

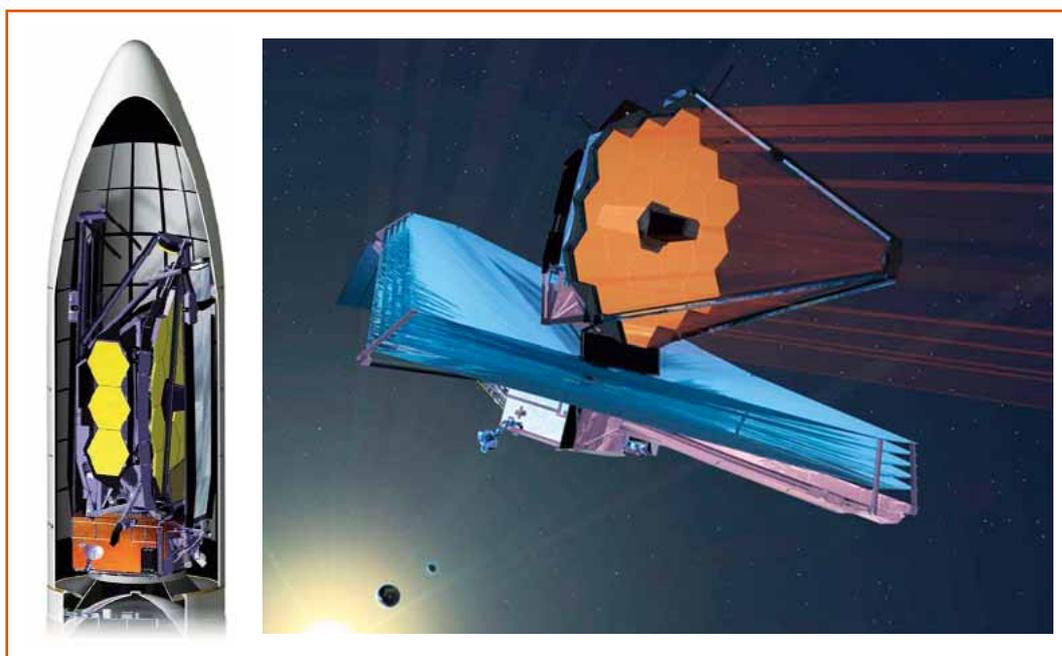
# Les télescopes du futur

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)<sup>(1)</sup> 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<sup>(2)</sup>. 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).

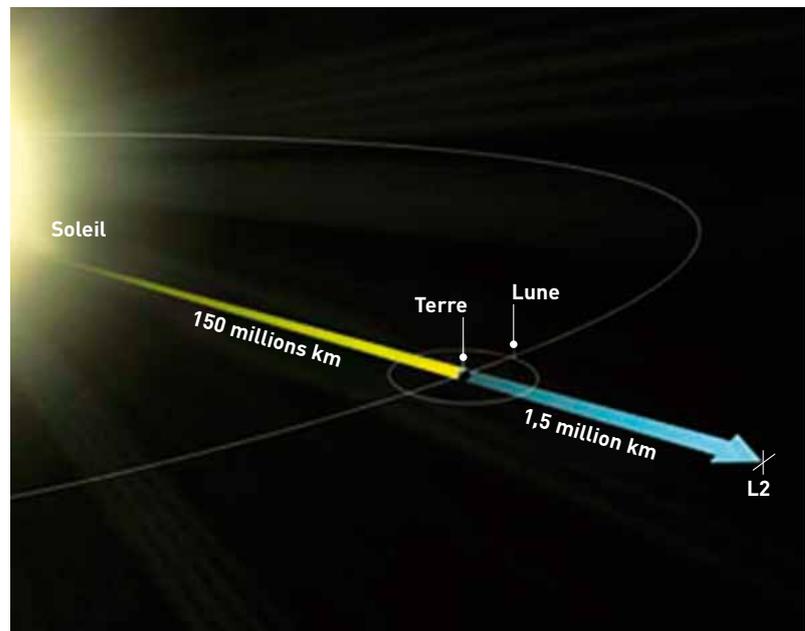


Figure 1. Schéma indiquant la position du point L2 où sera placé le JWST.



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.

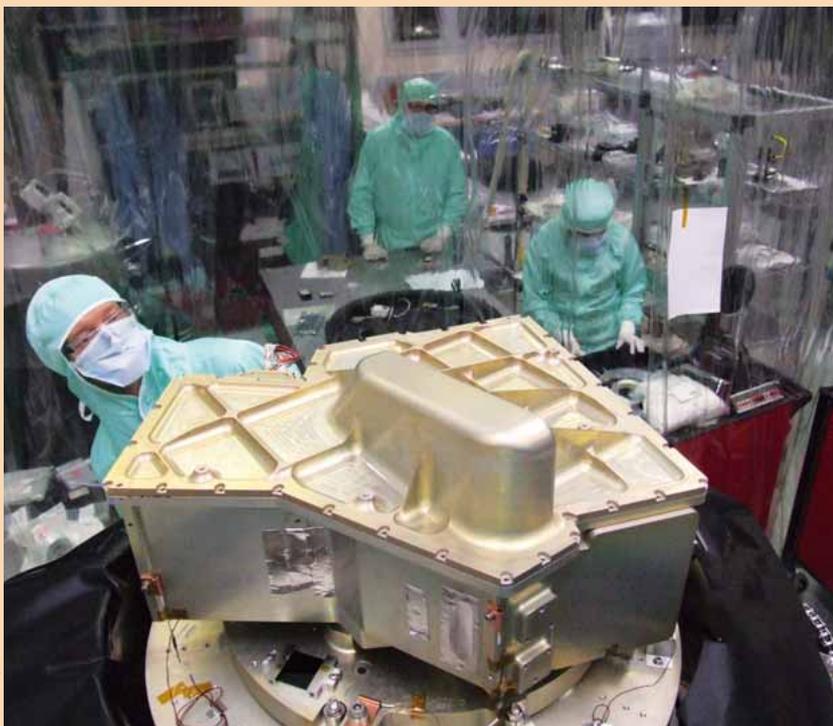
aura fallu 2 500 heures de travail pour contrôler les 65 000 composants électroniques, 900 pièces mécaniques et 50 cartes électroniques.

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

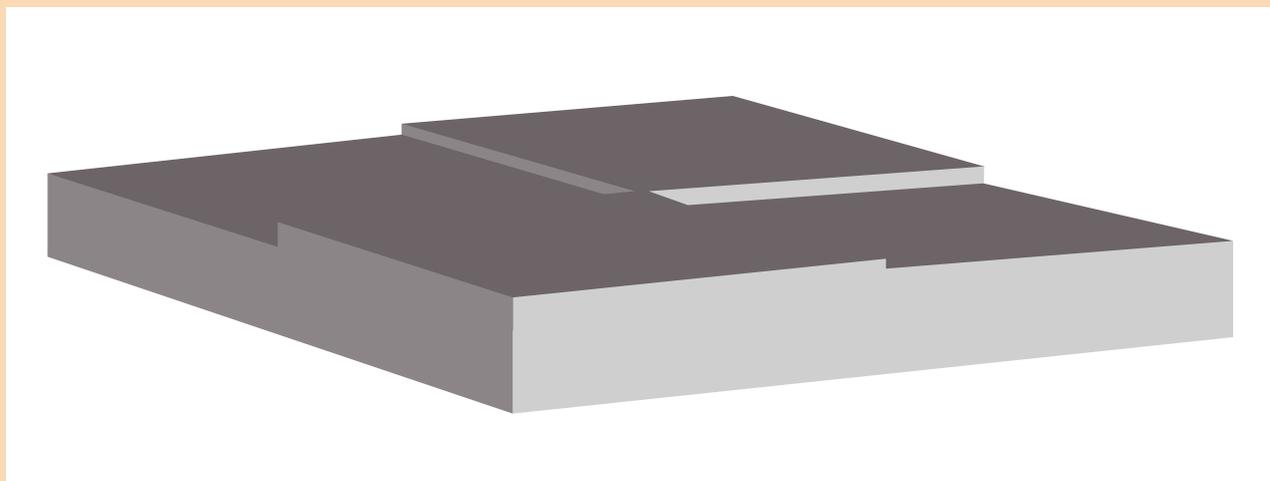


Figure 1. Schéma du masque coronographique en germanium monocristallin (la hauteur de marche n'étant pas à l'échelle).

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  $\text{cm}^2$  ;
- 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).

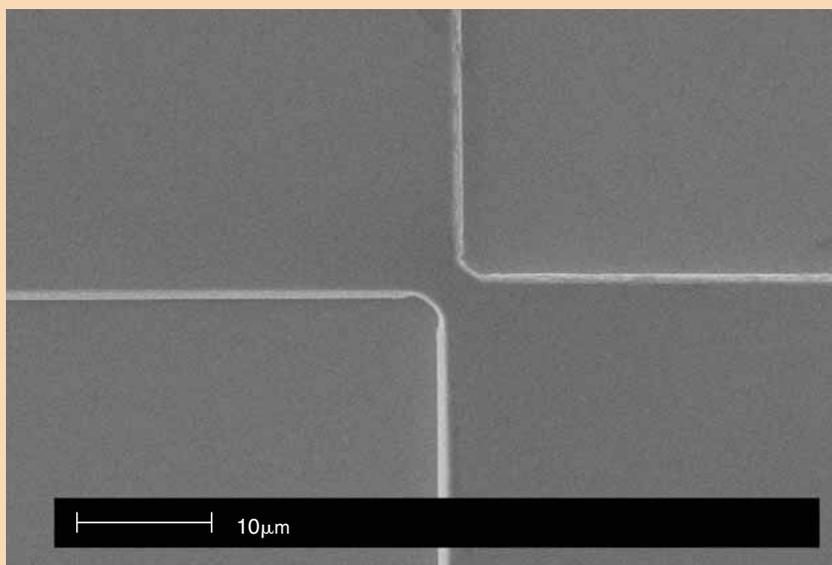


Figure 2. Image en microscopie électronique à balayage montrant le centre de l'élément après gravure. Échelle  $10 \mu\text{m}$ .

Anne de Vismes/CEA

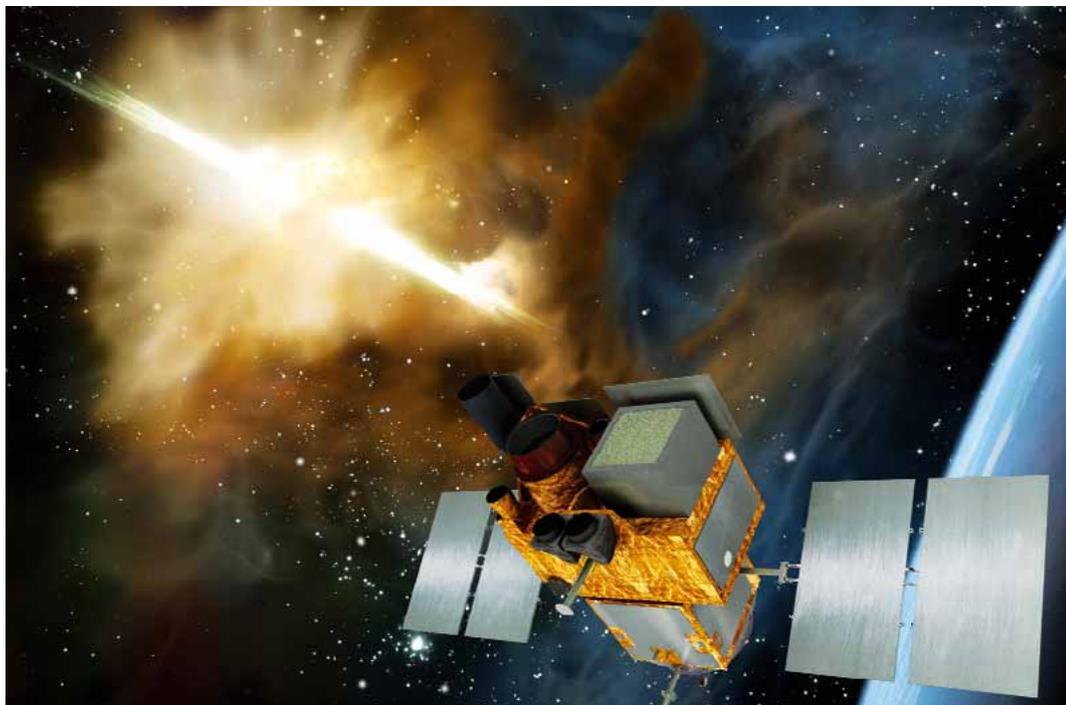
> **Claude Fermon**  
et **Myriam Pannetier-Lecœur**

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 tellure 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 cm<sup>2</sup>. 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<sup>(1)</sup> 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

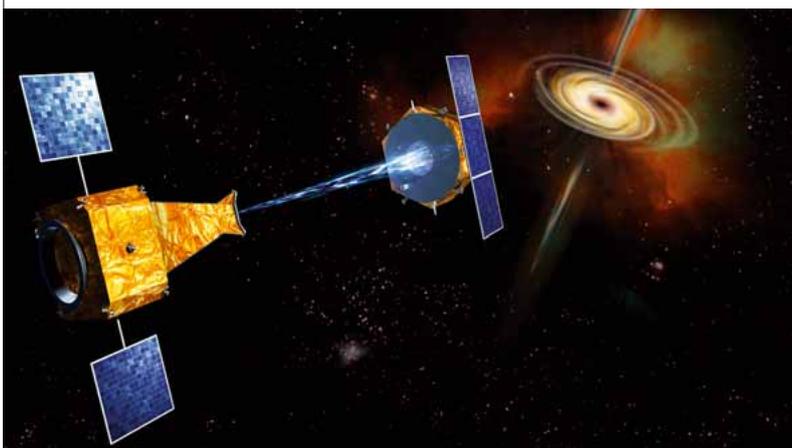
Service d'astrophysique (SAp)  
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)  
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles  
(CEA-Université de Paris 7-CNRS).  
Direction des sciences de la matière (DSM)  
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

#### > 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  $\text{cm}^3$  ;
- 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

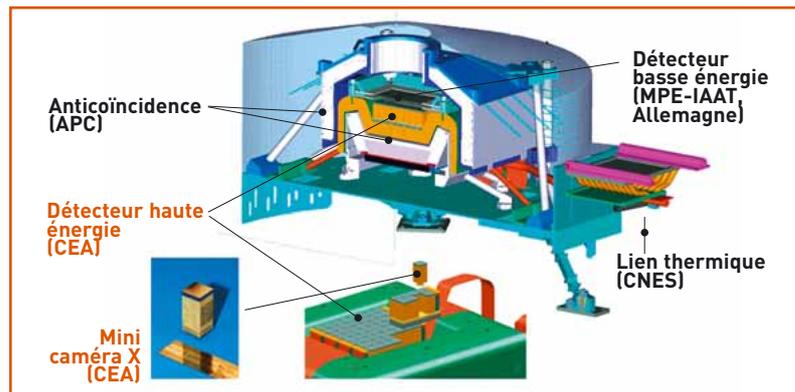


Figure 1. L'ensemble du plan focal de détection, placé sous responsabilité de l'Irfu, avec ses différents éléments et les laboratoires les fournissant : CEA, Laboratoire astroparticule et cosmologie (APC), Max Planck Institut für extraterrestrische Physic, Institut für Astronomie und Astrophysik-Tübingen (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  $1 \text{ cm}^2$  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

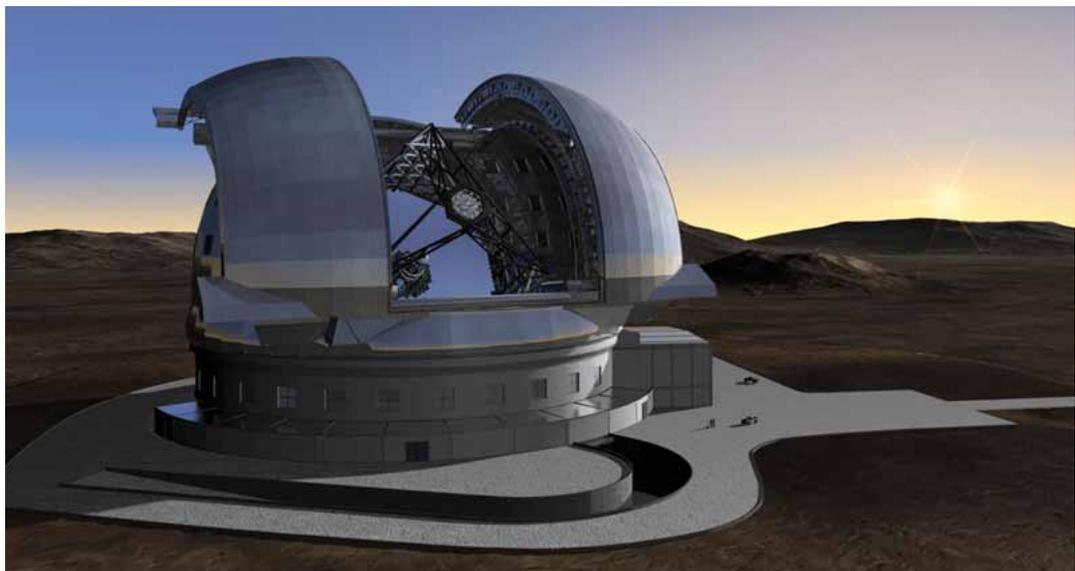
Service d'astrophysique (SAp)  
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)  
Unité mixte de recherche astroparticule et cosmologie  
(CNRS-Université de Paris 7-CEA-Observatoire de Paris)  
Direction des sciences de la matière (DSM)  
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

#### > 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.



**F**ort 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 m<sup>2</sup>). 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 »<sup>(1)</sup>, 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

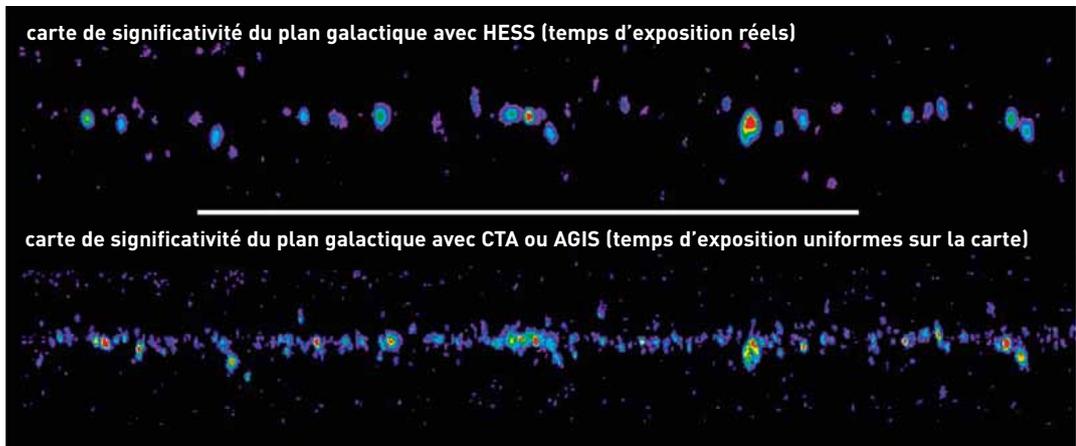


Figure 1  
Amélioration de la carte astronomique du plan galactique prédite en passant de HESS au CTA.  
Le nombre de sources détectées devrait s'accroître de plus d'un ordre de grandeur.

Dans le sillage de l'expérience européenne HESS (pour *High Energy Stereoscopic System*)<sup>(1)</sup> 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

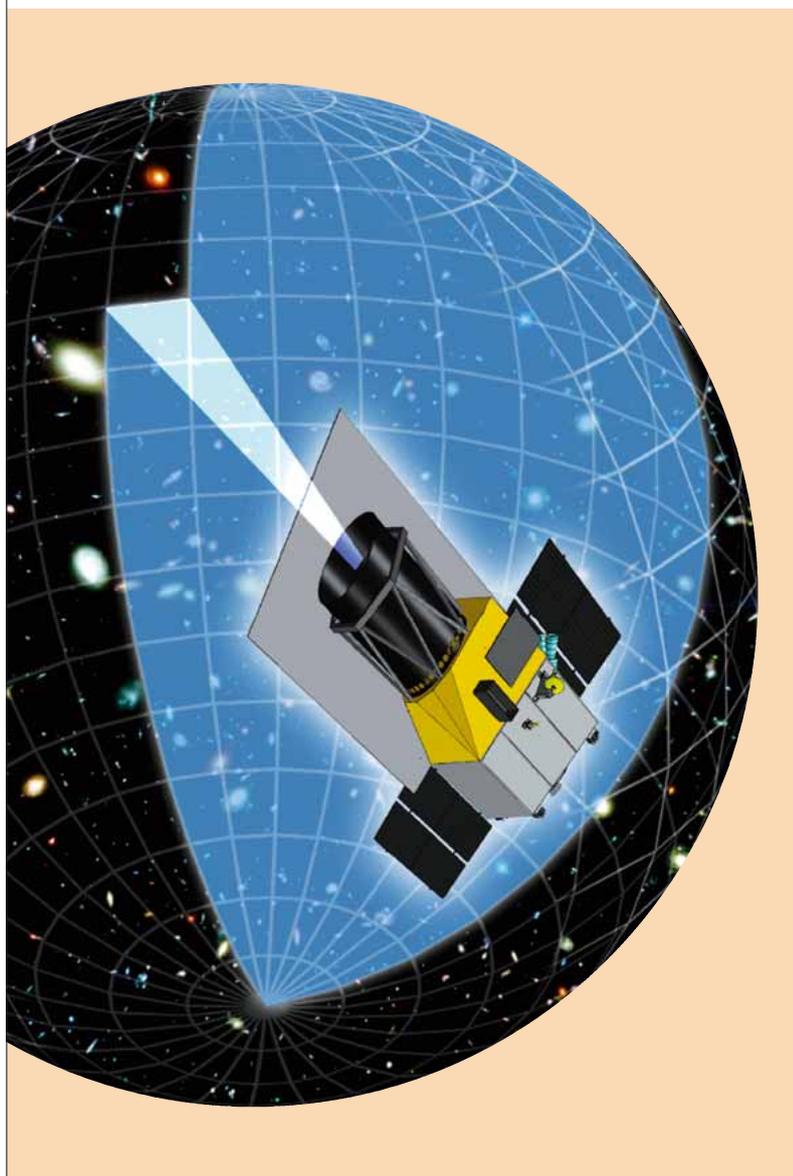
C'est le mathématicien grec Euclide qui a donné son nom au futur télescope chargé d'explorer la part sombre de l'Univers, celle qui échappe encore à l'observation des chercheurs, à savoir, l'**énergie noire** et la **matière noire** – soit près de 95 % de cet Univers. Cette mission d'étude utilisera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

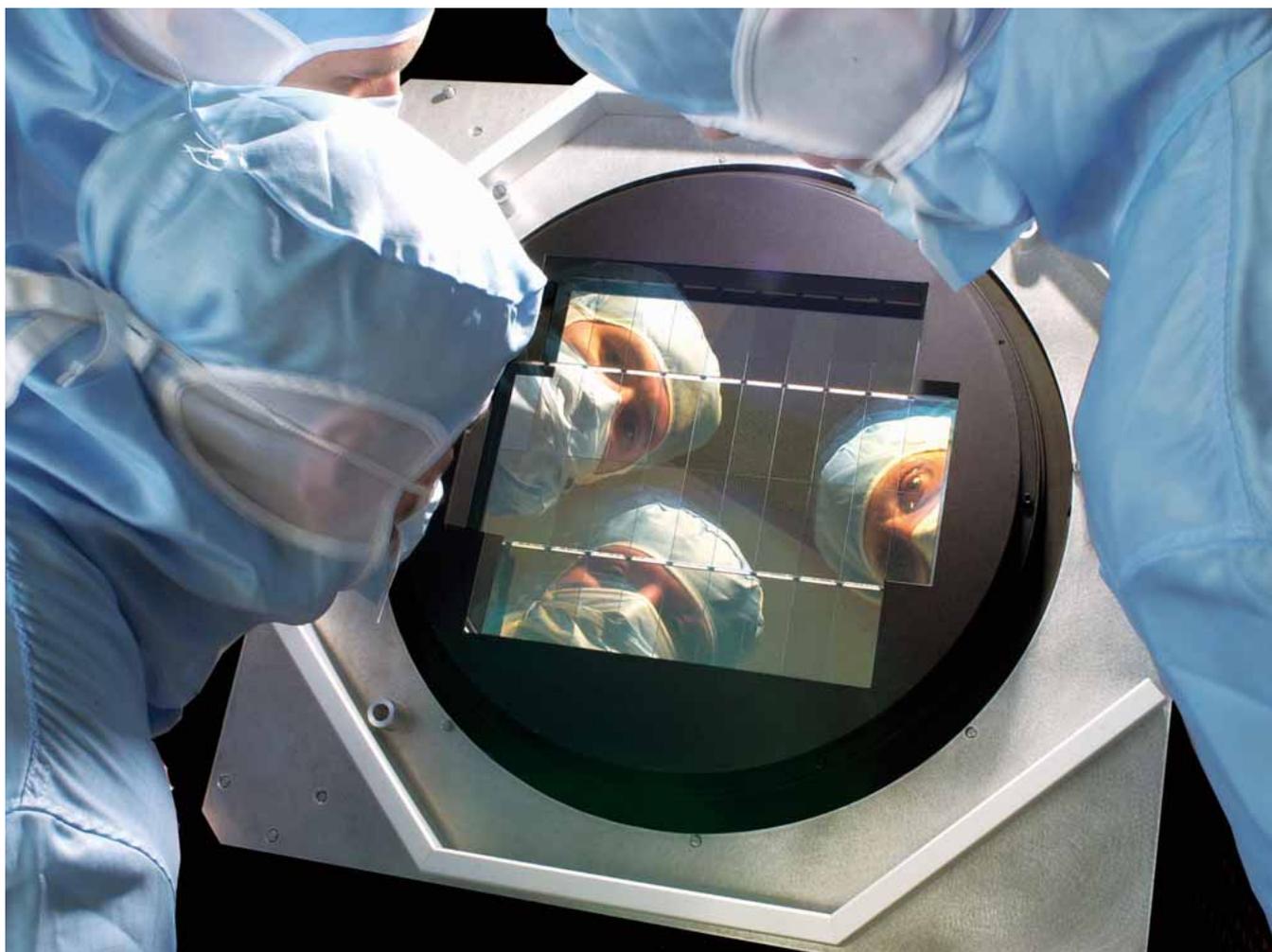
Ce type de mesure a déjà été effectué, depuis l'espace, grâce au télescope Hubble et à ses milliers d'heures d'observation. Il s'agit du plus grand relevé de l'Univers jamais réalisé et il porte le nom de COSMOS (pour *Cosmic Evolution Survey*). Pourtant, ce relevé ne concerne qu'une toute petite partie 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<sup>(1)</sup> 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-

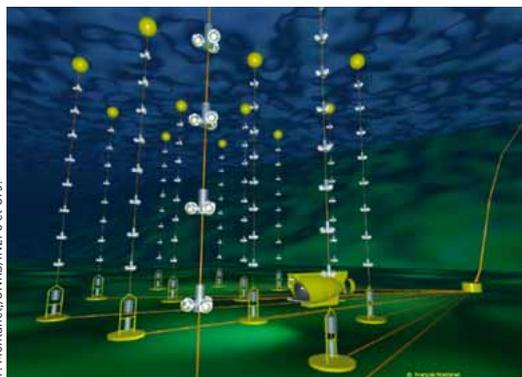
particules appellent « un bruit de fond ». La découverte d'une source cosmique n'interviendra qu'à l'occasion d'une accumulation anormale de quelques neutrinos de haute énergie observée sur cette carte. Mais la détection d'une telle source apportera la preuve irréfutable de la présence d'un accélérateur 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 *Km<sup>3</sup> 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 UFL

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>