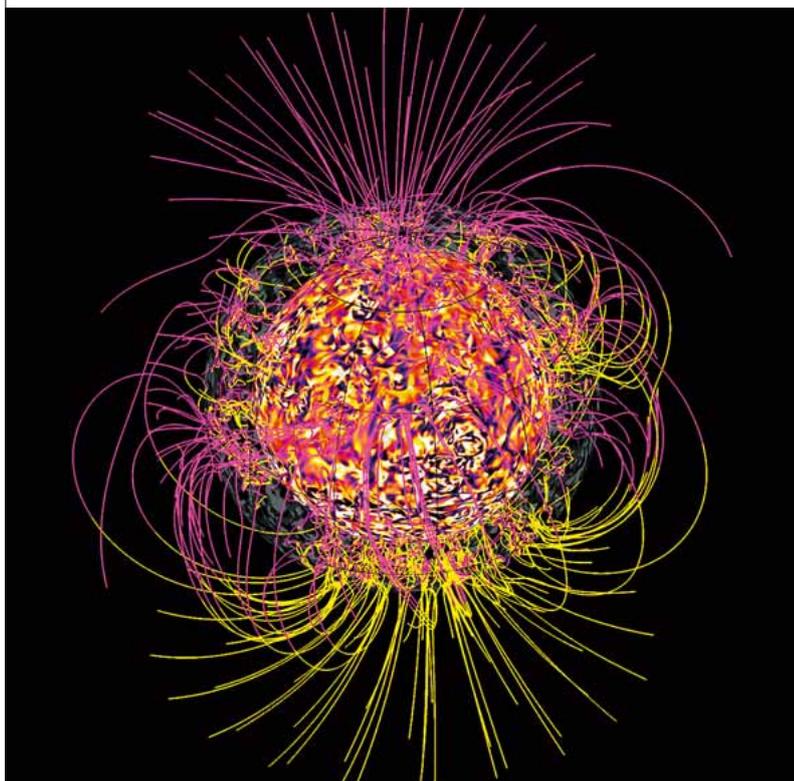


Figure 1.
Ligne de champ magnétique dans, et hors de la zone convective solaire. En violet, les zones dirigées vers le Soleil et en jaune celles dirigées vers l'observateur.

(1) Eugene Parker (né en 1927), astrophysicien américain qui a développé la théorie du vent solaire, prédit la forme spirale du champ magnétique à l'intérieur du système solaire, démontré que la couronne solaire se constituait d'une multitude de minuscules éruptions solaires couvrant la totalité de la surface du Soleil.

(2) Leur nombre de Reynolds magnétique ($R_m = VL/\eta$) est gigantesque. Dans cette équation, V et L représentent la vitesse et la longueur caractéristique du système ; η étant la diffusivité magnétique (inversement proportionnelle à la conductivité du plasma).

de densité et de pression électroniques non alignés dont l'association crée des sources de champ magnétique : c'est le phénomène dit de la batterie de Biermann⁽³⁾. Pour amplifier le champ magnétique vers des valeurs plus élevées (de quelques micro à plusieurs centaines de milliards de Gauss comme dans les objets compacts), on peut soit le comprimer (par la conservation du flux magnétique, l'amplitude du champ croît avec la réduction de la taille du système), soit l'amplifier *via* l'action d'une dynamo fluide. À titre de comparaison, prenons l'exemple d'une dynamo installée sur un vélo pour convertir l'énergie mécanique fournie par une personne pédalant, en énergie électrique, par exemple, pour allumer l'ampoule d'un phare. Pour les objets célestes, il existe un principe équivalent capable de transformer l'énergie cinétique en énergie magnétique. Ce principe dépend du mouvement du plasma composant ces objets célestes. On lui a donné le nom de « dynamo fluide ». Selon toute vraisemblance, il serait à l'origine du magnétisme de la Terre, de Jupiter, du Soleil, de certaines étoiles et des galaxies.

- Méthodes numériques et contrainte de conservation du flux magnétique.

Étudier le magnétisme des objets cosmiques nécessite l'utilisation d'une équation dynamique décrivant l'évolution du champ magnétique : il s'agit de l'équation d'induction⁽⁴⁾. Des solutions analytiques existent pour résoudre cette équation dans certaines configurations magnétiques simples. Mais la plupart des problèmes liés au magnétisme cosmique nécessitent le développement de programmes numériques multidimensionnels (2-D ou 3-D) pour résoudre cette équation et son comportement complexe. Ces dernières années, les chercheurs du CEA ont donc développé des programmes capables d'y parvenir, par approximation numérique. Ceci consiste à coupler l'équation d'induction, de manière non linéaire, aux équations de la mécanique des fluides. C'est le cas des programmes RAMSES, Heracles, ASH (pour *Alelastic Spherical Harmonic*). De nombreuses techniques numériques existent pour donner une approximation numérique à un système d'équations aux dérivées partielles (EDP) : par exemple, les différences finies, les méthodes spectrales, les éléments finis ou spectraux.

De plus, deux difficultés supplémentaires surgissent quand il s'agit de modéliser un plasma magnétisé

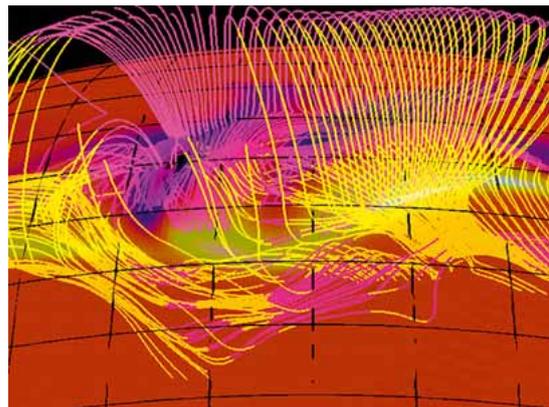


Figure 2. Émergence d'un tube de flux magnétique à la surface d'une simulation du magnétisme solaire illustrant l'apparition des taches solaires. On remarque la connectivité des lignes de champ magnétique entre l'intérieur et la basse couronne, la surface étant représentée par la grille semi-transparente (en jaune la ligne est dirigée vers le lecteur et en mauve vers l'étoile).

et de comprendre l'évolution de son champ magnétique : la première vient de la conservation du flux magnétique découlant directement des équations de Maxwell⁽⁵⁾ et la seconde de la présence d'ondes spécifiques telles que les ondes transverses incompressibles d'Alfvén. Le Service d'astrophysique du CEA a exploité les différences finies sur grilles et les méthodes spectrales afin de traiter, le plus précisément possible, les équations de la **magnétohydrodynamique** (MHD). Les méthodes grilles présentent l'avantage d'une mise en œuvre simple car les équations sont directement projetées sur la grille de calcul. De plus, elles s'avèrent flexibles puisque l'on peut toujours ajouter de nouveaux points de grille, en cours d'évolution (d'où le terme de grille adaptative), pour améliorer la précision numérique du calcul et pouvoir ainsi capturer les chocs. En revanche, elles sont d'une précision limitée en fonction de l'ordre du

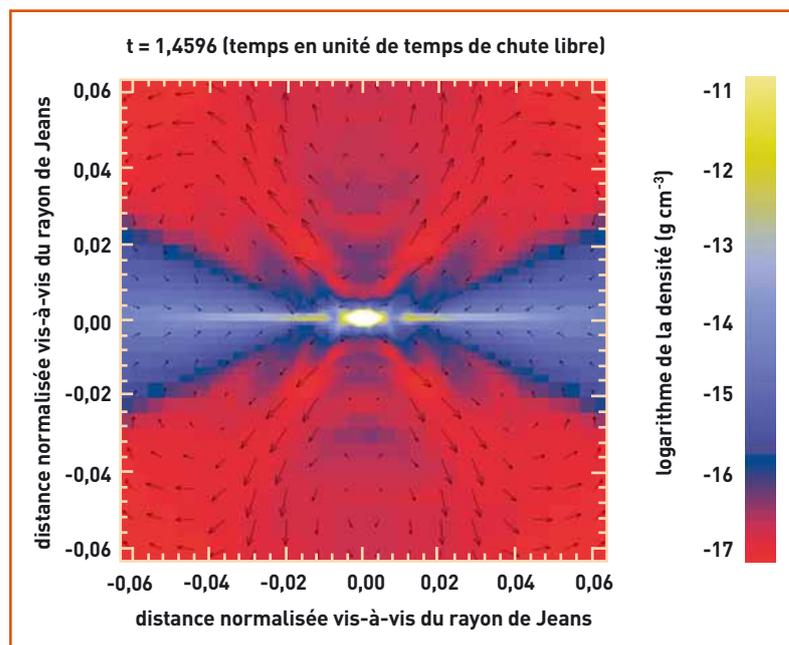


Figure 3. Formation d'un disque circumstellaire par effondrement gravitationnel d'un nuage de gaz ionisé baigné d'un champ magnétique.

(3) Ludwig Biermann (1907-1986), astronome allemand qui a étudié les queues des comètes et leurs interactions avec le vent solaire. Il a également contribué à la physique des plasmas, notamment à l'étude de la chromosphère et de la couronne solaire.

(4) Cette équation dérive des équations de Maxwell et de la loi d'Ohm. Comme pour celles-ci, il s'agit d'une équation aux dérivées partielles vectorielles :

$\delta B / \delta t = \text{Rot } x (u \times B) - \text{Rot } x (\text{eta Rot } x B)$. Le premier terme représente l'advection, le cisaillement et la compression du champ magnétique par les mouvements du plasma ; le second, sa dissipation par l'effet Joule (« B » correspond au champ magnétique, « u » au champ de vitesse, « Rot » le rotationnel d'un vecteur, « x » le produit vectoriel et « $\delta / \delta t$ » la dérivée partielle en fonction du temps.

(5) James Maxwell (1831-1879) : physicien et mathématicien écossais connu pour avoir unifié en un seul ensemble d'équations, les équations de Maxwell, l'électricité, le magnétisme et l'induction, en incluant une importante modification du théorème d'Ampère.



développement utilisé pour évaluer numériquement les dérivées et autres gradients présents dans les systèmes d'EDP/MHD. Au contraire, l'intérêt de la seconde approche, celle dite des méthodes spectrales, réside dans la précision : ici, les dérives spatiales deviennent des multiplications dans l'espace spectral plutôt que des variations. Ces méthodes spectrales reposent sur des transformations directes et indirectes faisant passer de l'espace physique (réel) à l'espace spectral, et vice versa, ce qui est préférable pour évaluer les termes non linéaires. Pour la plupart de ces transformations, il existe des **algorithmes** utilisant les **transformées de Fourier**, ce qui les rend numériquement très efficaces et rapides (FFT pour *Fast Fourier Transform*). En revanche, les méthodes spectrales s'avèrent moins efficaces pour traiter des chocs car il est difficile de décrire des discontinuités avec des fonctions trigonométriques (phénomène dit des anneaux de Gibbs⁽⁶⁾).

Afin de mettre en œuvre la contrainte concernant la conservation du flux magnétique, les chercheurs disposent de deux stratégies, à savoir la méthode dite de la « décomposition toroïdale/poloïdale du champ » et celle dite du « flux contraint ». La première de ces approches consiste à introduire directement la contrainte dans les équations, ce qui entraîne une augmentation de l'ordre du système d'équations à résoudre : dès lors, ce n'est plus le

champ magnétique que l'on évalue mais les potentiels magnétiques dont il dérive. Cette stratégie convient particulièrement aux méthodes spectrales pour lesquelles les dérivées successives restent précises. En revanche, mieux vaut utiliser la méthode dite de « flux contraint » pour les grilles capturant les chocs, par exemple celle dite de Godunov ou la *Piecewise parabolic method* (PPM) : ce sont des méthodes numériques permettant un traitement spécifique des discontinuités réduisant le lissage du choc que des méthodes plus classiques opèrent. La méthode dite de « flux contraint » repose sur le fait que l'intégrale, sur le volume élément de la divergence du champ magnétique, se réduit à l'intégrale de surface du flux magnétique défini au centre de la surface. Or, en utilisant l'équation d'induction dans son approximation idéale (on néglige les effets liés à la conductivité électrique finie du plasma), on peut relier cette intégrale de surface sur le flux magnétique au calcul d'une circulation de la force électromotrice (emf)⁽⁷⁾. Un simple bilan des contributions des différentes forces électromotrices sur les différents segments formant le contour (par exemple les quatre côtés d'un carré) montre que les contributions s'annulent 2 à 2, laissant le flux magnétique inchangé. Dès lors, si une simulation est initialisée avec un flux magnétique nul, il le restera à la précision machine près.

Dans les simulations, le nombre de types d'ondes dépend des hypothèses considérées pour l'évolution du plasma : incompressible, anélastique ou compressible. Par exemple, dans le code ASH, les ondes d'Alfvén et les ondes magnéto-sonores lentes sont bien prises en compte, mais pas les ondes purement compressibles. À l'inverse, avec le code RAMSES, toutes les ondes sont traitées, même les ondes compressibles ou les chocs. Elles sont traitées dans une approche de MHD idéale (la dissipation est purement numérique afin de stabiliser le schéma numérique). La **modélisation** du magnétisme cosmique appelle le développement de codes sur des machines massivement parallèles capables d'effectuer des calculs en quelques jours ou semaines, alors que des ordinateurs domestiques mettraient plusieurs décennies. On les trouve notamment au **Centre de calcul recherche et technologie** (CCRT), l'une des composantes du complexe de calcul scientifique du CEA localisé sur le site de Bruyères-le-Châtel (Centre DAM/Ile-de-France) ou au Grand équipement national de calcul intensif (Genci)⁽⁸⁾. Là encore, le SAP a développé deux stratégies : le parallélisme par décomposition de domaines (distribution de sous-domaines parmi les processeurs) ou le parallélisme dans l'espace spectral (distribution des nombres d'ondes). Le choix du problème astrophysique peut donc amener à des solutions numériques très variées alors même que le système d'équations physiques initial reste similaire.

corps céleste	amplitude champ magnétique B en Gauss (G)	taille caractéristique (L) ou forme (topologie) du champ
champ intergalactique	10^{-9}	
galaxie	2×10^{-6}	B régulier, L ~ plusieurs kiloparsec
nuage interstellaire	10^{-5}	10 parsec
mazer, nuage dense froid	10^{-2} à 10^{-3}	$< 10^{16}$ cm
quasars (radio galaxie)	100	~ 1 parsec
Soleil		
champ poloïdal	1 à 10	0,1 à 1 rayon solaire (dipôle et quadripôle)
champ toroïdal	$> 10^3$	5 000-50 000 km
champ coronal	10^{-5}	quelques rayons solaires
étoiles Ap	10^4	dipôle oblique, starpôle
naines blanches	10^6 à 10^8	dipôle
pulsar (étoiles à neutrons)	10^{12} (magnestar 10^{15})	dipôle
binaires X-ray (avec trou noir)	10^{-9}	3 à 100 rayon (R) gravitationnel
planètes		
Terre	0,5 à 1	plusieurs rayons de la Terre
Jupiter	4	plusieurs rayons de Jupiter
Saturne	0,2 à 0,4	plusieurs rayons de Saturne
Mercurure	5×10^{-3}	1 à 2 rayon de Mercure
Mars	$< 3 \times 10^{-4}$	reliquat dans la croute

Propriétés du magnétisme cosmique pour différents objets célestes. Nous listons l'amplitude typique du champ magnétique en Gauss (10^4 G = 1 Tesla) et leur taille caractéristique (L). Les méthodes d'observation du champ magnétique reposent essentiellement sur trois approches : soit la polarisation de la lumière traversant le champ magnétique de l'objet observé (effet Hanle, rotation Faraday), soit la modification des niveaux d'énergie des atomes baignés dans un champ magnétique (effet Zeeman), soit par émission cyclotron ou synchrotron des électrons en mouvement giratoire le long des lignes de champ de l'objet.

(6) Il s'agit d'un bruit numérique se caractérisant par des anneaux concentriques autour des structures les plus raides.

(7) $emf = u \times B$ (u étant la vitesse du plasma, B désignant le champ magnétique et \times , les produits vectoriels).

(8) Société civile détenue à 50 % par l'État représenté par le ministère de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur, 20 % par le CEA, 20 % par le CNRS et 10 % par les universités.

Les figures 1, 2, 3 et 4 montrent des simulations 3-D MHD illustrant les récents résultats obtenus par le SAP sur le magnétisme cosmique. Le calcul de l'effet dynamo et de l'activité magnétique solaire avec ASH (figure 1) a permis de mettre en évidence l'efficacité de la convection turbulente pour générer et entretenir un champ magnétique à toutes les échelles spatiales (y compris à des échelles supérieures à celles de l'écoulement, on parle de dynamo grande échelle). Il a également permis de montrer le rôle de la **tachocline** à la base de cette zone pour organiser le champ sous forme de « ruban » et de contribuer à l'établissement d'un cycle de 11 ans ainsi que l'évaluation quantitative de la rétroaction de la force de Lorentz sur l'écoulement moyen et l'émergence de flux magnétique à la surface du Soleil (figure 2). Enfin, grâce aux calculs réalisés par RAMSES, il a encore été possible de modéliser la diffusion ambipolaire et le rôle régulateur du champ magnétique dans la formation des étoiles, favorisant l'effondrement le long des lignes plutôt que perpendiculairement ainsi que la formation de jets le long de l'axe de rotation du corps central (figure 3) ou l'organisation le long des bras spiraux des galaxies du champ magnétique (figure 4).

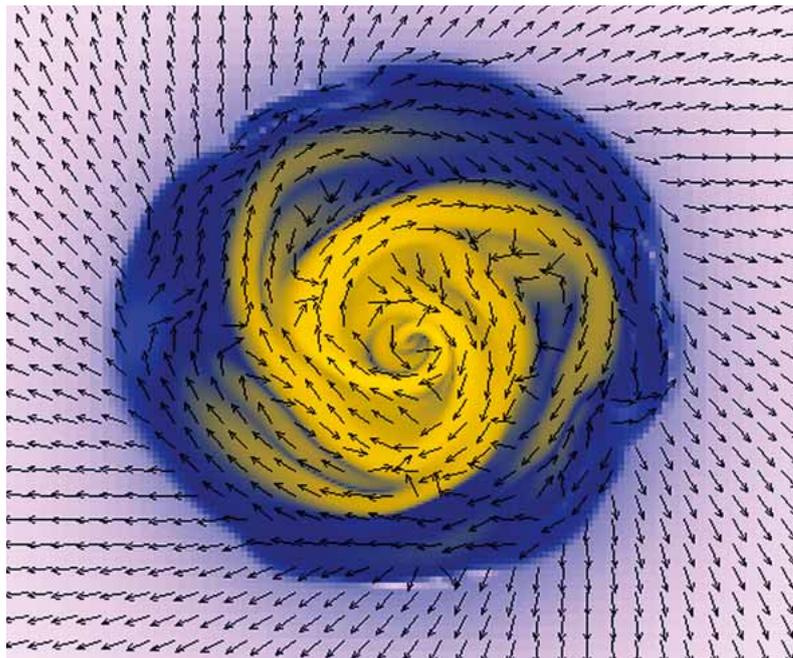


Figure 4. Disque galactique vu de dessus montrant le logarithme de la densité (où on remarque les bras spiraux de la galaxie) et l'organisation du champ magnétique (flèches) le long des bras.

> 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)

POUR EN SAVOIR PLUS

A. S. BRUN, M. MIESCH, J. TOOMRE, *Global-Scale Turbulent Convection and Magnetic Dynamo Action in the Solar Envelope*, 2004, *ApJ*, 614, 1073.

Des supercalculateurs pour mieux connaître l'Univers

La diffusion du parallélisme dans toute la pyramide de l'informatique et la prise en compte de contraintes multiples, comme la gestion des données ou l'architecture hiérarchisée des supercalculateurs, plongent les spécialistes du calcul scientifique au cœur d'une tourmente. En effet, l'installation, l'utilisation et l'administration de leurs nouveaux moyens de calcul s'opèrent désormais à l'instar des très grands équipements et la communauté des usagers doit donc apprendre à s'organiser en équipes pluridisciplinaires autour d'eux.



Supercalculateur BULL hybride installé au CCRT en 2009.

Ainsi, pour réussir pleinement les changements d'échelles résultant des avancées technologiques enregistrées dans le domaine du calcul de haute performance (le HPC pour *High Performance Computing*), les chercheurs en sciences fondamentales et appliquées doivent avoir accès à des ressources de calcul pouvant aller jusqu'au ordinateur entier, au moins pendant des périodes limitées de temps. Il existe un moment propice pour une utilisation dite « grand challenge ». Il s'agit de la période de mise en production de la machine qui va de 3 à 6 mois après la réception du ordinateur. Et pour cause, il s'agit d'un moment privilégié pendant lequel les équipes du centre de calcul (ingénieurs systèmes et spécialistes applicatifs) et les experts du constructeur informatique se retrouvent tous ensemble et mobilisés sur le site pour régler d'éventuels problèmes liés au démarrage de l'instrument. Les chercheurs peuvent alors bénéficier de cette étroite collaboration entre spécialistes pour optimiser leur logiciel de simulation et pour espérer franchir de nouvelles étapes dans la réalisation de simulations de très grande taille. Ainsi, les simulations de quelques milliers de processeurs qui relevaient, il y a peu de temps encore, du défi technique, sont-elles désormais très fréquentes.

En astrophysique, les grands challenges visent une meilleure prise en compte des couplages d'échelles inhérents à la plupart des phénomènes physiques rencontrés, cela en augmentant la **résolution spatiale**

et/ou temporelle. La très grande quantité de mémoire disponible sur les superordinateurs, associée à des techniques numériques novatrices, favorise l'accès à des résolutions spatiales de plus en plus importantes. L'objectif reste de s'approcher des échelles de dissipation dans les écoulements **turbulents**, de résoudre les cœurs protostellaires lors de la simulation d'un nuage moléculaire, ou encore de simuler finement les **galaxies** dans un contexte cosmologique. De cette dernière problématique naquit, en 2007, le code RAMSES, développé par le Sap, pour étudier la formation des grandes structures et des galaxies. Il s'agit d'un code s'inscrivant dans le cadre du projet Horizon visant à fédérer les activités de simulation numérique autour d'un projet ciblé sur l'étude de la formation des galaxies. Cette réflexion fut menée pendant la période de démarrage du ordinateur Bull Platine, au Centre de calcul recherche et technologie (CCRT) du CEA, avec pour objectif la simulation de la formation d'une moitié de l'Univers observable. Pour la première fois dans l'histoire du calcul scientifique, il fut possible de décrire une galaxie comme la **Voie lactée** avec plus d'une centaine de particules tout en couvrant la moitié de l'Univers observable. Pour simuler un tel volume avec autant de détails, les acteurs du projet Horizon utilisèrent 6 144 processeurs Intel Itanium2® du ordinateur Bull Platine pour activer le programme RAMSES à plein régime. Ce logiciel de simulation met en jeu une grille adaptative permettant d'atteindre une finesse spatiale inégalée. Avec près de 70 milliards de particules et plus de 140 milliards de mailles, ce grand challenge représente le record absolu pour un système à N corps modélisés par ordinateur.

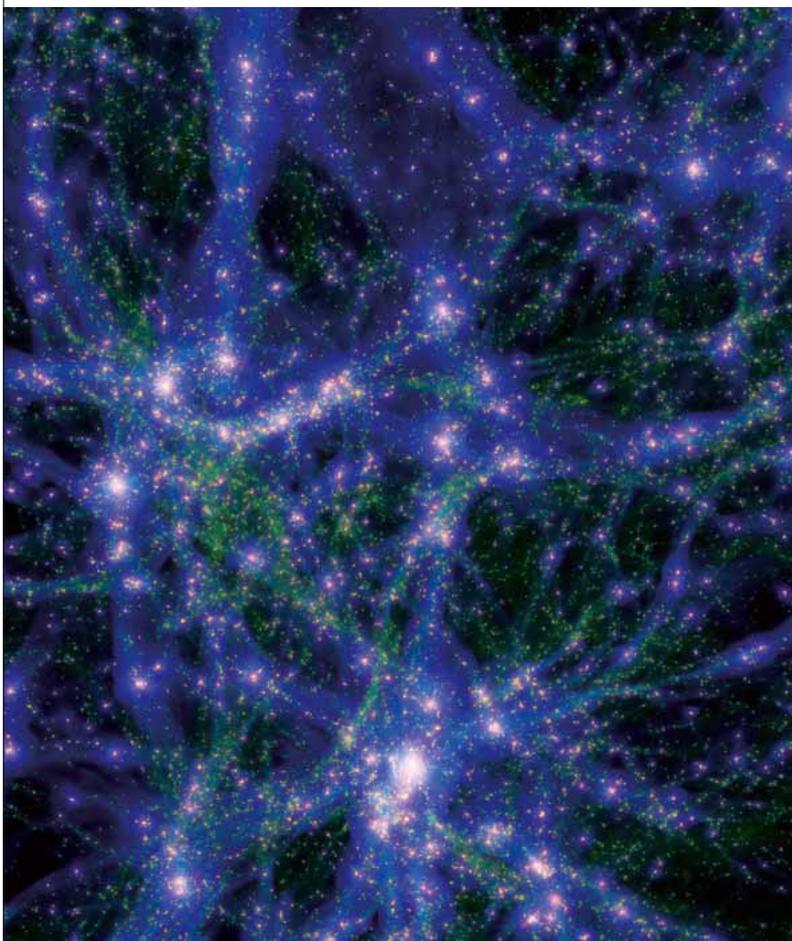
Cet exemple montre bien, qu'en matière de simulation, les avancées promises par les ordinateurs de grande puissance ne s'obtiennent qu'au prix d'une maîtrise de la complexité – celle concernant à la fois les modèles physiques, les méthodes et les **algorithmes** numériques, les méthodologies et les techniques de programmation et d'optimisation parallèles. De plus, la nécessité de contenir la consommation électrique a favorisé l'apparition d'un nouveau type de superordinateurs capables de combiner un très grand nombre de processeurs généralistes avec des processeurs spécialisés (processeurs graphiques, reconfigurables, vectoriels...). Dès l'été 2009, la communauté scientifique française a pu accéder à ces superordinateurs hybrides grâce à la machine BULL installée au CCRT. Avec plus de 2 100 processeurs Intel de nouvelle génération, associés à 48 serveurs graphiques Nvidia, c'est le premier superordinateur de ce type implanté en Europe.

> Pierre Leca et Christine Menaché

Département des sciences de la simulation
et de l'information (DSSI)
Direction des applications militaires (DAM)
CEA Centre DAM Ile-de-France

> Édouard Audit

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)



Le code RAMSES permet l'étude des structures de l'Univers à grande échelle ainsi que la formation des galaxies. La plus grande simulation de la formation de ces structures a été réalisée dans le cadre du projet Horizon, soutenu par l'Agence nationale pour la recherche (ANR).

La visualisation des simulations astrophysiques

La **simulation** numérique des **plasmas** astrophysiques produit des données de taille et de complexité considérables. Pour les comprendre et les interpréter, les astrophysiciens doivent les visualiser avec des outils logiciels adaptés. À cette fin, le logiciel SDvision (*Saclay Data Visualization*), développé à l'Irfu, permet une visualisation interactive de simulations produites sur des ordinateurs massivement parallèles, utilisant des milliers de processeurs, produisant des données de taille pouvant dépasser le **téraoctet** (figure 1). La complexité des simulations réside essentiellement dans la mise en œuvre du maillage de l'espace dont la résolution varie en fonction de différents critères physiques.

La technique numérique du maillage à résolution adaptative (figure 2) concentre le temps de calcul, et la mémoire allouée, sur des zones accueillant des phénomènes significatifs comme la formation d'**amas de galaxies**. En revanche, dans les zones à plus faible densité, les calculs restent à des résolutions plus modestes. Pour visualiser et analyser de telles structures de données, les chercheurs ont dû recourir à des **algorithmes** spécifiques et relever un défi : celui de la gestion de la mémoire. Il leur a fallu, en outre, s'adapter à divers modes d'utilisation. La visualisation et l'analyse de telles structures de données représentent un véritable défi, qui a conduit au développement d'algorithmes spécifiques, notamment en termes de gestion de la mémoire. En outre, le logiciel SDvision est adapté à des modes d'utilisation divers, par exemple sur des plateformes de visualisation locales bénéficiant de l'accélération matérielle des cartes graphiques modernes ou distantes sur des nœuds graphiques proposant d'importantes ressources (multicœurs, mémoire partagée

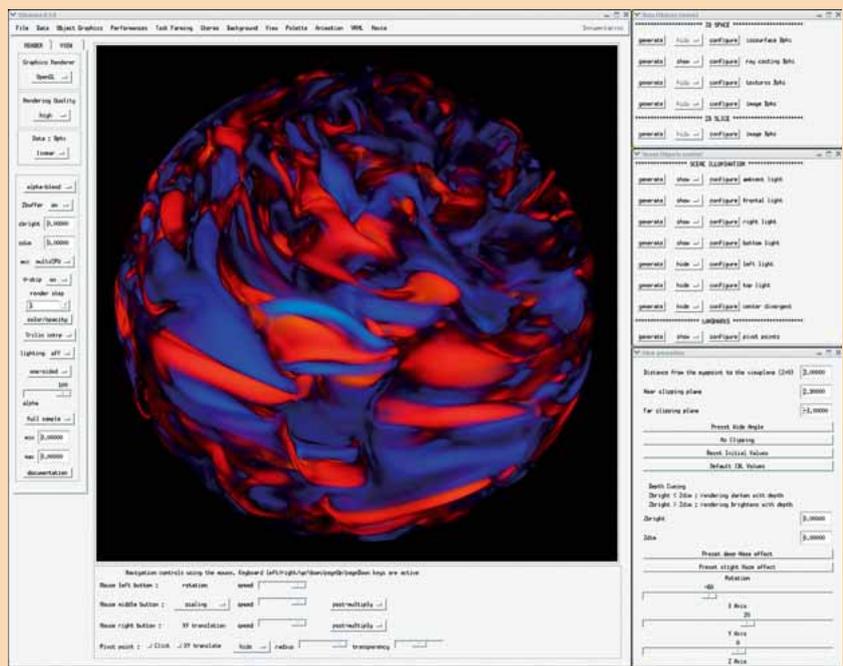


Figure 1. Le logiciel de visualisation interactive SDvision utilisé, ici, pour visualiser le champ magnétique obtenu dans une simulation de la zone convective solaire.

élevée dépassant 100 Gigaoctets par nœud). Véritable instrument d'exploration des simulations, ce logiciel permet de naviguer interactivement et en immersion dans les données. Elles contribuent également à découvrir ou à étudier des structures astrophysiques à échelles multiples : par exemple, la formation des grandes structures cosmologiques, des **galaxies**, **turbulences** du milieu interstellaire participant à la création des « cœurs protostellaires » où se forment les **étoiles**, dynamique des **disques d'accrétion** planétaires, **magnétohydrodynamique** de la zone convective solaire...

Le logiciel est employé dans une salle de visualisation stéréoscopique installée au Service d'astrophysique (SAP/Irfu). Il s'agit d'une technique qui appréhende complètement la structuration des volumes simulés dans les trois dimensions. Ces développements, qui ont pour moteur principal la recherche fondamentale en astrophysique, devraient également bénéficier à d'autres domaines de la recherche et de la technologie utilisant la simulation numérique : par exemple, pour explorer des simulations du transport turbulent dans le plasma du futur réacteur expérimental ITER (pour *International Thermonuclear Experimental Reactor*) actuellement en construction sur le centre du CEA de Cadarache. Il s'agit d'une collaboration avec l'Institut de recherche sur la fusion magnétique (DSM).

La montée en puissance des grands centres de calculs nationaux laisse prévoir l'obtention de simulations toujours plus massives et plus complexes mais aussi de nouveaux défis à relever en matière de visualisation des simulations destinées à l'astrophysique.

> **Daniel Pomarède**
et **Bruno Thooris**

Service de l'électronique, des détecteurs
et de l'informatique (Sedi)
Institut de recherche sur les lois fondamentales
de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay

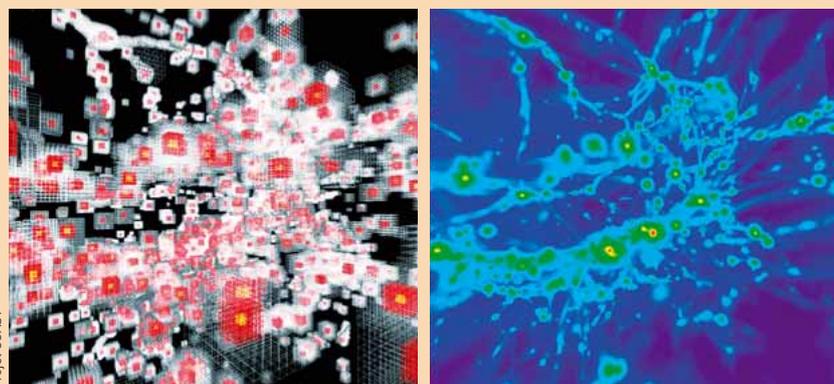


Figure 2. Visualisation d'une simulation cosmologique. À gauche : le maillage à résolution adaptative employé dans la simulation, représenté à travers les mailles de résolutions les plus élevées. À droite : la distribution de la densité de matière calculée sur ce maillage.

Godunov, une plate-forme numérique pour l'enseignement-recherche

Il devient indispensable d'enseigner les techniques et les méthodologies destinées à la **modélisation** et la **simulation numérique** aux étudiants, aux doctorants et postdoctorants, ainsi qu'aux chercheurs et ingénieurs, impliqués ou non en astrophysique, et qui souhaitent voir évoluer leurs connaissances. D'où la mise en place, depuis 2007, de la plate-forme numérique pour l'enseignement et la recherche *Godunov* (du nom du mathématicien qui développa une méthode classique de résolution des équations de l'hydrodynamique). Il s'agit d'une collaboration entre le SAp, l'Unité d'enseignement en sciences de la matière et de simulation (UESMS) de l'Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN) et l'Université Paris 7/ Denis-Diderot. Située sur le centre du CEA de Saclay, cette plate-forme a été équipée de vingt postes de travail, reliés par un réseau rapide à un *cluster* de calcul, c'est-à-dire un ordinateur

(1) Technique qui permet de cartographier la distribution de la matière noire dans l'Univers et de caractériser les propriétés de l'énergie noire.

parallèle comportant 240 cœurs de calcul. Bien que la plate-forme soit également destinée à la recherche, les activités pédagogiques demeurent néanmoins prioritaires. Ainsi, pendant les sessions de formations, le *cluster* demeure exclusivement réservé aux étudiants afin qu'ils s'initient au calcul haute performance à l'aide d'un outil à la fois performant et disponible, avant de se confronter à des ordinateurs de plus grande taille.

Les enseignements correspondent à un niveau postdoctoral, principalement dans le cadre de l'École doctorale d'astrophysique, mais aussi à celui des masters dans lesquels le CEA s'implique *via* l'INSTN : par exemple, astronomie & astrophysique, modélisation et simulation (M2S), matériaux pour les structures et l'énergie (MSE) et interaction climat et environnement (ICE). À ces enseignements s'ajoutent deux formations continues. L'une menée conjointement par l'INSTN et le SAp où sont abordées les méthodes de **Monte-Carlo** et les techniques de programmation parallèle (bibliothèque MPI) ; l'autre étant dédiée aux utilisateurs du Centre de calcul du CEA (CCRT).

Outre sa vocation pédagogique, *Godunov* sert au traitement de données pour l'astrophysique. Par exemple, la préparation des **algorithmes** de traitement de données émanant du satellite GLAST (pour *Gamma-ray Large Area Space Telescope*) et la réalisation du catalogue des sources. D'autres expériences, comme le *weak lensing*⁽¹⁾, bénéficient également de cette plate-forme pour leurs besoins de calcul, importants mais ponctuels, en matière de traitement des images.

> Édouard Audit

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 de Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

> Constantin Meis

Institut national des sciences et techniques du nucléaire (INSTN)
Unité d'enseignement en sciences de la matière et de simulation (UESMS)
CEA Centre de Saclay



Enseignement dans la salle de calcul de la plate-forme Godunov : simulation de plasma.

CEA/L. Godart