

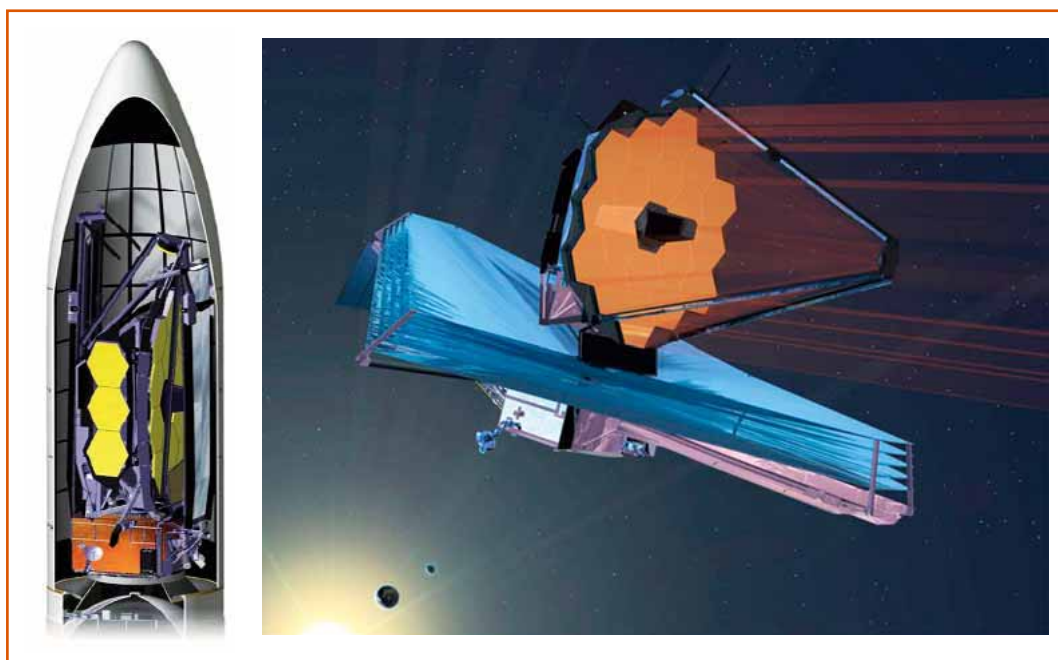
Les télescopes du futur

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

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

1. Voir plus loin

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



Maquette, à l'échelle 1, du JWST.

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

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

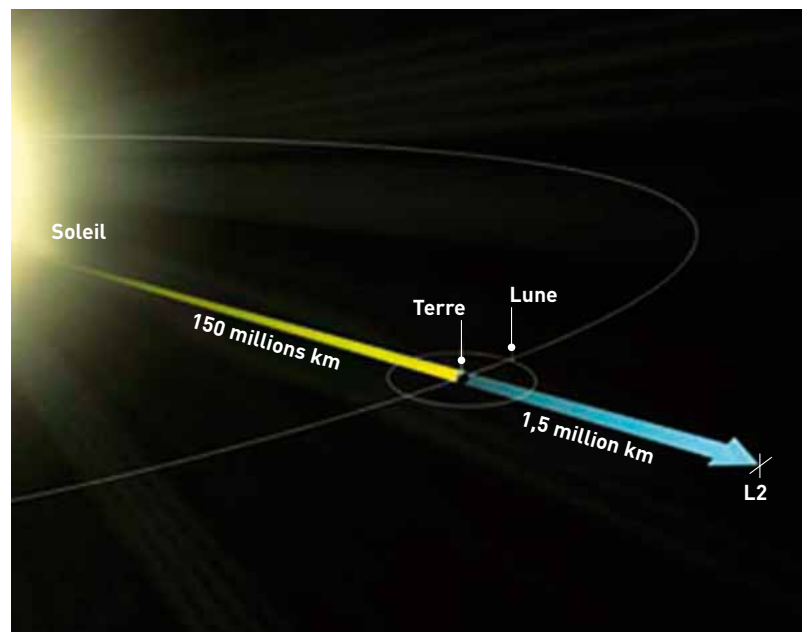


Figure 1. Schéma indiquant la position du point L2 où sera placé le JWST.



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



L. Godart/CEA

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

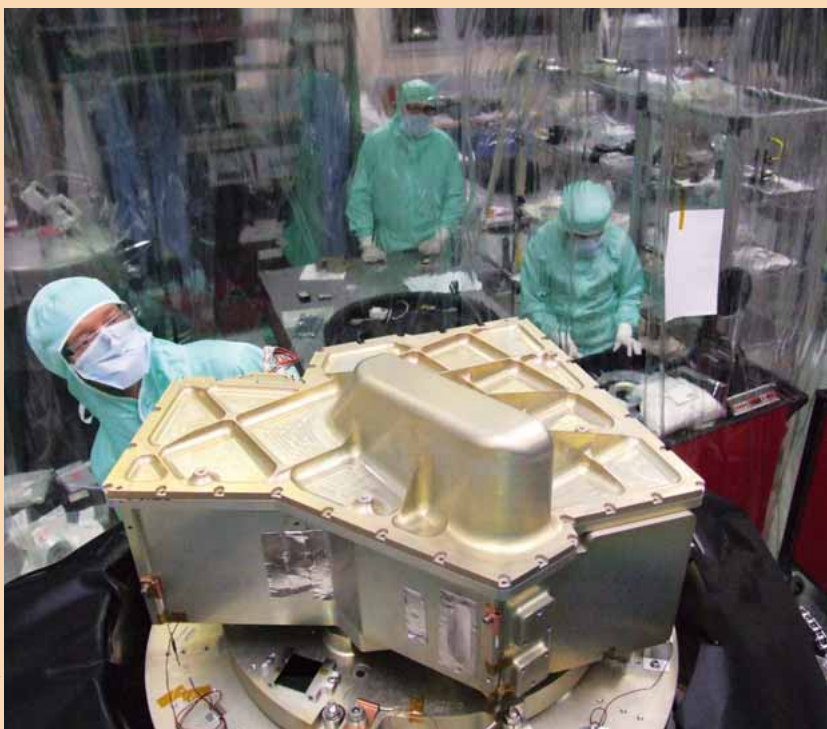
aura fallu 2 500 heures de travail pour contrôler les 65 000 composants électroniques, 900 pièces mécaniques et 50 cartes électroniques.

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

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

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

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



L. Godart/CEA

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

La réalisation d'un masque coronographique

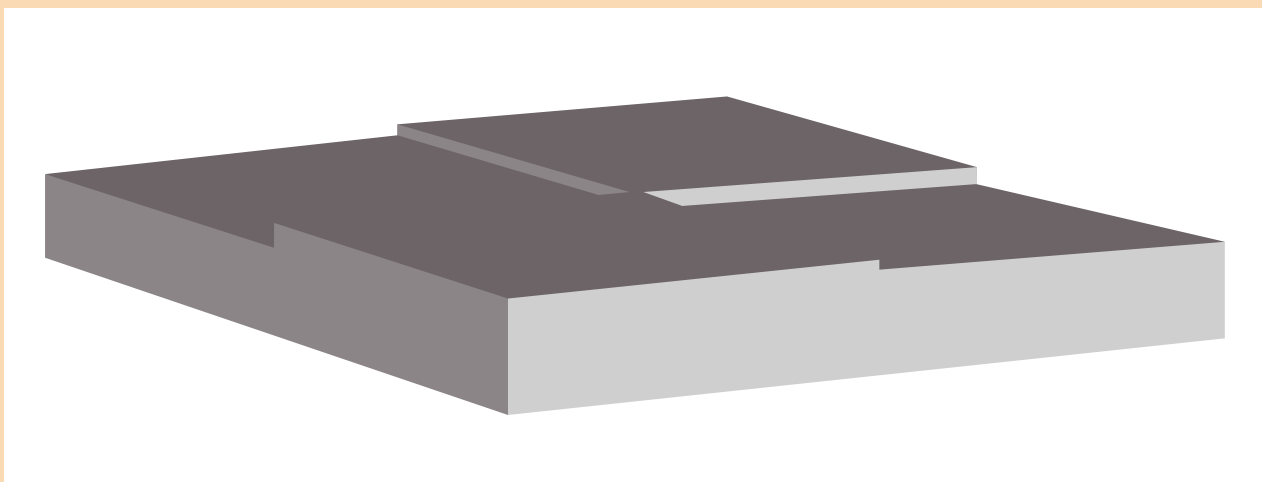


Figure 1. Schéma du masque coronographique en germanium monocristallin (la hauteur de marche n'étant pas à l'échelle).

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

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

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

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

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

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

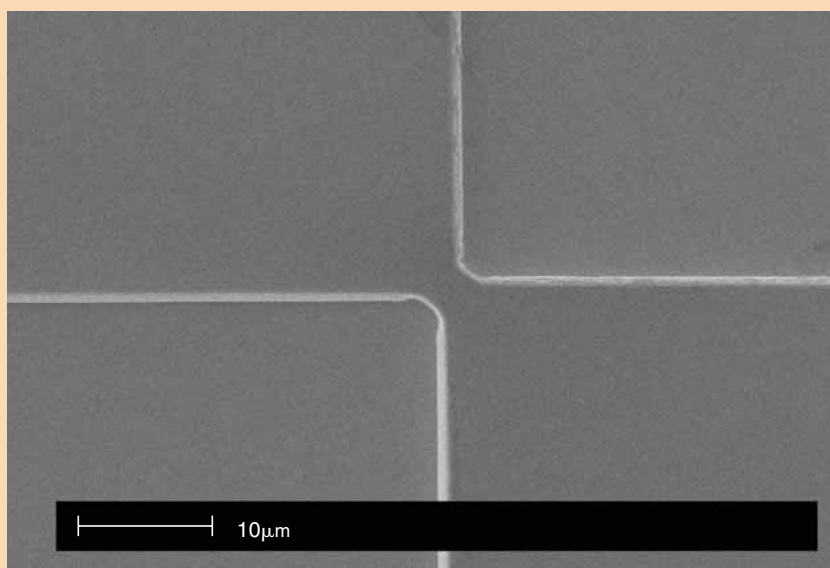


Figure 2. Image en microscopie électronique à balayage montrant le centre de l'élément après gravure. Échelle $10 \mu\text{m}$.

Anne de Vismes/CEA

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

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

> **Anne de Vismes**

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