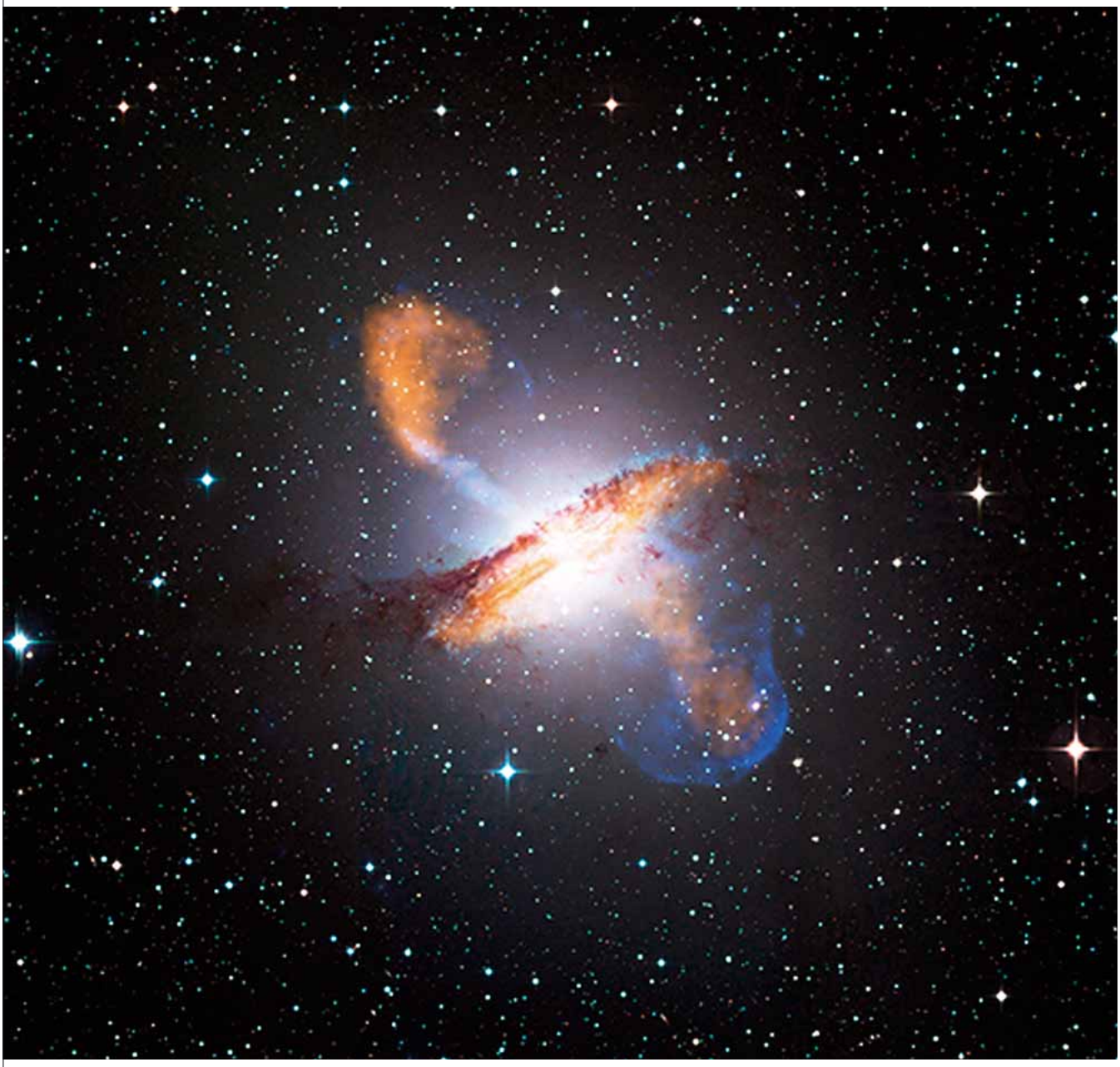
Des **spectro-imageurs** de nouvelle génération

En même temps que l'Année mondiale de l'astronomie, 2009 célébrera le 400e 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.



ESO

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 °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.

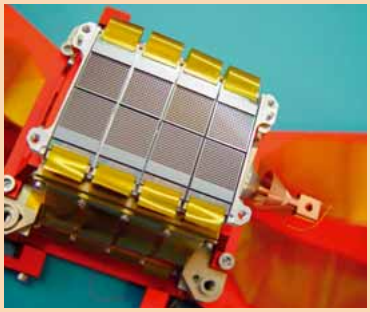
Le télescope spatial Herschel va ouvrir une nouvelle fenêtre d'observation, celle donnant sur l'Univers froid. Là s'initient les phases les plus précoces de la gestation des **étoiles** mais aussi les étapes les moins connues de l'évolution des **galaxies**. Il faut dire, qu'à ce jour, les **modèles** 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).

ESA

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.



CEA

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

NASA

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 Ophucius vue par le satellite ISO).

ESA

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 pluristructurelle 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 **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 intégrantes, 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 Kelvin. Pour atteindre cette température dans l'espace, les chercheurs recourent à des cryoréfrigérateurs à évaporation d'hélium (^{3}He) 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 µ**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 :

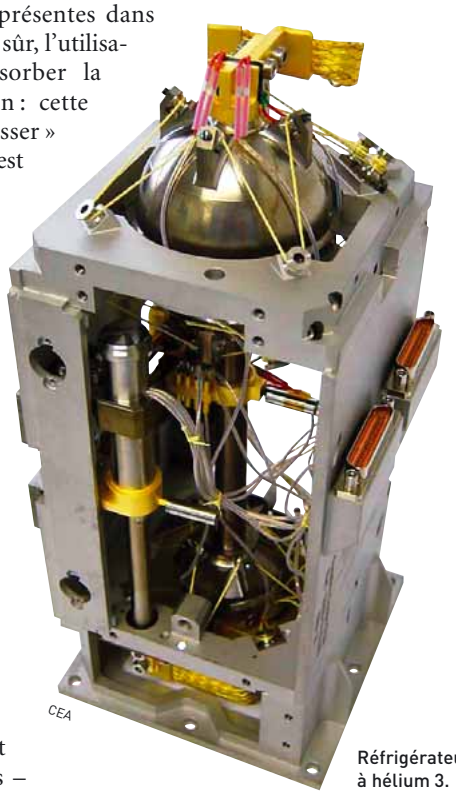
- l'interconnexion électrique habituelle du bolomètre au circuit de lecture ;
- la réalisation d'une cavité optique pour piéger efficacement la lumière incidente ;
- la tenue mécanique et la thermalisation du bolomètre.

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.

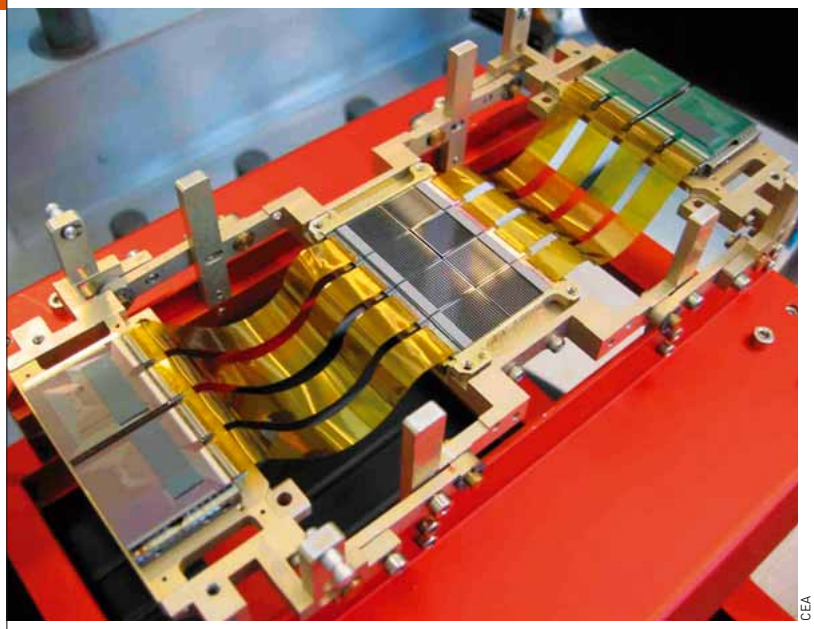
Quant à la grille bolométrique en silicium, elle se trouve suspendue par des poutres très fines ($\approx$ 2 µm) et faiblement conductrices de la chaleur. Ce dispositif permet au rayonnement ténu absorbé d'induire une élévation mesurable de sa température. Enfin, un thermomètre en silicium dopé, situé au centre de la grille, réalise la mesure en exploitant une loi exponentielle de la résistance avec la température. Il révèle un cœfficient 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.



CEA

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 défaillants 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.

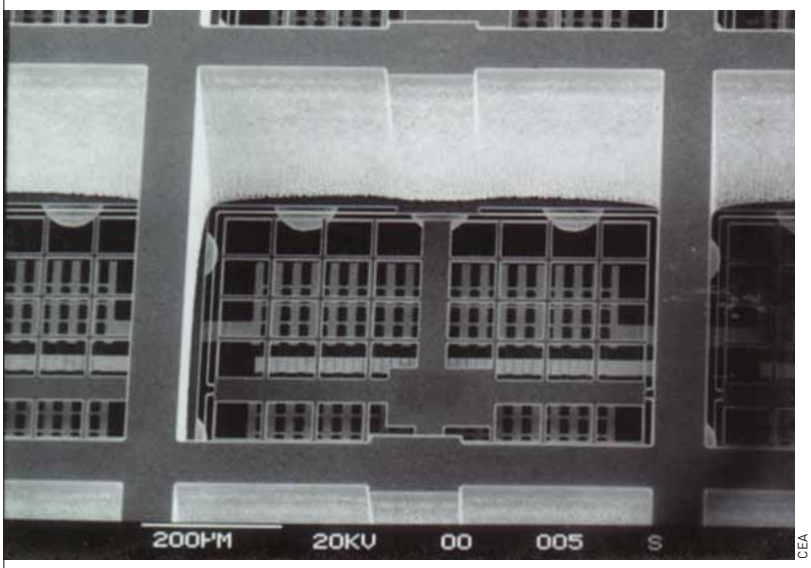
• La première consiste à pousser les matrices de bolomètres de PACS vers les plus grandes longueurs d'onde afin de les installer sur de grands télescopes au sol. L'opération nécessite l'adaptation préalable de ces matrices aux différentes « fenêtres » atmosphériques, c'est-à-dire aux différentes bandes 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 wavelenght Observation of the Tenous interstelar 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).



CEA

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

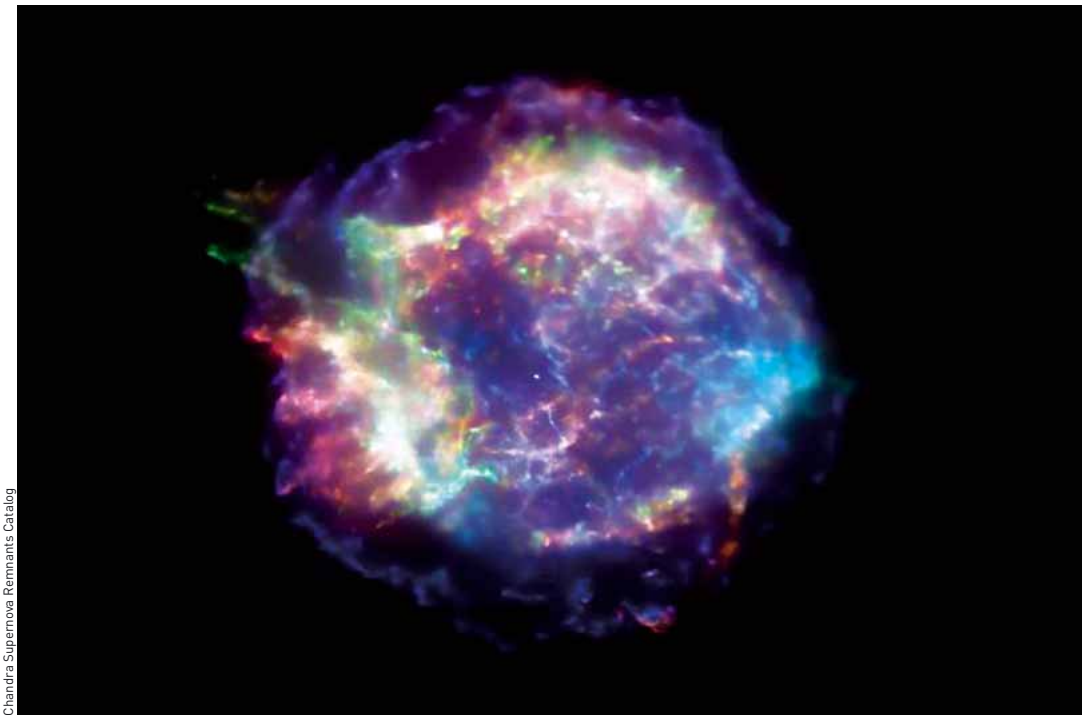
> Patrick Agnese
Département d'optronique
Laboratoire d'électronique
et de technologies de l'information (Leti)
Direction de la recherche technologique (DRT)
CEA Centre de Grenoble

> 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.

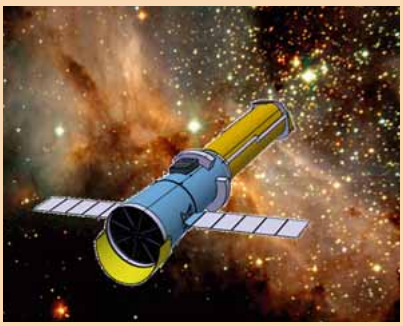


Chandra Supernova Remnants Catalog

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.

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.

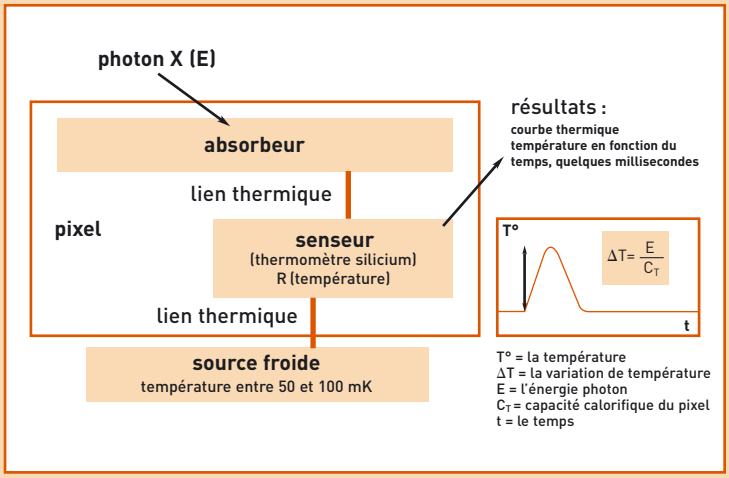


J-L Sauvageot/CEA

Vue d'artiste d'IXO.

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 !

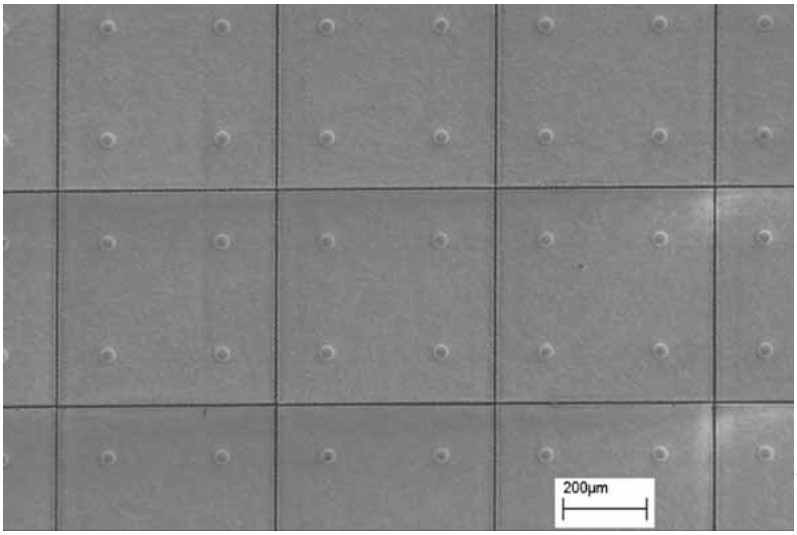
Un savoir-faire virtuose

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 micro**bolomètres** (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 x 500 µm^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 µm 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.

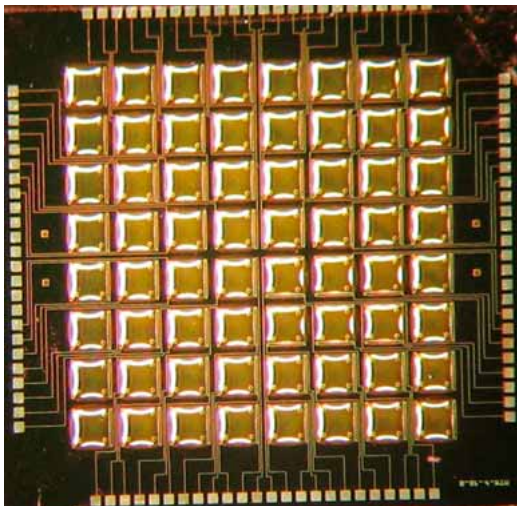
Restait encore à traiter la question des matrices de grande taille. Jusqu'à présent, celles de petite dimension se fabriquaient par assemblage manuel des absorbeurs avec les senseurs, opération réalisée sous microscope. Or, cette technique ne convient pas aux matrices de grande taille. D'où l'idée d'une 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.



A. Aliane/CEA

Matrice d'absorbeur en tantale.

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.



A. Aliane/CEA

Matrice senseur

> 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)

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.

L. Vigouroux/CEA

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 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.

(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.

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 m^2/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 Walls**). 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 de compression/détente de six ordres de grandeur (10^6), ce qui n'a pas d'équivalent avec des systèmes mécaniques.

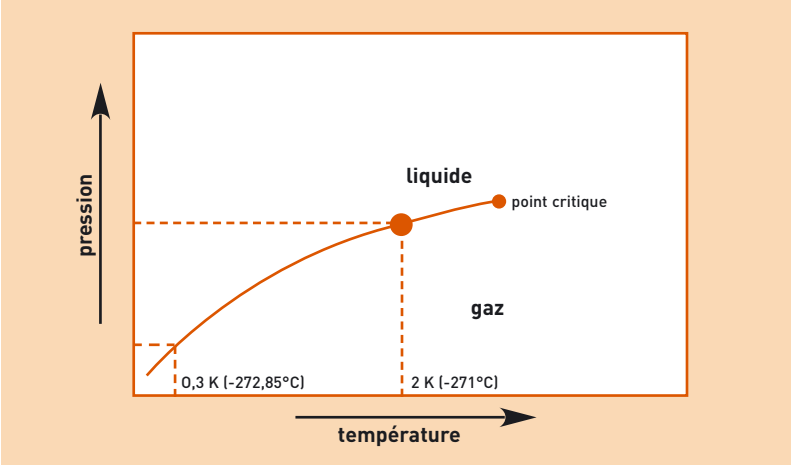
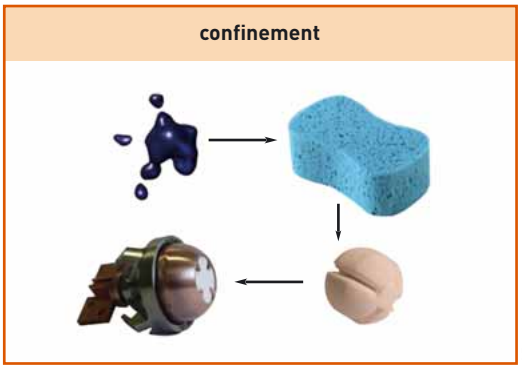


Figure 1.
Diagramme de phase de l'hélium 3 avec point extrême du cycle pour le liquide.

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.



CEA

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

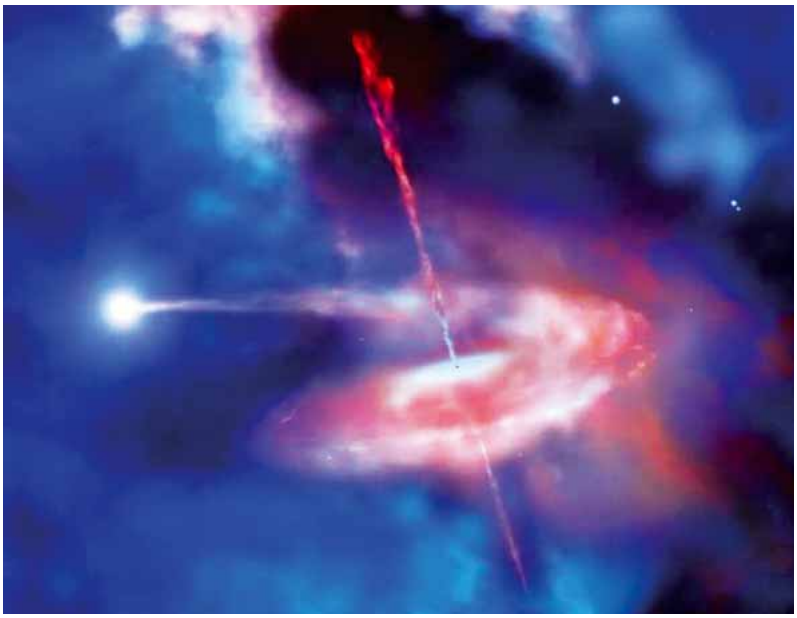
Il est une part encore secrète de l'Univers, celle où se manifestent les trous noirs et les sites d'accélération de particules du rayonnement cosmique. La connaissance de ces phénomènes, parmi les plus énergétiques de l'Univers, suppose d'explorer un domaine particulier du rayonnement cosmique : celui 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 *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.



CEA

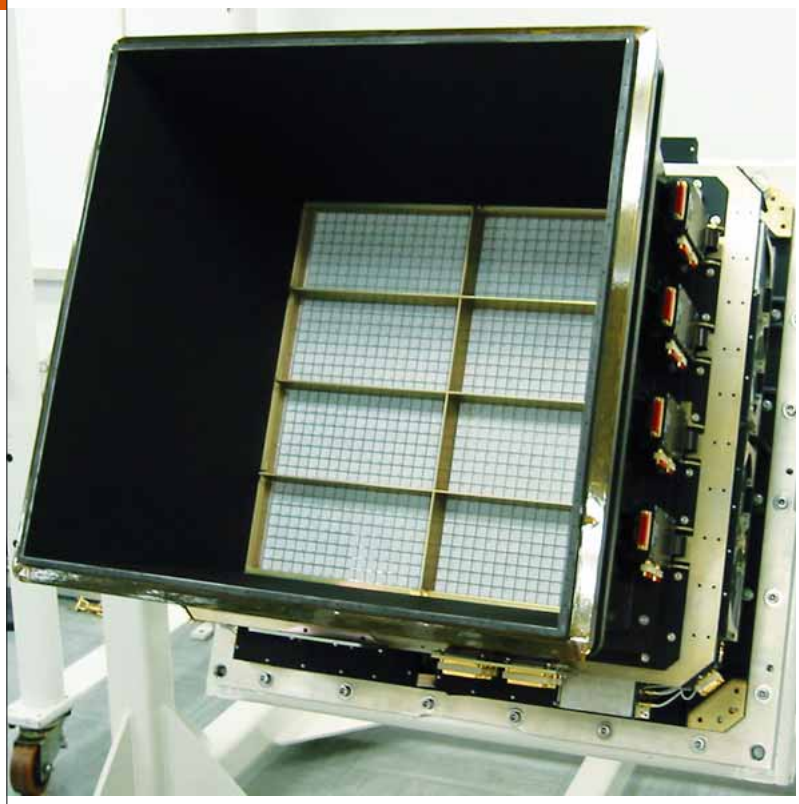
Vue d'artiste d'un trou noir accrétant la matière de son étoile compagnon dans un système binaire.

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.



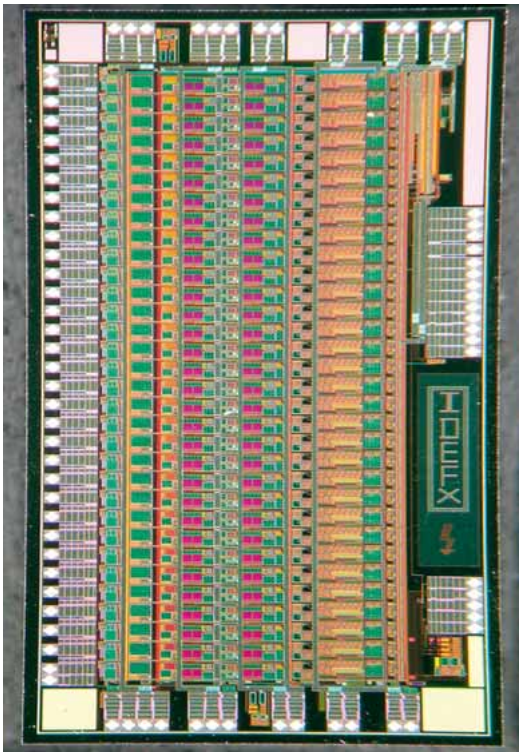
CEA

Grâce à sa caméra constituée d'une matrice de semi-conducteurs en tellurure 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 °C). Il s'agit d'un cristal lourd (le numéro atomique moyen « Z » vaut 50) et dense ($\approx$ 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 cristallogenèse 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



CEA

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, pixélisé 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). 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.

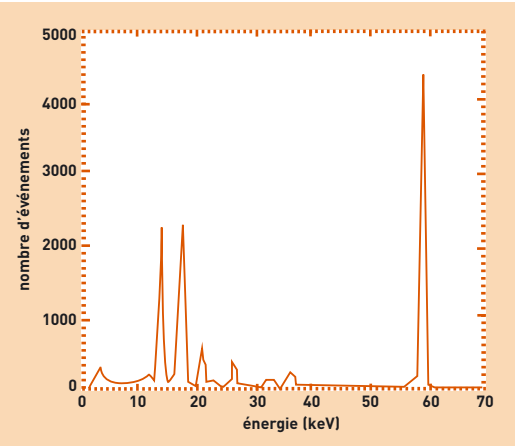
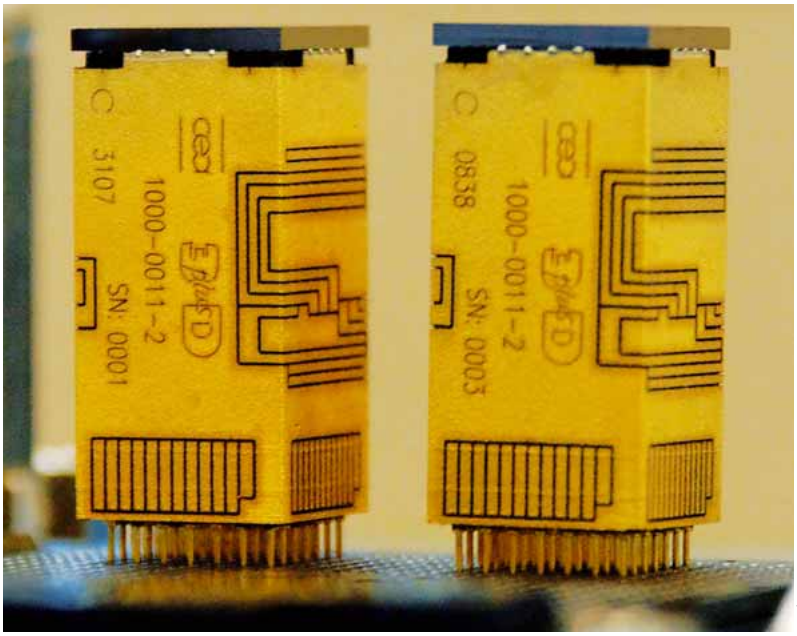


Figure 1.
Exemple d'un spectre enregistré avec *Caliste 64*. La figure représente la distribution en énergie des photons émis par une source d'américium 241. Ce spectre est constitué de la somme des réponses de 64 pixels indépendants étalonnée en énergie. La résolution spectrale vaut environ 900 eV fwhm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



CEA/Cnes

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.

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 connaitre 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 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).

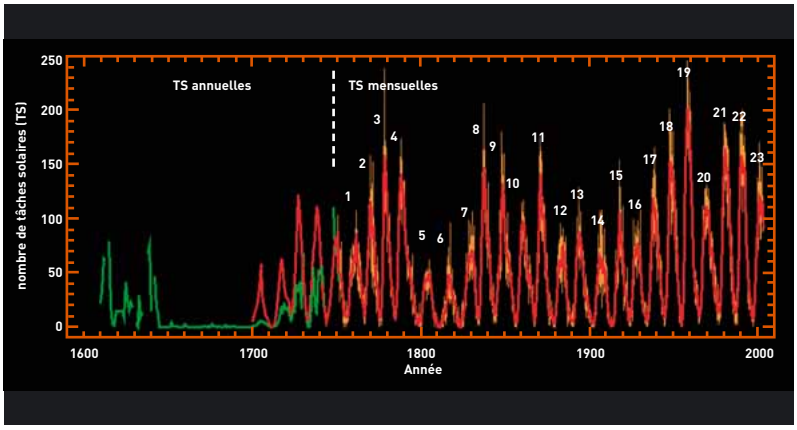


Figure 1.
Depuis les premières observations de Galilée, le nombre de taches a varié sur la surface du Soleil, rythmé par un cycle de 11 ans, mais avec une amplitude encore inexpliquée.

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 XVIIe siècle.

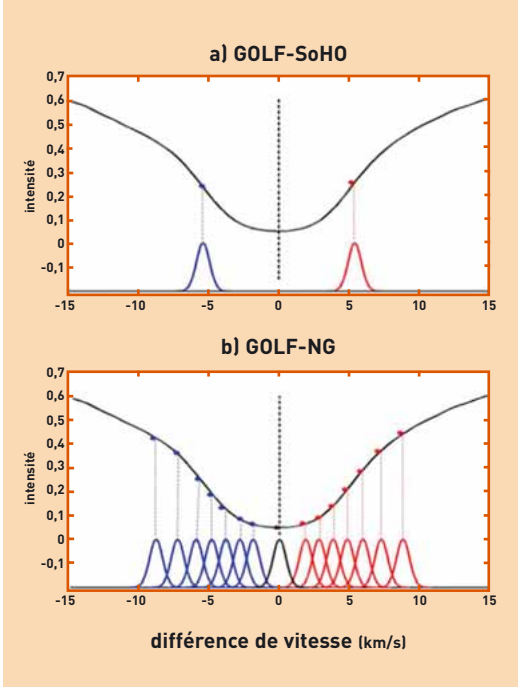
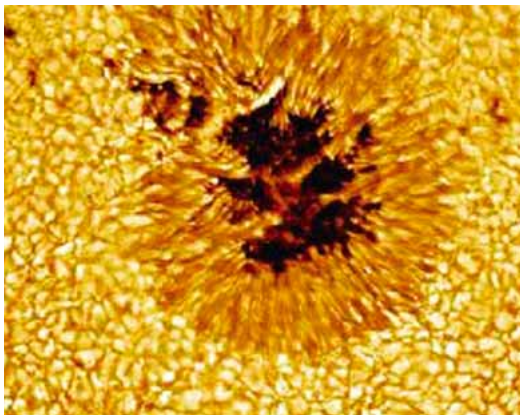
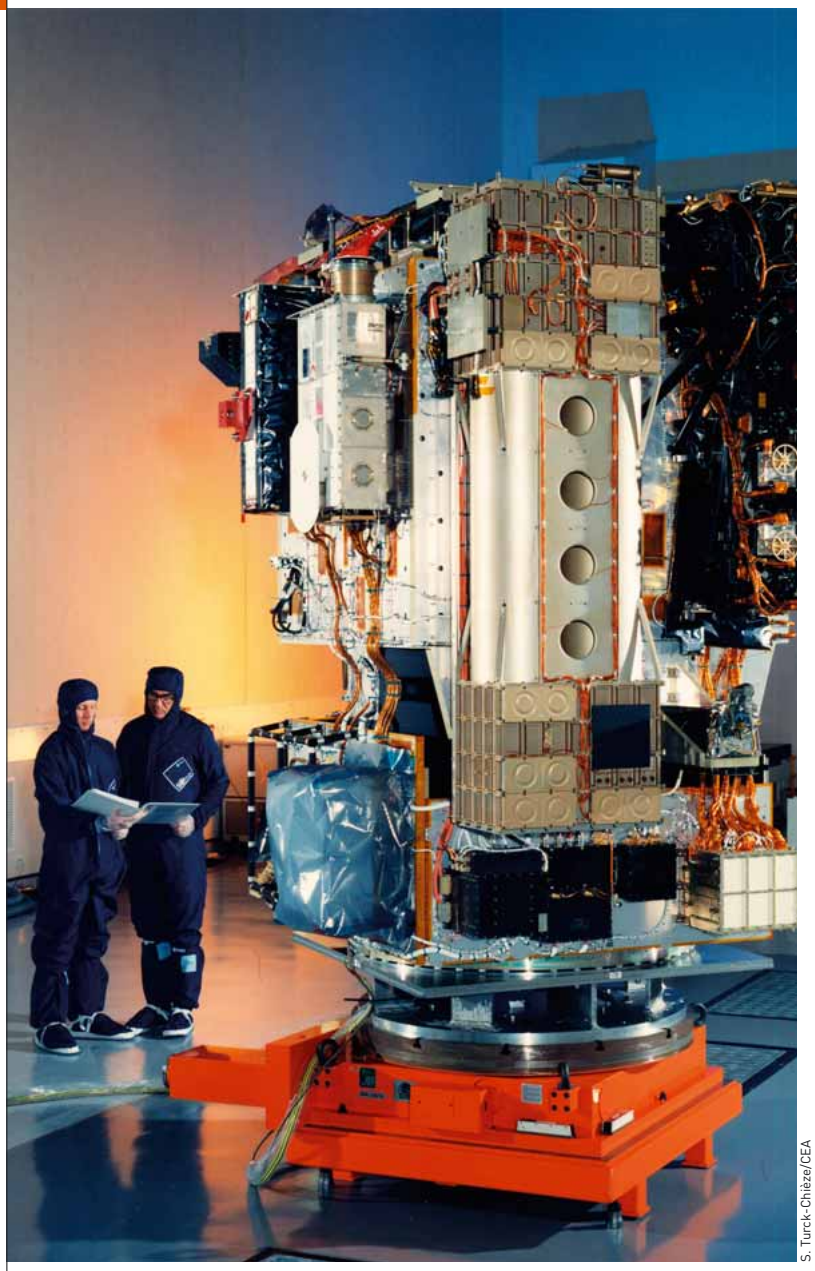


Figure 2.
Principe de mesure du spectromètre à résonance multicanal : les huit mesures bleues sont simultanées car la cellule, remplie de gaz de sodium, est placée dans un aimant à champ variable ; l'alternance de mesures bleues et rouges est garantie par un polarisateur à cristaux liquides.



CEA

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



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 cm^3). 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

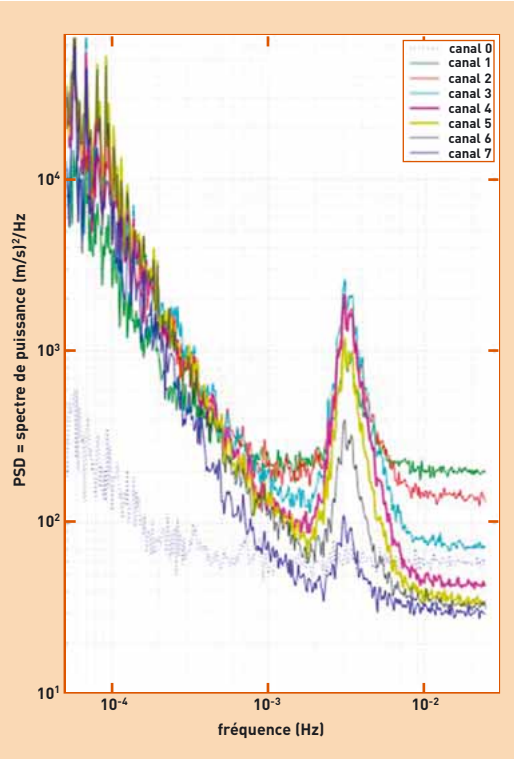


Figure 3.
Première lumière d'un prototype du spectromètre à résonance multicanal GOLF-GN. Sur cette figure apparaît le spectre des modes acoustiques, mesuré simultanément à huit hauteurs dans l'atmosphère. L'étape suivante consistera à améliorer la détection à basse fréquence pour affiner la détection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

sodium pur se trouve à l'état solide dans sa partie inférieure nommée queusot 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 éclairement 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 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 Teneriffe (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.

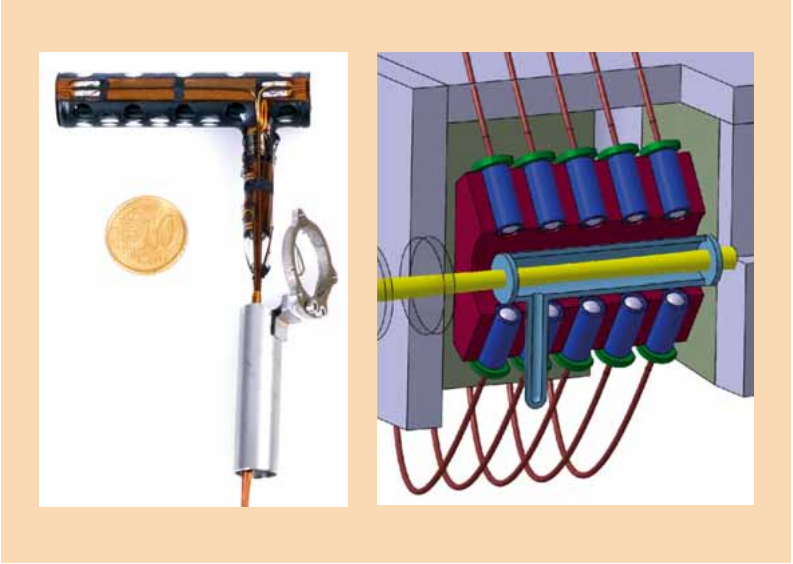
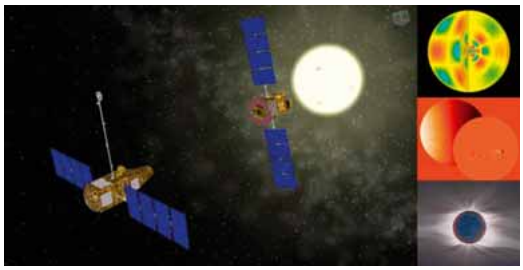


Figure 4.
Cellule et coupe en trois dimensions du schéma d'implantation dans l'aimant.



NASA

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 continûment 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