



# Opinions Libres

le blog d'Olivier Ezratty

## De l'astronomie à l'entrepreneuriat : télescopes spatiaux dans l'infrarouge

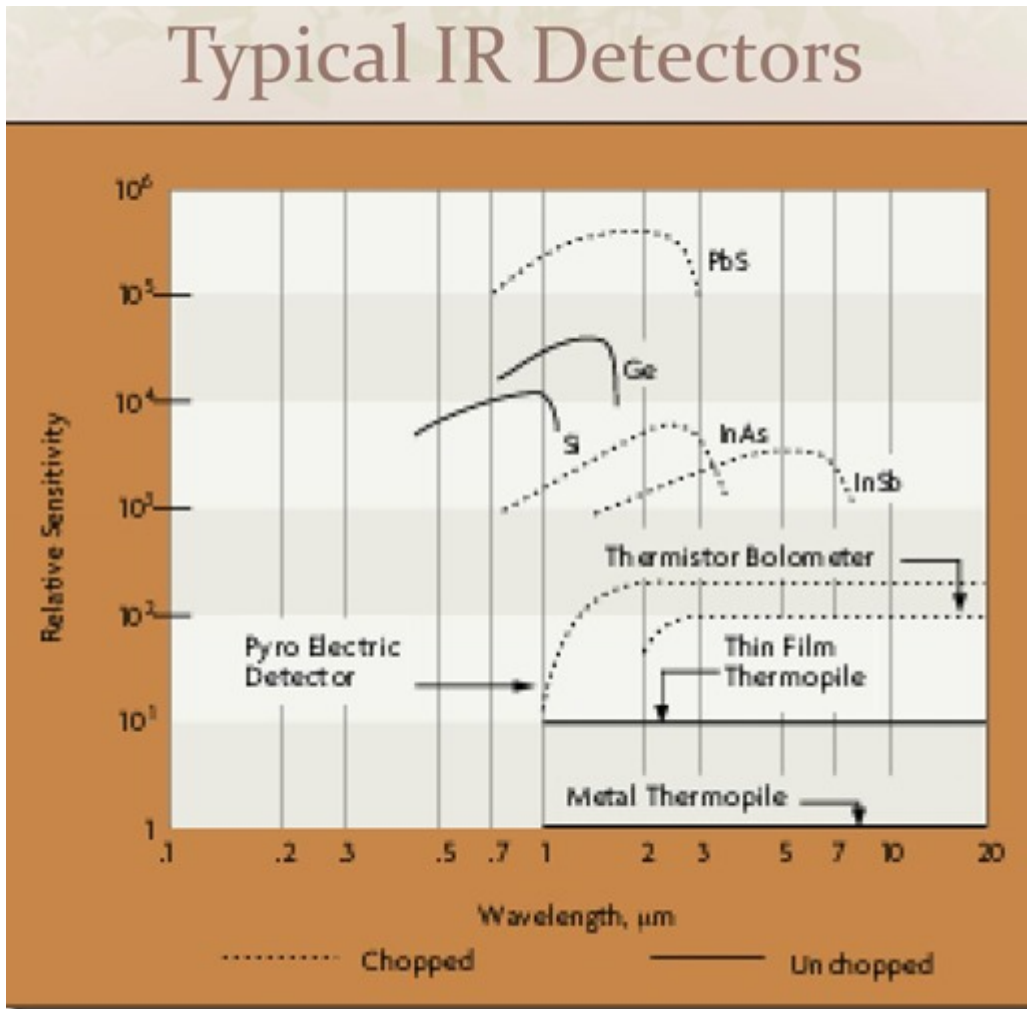
Nous poursuivons ici une longue série estivale de découvertes scientifico-technico-entrepreneuriales sur l'astronomie **démarrée mi juin**. J'y épluche en particulier des techniques et des instruments qui permettent d'analyser la composition de l'Univers, au-delà de notre système solaire.

Après les grands **télescopes spatiaux opérant dans le visible**, nous passons ici aux télescopes spatiaux opérant principalement dans l'infrarouge avec **WISE, Spitzer, Herschel, JWST, Euclid, WFIRST** et le cas particulier du télescope-avion **SOFIA** de la NASA. Ils sont triés comme d'habitude par ordre de mise en service. Je vais surtout faire la part belle au **JWST (James Webb Space Telescope)** qui est un objet fascinant par sa richesse, sa complexité, son déploiement multi-étapes et par ce que les astronomes pourront en tirer pour remonter encore plus loin dans l'histoire de l'Univers. Nous verrons déci-delà quelques contributions françaises à ces divers instruments scientifiques qui sont chacun uniques en leur genre.

Pour mémoire et en reprise des épisodes précédents, l'infrarouge est mieux capté dans l'espace que sur Terre, notamment l'infrarouge moyen et l'infrarouge lointain. Ils permettent d'observer des objets très anciens et très éloignés dans l'Univers. Mais pas que. Ils servent aussi à détecter les nuages de poussière des galaxies ainsi que les exoplanètes.

On sépare généralement les instruments et bandes de fréquences de l'infrarouge observées en trois catégories :

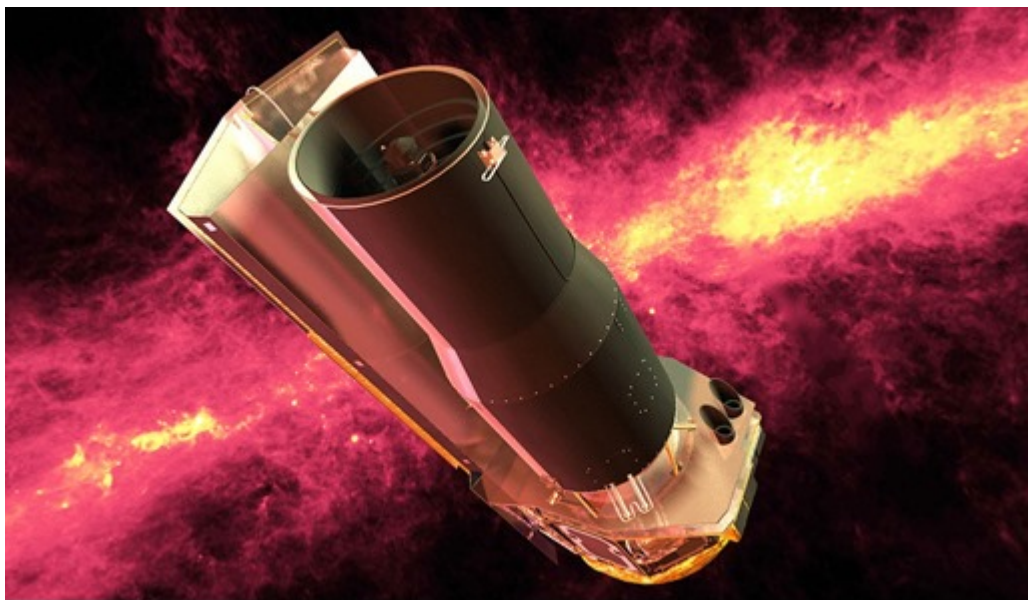
- Le **proche infrarouge**, situé dans la continuité du rouge visible, qui permet de détecter la poussière chauffée par les étoiles, les étoiles rouges géantes, les étoiles rouges froides, qui sont des étoiles petites et moins chaudes que le Soleil, ainsi que les étoiles en formation et les jeunes étoiles. Les capteurs sont des CCD relativement classiques et au silicium.
- L'**infrarouge moyen** explore les planètes, les comètes, les astéroïdes, la poussière chaude, les disques protoplanétaires, les galaxies très distantes ("high redshift"), les molécules complexes (les hydrocarbures aromatiques dits "PAH", comme pour l'UV). Les capteurs sont des CCD, généralement au tellure de mercure-cadmium (HgCdTe), en arséniure d'indium-gallium (InGaAs), en plus rarement à l'arséniure de silicium (SiAs) ou à l'antimoine d'indium (InSb).
- L'**infrarouge lointain** analyse la poussière froide, les régions centrales des galaxies, les nuages moléculaires froids, les galaxies avec un noyau actif (AGN) et les galaxies en spirale. Les capteurs sont des bolomètres, des sortes de thermomètres associés à un amplificateur analogique. Des capteurs avec du silicium dopé au germanium sont également utilisés.



Comme pour les deux parties précédentes, les télescopes spatiaux que nous allons examiner ici sont classés par date de mise en service. Tous ces télescopes étaient dotés de nombreux superlatifs au moment de leur lancement, et très attendus par les astronomes et les astrophysiciens.

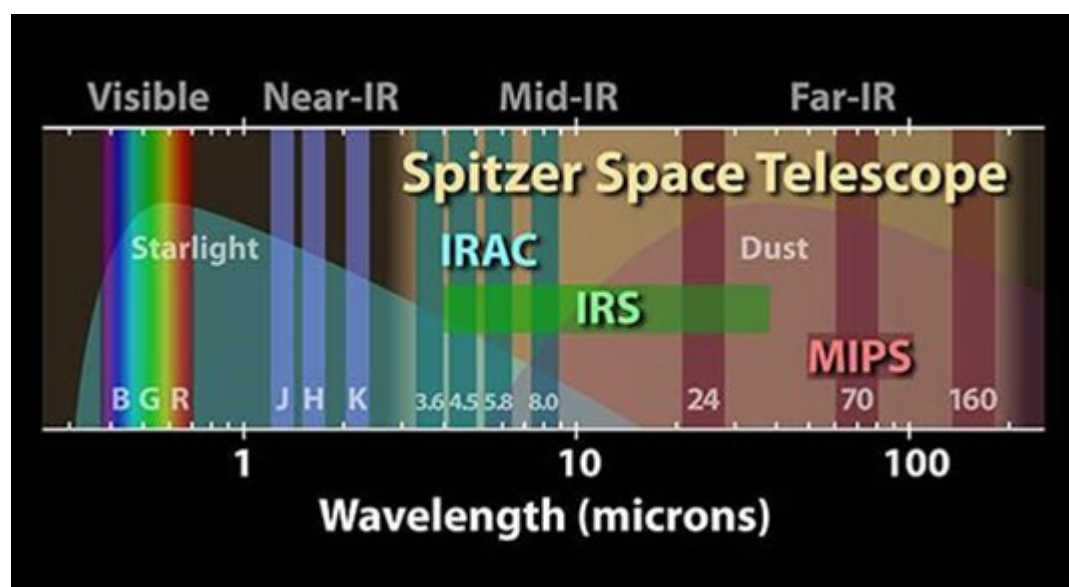
### Spitzer (2003-2020)

Spitzer est un télescope opérant dans l'infrarouge qui sert à l'étude d'exoplanètes. Il sert à détecter les exoplanètes puis à analyser leur atmosphère. Il couvre aussi les disques planétaires et les jeunes étoiles, l'étude du plan de la Voie Lactée et de son centre, puis celle de galaxies et d'amas de galaxies très éloignés. D'une manière générale, il capte les objets les plus froids et obscurs de l'Univers.

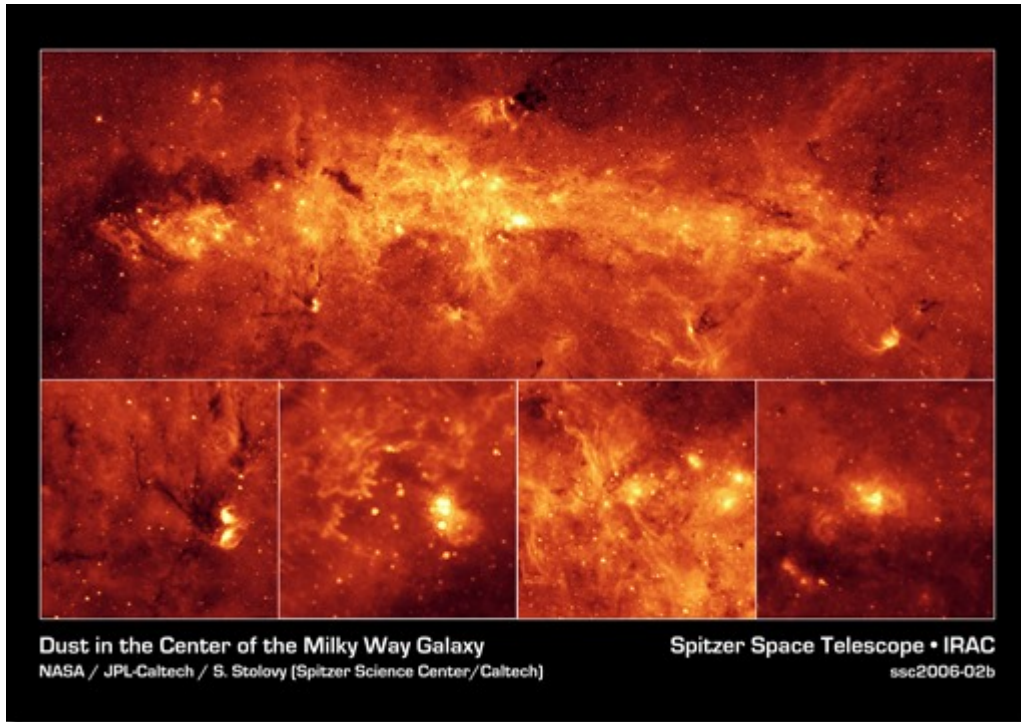


Le projet a été initié par la NASA en 1984 et le télescope lancé en 2003. Il succède à d'autres télescopes opérant dans l'infrarouge : **IRAS** (1983) et **ISO** (1995) et bénéficie notamment des améliorations en sensibilité et résolution des capteurs infrarouges. Le miroir principal du télescope est de taille modeste avec un diamètre de 85 cm. La partie purement optique du télescope ne pèse que 50 kg. Le vaisseau fait 4 m de long pour 865 kg. Il est situé en orbite héliocentrique, en retard sur la Terre dont il s'éloigne progressivement et qu'il rejoindra d'ailleurs d'ici plusieurs années.

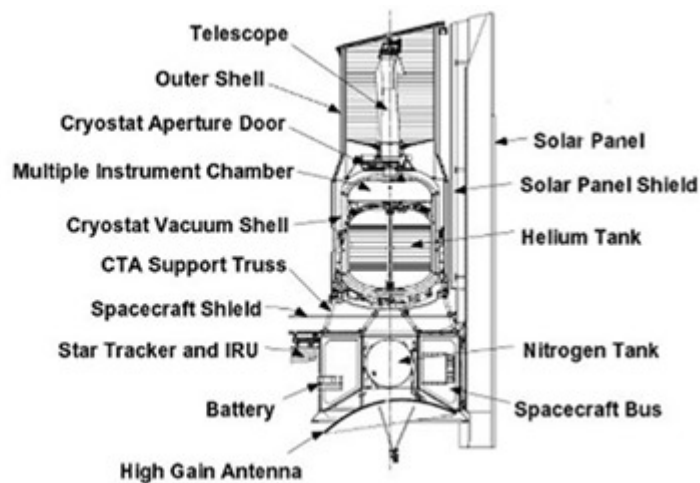
Les instruments de Spitzer comprennent l'**IRAC** (**I**nfra**R**ed **A**rray **C**amera), un photomètre imageur en proche et moyen infrarouge (de 3 à 8 microns) équipé de quatre capteurs CCD de 256×256 pixels, l'**IRS** (**I**nfra**R**ed **S**pectrograph), un spectroscopie dans l'infrarouge moyen (5 à 40 microns) et le **MIPS** (**M**ultiband **I**maging **P**hotometer for **S**pitzer), un spectrophotomètre dans l'infrarouge lointain (50 à 160 microns) doté de trois capteurs de respectivement 128×128, 32×32 et 2×20 pixels.



Les belles images générées par Spitzer comme le centre de la Voie lactée ci-dessous correspondent à l'accumulation d'un grand nombre d'images à basse résolution par ces différents capteurs. Les différents spectros de Spitzer permettent notamment la détection de l'hydrogène moléculaire, de silicates, de glace d'eau et de CO<sub>2</sub>, de méthanol, de méthane et de silicates amorphes et cristallins.



Le télescope est refroidi de manière passive à 30 K (30° au-dessus du zéro absolu), notamment grâce à une protection vis à vis du Soleil comprenant un cache et des panneaux solaires. Ses instruments sont refroidis par un système cryogénique avec de l'hélium liquide dont la recharge initiale était de 50 kg et pour atteindre une température de 5 K et de 1,5 K pour les capteurs.



Celui-ci a été épuisé en 2009, date à partir de laquelle il s'est mis à fonctionner sans réfrigération, essentiellement dans le proche infrarouge. Dans la pratique, les instruments sont enfermés dans un gros container faisant office de réfrigérateur (*ci-dessus*).

### Herschel (2009 – 2013)

Herschel est un télescope spatial de l'agence européenne ESA et le plus grand qui ait été lancé qui soit spécialisé dans l'infrarouge et en particulier dans l'infrarouge lointain. Il tire son nom du savant allemand qui avait découvert ces rayons en 1800 avec un prisme et un thermomètre. Il avait observé que ce dernier montait en température après le rouge dans l'arc en ciel généré par le prisme. Il en déduit l'existence de rayons invisibles après le rouge dans le spectre électromagnétique.

Dans la pratique, ils proviennent notamment de nuages de poussières chaudes et d'objets célestes froids. Ils

correspondent également aux objets qui s'éloignent avec fort décalage vers le rouge ("redshift") aussi appelées les galaxies "high-z", du fait de l'expansion de l'Univers dont on cherche toujours à mieux comprendre la dynamique.

Comme Spitzer, le télescope Herschel couvre l'infrarouge lointain. Il le dépasse en allant jusqu'aux ondes pré-millimétriques, atteignant ainsi 670 microns de longueur d'onde, qui correspondent au début des micro-ondes. Nous avons pu les traiter au sujet des radiotélescopes terrestres fonctionnant dans les ondes millimétriques (**Nobeyama** au Japon, l'**IRAM 30 Meter Telescope** français installé en Espagne, le **James Clerk Maxwell Telescope** américain installé à Mauna Kea, le **South Pole Telescope** ou encore, le **Large Millimeter Telescope** installé au Mexique).



Son miroir primaire circulaire de 3,5 m ne pèse que 315 Kg. Sa masse a été fabriquée en carbure de silicium fritté (SiC), une céramique technique produite par la société française **Boostec**, dont c'est la spécialité. La société basée près de Tarbes dans les Hautes-Pyrénées a été créée en 1999 et fait partie du groupe français Mersen depuis 2010. C'est un partenaire industriel de l'activité satellite d'Airbus. Boostec a aussi réalisé des miroirs pour Gaia (vu dans la **partie précédente**), pour le spectrographe NIRSpec du JWST (vu plus loin) ainsi que pour la sonde Rosetta.

Le carbure de silicium fritté est très stable thermiquement et très rigide ce qui permet aux miroirs de fonctionner quelles que soient les conditions thermiques. La technique de Boostec consiste à fabriquer des pièces faisant au maximum 1 x 1,5 m et de les assembler ensuite par soudure utilisant un alliage de silicium. Le miroir d'Herschel est ainsi le résultat de l'assemblage de 12 pièces en SiC (cf illustration *ci-dessous* provenant de Boostec). Le miroir a été poli en Finlande et ensuite revêtu d'une couche réfléchissante d'aluminium protégée par de la silice en Espagne. Boostec a aussi réalisé d'un seul tenant le miroir secondaire du télescope.



Le télescope a une masse totale de 3402 Kg. Il a été lancé par une fusée Ariane 5 et positionné sur le point de Lagrange L2. Il a fallu attendre trois mois après son lancement pour qu'il soit refroidi à la bonne température pour fonctionner. Il a été lancé dans la même coiffe d'Ariane que Planck, un autre télescope spatial, spécialisé dans les ondes radio pour l'analyse du bruit cosmique diffus (CMB).

Comme il couvre à peu près les mêmes longueurs d'onde que Spitzer, ses objectifs scientifiques sont voisins. Il sert à étudier l'énergie radiante des nuages moléculaires, les galaxies, à analyser le processus de formation des étoiles, notamment à partir des parties les plus froides et poussiéreuses de l'Univers et à évaluer la présence d'eau et d'autres molécules pouvant être à l'origine de la vie.

Il comprend trois grands instruments :

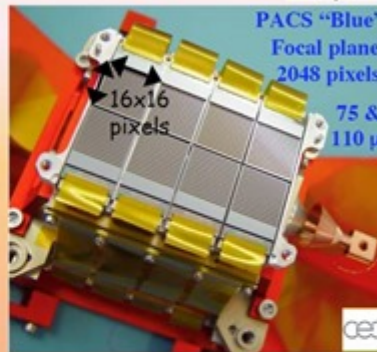
- **PACS** (Photodetector Array Camera and Spectrometer) est une caméra de matrice de bolomètres de  $64 \times 32$  et  $32 \times 16$  pixels servant à cartographier l'émission infrarouge des grains de poussière. Elle couvre l'infrarouge lointain de 55 à 210 microns, découpé en deux bandes de 60-85 microns ou 85-130 microns et 130-210 microns. La résolution spatiale du spectromètre est moyenne, comprise entre 1000 et 5000 raies spectrales selon la longueur d'onde.



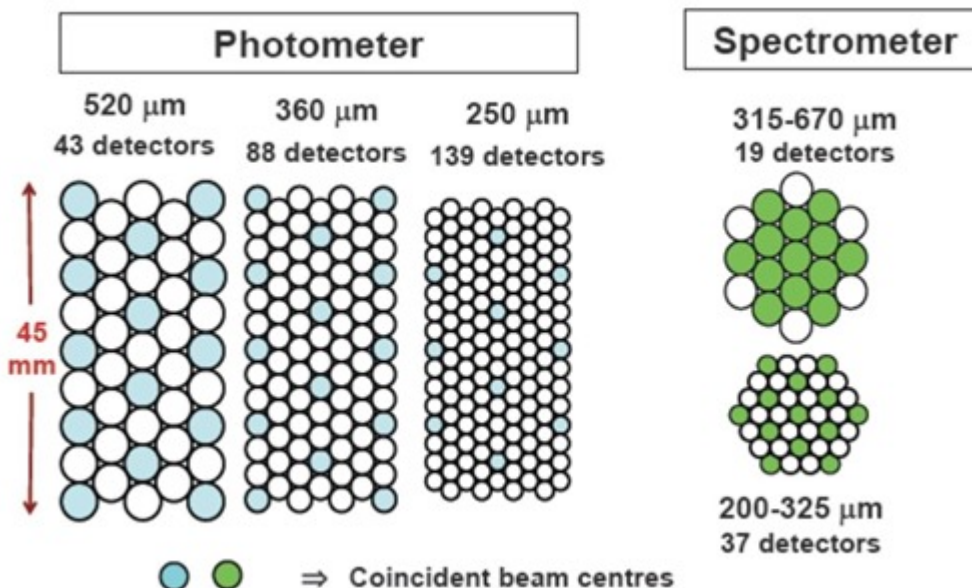
## Herschel imaging instruments



- **PACS - Photodetector Array Camera and Spectrometer**
  - PI: Albrecht Poglitsch, MPE, Garching, Germany
  - imaging photometry in 2 bands simultaneously: 75 or 110  $\mu\text{m}$  (blue) and 170  $\mu\text{m}$  (red)
  - 2 filled bolometer arrays ( $64 \times 32$  and  $32 \times 16$  pixels) --> full beam sampling over  $3.5' \times 1.75'$  field of view
  - Angular resolution:  $\sim 5''$ ,  $8''$ ,  $13''$  (HPBW)
  - Expected sensitivity:  $\sim 3\text{-}4$  mJy/beam ( $5\sigma$ , 1hr)
  - Integral-field line spectroscopy from 57 to 210  $\mu\text{m}$
- **SPIRE - Spectral and Photometric Imaging Receiver**
  - PI: Matt Griffin, Cardiff University, UK
  - 3-band imaging bolometer array: 250, 350, 500  $\mu\text{m}$  (simultaneous)
  - $8' \times 4'$  field of view ( $2F\lambda$  feedhorns - cf. SCUBA)
  - Angular resolution:  $18''$ ,  $25''$ ,  $36''$  (HPBW)
  - Expected sensitivity:  $\sim 2\text{-}8$  mJy/beam ( $5\sigma$ , 1hr)
  - Spectro-imaging FTS from 200 to 670  $\mu\text{m}$



- **SPIRE** (Spectral and Photometric Imaging Receiver) couvre les ondes infrarouges sub-millimétriques de 200 à 670 microns sur trois bandes et générant respectivement 139, 88 et 43 pixels (cf les 43 pixels *ci-dessus* et l'arrangement des instruments *ci-dessous*). Les images sont la résultante de transformées de Fourier inverses, exploitant les données de chaque bolomètre radial, originaire d'Allemagne. La résolution spectrale est de 20 à 1200 raies (elle diminue avec l'augmentation de la longueur d'onde).



- **HIFI** (High resolution heterodyne spectrometer) qui couvre l'infrarouge lointain entre 157 et 625 microns doté d'une très grande résolution spectrale de 10 millions de raies. Il permet l'étude de la chimie de l'Univers.

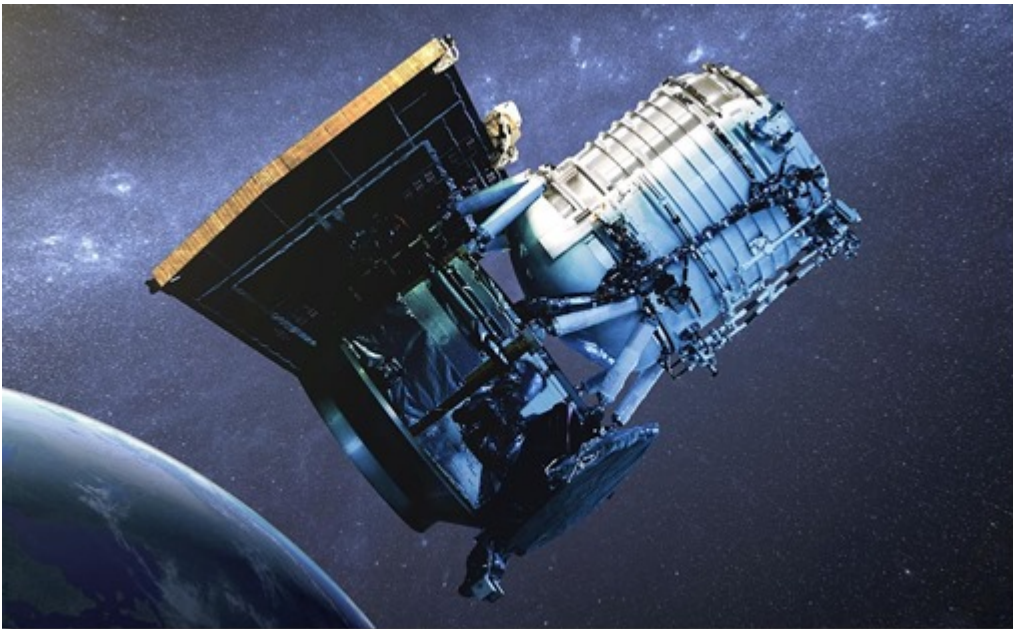
La température nominale du télescope est de 70K et les capteurs des instruments sont refroidis à 2K (-271°C). Le réservoir d'hélium liquide associé est conséquent, avec ses 2300 litres de capacité !

La durée de vie opérationnelle de ce télescope était, comme pour les autres engins de ce type, conditionnée par son réservoir de réfrigérant, indispensable pour le fonctionnement des instruments dans l'infrarouge moyen et lointain. Spécifié pour durer 3,5 ans, il les a dépassés de peu pour rester opérationnel un peu plus de quatre ans.

### **WISE** (2010 – 2013)

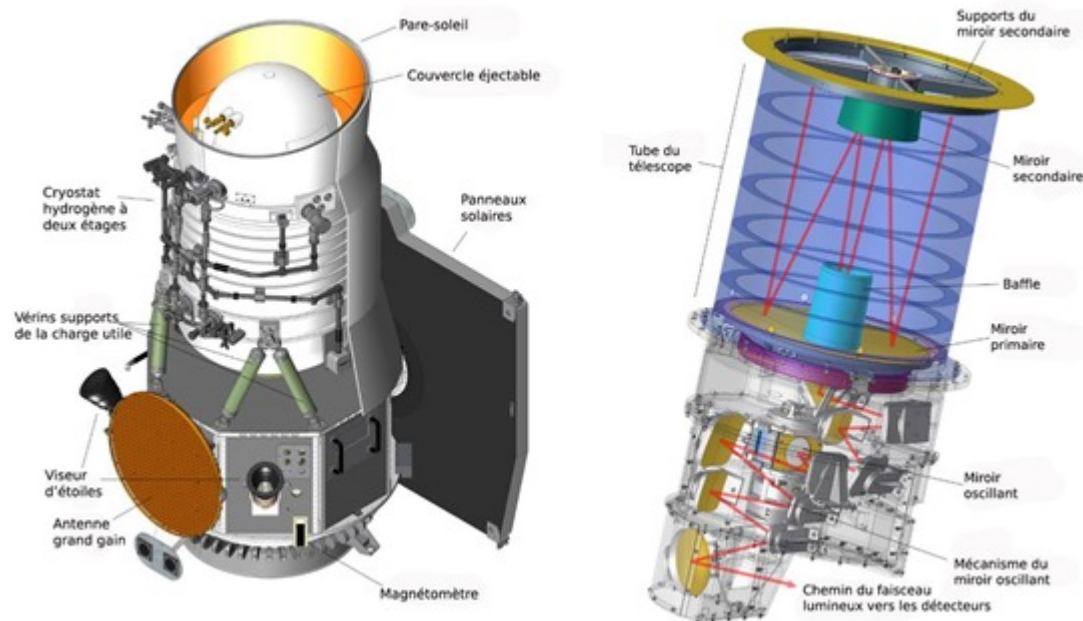
WISE (Wide-Field Infrared Survey Explorer) est un télescope spatial de la NASA à champ large dans l'infrarouge dédié notamment à la recherche d'astéroïdes ("near earth objects") et en particulier, ceux qui sont susceptibles de frôler la Terre. Il recherchait aussi les étoiles de faible luminosité proches du système solaire ainsi que les étoiles de la Voie Lactée non observables dans le visible, cachées par les nuages interstellaires, permettant de comprendre comment se forment les étoiles de masse élevée. Les autres champs de recherche comprenaient la recherche de galaxies éloignées, de leur formation et évolution, l'émission d'infrarouge lointain par les jets associés aux trous noirs, la composition chimique des planètes, comètes et lunes dans le système solaire.

Sa mission initiale qui devait durer moins d'un an lui a permis de découvrir 21 comètes, 34 000 astéroïdes et 135 géocroiseurs, qui sont des astéroïdes de grande taille. Placé en hibernation après cette mission en février 2011, il a été réactivé en 2013 pour poursuivre sa recherche d'astéroïdes, activité qui se poursuivait en 2017, grâce à deux de ses capteurs qui n'ont pas besoin du refroidissement maximum pour fonctionner.



Le satellite fait 2,85 x 2 x 1,73 mètres et est alimenté par ses panneaux solaires qui lui fournissent 550 W lorsqu'il n'est pas dans la nuit. Il est positionné sur une orbite héliosynchrone à 525 km d'altitude et qui dure 95 minutes. Ses transmissions de données passent par la bande Ku, la même qui est utilisé en TV numérique par les satellites géostationnaires d'Eutelsat ou SES-Astra. Elles passent par l'intermédiaire des satellites géostationnaires TDRSS.

Le miroir principal du télescope fait seulement 40 cm. Les instruments fonctionnent dans l'infrarouge moyen sur les longueurs d'ondes de 3, 5, 12 et 22 microns et sont dotés de capteurs HgCdTe (tellurure de mercure-cadmium) et SiAs (arséniure de silicium) de 1Kx1K pixels chacun, totalisant 4 millions de pixels. Ils sont réfrigérés par un système cryogénique utilisant 16 kg d'hydrogène à l'état solide (en fait, associé à une mousse d'aluminium, *source*) en lieu et place de l'habituel hélium liquide, pour descendre jusqu'à 12K pour la longueur d'onde la plus grande, sachant que l'ensemble du télescope est à -83°C.

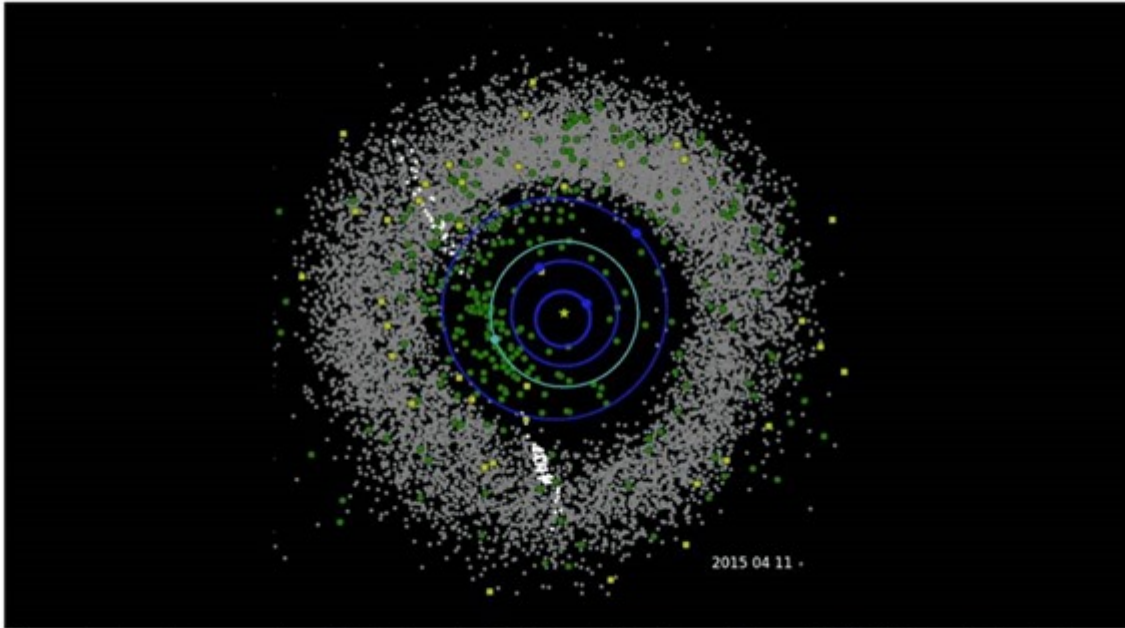


Pour couvrir le ciel avec un champ assez grand de 47 minutes d'arc, il a fallu prendre 1,5 millions de photos avec des temps de pose de 11 secondes. La cartographie du ciel est exhaustive avec ce télescope tandis que son homologue Spitzer ne couvre que des cibles précises avec son champ de visée étroit.

La mission actuelle de WISE est dénommée **NEOWISE**. Elle vise à détecter de nouveaux nouveaux astéroïdes ou de nouvelles comètes. Pour obtenir un refroidissement passif optimal de 75K, le télescope est pointé vers le zénith. Depuis 2013, elle a permis la découverte de 97 nouveaux objets dont 28 NEOs, 64 astéroïdes et cinq comètes (*source* de la cartographie *ci-dessous*). Sur les trois dernières années après sa remise en route, WISE a capté 7,7 million d'images.



## NASA's Asteroid-Hunting Spacecraft a Discovery Machine



This movie shows the progression of NASA's Near-Earth Object Wide-field Survey Explorer (NEOWISE) investigation for the mission's first three years following its restart in December 2013. Image Credit: NASA/JPL-Caltech/PSI

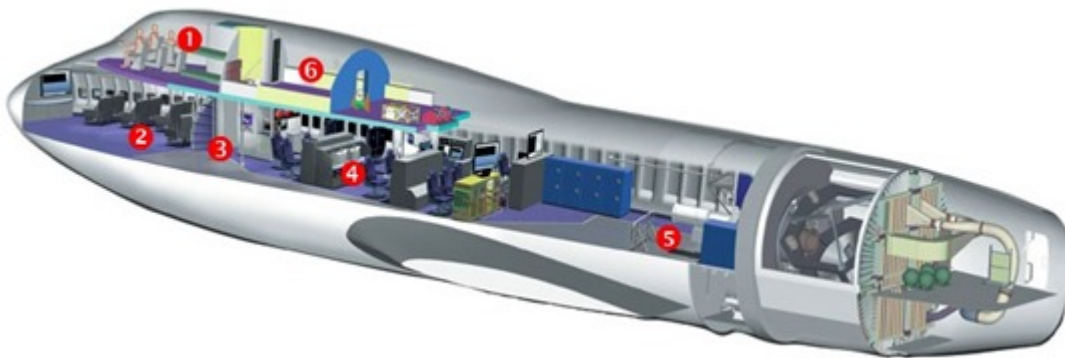
Le télescope a aussi permis la découverte de plusieurs étoiles naines brunes proches du Soleil notamment **WISE 0855–0714**, **WISE 1049-5319** ainsi que l'étoile de **Scholz** et en 2015, de **WISE J224607.57-052635.0**, la galaxie la plus lumineuse connue à ce jour, située à 12,5 milliards d'années lumière ([source](#)). A cette distance, on n'en détecte que quelques pixels, mais surtout une composition spectrale infrarouge détaillée.

### **SOFIA** (2010-2030)

SOFIA est un télescope unique en son genre de la NASA qui est installé dans un ancien Boeing 747SP de la PanAm modifié. C'est un programme commun entre les USA et l'Allemagne. Il est opérationnel environ 900 heures par an et vole à 12-14 km d'altitude, soit un peu plus haut que les 747 commerciaux qui volent aux alentours de 11-12 km. Plus l'altitude est élevée, moins l'atmosphère, faiblement dense à cette altitude, interfère avec les observations.

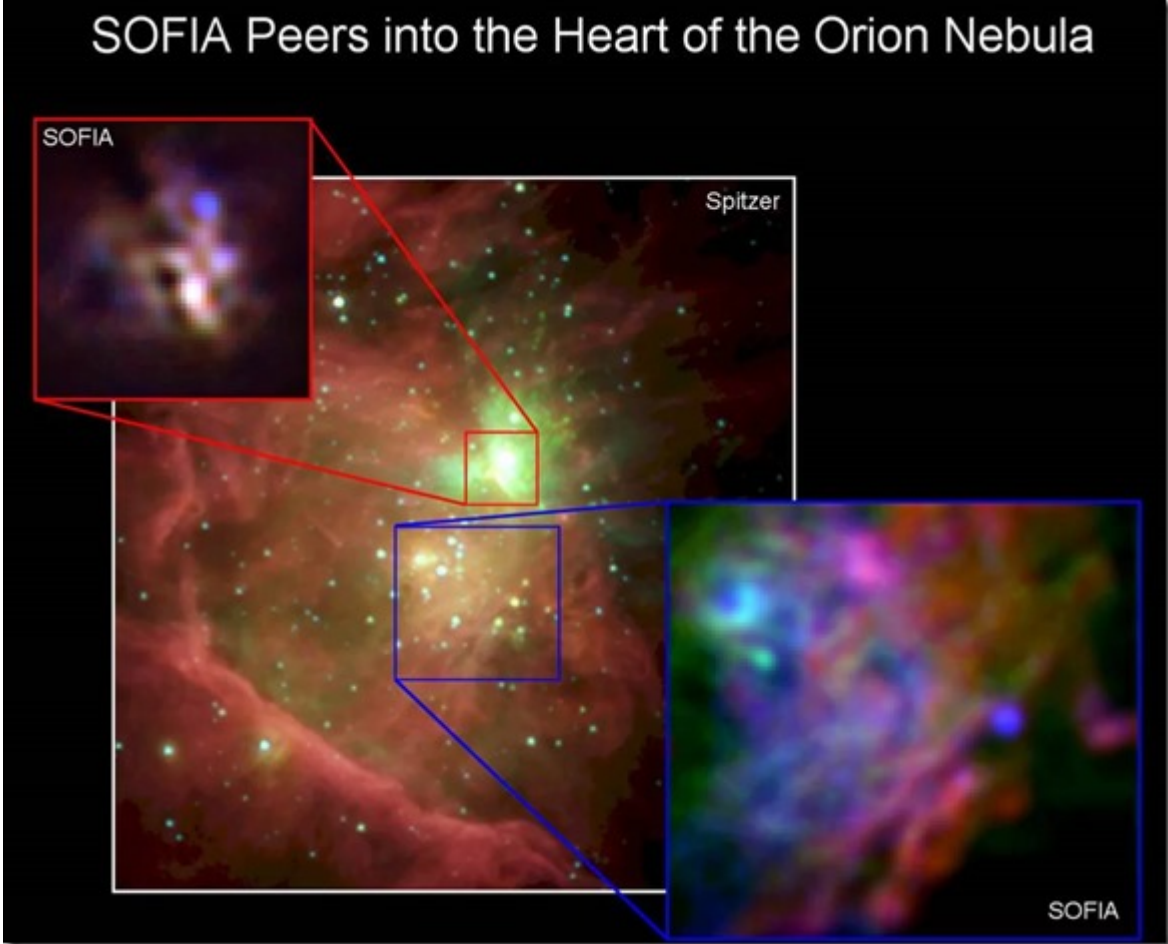


Le télescope dont le miroir fait 2,5 m est embarqué à l'arrière de l'avion et protégé au décollage par une porte coulissante vers le haut (*ci-dessus*). L'avion supporte bien son ouverture en altitude sans que son enveloppe de vol en souffre. Le télescope comprend de nombreux instruments, caméras et spectrographes, surtout dans l'infrarouge lointain qui est mieux capté en altitude. Un tel télescope est plus facile à mettre à jour et réparer qu'un télescope spatial et sa durée de vie en opération est bien plus longue malgré la taille de l'aéronef.

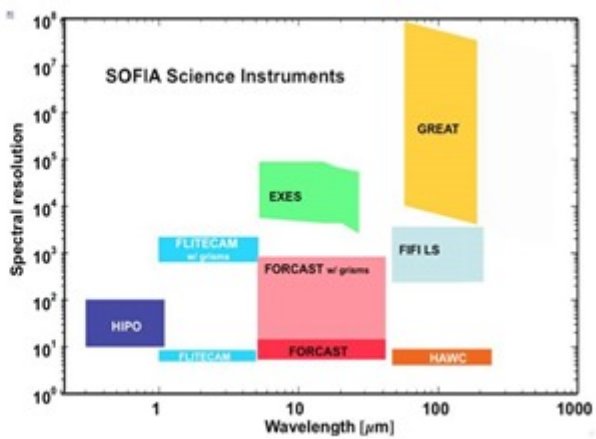
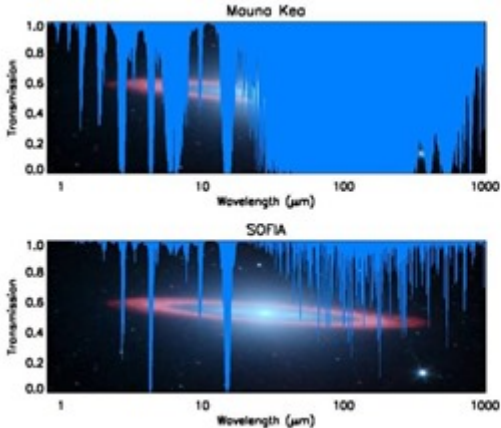


D'un point de vue pratique, SOFIA a pris le relais de Spitzer lorsque celui-ci est arrivé à cours d'hélium pour refroidir ses instruments. Mais leur positionnement était différent et complémentaire. Spitzer avait des imageurs à haute sensibilité et basse résolution spectrale. SOFIA apporte une haute résolution angulaire et spectrale.

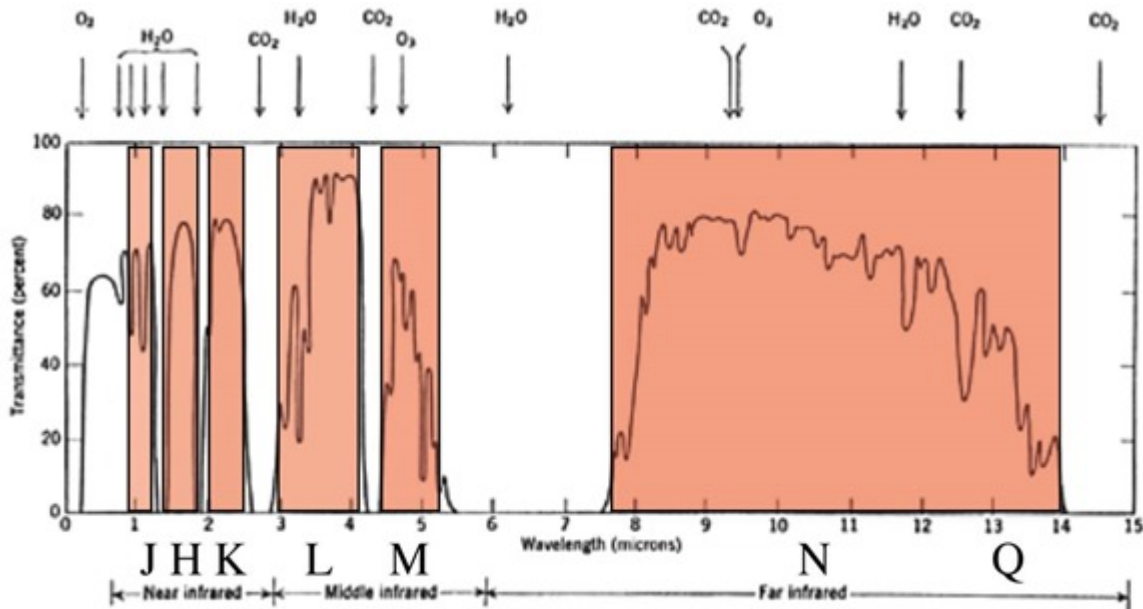
# SOFIA Peers into the Heart of the Orion Nebula



Maintenant que Spitzer et Heschel sont hors service dans l'infrarouge lointain, SOFIA est la seule solution pour les astronomes et astrophysiciens ! Il est même complémentaire du JWST que nous verrons plus loin car il couvre l'infrarouge au-delà de 28 microns et jusqu'à 600 microns, et une haute résolution spectrale dans l'infrarouge de 5 à 28 microns, choses que JWST ne sait pas du tout faire. L'un de ses instruments, le **GREAT** (German REceiver for Astronomy at frequencies) est un spectrographe dans l'infrarouge lointain allant de 63 à 611 microns (de 4,747 THz à 0,40 THz) qui va plus loin dans l'infrarouge que Herschel.



Quand aux télescopes terrestres, ils sont focalisés sur le proche infrarouge, l'infrarouge moyen étant mal reçu sur terre, gêné par la diffraction générée par l'atmosphère, dans les bandes blanches dans le spectre ci-dessous.



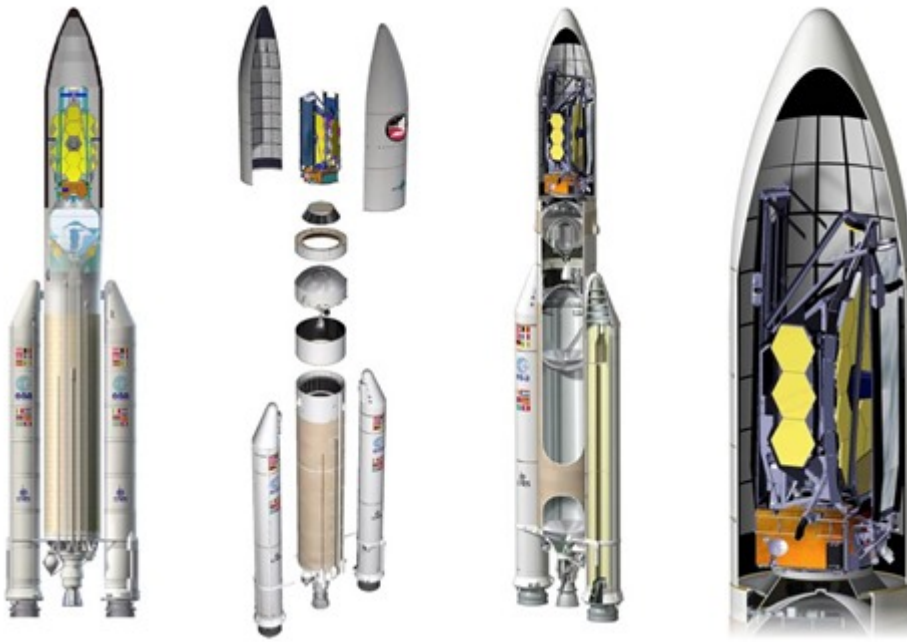
### James Webb Space Telescope (2019-2029)

Le JWST est le télescope spatial de tous les records depuis Hubble. C'est celui qui aura le plus grand miroir (6,2 mètres de diamètre) et qui coûtera le plus cher depuis Hubble avec un budget actuel total situé aux alentours de \$9B. Son lancement est prévu pour octobre 2018 et sa mise en service pour avril 2019. C'est un projet de la NASA réalisé en partenariat avec l'ESA. Son nom, attribué en 2002, rend hommage au second administrateur de la NASA pendant les années critiques de conception des programmes Mercury, Gemini et Apollo, entre 1961 et 1968.

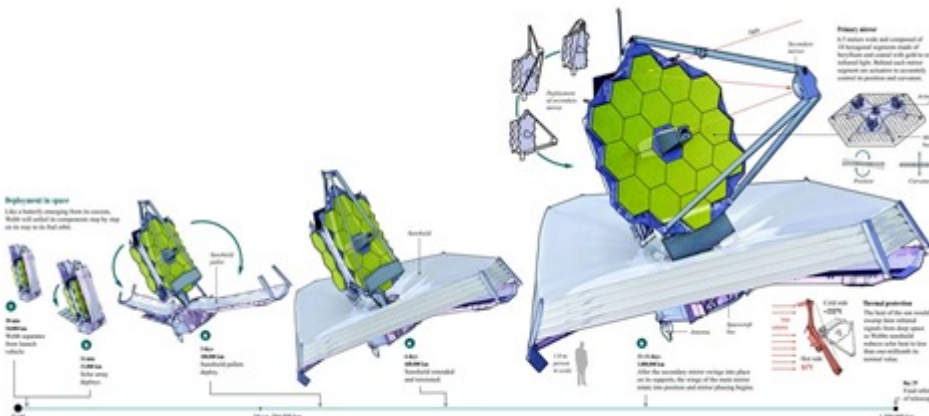
Dédié aux observations dans l'infrarouge, le JWST a pour objectif scientifique principal de s'approcher autant que possible du Big bang – sachant qu'il y a peut-être un avant le Big bang sans que nous ne puissions l'observer –, en remontant au-delà de 13,4 milliards d'années en arrière. Selon les théories actuelles, nos observations ne devraient pas pouvoir s'approcher à plus de 3 minutes du Big Bang, moment où les plus anciennes lumières théoriquement observables ont été émises, bien avant la formation des premières étoiles et galaxies. Mais JWST n'ira pas jusque là. Accessoirement, il contribuera aussi à la détection d'exoplanètes mais sera moins unique de ce point de vue-là pour ce qui est de son instrumentation.

Ce télescope est unique à plusieurs titres que je vais explorer ici même. Cela concerne son déploiement, sa protection contre les rayons solaires tout comme son instrumentation.

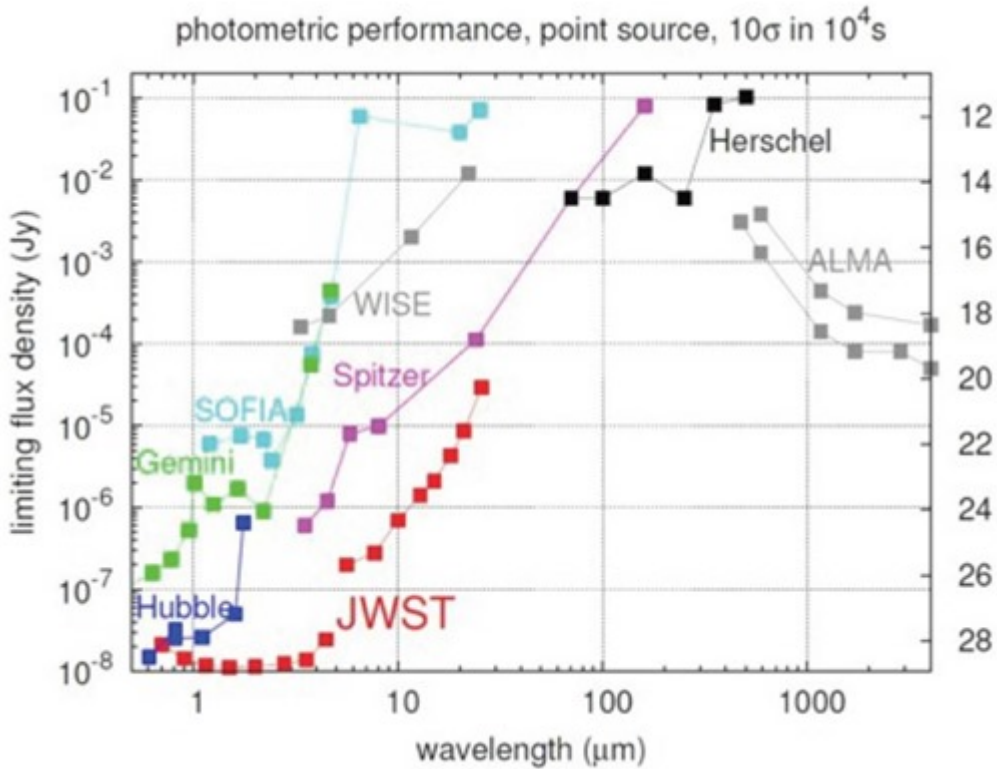
Le télescope est un véritable **origami** à déplier. Prévu pour être lancé par Ariane 5, dont la coiffe fait un diamètre intérieur de 4,57 m, le télescope de 6,2 tonnes doit être replié sur lui-même à plusieurs niveaux : pour le miroir de 6,5 m de diamètre tout comme la protection contre les rayons du soleil qui, une fois dépliée, fait 21,2 m x 14,2 m, ainsi que pour le support du miroir secondaire, les panneaux solaires et sa protection contre le soleil qui fait la taille d'un terrain de tennis une fois dépliée.



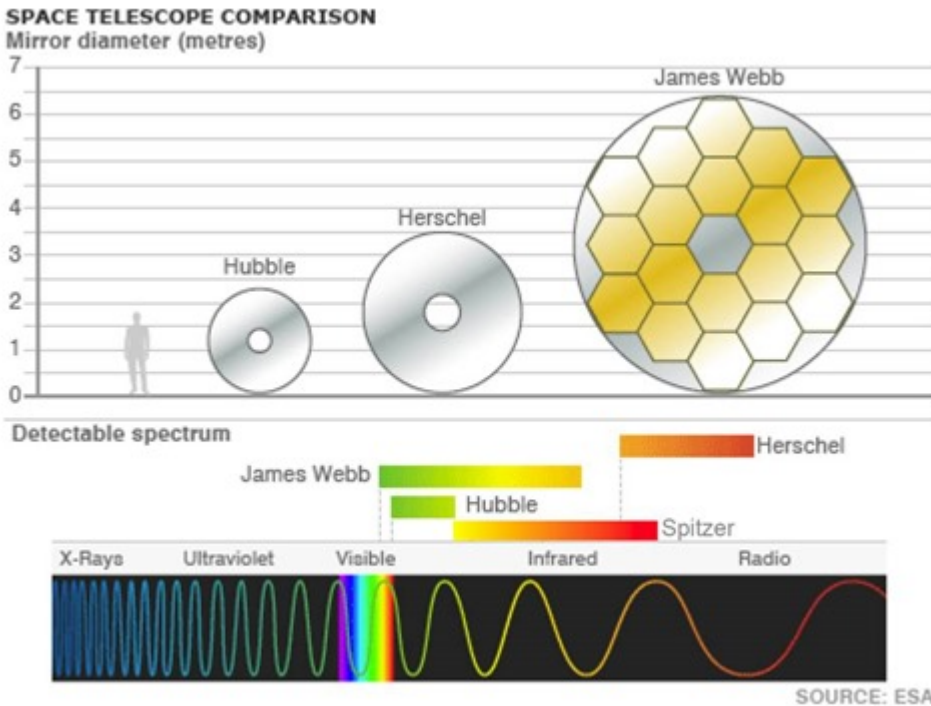
JWST sera placé sur le point de Lagrange L2. Le trajet pour y parvenir dure un mois. La première moitié de ce parcours sera consacrée au lent dépliement du télescope. Celui-ci est magistralement présenté dans cette **simulation vidéo** de 5 minutes. Pour ce dépliement, 178 vérins mécaniques sont activés et 40 structures différentes sont à déployer. La plus critique à déplier est le système de protection contre les rayons solaires en képton en cinq couches. On se rappelle des “7 minutes de terreur” de l’atterrissage sur Mars de la sonde Curiosity. Ici, la terreur passera à deux semaines de patience ! Et il n’y a aucune caméra embarquée dans JWST pour suivre son déploiement, surtout en cas de problèmes. Certains ingénieurs y ont pensé mais un peu trop tard pour son intégration dans le projet sans augmentation du cout. Son état pourra cependant être reconstitué grâce à tous les capteurs qu’il embarque.



Le placement sur le point de Lagrange qui interviendra fin novembre 2018 ne sera que le début d’un processus de mise en route qui durera encore cinq mois avant que le télescope capte les premières images. En cause, le lent refroidissement de ses instruments infrarouge et leur calibrage. C’est le prix à payer pour bénéficier de son excellente sensibilité qui est bien meilleure que celle de Spitzer, WISE et SOFIA (cf la comparaison dans le schéma *ci-dessous*).

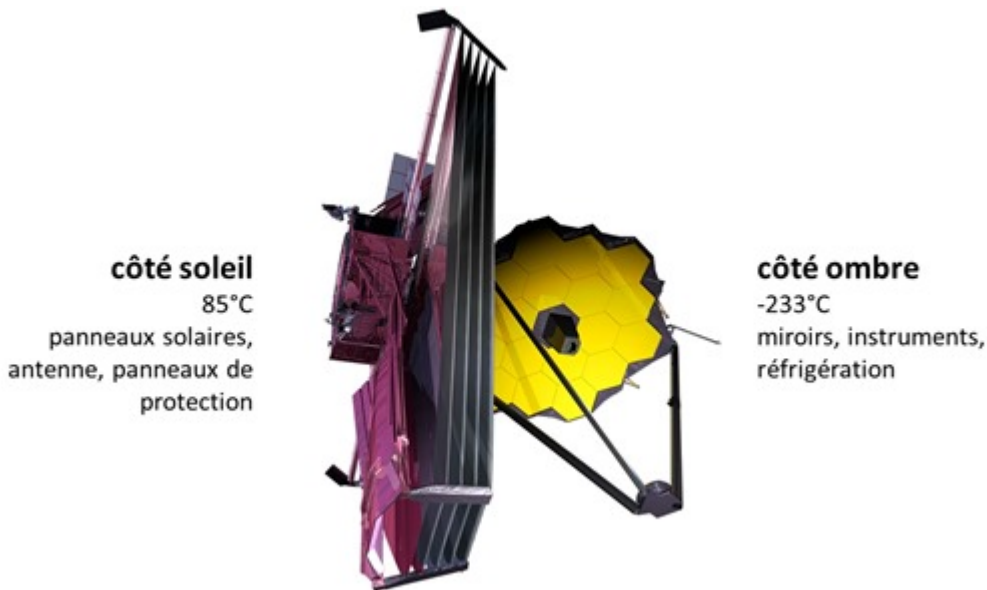


Le **miroir primaire** est constitué de 18 miroirs hexagonaux en béryllium de 1,32 m de côté. Ils sont recouvert d'or, 38g en tout, qui réfléchit bien les rayons infrarouges. L'or est ensuite recouvert d'une fine couche de protection en verre. Ce miroir utilise une optique adaptative pilotée par 144 vérins assurant un contrôle précis de la position des hexagones sur 2 cm d'amplitude et avec une précision redoutable de 20 nm. Il faut 7 actionneurs cryogéniques par miroir. Le miroir principal est complété par un miroir secondaire de 74 cm, un tertiaire de 51 x 71 cm et un dernier miroir de 17 cm.



L'**orientation du JWST** avec, du côté du Soleil, des panneaux solaires générant une puissance permanente de 2 KW, les cinq couches d'isolant en Kepton, une antenne de communication avec la Terre et un système de positionnement par propulsion de jets de gaz. L'isolant en Kepton est un film de polyamide développé par

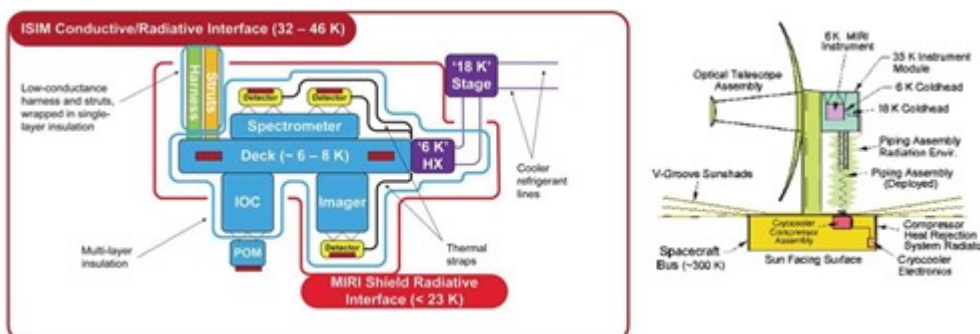
DuPont qui peut rester stable dans une plage étendue de température, de  $\approx 269$  °C à 400 °C. Le côté ombre comprend les miroirs et les instruments.



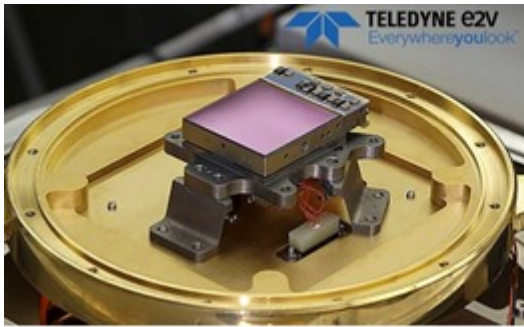
Les **instruments** embarqués dans JWST sont nombreux et intégrés dans l'ISM, l'Integrated Science instruments Module. On y trouve un FGS pour le guidage, une caméra dans le proche infrarouge NIRcam, une caméra et un spectrographe dans le proche infrarouge NIRISS, un spectrographe multi-objets dans le proche infrarouge NIRSpec et enfin, une caméra dans l'infrarouge moyen, le MIRI. Nous allons les examiner un par un. L'ISM comprend également tout un tas de fonctions de support comme l'alimentation électrique des instruments, leur électronique de commande, celle des télécommunications avec la Terre et le radiateur. La conception de ces instruments date de la décennie 2000.



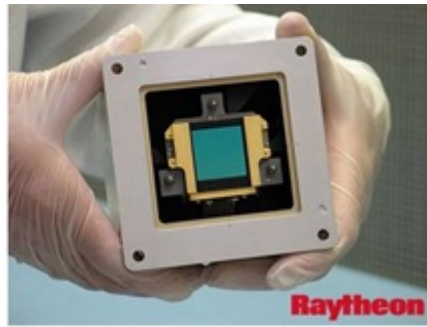
Le **refroidissement** est assez classique. L'ensemble des instruments est placé dans une enceinte à une température de 40K et ses différentes parties sont refroidies via une trentaine de radiateurs alimentant un grand radiateur placé à côté de l'ISM. Le MIRI qui fonctionne dans l'infrarouge moyen est refroidi par un système utilisant de l'hélium liquide et un thermocouple utilisant le principe Joule-Thomson pour descendre jusqu'à 6 K. C'est le MIRI qui conditionne donc la durée de vie opérationnelle à 100% du JWST. Mais celui-ci aura probablement une vie étendue pour ses autres instruments dont le refroidissement est passif.



Les **capteurs CCD** intégrés dans ces instruments sont de deux types : ceux qui fonctionnent dans le proche infrarouge sont des classiques capteurs HdCdTe (tellurure de mercure-cadmium) H2RG issus de Teledyne E2V, le leader de ce marché. Intégrés dans les instruments NIRISS, NIRCam et NIRSpec, ils démarrent dans le rouge visible puis couvrent le proche infrarouge, de 0,6 à 5 microns et font 2Kx2K pixels.



**NIRCam, NIRSpec, FGS**  
15 capteurs 2Kx2K, 16 bits/pixels  
IR 0,6-5 $\mu$ m  
tellure de mercure-cadmium

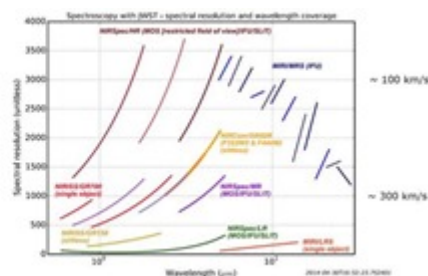


**MIRI**  
1 capteur 1Kx1K  
IR 5-28 $\mu$ m  
silicium dopé à l'arsenic

Ces capteurs sont déclinés en deux versions avec des teneurs variées de mercure et de cadmium permettant de les optimiser pour couvrir différemment le proche infrarouge : l'une pour couvrir 0,6 à 2.5 microns, avec une meilleure sensibilité, et l'autre pour aller de 0,6 à 5 microns, avec une sensibilité moindre. Une quinzaine de capteurs de ce type sont installés dans JWST. Les pixels font 18 microns de taille, à comparer (même si ce n'est pas vraiment comparable...) avec les 6 microns de côté des pixels d'un reflex Canon EOS 5D Mark III. Le second type de capteur et celui du MIRI. Réalisé en arséniure de silicium (Si:As), il couvre l'infrarouge moyen de 5 à 28  $\mu$ m. Il est issu de Raytheon Vision Systems et fait 1Kx1K pixels. Un classique : plus la longueur d'onde augmente, plus la résolution baisse, comme dans les radiotélescopes.

Tous les instruments comprennent leur propre **spectrographe**, et avec des variantes. En effet, presque tous les modes de spectrographie sont embarqués dans le télescope pour découper les images en morceaux divers (bandes, points, etc) et les décomposer en fréquences, avec des résolutions variables selon les instruments et les longueurs d'onde. Ces résolutions sont d'ailleurs plutôt moyennes par rapport à de nombreux télescopes optiques vus dans une partie précédente. Le tableau et le schéma suivants illustrent ces variations.

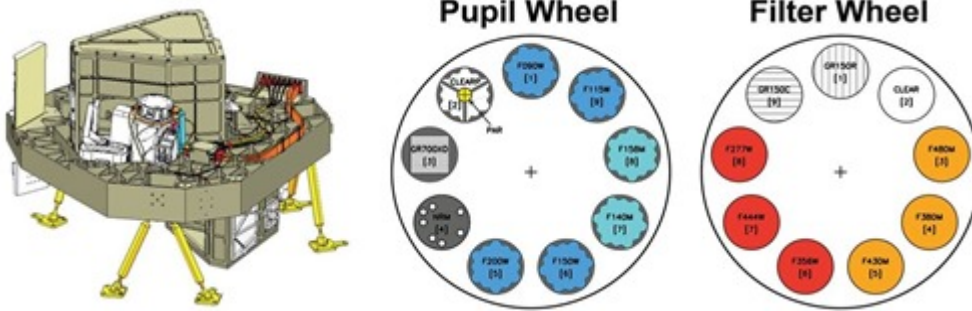
Instrument	Type	Wavelength (microns)	Spectral resolution	Field of view
NIRISS	slitless	1.0-2.5	~150	2.2' x 2.2'
NIRCam	slitless	2.4-5.0	~2000	2.2' x 2.2' (TBC)
NIRSpec	MOS	0.6-5.0	100/1000/2700	9 square arcmin.
NIRSpec	IFU	0.6-5.0	100/1000/2700	3" x 3"
MIRI	IFU	5.0-28.8	2000-3500	>3" x >3.9"
NIRSpec	SLIT	0.6-5.0	100/1000/2700	Single object
MIRI	SLIT	5.0-10.0	60-140	Single object
NIRISS	Aperture	0.6-5.0	100/1000/2700	Single object
NIRSpec	Aperture	0.6-2.5	700	Single object



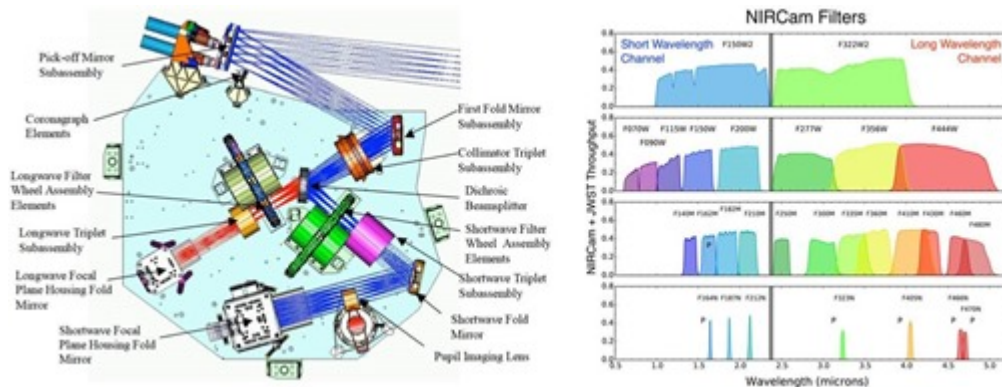
Voyons donc maintenant les cinq grands instruments du JWST...

Le **FGS** (Fine Guidance Sensor) et le **NIRISS** (Near-InfraRed Imager and Slit-less Spectrograph) sont construits dans un même ensemble mais leurs chemins optiques se séparent à l'entrée. Ils ont été réalisés par l'agence spatiale canadienne et livrés en 2012 ! Il s'agit du système de visée et d'un système de caméras et de spectrographie "de base", couvrant juste le proche infrarouge, de 0,8 à 5 microns en analysant l'image d'un seul coup. Le NIRISS est aussi capable de réaliser de l'interférométrie avec un masque comprenant sept ouvertures. Ils permettent après moult traitement de signal de détecter par imagerie directe des exoplanètes autour de certains types d'étoiles. Le capteur du NIRISS est un CCD HgCdTe de 2Kx2K pixels. Le FGS sert à capter une vue du ciel pour repérer des étoiles ou galaxies clés servant à maintenir le pointage du JWST dans la bonne direction.





Le **NIRC2** est une caméra dans le proche infrarouge dédiée à la compréhension des origines de l'Univers, de la formation des amas de galaxies, des galaxies elles-mêmes, des systèmes planétaires ainsi qu'à la détection d'exoplanètes par la méthode des transits ou par imagerie directe. L'instrument sépare la lumière en deux chemins optiques distincts via un miroir dichroïque (qui se laisse traverser par certaines fréquences et est réfléchissant pour d'autres fréquences) : l'un pour analyser la bande de 0,6 à 2,3 microns, et l'autre, pour aller de 2,4 à 5 microns. La première bande est couverte par huit capteurs CCD HgCdTe de 2K X 2K pixels, triplant la résolution angulaire par rapport à la caméra WFC3 de Hubble. La seconde est dotée de deux capteurs de ce type. La résolution angulaire sera double dans la première bande par rapport à la seconde, car 8 capteurs y couvriront le même champ de vision focale que 2 capteurs. L'ensemble permettra de détecter des objets 100 fois moins lumineux que ne le pouvait le télescope spatial Spitzer vu au début de cette partie.



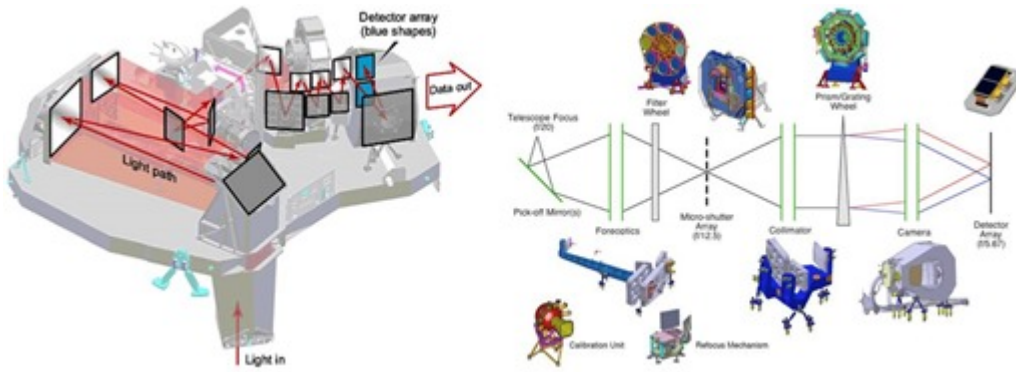
La caméra peut supporter des temps de pose de près de trois heures pour observer des objets de très faible magnitude. Elle permet d'observer les exoplanètes de manière directe, via l'usage de coronagraphes qui occultent les étoiles pour la visualisation d'exoplanètes tournant autour. Cela fonctionne pour les grandes planètes, de taille égale ou supérieure à celle de Jupiter. Ces exoplanètes pourront avoir été détectées par d'autres moyens (télescopes terrestres, Kepler, ...). La grande précision photométrique des capteurs CCD embarqués et la qualité des optiques permettra d'obtenir avec précision la taille, la masse, la densité et la composition des planètes observées.

Le coronographe permet aussi d'analyser les nuages de poussières autour d'étoiles en formation, dans ce que l'on appelle les disques proto-planétaires, qui sont les disques de poussières et de gaz servant de préludes à la formation des planètes. Chaque chemin optique traverse un filtre situé dans un roue, avec des filtres de couleur séparant la bande infrarouge en parties distinctes, ou avec un coronographe. Les 29 filtres différents qui équipent NIRC2 permettent notamment d'évaluer le décalage vers le rouge (redshift) des objets observés.

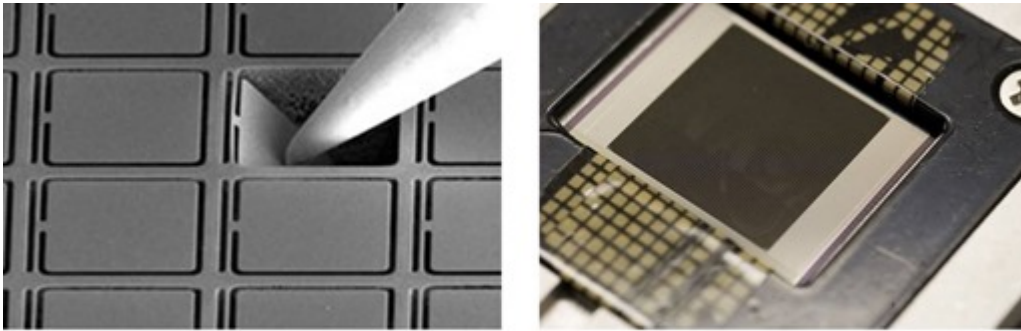
NIRC2 sert aussi à l'alignement précis des 18 miroirs hexagonaux du miroir principal du télescope. Cet ajustement sera réalisé à une fréquence de une à deux semaines. L'instrument fonctionne à la température de 37K, soit 37°C au-dessus du zéro absolu qui est à -273°C.

Le **NIRSpec** est le premier spectrographe multi-objets lancé dans l'espace, capable d'analyser simultanément le spectre dans le proche infrarouge d'une centaine d'objets. Il sert à étudier les galaxies, à évaluer leur masse et

leur vitesse de rotation ainsi qu'à découvrir des exoplanètes. Sa conception et sa fabrication ont été gérées par l'ESA.

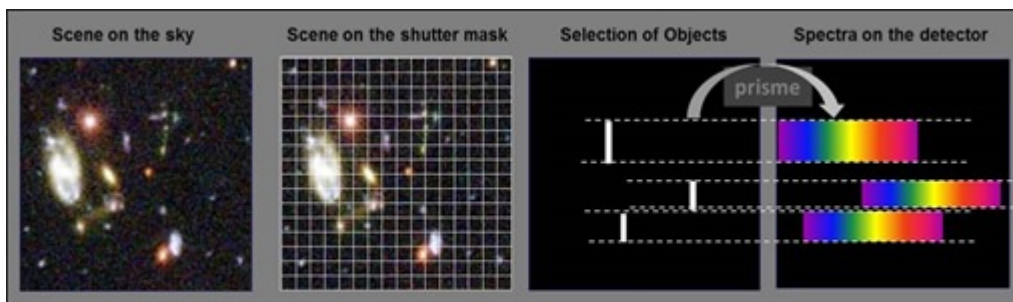


La lumière passe par un système à base de micro-miroirs qui n'est pas sans rappeler le fonctionnement des projecteurs vidéo utilisant les puces DLP de Texas Instruments ou leur équivalent SXRD chez Sony. Quatre puces comprennent chacune 171 colonnes et 365 lignes de micro-miroirs, ce qui fait un total de 249 660 micro-miroirs. Ils permettent de sélectionner des étoiles ou galaxies à spectrographier.



$365 \times 171 = 62\,415$  micro-obturbateurs (x4)

La lumière de ces objets va ensuite traverser un prisme pour être décomposée et le spectre correspondant lu sur un capteur CCD. De 60 à 100 objets peuvent ainsi être spectrographiés d'un seul coup ce qui apporte un gain de productivité significatif, critique pour un télescope dont la durée de vie opérationnelle est limitée à une dizaine d'années maximum. La lumière qui rentre dans le NIRSpec est réfléchiée sur un total de 14 miroirs, dont les micro-miroirs, et passe au travers de filtres de couleur infrarouge arrangés sur une roue puis par des prismes, eux-aussi arrangés sur une roue de sélection. Les miroirs ont été produits en carbure de silicium par le français Boostec et intégrés par Astrium. NIRSpec couvre le rouge et le proche infrarouge (seul le MIRI couvre l'infrarouge moyen), de 0,6 à 5,3 microns.

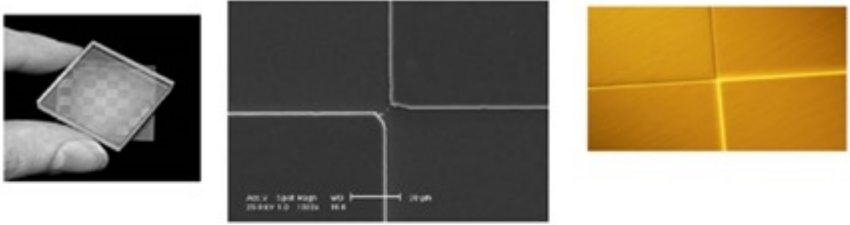


1 à 100 spectros

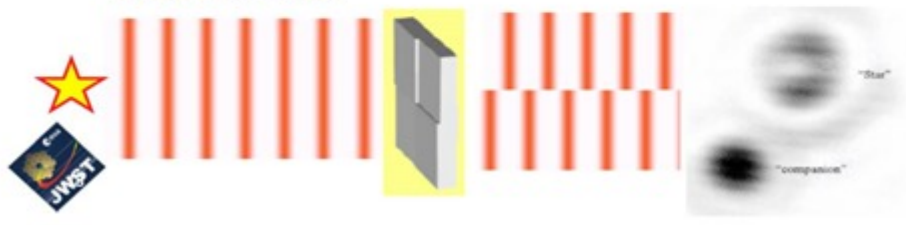
La spectrographie peut être réalisée dans un autre mode faisant appel à un IFU (Integral Field Unit) qui découpe le champ de vision en bandes étroites qui peuvent être spectrographiées individuellement. Ce qui

permet de créer une sorte de “cube” du champ de vision avec deux dimensions spatiales et une troisième dimension spectrale pour chaque pixel de l’image.

Le **MIRI** est une caméra fonctionnant dans l’infrarouge moyen, de 5 à 28 microns. Elle est dotée de quatre coronagraphes qui permettent d’observer et analyser de manière directe des exoplanètes. Dont un qui repose sur un filtre à quadrants, 4Quadrant, qui déphase d’une demi-longueur d’onde deux quadrants sur les quatre et permet ensuite par interférométrie d’identifier des exoplanètes.



- A flat ‘window’ with 4 panes (quadrants)
- If the star is centred on the cross at the centre of a 4QPM, half of its light is retarded by half a wavelength.



L’observation des exoplanètes est aussi possible en photométrie par la méthode des transits, que nous aurons l’occasion de détailler dans une partie à venir sur les exoplanètes. Cette dernière méthode est optimisée car, dans l’infrarouge moyen, le différentiel de luminosité est moindre entre planètes et étoiles que dans le proche infrarouge et d’un facteur 1000 !

### The MIRI Imager

**18 Station Filter Wheel**  
- Filters (10), LRS prism (1), coronagraphic diaphragms and filters (4), open (1), closed+PAR(1), lens (1)

**Focal Plane Module**  
- 6.7K operating temperature  
- 1024 x 1024 Si:As detector array thermally and electrically isolated from housing

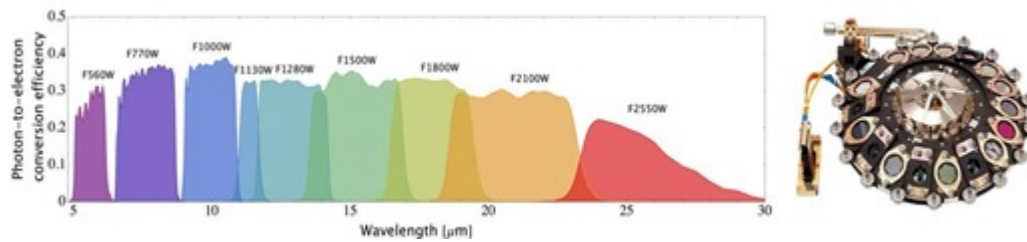
**Coronagraphic masks**  
- 4QPM (3)  
- Lyot mask (1)

**Imager optical design**

**LRS optical path**

La caméra comprend aussi un spectrographe, doté de quatre canaux avec leur propre optique de séparation du champ de vision. Elle est adaptée à l’observation d’objets célestes très distants (high red shift), aux objets très froids et/ou chargés en poussières et à la détection de nombreuses molécules : hydrogène, PAH, silicates, eau,

CO, CH<sub>4</sub>, CH<sub>3</sub>OH, NH<sub>3</sub>, OCN<sup>-</sup>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, HCN et OH. Dix filtres de couleur sont disponibles et conçus par Zeiss en Allemagne. Les trois capteurs CCD du MIRI font pour mémoire 1Kx1K pixels.



Les capteurs CCD ont des zones spécialisées adaptées aux différents types de mesure et spectrographie. L'instrument a bénéficié de contributions françaises avec le CEA pour l'imageur puis le LESIA et le LAM (Marseille) pour le coronographe.

Le calculateur de JWST est le "Command and Data Handling System" devrait envoyer vers la Terre au moins 660 To de donnée pendant la durée de vie opérationnelle du télescope. Son buffer local est de 58,9 Go de données, en technologie de type SSD. Il est vidé dans des créneaux de 4 heures deux fois par jour au rythme de 28,6 Go par créneau. Le buffer contient donc tout juste une journée d'observations. Les instruments et le calculateur de JWST sont reliés par un bus de données conçu par l'ESA, le SpaceWire, qui tourne à 66 Mbits/s.

Voilà pour le riche équipement du JWST. Il reste à croiser des doigts pour que ce magnifique télescope se déploie sans encombres en 2018 pour qu'il puisse nous informer ensuite convenablement sur les origines de l'Univers à partir du printemps 2019 !

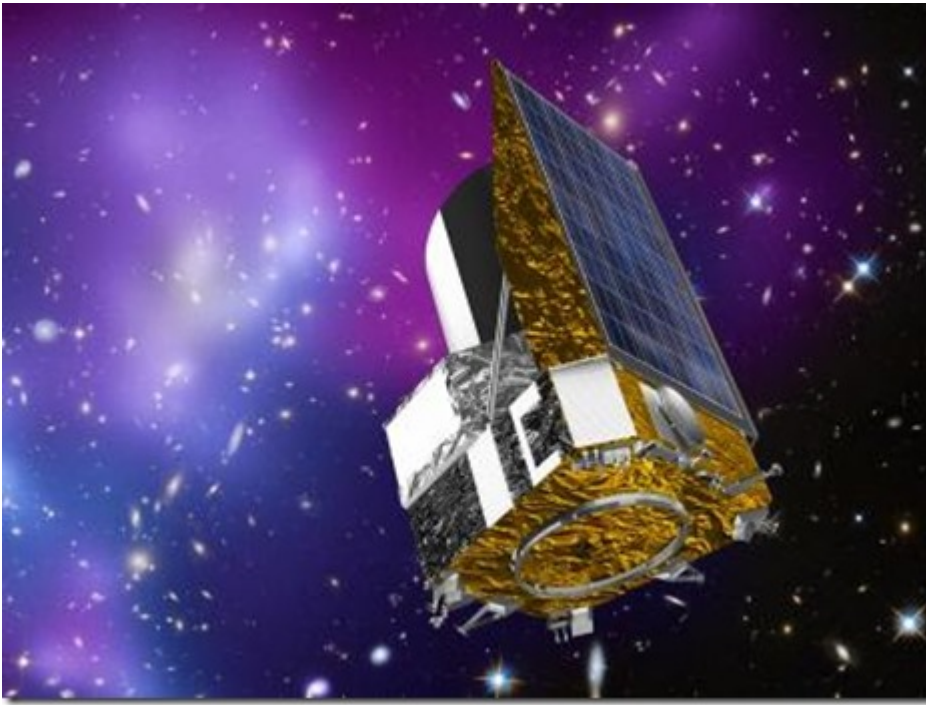
Il nous reste maintenant à étudier trois autres télescopes dédiés aux merveilles célestes de l'infrarouge. Il sont encore en gestation et leur mise en service aura lieu au mieux d'ici 2020.

### **Euclid (2020 – 2027)**

Ce télescope spatial est un projet de l'ESA dédié à l'étude de l'expansion de l'Univers et servant à valider ou invalider les théories de la relativité générale et l'hypothèse de l'énergie et de la matière noire. Il doit servir à déterminer avec précision diverses constantes cosmologiques dans le domaine gravitationnel. Et notamment découvrir si l'énergie noire est une constante cosmologique ou bien si elle dépend de l'expansion de l'Univers.

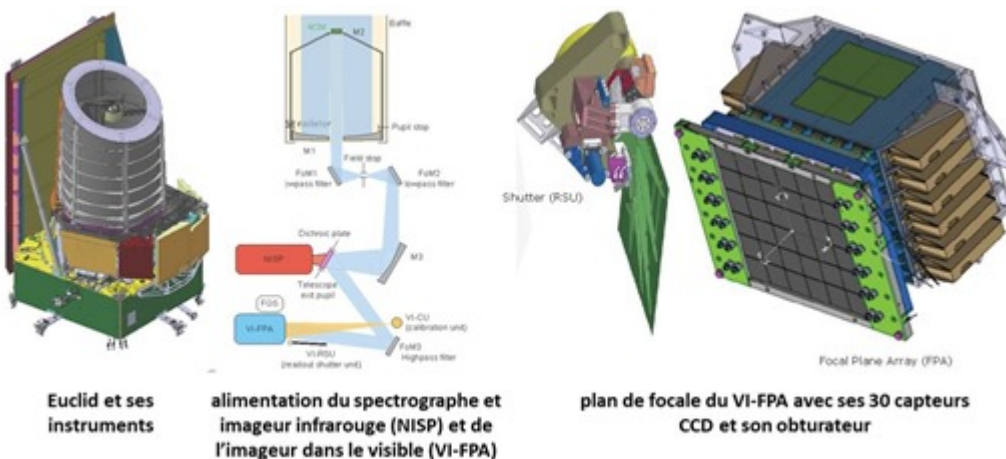
La mission se situe dans la continuité de celle du télescope spatial Planck qui est dédié à l'étude du rayonnement de fond cosmologique. Euclid fonctionne dans le visible et l'infrarouge. Il mesure le décalage vers le rouge des galaxies et amas de galaxies jusqu'à un décalage modeste  $z=2$  correspondant à un éloignement de 10 milliards d'années. Il permettra aussi de cartographier les galaxies éloignées avec une plus grande précision et sensibilité que le **Sloan Foundation Telescope**.

Pesant 2,2 tonnes, le télescope sera envoyé sur le point de Lagrange L2 par un lanceur Soyouz à partir de la base de Kourou en Guyane. Il est construit par Airbus Defense & Space et Thales Alenia Space.



L'optique d'Euclid sépare le champ lumineux issu du miroir primaire de 1,2 m, réfléchi par trois miroirs, via un filtre dichroïque avec d'un côté le visible et de l'autre le proche infrarouge. Les deux instruments alimentés sont :

- **VI-SPA**, qui est dédié à l'imagerie dans le visible et est doté d'une matrice de 36 capteurs CCD de 4Kx4K Teledyne E2V couvrant les fréquences de 550 à 900 microns, en grignotant un peu le début du proche infrarouge. L'observation est à champ large. Elle permettra notamment de déterminer avec plus de précision la forme des galaxies.
- **NISP**, qui est consacré à la photométrie (mesure de la variation de la lumière dans le temps) et la spectroscopie (décomposition de la lumière en fréquences) dans le proche infrarouge. Il comprend trois filtres dans le proche infrarouge (950-1,192 microns, 1,12- 1,5 microns, 1,5- 2 microns) et quatre grismes qui sont des prismes avec une face formant un réseau de diffraction ne laissant passer qu'une seule longueur d'onde. Le tout arrive sur 16 capteurs CCD de 2Kx2K. L'ensemble est refroidi passivement à 90 K.



Euclid va être notamment utilisé sur deux campagnes d'exploration. Une campagne à large champ (15 000

degrés carrés) hors de la Voie Lactée ciblant 1,5 milliards de galaxies et une campagne à champ étroit ciblant deux zones de 10 et 20 degrés carrés ciblant 1,5 millions de galaxies. Il s'appuiera en particulier sur les lentilles gravitationnelles pour ses investigations. Ce sont des "loupes" générées par des galaxies ou AGN (noyaux galactiques actifs) dont la gravitation dévie les flux de lumière des objets qui sont derrière elles et qui permettent de mieux les observer.

Euclid enverra ses données à la Terre via la bande Ku, aussi utilisée par les satellites géostationnaires de diffusion de TV, à raison de 850 Gbits par jour. Le coût du projet est estimé à 850M€.

### WFIRST (2020-2030)

Le projet de ce télescope spatial Wide-Field InfraRed Survey Telescope a démarré relativement récemment, en 2015. Il est construit par **Ball** et **Lockheed Martin** pour le compte de la NASA et doit être positionné sur le point de Lagrange L2, comme JWST.



Lui aussi doit aider les astrophysiciens à étudier l'existence et l'impact de la matière et de l'énergie noires dans l'expansion accélérée de l'Univers et remonter pour cela assez loin dans l'histoire de l'Univers.

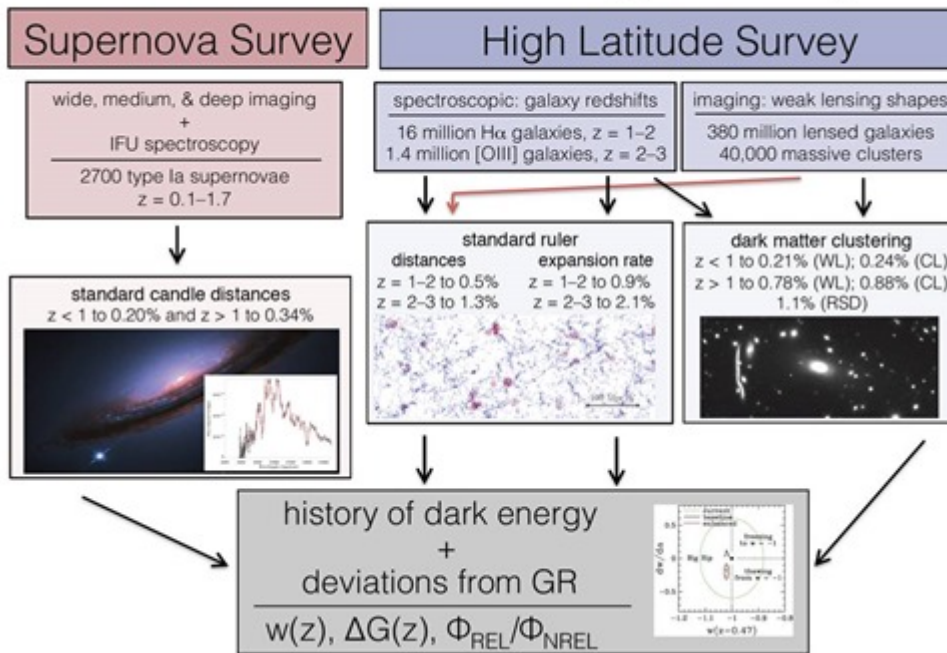
Basée sur l'identification d'une centaine de quasars avec un redshift de plus de 7 (plus de 12 milliards d'années lumière de distance), cette étude doit permettre d'affiner les grandes équations physiques associant gravité, masse et énergie et de déterminer au passage le futur lointain de l'Univers : qui se déchire ou qui s'écrase sur lui-même ou reste relativement stable et en expansion, sachant que l'espèce humaine n'aura probablement jamais le loisir d'observer directement ces phénomènes. En effet, la Terre ne sera plus habitable bien avant qu'ils interviennent. Et il sera plus que difficile pour l'espèce humaine de s'installer sur d'autres planètes.

Ce télescope servira aussi à comprendre le cycle de vie des galaxies et à évaluer la quantité d'exoplanètes similaires à la Terre. Il ambitionne de détecter plus de 25 planètes "habitables" lors de sa mission, dans la direction du centre de la galaxie.

L'étude de l'énergie noire repose sur plusieurs mesures indirectes :

- Les **lentilles gravitationnelles faibles** mesurent l'histoire de l'expansion et de la croissance des grandes structures de l'Univers comme ses galaxies et amas de galaxies.
- Les **supernovas Ia** qui permettent aussi de comprendre l'histoire de l'expansion de l'Univers.
- Enfin les **oscillations acoustiques baryoniques** exploitent le regroupement de galaxies en amas comme un indicateur des constantes de l'expansion de l'Univers.

## WFIRST-AFTA Dark Energy Roadmap



Son miroir principal fera 2,5 m. Son instrument fonctionnera dans le proche infrarouge entre 0,76 et 2 microns et utilisera 18 capteurs HgCdTe (tellurure de mercure-cadmium) de 4Kx4K pixels totalisant 288 mpixels. Le refroidissement prévu n'est pas extrême et se contentera de descendre à 100K par radiation passive.

Il sera complété d'un spectrographe avec un capteur CCD de 2Kx2K pixels et d'un coronographe (pour la détection directe d'exoplanètes autour d'étoiles cibles) utilisant son propre capteur CCD de 1Kx1K pixels. Son optique est à champ très large, comparativement à celles de Hubble et du JWST.

Pour en savoir bien plus, direction cet imposant document "Wide-Field InfraRed Survey Telescope-Astrophysics Focused Telescope Assets WFIRST-AFTA 2015 Report" de 319 pages qui détaille la mission scientifique et l'instrumentation de ce télescope. A ce stade, vous devez en avoir marre de l'infrarouge !

Le prochain épisode poursuivra ce long parcours des télescopes spatiaux en se consacrant à ceux qui explorent les rayons gamma, X et ultraviolets ainsi que des rares radiotélescopes spatiaux. Encore de quoi quelques découvertes scientifiques et technologiques liées aux méthodes de captation dans ces longueurs d'onde exotiques. Nous suivrons après avec les techniques et télescopes spatiaux consacrés à la détection d'exoplanètes avec un petit détour via l'équation de Drake, celle de Seager et le paradoxe de Fermi. Enfin, le dernier épisode tant attendu clôturera ce voyage avec les entrepreneurs de la conquête spatiale.

Voici les pointeurs sur les douze épisodes de cette série dans leur ordre de parution :

**De l'astronomie à l'entrepreneuriat : l'Univers**

**De l'astronomie à l'entrepreneuriat : télescopes terrestres**

**De l'astronomie à l'entrepreneuriat : grands télescopes**

**De l'astronomie à l'entrepreneuriat : télescopes géants**

**De l'astronomie à l'entrepreneuriat : radiotélescopes**

**De l'astronomie à l'entrepreneuriat : interféromètres**

**De l'astronomie à l'entrepreneuriat : télescopes spatiaux**

**De l'astronomie à l'entrepreneuriat : télescopes spatiaux dans le visible**

---

**De l'astronomie à l'entrepreneuriat : télescopes spatiaux dans l'infrarouge**

**De l'astronomie à l'entrepreneuriat : télescopes spatiaux dans les rayons gamma, X et UV et ondes radio**

**De l'astronomie à l'entrepreneuriat : les exoplanètes**

**De l'astronomie à l'entrepreneuriat : entrepreneurs**

Cet article a été publié le 8 août 2017 et édité en PDF le 16 mars 2024.

(cc) Olivier Ezratty – “Opinions Libres” – <https://www.oezratty.net>