

# Les matériaux pour l'espace : application aux instruments optiques

*Dominique Gilliéron a effectué ses études à l'École supérieure d'aéronautique de Toulouse puis obtenu un Master en astrophysique. Il a notamment travaillé à la Direction générale de l'armement (DGA) sur le programme « Essaim de micro-satellites » destiné au renseignement électromagnétique. Il est actuellement responsable des instruments optiques spatiaux et directeur du Centre de compétence optique spatiale chez Airbus Defense & Space<sup>1</sup>.*

Quel est le matériau idéal pour réaliser un instrument optique spatial ? C'est à cette question que nous essayerons de répondre en adoptant une démarche scientifique visant à poser le problème. Nous présenterons dans un premier temps les contraintes associées à l'environnement

spatial, puis nous identifierons les performances essentielles d'un télescope optique et enfin nous passerons en revue différents matériaux, avant de conclure sur une comparaison concrète de deux instruments optiques de même classe.

1. [www.airbus.com](http://www.airbus.com)

## 1 L'espace, un environnement hostile

Pour un opticien, l'environnement spatial est hostile et il est difficile d'y envoyer des instruments optiques extrêmement précis. Cela vient d'abord des caractéristiques spécifiques de l'espace qui posent une quantité de problèmes aux ingénieurs en charge de développer ces instruments.

### 1.1. Le vide

Pour commencer, l'espace est presque « le vide ». Sur Terre, la pression est d'un bar, mais à trente kilomètres, elle n'est plus que d'un millibar (Figure 1). Or, les satellites évoluent à partir de 300 kilomètres, et à cette distance la

pression n'est plus que d'un millionième de bar : il n'y a quasiment plus d'air du tout et les matériaux vont donc être soumis à ce vide extrême.

Sur Terre, ces matériaux captent les gaz, et en particulier l'eau sous forme de vapeur... Dans l'espace, ils vont être peu à peu relâchés *via* un lent processus qui peut durer plusieurs années et qui reste difficile à prédire au sol.

Les composites<sup>2</sup> sont des matériaux très utilisés en spatial car ils sont rigides et très légers. Le problème est qu'ils ont tendance à capter beaucoup d'eau au sol qui

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

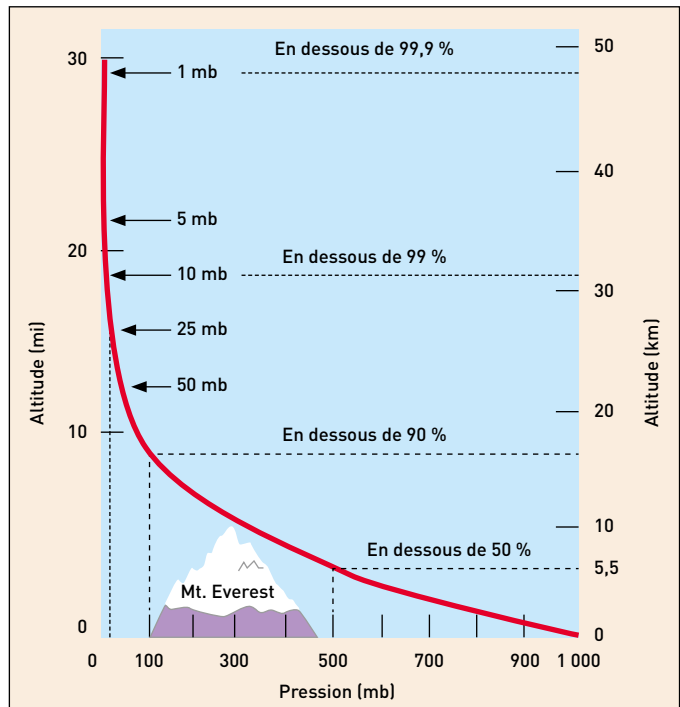


Figure 1

Évolution de la pression atmosphérique (en millibar, mb) en fonction de l'altitude (en kilomètres, km). Plus l'altitude est haute, plus la pression diminue, jusqu'à atteindre le « vide » de l'espace.

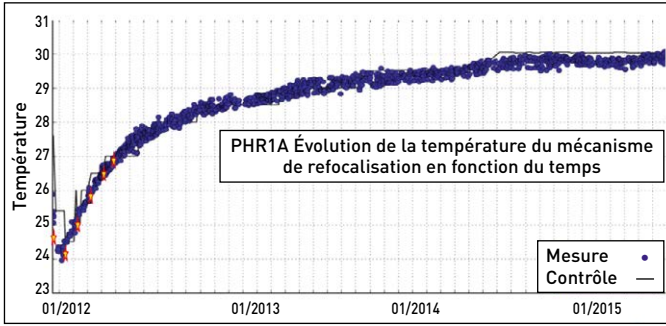


Figure 2

À cause du dégazage, c'est-à-dire de la libération progressive des gaz accumulés sur Terre par les matériaux composites, les instruments optiques doivent être refocalisés pendant plusieurs années. C'est le cas pour le satellite Pléiades où l'évolution de la courbure du miroir primaire est compensée par un dispositif thermique. La courbe montre l'évolution de la température du mécanisme de refocalisation de ce miroir primaire en fonction du temps, traduisant la lente évolution due à la déformation de la structure porteuse en composite comme suite au lent dégazage.

sera relâchée progressivement dans l'espace au prix d'une modification de leurs propriétés mécaniques : ces matériaux vont tout simplement se déformer. Si un miroir est fixé sur un composite, il se déformera à son tour très légèrement mais suffisamment pour modifier la courbure d'un grand miroir et déplacer le point de focalisation<sup>3</sup>, c'est-à-dire rendre les images floues ! Pour corriger cet effet, comme pour le satellite Pléiades du CNES, on refocalise l'instrument optique régulièrement sur plusieurs années (Figure 2).

L'eau ainsi libérée va s'accumuler autour du satellite et va avoir tendance à se condenser sur les surfaces froides, propres et lisses... comme les miroirs ! Cela donne naissance à la formation de cristaux de glace qui vont atténuer peu à peu la lumière reçue par l'instrument et créer une lumière parasite gênante pour les observations. C'est ce qui est arrivé récemment au satellite GAIA de l'Agence Spatiale Européenne (Figure 3). Afin de traiter le problème, on réchauffe les miroirs contaminés périodiquement

pour sublimer la glace. Plusieurs décontaminations ont été nécessaires en 2016 pour retrouver une performance nominale.

### 1.2. Les radiations

Il faut en outre tenir compte des radiations dans l'espace (Figure 4). Sur la Terre, l'atmosphère dense et le champ magnétique nous protègent très efficacement des radiations qui ne pénètrent qu'aux pôles sous la forme d'aurores boréales. Mais lorsqu'on quitte l'atmosphère, on est rapidement soumis à trois types de radiations :

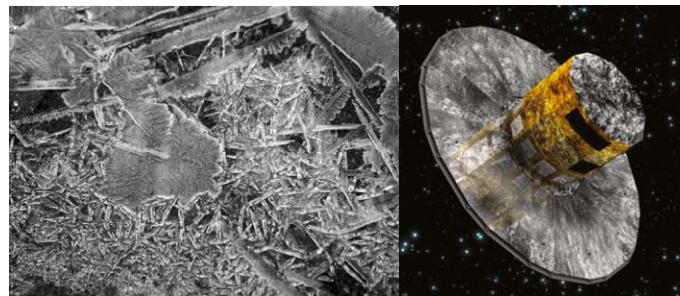
- le **vent solaire** : le Soleil est le lieu d'explosions thermonucléaires<sup>4</sup> permanentes,

4. Réaction thermonucléaire : réaction nucléaire de fusion de noyaux d'atomes légers portés à très haute température.

Figure 3

Pollution due à l'eau qui se condense sous forme de cristaux de glace sur les miroirs du satellite Gaïa, un observatoire spatial chargé de cartographier les étoiles proches de notre galaxie. Ce phénomène perturbe l'acquisition des données. L'eau vient du dégazage des matériaux composites utilisés pour réaliser la plateforme du satellite.

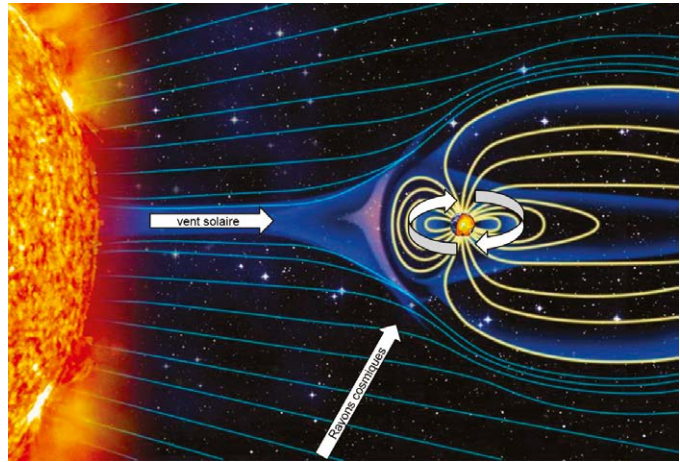
Source : ESA.



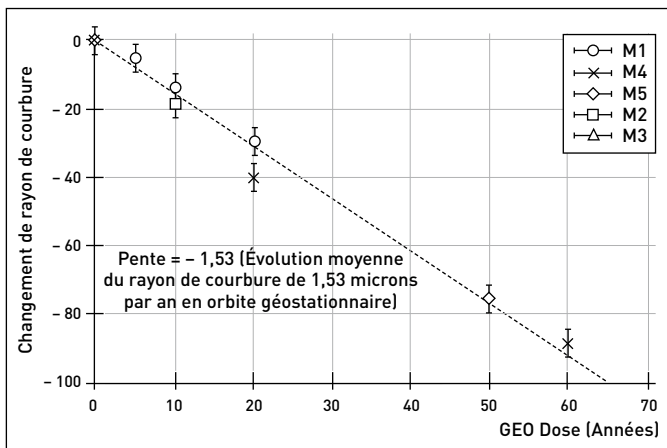
3. Point de focalisation : point où convergent les rayons en provenance de différents endroits.

**Figure 4**

Les différentes radiations auxquelles sont soumis les satellites dans l'espace sont le vent solaire, les rayons cosmiques et les ceintures de radiation.

**Figure 5**

Les propriétés mécaniques des matériaux dans l'espace changent à cause des radiations. Par exemple, ici est représentée l'évolution du rayon de courbure d'un miroir en verre en fonction de la dose de radiations reçue en orbite géostationnaire. Le changement est suffisant pour défocuser le télescope et rendre l'image floue en moins d'un an.



qui émettent énormément de radiations. L'exposition directe au vent solaire entraîne des dommages importants sur les électroniques et certains matériaux ;

– les **rayons cosmiques** : ce sont des particules extrêmement énergétiques qui viennent du fin fond de notre galaxie ainsi que de galaxies distantes. Elles sont générées par des événements cataclysmiques. En pénétrant dans les matériaux, elles vont casser des liaisons chimiques et déposer des charges électriques importantes ;

– le bouclier magnétique, qui protège la surface terrestre, a tendance à piéger les particules du vent solaire et à les garder dans des **ceintures** fortement ionisées présentant de fortes densités d'électrons et de protons. Suivant leur altitude, les satellites croisent régulièrement ces ceintures et sont soumis à de fortes radiations.

Pour les instruments optiques, ces radiations sont à l'origine de deux effets :

– une modification des propriétés mécaniques. Par exemple, sous l'effet du bombardement des particules, certains matériaux vont se densifier en surface. Appliqué à un miroir, cela va se traduire par un changement de courbure de quelques microns (**Figure 5**). C'est infime, mais cela suffit à rendre des images floues. Comme le dégazage, ce processus est très lent et dure des années. Il sera d'autant plus important que les miroirs sont exposés aux radiations et non protégés par la structure du satellite.

– une modification des propriétés optiques. Par exemple,

sur des verres, les particules les plus énergétiques cassent des liaisons chimiques et créent des sites actifs qui vont à leur tour piéger la lumière, ce que l'on veut éviter. En effet, les lentilles doivent être transparentes et focaliser les photons sans les arrêter. Les radiations entraînent ainsi une perte de transmission des lentilles (Figure 6). Cet effet doit être pris en compte dans le choix des matériaux pour qu'une mission dure trois, quatre ou cinq ans. Il existe néanmoins des verres durcis qui ne noircissent pas sous les radiations.

### 1.3. Un environnement thermique particulier

Troisième particularité de l'environnement spatial, la

thermique. L'espace est très agressif thermiquement et soumet les satellites à un véritable « barbecue ». D'un côté, le Soleil chauffe très fortement, il émet 1 400 watts par mètre carré. De l'autre, l'espace est très froid, avec une température de  $-270\text{ °C}$ . Si rien n'est fait, la partie exposée au Soleil d'un satellite peut atteindre une température de  $200\text{ °C}$  tandis que l'autre, face à l'espace froid, peut descendre jusqu'à  $-100$ , voire  $-150\text{ °C}$  (Figure 7).

Ces variations extrêmes d'environnement thermique posent des problèmes sérieux aux instruments optiques. En effet, une fois l'instrument optique réglé, un changement de température d'un



Figure 6

Un exemple de changement des propriétés optiques des matériaux sous l'effet des radiations. Les résultats d'essais de bombardements par des rayons gamma<sup>5</sup> et des protons sont ici visibles. Cela provoque un jaunissement de lentilles fabriquées dans un matériau non durci.

Source : ESA.

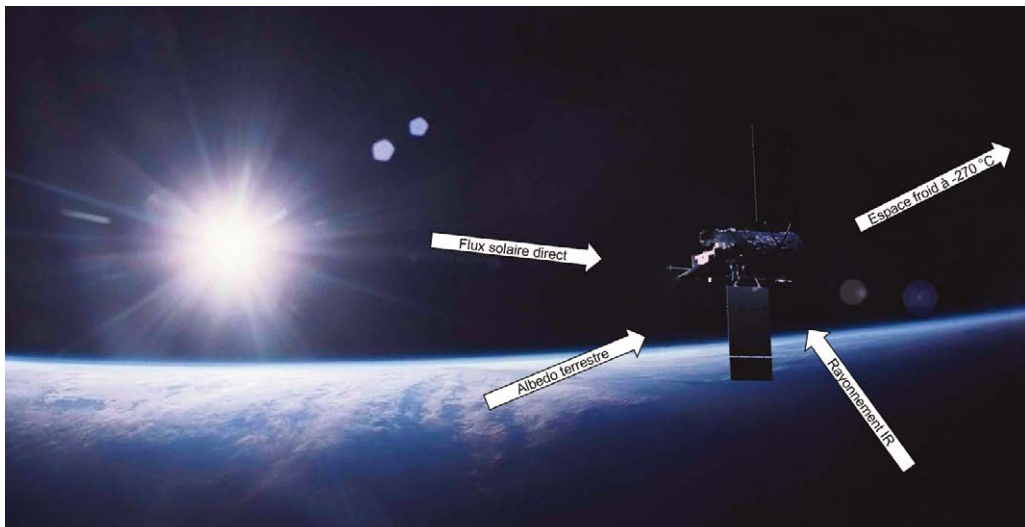


Figure 7

Les différents flux auxquels sont soumis les satellites sont divers : le flux solaire intense de près de  $1\,400\text{ W/m}^2$ , l'albédo terrestre<sup>6</sup> d'environ  $500\text{ W/m}^2$  dans le visible et de  $200\text{ W/m}^2$  dans l'infrarouge. Par ailleurs, il n'y a pas de convection car il n'y a pas d'air, seulement de la conduction et du rayonnement.

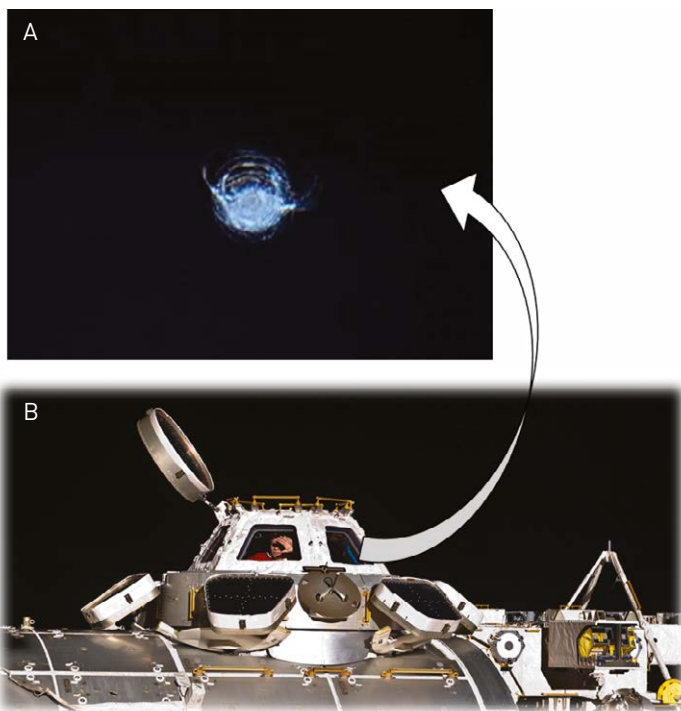
5. Rayons gamma : rayonnements électromagnétiques très pénétrants émis lors de transitions nucléaires.

6. Albédo terrestre : fraction de l'énergie de rayonnement incidente (envoyée par le Soleil) qui est réfléchi ou diffusée par la Terre.

**Figure 8**

A) Les micrométéorites sont un danger pour les instruments envoyés dans l'espace. On voit ici un impact de 7 mm dû à une écaille de peinture sur un hublot de l'ISS (Station spatiale internationale). Cela a failli casser le hublot, bien qu'il soit épais de 4 cm ; B) la coupole de l'ISS possède des volets très robustes pour prévenir les problèmes dus aux impacts avec des micrométéorites.

Source : NASA.



seul degré est suffisant pour le dérégler à cause de la dilatation thermique des matériaux, c'est-à-dire de leur changement de dimensions avec la température. Pour un matériau standard, une élévation d'un degré se traduit par une dilatation d'un micron au moins, ce qui est suffisant pour que la focalisation de votre instrument soit perdue.

Il y a donc une nécessité de trouver des techniques et des matériaux qui assurent le contrôle thermique de l'instrument optique. Il faut que malgré un environnement aussi agressif thermiquement, la température de l'instrument au centre du satellite reste maîtrisée, du dixième au millième degré, comme cela a été réalisé pour Gaia.

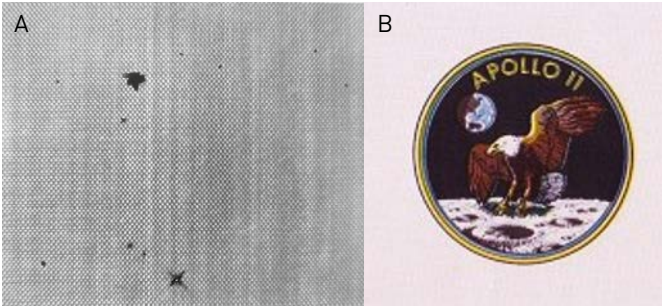
#### 1.4. Micrométéorites et oxygène atomique

Le quatrième élément hostile vient de la présence d'objets qui se promènent dans l'espace à proximité de la Terre – qui n'est en fait pas totalement vide. Ainsi, vers 300 km, c'est-à-dire dans la partie supérieure de l'atmosphère qui est totalement ionisée, il y a de l'oxygène atomique, qui résulte de la dissociation du dioxygène et est formé d'un unique atome d'oxygène. Il est chimiquement très réactif et va user très rapidement tous les matériaux.

On trouve aussi des micrométéorites. Certaines sont naturelles, ce sont par exemple des poussières de comètes. D'autres ne le sont pas, comme des écailles de peinture provenant d'un troisième étage de lanceur resté trop longtemps en orbite. Elles peuvent provoquer des impacts importants à cause de leur très grande vitesse (plusieurs km/s) comme sur les hublots de la Station spatiale internationale ISS (Figure 8A). Il est possible de s'en protéger par des écrans comme par exemple les volets pour la coupole de l'ISS (Figure 8B).

Les instruments optiques sont le plus souvent intégrés à l'intérieur du satellite pour les protéger de tous ces risques. Des revêtements plus ou moins résistants, comme des fibres de verre tissées (le matériau des combinaisons de cosmonaute), sont également utilisés (Figure 9).

Les satellites sont revêtus d'un tissu en fibres de verre



**Figure 9**

Les fibres de verre tissées (A) utilisées pour revêtir les satellites à basse altitude sont les mêmes que celles des combinaisons de cosmonaute, comme celles de la mission d'Apollo 11 [B : logo d'Apollo 11].

Source : NASA.



**Figure 10**

Le satellite Aeolus, qui doit voler à 330 km d'altitude, est revêtu de fibres de verre pour être protégé des micrométéorites et résister à l'abrasion de l'oxygène atomique. C'est pour cela qu'il est blanc, alors que la plupart des satellites sont revêtus d'un isolant thermique doré.

Source : ESA.

qui stoppe les micrométéorites ; celles-ci se subliment directement au contact de la fibre, qui encaisse le choc et évite qu'il ne se propage au reste de la structure (Figure 10).

### 1.5. La microgravité

Dernier aspect : dans l'espace, si le satellite ne manœuvre pas, il est en situation de microgravité ou apesanteur. En effet, un satellite est en chute libre, il tombe en permanence mais ne s'écrase pas parce que la Terre est ronde. On parle d'apesanteur, non pas qu'il y ait absence de gravité, mais parce que le satellite ne subit aucune accélération. Or, les phénomènes se produisent différemment en apesanteur. Par exemple, sur Terre, la flamme d'une bougie est bien

droite, mais dans l'espace, elle devient ronde et bleue (Figure 11).

En optique, on ne s'intéresse pas aux bougies mais aux télescopes... Le problème est que les télescopes sont fabriqués et réglés au sol où il y a de la gravité. Il faut donc prédire ce qui va se passer pour cet instrument quand il sera en microgravité, c'est-à-dire choisir des matériaux dont la déformation peut être modélisée de manière précise pour anticiper sa forme une fois dans l'espace.

Nous avons passé en revue les diverses agressions subies par des objets placés dans l'espace et identifié certaines manières de s'en prémunir. Il faut maintenant analyser une étape critique de la vie des satellites, leur lancement.



**Figure 11**

A) Une bougie sur Terre a une flamme droite, plus chaude à la base (couleur bleue) qu'au sommet (couleur orangée). C'est un effet de la gravité, les gaz chauds moins denses montant et les gaz froids plus denses alimentant la bougie par sa base ; B) une bougie dans l'espace, en microgravité, a une flamme sphérique et bleue (chaude).

## 2 Le lancement, une étape obligée

Adoptons, à des fins didactiques, la vision des lanceurs<sup>7</sup> du point de vue de la charge utile<sup>8</sup> et non de leurs fabricants.

### 2.1. La pression acoustique

À la fin du compte à rebours, c'est l'allumage du moteur principal (Figure 12). Le lancement a débuté de manière spectaculaire, mais que se passe-t-il pour la charge utile ? À ce moment dans la coiffe<sup>9</sup>, on est complètement assourdi par les vibrations sonores du moteur propagées par l'air et la structure du lanceur. Il faut résister mécaniquement à cette pression sonore. Pour cela, les

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

8. 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.

9. Coiffe : partie supérieure du lanceur abritant la charge utile.

ingénieurs essaient de minimiser les surfaces exposées comme un navigateur réduit la voile dans la tempête.

Les charges utiles doivent donc être les plus compactes possibles et éviter toute voile ou tout grand mur, qui vibrerait comme un haut-parleur sous la pression acoustique et pourrait céder.

### 2.2. L'accélération

La mission du lanceur consiste à accélérer la charge utile de quelques mètres par seconde à près de huit kilomètres par seconde. Cela se fait au moyen d'une poussée continue de 3 à 4 g<sup>10</sup> mais également au prix de quelques vibrations. Il faut donc que le télescope soit assez solide mécaniquement pour résister à trois ou quatre fois son poids à cause de l'accélération. C'est le même phénomène quand les astronautes sont écrasés sur leur siège au lancement. Il faut aussi

10. g (comme gravité) : unité d'accélération correspondant environ à l'accélération de la pesanteur à la surface de la Terre.

Figure 12

L'allumage du moteur principal est une des étapes du lancement de Sentinelle 1, à Kourou, par un Soyouz. Sentinelle 1 est un des satellites du programme Copernicus de l'ESA et de l'Union Européenne. Cette étape engendre des contraintes mécaniques importantes pour la charge utile via les ondes sonores générées par le moteur et propagées par l'air et la structure du lanceur.

Source : ESA







Figure 13

Phase d'accélération lors du lancement du satellite Sentinelle 1. L'accélération provoque des vibrations auxquelles le télescope embarqué doit être capable de résister.

Source : ESA.

que le télescope résiste aux vibrations qui peuvent générer des efforts encore plus importants sur l'ensemble de sa structure. Ces efforts sont tels que l'on doit tester les instruments optiques au sol en les secouant pour prouver leur intégrité lors du lancement (Figure 13).

### 2.3. Les chocs

Il ne viendrait à personne l'idée de taper au marteau sur un instrument optique. C'est pourtant ce que font les lanceurs, car ils ont besoin d'évacuer plusieurs éléments au fur et à mesure de leur ascension. Une fois à court de carburant,

le premier étage devenu inutile est détaché, puis la coiffe, le deuxième étage, et enfin le satellite, sont séparés du troisième étage pour être mis en orbite. Ces séparations se font principalement au moyen de boulons explosifs qui cisailent mécaniquement le lanceur afin d'assurer une parfaite séparation.

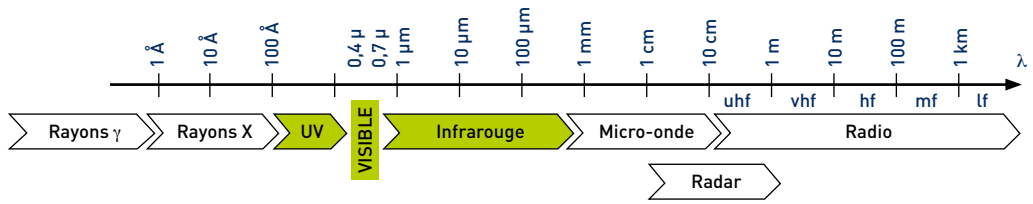
Du côté de la charge utile, cela revient à subir quatre chocs successifs. Le télescope doit pouvoir résister à chacun de ces « coups de marteau », qui peuvent atteindre cent fois l'accélération de la pesanteur (g), c'est-à-dire qu'il doit résister à cent fois son poids à chaque choc (Figure 14).



Figure 14

Séparation de la coiffe lors du lancement du satellite Sentinelle 1. Cette étape est un nouveau défi pour les concepteurs de télescopes car ces instruments doivent être capables de supporter les chocs engendrés.

Source : ESA.



**Figure 15**

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. Le domaine visible est situé entre le domaine ultra-violet (UV) et le domaine infrarouge.

### 3 Choisir le bon matériau

Maintenant que nous connaissons toutes les contraintes associées au milieu spatial et au lancement, intéressons-nous aux propriétés fondamentales d'un télescope optique afin d'identifier le bon matériau.

#### 3.1. Un bon télescope

Qu'est-ce qu'un télescope, et en particulier un bon télescope ? Un télescope est un dispositif conçu pour collecter des photons dont les longueurs d'onde varient entre l'ultra-violet et l'infrarouge (Figure 15).

Le télescope est un collecteur de photons. Les photons sont caractérisés par leur longueur d'onde. On s'intéresse à des photons ayant des longueurs d'onde comprises entre cent microns (soit un peu plus petit que le diamètre d'un cheveu) et cent nanomètres (soit un millième de cheveu). Les photons peuvent

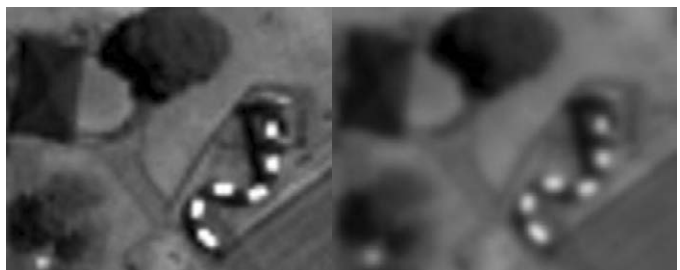
être traités, selon les situations, comme des particules dotées de propriétés élémentaires, ou comme une onde caractérisant des propriétés collectives. Au moment de la collecte par le télescope, ils réagissent comme une onde. Chaque photon doit alors avoir un chemin exactement identique aux autres, afin d'éviter qu'ils n'interfèrent de manière négative en supprimant une partie importante de signal se traduisant à nouveau par une image floue (Figure 16).

Pour cela, il faut garantir que le chemin parcouru par chaque photon soit identique à un dixième de sa longueur d'onde près. Ainsi, pour un télescope en infrarouge, il faut que les surfaces optiques soient ajustées à 10 microns près. Dans le visible et dans l'ultra-violet, cela descend à 10 nanomètres près. Il faut donc s'assurer que les surfaces optiques, qui sont des collecteurs de 1 ou 1,50 mètres, voire 3,50 mètres de diamètre, soient maîtrisées

**Figure 16**

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

Source : Airbus.



à la dizaine de nanomètre ou de micron près !

Deuxième contrainte : nous nous intéressons à des télescopes spatiaux qui doivent donc pouvoir être lancés. Ainsi, nous devons rechercher des solutions les plus légères possibles mais suffisamment rigides pour pouvoir résister aux conditions de lancement.

### 3.2. Le carbure de silicium, un matériau optimum pour un télescope spatial

Avec tous les éléments de l'équation désormais en main, plusieurs matériaux ont été comparés et sélectionnés pour faire la structure et les miroirs des télescopes spatiaux. Ce choix dépend des caractéristiques intrinsèques de ces matériaux (**Tableau**) mais aussi de leur capacité à être fabriqués à des coûts et dans des délais raisonnables.

L'aluminium est très léger mais peu rigide ; il est néanmoins

utilisé pour fabriquer certains miroirs de qualité optique moyenne compatible de l'infrarouge notamment.

Le béryllium est un excellent matériau pour faire des miroirs à la fois légers et résistants, et présentant des performances thermiques remarquables, mais il est difficile à fabriquer (toxique) et très onéreux. Il a néanmoins été choisi par la NASA pour la réalisation du James Webb Space Telescope (**Figure 17**).

Une céramique, le carbure de silicium (SiC) et des verres à très faible dilatation thermique (ULE, « *Ultra Low Expansion glass* ») apparaissent également comme des candidats intéressants.

Les matériaux retenus doivent être très résistants mais aussi légers. On recherche donc des coefficients indiquant la rigidité et la densité. L'objectif est de supporter le lancement avec le moins de matière possible. Il faut donc s'intéresser au rapport rigidité/densité (voir le **Tableau**).

**Tableau**

Données de comparaison entre plusieurs matériaux : aluminium, béryllium, carbure de silicium (SiC), verre à très faible dilatation thermique ULE (« *ultra low expansion glass* »).

Propriété	Unités	Aluminium	Beryllium	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

Figure 17

Partie du James Webb Space Telescope. Les segments de miroir sont fabriqués en béryllium (ici recouverts d'or), utilisé pour son bon rapport rigidité/densité et ses propriétés thermiques.

Source : NASA.



Le carbure de silicium est excellent de ce point de vue : il permet de résister au lancement avec des miroirs jusqu'à trois fois plus légers qu'un miroir équivalent en verre. Par exemple, un miroir de 1,50 mètres de diamètre en carbure de silicium pèse 40 kg, mais en pèserait 110 kg s'il était en verre ! Cette propriété a été exploitée dans le cadre de la mission Hershell de l'ESA avec la fabrication d'un miroir de 3,5 m de diamètre en carbure de silicium (Figure 18).

Le deuxième élément essentiel est le contrôle thermique des instruments : il existe deux solutions pour réguler thermiquement un instrument. Soit il

faut totalement isoler l'instrument de l'environnement, soit il faut le contrôler activement, c'est-à-dire réguler sa température. Cette régulation est d'autant plus efficace que le matériau conduit la chaleur. Il faut en effet éviter qu'il y ait un point chaud dans l'instrument, qui conduirait à une déformation locale et donc à une image floue. Or, une mauvaise conduction thermique empêcherait de drainer la chaleur du point chaud pour rééquilibrer la température de l'instrument. Le carbure de silicium et le béryllium présentent une excellente conduction thermique qui va permettre de simplifier le contrôle thermique et donc

Figure 18

Miroir Hershell en carbure de silicium de 3,5 m de diamètre.

Source : ESA.



réduire la complexité de l'instrument. De plus, le carbure de silicium possède un coefficient de dilatation relativement faible, ce qui permet de tolérer une excursion en température plus importante et donc une régulation thermique plus simple.

La troisième propriété intéressante du carbure de silicium, c'est qu'il est chimiquement inerte. Après sa cuisson à plus de 1 600 °C, le carbure de silicium n'absorbe plus ni l'humidité ni les gaz. Étant formé de silice et de carbone, sa composition est simple et extrêmement résistante aux radiations. Le carbure de silicium ne change

pas de propriétés en orbite : il ne dégage pas, ne contamine pas et ne se déforme pas.

Enfin, la diversité de pièces que l'on sait réaliser grâce aux propriétés des céramiques est spectaculaire. La céramique est un peu comme l'argile du potier, c'est une matière très malléable, facilement usinable avant cuisson et extrêmement dure après cuisson. Cette malléabilité avant cuisson est utilisée pour réaliser des pièces élémentaires complexes, assemblées ensuite en structure pouvant atteindre des tailles de plusieurs mètres comme dans l'exemple du télescope Gaïa pour l'ESA (*Figure 19*).

## Le carbure de silicium confirme ses qualités exceptionnelles comme matériau optique pour les applications spatiales

A-t-on fait un bon travail d'ingénieur ? A-t-on élaboré une solution robuste, élégante, efficace et répondant à des performances optiques extrêmes ? La réponse est oui, comme le montre l'exemple ci-dessous.

Comparons deux télescopes ayant le même facteur de mérite<sup>12</sup>, c'est-à-dire avec la même taille de miroir principal, et donc permettant d'obtenir des images de même résolution et de même rapport signal sur bruit (*Figure 20*). La seule différence entre ces deux instruments est l'utilisation d'un côté d'une structure et de



*Figure 19*

Série de pièces en carbure de silicium utilisées pour Gaïa, instrument qui est comme un immense lego, constitué d'un tore<sup>11</sup> de quatre mètres de diamètre réalisé en dizaine de tronçons élémentaires.

Source : Airbus Defense & Space.

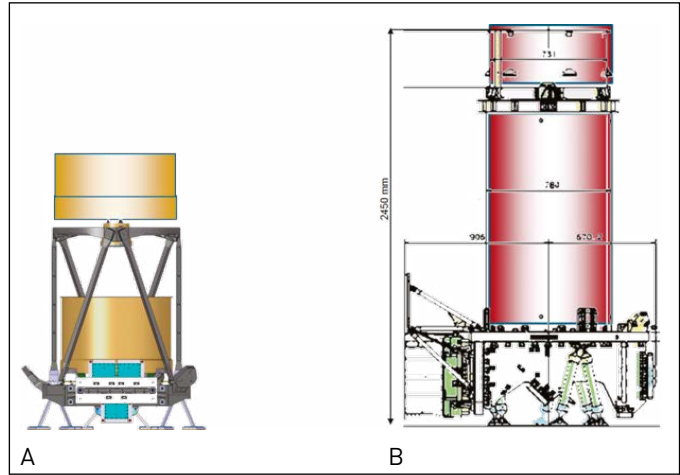
11. Tore : solide ayant la forme d'un tube refermé sur lui-même, comme une bouée ou un donut.

12. Facteur de mérite : grandeur servant à caractériser les performances d'un appareil, pour les comparer à celles d'un autre.

Figure 20

Comparaison entre deux télescopes fournissant la même qualité d'image, mais ayant des propriétés physiques différentes : A) avec utilisation du carbure de silicium, B) avec un miroir en verre et un composite contenant des fibres de carbone.

Source : A) Airbus Defense & Space ; B) CNES.



miroirs en carbure de silicium (**Figure 20A**), et de l'autre d'un miroir en verre et de panneaux en CFRP (« *carbon fiber reinforced polymer* », composite à base de fibre de carbone, **Figure 20B**). Le télescope en carbure de silicium est visiblement beaucoup plus compact, mais il est aussi beaucoup moins lourd (d'un facteur deux typiquement). Il sera donc moins cher à lancer, pourra être embarqué sur un petit satellite, qui sera d'autant plus agile que l'instrument sera compact.