

# QUEL(S) MATÉRIAU(X) POUR OBSERVER L'ESPACE ?

Sandrine Steydli

## Parties des programmes associées

### Programme de la spécialité physique-chimie de terminale générale :

[https://cache.media.education.gouv.fr/file/SPE8\\_MENJ\\_25\\_7\\_2019/92/9/spe249\\_annexe\\_1158929.pdf](https://cache.media.education.gouv.fr/file/SPE8_MENJ_25_7_2019/92/9/spe249_annexe_1158929.pdf)

Partie : Ondes & signaux

### Programme de sciences physiques, complément des sciences de l'ingénieur de terminale générale :

[https://cache.media.education.gouv.fr/file/SPE8\\_MENJ\\_25\\_7\\_2019/03/6/spe269\\_annexe\\_1159036.pdf](https://cache.media.education.gouv.fr/file/SPE8_MENJ_25_7_2019/03/6/spe269_annexe_1159036.pdf)

Partie : Ondes & signaux

### Programme d'enseignement scientifique de première générale :

[https://cache.media.eduscol.education.fr/file/Enseignement\\_scientifique/58/3/Programme2020\\_Ens\\_Sci\\_COM\\_1eG\\_modifie\\_1313583.pdf](https://cache.media.eduscol.education.fr/file/Enseignement_scientifique/58/3/Programme2020_Ens_Sci_COM_1eG_modifie_1313583.pdf)

Partie : Une longue histoire de la matière – Les cristaux

### Programme de première de physique chimie en laboratoire de STL

[https://cache.media.education.gouv.fr/file/SP1-MEN-22-1-2019/86/6/spe645\\_annexe4\\_22-1\\_1063866.pdf](https://cache.media.education.gouv.fr/file/SP1-MEN-22-1-2019/86/6/spe645_annexe4_22-1_1063866.pdf)

Thème : Image photographique

### Programme de terminal Bac professionnel

[https://www.education.gouv.fr/sites/default/files/imported\\_files/document/spe004\\_annexe1\\_1239692.pdf](https://www.education.gouv.fr/sites/default/files/imported_files/document/spe004_annexe1_1239692.pdf)

Spécialité 4 – Thème : Produire une image

**Mots-clés :** matériaux – carbure de silicium – optique – aéronautique – espace – télescope

## INTRODUCTION

Quel est le point commun entre les dénommés Gaïa, Herschel, et JWST ? Ce sont des missions d'astronomie spatiale, dont l'objectif est d'observer différents objets célestes avec de fortes exigences en termes de qualité d'image. Cependant, le lancement et la mise en orbite du satellite, puis l'environnement hostile dans lequel le télescope spatial va évoluer, induisent de nombreuses contraintes sur les matériaux qui composent les instruments.

Comment choisir les matériaux les mieux adaptés à la construction d'instruments d'optique spatiale toujours plus performants ?

## UN SEUL OBJECTIF : VOIR TOUJOURS PLUS LOIN ET TOUJOURS MIEUX

### Des miroirs les plus grands possibles...

Les instruments d'optique sont constitués d'une association de lentilles et de miroirs permettant d'observer l'image agrandie d'objets célestes toujours plus éloignés, et dont on ne parvient à capter qu'une faible partie du rayonnement émis. Ainsi, dans le but de collecter le plus de rayonnement possible et d'augmenter la résolution angulaire d'un instrument, c'est-à-dire sa capacité à distinguer des détails très fins, on cherche à augmenter au maximum la surface de son objectif. De ce fait, les lunettes astronomiques ont assez vite été abandonnées au profit des télescopes, car les lentilles de très grande taille (dont le diamètre est de l'ordre du mètre) ont tendance à se déformer sous l'effet de la gravité et présentent trop d'impuretés, à la différence des miroirs qui constituent l'objectif des télescopes.



Figure 1 – Le télescope Herschel finalisé, avec son miroir primaire de 3,5 mètres de diamètre.

À l'heure actuelle, les plus grands télescopes terrestres ont un miroir primaire dont le diamètre est de l'ordre de 10 mètres, et le futur Télescope Géant Européen (ELT en anglais), dont l'inauguration est prévue en 2025 au Chili, sera doté d'un objectif de 39 mètres de diamètre.

En revanche, pour les télescopes spatiaux, cette course vers des miroirs toujours plus grands est contrecarrée par leur mise en orbite et donc, le passage obligé par la coiffe d'une fusée dont les dimensions sont nécessairement réduites. Ainsi, le plus grand télescope envoyé dans l'espace est pour l'instant Herschel (2009 – 2013), avec un miroir primaire de 3,5 mètres de diamètre (Figure 1).

### ...et à la surface irréprochable

L'instrument optique doit être toujours plus précis, afin d'obtenir de nouvelles données et de faire avancer les connaissances sur les astres observés.

Selon l'objectif de la mission spatiale, la gamme de longueurs d'onde que l'on va détecter sera différente (Figure 2). En conséquence, les dimensions de l'appareil et surtout la finesse du polissage de la surface du miroir ne seront pas les mêmes.

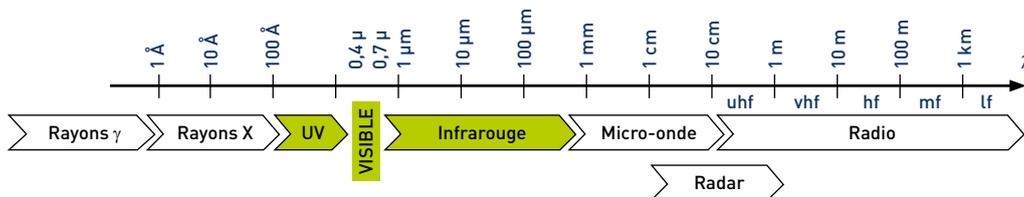


Figure 2 – Les différents domaines du spectre électromagnétique en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$ . Un télescope optique ne recueille qu'une partie de ce spectre.

La netteté des images dépend de la convergence des rayons lumineux dans le plan focal de l'appareil imageur, où se situe le capteur photographique. L'ensemble des rayons issu d'un même point de l'objet céleste doit ainsi parcourir le même chemin optique dans le télescope, au dixième de longueur d'onde près, pour éviter qu'ils n'interfèrent de manière destructive. De ce fait, la symétrie du miroir primaire doit être parfaitement maîtrisée, et notamment le polissage de sa surface, sous peine de conduire à des images floues (Figure 3).

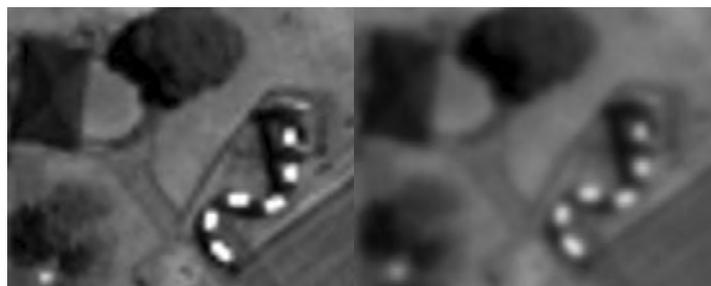


Figure 3 – Afin de fournir une image nette, les surfaces optiques des télescopes doivent être ajustées à un dixième de la longueur d'onde. Source : Airbus.

Ainsi pour Herschel, dont la vocation est d'observer l'Univers dans l'infrarouge lointain et submillimétrique (longueurs d'onde jusque 50  $\mu\text{m}$  environ), le miroir de 3,5 m de diamètre est poli avec une précision de 3 microns (Figure 4).

Il permet d'obtenir des clichés remarquables des parties les plus froides de l'Univers (Figure 5) et de recueillir des données riches en informations sur la naissance des étoiles et la formation des galaxies.



Figure 4 – Le miroir principal d'Herschel est recouvert d'une couche de métal d'environ 1 mm d'épaisseur et on polit la surface avec une précision de 3 microns, nécessaire pour assurer les performances des instruments embarqués. Source : ESA.

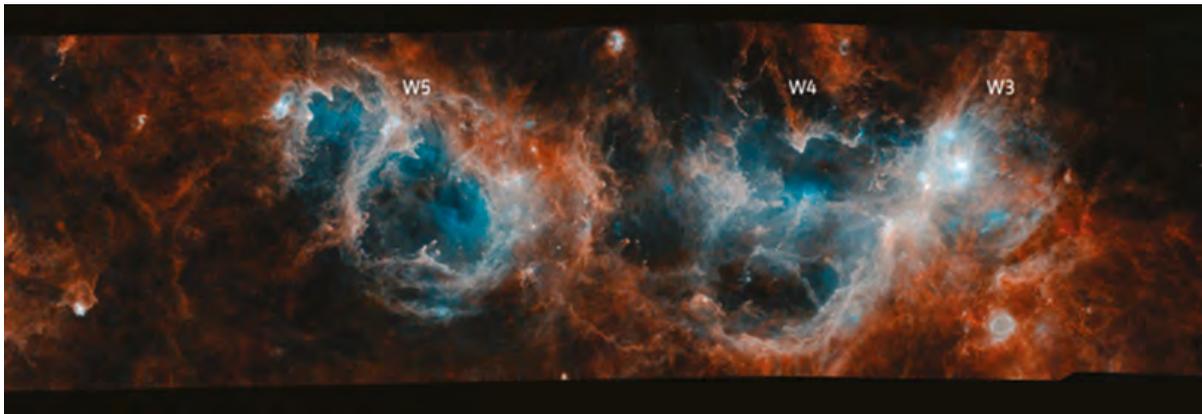


Figure 5 – Situé à 6000 années-lumière, le nuage moléculaire photographié par le télescope Herschel révèle la présence d'une nurserie d'étoiles : les filaments observés correspondent à la formation d'étoiles. Source : ESA.

À titre de comparaison, le satellite Gaïa, lancé en 2013 pour cartographier les étoiles proches de notre galaxie, opère dans le visible. Ses deux miroirs principaux sont rectangulaires et de dimensions moins importantes que pour Herschel (environ 1,50 m de long pour 50 cm de large), mais étant donné que les longueurs d'onde de travail sont largement inférieures, le polissage est nettement plus exigeant : on atteint une précision de 10 nanomètres (Figure 6) !



Figure 6 – Les grands miroirs de Gaïa doivent avoir une précision de finition de surface de 10 nm pour une observation dans le domaine visible, ce qui est encore plus exigeant que pour Herschel qui travaille avec des longueurs d'onde submillimétriques. Source : ESA / Airbus.

## UN PREMIER OBSTACLE À SURMONTER : LA MISE EN ORBITE !

La volonté de mettre un instrument d'optique en orbite dans un satellite constitue un défi de taille pour les scientifiques, tant les contraintes sont nombreuses, notamment au niveau mécanique.

Pour commencer, les vibrations sonores du moteur du lanceur<sup>1</sup> lors de son décollage sont très importantes et nécessitent que la charge utile<sup>2</sup> embarquée soit la plus compacte possible pour résister à cette pression acoustique.

Par la suite, la résistance des matériaux est également mise à rude épreuve car pour atteindre la vitesse de huit kilomètres par seconde, la charge utile subit une accélération de 3 à 4 g<sup>3</sup>. Le télescope doit donc être assez solide pour résister à trois ou quatre fois son poids.

Enfin, le largage successif des différents éléments de la fusée (premier étage, coiffe, deuxième étage puis satellite) se fait au moyen de boulons explosifs et constitue à chaque fois un choc violent du point de vue de la charge utile, pouvant atteindre 100 g !

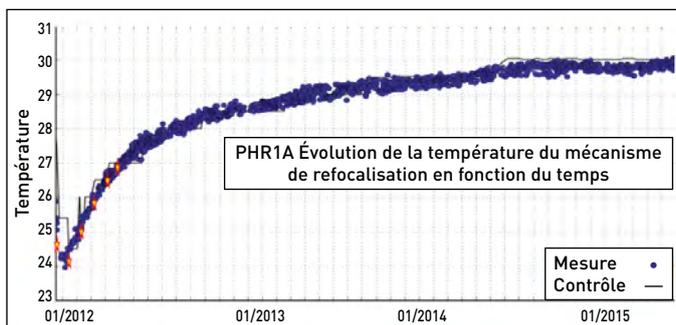
Il en résulte qu'en plus d'être légers pour minimiser la charge embarquée et donc le coût du lancement, les matériaux de construction des télescopes doivent être extrêmement résistants.

## UN AUTRE DÉFI TECHNOLOGIQUE : ÉVOLUER DANS L'ESPACE

### Un milieu où règne le vide...

Une fois dans l'espace, le satellite est confronté à de nouvelles difficultés liées à ce milieu des plus hostiles.

Tout d'abord, la pression extrêmement réduite qui y règne s'avère être une source de complications pour l'élaboration des télescopes spatiaux. En effet, alors que sur Terre, la valeur de la pression est de 1 bar, elle diminue progressivement avec l'altitude pour atteindre à peine un millionième de bar à l'altitude de 300 kilomètres, où évoluent les premiers satellites.



*Figure 7 – Pour refocaliser le miroir primaire du satellite Pléiades du CNES, l'évolution de la courbure du miroir primaire est compensée par un dispositif thermique pendant plusieurs années. La courbe montre l'évolution de la température du mécanisme de refocalisation de ce miroir en fonction du temps, traduisant la lente évolution due à la déformation de la structure porteuse en composite suite au lent dégazage.*

Un des inconvénients de ce vide extrême est le dégazage des matériaux. Ainsi les composites<sup>4</sup>, qui sont très utilisés en spatial pour leur rigidité et leur grande légèreté, ont tendance à capter au sol beaucoup de gaz de l'air ambiant, telle la vapeur d'eau. Sous la pression atmosphérique, les molécules de gaz se trouvent piégées au niveau de la surface du matériau mais une fois dans l'espace, elles sont relâchées progressivement selon un processus de désorption difficile à prédire depuis le sol et dont les conséquences peuvent être désastreuses.

Tout d'abord, ce dégazage modifie les propriétés mécaniques des matériaux et conduit à leur déformation progressive. Concernant la structure d'un

miroir, sachant que même une infime déformation entraîne une perte de netteté de l'image, il est nécessaire de procéder à des corrections de la courbure du miroir pour le refocaliser en temps réel (Figure 7).

De plus, les molécules d'eau désorbées dans l'espace s'accumulent autour du satellite et tendent à se recondenser sur la surface froide et lisse des miroirs, formant une fine couche de glace qui va atténuer la lumière reçue par le miroir et altérer la qualité des images (Figure 8). Pour y remédier, on réchauffe périodiquement les miroirs contaminés afin de sublimer la glace.

1. Lanceur : véhicule propulsif capable d'envoyer une charge utile dans l'espace.

2. Charge utile : équipement pouvant être transporté par un véhicule spatial et qui est destiné à remplir une fonction donnée. Pour le lanceur, cela peut être un satellite, mais au niveau du satellite, cela peut être un télescope.

3. g [comme gravité] : unité d'accélération correspondant environ à l'accélération de la pesanteur à la surface de la Terre.

4. Composite : matériau formé à partir de plusieurs composants élémentaires dont l'association confère à l'ensemble des propriétés que chaque composant pris séparément ne possède pas.

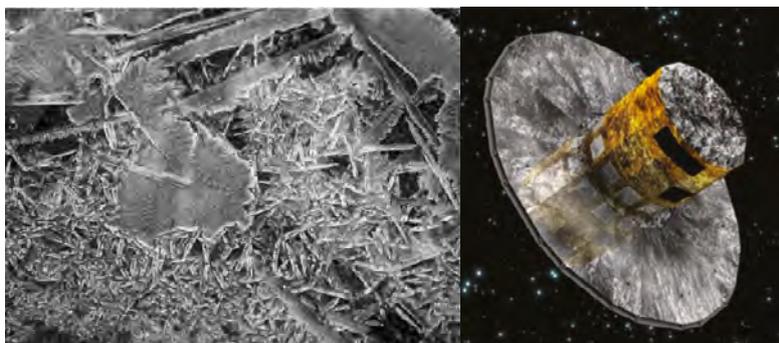


Figure 8 – Pollution due à l'eau qui se condense sous forme de cristaux de glace sur les miroirs du satellite Gaïa. Ce phénomène perturbe l'acquisition des données. L'eau vient du dégazage des matériaux composites utilisés pour réaliser la plateforme du satellite.

### ...et aux variations de températures extrêmes

En plus de la pression très faible qui règne dans l'espace, les satellites subissent un environnement thermique pour le moins agressif. En effet, la partie exposée au Soleil peut atteindre 200 °C, tandis que celle à l'ombre, face à l'espace froid, peut descendre jusqu'à -100, voire -150 °C ! Cette amplitude thermique extrême est un inconvénient majeur puisque pour un matériau standard, une élévation d'un seul degré se traduit par une dilatation de l'ordre du micron, déjà suffisante pour que la focalisation de l'instrument soit perdue.

Pour remédier à ce problème, il est donc nécessaire d'assurer le contrôle thermique des instruments, soit en les isolant complètement de leur environnement, soit en régulant leur température.

Le futur télescope JWST (*James Webb Space Telescope*) de la NASA, disposera par exemple d'un immense bouclier thermique, de la taille d'un terrain de tennis une fois déployé (Figure 9).

Dans le cas de Gaïa, c'est grâce à un contrôle actif qu'on parvient à maîtriser la température en son centre, du dixième au millième de degré.

Afin de réguler efficacement la température, les matériaux sont sélectionnés en fonction de leur aptitude à conduire la chaleur. En effet, une conductivité thermique élevée permet d'homogénéiser plus rapidement la température et d'éviter au cœur de l'instrument la formation de points chauds qui nuiraient à son bon fonctionnement.

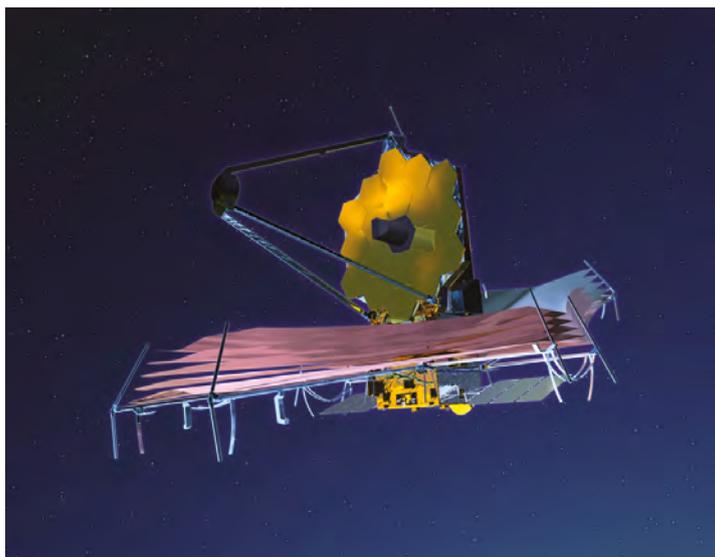


Figure 9 – Vue d'artiste du satellite JWST avec son bouclier thermique solaire, de la taille d'un terrain de tennis une fois déployé. Sous ce bouclier, le module de service est tourné vers la Terre et le Soleil tandis qu'au-dessus, le télescope de 6,5 mètres de diamètre regarde vers l'espace froid.

## LES MATÉRIAUX DE L'ESPACE

### Des propriétés passées à la loupe

Pour répondre au cahier des charges imposé, les matériaux sont sélectionnés avec la plus grande exigence. Le tableau 1 ci-dessous regroupe quelques exemples utilisés pour réaliser la structure et les miroirs des télescopes spatiaux, tels les métaux aluminium ou béryllium, la céramique carbure de silicium, et les verres à très faible dilatation thermique ULE (*Ultra Low Expansion glass*).

Tout d'abord, pour satisfaire aux conditions de lancement, ils doivent être résistants mais également légers, ce qui revient à choisir un rapport rigidité/densité le plus élevé possible.

Ensuite pour assurer une régulation thermique efficace, on privilégie une bonne conduction, donc des valeurs de gradients thermiques et diffusivité thermiques élevées.

Viennent enfin s'ajouter d'autres critères tels le coût, l'impact environnemental ou les délais de fabrication.

Propriété	Unités	Aluminium	Béryllium	SiC	ULE
$\rho$ , Densité	g/cm <sup>3</sup>	2,71	1,85	2,95	2,21
E, Rigidité	GPa	68,3	303	364	67,6
E/ $\rho$ , Rapport rigidité/densité	KN-m/g	25	164	123	31
$\sigma/\rho$ , Résistance à la contrainte	N-m/g	46	11	24	3,2
$\alpha$ , Trempage thermique	ppm/°C	22,7	11,4	3,38	$\pm 0,03$
$\Delta\alpha$ , Homogénéité	ppb/°C	100	100	30	10
K/ $\alpha$ , Gradients thermiques	MW/m	6,9	19	51	44
K/rCp, Diffusivité thermique	m <sup>2</sup> /s	6,55	6,07	8,7	0,08
K/ $\alpha$ E, Tension thermique	MW-m/N	101	63	140	646

Tableau 1 – Données de comparaison entre plusieurs matériaux : aluminium, béryllium, carbure de silicium (SiC), verre à très faible dilatation thermique ULE (*Ultra Low Expansion glass*).

### Le carbure de silicium de plus en plus plébiscité

Le carbure de silicium (SiC), est une céramique qui répond à l'ensemble des critères précédents.

Matériau quasi inexistant sur Terre à l'état naturel, il est synthétisé depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, et sa très grande dureté<sup>5</sup> a été mise à profit dans l'industrie depuis longtemps, notamment dans le domaine des abrasifs.

Le carbure de silicium présente également une faible dilatation thermique et une haute résistance aux acides et bases. Il est chimiquement inerte, et après sa cuisson à plus de 1 600 °C, il n'absorbe plus l'humidité ni les gaz.

En optique spatiale, cette très grande stabilité a conduit à utiliser le carbure de silicium pour les éléments optiques ou la structure des télescopes.

Ainsi, pour construire le miroir du télescope Herschel, douze pétales en carbure de silicium ont été assemblés puis soudés, avant d'être métallisés puis polis (Figure 10).



Figure 10 – Le télescope Herschel est constitué de douze pétales qui sont fabriqués en carbure de silicium.  
Source : ESA / Airbus / Boostex.

5. La dureté du carbure de silicium atteint une valeur de 9,5 sur l'échelle de Mohs, ce qui le rend quasiment aussi dur que le diamant.

Avec le bon rapport rigidité/densité du carbure de silicium, le gain de poids du télescope est considérable, puisque l'ensemble atteint 300 kg contre près de 1 500 kg avec une technologie traditionnelle comme celle utilisée pour le miroir Hubble (Figure 11).

Pour finir, un autre avantage du carbure de silicium est la très grande diversité de pièces que l'on peut réaliser puis assembler (Figure 12). En effet, cette céramique est très malléable, facilement usinable avant cuisson et très dure après cuisson, ce qui a permis de construire pour Gaïa une structure complexe de plusieurs mètres qui sert de support aux instruments (Figure 13).

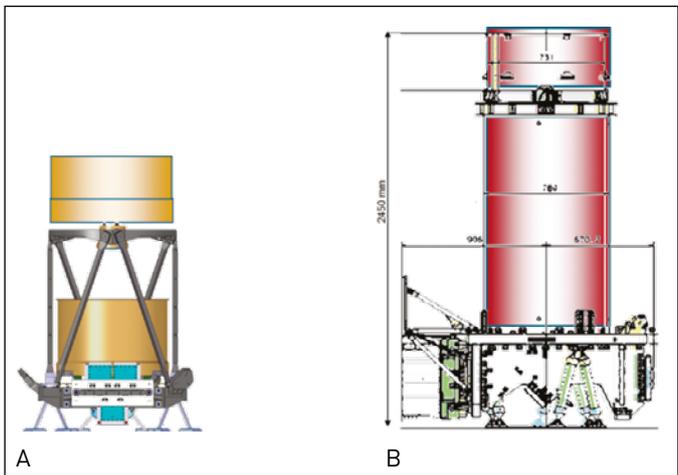


Figure 11 – Comparaison entre deux télescopes fournissant la même qualité d'image, mais ayant des propriétés physiques différentes : A) avec utilisation du carbure de silicium et B) avec un miroir en verre et un composite contenant des fibres de carbone. Sources : A) Airbus Defence & Space ; B) CNES.



Figure 12 – Série de pièces en carbure de silicium utilisées pour Gaïa, instrument construit comme un immense lego. Source : Airbus Defence & Space.

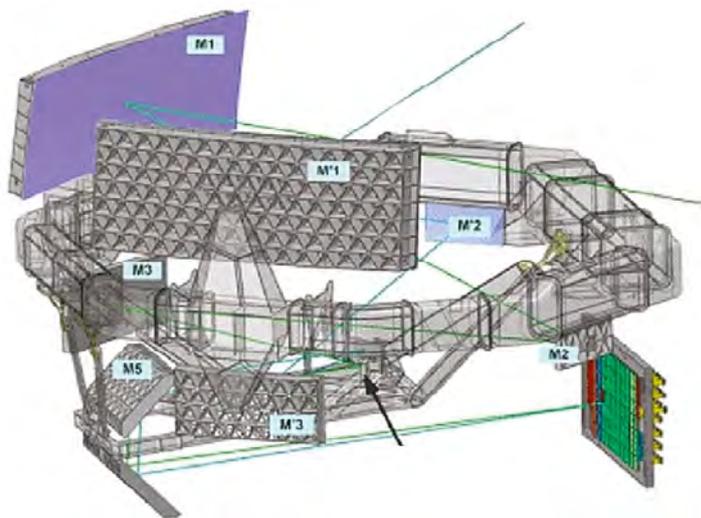


Figure 13 – Le tore<sup>6</sup> du télescope Gaïa, constitué d'une dizaine de tronçons élémentaires en carbure de silicium, mesure plus de 3 mètres. Ce banc optique rigide sert de support aux différents miroirs notés M ou M' sur le schéma. Source : Airbus Defence & Space.

6. Tore : solide ayant la forme d'un tube replié sur lui-même, comme une bouée ou un donut.

## Structure cristalline du SiC

Le carbure de silicium SiC est un matériau essentiellement covalent, constitué d'un empilement régulier d'atomes de carbone C et de silicium Si, situés dans la même colonne du tableau périodique.

Ce matériau présente un important polymorphisme, puisqu'il peut se trouver sous plus de 250 formes cristallines.

- ▶ Le carbure de silicium alpha ( $\alpha$ -SiC) est la forme la plus courante, avec une structure cristalline hexagonale dite 6H, semblable à celle de la wurtzite (Figure 14A).
- ▶ Le carbure de silicium bêta ( $\beta$ -SiC) a une structure cubique dite 3C de type sphalérite, semblable à celle du diamant (Figure 14B).

Pour décrire la maille élémentaire de la forme  $\beta$  (Figure 14B), on peut considérer que les atomes de silicium Si forment un réseau cubique à faces centrées (CFC) où les atomes de carbone C occupent la moitié des lacunes tétraédriques.

On retrouve ainsi une multiplicité de 4 atomes de chaque type par maille

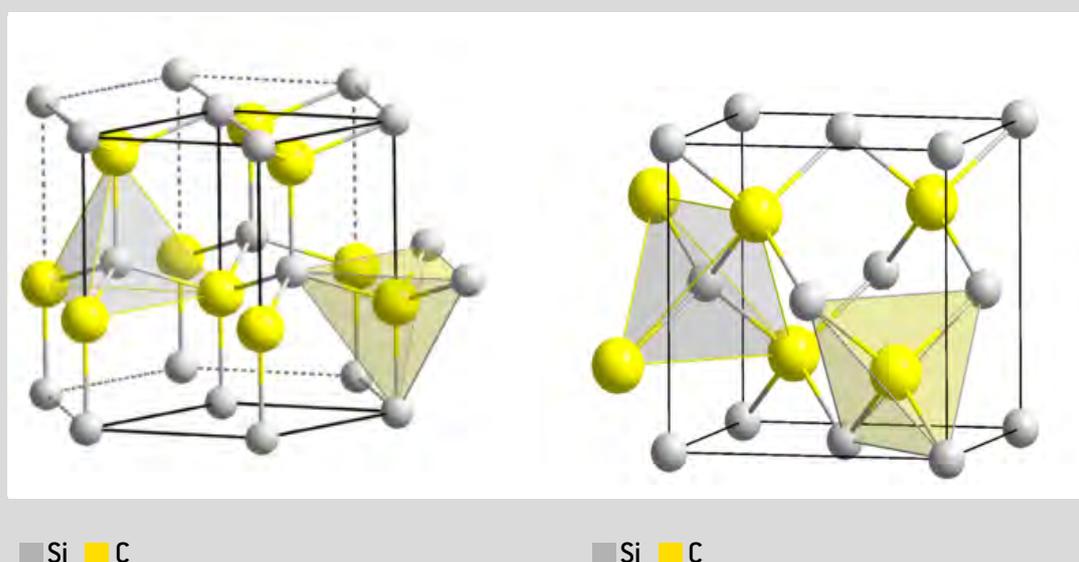


Figure 14 – Deux des nombreuses formes cristallines du carbure de silicium.

À gauche (A) : forme alpha ( $\alpha$ -SiC) hexagonale de type wurtzite, de paramètres de maille  $a = 0,308$  nm et  $c = 1,512$  nm

À droite (B) : forme bêta ( $\beta$ -SiC) cubique de type blende, de paramètre de maille  $a = 0,436$  nm

Source : Wikipédia [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8e/Wurtzite\\_polyhedra.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8e/Wurtzite_polyhedra.png) et [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/12/Sphalerite\\_polyhedra.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/12/Sphalerite_polyhedra.png)

## CONCLUSION

En plus de leur performance optique, les miroirs embarqués dans des missions spatiales doivent être mécaniquement très stables pour supporter à la fois le violent décollage et les grandes variations de pression et de température subies lors de la mise en orbite. Le choix des matériaux est donc une étape cruciale dans l'élaboration d'un télescope. Parmi eux, le carbure de silicium se distingue par ses propriétés remarquables, notamment en termes de dureté, et c'est ainsi qu'il a largement intégré la construction des missions européennes telles Herschel et Gaïa. Le projet JWST (*James Webb Space Telescope*) de la NASA a quant à lui choisi un matériau concurrent, le Béryllium, pour son immense miroir. Mais l'incontournable carbure de silicium, constituant-clé d'un spectromètre embarqué, participera également au lancement de ce télescope géant, prévu le 31 octobre 2021... Vivement la suite des aventures de ce « super-matériau » !

## SOURCES

*Dominique Gilliéron*

*Chimie, aéronautique et espace, EDP Sciences, 2018, ISBN : 978-2-7598-2283-6*

Les matériaux pour l'espace : application aux instruments optiques

<https://www.mediachimie.org/ressource/les-matériaux-pour-l'espace-application-aux-instruments-optiques>

*Jacques Louet*

*Chimie, aéronautique et espace, EDP Sciences, 2018, ISBN : 978-2-7598-2283-6*

La chimie et l'espace

<https://www.mediachimie.org/ressource/la-chimie-et-lespace>

**Sandrine Steydli** est professeure agrégée de physique-chimie

**Comité éditorial** : Danièle Olivier, Jean-Claude Bernier, Grégory Syoen