

LE MIROIR D'HERSCHEL

Texte par Vincent Minier, CEA Saclay. Tous droits réservés. Email : vincent.minier@cea.fr

La taille d'un miroir et la précision sur la surface définissent les performances optiques d'un observatoire spatial. Alors que les télescopes au sol possèdent des miroirs primaires de 10 m de diamètre, les télescopes spatiaux sont généralement de petite taille. Hubble avec un miroir de 2,4 m de diamètre possédait le record jusqu'en 2009. La limitation imposée sur la taille du miroir a plusieurs raisons. Tout d'abord, le diamètre de la coiffe des lanceurs comme Ariane 5 impose une limite sur la taille du satellite. Herschel avec un miroir de 3,5 m de diamètre loge dans la coiffe. Pour des tailles supérieures, les miroirs doivent être déployables comme celui du *James Webb Space Telescope* en construction. Enfin le coût du lancement impose des contraintes très fortes sur le poids du satellite. Des matériaux légers et résistant sont privilégiés.

Le carbure de silicium (SiC) : des étoiles à l'industrie

Le carbure de silicium est un matériau naturellement rare sur Terre. Au contraire il est très présent dans les météorites qui sont formées à partir des poussières interstellaires produites dans les enveloppes circumstellaires des étoiles évoluées. Ces grains de poussière interstellaire ont des noyaux en silicate et s'enrichissent en carbone autour des étoiles carbonées. Toutes les étoiles évoluées ne sont pas carbonées. Le nom naturel du SiC est la moissanite du nom de son découvreur, F.H. Moissan qui analysa l'abondance de ce minéral en 1893 dans une météorite tombée en Arizona. Sa production est réalisée, par exemple, à partir du silicate (sable) et de carbone. Les premières expériences de synthétisation du SiC datent de la fin du 19^e siècle par Moissan en 1888 et par E.G. Archeson en 1891.

Le SiC est un minéral très dur, fond à 2700°C, est insoluble même dans l'acide, a une masse volumique de 3,2 kg/l (fer : 7,8 kg/l ; ardoise, aluminium : 2,7 kg/l ; béton : 2,4 kg/l ; verre : 2,5 kg/l), et ses microstructures homogènes lui confèrent des propriétés physiques isotropiques. Enfin le SiC est caractérisé par un coefficient de dilatation thermique⁶ assez faible de l'ordre de 2 ppm/K à 20°C (fer : 11 ppm/K ; aluminium : 23 ppm/K ; verre : 8,5 ppm/K), et de 0,65 ppm/K à 110 K. Ses propriétés physico-chimiques permettent des utilisations multiples. Sa dureté et sa résistance aux sollicitations mécaniques en font un matériau très abrasif pour les papiers de verre et antidérapants. Sa résistance aux hautes températures favorise son utilisation dans la métallurgie et dans les réacteurs nucléaires. Dans les combustibles à particules, les oxydes d'uranium et de plutonium sont enveloppés par plusieurs couches de pyrocarbone et de carbure de silicium isolant (Clefs CEA #55). Ce minéral est également utilisé pour fabriquer des bijoux ou du graphène à la base du graphite. Pour l'industrie spatiale, ce sont les propriétés isotropiques, sa stabilité dans le temps et dans des environnements hostiles, et la possibilité d'être à la fois léger et dur, qui ont favorisé son étude pour la construction de miroirs complets. Ainsi, les propriétés du miroir peuvent être parfaitement prédites en fonction de la température. Herschel fonctionne dans un environnement spatial à 100 K. La prédiction de la déformation du miroir lors de son lancement, et de son passage d'une température ambiante de 25°C à celle de l'espace est donc vitale pour conserver les propriétés optiques du télescope.

L'utilisation du carbure de silicium par l'industrie spatiale est récente et date des travaux de R&D d'Astrium à Toulouse en 1980-1990 en partenariat avec BOOSTEC, une PME de Tarbes. Il se présente alors sous forme de poudre à laquelle

⁶ Au sens d'une expansion linéaire en partie par million (ppm) par degré.

BOOSTEC ajoute des ingrédients secrets (additifs et liants organiques) pour améliorer ses propriétés d'adhésion et de frittage⁷. La poudre est uniformément compactée sous une pression de 1400 bars par un liquide à l'intérieur d'une enveloppe en caoutchouc. Ensuite le matériau est travaillé à froid pour donner la forme quasi-finale de la céramique, puis fritté à 2100°C sans pression pour former les différentes pièces d'un mètre linéaire, et enfin usiné par des meules à diamants pour obtenir la précision requise sur l'épaisseur de peau. Le polissage du SiC est possible jusqu'à une rugosité de surface de l'ordre de 1 nm. Le SiC peut être recouvert d'une peau métallique qui lui confère un pouvoir réfléchissant. Sa dureté et sa masse volumique permettent de réaliser des miroirs légers et résistants. La masse du miroir primaire d'Herschel avait été spécifiée à 280 kg par l'Agence spatiale européenne.

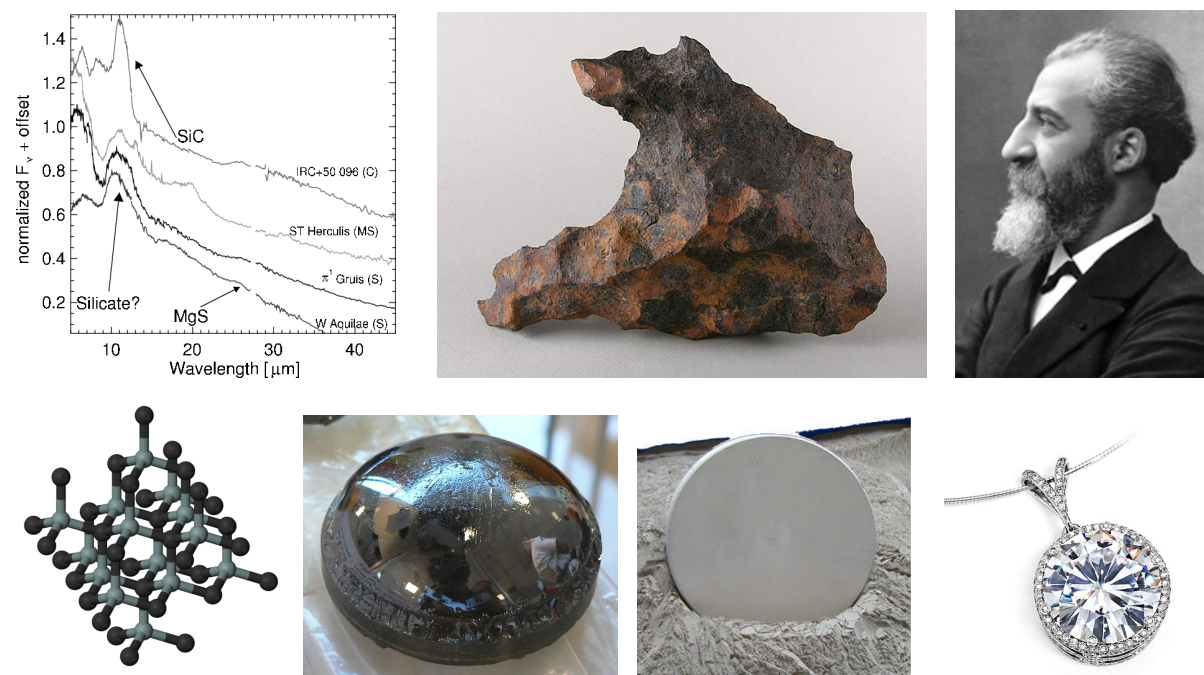


Fig. 39. À gauche haut: rayonnement infrarouge observé par ISO à travers plusieurs étoiles évoluées. La courbe du haut montre une raie signalant la présence du SiC dans l'enveloppe de l'étoile carbonée IRC+50 096 (crédit : S. Hony). Milieu : météorite du Canyon Diablo en Arizona qui fut découverte en 1891, et vieille de 50000 ans. L'étude de sa composition révèle du fer, du carbone et de la moissanite (SiC). À droite : portrait de F.H. Moissan, prix Nobel de chimie en 1906, mit en évidence la présence de SiC dans la météorite du Canyon Diablo en 1893. Bas gauche : forme cristalline du SiC. Milieu droite : Monocristal de SiC (crédit : LMGP, Minatec, Grenoble). Milieu gauche : poudre de SiC comprimée à 1400 bars (crédit : BOOSTEC). Droite : bijoux réalisés à partir du SiC par Charles & Colvard dont le slogan est « Moissanite... Born From The Stars - Perfected on Earth ».

Du miroir américain au miroir européen

Initialement, le miroir d'Herschel devait être fabriqué par les Américains, alors que les Européens se concentraient sur la charge utile (les détecteurs dans le cryostat) et le module de service. Le projet original américain était le Large Deployable Reflector (LDR) qui devait collecter le rayonnement pour les longueurs d'onde de 30 μm à 1 mm (Swanson & Kiya 1983). Le miroir primaire avait un diamètre de 20 m, composés de 37 segments déployables manuellement par des astronautes une fois en orbite et ainsi révisable tous les deux ans grâce à la navette spatiale comme le télescope spatial Hubble. Un projet de R&D de la NASA, baptisé Precision Segment Reflector (PSR), fut lancé pour développer de nouvelles technologies pour fabriquer des miroirs de grande taille dont les déformations à basse température (-100 à -150°C) dans l'espace étaient prévisibles et contrôlables. Un prototype de 2 m fut construit (Catanzaro et al. 2001) et

⁷ Le frittage est un procédé qui permet de transformer une poudre en céramique en la chauffant suffisamment pour favoriser l'adhésion des différents grains mais sans passer par la phase de fusion. Le terme anglais est *sintering*.

plusieurs matériaux furent testés du *Zerodur*⁸ à la fibre de carbone. Le prototype de 2 m en fibre de carbone était sphérique et devait permettre de caractériser les erreurs sur la surface à une température de 70 K. Dans la lancée du projet PSR, le JPL/NASA avait ainsi tenté de construire un miroir en fibre de carbone en la tissant sur un moule. Le démoulage conduisit à des faibles déformations dues au caractère hydrophile de la fibre de carbone. Il fut tenté alors de déformer inversement le moule pour compenser les déformations produites par le démoulage. La possibilité de corriger les erreurs à l'aide d'un miroir secondaire ou tertiaire fut également proposée par Catanzaro et al. En Europe, Astrium et Alcatel menèrent des études sur la fabrication des miroirs. Alcatel essaya les techniques basées sur l'alliage d'aluminium, mais ne parvint pas à atteindre les niveaux de performance exigés par l'ESA. Astrium se lança alors dans la construction d'un miroir à partir du carbure de silicium (SiC). En 1997-98, un miroir prototype sphérique de 1,35 m fut assemblé par neuf segments en SiC car les fours disponibles ne permettaient pas de fondre un miroir en un bloc monolithique. Les tests à 150 K (-223°C) furent conduits dans une cuve cryogénique dans une enceinte à vide chez Astrium Toulouse.

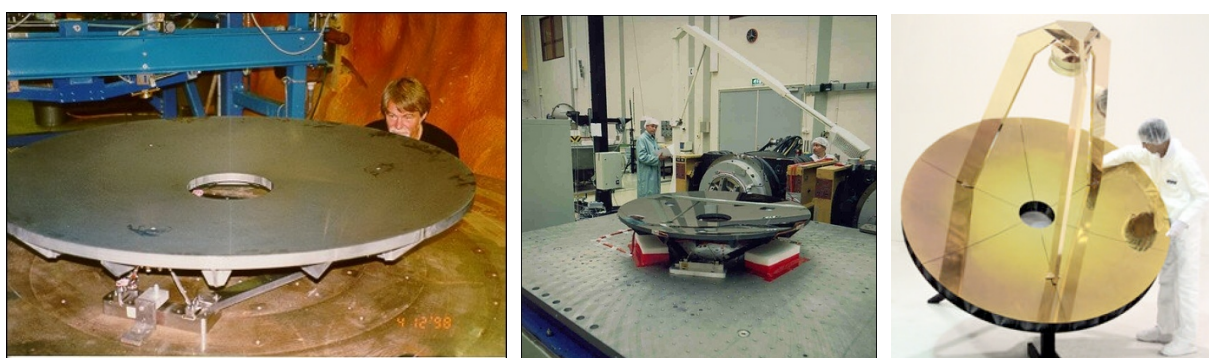


Fig. 40. À gauche : décembre 1998, T. Korhonen de Opteon, Finlande, vérifie l'installation dans la machine à polir. Le miroir est le prototype de 1,35m. Au milieu : miroir sur le banc de test. À droite : miroir prototype.

Pour passer de 1,35 m à 3,5 m, un four de plus grande dimension était nécessaire. Ce plus grand miroir était constitué de 12 pétales dans une matière constituée de poudre de silice (SiC) et d'un liant dont la composition demeure un secret industriel. Un premier segment à l'échelle fut produit entre 1999 et 2001. Le SiC utilisé fut mis au point par la société BOOSTEC à Tarbes et son directeur P. Deny, un spécialiste de la céramique industrielle pour l'industrie spatiale et militaire. Cette céramique composite a nécessité 15 ans de mise au point de 1981 à 1996. Pourtant la R&D du BOOSTEC sur le SiC n'avait pas reçu un accueil favorable du CNES qui n'a jamais mis un euro dans son développement pour le miroir spatial. Cette nouvelle technologie de fabrication de miroir est notamment utilisée pour les miroirs de la mission GAIA de l'ESA. À base de cristaux de silice, cette céramique, préparée à haute température et haute pression, offrait une très grande compacité ce qui évitait d'avoir des hétérogénéités en pression dans le matériau. En conséquence, la céramique était très résistante et nécessitait d'être usinée avec des outils à têtes en diamant. Entre 2001 et 2003, 18 furent produits au total, offrant ainsi 6 pétales de rechange. Les 12 segments furent ensuite rassemblés, *brasés*, pour former un seul bloc. D'autres techniques avaient été envisagées comme l'assemblage mécanique et un collage avec de l'époxy. Astrium préféra le brasage et utilisa le brevet BraSiC déposé par le CEA DTEN (devenu le Liten). Cette technique consiste à ajouter un matériau à haute température entre deux segments du miroir de telle sorte que le coefficient de dilatation thermique soit égal à celui du SiC à quelque 0,1 ppm/K près. Les joints sont très minces, environ 300 micromètres. Des tests pratiqués à 77 K avec de l'azote liquide démontrent que la rigidité des joints n'est pas modifiée

⁸ Le Zerodur est un verre céramique (verre + cristal), conçu par Schott AG en Allemagne, dont le coefficient de dilatation est presque nul, et dont l'homogénéité de ce coefficient dans la matière est excellente. Le Zerodur est employé pour les substrats de miroirs nécessitant une très grande stabilité thermique.

par la température et qu'elle est égale à celle du SiC. Des bulles d'air peuvent néanmoins apparaître à l'intérieur du miroir. Elles furent éliminées par passage aux ultrasons.



Fig. 41. En haut à gauche : mise en place des segments avant brasage. En haut à droite : structure du miroir en 12 pétales de SiC. En bas à gauche : vérification par ultra-sons des joints de brasure entre les segments. En bas à droite : inspection à Kourou du miroir avec des lampes UV.

Le premier brasage du miroir primaire fut pourtant un échec en 2003. Plusieurs vides apparurent sur la première monture du miroir, et 6 nouveaux pétales furent brasés en remplacement de ceux comportant des vides ou abîmés par la découpe. La nouvelle monture fut ensuite usinée pour alléger la couche intérieure du miroir en la réduisant à une peau de 2 mm d'épaisseur. La dureté de la céramique empêcha les outils en diamant à aller en deçà de 3 mm pour atteindre un poids de 315 kg au lieu des 280 kg spécifié par l'ESA. Pour comparaison, le miroir primaire en Zerodur du télescope Hubble mesure 2,4 m de diamètre et pèse 900 kg. Un miroir similaire en Zerodur pour Herschel aurait pesé 1,5 tonne. Le polissage de la surface en SiC fut réalisé en Finlande par le Laboratoire Opteon à l'observatoire de l'Université de Tuorla pour obtenir une rugosité finale de 30 nm. Cette opération fut très longue et dura plusieurs mois avec des aller-retours entre Turku et Toulouse. Une fois poli, le miroir devait être aluminisé pour assurer sa réflectivité. Ce travail de *coating* fut réalisé à l'observatoire de Calar Alto. Une fine couche de silice fut ensuite ajoutée pour protéger le miroir. Le miroir secondaire d'Herschel fut également fabriqué en SiC ce qui permit d'obtenir des effets de dilatation homogène entre le miroir primaire, le miroir secondaire et l'hexapode. Herschel a d'ailleurs décollé avec une myopie qui se corrigea naturellement dans l'espace à basse température en contractant les matériaux et en réduisant ainsi les distances focales. Un second miroir de remplacement fut produit en 2005 en cas de dommages. Le miroir complet fut livré à l'ESA le 8 février 2008. Les miroirs en SiC définissent également un stade concrétisé dans le perfectionnement des miroirs spatiaux. Cette nouvelle série dans la lignée des miroirs spatiaux est devenue la norme dans la construction des télescopes de

l'Agence spatiale européenne, ainsi qu'au Japon. Aux Etats-Unis, le James Webb Space Telescope, un miroir déployable constitué de 18 panneaux hexagonaux en béryllium, poursuit une autre lignée.

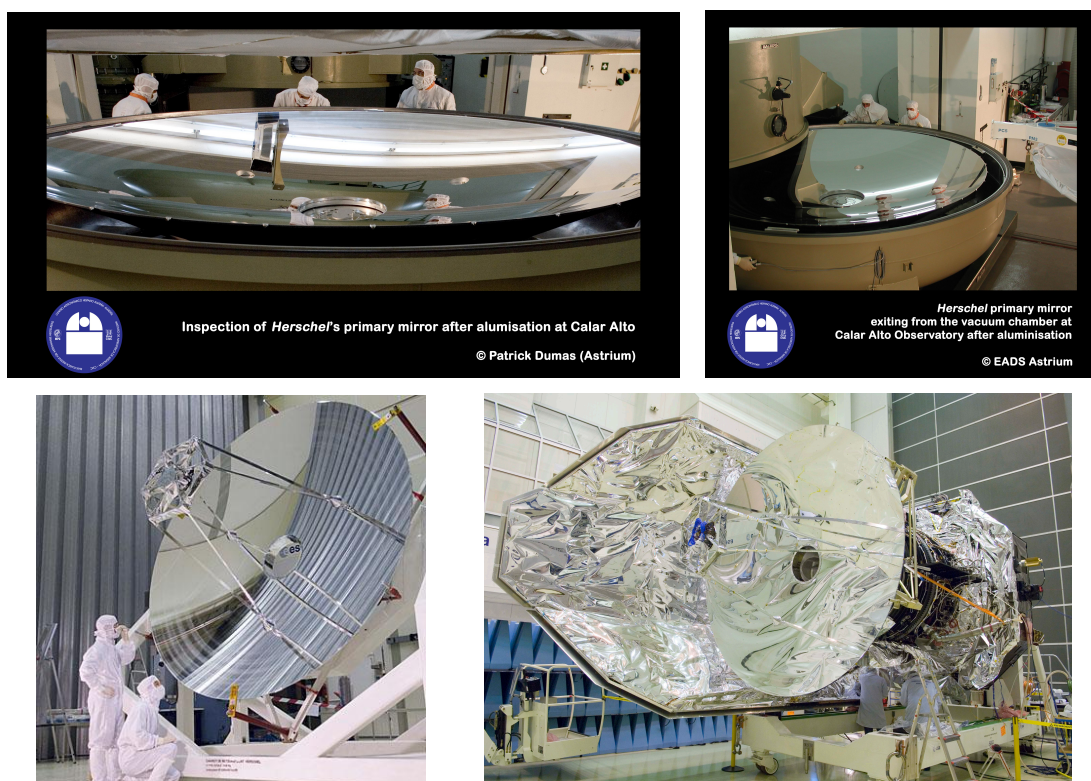


Fig. 42. En haut à gauche : inspection du miroir après aluminisation dans le four à Calar Alto. En haut à droite : sortie du four et de la chambre à vide où l'aluminisation a été réalisée. En bas à gauche : miroir à l'ESTEC. En bas à droite : miroir intégré au satellite à l'ESTEC.