De l’astronomie à l’entrepreneuriat

Juin – août 2017

Olivier Ezratty

A propos de l'auteur

Olivier Ezratty olivier (at) oezratty.net , http://www.oezratty.net , @olivez

consultant et auteur +33 6 67 37 92 41

Olivier Ezratty conseille les entreprises dans l'élaboration de leurs business plans, stratégies produits et marketing, avec une focalisation sur les projets à fort contenu technique et scientifique (objets connectés, intelligence artificielle, medtechs, biotechs, …). Il leur apporte un triple regard : technologique, marketing et management ainsi que la connaissance des écosystèmes dans les industries numériques.

Il a réalisé depuis 2005 des missions diverses d'accompagnement stratégique et de conférences ou formations dans différents secteurs tels que la **télévision** (TF1, RTS-SSR, SES Astra, TDF, Euro Media Group, Netgem), les **télécoms** (Bouygues Télécom, Orange, SFR, Alcatel-Lucent), les **produits grand public** (LG Electronics, groupe Seb, L'Oréal, Alt Group), la **finance et l'assurance** (BPCE, Crédit Agricole, Crédit Mutuel-CIC, Société Générale, Natixis, Groupama). Ces missions couvrent l'assistance à la création de roadmap produit, l'analyse de positionnement et de la concurrence, la définition technologique et marketing de stratégies d'écosystèmes et « d'innovation ouverte », l'assistance à la réalisation de business plans, l'animation de séminaires de brainstorming, ainsi que l'intervention dans des conférences et séminaires sur les tendances du marché dans le numérique.

Ses contributions s'appuient sur un fort investissement dans l'écosystème de l'innovation et sous différentes casquettes, notamment dans l'univers des startups :

- Expert, membre et l'un des présidents du comité d'agrément de **Scientipôle Initiative (Wiplo)**, une association membre d'Initiative France qui accélère les startups franciliennes.
- Membre depuis fin 2015 du Comité de Prospective de l'**ARCEP**.
- Advisor du fonds d'investissement **INVST I/O** spécialisé dans les objets connectés.
- Expert auprès du pôle de compétitivité **Cap Digital** ainsi que de la **Caisse des Dépôts** et du **CNC**.
- Membre du jury de divers **concours entrepreneuriaux** comme le Grand Prix de l'Innovation de la Ville de Paris ou la Startup Academy, mentor dans de nombreux **Startups Weekends**.

Il est *guest speaker* dans divers établissements d'enseignement supérieur tels que HEC, SciencePo, Neoma Rouen, CentraleSupelec, l'Ecole des Mines de Paris, Télécom Paristech et l'ECE où il intervient sur le marketing de l'innovation dans les industries numériques, sur l'entrepreunariat et le product management, en français comme en anglais selon les besoins.

Olivier Ezratty est l'auteur du **Rapport du CES de Las Vegas**, publié à la fin janvier de chaque année depuis 2006, et du **Guide des Startups** qui est devenu une référence en France avec plus de 200 000 téléchargements à date. Le tout étant publié sur le blog « Opinions Libres » (http://www.oezratty.net) qui traite de l'entrepreneuriat et des médias numériques. Comme photographe, il est aussi le co-auteur de l'initiative « Quelques Femmes du Numérique ! » (http://www.qfdn.net), devenue une association en 2016, et qui vise à augmenter la place des femmes dans les métiers du numérique, en sensibilisant les jeunes à ces métiers.

Olivier Ezratty débute en 1985 chez Sogitec, une filiale du groupe Dassault, où il est successivement Ingénieur Logiciel, puis Responsable du Service Etudes dans la Division Communication. Il initialise des développements sous Windows 1.0 dans le domaine de l'informatique éditoriale ainsi que sur SGML, l'ancêtre de HTML et XML. Entrant chez Microsoft France en 1990, il y acquiert une expérience dans de nombreux domaines du mix marketing : produits, canaux, marchés et communication. Il lance la première version de Visual Basic en 1991 ainsi que Windows NT en 1993. En 1998, il devient Directeur Marketing et Communication de Microsoft France et en 2001, de la Division Développeurs dont il assure la création en France pour y lancer notamment la plate-forme .NET et promouvoir la plate-forme de l'éditeur auprès des développeurs, dans l'enseignement supérieur et la recherche ainsi qu'auprès des startups. Olivier Ezratty est ingénieur de l'Ecole Centrale Paris (1985).

Ce document vous est fourni à titre gracieux et est sous licence « Creative Commons »
dans la variante « Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 2.0 France »

Voir http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/fr/

Photo de couverture : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Milky_Way_over_Nanga_Parbat.jpg.

Table des matières

L'Univers **5**
L'astronomie commence avec les astronomes ! 6
Ce que l'on sait des dimensions de l'univers 9

Télescopes terrestres **18**
Les moyens d'exploration de l'Univers 18
L'histoire des télescopes terrestres 20
Les capteurs photo, du CCD au CMOS 22

Grands télescopes **29**
Les innovations des grands télescopes 30
Les grands télescopes contemporains 35
Les télescopes à miroirs segmentés 46
Réserver son télescope 54

Télescopes géants **56**
Large Synoptic Survey Telescope (LSST) 57
Giant Magellan Telescope 59
Thirty Meter Telescope 63
European Extremely Large Telescope 70

Radiotélescopes **75**
Grandes découvertes de la radio astronomie 76
Types de radio télescopes 83
Particularités des radiotélescopes à antenne parabolique 85
Grands radiotélescopes paraboliques 90

Interféromètres **102**
Les grands interféromètres 102
La recherche d'astéroïdes 110

Télescopes spatiaux **112**
Les bandes de fréquences observées 113
La diversité de leurs instruments 115
Leurs sources d'énergie 119
La cryogénie des instruments 120
Leur orbite 120
Leur durée de vie 122
Les télécommunications avec les télescopes spatiaux 124
Des budgets élevés 126
Les réservations des créneaux 127
Les entrepreneurs 128

Télescopes spatiaux dans le visible **129**
Hubble Space Telescope (1990-2021) 129
Gaia (2013-2023) 139

Télescopes spatiaux dans l'infrarouge 143
Spitzer (2003-2020) 144
Herschel (2009 – 2013) 146
WISE (2010 – 2013) 149
SOFIA (2010-2030) 152
James Webb Space Telescope (2019-2029) 154
Euclid (2020 – 2027) 165
WFIRST (2020-2030) 166

Télescopes spatiaux dans les rayons gamma, X et UV et ondes radio 169
Télescopes spatiaux dans les rayons gamma 170
Télescopes dans les rayons X 182
Télescopes spatiaux dans l'ultra-violet 192
Télescopes spatiaux dans les ondes radio 195

Exoplanètes 198
Les méthodes de recherche d'exoplanètes 201
Les télescopes spatiaux dédiés à la recherche d'exoplanètes 213
Les équations de Franck Drake et Sara Seager et le paradoxe de Fermi 221

Les entrepreneurs 226
La conquête spatiale dans le secteur privé 226
Investissements dans les startups de l'espace 227
Grands projets entrepreneuriaux de la conquête spatiale 232
Les outils de l'astronomie amateur 248
Progrès technologiques issus de la conquête spatiale 249
Epilogue entrepreneurial 252

L'Univers

Vous avez craqué pendant les élections présidentielles françaises avec ses multiples rebondissements. Vous n'en pouvez plus si vous suivez les faits et gestes de Donald J. Trump. Vous en avez ras la casquette de la transformation digitale de charlatans qui ne fait plus rêver. Vous en avez marre d'entendre à tout bout de champs que votre métier va disparaître et être remplacé par une intelligence artificielle développée par un jeune de 19 ans sorti de l'école 42 ? Je vais alléger vos souffrances et vous aérer les neurones en vous permettant de vous évader un peu, tout en restant les pieds sur terre.

Ces lignes vont reprendre et amplement compléter le verbatim de la conférence « **De l'astronomie à l'entrepreneuriat** » que j'ai eu l'immense plaisir de délivrer dans la faille spatio-temporelle du Web2day, le 8 juin 2017 à Nantes. Elle durait une heure, le plus long format de cet événement. J'ai déjà publié les **photos** et mon **support de présentation**. La vidéo produite par le Web2day est également disponible.

Comme beaucoup de curieux sur les sciences et technologies, je m'intéresse à l'infiniment petit tout comme à l'infiniment grand. J'ai déjà eu l'occasion de traiter l'infiniment petit en m'intéressant à la **fabrication des semi-conducteurs** et au **séquençage de l'ADN et à ses applications**. L'astronomie et la conquête spatiale incarnent l'esprit de questionnement, de découverte et d'aventure de l'espèce humaine. Elles sont l'aboutissement ultime de l'entrepreneuriat humain et répondent à ce besoin de repousser nos limites pour comprendre les nombreux mystères de l'Univers et le conquérir à la mesure de nos moyens. Cette quête sert aussi à tenter de répondre à de nombreuses questions existentielles : d'où venons-nous, sommes-nous seuls dans l'univers, l'univers est-il fini ou infini, existe-t-il une planète B pour éventuellement contredire Emmanuel Macron ?

J'ai compulsé des centaines de sources d'informations publiques pour préparer cette conférence du Web2day. La recherche en astronomie a ceci de particulier qu'elle est principalement financée par les derniers publics partout dans le monde et qu'elle donne lieu à une forte coopération internationale. Elle génère mécaniquement une grosse masse de données ouvertes, autant sur les observations de l'espace que sur les moyens de les mener, sans compter les photos ! C'est grâce à cela que j'ai pu creuser de nombreuses technologies du secteur. Il est bien plus aisé de décortiquer le fonctionnement d'un télescope que d'une startup utilisant de l'intelligence artificielle !

Dans cette série d'articles en plusieurs parties – comme d'habitude –, je vais dans l'ordre :

- Faire le point et à grosses mailles sur **ce que l'on sait de l'univers**, et surtout vous faire appréhender l'immensité du sujet. C'est ici-même. C'est de l'ordre de la culture générale et ne vous apprendra pas grand chose si vous vous intéressez déjà à l'astronomie.

- Décrire les technologies mises en œuvre dans les moyens d'observation terrestres de l'univers, à savoir, les **télescopes** et les **radio-télescopes**. Ces derniers étaient un peu mystérieux pour moi, surtout pour ce qui est des techniques de reconstitution d'images alors qu'ils n'ont pas de capteurs photo.
- Passer aux **télescopes spatiaux** qui permettent d'aller encore plus loin en distance et dans le passé de l'univers avec une focalisation particulière sur un véritable bijou technologique : le James Webb Space Telescope qui sera lancé en 2018. Et au passage, évoquer la notion de gestion du risque dans ce genre de projet à près de $10B.
- Puis traiter de la **découverte des exoplanètes** et des instruments qui y sont dédiés, tout en évoquant les équations de Drake, Seager puis le paradoxe de Fermi qui évaluent d'un côté les chances de trouver des vies extraterrestres dans la Voie Lactée et, de l'autre, qui expliquent que l'on n'en ai pour l'instant toujours pas encore croisé. Même dans l'Area 51 !
- Enfin, terminer avec les **entrepreneurs privés de la conquête spatiale**, et pas seulement Elon Musk. Nous verrons que l'espace est devenu une branche à part entière de l'entrepreneuriat technologique, avec quelques particularités et des métaphores intéressantes sur l'entrepreneuriat « terrestre » qui reviendront sur les articles précédents. A ceci près que ces entrepreneurs se contentent d'essayer d'aller en orbite basse, de conquérir Mars voir d'atteindre Proxima du Centaure. Il n'est pas encore question d'aller plus loin. Et il y a même des margoulins de l'espace !

Finalement, je vous propose donc une longue thèse hors-sujet en une dizaine de parties, puis une antithèse et une synthèse dans la dernière partie qui nous rapprochent du sujet. Le voyage et le jeu en valent la chandelle ! Le principe de ces interventions et textes est toujours de vulgariser un domaine scientifique qui comprend une part de mystères technologiques.

Vous pourriez obtenir le même type d'informations en parcourant régulièrement la presse scientifique (Science et Avenir, Science & Vie, La Recherche, Pour la Science, …) mais, généralement, en pièces détachées et pas avec le même regard technologique. Ces textes donnent en effet la part belle aux instruments de l'astronomie.

Venant du numérique, on peut ainsi se poser des questions pratiques peu évoquées dans ces supports. Par exemple, à quoi ressemblent les capteurs photo des télescopes spatiaux, quels volumes de données sont générés par ces télescopes, comment sont-ils transmis sur terre et comment y sont-ils traités ? Et enfin, quelles en sont les éventuelles retombées industrielles qui affectent notre vie dans ce bas monde terrestre ?

L'astronomie commence avec les astronomes !

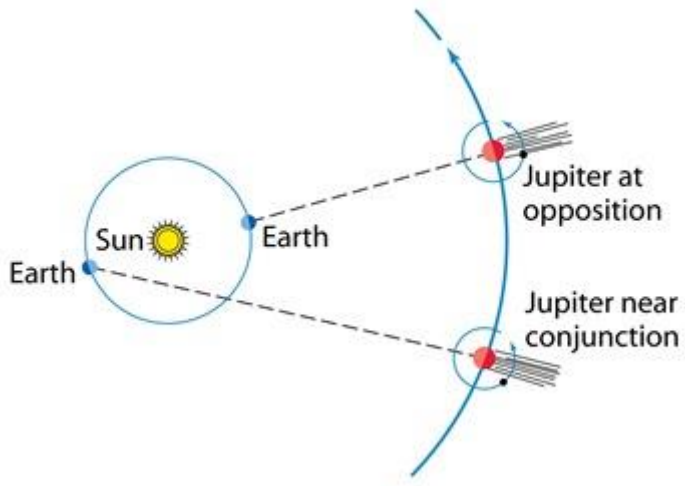
Comme tous les domaines, l'astronomie est avant tout une aventure humaine. On compte environ 10000 astronomes et astrophysiciens professionnels dans le monde, les 2/3 aux USA et quelques centaines en France, qui sont répartis dans différentes villes et institutions tels que le CNRS ou le CEA. Il faut y ajouter les ingénieurs des entreprises du spatial, à commencer par ceux d'Arianespace, d'Airbus, de Thalès et

de nombreux sous-traitants spécialisés dans des technologies de pointe. Il s'agit, même de manière extensible, d'une profession assez rare. Mais on compte un bien plus grand nombre d'astronomes amateurs qui, armés de leur modeste télescope, scrutent le ciel ou bien analysent les données publiques issues des grands télescopes. Ils contribuent au développement du savoir. Ils détectent par exemple fréquemment des astéroïdes. Ils sont l'équivalent des contributeurs individuels à des projets open source dans le logiciel.

Depuis l'antiquité, les astronomes essayent de comprendre l'univers. Cela requiert une approche scientifique : de l'intuition, des mathématiques, de la géométrie, de la physique et de l'observation permettant de vérifier des théories élaborées sur le fonctionnement de l'univers. J'admire ainsi les astronomes d'avant la Renaissance qui observaient patiemment les étoiles et savaient distinguer les planètes du système solaire des étoiles de la Voie Lactée. Il a fallut quasiment deux millénaires pour que **l'héliocentrisme** soit accepté par l'ensemble des scientifiques, sans compter le bien récalcitrant Vatican. Bien plus tard, en 2015, le **LIGO** a permis de vérifier la théorie d'Einstein sur les ondes gravitationnelles un siècle après son élaboration.

Passons sur les Ptolémée, Galilée, Newton et autres Copernic. Après avoir parcouru quelques histoires de l'astronomie au travers des âges, quelques personnages peu connus m'ont particulièrement intrigué :

- **Ole Roemer**, un Danois, qui su déterminer la vitesse de la lumière au 17eme siècle en observant les éclipses de la lune Io de Jupiter. Il a obtenu un résultat valable à 26% près (190 000 km/s vs 300 000 km/s) ce qui est une performance. Surtout dans la mesure où il ne devait disposer que d'une simple lunette de Galilée et du calcul à la main pour y parvenir. Chapeau bas !



- **Albert Michelson**, un américain qui détermina cette vitesse avec précision en 1887, soit avec moins de 0,1% d'erreur par rapport aux mesures modernes. Il était alors sous-officier de la Navy. Il obtint le Prix Nobel de physique en 1907. La méthode s'appuyait sur un système de miroirs rotatifs et d'interférométrie.
- **Georges Lemaitre**, un prêtre Belge formé à Harvard et Cambridge, puis travaillant au MIT, qui théorisa le big bang en 1927. Une théorie qui fut validée progressivement les décennies suivantes, et nommée "big bang" en 1949. En 1929, Edwin Hubble identifia le "red shift", le décalage vers le rouge de la lumière émise par les galaxies distantes, expliquant leur éloignement et l'expansion de l'Univers.

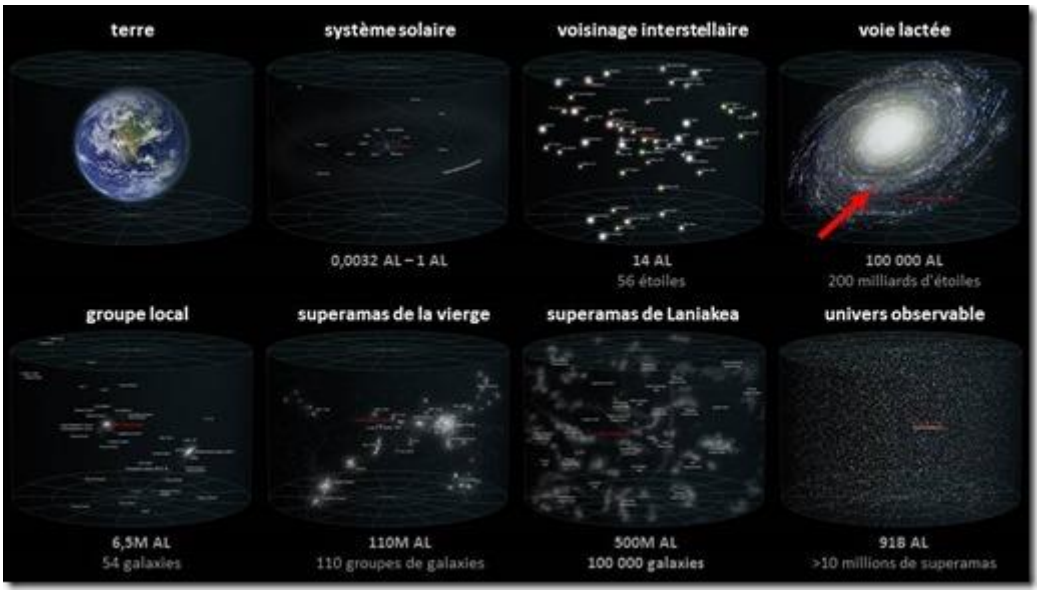
Plus récemment, des femmes brillantes sont venues apporter leur contribution à une histoire trop souvent bâtie uniquement par des hommes :

- **Vera Rubin** : une américaine qui travaillait sur la rotation des galaxies et en a inféré l'existence de la matière noire en 1976, seul moyen d'expliquer leur cohésion. Elle est décédée en décembre 2016.
- **Amy Mainzer**, une autre américaine qui a contribué à la création du télescope spatial Spitzer qui explore l'univers dans l'infrarouge. Lancé en 2003, c'est l'un des premiers à avoir détecté des exoplanètes.
- **Sara Seager**, également américaine, qui a créé en 2013 une nouvelle équation de Drake pour prédire le nombre de planètes dotées de la vie dans la Voie Lactée.

On pourrait aussi y ajouter **Ralph Alpher** et **Robert Herman** qui, en 1948, prédisent les scénarios du big bang avec la température résiduelle de l'univers lorsqu'il est devenu transparent après le big bang (-240°C) ainsi que le fond diffus cosmologique (160 GHz). Après son expansion, la température de l'Univers devait descendre à -270°C. Ces théories sont vérifiées fortuitement en 1964 par **Arno Allan Penzias** et **Robert Woodrow Wilson**. Ils ont pour cela obtenu le Prix Nobel de Physique en 1978. Les astrophysiciens ont ceci de particulier qu'ils ont une forte capacité à conceptualiser le fonctionnement de la matière à très bas niveau, la physique des particules mise en œuvre dans la création des atomes, puis à bâtir des théories générales, et à les vérifier ensuite. Ce sont ces théories appliquées au big bang qui permettent par exemple d'expliquer le ratio entre hydrogène et hélium dans les étoiles et galaxies.

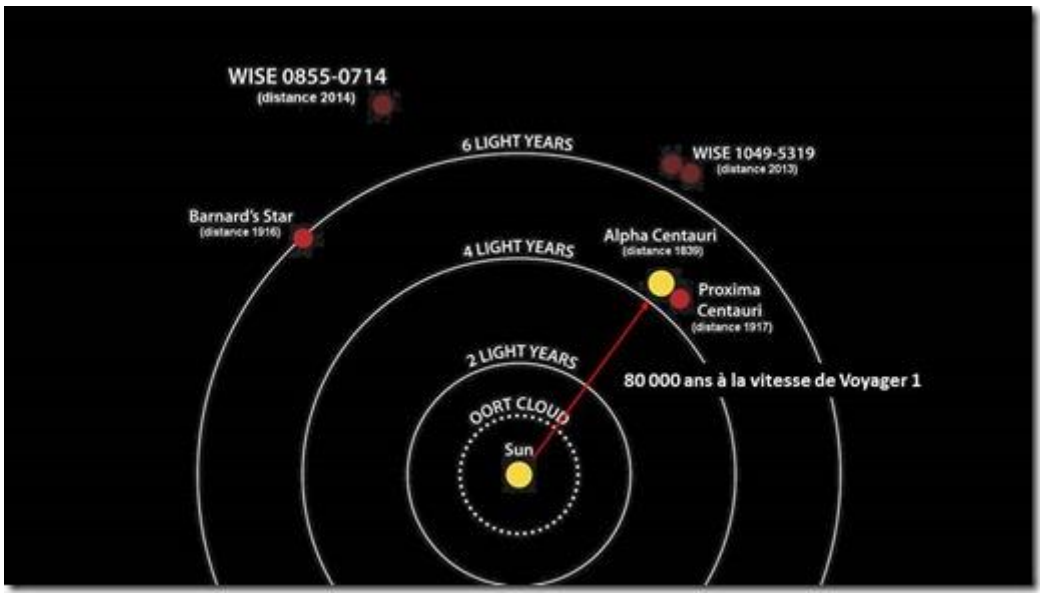
Ce que l'on sait des dimensions de l'univers

Avant de décrire en détail les technologies qui permettent de l'observer, je vous propose un petit tour de l'Univers observable en partant du système solaire. Nous allons naviguer du plus petit au plus grand, ce qui nous rappellera que nous ne sommes pas grand-chose. C'est un bel exercice d'humilité. Le schéma ci-dessous est une version documentée d'un **schéma issu de Wikipedia**.

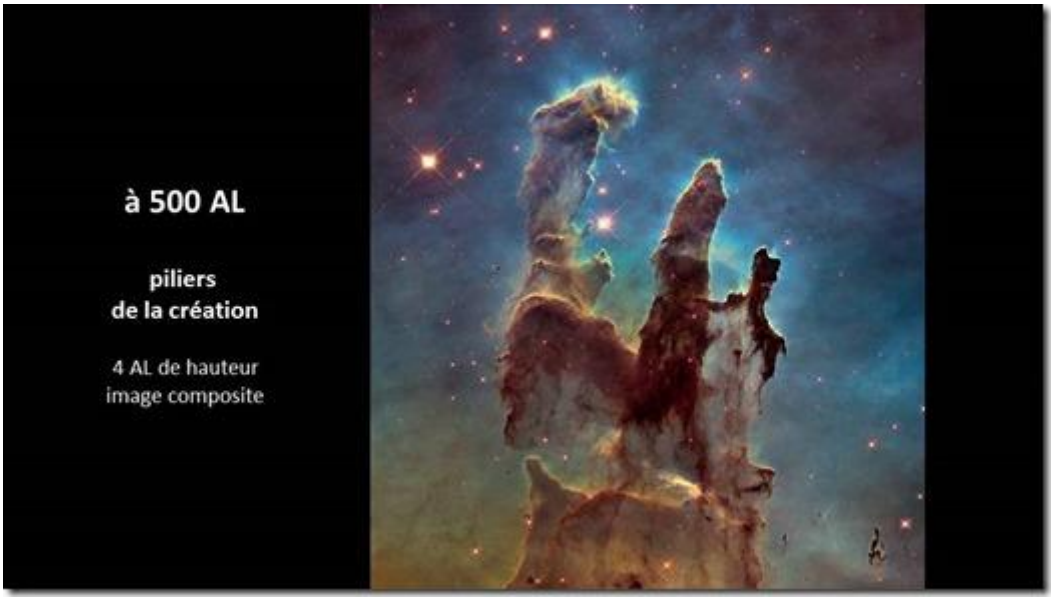


J'utilise l'année lumière comme unité de référence. Une année lumière fait 9 461 milliards de kilomètres. Le système solaire fait juste deux dizaines d'heures-lumière de diamètre. La Terre n'est qu'à 150 millions de km du soleil, qui ne fait que 1,4 millions de km de diamètre, soit quatre fois la distance entre la terre et la Lune. Le système solaire ne fait que 3% d'une année lumière de diamètre jusqu'à Pluton. Si l'on y intègre le nuage de Oort qui entoure le système solaire, bien au-delà de l'héliosphère, et qui contient des comètes en formation, le diamètre complet du système solaire dépasse l'année lumière.

Ensuite, dans la **proche banlieue stellaire** du soleil, on ne trouve que 54 étoiles distantes de moins de 14 AL. Ce n'est pas énorme compte tenu des distances. L'étoile la plus proche est Alpha du Centaure, à 4,37 AL. A la vitesse des sondes spatiales actuelles, il faudrait 80 000 années pour s'en approcher. On a déjà trouvé quelques exoplanètes dans cette proche banlieue mais pas encore de planètes où une vie carbonée pourrait exister.

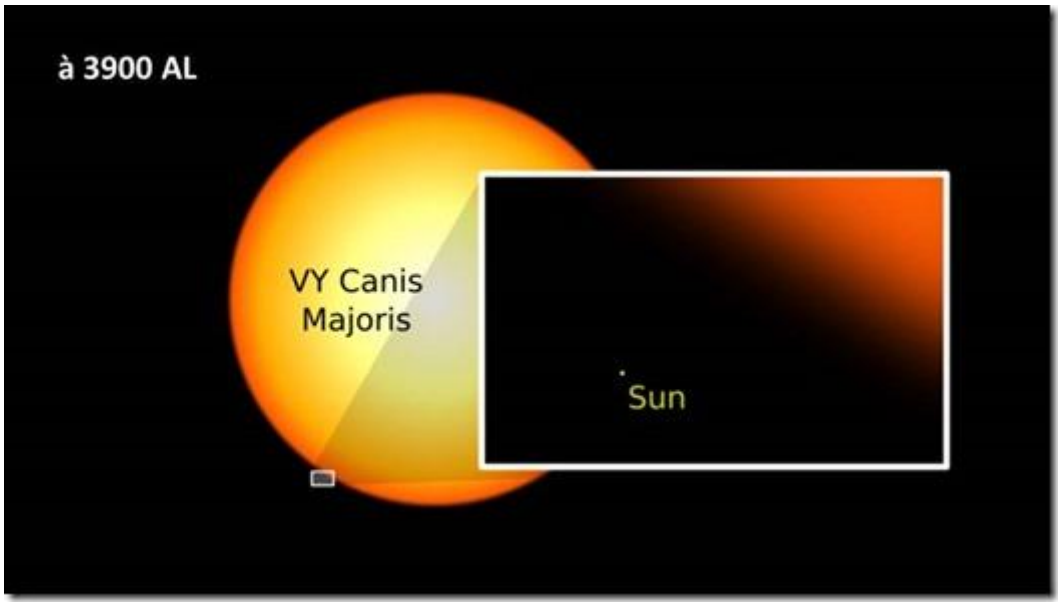


Lorsque l'on s'éloigne encore plus, on trouve évidemment d'autres étoiles mais aussi de nombreuses nébuleuses, de gigantesques nuages de poussières ainsi que des restes d'étoiles ayant explosé, les supernovas. L'un des plus beaux de ces nuages qu'il soit possible d'observer, notamment avec le télescope spatial Hubble s'appelle les « **Piliers de la création** ». Ils sont situés à 500 AL du soleil et font 4 AL de hauteur. Cette belle image est une composite d'images de sources différentes et dans différentes longueurs d'ondes visibles et non visibles, que nous décortiquerons plus tard dans cette série d'articles.



Si l'on s'éloigne encore un peu, à 3900 AL, on trombe sur l'étoile géante **Canis Majoris** qui est l'une des plus grosses de la Voie Lactée. C'est une super géante rouge dont le diamètre est d'environ 600 fois celui du soleil, soient 2 milliards de km (vs 1,4 millions de km). La périphérie de cette étoile correspond à l'orbite de Saturne. Mais sa densité est très faible, de 5 to 10 mg/m^3, soit bien plus faible que celle de l'atmosphère terrestre en haute altitude. Cette étoile ressemble à ce que deviendra notre soleil lorsqu'il s'éteindra d'ici quelques milliards d'années. Période où la Terre

y aura été engloutie sachant que la vie y aura disparu bien avant avec le réchauffement planétaire qui sera provoqué non pas par l'Homme mais par l'expansion du Soleil.

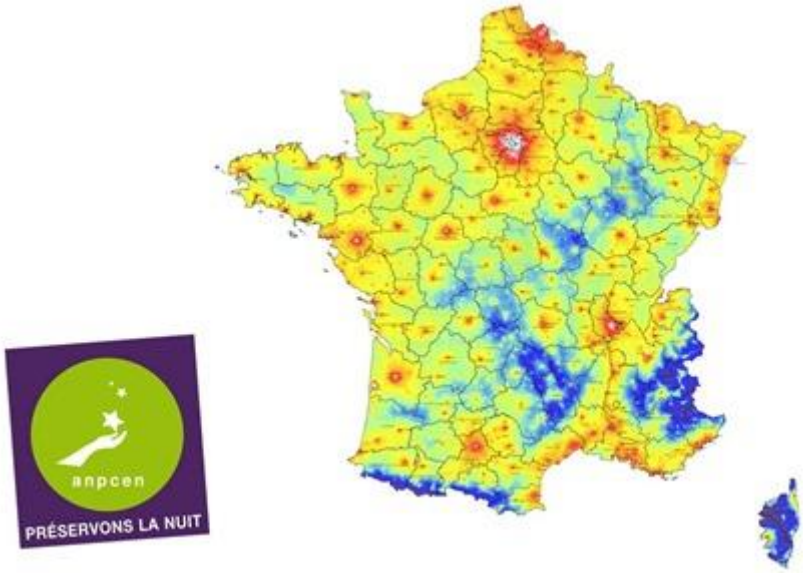


On trouve bien d'autres monstres dans la Voie Lactée : au moins un gros trou noir en son centre ainsi que des pulsars qui sont des étoiles à neutrons tournant rapidement sur elles-mêmes une fois par seconde voire moins et émettant un fort rayonnement électromagnétique. Ce **bel article** de Vincent Pinte-Deregnaucourt fait un inventaire plus détaillé des composantes de la Voie Lactée.

La Voie Lactée est notre galaxie. Sa structure n'a été découverte que tardivement, dans les années 1920, notamment par Hubble. Elle fait 100000 AL de diamètre et comprend entre 200 et 400 milliards d'étoiles de taille et maturité variables et au moins autant de planètes. Notre soleil est situé à environ 26 000 AL du centre de la galaxie. Celui-ci est difficile à localiser avec précision. La cartographie exacte de la Voie Lactée est d'ailleurs encore incomplète, surtout pour les bras qui sont situés de l'autre côté de son centre vis à vis du Soleil.

Que voit-on de la Voie Lactée au juste en observant le ciel ? Dans une zone dénuée de pollution lumineuse, nous pouvons observer la trainée d'étoiles de la Voie Lactée, comme ici dans cette magnifique photo prise en Australie. Elle correspond à la tranche de la Voie Lactée dans laquelle nous sommes. Lorsque l'on regarde dans une autre direction, on peut surtout observer une partie moins dense de la Voie Lactée. La pollution lumineuse empêche de bénéficier de ce genre de vue dans les zones habitées. J'avais eu l'occasion de faire une belle observation de la Voie lactée en Afrique du Sud en 2001 et c'est tout bonnement merveilleux et inoubliable.

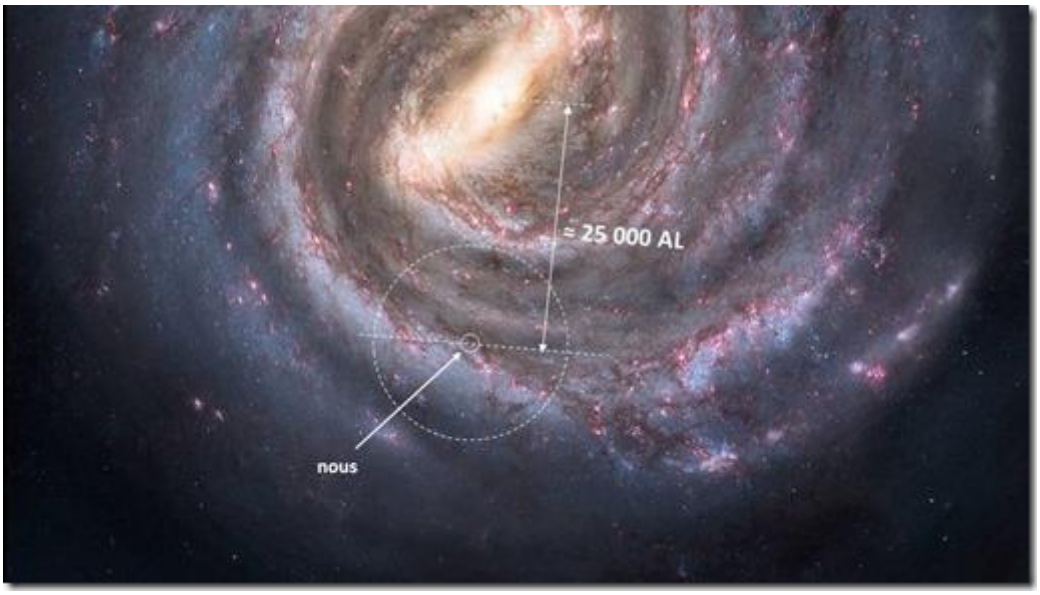
Il n'y à qu'à peine 10% du territoire français qui soit potable pour des observations astronomiques à l'œil nu. Il s'agit essentiellement des zones montagneuses et d'une bonne partie de la Corse. A l'occasion de l'élection présidentielle 2017, j'ai d'ailleurs découvert l'association de lutte contre la pollution lumineuse, l'**ANPCEN**. Son programme s'était même retrouvé dans celui de Jean-Luc Mélenchon ! Evidemment, sans que cela ne génère d'écho particulier, autant dans les médias que dans les discours du candidat. C'est un exemple parmi d'autres des conséquences hasardeuses du lobby associatif vis à vis des politiques.



Dans cette vue de la Voie Lactée, fictive, ou tout du moins inspirée de ce que l'on en sait, vous trouvez la position du Soleil dans l'un des bras de la Voie Lactée. Le petit cercle indique la partie de la voie lactée que l'on voit à l'œil nu lors d'une nuit étoilée et sans pollution lumineuse, ce qui correspond à un rayon d'environ 500 AL. Certaines étoiles très lumineuses sont jusqu'à 10 000 AL. Le soleil tourne en fait autour du centre de la Voie Lactée, mais on ne s'en rend pas compte car la période de rota-

tion, l'année galactique, est de 250 millions d'années solaire. C'est le temps qu'il faut pour que le soleil fasse le tour complet de la voie lactée.

Dans les photos du centre de la Voie Lactée prises dans le visible, de la terre ou de l'espace, le centre de la voie lactée est un mélange de bande d'étoiles et de bandes obscures. Elles empêchent d'observer le centre de la galaxie. Il s'agit de grands nuages de poussière. Le centre de la Voie Lactée comprendrait un gros trou noir de 2,6 millions de fois la masse du Soleil. Mais il n'est probablement pas le seul.



A noter que les ondes électromagnétiques d'origine humaine n'ont parcouru à ce jour qu'environ 150 années-lumières, correspondant à l'invention des émetteurs radios sur terre. Il s'agit de l'empreinte la plus éloignée de la civilisation humaine dans la galaxie. Sachant que les pyramides et autres constructions humaines plus anciennes sont difficilement observables de l'espace lointain ! En 1974, l'initiative SETI a envoyé un message structuré vers l'espace à partir du radio-télescope d'Acirebo de Porto Rico. Il a été envoyé de manière très directionnelle vers un cluster d'étoiles, dit Messier 13, qui contient tout de même 300 000 étoiles. Petit détail d'importance : ce cluster est situé à 22 200 AL de la Terre. Donc, il ne recevra notre message que dans 22 157 années. Et si quelqu'un nous réponds, nous recevrons un signal dans 44357 années. Les temps cosmiques sont bien longs par rapport au temps de la civilisation humaine.

Par contre, les caractéristiques favorables de la Terre sont détectables de plus loin. Et elles sont bonnes depuis au moins 3,8 milliards d'années, malgré les nombreuses fluctuations que la Terre a connues, par exemple dans sa température, et la composition de son atmosphère qui a varié dans sa teneur en oxygène et CO2. Donc, notre banlieue de la Voie Lactée doit pouvoir détecter la Terre et si on y trouve une civilisation. Mais pas forcément dans n'importe quelle direction puisque les techniques de détection d'exoplanètes que nous verrons dans une autre partie de cette série d'article limitent celle-ci aux plans de rotation des planètes autour de leur étoile qui croisent l'axe point d'observation-soleil. Comme nous le verrons aussi, les **exoplanètes détectées** récemment sont situées à une relative proximité du soleil dans la voie lactée, et sont situées dans la limite du second cercle en pointillé (10 000 AL de rayon). Les

plus proches sont à respectivement 4,2 AL et 10 AL. On ne risque à priori pas de détecter d'exoplanètes dans d'autres galaxies qui sont trop lointaines pour ce genre d'observation. Ce qui nous rappelle que la recherche de planètes habitables et de planètes abritant une vie extraterrestre est très limitée en distance dans l'espace observable. Elle ne couvre qu'un tout petit bout de la Voie Lactée.

Eloignons-nous encore un peu. La Voie lactée est située dans un groupe local de galaxies qui fait un diamètre de 6,5 millions d'AL et comprend 54 galaxies. La plus importante des galaxies de ce groupe est **Andromède**. Elle comprend cinq fois plus d'étoiles que la Voie Lactée et fait 140 000 AL de diamètre. A l'échelle de l'histoire, elle est assez éloignée : 2,5 millions d'AL ! La lumière que l'on reçoit de cette galaxie correspond à l'arrivée d'Homo Habilis, un ancêtre d'Homo Erectus puis Néanderthal et Homo Sapiens.

La photo ci-dessous a été prise par le télescope spatial Hubble. Vous pouvez aussi profiter de cette très belle **vidéo d'observation** d'Andromède qui rassemble des milliers de photos prises par Hubble. Elle est visualisable en 4K si votre installation le supporte.

Quand on s'éloigne encore, on se retrouve dans un superamas (supercluster), un groupe de groupes de galaxies, celui de la Vierge. Il comprend 110 groupes de galaxies du style du groupe local dans lequel se trouve la Voie Lactée et Andromède. Ce superamas fait 110 millions d'AL de diamètre.

Ce superamas est lui-même intégré dans le superamas de Laniakea, qui a été décrit en septembre 2014 par l'américain R. Brent Tully et la lyonnaise **Hélène Courtois.** Leur étude est basée sur la vitesse relative des galaxies les unes par rapport aux autres. Ce superamas de Laniakea comprend la bagatelle de 100 000 galaxies.

Dans Laniakea, on trouve notamment le superamas de **Persée** (Abell 426). C'est le plus gros objet observable de l'univers. Il contient des milliers de galaxies de tailles diverses. Son image ci-dessous ne visualise pas ses galaxies mais les gaz chauds qu'il contient. Elle a été obtenue dans les rayons X par le télescope spatial **Chandra** et

avec un temps de pose de 16 jours. Cette structure fait un million d'années lumières de diamètre. A côté, notre gigantesque Voie Lactée est une naine ! Il est situé à 240 millions d'années lumières, 90 fois plus loin que la galaxie Andromède.

Bon, et puis ensuite, on s'éloigne encore, on découvre d'autres galaxies en se rapprochant de l'horizon de temps que constitue le big bang, puisque plus loin vont nos observations, plus on remonte dans le temps. La galaxie la plus éloignée que l'on ait pu observer, GN-z11, est à 13,4 milliards d'AL, environ 400 millions d'années lumières après la naissance supposée de l'univers.

Compte-tenu de sa dilatation depuis sa création, l'univers observable fait 90 milliards d'années lumières de diamètre. Une galaxie qui est à 13,5 milliards d'années lumières était à cette distance là au moment où elle a émis sa lumière observée. Mais elle a bougé depuis et se trouve maintenant à environ 45 milliards d'AL. D'après les observations et estimations les plus récentes, l'univers observable comprendrait 2 trillions de galaxies.

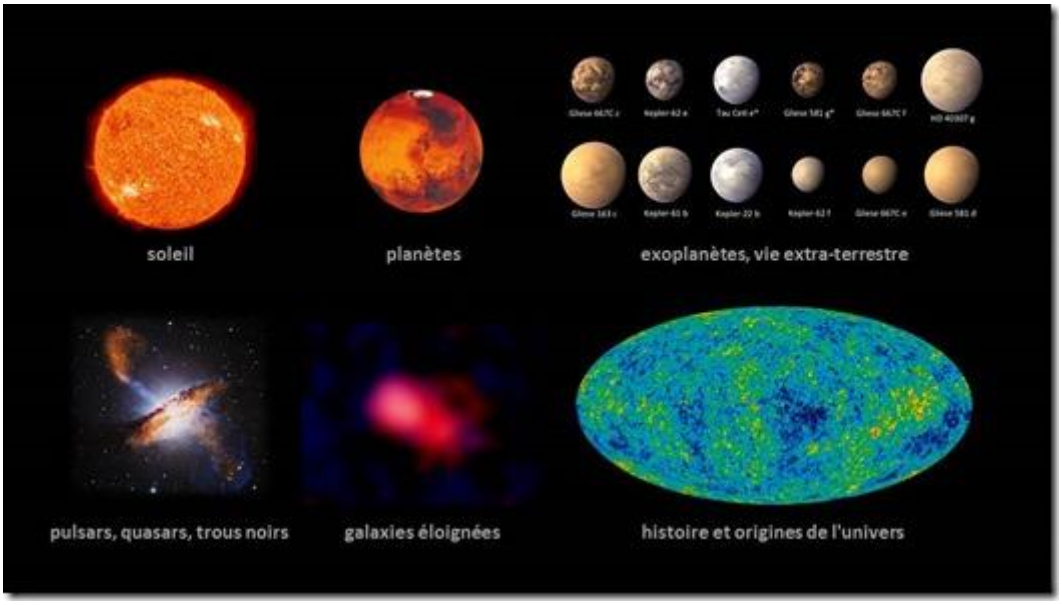
Quels sont les grands objectifs actuels de l'astronomie ? En gros, il s'agit déjà de bien comprendre le fonctionnement de notre propre étoile, le Soleil. Plusieurs télescopes sont braqués dessus en permanence pour l'observer et notamment détecter ses fluctuations. Notre climat est en effet sensible à ses variations. Un orage électromagnétique issu du Soleil peut aussi à tout moment détruire tous les processeurs et mémoires sur Terre malgré la protection de sa magnétosphère.

Ensuite, on continue d'explorer sans relâche les autres planètes du système solaire et leurs propres satellites. Mars est une destination future de l'exploration humaine, après les nombreuses sondes que l'on y a fait atterrir comme Curiosity. La planète contient de l'eau et aurait pu voir des formes de vie primitives y émerger. Certains comme Elon Musk rêvent même de terra former la planète et d'en faire une colonie humaine durable. C'est probablement le seul endroit du système solaire où il est envisageable de le faire, mais cela relève tout de même plutôt de la science fiction au re-

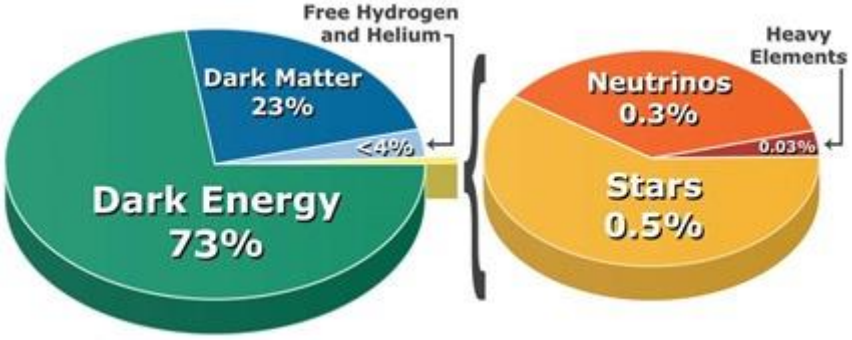
gard des conditions qui règnent sur cette planète. Et encore, c'est loin d'être une panacée.

Au-delà du système solaire, les recherches d'exoplanètes vont bon train. Les astronomes cherchent en priorité des exoplanètes ressemblant de près à la Terre ou tout du moins capables d'y héberger une vie équivalente à la notre. Il faut donc une gravité de préférence voisine de celle de la terre, une atmosphère, de l'oxygène, du carbone, de l'eau liquide et une magnétosphère pour protéger la vie des rayons cosmiques. La distance entre la Terre et ces éventuelles exoplanètes reste cependant énorme pour les rendre colonisables. Il existe des barrières pour l'instant insurmontables côté distance, temps et énergie pour pouvoir ne serait-ce que les explorer.

On cherche ensuite à mieux comprendre les divers objets qui constituent notre galaxie, les trous noirs, les pulsars, puis à comprendre les mécanismes de la naissance comme du crépuscule des étoiles et des galaxies. Les temps évalués sont "cosmiques", c'est-à-dire de plusieurs ordres de grandeur supérieurs à l'histoire de l'Humanité. C'est donc un exercice plus intellectuel que pratique.



En allant plus loin et en remontant le temps dans l'histoire de l'Univers, on cherche à en comprendre le processus de formation. Celle de la matière, de la lumière, puis des étoiles et des galaxies. On cherche aussi à trouver la forme que prend la fameuse matière noire qui expliquerait la cohésion des galaxies.



Cette matière noire est cependant aussi difficile à trouver que l'intelligence humaine en période électorale. La première pourrait bien ne pas exister si on reformulait les lois de la gravité. C'est l'hypothèse **MOND** de Mordechai Milgrom, exposée en 1983, affinée par **Erik Velinde** en 2010 et validée partiellement **en 2016** (cf **New theory of gravity may explain dark matter** qui date de novembre 2016). De son côté, Margot Brouwer, de l'observatoire de Leiden aux Pays-Bas, a observé la distribution de matière dans 30 000 galaxies et **en conclut** qu'il n'y a pas de "naissance" de l'Univers et que celui-ci serait en fait éternel. Bref, en astronomie comme ailleurs, il ne faut jamais s'asseoir sur ses certitudes !

Télescopes terrestres

Après une première partie dédiée à un débroussaillage de gros des dimensions de l'Univers, nous allons tout de suite partir à son exploration, et surtout pour aller aussi loin que possible. On trouve quelques entrepreneurs français dans ce domaine que je vais citer, qui cherchent à rendre plus accessibles les télescopes d'amateurs. Le plus spectaculaire se situe cependant dans les grandes installations de télescopes géants et les technologies associées. L'une des histoires les plus fascinantes est cependant celle des capteurs CCD et CMOS issus des avancées dans les télescopes, satellites et sondes spatiales. Les appareils photos de nos reflex et smartphones sont en effet de lointains descendants de technologies à l'origine développées pour l'exploration spatiale !

Les moyens d'exploration de l'Univers

Nous savons que l'Homme observe le ciel depuis au moins des milliers d'années. Au Néolithique, les sites de Stonehendge, Goseck, Nabta Playa témoignent d'observations oculaires permettant de prédire les saisons pour l'agriculture. Dans l'antiquité l'essor de la géométrie a permis les premières descriptions réalistes du système solaire. Et depuis le XVIIe siècle, avec Galilée et l'apparition de la lunette astronomique, les outils d'observation ont permis à l'Homme d'élargir constamment sa compréhension de l'Univers dont les dimensions se sont considérablement accrues au XXe siècle.

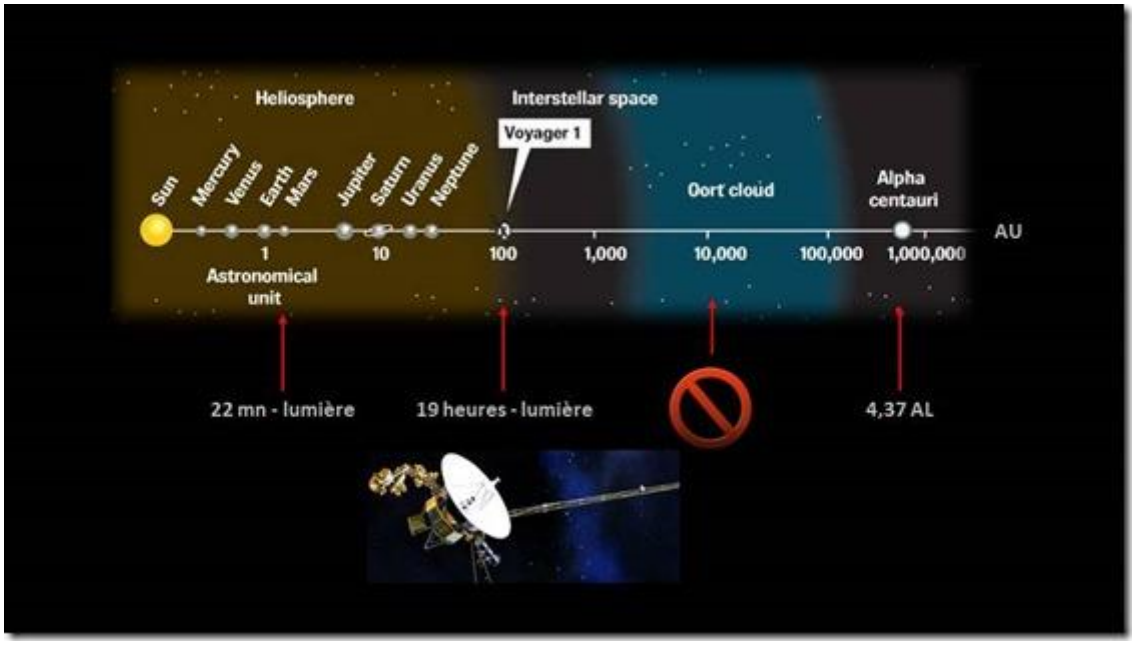
Nous disposons aujourd'hui, dans la pratique, de quatre grandes catégories d'outils qui vont du plus près au plus loin pour explorer l'Univers

L'Homme a toujours voulu comprendre comme l'Univers était structuré et partir à sa découverte. Mais l'Univers est immense ! Nous disposons, dans la pratique, de quatre grandes catégories d'outils qui vont du plus près au plus loin pour explorer l'Univers.

Les **vols habités** nous mènent habituellement en orbite basse terrestre, comme dans la station spatiale ISS où Thomas Pesquet a séjourné six mois. L'Homme est allé sur la Lune ou autour d'elle dix fois entre 1968 et 1972, à 384 400 km. Nous ambitionnons d'aller sur Mars, ce qui est une sacrée paire de manche car c'est très loin – plus de 7 mois de voyage – et très coûteux – plus de 100 milliards de dollars – pour s'y rendre avec un équipage humain. La distance entre Mars et la Terre ? Elle va de 55 à 400 millions de km selon la position orbitale des deux planètes. Et au-delà ? A ce jour, rien n'est prévu car rien n'est possible au vu de nos connaissances et des technologies de propulsion que nous maîtrisons. Les vols habités sont donc contraints à un petit bout du système solaire qui n'est qu'une particule de poussière à l'échelle de la Voie Lactée comme de l'Univers.

Les **sondes spatiales** nous ont permis d'explorer le système solaire et son proche voisinage. Les sondes Voyager 1 et 2 sont celles qui sont allées le plus loin (*schéma ci-dessous*). Nous avons plein de sondes et de robots sur Mars. Il y en a autour de Jupiter ou Saturne. D'autres observent le Soleil de manière continue. Mais aucun objet

d'origine humaine n'est pour l'instant véritablement sorti du système solaire. Lancé en 1977, Voyager 1, est tout juste en train de sortir de l'héliosphère. Il a parcouru 100 fois la distance Terre-Soleil, soient 15 milliards de km. Dans plus de 500 ans, il arrivera dans le nuage d'Oort, une zone périphérique du système solaire qui contient des blocs de glace étant à l'origine de la création de comètes. Voyager 1 sortira véritablement du système solaire d'ici environ 20 000 ans. S'il allait dans sa direction, ce qui ne me semble pas être le cas, Voyager 1 atteindrait l'étoile la plus proche, Proxima du Centaure, d'ici 80 000 longues années. Cette étoile qui est à 41 000 milliards de kilomètres du Soleil. La source d'énergie principale de Voyager est une pile au plutonium qui sera épuisée à partir de 2025. A partir de ce moment-là, les sondes Voyager ne nous enverront plus d'informations tout en poursuivant inlassablement leur chemin.

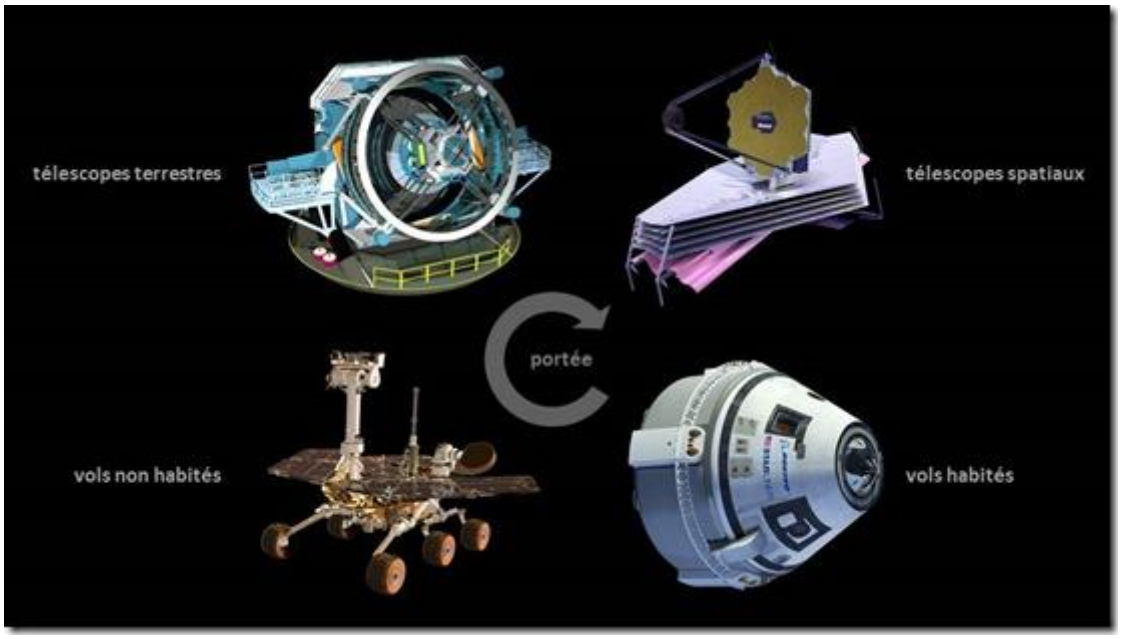


Les meilleurs espoirs en termes de vitesse avec des techniques non encore éprouvées comme la propulsion par antimatière nous permettraient d'atteindre 1/10 de la vitesse de la lumière. Donc, le voyage vers la première étoile durerait 40 ans. Et bien plus pour la première exoplanète habitable. Ray Kurzweil évoque une solution dans ses ouvrages : envoyer plein de sondes dans toutes les directions pour explorer la Voie Lactée. Mais il oublie l'écueil de la source d'énergie. Sachant qu'entre les étoiles, il est difficile de recueillir de l'énergie ambiante.

Les **télescopes terrestres** permettent d'explorer une bonne part de l'Univers. Leur portée est bien plus grande que les deux précédents outils puisqu'elle s'évalue en milliards d'années lumières. Ils fonctionnent dans le visible ainsi que dans les ondes radio, les autres longueurs d'onde étant filtrées par l'atmosphère terrestre. Il existe de nombreuses sortes de radio-télescopes, à une ou plusieurs antennes, paraboliques ou non. Plusieurs posts sont consacrés à ces différentes catégories de télescopes dans cette série.

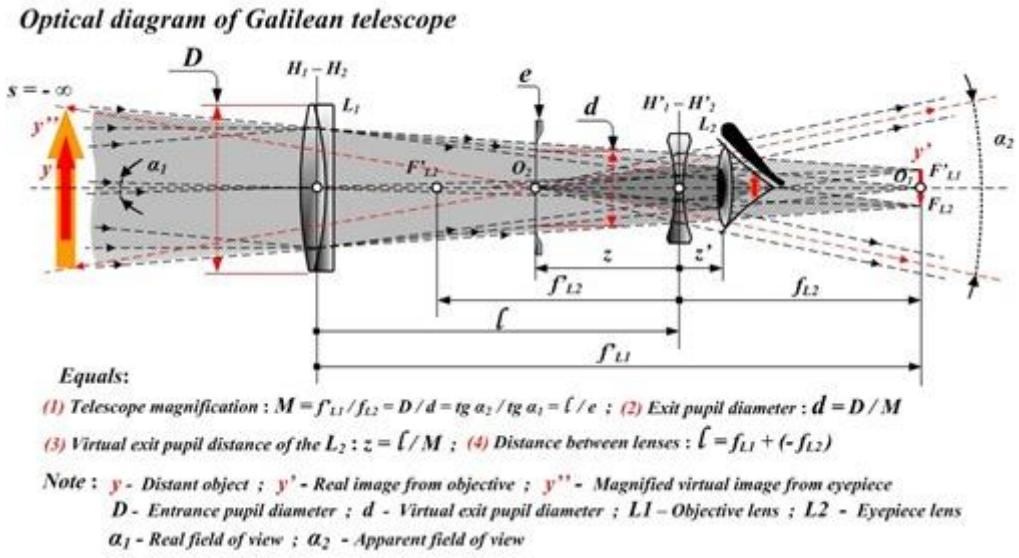
Les **télescopes spatiaux** permettent d'aller encore plus loin en s'affranchissant de l'impact de l'atmosphère et de remonter encore plus dans le temps de l'histoire de

l'Univers. On dépasse les 13 milliards d'années lumière en distance perçue. Dans la pratique, l'astronomie, la science des astres, n'est pratiquement expérimentable qu'avec des télescopes. Nous n'avons pas d'autres moyens à disposition pour observer les étoiles et les galaxies. Nous exploitons tout le spectre électromagnétique pour tirer un maximum d'informations sur les étoiles et galaxies. Nous verrons que celui-ci a beaucoup de ressources à nous apporter.



L'histoire des télescopes terrestres

L'histoire du télescope remonte aux débuts du XVIIe siècle avec une série rapprochée d'inventions. Le principe de la lunette télescopique est d'abord inventé en 1608 aux Pays Bas par Hans Lippershey, Zacharias Janssen, et Jacob Metius. Il est ensuite perfectionné en 1609 par Galilée qui créé la première lunette d'observation télescopique, à base de lentille convexe pour l'objectif et concave pour le viseur. La lunette utilise le principe de la réfraction optique, perfectionné au XVIe siècle. Galilée créé plusieurs lunettes dont le grossissement passe progressivement de 3 à 30.



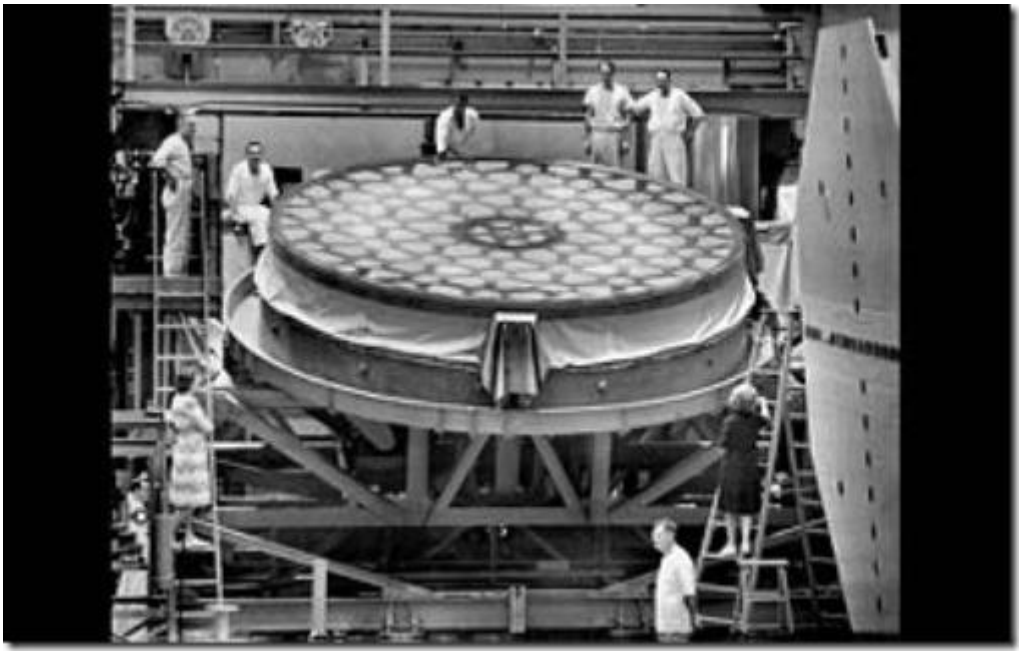
Galilée utilise ses lunettes pour observer l'espace et découvrir les phases de Vénus. Cela lui permet de confirmer les théories héliocentriques. Il découvre aussi quatre satellites de Jupiter. Ceux-ci amenèrent le danois Oto Reimer à déterminer la vitesse de la lumière en 1674 comme nous l'avons vu dans la partie précédente. Le télescope est amélioré peu après en 1611 par Kepler qui utilise un objectif convexe pour le viseur, donnant un résultat plus précis, notamment lors des changements de focale. En effet, le système de viseur concave de Galilée pose un tas de problèmes de focalisation selon l'allongement de la lunette [source : **Galileo, the Telescope ans the Science of Optics in the Sixteenths Century**].

Les télescopes à réfraction furent en œuvre jusqu'à la fin du 19e, culminant en 1888 avec le lancement du télescope de l'observatoire de Lick situé en montagne en Californie et doté d'une optique de 92 centimètres de diamètre (*ci-dessous*). Il permit la détection d'astéroïdes, de comètes, des structures de la Voie Lactée et du déplacement des étoiles. C'est en 1839 que fut produit la première photographie prise avec un télescope, celle de la Lune, par François Arago. La photographie argentique fut un progrès clé vis à vis de la vision humaine, notamment en permettant des temps de pose longs.

La seconde grande génération de télescopes utilisa des miroirs au lieu de lentilles, permettant de s'affranchir des défauts inhérents à la diffraction de la lumière, comme l'aberration chromatique, et d'augmenter leur sensibilité tout comme la portée. Le premier de ces télescopes est créé par Newton en 1668 avec un miroir de 33 mm de diamètre. Plus tard, le Léviathan de Parsontown en 1842, doté d'un miroir de 1,83 m de diamètre, permis la découverte des lunes de Neptune et Uranus. Pendant la seconde moitié du 19e siècle, les miroirs furent construits avec un revêtement en argent permettant de perdre moins de lumière. En 1896 fut construit un télescope de ce type, toujours à l'observatoire de Lick, et avec un miroir principal de la même taille. Son guidage manuel permettant de suivre les déplacements de la voute céleste au gré de la

rotation de la terre sur elle-même et autour du soleil et rendit possible la prise de clichés photographiques (argentiques, évidemment) avec des poses de plusieurs heures. Ce télescope permis la découverte de l'immensité de notre galaxies et d'autres galaxies.

La taille des télescopes de ce genre continua d'augmenter au 20e siècle avec les télescopes de 1,5 m et 2,5 m du Mont Wilson (Californie) en 1908 et 1917 qui permirent à Edwin Hubble de détecter l'éloignement des galaxies en fonction de leur distance et, par conséquence, l'expansion de l'Univers. Un record de taille fut atteint avec le télescope Hale du Mont Palomar de 1949 et son miroir de 5 mètres pesant 14,5 tonnes (*ci-dessous*), également en Californie. Ces miroirs sont très difficiles à polir, pèsent très lourds et sont peu maniables dans les télescopes. Les scientifiques ont arrêté de construire ce genre de télescope pendant les années 1990 où d'autres types de télescopes se sont imposés, utilisant des assemblages de miroirs plus petits, légers et mobiles. Nous les explorerons dans la partie suivante de cette série.



Les capteurs photo, du CCD au CMOS

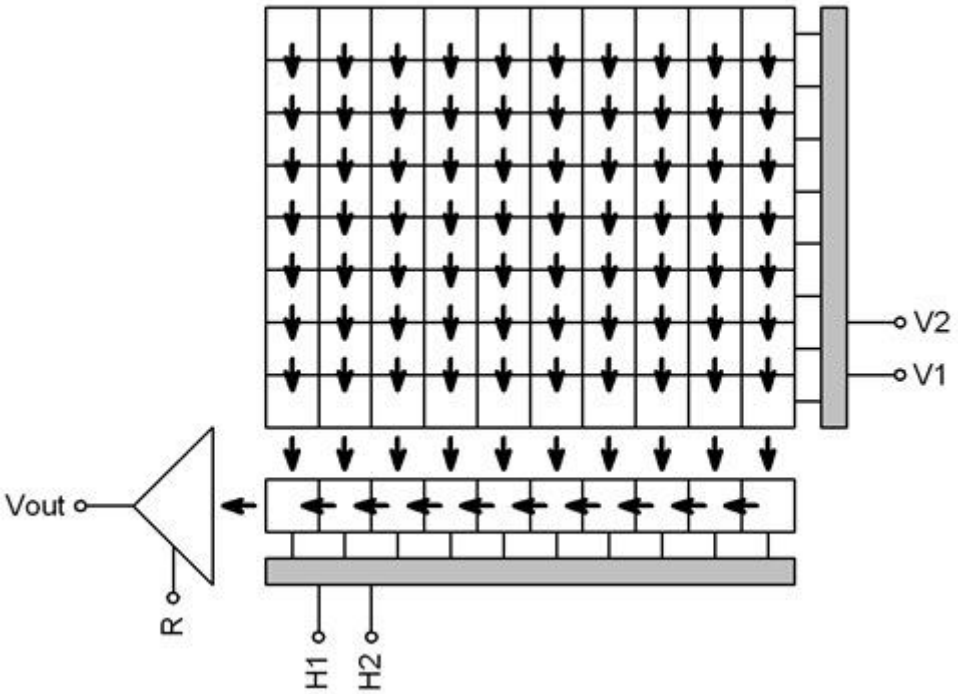
L'une des révolutions clés des télescopes est celle de la captation numérique des images grâce aux capteurs CCD. Le CCD fut inventé en 1969 par les américains William Boyle et Georges Smith, des Bell Labs, qui obtinrent pour cela le prix Nobel de physique en 2009. 40 ans plus tard, donc, il faut savoir être patient ! Les mathématiciens sont plus chanceux puisque la médaille Fields est décernée à des lauréats de moins de 40 ans !

L'invention du CCD fut ensuite brevetée par Michael Thompsett, également des Bell Labs, et mise en œuvre pour la première fois en 1971 dans un capteur CCD faisant une rangée de 96 pixels. La première image de télescope obtenue avec un capteur CCD a été générée en 1975.

L'usage de capteurs CCD se généralisa dans les télescopes au début des années 1980. Ils améliorèrent d'un facteur 10 la captation de lumière des télescopes. A savoir

qu'un télescope de 30 cm équipé d'un capteur CCD équivaut à un télescope de 3 m captant les images en argentique. Mais il fallut attendre les années 1990 pour que leur résolution devienne convenable.

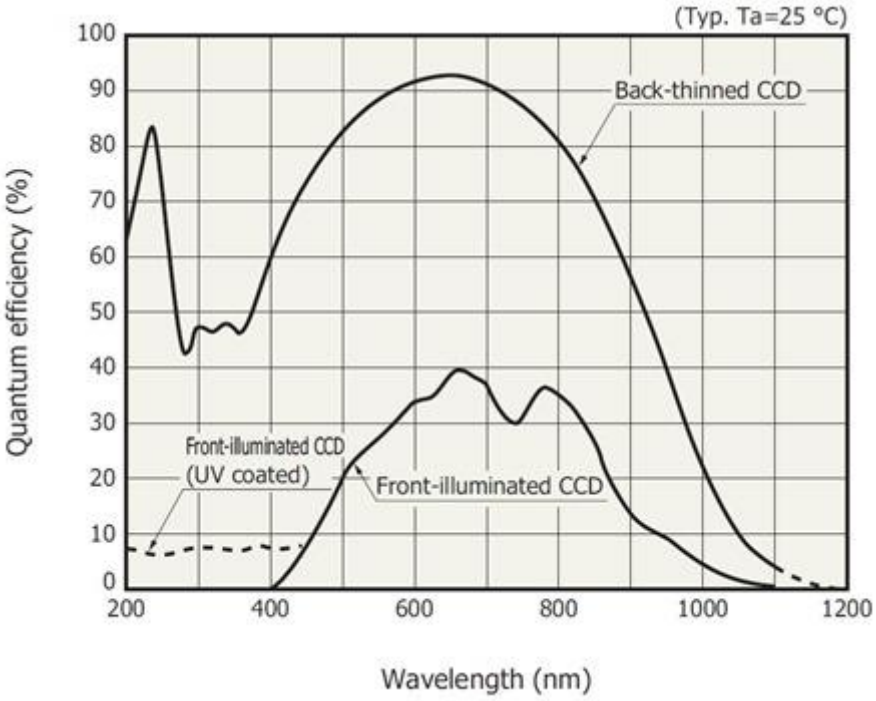
Les capteurs CCD sont à base de technologies au silicium, comme les capteurs CMOS qui ont été inventés plus tard, mais réutilisant la technologie CMOS exploitée dans la fabrication de microprocesseurs depuis les années 1970. Les CCD utilisent l'effet photoélectrique pour convertir les photons reçus en électrons qui sont captés dans des photosites sous forme de potentiel électrique dans des sortes de micro-capacités. Chaque pixel est capable d'accumuler des charges électriques correspondant aux photons reçus, ce qui permet des temps de pose assez longs. C'est lié à leur grand efficacité quantique, à savoir que le ratio d'électrons captés par photons reçus dans chaque photosite du capteur. Les films argentiques ont une efficacité quantique inférieure à 5%. Les capteurs CMOS du marché sont aux alentours de 30/40% et les capteurs CCD de l'astronomie atteignent 80%. L'image captée par les CCD est lue ligne par ligne de pixel et de manière analogique. C'est seulement en sortie de capteur que la tension captée est converti en valeur numérique pour être ensuite stockée puis traitée sur ordinateurs. Avant ces capteurs, les télescopes terrestres et les premières sondes spatiales utilisaient des tubes à vide comme dans les premières caméras de télévision !



Les CCD présentent l'intérêt de fonctionner de manière linéaire. A savoir que la tension qu'ils génèrent pour chaque pixel est proportionnelle au nombre de photons reçus. Ce qui n'est pas le cas des films argentiques utilisés auparavant. Leurs inconvénients sont divers : une charge élevée peut baver sur les photosites voisins, générant un effet d'illumination d'une zone surexposée sur son voisinage. Leur électronique est complexe et ils consomment beaucoup d'énergie.

Les capteurs CCD ne fonctionnent que dans la lumière visible ou dans le proche ultra-violet et le proche infra-rouge. Pour les longueurs d'onde plus courte dans l'UV, le silicium devient réfléchissant Dans les longueurs d'onde plus longues, dans l'infrarouge, le potentiel électrique est insuffisant pour être détecté.

Ces capteurs ont été ensuite améliorés avec des micro-lentilles, faisant converger les rayons lumineux à diverses incidences vers la zone de captation de chaque pixel. Ces microlentilles permettent d'utiliser des ouvertures et focales variables. Cette technique est généralisée dans les capteurs CMOS utilisés aujourd'hui dans les applications grand public.



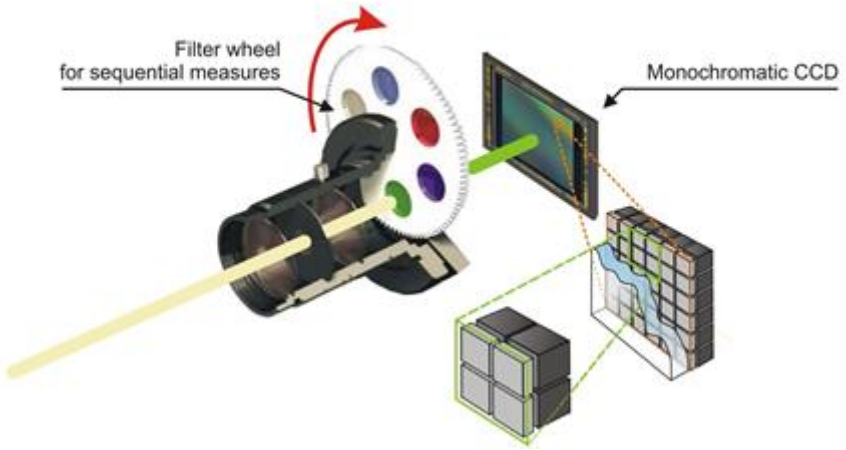
Les capteurs CCD sont aussi passés au rétro-éclairage, avec une électronique analogique de récupération du signal située derrière le composant au lieu d'être du côté de la réception de la lumière. C'est une technique courante en photo grand public avec les capteurs CMOS-BSI que l'on trouve notamment chez Sony. Avec le rétroéclairage, l'efficacité quantique s'approche des 100%. Aujourd'hui, la grande majorité des CCD utilisée en astronomie est rétro-éclairée.

Les capteurs CCD génèrent un bruit de fond provenant du bruit thermique et des rayons cosmiques. Celui-ci est supprimé partiellement en prenant des photos avec l'obturateur fermé. Le résultat est soustrait des photos réalisées avec l'obturateur ouvert, pour supprimer ce bruit de fond qui est en général plutôt stable.

Du côté de la couleur, les capteurs CCD et CMOS du marché de la photo et de la vidéo utilisent généralement des matrices de Bayer avec des filtres rouge, vert et bleu, avec deux fois plus de filtres verts que rouge et bleu. L'électronique des appareils réalise ensuite un dématriçage qui recalcule par interpolation la valeur du rouge, du vert et du bleu pour chaque photosite du capteur qui n'a dans la pratique capté que la valeur d'une des trois couleurs primaires. Les filtres de Bayer ne sont pas utilisés dans les capteurs CCD de télescopes. La technique des filtres monochromes est préfé-

rée. Ceux-ci sont arrangés sur une roue qui place le bon filtre devant le capteur à tour de rôle. On peut aussi utiliser des filtres infrarouges ou UV, les capteurs CCD y étant sensibles. Ces filtres et leur mécanique sont évidemment embarrassants et faiblement miniaturisés.

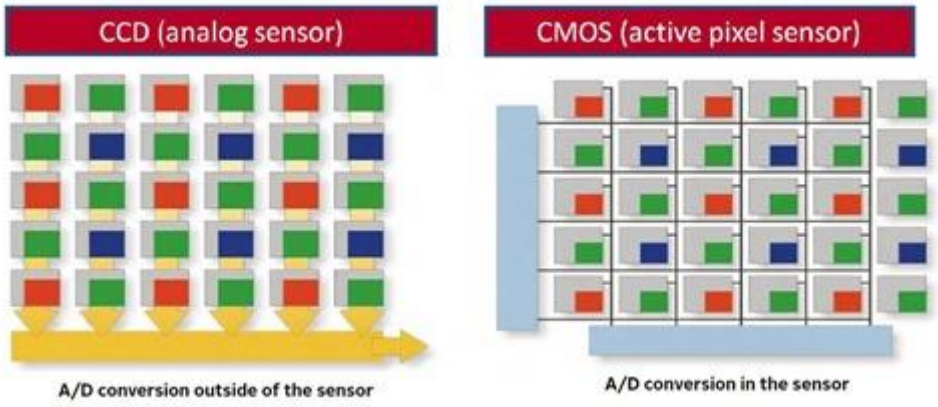
roues à filtres de couleur pour capteurs CCD



Cette technique permet de ne pas perdre en résolution et en sensibilité. Elle est aussi adaptée à un sujet qui ne bouge pas ! Mais les étoiles bougent dans le ciel ! Les télescopes utilisent donc divers systèmes de guidage automatiques qui servent à suivre le mouvement des étoiles dans la voûte céleste, au gré de la rotation de la Terre sur elle-même et de celle-ci autour du Soleil. Ils s'appuient généralement sur un second capteur CCD – associés éventuellement à une optique à champ large – qui détecte le mouvement des étoiles pendant la prise de vue et déplace le télescope au fur et à mesure.

Les télescopes ne génèrent pas que de l'imagerie traditionnelle. On les utilise aussi pour analyser le spectre lumineux émis par les étoiles et les galaxies, via la technique de la spectrographie, qui via un prisme, décompose une onde lumineuse dans ses composantes en fréquences (couleurs). L'interférométrie est également utilisée, pour améliorer la résolution des images reçues en exploitant plusieurs miroirs. Dans tous ces cas-là, la captation se fait toujours avec des CCD.

Les capteurs CCD du marché proviennent de différentes sources comme **On Semiconductor** qui a fait l'acquisition du business des capteurs de Kodak en 2014, l'Anglais E2V, anciennement Marconi CCD, Dalsa qui fait partie du groupe américain Teledyne depuis 2010, **Sharp**, Fairchild Imaging, Sony et Oxford Instruments qui a fait l'acquisition en 2014 de l'Irlandais **Andor**.



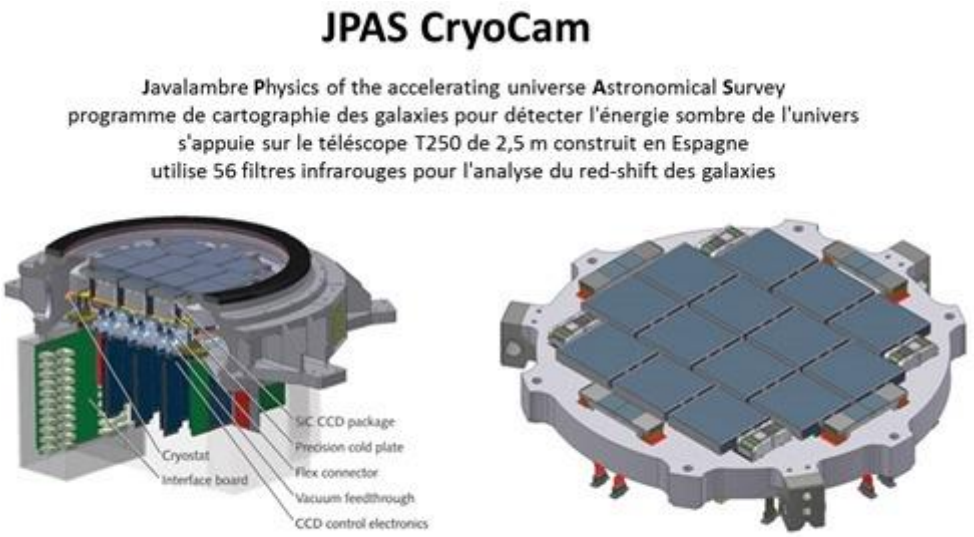
Les capteurs photos et vidéo CMOS sont une retombée étonnante des industries spatiales. Ils sont inventés par l'Américain Eric R. Fossum en 1995 qui travaillait jusqu'à présent sur les capteurs CCD embarqués dans les satellites et sondes spatiales au JPL de la NASA. Voulant alléger les capteurs CCD qui étaient bien trop lourd et consommateurs d'énergie, il invente donc les capteurs CMOS qui s'appuient notamment sur un système de lecture des pixels plus rapide et efficace [sources : **Camera-on-a-Chip: Technology Transfer From Saturn to Your Cell Phone** par Eric R. Fossum et **Digital Camera System on a Chip** (1998) du même auteur]. Il créé la société fabless Photobit Corporation pour commercialiser son invention. Elle est acquise par l'américain Micron en 2001. Les entreprises américaines appréciaient la technologie CMOS car elle réexploitait des lignes de production de mémoires et processeurs CMOS, tandis que la production de CCD était le domaine de sociétés asiatiques et européennes. Mais les asiatiques ont depuis largement repris le contrôle de cette industrie (Omnivision, Sony, Samsung, …).

L'histoire du CMOS est plutôt ironique. L'invention visait à perfectionner le CCD pour se débarrasser de certaines de ses limitations dans les sondes spatiales, notamment au niveau poids et consommation électrique. Mais les télescopes terrestres et spatiaux actuels continuent de s'appuyer sur des capteurs CCD, grâce à leurs forces et malgré leurs nombreuses faiblesses que n'ont pas les capteurs CMOS. Ils présentent toujours une sensibilité meilleure que celle des capteurs CMOS.

CCD vs CMOS

CCD	CMOS
moins de bruit	facile à fabriquer
plus grande sensibilité	faible consommation
meilleure uniformité	miniaturisation
meilleure dynamique	vitesse d'acquisition d'images
	faible coûts
complexité électronique	pas d'effets de bord
effets de bords	
vitesse d'acquisition d'images	sensibilité moins grande
consommation électrique	
coût	

De leur côté, les CMOS ont démocratisé la captation vidéo et photo dans le grand public. C'est la technologie dominante intégrée dans tous les appareils photos, caméras et smartphones grand public d'aujourd'hui. C'est même le cas pour les caméras vidéo professionnelles, jusqu'aux caméras 4K haut de gamme Sony et autres RED et Arri qui servent aux tournages dans le cinéma et pour les séries TV. Des capteurs CMOS sont cependant utilisés dans les télescopes amateurs à défaut de l'être dans les grands télescopes ou télescopes spatiaux. Ils le sont aussi dans les caméras embarquées dans des robots d'exploration tels que Curiosity.



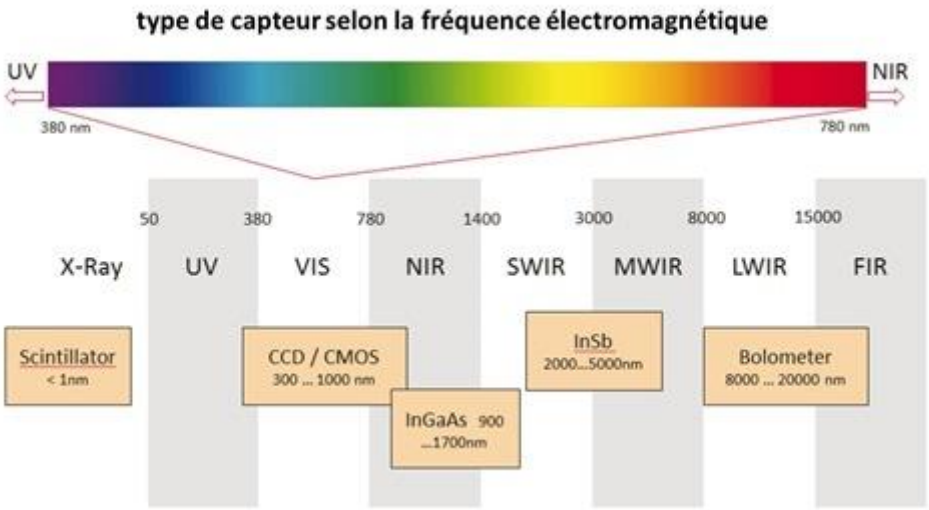
caméra infrarouge à 14 capteurs CCD E2V CCD290-99
9216 X 9232 pixels de 10 µm et 92 X 92 mm

L'un des des plus gros capteurs CCD du marché est le **E2V** CCD290-99 avec ses 9216 X 9232 pixels de 10 µm étalés sur une surface de 92 X 92 mm. Il est notamment utilisé dans le télescope espagnol du **J-PAS** (Javalambre Physics-of-the-Accelerating-Universe Astrophysical Survey) qui comprend un "focal plane array", une matrice de 14 de ces capteurs CCD faisant un total de 1,2 Gpixels (*ci-dessus*). Ce système est complété d'un sélecteur de 56 filtres différents dans le proche infrarouge. Au lieu de la trichromie dans le visible, nous avons donc de la 56-chromie dans l'infrarouge. Ce télescope sert à faire de la photométrie pour analyser le décalage vers le rouge de millions de galaxies pour comprendre la structure volumétrique de l'Univers et de son expansion. Le télescope est modeste, avec un miroir de 2,55 m. Les capteurs sont réfrigérés pour améliorer leur sensibilité.

Pour en savoir plus sur les CCD utilisés en astronomie et en particulier sur les contributions françaises du domaine, je vous recommande la présentation **Imagerie CCD en astronomie** d'Olivier Boulade du Service d'Astrophysique du CEA/DAPNIA. Elle date de 2007 mais reste d'actualité. Surtout dans la mesure où la grande majorité des capteurs CCD utilisés dans les télescopes terrestres et spatiaux ont été conçus bien avant cette date !

Les capteurs CCD et CMOS ne sont pas les seuls utilisés dans les observations astronomiques. Des capteurs utilisant des semiconducteurs différents du silicium (Gallium, Indium) sont utilisés pour l'infrarouge moyen. Ce sont des IRFPA (Infrared Focal

Plane Array) fabriqués sur un substrat photosensible à base de tellurure de mercure-cadmium.



Enfin, les bolomètres sont des instruments de mesure utilisés dans les radio-télescopes à antenne paraboliques pour capter les ondes radios. Nous aurons l'occasion de nous pencher dessus dans un autre épisode.

Grands télescopes

Après une première partie dédiée à l'exploration des **dimensions de l'Univers**, et une seconde qui couvrait l'**histoire des télescopes et notamment de leurs capteurs CCD**, passons à un tour d'horizon des nouvelles technologies mises en œuvre dans les télescopes contemporains. Cela nous permettra de partir à la découverte des plus grands observatoires d'astronomie optique du monde.

Nous nous intéresserons en particulier à appréhender la diversité des instruments qui équipent les télescopes modernes. Cela dépasse l'entendement. Un grand télescope peut être équipé d'une vingtaine d'instruments divers pour analyser les images dans tous les sens. Chaque instrument a son utilité. La spectrographie permet de comprendre de quelles matières sont faites les étoiles et galaxies. La coronographie et l'interférométrie permet de découvrir des exoplanètes. On les visualise directement alors qu'avec la méthode des transits, on ne fait que deviner leur présence grâce à l'analyse de la variation de la luminosité des étoiles dans le temps, via de la photométrie. L'analyse dans l'infrarouge permet de détecter des objets célestes lointains et qui s'éloignent du fait de l'expansion de l'Univers.

Je ne vais pas m'attarder sur les programmes scientifiques de ces télescopes ou de leurs découvertes qui sont souvent pléthoriques. Je m'intéresse ici un peu plus aux outils qu'aux découvertes qu'ils permettent de faire, même si ces dernières sont passionnantes et assez bien couvertes par la littérature scientifiques pro et grand public. Nous la couvrirons en partie dans l'un des articles de cette série que je consacrerai spécifiquement à la recherche des exoplanètes.

Bien entendu, je n'invente rien dans ces articles. Je vais à la pêche aux informations techniques sur Internet, qui n'en est pas avare, et j'en fais une compilation à ma façon, avec un regard de néophyte curieux. Pour cette série d'articles, j'ai téléchargé et dépiauté plus de 500 documents et présentations ! Ces télescopes représentent un domaine technologique relativement méconnu, y compris chez les experts du numérique comme de ceux de la photo. Je ne connaissais que 10% de ce que vous trouverez dans ces lignes avant de me lancer dans cette série !

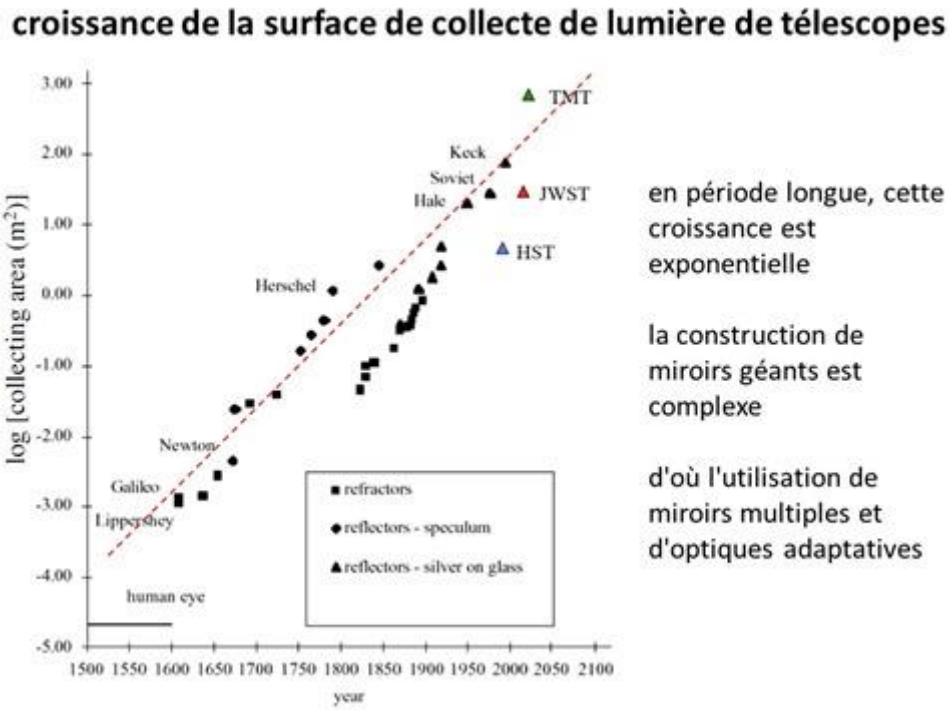
Vous découvrirez ainsi d'étonnants télescopes à miroir liquide, au mercure ! Je vous épargnerai cependant les aspects scientifiques les plus pointus, en particulier dans le domaine de l'optique et de l'interférométrie. Ils m'échappent autant qu'ils sont difficiles à vulgariser.

Vous vous demandez peut-être où est l'entrepreneuriat dans cette série d'articles ? Je cite bien quelques entreprises françaises existantes dans ces parties sur les télescopes. Mais la partie réservée aux entrepreneurs aventuriers de l'espace arrivera à la fin ! C'était un prétexte pour pouvoir vous faire découvrir un peu de sciences et de technologies et aussi, pour relativiser les ambitions des dieux vivants que sont Elon Musk et autres Jeff Bezos.

Les innovations des grands télescopes

Les technologies de ces télescopes ont progressé de nombreuses manières pour leur permettre d'observer l'Univers en remontant encore plus dans le temps et les distances, en détectant des exoplanètes et en analysant la composition des planètes, des étoiles et des galaxies pendant tout leur cycle de vie.

La **course à la taille des miroirs** principaux des télescopes s'est poursuivie jusqu'à la fin du 20e siècle pour se stabiliser aux alentours de 8 à 10 mètres. C'est l'un des paramètres permettant aux télescopes de capter un maximum de lumière lors des observations et d'améliorer également la résolution des images reçues. Celle-ci est en effet proportionnelle à la longueur d'ondes reçue et inversement proportionnelle à la taille du télescope ou à une celle d'une combinaison de télescopes. Nous avons vu dans la partie précédente que cette dernière dépendait aussi de l'évolution des capteurs CCD utilisés pour capter la lumière, du proche ultra-violet au proche infrarouge en passant par le visible. Mais les progrès des CCD sont tels qu'ils sont maintenant à la limite théorique de résolution des télescopes (il me semble…). Mais ce n'est pas tout !

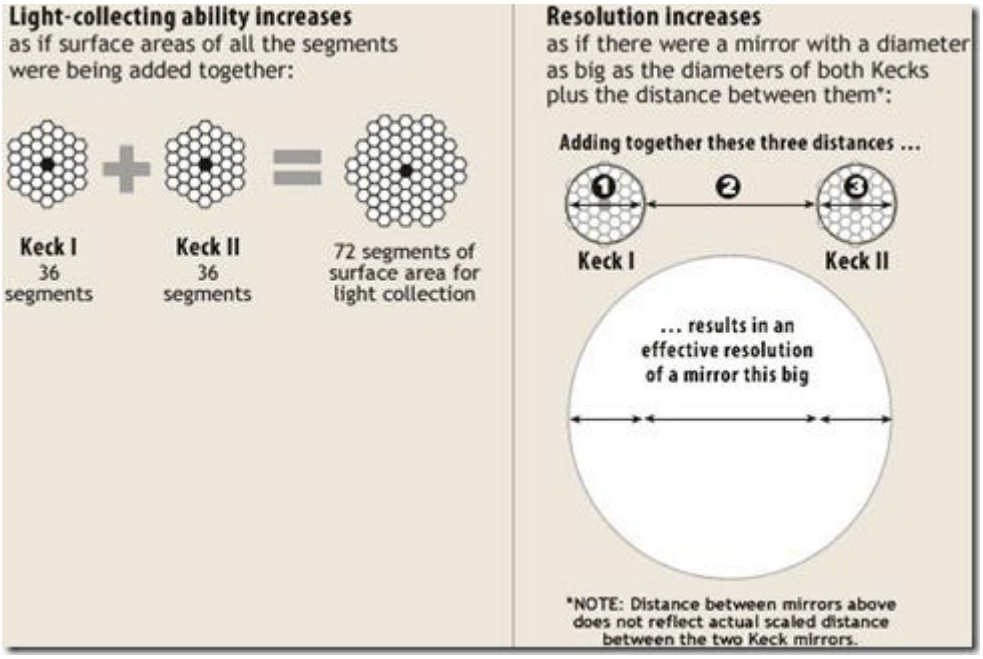


Les grands télescopes sont depuis plus d'une décennie construits à partir de **miroirs segmentés**, hexagonaux, qui peuvent être pilotés individuellement pour gérer l'optique adaptative. Ces miroirs sont très fins et légers et donc plus faciles et rapides à construire et aussi à contrôler. Ils réduisent aussi le poids de l'infrastructure supportant le télescope. C'est le moyen qui permet maintenant de continuer à faire croitre régulièrement la surface de collecte de la lumière des télescopes qui suit une évolution exponentielle depuis cinq siècles (*ci-dessus*).

Pourquoi en est-on arrivé là ? A la fois parce qu'il était de plus en plus difficile de fabriquer des miroirs parfaits dépassant 10 m de diamètre et aussi, plus pratiquement,

parce qu'il était très difficile de les transporter, par la route ou par les airs jusqu'aux télescopes qui sont souvent installés en altitude ! Airbus a les mêmes contraintes à gérer pour déplacer en Europe les grandes pièces détachées de ses Airbus 380 !

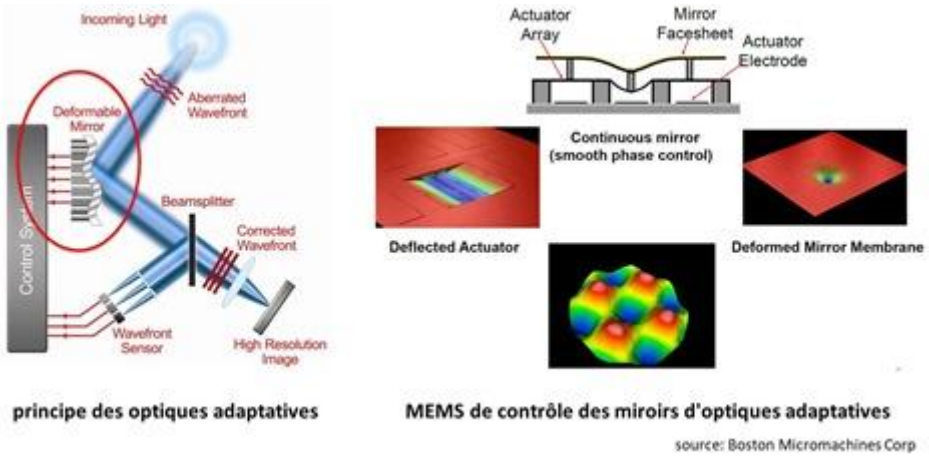
Cette croissance en surface devrait cependant se calmer sur terre car plus grands sont les télescopes, plus les projets sont longs à monter. Même si plusieurs télescopes avec des miroirs de 30 à 39 mètres sont en gestation. Par ailleurs, ces télescopes sont aussi concurrencés par les télescopes spatiaux qui, s'ils ont des miroirs de taille plus modeste, bénéficient de l'absence de diffraction générée par l'atmosphère pour les télescopes terrestres [**source schéma**] et surtout, qui peuvent capter les fréquences du spectre électromagnétique qui ne traversent pas l'atmosphère. Lorsque nous analyserons dans une autre partie les performances des télescopes spatiaux, nous verrons comment les télescopes terrestres et spatiaux se concurrencent et se complètent selon les cas.



Les télescopes modernes sont maintenant couramment équipés d'**optiques actives et adaptatives** qui déforment dynamiquement les miroirs pour corriger leurs défauts et tenir compte de la déformation de la lumière par l'atmosphère terrestre (diffusion, diffraction). Cela requiert des mécaniques sophistiquées et très précises tout comme des logiciels puissants. La technique est utilisée dans les miroirs secondaires pour les télescopes anciens et/ou sur les miroirs principaux pour les télescopes les plus récents, surtout s'ils sont construits en segments de miroirs hexagonaux.

Les systèmes d'optiques adaptatives exploitent quasiment systématiquement un **système de guidage et de calibrage** de l'optique adaptative à base de lasers (LGS = Laser Guidance Systems). Des lasers crééent une ou plusieurs étoiles fictives dans le ciel en éclairant les fines particules de sodium que contient la mésosphère, la partie haute de l'atmosphère comprise entre 90 et 110 km d'altitude. Ces lasers émettent un rayon utilisant la fréquence d'excitation du sodium, qui correspond à la longueur d'onde de 589 nm. Il génère une fluorescence similaire à celle d'une étoile qui peut

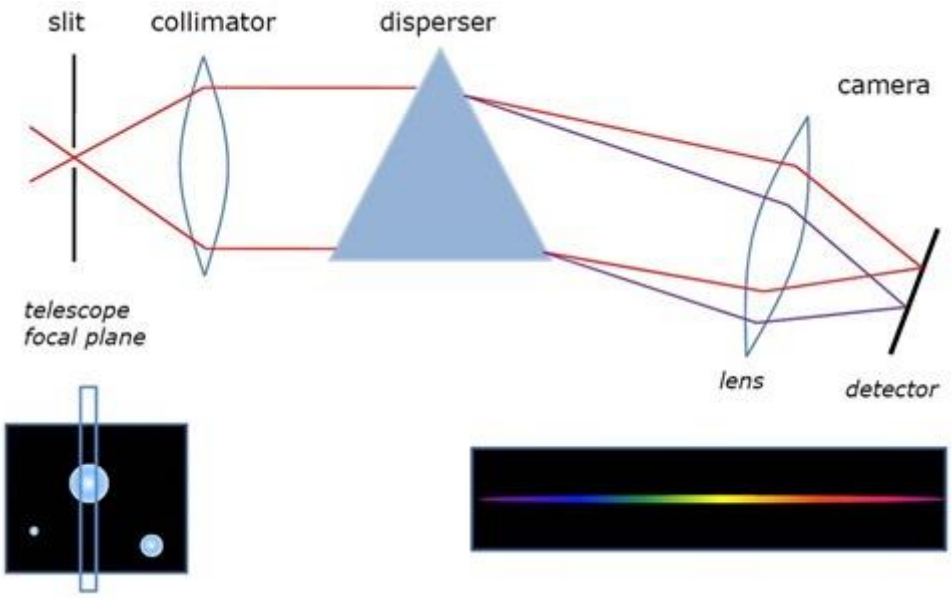
ensuite être détectée par un capteur CCD dédié du télescope. Celui-ci va analyser les déformations de la lumière générées par l'atmosphère. La mesure est encore plus précise lorsque plusieurs lasers sont utilisés simultanément. Les lasers utilisés dépassent 20 W de puissance émise. Ces systèmes laser sont conçus pour éviter d'illuminer par inadvertance les avions [source : **Les étoiles laser artificielles**]. L'information reçue par le LGS (Laser Guidance System) permet ensuite d'agir sur des systèmes de vérins mécaniques, magnétiques et/ou à base de MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) qui contrôlent la surface des miroirs principaux ou secondaires pour réduire les effets de distorsion induits par l'atmosphère terrestre [**source**]. Ces MEMS proviennent de sociétés spécialisées comme Boston Micromachines Corp (*ci-dessous*) ou du français CILAS qui est basé à Orléans.



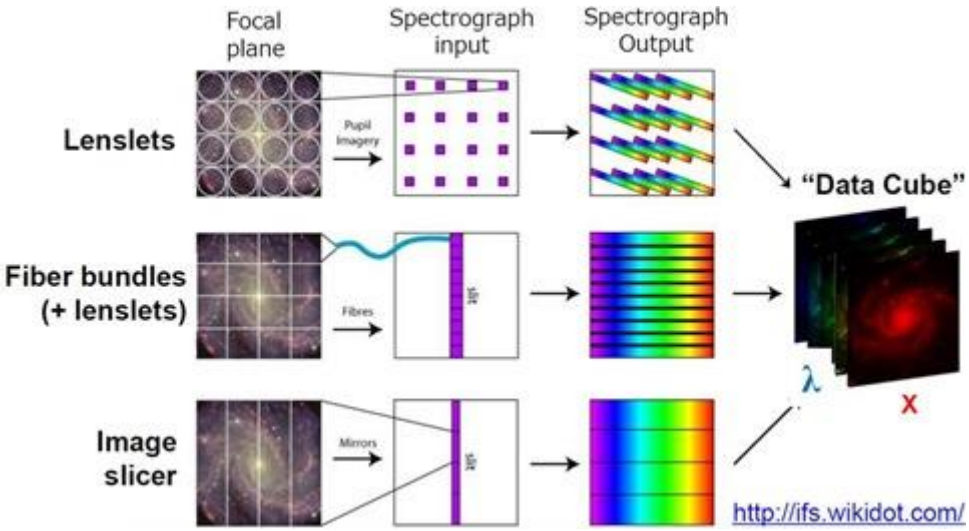
L'**interférométrie optique** est de plus en plus utilisée pour combiner l'image de plusieurs télescopes. Elle améliore la résolution des images générées au point de la faire égaler celle d'un télescope classique dont le diamètre engloberait tous les télescopes du dispositif. Par contre, comme la quantité de lumière n'augmente pas énormément, la sensibilité n'est pas radicalement meilleure. L'interférométrie optique est plutôt réservée aux objets célestes les plus lumineux. Elle permet notamment de déterminer la taille des étoiles observées. L'interférométrie est utilisable en particulier dans les hyper télescopes qui recombinent de manière optique et sans calculs les images issues de plusieurs télescopes et miroirs. Cette méthode a été inventée par le français Antoine Labeyrie, à l'origine du premier interféromètre à deux télescopes en 1975.

Dans le même temps, les télescopes terrestres optiques se sont améliorés en explorant le **proche infrarouge** en plus du visible, aidés en cela par les capteurs CCD spécifiques fonctionnant dans ces longueurs d'ondes. Les télescopes ont été aussi progressivement équipés de capteurs divers pour détecter la matière contenue dans les objets célestes observés et notamment de spectrographes dont nous examinerons plus loin quelques spécimens. Les spectrographes décomposent la lumière via un prisme pour identifier les longueurs d'onde qui la composent. Le spectre contient des marqueurs servant à identifier la composition des objets observés. La qualité d'un spectrographe se mesure notamment pas sa résolution spectrale, à savoir le nombre de raies spectrales qu'il est capable de générer. Cette résolution peut aller de 1000 à plus de 100 000 raies spectrales. On peut ainsi identifier la proportion d'hydrogène, d'hélium et

d'autres éléments des étoiles, ainsi que de la composition de l'atmosphère des exoplanètes (CO2, eau, azote, …) qui sont des marqueurs d'une vie potentielle. Les spectrographes infrarouges sont systématiquement confinés dans des installations cryogéniques, refroidies à des températures inférieures à -40°C pour le proche infrarouge ou descendant jusqu'à -265°C pour l'infrarouge moyen. Le refroidissement permet aux capteurs CCD de ne pas être perturbés par les rayons infrarouges provenant de l'environnement et du télescope lors des observations [**source du schéma ci-dessous**].



La spectrographie s'appuie de plus sur la technique de l'**Integral Field Spectroscopy** (IFS) et des Integral Field Units qui décomposent spatialement l'image à analyser en points, zones rectangulaires ou bandes pour les faire ensuite traverser un prisme qui va en décomposer la lumière, le tout alimentant un ou plusieurs capteurs CCD [**source du schéma ci-dessous**]. Le "slicer" à bandes est le plus répandu dans les télescopes terrestres. Ce genre de spectrographe permet d'analyser simultanément plusieurs objets d'un champ de vue télescopique, comme diverses étoiles ou galaxies. Il génère un cube de données avec dans les tranches, une vue dans une fréquence donnée et dans l'orthogonale, la spectrographie de parties d'images. Un télescope moderne pourra facilement être équipé d'une demi-douzaine de spectrographes. La variantes concernent les longueurs d'onde explorées (proche UV, visible, proche infrarouge, infrarouge moyen), la manière de découper l'image en sous-images, la résolution spatiale et la résolution spectrale. Les usages scientifiques varient en fonction de tous ces paramètres.



Les télescopes sont parfois équipés de **coronographes** (coronagraph en américain) qui sont des caches occultant une étoile ou un autre objet observé pour détecter son entourage, comme ses exoplanètes. Cela passe par un traitement de l'image permettant d'éliminer les franges de diffraction générées par ces caches. Le coronographe a été inventé et expérimenté sur l'observatoire du Pic du Midi par le français Bernard Lyot en 1930, pour observer la couronne solaire. Il a donné son nom au télescope du Pic du Midi qui est équipé d'un modeste miroir de 2 m. La coronographie couplée à l'interférométrie permet maintenant la détection visuelle directe d'exoplanètes alors qu'auparavant (à ses débuts dans les années 1990), elle était indirecte, principalement via la méthode des transits analysant les variations temporelles et spectrales de la lumière émise par les étoiles.

Les télescopes ont une **durée de vie** qui se compte en décennies. Pendant ce laps de temps, ils sont régulièrement upgradés au niveau de leurs instruments. Les mises à jour concernent notamment les systèmes de visée laser liés aux optiques adaptatives ainsi que le perfectionnement des spectrographes et des capteur CCD qui gagnent régulièrement en résolution et sensibilité.

Enfin, les grands télescopes sont quasiment tous des **projets internationaux**. Ils sont installés le plus souvent à Hawaï (Mauna Kea) ou au Chili, en altitude, là où l'atmosphère est très sèche, limitant les effets de diffraction de la lumière. On en trouve aussi aux Canaries. Aux USA, les Universités américaines dominent le terrain, elles-mêmes financées par l'Etat Fédéral (NSF et NASA). En Europe, une bonne part des projets sont menés sous l'égide de l'ESO, l'European Southern Observatory, installé au Chili et lancé en 1962, là où plusieurs générations de télescopes sont déployées ou en construction. L'ESO est supporté par de nombreux pays européens dont la France, qui en est un grand contributeur scientifique et industriel, ainsi que par le Brésil et la Suisse. Cette collaboration internationale est voisine de celle qui intervient dans de nombreux projets spatiaux en général, côté fusées, satellites ou autour de l'ISS (International Space Station).

Les grands télescopes contemporains

Il existe en tout une quarantaine de télescopes terrestres dotés d'un miroir principal faisant plus de 3 mètres de diamètre. Sachant que le nombre d'observatoires est encore plus réduit, certains télescopes étant concentrés sur quelques sites comme celui de Mauna Kea à Hawaï, aux Canaries et au Chili.

Commençons ce tour par les grands télescopes dotés d'un miroir principal monolithique, de grande taille, sachant qu'il ne s'en fabrique depuis plus de 15 ans. Ces télescopes sont cependant régulièrement mis à jour avec de nouveaux instruments tenant compte des progrès dans les optiques adaptatives (pour les miroirs secondaires), les capteurs CCD et les spectrographes en tout genre.

Les grands télescopes ont quelques caractéristiques communes du côté gestion de projets. Leur conception et leur construction peut prendre beaucoup de temps, facilement plus de dix ans et peut même dépasser la vingtaine d'année. Leur mise à jour vise à améliorer leur résolution, les mécanismes de pointage laser et d'optique adaptative. Parfois, ils ne fonctionnent pas bien au moment de leur lancement et traversent de longues années de mise au point. Enfin, lorsqu'ils sont devenus périmés, ils peuvent être démantelés ou être transformés en musées.

Du côté de leurs domaines d'applications, une bonne partie des grands télescopes est à usage généraliste du fait d'une panoplie d'instrumentation très variée permettant d'étudier les étoiles et leurs exoplanètes dans la Voie Lactée, les galaxies éloignées ainsi que, de manière directe ou indirecte, les trous noirs, les pulsars et les quasars.

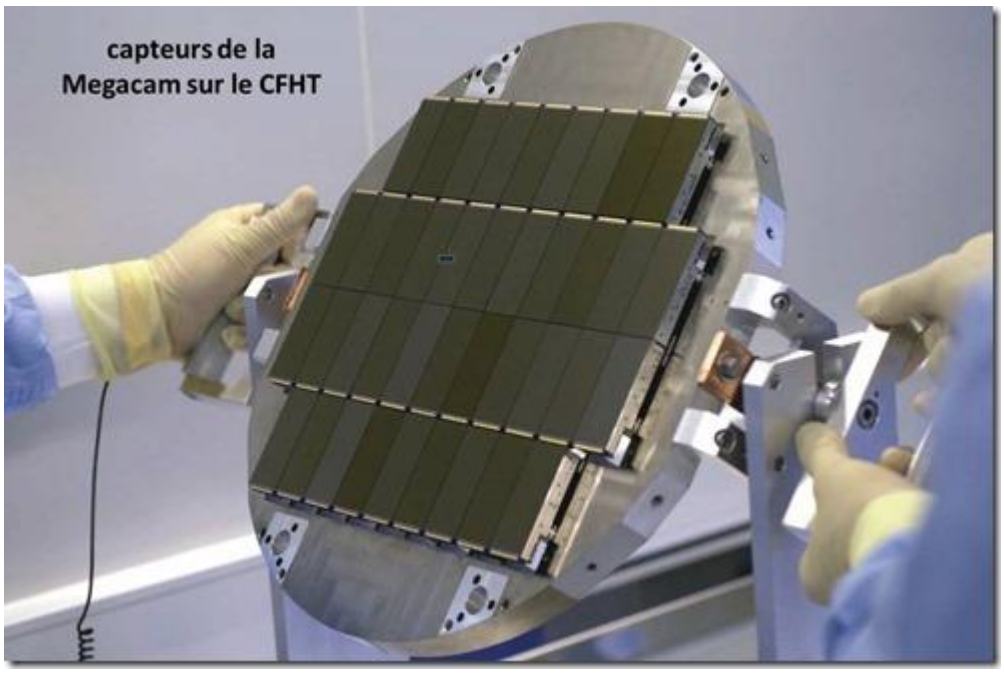
United Kingdom Infrared Telescope (UKIRT)

C'est un télescope doté d'un miroir principal de 3,8 mètres. Il a été inauguré en 1979 et était dédié aux observations dans le spectre infrarouge. Il a été équipé d'une nouvelle caméra à large champs en 2004. Il est depuis 2012 opéré par l'Université d'Arizona, celle de Hawaï et Lockheed Martin avec un financement du NASA Orbital Debris Program Office. Installé sur le site Mauna Kea de Hawaï, ce télescope attend depuis 2015 son démantèlement. Il aura été opérationnel plus de 35 ans.

Canada-France-Hawaï Telescope (CFHT)

C'est un télescope conjoint entre le National Research Council du Canada, le CNRS et l'Université de Hawaï. C'est l'un des premiers qui ait été installé, en 1979, sur le site de Mauna Kea à 4200 m d'altitude. Il est équipé d'un miroir principal de 3,6 m, d'une caméra à haute résolution à large champs dans le visible et d'une caméra dans le proche infrarouge, la WIRCAM, dotée de 4 capteurs totalisant 16 mpixels mise en place en 2006. Il est équipé depuis 2003 d'une MegaCam qui couvre un champ d'un degré carré et comprend 36 capteurs CCD de 2048 x 4612 pixel (340 mpixels) couvrant le visible et le proche infrarouge. Conçue et fabriquée par le **CEA de Saclay**, elle permet depuis 2002 l'étude de d'astéroïdes et de galaxies éloignées tout comme de la Voie Lactée et Andromède.

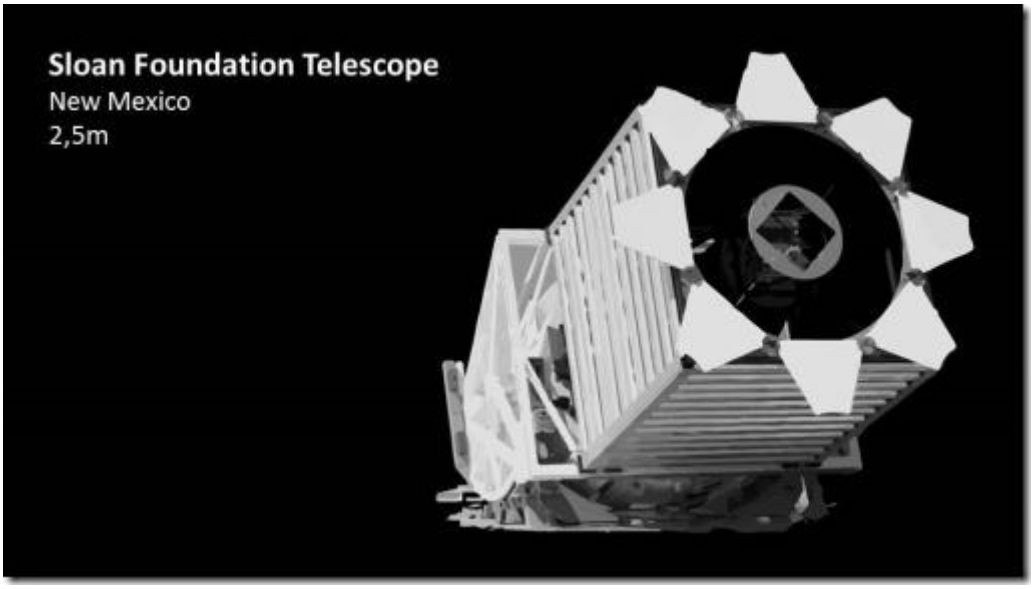
L'instrumentation comprend également SITELLE, un spectrographe Fourier à large champ dans le visible lancé en 2015 et construit par ABB Analytical au Canada, équipé de deux caméras de 2048 x 2048 pixels originaires d'E2V. il peut produire simultanément un millions de spectrographies. On y trouve aussi SPIRou, un spectromètre à polarisation dans le proche infrarouge.



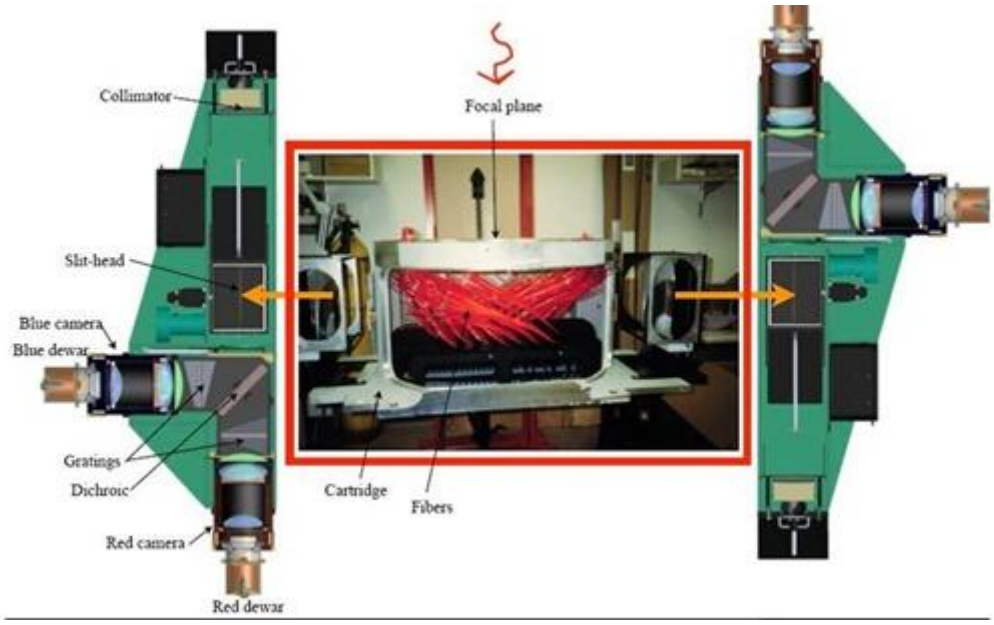
Le télescope a récemment permis la découverte de diverses exoplanètes, dont une exoplanète massive grâce au principe des lentilles gravitationnelles (**source**), de la matière noire reliant deux galaxies (**sources**), de la formation d'une galaxie géante (**source**) et d'une mesure plus précise de la constance de Hubble qui évalue l'éloignement des galaxies dans l'Univers (**source**). Après 38 ans d'opérations, ce télescope semble être toujours en activité.

Sloan Foundation Telescope

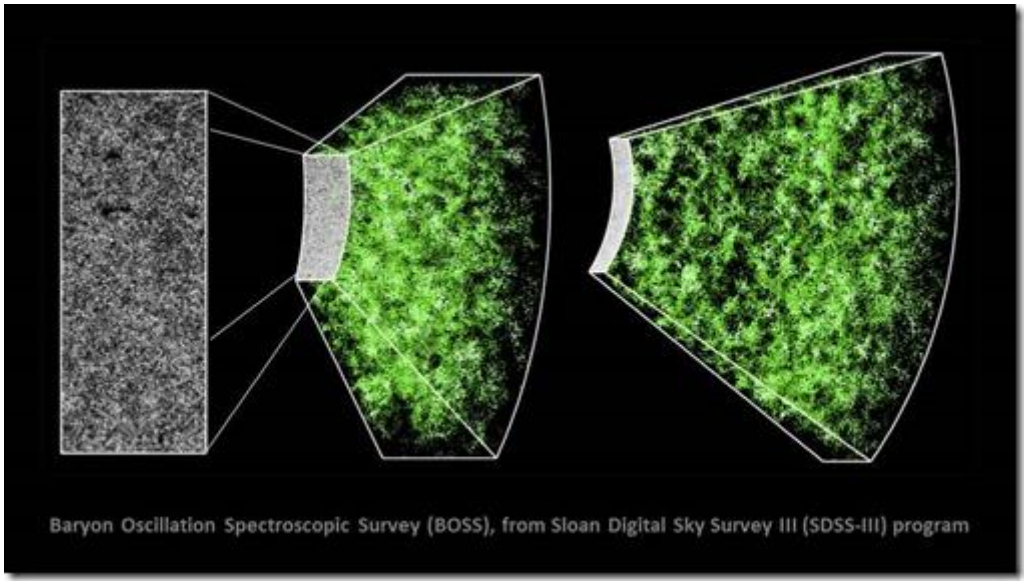
C'est un télescope australien qui est modeste en taille avec son miroir de 2,5 m. Il est opérationnel depuis 1998 et est dédié depuis des années au programme SDDS de cartographie en volume d'une partie de l'univers. Le télescope utilise un spectrographe à fibres optiques qui s'appuie d'abord sur de la photométrie pour déterminer les objets à analyser en fonction de leur nature. Ce projet est voisin de celui de l'Espagnol JPAS que nous avons évoqué dans l'article précédent.



Le capteur est différent : au lieu d'un capteur CCD doté de 56 filtres dans l'infrarouge, il réalise de la spectroscopie multiple à base d'un millier de fibres optiques captant la lumière arrivant dans le plan de focale. La spectrographie se concentre sur les galaxies éloignées de 6,4 à 7 milliards d'années-lumière.



1,2 millions de galaxies ont été analysées à ce jour et intégrées dans un modèle 3D de la tranche d'Univers analysée. La répartition des galaxies détectées est cohérente avec l'explosion résultante du big bang détectée avec les sondes spatiales telles que Planck qui ont analysé le bruit cosmique résiduel du big bang.



Very Large Telescope

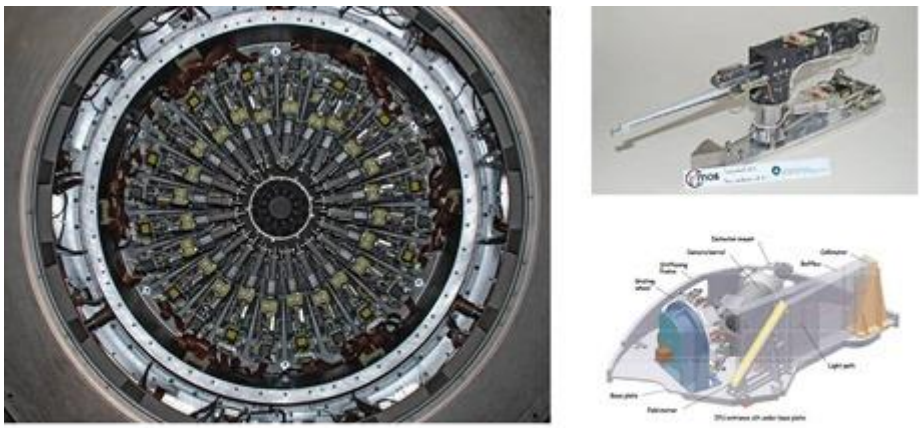
C'est un observatoire de l'ESO situé sur le site de Cerro Paranal au Chili, à 2635 m d'altitude. Proposé initialement en 1972 par le français Antoine Labeyrie, il a été mis en service à partir de 2001. La fin du projet de construction a été supervisée par la chercheuse française Catherine Cezarsky qui dirigea l'ESO entre 1999 et 2007. Il utilise le principe de l'interférométrie comprenant quatre télescopes dotés chacun d'un

miroir de 8,2 m de diamètre pesant 23,5 tonnes et réalisés en Zerodur de 17,2 cm d'épaisseur, une sorte de céramique bénéficiant d'absence de dilatation thermique. Ces grands miroirs ont été réalisés par le français Safran Reosc (anciennement chez Sagem). Les miroirs secondaires ont un diamètre de 1 m et pèsent 42 kg.

Les télescopes sont dotés d'optiques actives et adaptatives. Pour cela, la forme du miroir principal des quatre télescopes de 8,2 m est contrôlée verticalement par 150 vérins avec une précision de quelques centaines de nano-mètres nécessitant des calculs complexes par éléments finis. Ces quatre télescopes de 8,2 mètres sont notamment exploités par le VLTI, un laboratoire d'interférométrie qui collecte les rayons lumineux de ces télescopes pour alimenter divers instruments d'interférométrie dans le visible et l'infrarouge (AMBER et MIDI, ce dernier ayant été retiré du service en 2015). L'alimentation de l'interféromètre passe par des lignes à retard optiques permettant l'alignement temporel des images issues des miroirs des différents télescopes du VLT.

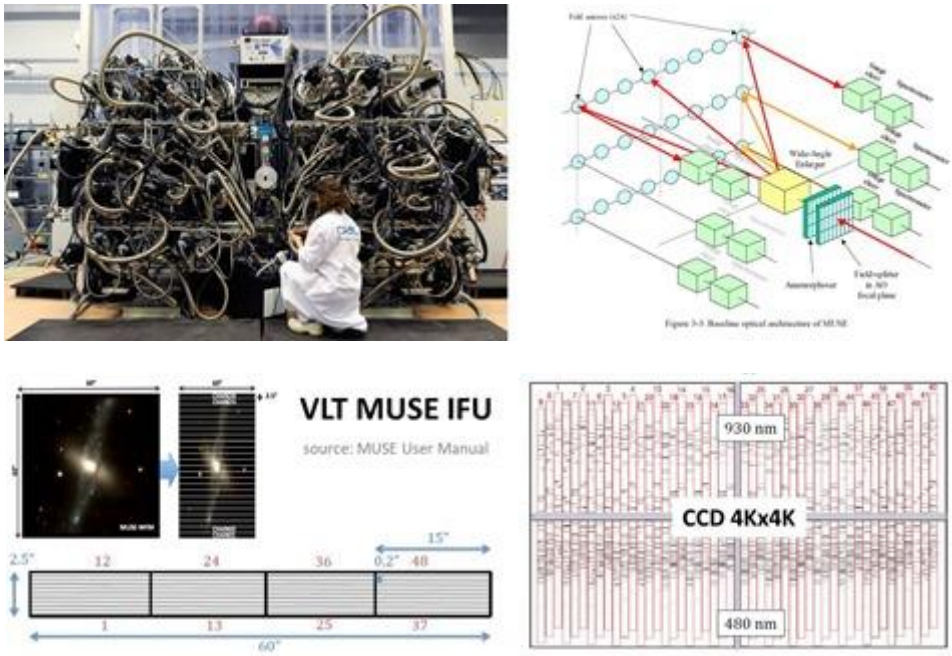
La palette des instruments équipant actuellement le VLT est des plus large avec :

- **CRIRES**, un spectrographe dans le proche infrarouge à haute résolution spectrale (100 000 raies). Il est en cours d'upgrade vers le CRIRES+ qui étend la largeur spectrale étudiée.
- **FLAMES**, un spectrographe dans le visible, haute résolution (47 000 raies) et multi-objets via des fibres optiques positionnables alimentant le GIRAFFE, un spectrographe dans le visible et le UVES dans l'ultraviolet et le visible. Ce dernier couvre 8 objets à la fois.
- **FORS**, un spectrographe dans l'ultra-violet équipé de deux CCD de 2Kx4K pixels.
- **HAWK-I**, un imageur dans le visible à large champ doté de quatre CCD de 2Kx2K pixels et 10 filtres de couleurs.
- **KMOS**, un spectrographe dans le proche infrarouge multi-objets capable de suivre 24 cibles différentes grâce à un système qui positionne individuellement 24 miroirs de captation de portions du champs visuel à analyser dans le plan de focale du télescope. Le tout alimente trois CCD E2V de 2Kx2K pixels qui sont refroidis à 35K (-238°C). La résolution spectrale est de 1500 raies.



dans le KMOS, des bras mécaniques (à gauche et en haut à droite) viennent capter la lumière de zones précises dans le plan de focale du télescope, elle est ensuite envoyée dans un spectrographe (en bas à droite)

- **MUSE**, un spectrographe dans le visible doté de 24 modules IFU. A savoir que la vue du télescope est découpée en 24 rectangles dans une matrice 8×3. Ils sont ensuite envoyés chacun de leur côté dans un spectrographe, via un splitter qui décompose à son tour le rectangle en 24 fines bandes analysées tour à tour par le capteur CCD après avoir été doublées pour réaliser une spectrographie dans le bleu et une dans le rouge. Le CCD est un Teledyne E2V de 4Kx4K pixels opérant dans la lumière visible. Installé dans l'un des 4 télescopes du VLT, l'imposant instrument a été réalisé avec le concours du CRAL à Lyon (*ci-dessous*) !

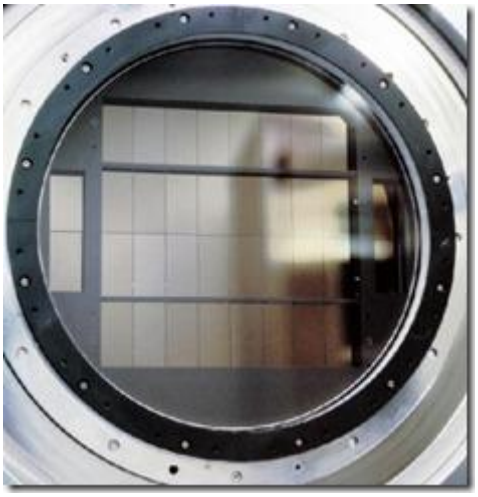


chaque 1/24 de la vue provenant du télescope est découpé optiquement en 24 bandes qui sont envoyées au CCD via un prisme après avoir été elles-mêmes dédoublonnées pour couvrir deux bandes de fréquences dans le visible (bleu à 480 nm et rouge à 920 nm).
le CCD réalise donc 2x24 spectroscopies de bandes, en haut dans le rouge et en bas dans le bleu.

- **NaCo** (NAOS-CONICA) est le système d'optique adaptative doté d'imageurs, d'un coronographe et d'un polarimètre. dans le proche infrarouge. Il a notamment servi à analyser la formation des étoiles géantes et naines dans la Voie Lactée.

- **SINFONI** est un spectrographe dans le proche infrarouge avec quatre prismes balayant les bandes J, H, K et H+K de l'IR, et un capteur CCD de 2Kx2K pixels.
- **SPHERE** est un système d'optique adaptative couplé à un coronographe et à un spectrographe.
- **VIMOS** est un imageur à large champ dans le visible complété d'un spectrographe multi-objets dotés de capteurs CCD E2V de 4K x 2K pixels.
- **VISIR** est un spectrographe dans l'infrarouge moyen, construit par le CEA.

L'ensemble est complété par quatre télescopes de 1,8 m et d'un télescope à champ large de 2,5 m, le VLT Survey et d'un autre de 4 m, le VISTA, équipé d'une caméra infrarouge de 67 millions de pixels, la VIRCAM. Mise en service en 2011, la caméra du VLT Survey, l'OmegaCAM, comprend 32 capteurs CCD de 2Kx4K pixels d'origine Teledyne E2V, donc 268 mpixels au total. Ils sont complétés de quatre CCD servant au guidage et au pointage. La lumière arrivant sur les capteurs passe au travers de l'un des 12 filtres disponible couvrant le spectre visible du proche ultraviolet au proche infrarouge. La caméra est réfrigérée à -140°C et fonctionne sous vide.



A noter cette **intéressante vidéo** qui décrit le processus de maintenance du miroir principal des VLT. Un bâtiment lui est dédié qui le nettoie, enlève la couche existante d'aluminium puis en remet une par déposition sous vide, et elle ne pèse que 12 grammes au total !

Subaru

Basé à Hawaï, ce télescope est opéré par les Japonais. Le projet a démarré en 1991 et il est opérationnel depuis 2000. Il est alors équipé du plus gros miroir monolithique au monde avec 8,2 mètres de diamètre, dépassé ensuite par ceux du LBT, opérationnel en 2005. Sa fabrication a duré 3 ans. Il est composé d'ULE, un matériau à très faible dilatation thermique (ultra-low thermal expansion glass) concurrent du Zerodur. C'est un miroir actif doté de 261 vérins de contrôle. Le télescope a permis de nombreuses découvertes diverses et notamment sur l'expansion de l'Univers, sur le rôle de la matière noire et sur la formation des galaxies massives,

Le télescope a bénéficié de diverses mises à jour, dont un nouveau coronographe doté d'une optique adaptative en 2012 avec un miroir contrôlé par 2000 vérins en MEMS en 2013.

Large Zenith Telescope

C'est un télescope canadien doté d'un miroir de 6 m et opérationnel depuis 2005. Il est plutôt original : **son miroir est en mercure** (métal liquide à température ambiante) et sur une base tournante permettant d'obtenir naturellement une forme parabolique parfaite [source du schéma ci-dessous). La focale reste à peu près fixe car le mercure repose sur une forme parabolique de 6 cm d'épaisseur faite de PVC renforcée de fibre de verre. Il faut un litre de mercure par m2 de surface à couvrir. Si des poussières s'accumulent, elles peuvent être supprimées simplement en stoppant la rotation du miroir et en les récupérant à la surface du mercure qui est bien plus dense que toutes les impuretés. Avantage : cela coute bien moins cher qu'un télescope à base de miroir traditionnel monolithique ou même multi-miroirs. D'un facteur 50 ! Le LZT a couté moins de $1M à construire !

C'est l'équivalent "Makers" ou "FabLab" du télescope géant. Petits inconvénients : on ne peut réaliser d'observation qu'à la verticale du télescope, le mercure est toxique et la qualité de sa surface dépend de la régularité de la rotation et est très sensible au vent et autres vibrations ! Le LZT est situé en légère altitude au Canada (450 m), ce qui limite les risques d'évaporation du mercure mais la partie miroir du télescope est tout de même bien isolée. Le LZT est équipé d'un capteur CCD assez classique, faisant 2Kx2K pixels.

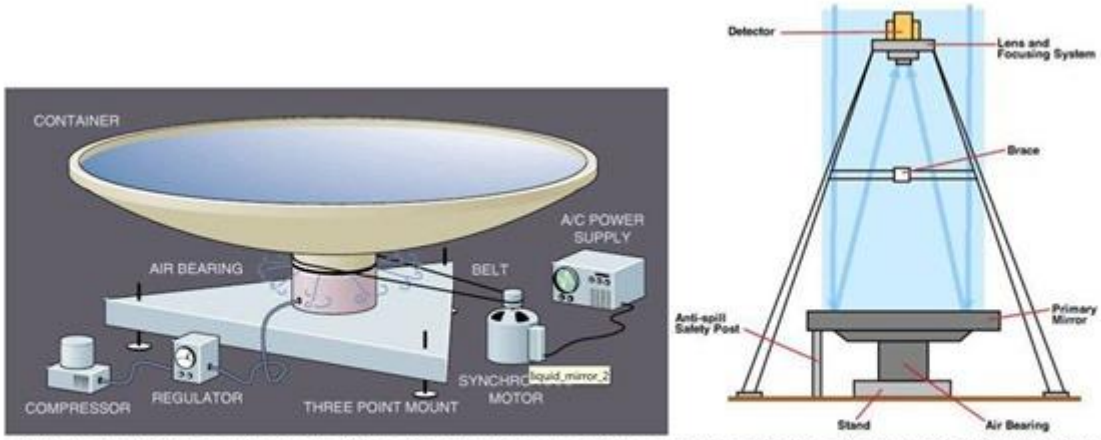


Figure 3: Main components of the liquid primary mirror and the scheme of a working liquid mirror telescope. [4] The liquid mirror is formed in the container on the air bearing. Light is then reflected to the focus, where the corrector eliminates the coma. Then light is collected on the detector. [6]

Il existe seulement trois autres télescopes dans le monde utilisant ce procédé : le LMT de l'UBC/Laval (2.65 m, lancé en 1992), le LMT de la NASA (3 m, 1995-2002 qui n'est donc plus en service) et le ILMT en Inde (4 m, fabriqué en Belgique, déployé entre 2011 et 2016).

Quelques projets sont aussi dans les cartons ou déjà dans les limbes pour lancer de nouveaux télescopes à miroir en mercure :

- **ALPACA** (Advanced Liquid-mirror Probe for Astrophysics, Cosmology and Asteroids), qui devait être doté d'un miroir de 8 mètres au Chili et d'une caméra orientable de 240 capteurs CCDs totalisant un gigapixel.
- **LAMA** : qui assemblerait 18 miroirs représentant un diamètre de 50 mètres. Toujours au Canada, le système utiliserait de l'optique adaptative et de l'interférométrie optique avec assemblage par lignes à retard des images issues des 18 capteurs associés à chaque miroir.
- Divers projets d'installation de tels télescopes sur la lune, qui risquent de rester longtemps dans les cartons.

Les applications de ce genre de télescope ? Elles sont variées : analyse du transit des étoiles, recherche de quasars, calculs géométriques divers, photométrie d'étoiles, détection d'étoiles faiblement lumineuses et évolution de la formation de galaxies.

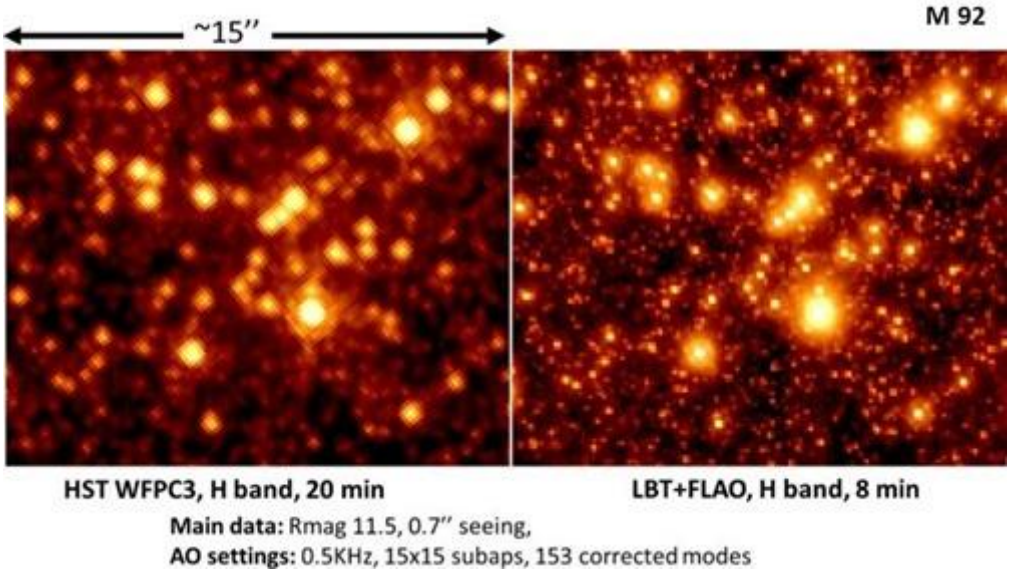
Large Binocular Telescope

Opérationnel en Arizona à 3191 m d'altitude depuis 2005, ce grand télescope est le fruit de la collaboration entre l'Université d'Arizona, l'Allemagne et l'Italie, cette dernière ayant construit la structure du télescope. La première utilisation conjointe des deux miroirs date de 2008. Les deux miroirs font 8,4 m de diamètre. Au début de leur production, ils ne faisaient qu'un pouce d'épaisseur. Ils ont été solidifiés en faisant tourner leur support dans un four à 20 tours par minute pour créer une forme parabolique parfaite. Le processus de ponçage des miroirs s'est passé en plusieurs étapes conduisant à retirer un centimètre d'épaisseur du miroir. La partie réfléchissante du miroir est une fine couche d'aluminium qui a été déposée sous vide sur le

site du télescope, grâce à un énorme coffrage sous vide placé sur le miroir une fois installé sur le télescope, permettant son anodisation.

Le télescope utilise l'optique active et adaptative au niveau du miroir secondaire, celui-ci étant doté de 672 vérins magnétiques fonctionnant à la fréquence de 1 kHz pour suivre en temps réel les perturbations de l'atmosphère détectées par un LGS (laser guidance system). Un spectrographe UV est directement monté dessus.

Le LBT a été équipé comme il se doit d'un grand nombre d'instruments, mis en service progressivement. On y trouve notamment une caméra binoculaire (LBC), un spectrographe multi-objets (MODS, en 2011 et 2014) et un spectrographe dans le proche infrarouge (LUCI, en 2010 et 2013). La puissance de l'optique adaptative est illustrée par la comparaison ci-dessous entre une image du LBT et la même obtenue par la caméra WFC3 du Hubble Space Telescope, dans les deux cas, dans la bande H du proche infrarouge [source].



Une autre série d'instruments est intégrée dans le LBTI, pour le LBT Interferometer. C'est un interféromètre recombinant la lumière issue des deux grands miroirs. Cette recombinaison prend plusieurs formes et permet d'améliorer la résolution des images prises par les deux télescopes. Ses deux instruments principaux liés à l'interféromètre sont les caméras LMIRcam (1Kx1K pixels) et NOMIC qui couvrent différentes portions de l'infrarouge.

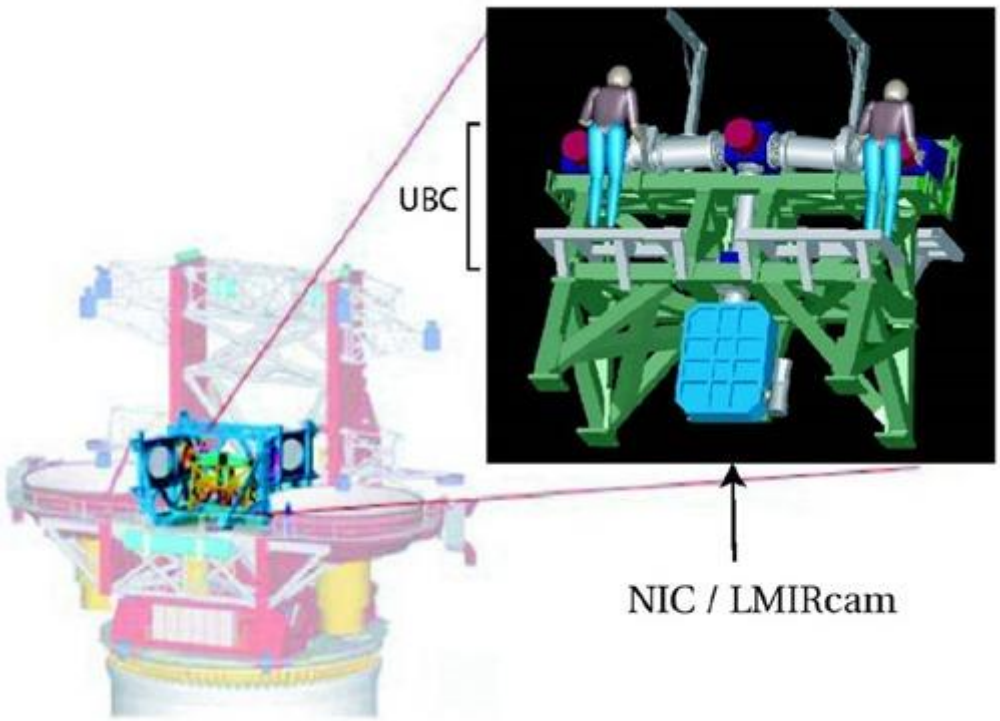
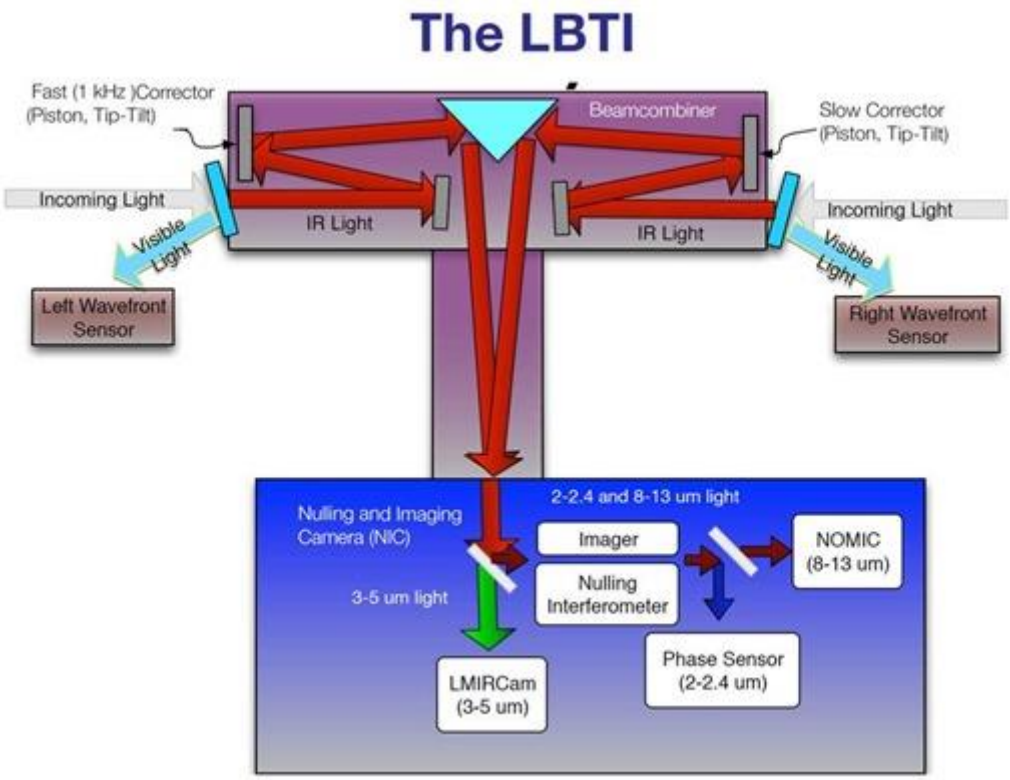


Figure 1. Location of LMIRcam within the LBT structure.

Plusieurs types d'interférométries sont possibles et notamment :

- De la **coronographie** qui permet de masquer les étoiles observées et d'observer leur périphérie et détecter des exoplanètes.
- De l'interférométrie **Fizeau,** du nom du physicien français du XIXe siècle, Hippolyte Fizeau, qui additionne les deux images en les déphasant légèrement pour tenir compte de la différence de chemin parcouru par la lumière pour atteindre l'interféromètre.
- De l'interférométrie d'**annulation** qui consiste à additionner le signal lumineux des deux télescopes en le déphasant d'une demi-longueur d'onde. Cela permet d'observer des détails très fins et faiblement lumineux… comme les exoplanètes, toujours elles, en éliminant au passage l'étoile autour desquelles elles tournent.



Le LBT est notamment dédié à la recherche d'exoplanètes et à l'analyse de leur atmosphère. Le LBT étudie en particulier la poussière exozodiacale, une étrange appellation décrivant l'anneau de poussière entourant les étoiles et situé dans leur zone habitable, autour d'une unité astronomique (AU = distance Soleil-Terre). Ces anneaux de poussière sont en général faits de carbone et de silicates et sont issus de comètes et d'astéroïdes. Visibles dans l'infrarouge, leur étude permet d'identifier des étoiles candidates à la recherche d'exoplanètes. Elle permet aussi d'en évaluer l'impact dans l'imagerie et l'interférométrie car ils perturbent la recherche d'exoplanètes.

Le site d'Arizona du LBT comprend aussi le Multiple Mirrors telescope, doté de 6 miroirs et opérationnel depuis 1998. C'est l'un des premiers au monde à avoir intégré un interféromètre. Il avait été initialement équipé de 7 miroirs de un mètre et a été ensuite transformé en 2006 pour n'avoir qu'un seul grand miroir de 6,5 mètres.

Cette liste n'est pas exhaustive. Dans les **grands télescopes** à miroir monolithique de plus de 5 mètres, j'ai fait l'impasse sur Magellan 1 et 2 (Chili, miroirs de 6,5 mètres) et sur le BTA-6 Russe (miroir monolithique de 6 mètres). Seuls les experts du sujet l'auront remarqué… !

Les télescopes à miroirs segmentés

Passons à la génération plus récente de télescopes utilisant des miroirs primaires construits à partir de multiples segments hexagonaux assemblés et pilotés par des systèmes mécaniques d'optique corrective et adaptative.

Keck

Il s'agit d'un couple de télescopes lancé entre 1993 et 1996 à 4200 m d'altitude sur le mont Mauna Kea à Hawaï (Keck 1 et Keck 2). Chacun des télescopes est doté d'un

miroir principal de 10 mètres composé de 36 miroirs hexagonaux de 1,8 m de diamètre dont le socle en céramique présente une très faible dilatation thermique. 168 vérins sont montés derrière les miroirs pour gérer l'optique adaptative, soit trois par miroir.

C'est le premier grand télescope à avoir été doté d'un système de guidage et de correction laser. Les observations s'appuient sur de l'interférométrie dans le proche infrarouge et de la spectrographie allant du proche ultra-violet à l'infrarouge. Elles ont permis la découverte d'un grand nombre d'exoplanètes, de mesurer la part de l'expansion de l'Univers explicable par la matière noire. Keck a aussi permis d'évaluer la masse du trou noir situé au cœur de la Voie Lactée.

Keck est un télescope relativement ancien et il a connu de nombreuses évolutions au niveau de son équipement scientifique. On trouve de nombreux spectrographes parmi ses instruments, leurs différences se situant dans leur résolution, leur champ de vision, les longueurs d'ondes explorées et leur capacité de filtrage pour réaliser des spectrographies simultanées de différents objets célestes.

- **MOSFIRE** (Multi-Object Spectrometer For Infra-Red Exploration), un spectrographe dans le proche-infrarouge multi-objets, opérationnel depuis 2012 et installé sur Keck 1. Il est équipé d'un capteur CCD de 2K x 2K pixels provenant de Teledyne E2V. Un masque permet de faire passer la lumière de manière sélective dans différents prismes qui séparent les longueurs d'onde dans l'infrarouge [source du schéma ci-dessous : MOSFIRE, the Multi-Object Spectrometer For Infra-Red Exploration at the Keck Observatory].

Figure 7. On the left is the layout of the MOSFIRE field on the sky with a 58s J-band image of The Antennae galaxies. The middle image is of a slit mask and the right image is the night sky emission with this mask in H-band.

- **DEIMOS** (Deep Extragalactic Imaging Multi-Object Spectrograph), un spectrographe capable d'analyser jusqu'à 1200 objets célestes en une seule exposition. Il est doté d'une matrice de huit capteurs CCD de 2K x 4K totalisant 8K x 8K pixels. Il est plus ancien que le MOSFIRE, ayant été lancé à la fin des années 1990. Son champ de vision relativement large lui sert à analyser la périphérie de galaxies et leur composition chimique.
- **HIRES** (High Resolution Echelle Spectrometer) est un spectrographe à haute résolution opérationnel depuis 1993 et mis à jour en 2004 avec une matrice de trois capteurs CCD de 2Kx2K pixels remplaçant un capteur unique et moins sensible de 2Kx2K pixels. La lecture des images du CCD est aussi bien plus rapide. Il fonctionne dans le proche UV et dans le visible. Il a permis la détection de nombreuses exoplanètes. C'est l'instrument terrestre le plus prolixe de ce point de vue-là. Il était concurrencé par le télescope spatial Kepler, spécialisé dans la détection d'exoplanètes.
- **LRIS** (Low Resolution Imaging Spectrograph) est un spectrographe à basse résolution adapté à l'analyse d'objets très distants de l'Univers. Il est doté de deux caméras, une pour le bleu et l'autre pour le rouge visibles, via des capteurs CCD de 2Kx2K pixels. Il explore la composition des galaxies les plus anciennes de l'Univers. Il date des années 1990.
- **NIRC-2** (Near Infrared Camera 2) est la seconde génération de caméra infrarouge du télescope, couplée à l'optique adaptative. Elle est utilisée pour cartographier des objets du système solaire, pour détecter des exoplanètes et analyser la structure de galaxies. Elle a permis la détection en 2008 d'un système avec quatre planètes autour de l'étoile HR 8799 par Christian Marois.
- **NIRSPEC** (Near Infrared Spectrometer) étudie notamment le red-shift (décalage vers le rouge) des galaxies et d'étoiles proches du centre de la Voie Lactée. Il doit être mis à jour en 2017.
- **OSIRIS** (OH-Suppressing Infrared Imaging Spectrograph) est un autre spectrographe infrarouge. Il permet de réaliser des images d'objets en filtrant certaines longueurs d'ondes infrarouge. Il est installé sur Keck 1.

- **Keck Interferometer** : cet instrument combine la lumière de Keck 1 et Keck 2 dans un interféromètre, ce qui permet d'améliorer la résolution angulaire des images captées. L'instrument est en jachère depuis 2012, faute de financements pour le faire évoluer !
- **KCWI** (Keck Cosmic Web Imager) est un nouveau spectrographe développé pour Keck 2 qui est en **cours d'installation** et qui sera dédié à l'observation de galaxies et trous noirs éloignés de plusieurs milliards d'années lumières. Il fonctionnera dans le bleu et dans le rouge visibles. Cet instrument des plus complexes utilise un IFU (Integral Field Unit) originaire de la société française d'optronique Winlight créée en 2001.

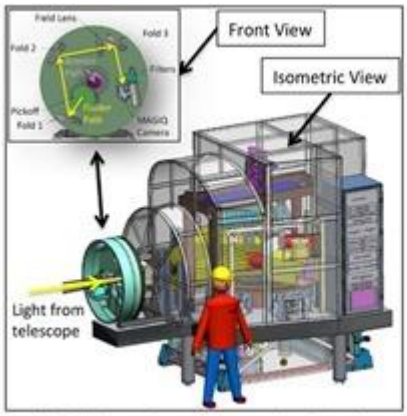
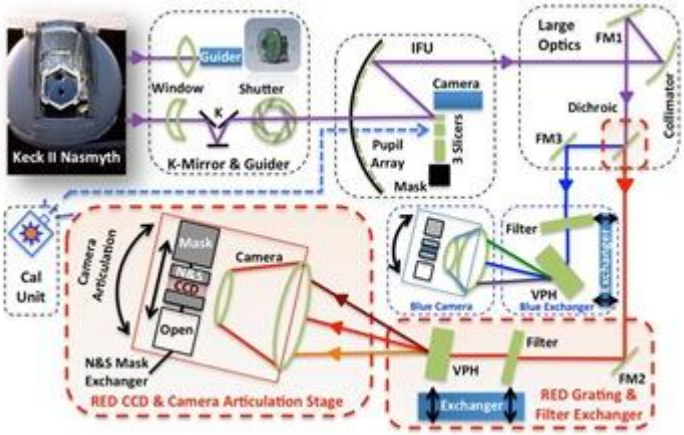


Figure 5: The KCWI instrument shown with transparent enclosure. The inset shows a front view of the tracking guider.



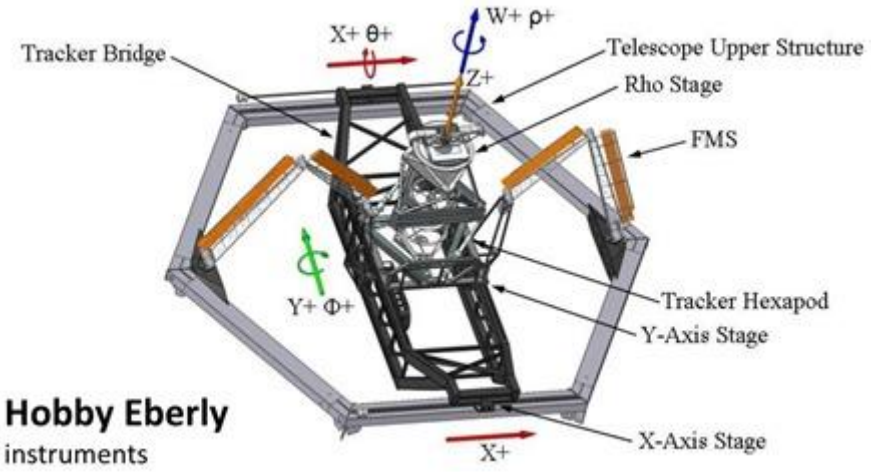
- **Keck Planet Finder**, est un instrument qui doit rentrer en service en 2019. Il doit servir à détecter des exoplanètes par la méthode des transits, en explorant une large partie du ciel.

Comme de nombreux télescopes terrestres, leur activité sera concurrencée à partir de 2019 par celle du télescope spatial JWST dont nous ferons un tour dans un article suivant. Celui-ci est doté d'un ensemble de miroirs de 6,2 m de diamètres. Les télescopes terrestres continueront de se distinguer du JWST par la résolution angulaire de leurs observations, permise par de plus grands miroirs et par l'interférométrie associant plusieurs miroirs. JWST se distinguera de son côté par la capacité à observer des objets très éloignés et à le faire dans l'infrarouge moyen, qui est inaccessible sur terre à cause de l'atmosphère.

Hobby Eberly

Ce télescope est installé depuis 1996 au Texas. Il résulte d'un partenariat entre universités américaines, allemands et hollandaises. Son miroir principal qui fait 11 mètres de diamètre est fixe, ce qui rend son architecture plus simple. C'est le plus grand miroir de ce genre à ce jour. Il est composé de 91 miroirs hexagonaux d'un mètre de diamètre. Il est doté de trois spectrographes qui se distinguent par leur résolution spectrale (haute, moyenne et basse).

Le miroir secondaire et ses instruments est mobile, permettant le suivi d'objets célestes en déplacement. Une partie des instruments a été mise à jour au début des années 2000. Je vous passe les détails !



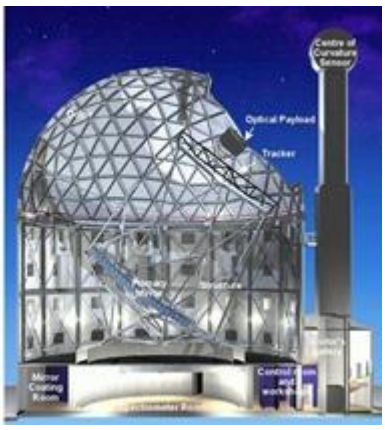
Gemini Twins

Les Gemini Twins sont une paire de télescopes anglais installés respectivement au Chili (Gemini South) et à Hawaï (Gemini North). Ils ont chacun un miroir de 8,1 m composé de 55 segments hexagonaux. Ils ont été terminés respectivement en 1999 et 2000. Ils observent le ciel dans le visible et l'infrarouge. Malheureusement, ils n'ont pas produit grand-chose du fait de débuts chaotiques. Ils sont cependant bien opérationnels.

Les deux télescopes ont été équipés en 2012 d'un système d'optique adaptative dans leur miroir secondaire (originaire de Safran Reosc), exploitant comme il se doit un laser de pointage au sodium qui envoie cinq rayons (*ci-dessous*). Le miroir adaptatif est contrôlé par 64×64 vérins en MEMS.

South African Large Telescope (SALT)

Ce télescope opérationnel depuis 2005 comprend un grand miroir de 11 mètres constitué de 91 miroirs hexagonaux. C'est visiblement le plus grand de sa catégorie. Le "Large" est donc toujours valable 12 ans après l'inauguration ! Mais la mise au point de ce grand télescope a pris plusieurs années.



L'équipement du SALT est varié comme pour tous les grands télescopes. Il comprend un dispositif de photométrie permettant de suivre dans le temps l'évolution de la luminosité des étoiles et galaxies, la suivant à 20 Hz, ce qui doit générer de gros volumes de données. Il comprend aussi un spectrographe dans l'ultraviolet et un spectrographe dans le visible et le proche infrarouge. Il est spécialisé notamment dans la détection d'astéroïdes et la spectroscopie de galaxies.

Grand Télescope des Canaries

Opérationnel depuis 2007, 20 ans après son planning initial en 1987 et situé à 2267 m d'altitude aux Canaries, ce télescope est doté d'un miroir principal de 10,4 m de diamètre comprenant un assemblage de 36 miroirs hexagonaux complétés par un dispositif d'optique active, le tout provenant aussi de Safran Reosc. Il résulte d'un partenariat entre des organismes de recherche espagnols, mexicains et américains sachant que les espagnols en sont les premiers contributeurs et utilisateurs (à 90%).

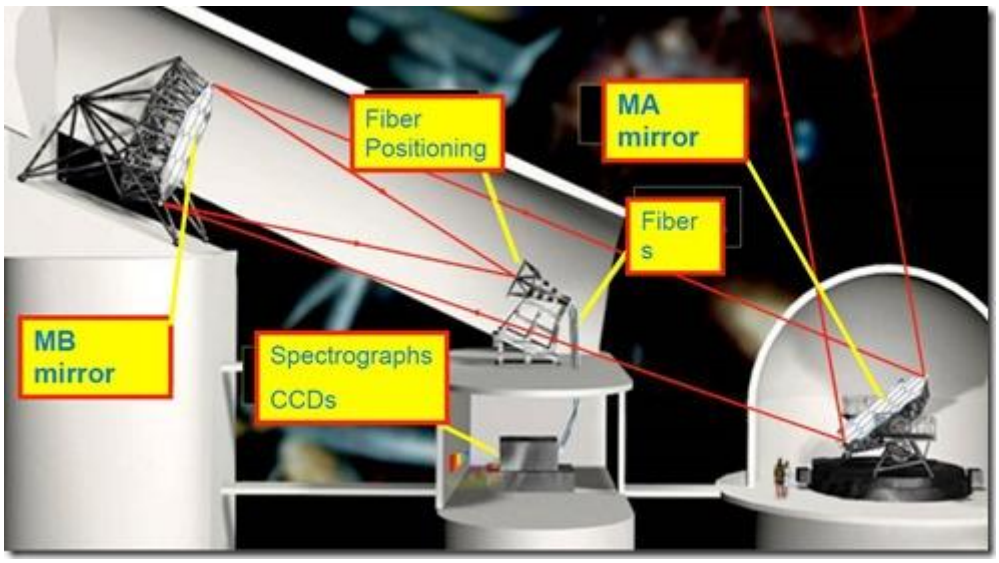
Il dispose d'un équipement que nous avons déjà vu dans les nombreux autres télescopes de cet article : un capteur dans l'infrarouge moyen couplé à un spectrographe, un coronographe et un polarimètre (qui mesure la polarité de la lumière reçue). La réfrigération est assurée à -245°C pour l'installation et à -265°C pour le capteur. Un

capteur dans l'infrarouge moyen doit être plus refroidi que dans le proche infrarouge ! Il est aussi doté d'un spectrographe multi-objets suivant jusqu'à 92 objets dans le proche infrarouge (OSIRIS) et un autre dans le visible (MEGARA). Ils utilisent des faisceaux de fibres optiques pour récupérer la lumière et l'envoyer dans les spectrographes.

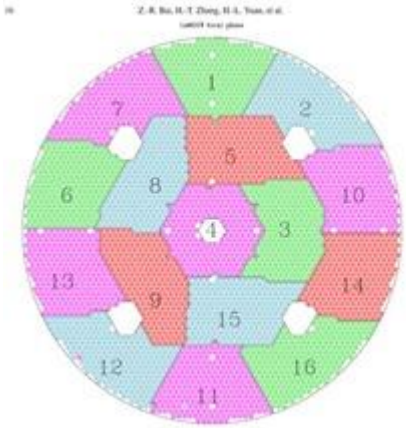
LAMOST Hebei

Dernier télescope de cette série, le LAMOST (Large Sky Area Multi-Object Fibre Spectroscopic Telescope) est un télescope chinois basé à Xinglong Station (ça ne s'invente pas) dans la province de Hebei. Il est actif depuis 2008 et véritablement opérationnel depuis 2012. Contrairement au radiotélescope FAST que nous verrons plus tard, les chinois n'ont pas donné dans le gigantisme avec ce télescope. Son miroir fait 4 mètres de diamètre. Il est dédié à la spectrographie de 10 millions d'étoiles de notre Voie Lactée et de millions de galaxies.

L'installation optique est plutôt originale (schéma ci-dessous) puisque nous avons un premier miroir plat et orientable de 24 segments hexagonaux de 1,1 mètre faisant 5,72×4,4 m qui réfléchit la lumière sur un second miroir sphérique de 37 segments faisant 6,67×6,09 m.



Ce dernier fait converger les rayons dans un plan focal de 1,75 m de large où se trouvent 4000 fibres optiques positionnées par 8000 moteurs. L'optique est adaptative. Les fibres alimentent par paquet de 250 les 16 spectrographes qui sont situés en-dessous du plan de focale. Chaque spectrographe est équipé de deux capteur CCD de 4Kx4K pixels originaire de Teledyne E2V, adaptés l'un au bleu et l'autre au rouge.



Les objectifs de ce télescope sont de réaliser des spectrographies de grandes structures dans l'univers (galaxies et quasars, qui sont des galaxies très énergétiques) et d'étoiles de la Voie Lactée. Il a notamment permis de découvrir des étoiles binaires et des étoiles géantes dans la Voie Lactée après le début de sa cartographie systématique.

Réserver son télescope

Vous vous demandez peut-être comment les astronomes font-ils pour accéder aux télescopes. Heureusement pour leurs rythmes circadiens, ils ne sont pas obligés de se déplacer à Hawaï ou dans la pampa chilienne. Ils commandent leurs observations par Internet et reçoivent les résultats par le même chemin ! Tous les six mois en général, mais cela peut-être sur une période mensuelle ou annuelle, les grands télescopes internationaux – terrestres et spatiaux – sont ouverts aux demandes d'observation (Telescope Application Form). Seuls les chercheurs, doctorants et étudiants en astronomie sont acceptés, et en priorité ceux dont les pays ont cofinancé les télescopes de-

mandés. Il faut évidemment aussi savoir quel instrument sélectionner vu leur nombre ! La liste est ainsi fournie sur les sites des télescopes comme pour l'observatoire américain **Keck** ou pour le **SALT** d'Afrique du Sud.

Les demandes sont ensuite examinées par un comité scientifique et les slots alloués, le taux de succès des demandes variant selon les télescopes. Comme pour préparer son pitch de startup, il existe des conseils pour bien préparer ses demandes d'observations (**exemple**). On peut alors devoir attendre plusieurs mois avant que le télescope aille observer le bout de ciel demandé. Voici la **liste des demandes** récemment approuvées par l'European Southern Observatory qui couvre notamment le VLT évoqué dans cet article.

Les chercheurs en astronomie doivent dans la pratique savoir taper à plusieurs portes. Les différents télescopes terrestres et spatiaux disposent d'instruments complémentaires et qui évoluent régulièrement. Un travail de recherche va donc facilement nécessiter de faire appel à plusieurs d'entre eux. C'est particulièrement vrai pour l'étude des galaxies et la recherche d'exoplanètes. Certaines peuvent être découvertes en premier via un télescope spatial (Hubble pour les galaxies, Kepler pour les exoplanètes) et être ensuite examinées par d'autres méthodes via des télescopes terrestres. Ce sera encore plus le cas lorsque le James Webb Space Telescope et les télescopes géants seront opérationnels aux débuts de la prochaine décennie.

La recherche en astronomie et astrophysique est assez ouverte. Les travaux sont régulièrement publiés tout comme les observations réalisées avec les télescopes. Qui plus est, de nombreuses observations télescopiques déjà réalisées sont accessibles pour les profanes sur Internet, et notamment sur **Worldwidetelescope** ou sur **Eyesofuniverse** où vous pouvez télécharger 230 Go d'images si cela vous chante. Paradoxalement, c'est un bon moyen de faire une belle cure de digital detox !

Télescopes géants

Après une première partie dédiée à une mise en abyme des **dimensions de l'Univers**, et une seconde qui couvrait l'**histoire des télescopes et notamment de leurs capteurs CCD**, et une troisième aux **grands télescopes**, nous allons maintenant explorer les télescopes terrestres géants qui sont actuellement en construction.

L'objectif technique principal de ces nouveaux télescopes est de continuer d'améliorer la résolution angulaire et la captation d'objets distants faiblement lumineux. Ils seront dotés d'instruments dans la lignée de ceux des grands télescopes existants : optique adaptative pour limiter les effets de diffraction de l'atmosphère et des défauts des miroirs principaux et secondaires, spectrographie multi-objets à haute résolution, caméras CCD très sensibles, etc.

Les objectifs scientifiques sont voisins entre ces différents télescopes mêmes si, parfois, ils se complètent harmonieusement. Il s'agit d'explorer l'Univers du plus près au plus lointain : le système solaire, les étoiles proches de la Voie Lactée et leurs exoplanètes, comprendre la formation et le cycle de vie des étoiles et des galaxies, et remonter dans le temps autant que possible pour analyser la création de la matière, des premières étoiles et galaxies dans l'histoire appréhendable de l'Univers.

La complémentarité est plus forte entre les télescopes terrestres et les télescopes spatiaux qui peuvent explorer les parties du spectre électromagnétique qui sont inaccessibles sur Terre, comme les rayons X et gamma ainsi qu'une bonne part de l'infrarouge moyen et lointain. Du côté des exoplanètes, la précision des nouveaux télescopes est telle que l'on peut maintenant les détecter directement par imagerie et non pas indirectement, comme avec la méthode des transits qui analyse l'évolution temporelle de la luminosité et du spectre des étoiles observées.

Nous allons ici examiner de près les quatre télescopes géants qui sont actuellement en gestation : le **Large Synoptic Survey Telescope** (Chili), le **Giant Magellan Telescope** (également au Chili), le **Thirty Meters Telescope** (Hawaï, mais ce n'est pas encore sûr) et l'**European Extremely Large Telescope** (aussi au Chili). Tous ces télescopes ne seront pas opérationnels avant 2022-2028 selon les cas. A part le LSST, les trois autres se distinguent pas leur gigantisme. Leurs miroirs primaires géants sont trois à quatre fois plus larges que ceux des plus grands télescopes existants. Tous ces projets sont le résultat d'une collaboration internationale intense. Ils mettent systématiquement en jeu les USA, le Canada et les pays européens avec, selon les cas, des pays d'Asie (Japon, Corée, Chine) ou d'autres continents comme l'Amérique du Sud. Les Russes sont étonnamment absents de ces partenariats et relativement peu actifs.

Comme pour les grands télescopes examinés dans la partie précédente, ces télescopes géants sont des projets au long cours. Leur conception et planification date en général du début des années 2000 et ils seront opérationnels près de 25 ans après. Leur roadmap prévoit de plus la mise en service d'instruments sur près d'une décennie. Qui plus est, ces projets sont conditionnés par le côté aléatoire des financements publics

qui les alimentent. Ils bénéficient de quasiment aucun financements privés car ils sont dédiés à la recherche fondamentale. Heureusement, ces financements publics alimentent des industriels de toutes tailles et font avancer les technologies qui ont souvent des usages autres, civils comme militaires.

Large Synoptic Survey Telescope (LSST)

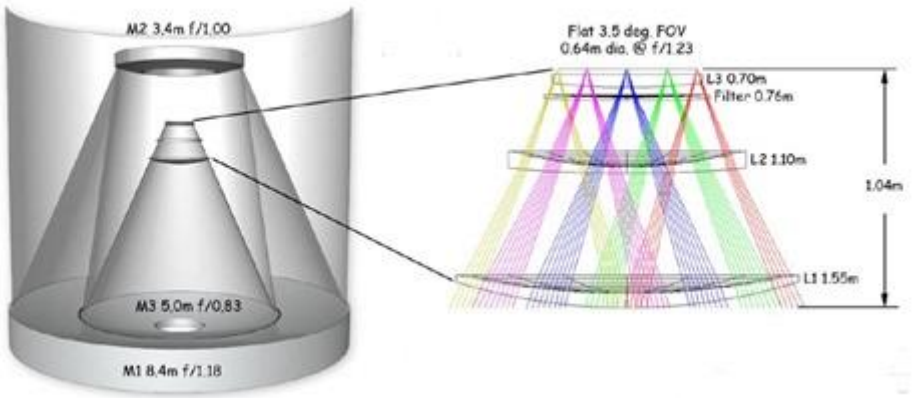
Avec son miroir principal de 8,4 mètres de diamètre, que fait le LSST dans la liste des télescopes géants ? C'est la même taille que l'un des miroirs du Large Binocular Telescope d'Arizona lancé en 2005 ! La raison est que ce télescope est un géant dans sa catégorie. Il doit succéder au Sloan Telescope qui, avec son miroir de 2,5 mètres, servait au programme SDSS (Sloan Digital Sky Survey) de cartographie volumétrique des galaxies dans une portion du ciel. Nous l'avions décrit dans la **partie précédente**.

Ce télescope est en construction depuis 2015 au nord du Chili, à 2682 m d'altitude, sur le même site que Gemini South, le frère jumeau anglais de Gemini North qui est sur le site de Mauna Kea à Hawaï. Il est prévu qu'il voie sa première lumière en 2019 et qu'il soit pleinement opérationnel à partir de 2022.

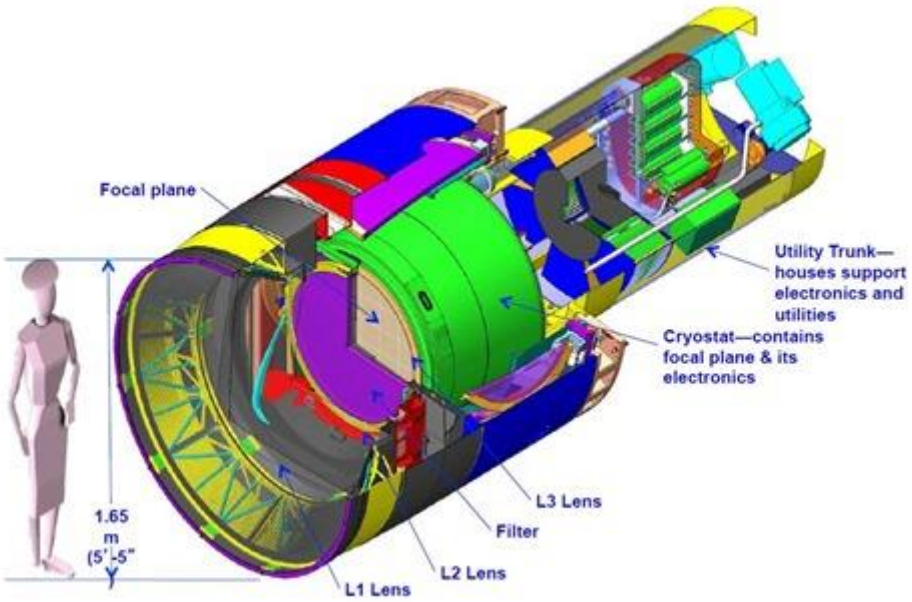
Les objectifs scientifiques du LSST sont décrits dans ce **document de 2009** qui fait 596 pages. Il s'agit essentiellement de cartographier en 3D un maximum d'objets célestes allant du système solaire aux confins de l'Univers.

Pendant une dizaine d'années, le télescope devra capter 4 milliards de galaxies (sur les 2000 milliards que compterait l'Univers visible et pour mener des recherches sur les lois qui régissent l'existence ou l'inexistence de l'énergie et de la matière noires…), 10 millions de supernovas, un million de lentilles gravitationnelles, 10 millions d'étoiles de la Voie Lactée pour en faire une cartographie précise (sur les 200 milliards qu'elle doit compter), et dans le système solaire, environ 90% des "near earth objects" (astéroïdes, comètes) descendant à une taille de 140 m.

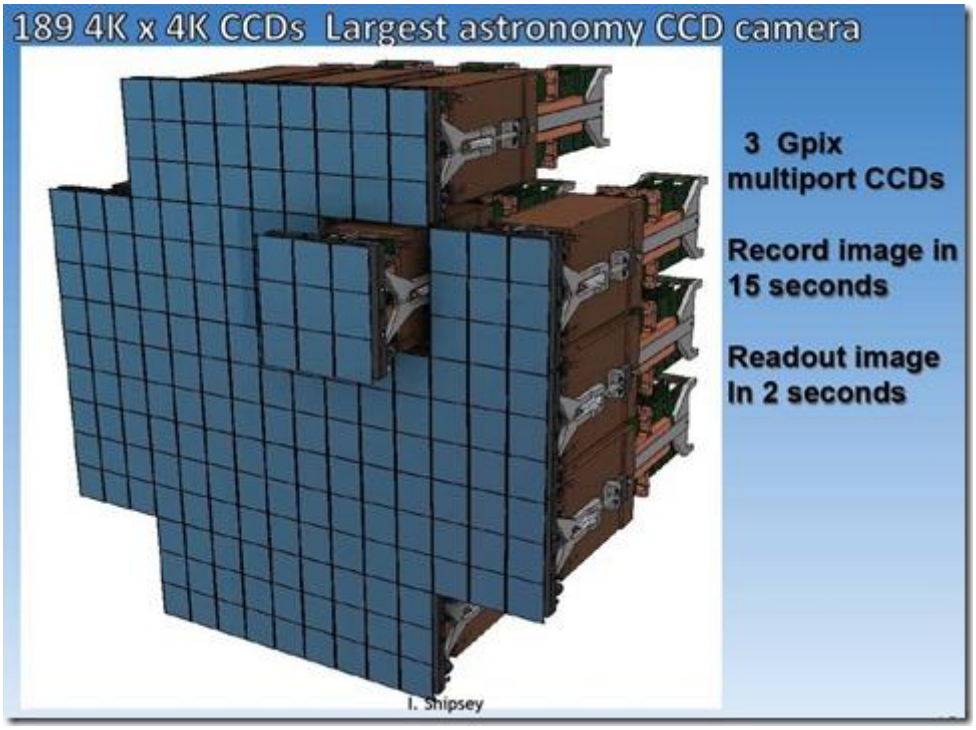
Son champ de vision est très large pour un télescope : 3,5°, contre 0,2° pour le télescope Keck. 3,5°, c'est environ sept fois l'angle apparent de la Lune dans le ciel. Son dispositif de miroirs est très original. Il est constitué d'une série de miroirs annulaires qui permet d'avoir un design très compact. Le miroir primaire de 8,4 est annulaire et d'un seul tenant (M1). Il envoie sa lumière vers un miroir secondaire convexe M2 de 3,4 de diamètre qui est lui aussi annulaire. Et puis vers un miroir tertiaire M3 de 5 mètre positionné dans le trou du miroir M1. Enfin, M3 alimentera en haut du télescope le module d'instruments de captation. M1 et M3 ont été construits en même temps, d'une seule pièce, entre 2008 et 2014.



Contrairement à nombre de grands télescopes, l'instrumentation du télescope est unique. Il s'agit d'un système de captation d'image dans le visible installé dans le plan focal du télescope et faisant un record de 3,2 gigapixels, généré par l'assemblage de 189 capteurs CCD. Point de spectrographe ou de coronographe au programme ! C'est la plus grande caméra créée à ce jour. Elle captera des images du ciel pendant des poses de 15 secondes et toutes les 20 secondes. Le LSST va photographier l'intégralité du ciel chaque nuit en le balayant méthodiquement !



L'optique adaptative est gérée jusqu'aux capteurs CCD dont le mouvement est contrôlable avec précision. La caméra comprend un système de six filtres de couleur couvrant le spectre lumineux visible. Les capteurs CCD sont relativement classiques et font 4Kx4K pixels. L'intégrateur en charge de la fabrication de cette caméra est le **SLAC National Accelerator Laboratory**.



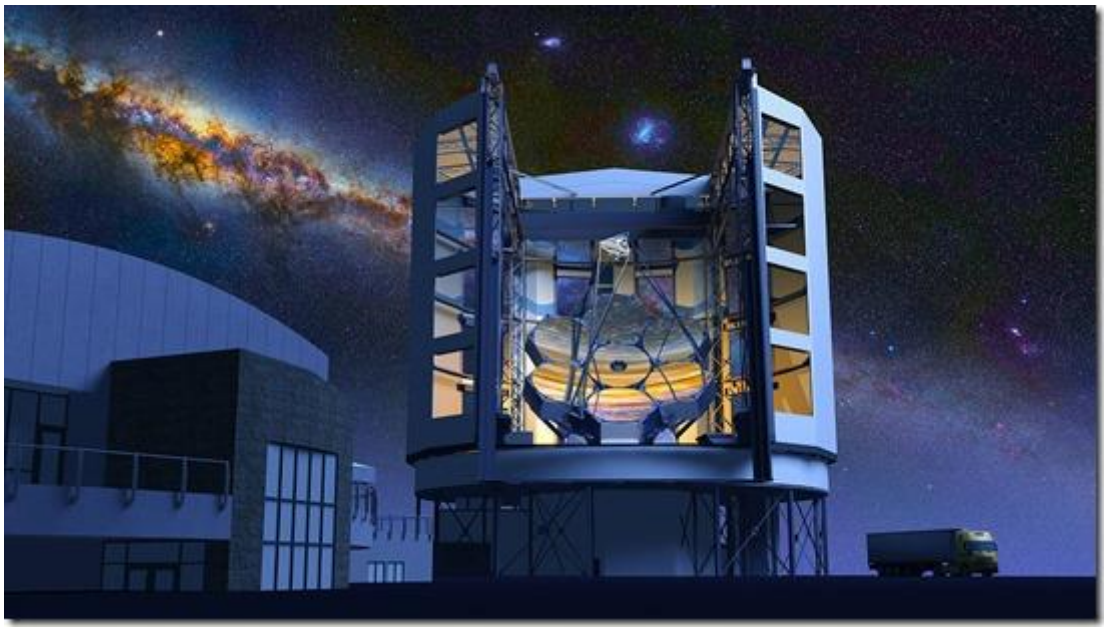
L'activité stakhanoviste de ce télescope va entrainer la génération d'énormes volumes de données à transmettre, stocker, traiter et partager. Chaque prise génère 6 Go (2 octets par pixel capté). Chaque nuit va donc générer 15 To d'images brutes (RAW), dont 4 To à conserver en archives, et chaque année, 6,8 Po. Elles seront stockées et gérées dans un datacenter du NCSA, le National Center for Supercomputing Applications, dans l'Illinois aux USA. Ses capacités de calcul devront excéder 100 TFlops. Ce qui sur le papier n'a plus rien d'extraordinaire puisque c'est la puissance de calcul théorique de la carte Nvidia Tesla V100 avec son processeur GV100, annoncée au printemps 2017.

Le projet a été financé par la NSF ($466m, pour le télescope et la gestion des données), le Département de l'Energie US ($163m pour la caméra), et des financements privés ($40m, provenant notamment des milliardaires Bill Gates et Charles Simonyi, ex-Microsoft). La NSF va financer ensuite les opérations sur 10 ans pour $270m, complétés de financements étrangers pour $100m.

Giant Magellan Telescope

Ce télescope sera aussi unique en son genre et combinera 7 miroirs traditionnels de 8,4 m de diamètre et 20 tonnes, comme ceux du LBT d'Arizona, et totalisant un diamètre de 25,4 m. Sa conception a été initialisée en 2003 et sa construction a été lancée en 2015. Il est installé au Chili près du désert d'Alacama et à 2550 m d'altitude. Son exploitation démarrera progressivement en en 2022 avec 4 miroirs opérationnels

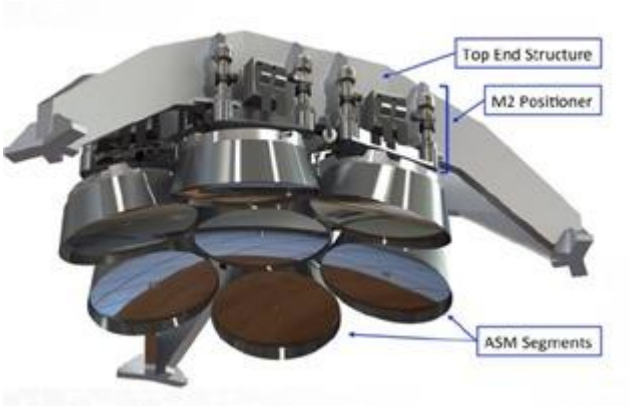
puis avec les 7 miroirs en 2025. Il s'écoulera donc plus de 20 ans entre la conception et l'utilisation ! Un cycle aussi long que dans les biotechs. Le projet est d'envergure internationale, piloté par les USA et avec des contributions coréennes. D'ailleurs, le terrassement sur lequel il est construit comprend la place pour installer un second télescope du même genre à ses côtés et installer un interféromètre reliant les deux télescopes. D'ici 2030/40… !



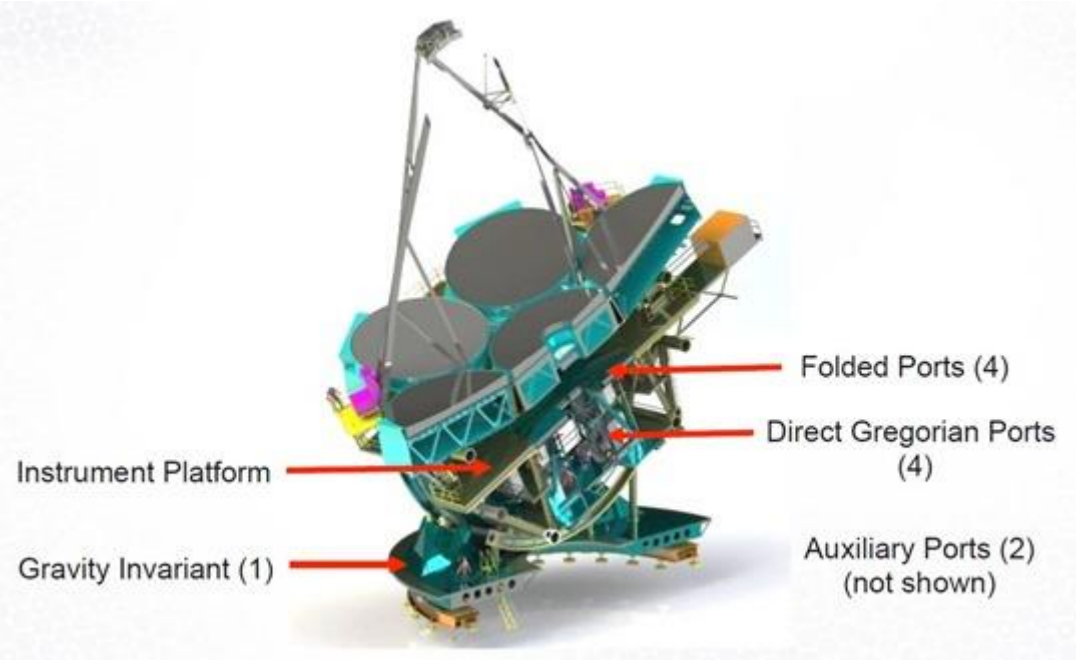
L'ambition scientifique de ce télescope original est décrite dans le détail dans **Giant Magellan Telescope Scientific Promise and Opportunities** qui date de 2012 (132 pages).

L'un des principaux objectifs de ce télescope est la détection des premières galaxies de l'Univers (première lumière et période de la réionisation). Mais comme de nombreux grands télescopes, les objectifs sont multiples et redondants avec d'autres télescopes géants : compréhension des trous noirs, cycle de vie des galaxies, constitution des étoiles, et recherche d'exoplanètes).

L'une des nouveautés de ce télescope est son très sophistiqué système d'optique adaptive. Il utilise tout un tas de lasers, dont un LGS (Laser Guidance System) de 6 lasers au sodium créant une mosaïque d'étoiles fictives dans la mésosphère permettant de tenir compte de l'impact de l'atmosphère à plusieurs altitudes. Ces lasers sont complétés d'autres lasers servant à l'alignement des segments de miroirs du M1 et du M2. Le miroir secondaire M2 est constitué de 7 segments de 1,06 m faisant un diamètre total de 3,2 m. Chaque miroir est positionné à 10nm près par trois vérins et leur surface contrôlée par 4704 positionneurs. L'ensemble est bien décrit dans **Adaptive Optics for the Giant Magellan Telescope** de Marcos van Dam (37 slides).



Les instruments qui récupèrent la lumière du télescope sont situés en dessous de celui-ci, dans la position dite grégorienne. Un troisième miroir, le M3, est orientable et envoie la lumière vers celui des instruments qui est utilisé. Un seul peut l'être à la fois.

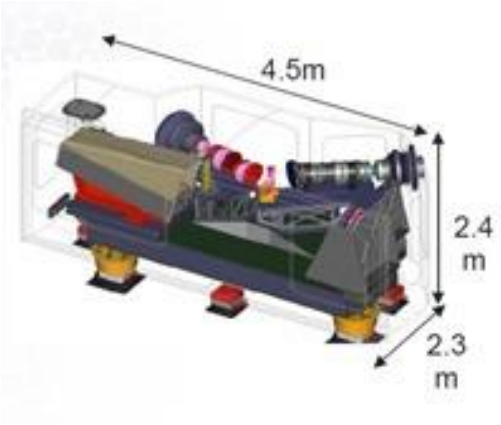


Voici la liste de ces instruments :

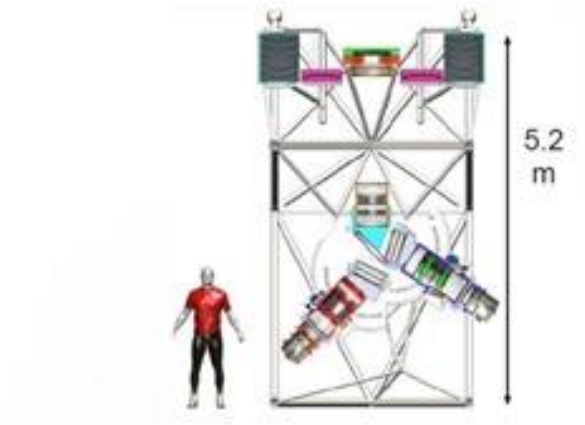
Name	Capability	Wavelength Range	AO Mode
G-CLEF	Visible Echelle	0.35 – 1.0	Seeing-limited
GMTNIRS	Near-IR Echelle	1.2 – 5.0	Diffraction-limited
GMACS	Visible MOS	0.35 – 1.0	Seeing-limited
NIRMOS	Near-IR MOS	0.85 – 2.5	Ground-layer AO
GMTIFS	Integral Field Spec	0.9 – 2.5	Diffraction-limited
TIGER	mid-IR planet imager	1.5 – 10.0	NGS diffraction-limited
MANIFEST	Fiber-Feed system	--	Instrument dependant

Avec tout d'abord, les instruments optiques :

- **G-CLEF** (GMT Chicago Large Earth Finder) : un spectrographe à haute résolution spectrale dans le visible alimenté par fibre optique. Il est dédié à la recherche de grandes exoplanètes et à l'évaluation de la distribution de matière noire dans les galaxies naines. Il est capable de mesurer avec une très grande précision la vitesse de mouvement des étoiles. Notamment celle qui est générée par la rotation des planètes autour d'elles.
- **GMACS** : un spectrographe multi-objets à double faisceaux dans le visible (pour le rouge et le bleu). Le mode multi-objet fonctionne avec 12 masques de sélection débouchant sur une segmentation en 80 partie de l'image issue de chaque masque. Il peut aussi être alimenté par les fibres optiques issues du MANIFEST. Il analyse l'évolution des étoiles et la composition des galaxies.



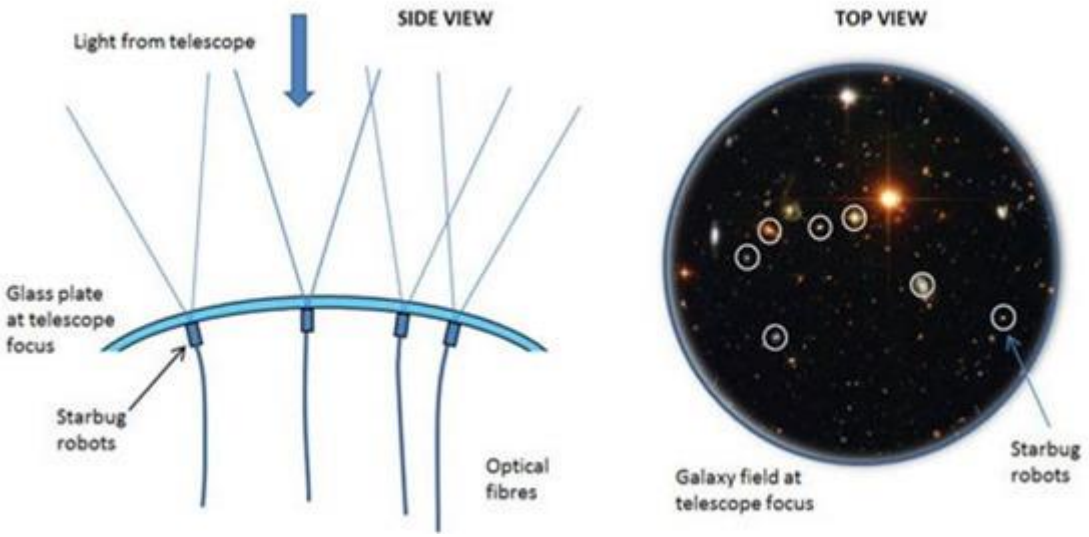
G-CLEF



GMACS

Puis les instruments couplés à l'optique adaptative :

- **GMTIFS** (GMT Integral Field Spectrograph) : un spectrographe qui découpe l'image en tranches avec un système à micro-miroirs. Il analyse l'histoire chimique des galaxies et évalue la masse des trous noirs.
- **GMTNIRS** (GMT Near-IR Spectrometer) : un spectromètre dans le proche infrarouge. Il analyse l'atmosphère des exoplanètes par la méthode des transits, la composition chimique des étoiles et des nébuleuses ainsi que l'histoire chimique des galaxies.
- **MANIFET** : un système de captation de la lumière doté de 2000 fibres optiques mobiles dans le champ de focale. Il alimente notamment le spectrographe multi-objets GMACS.



Et pour le futur :

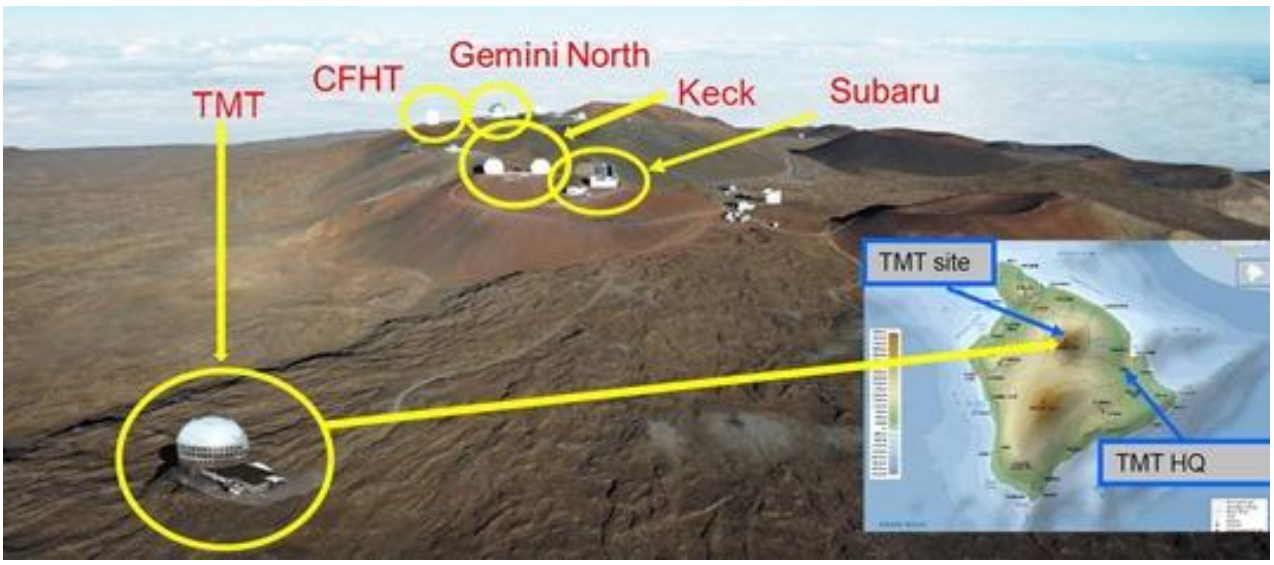
- **NIRMOS** (Near-IR Multi-Object Spectrograph) : un spectrographe dans le proche infrarouge couplé à l'optique adaptative dédié à l'analyse de galaxies éloignées.
- **TIGER** (Thermal IR imagER) : un imageur qui va cibler les exoplanètes et disques protoplanétaires opérant dans l'infrarouge moyen.

Thirty Meter Telescope

C'est un télescope doté d'un miroir primaire de 30 m issu d'un partenariat international associant un grand nombre de pays de la zone Pacifique.

Avant de rentrer dans la dimension scientifique et technique, évoquons une péripétie de ce projet : il doit être installé sur le site de Mauna Kea à Hawaï. Seulement voilà, le projet a été attaqué en justice par les associations représentants les natifs d'Hawaï qui veulent sauvegarder le site de construction qui est fortement symbolique pour leur culture et religion. Ces associations ont temporairement obtenu gain de cause via un arrêt de la Cour Suprême de Hawaï qui a stoppé net fin 2015 les travaux de terrassement qui avaient tout juste démarré. Sur un vice de forme de l'appel à projet ! S'y ajoutent des manifestations ininterrompues sur le site. C'est en quelque sorte le Notre Dame des Landes du télescope !

La décision est toujours en suspens, en attente d'une **autre décision** de la Cour Suprême de l'Etat de Hawaï qui pourrait intervenir d'ici fin 2017. L'ironie de l'histoire est que l'emplacement prévu du TMT est situé à quelques encablures de télescopes déjà implantés depuis des décennies : l'Américain Keck. l'Anglais Gemini North, le Japonais Subaru et le Franco-Canadien CFHT (*cf la photo du site ci-dessous*) ! Et sur un site en apparence dénué de toute végétation.



Le site de Mauna Kea est le meilleur de tous pour les télescopes car il est à plus de 4000 m d'altitude et qu'il y a peu d'humidité et de poussière. Si la construction ne peut être lancée à Mauna Kea, elle aura probablement lieu sur le site des Iles Canaries, qui est cependant moins satisfaisant côté altitude, poussière et humidité. Reste aussi ceux du Chili.

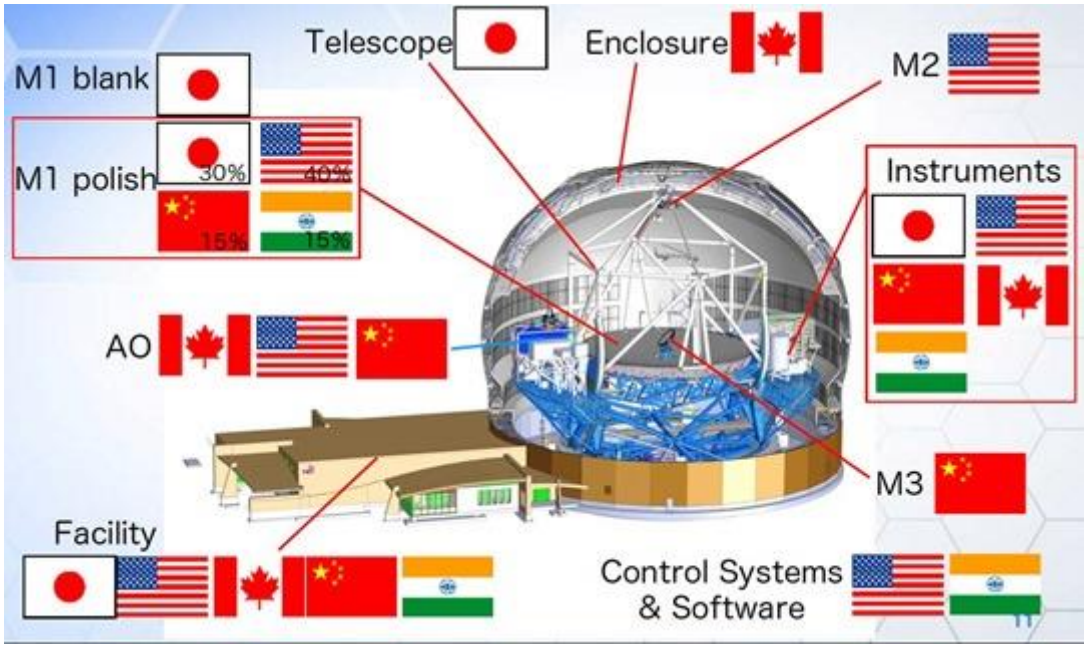
Malgré ces déboires, la construction des éléments du télescope est évidemment déjà lancée, notamment au niveau du miroir et des instruments. Qu'il s'agisse de Mauna Kea ou d'un autre site, les travaux de terrassement et la construction du télescope devrait démarrer quelque part, en 2018. Avec une "première lumière" en 2022 dans le meilleur des cas !

Comme pour chaque grand projet de télescope, un document décrit ses nombreux objectifs scientifiques, compilés par des comités internationaux d'astronomes. Il s'agit de **Detailed Science Case: 2015 Thirty Meter Telescope** (201 pages). Ce télescope servira à contribuer à répondre aux questions suivantes : quelle est la nature de la matière et de l'énergie noire qui expliquent la cohésion des galaxies ? Comment les galaxies se forment et évoluent ? Quel est le rôle des trous noirs dans la croissance des galaxies ? Comment se forment les étoiles et les planètes ? A quoi ressemblent les exoplanètes ? Est-ce qu'il existe de la vie quelque part dans l'Univers ? Le télescope servira aussi à ses heures perdues à observer le système solaire et les satellites de planètes éloignées, sans compter les astéroïdes et les comètes.

La forme particulière du dôme avec ses fenêtres ouvertes sur les côtés a été étudiée pour bien résister au vent et permettre son écoulement au-dessus du dôme et à l'intérieur de celui-ci via les fenêtres.

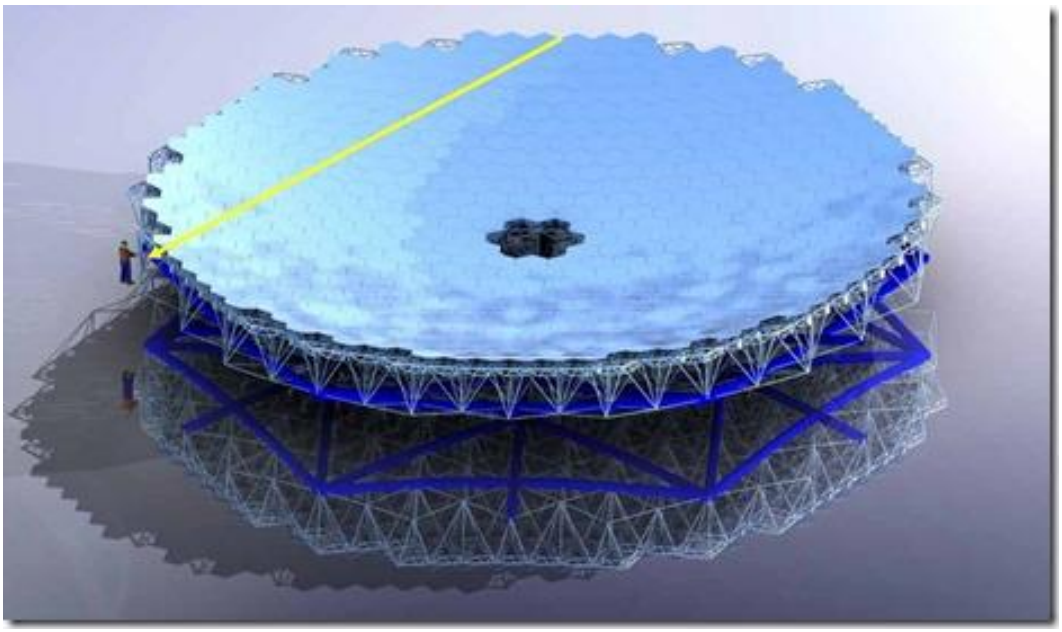
C'est un projet très international qui associe la Californie, la Canada, la Chine, l'Inde et le Japon. Le coût du télescope est estimé à $1,5B.

Le Canada réalise le bâtiment et les portes coulissantes et contribue à la fabrication de divers instruments scientifiques (IRIS OIWFS). Le Japon fabrique la structure du télescope (Mitsubishi Electric Corp, MELCO), polis les miroirs chez Canon et fabrique la caméra des instruments IRIS et MOBIE. La Chine réaliser le miroir M3, le système de guidage laser qui exploite un laser Allemand et les systèmes de refroidissement. Elle contribue au MOBIE et au AGWFS. La Suisse planche sur l'IRMS. L'équipement du télescope est réalisé en Inde notamment au niveau mécanique et capteurs. Les USA planchent sur les instruments MOBIE, IRIS et IRMS. Enfin, l'optique adaptative réalisée dans différents endroits (Allemagne, Chine, USA, Canada). Cela fait une belle coordination au programme pour que tout se goupille bien !

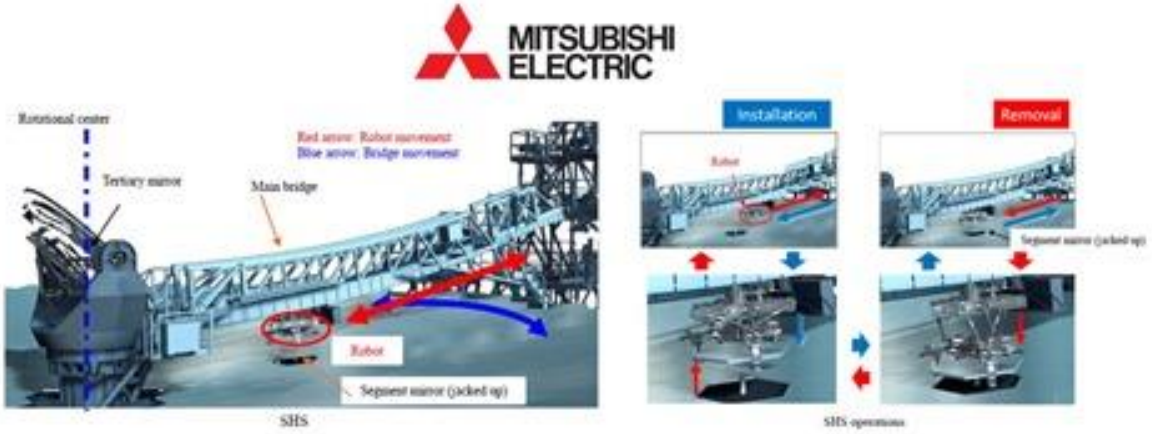


[l'une des sources de nombre des schémas intégrés est **The Thirty Meter Telescope: How California, Canada, China, India and Japan are Working Together to Build a Next Generation Extremely Large Telescope** de Gary H Sanders, du SLAC National Accelerator Laboratory (2013)]

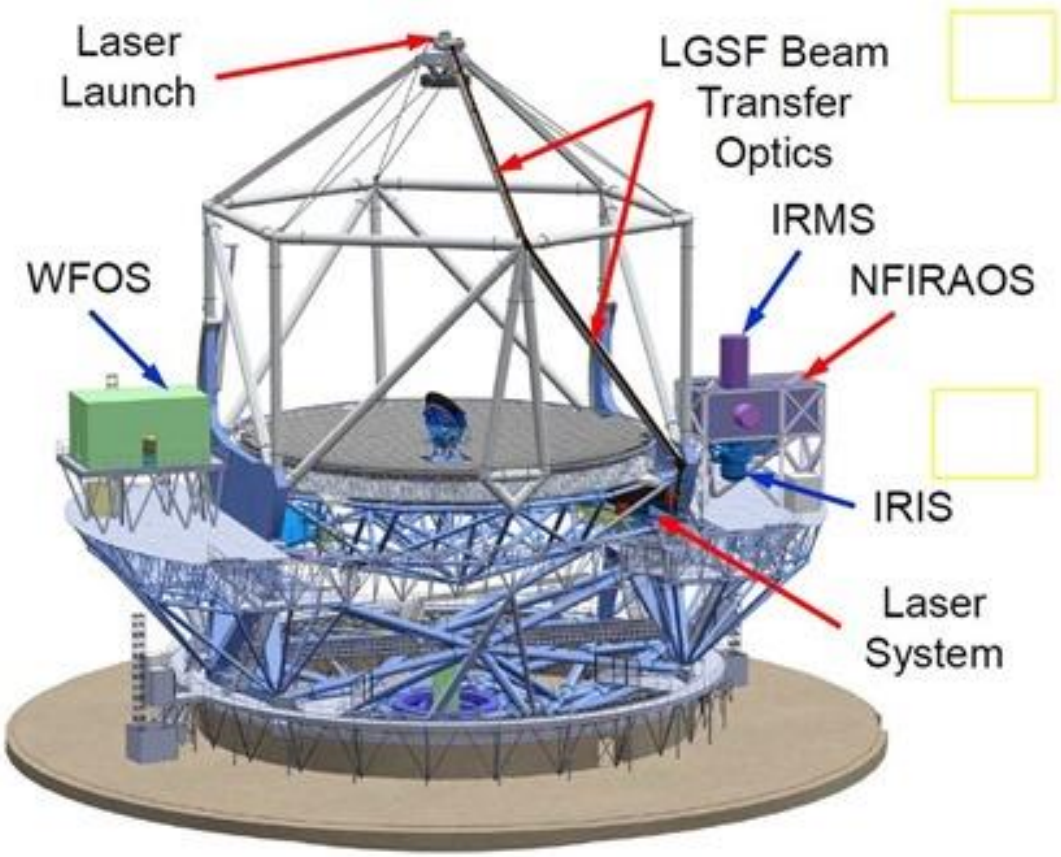
Le miroir primaire de 30 mètres du télescope – soit la taille d'un terrain de basketball – est constitué de 492 segments de 1,42 m de diamètre, mais de 82 types et formes différentes, en verre de céramique de 45 mm d'épaisseur et pensant chacun 250 kg. L'optique adaptative est activée sur ce miroir primaire avec trois vérins et deux capteurs de position par miroir, ce qui fait un total de 1476 vérins et 2772 capteurs. Voilà un peu d'économies d'échelle ! Ces 492 miroirs ont déjà été polis… en 2012 ! Le système reprend en plus grand la conception des miroirs de l'observatoire Keck lancé dans les années 1990.



A noter que Mitsubishi a construit un robot de manutention suspendu à un bras radial situé au-dessus du miroir primaire qui sert à remplacer les segments défectueux (*ci-dessous*). Il faut en effet prévoir la maintenance de l'ensemble. Les miroirs ne sont pas éternels !

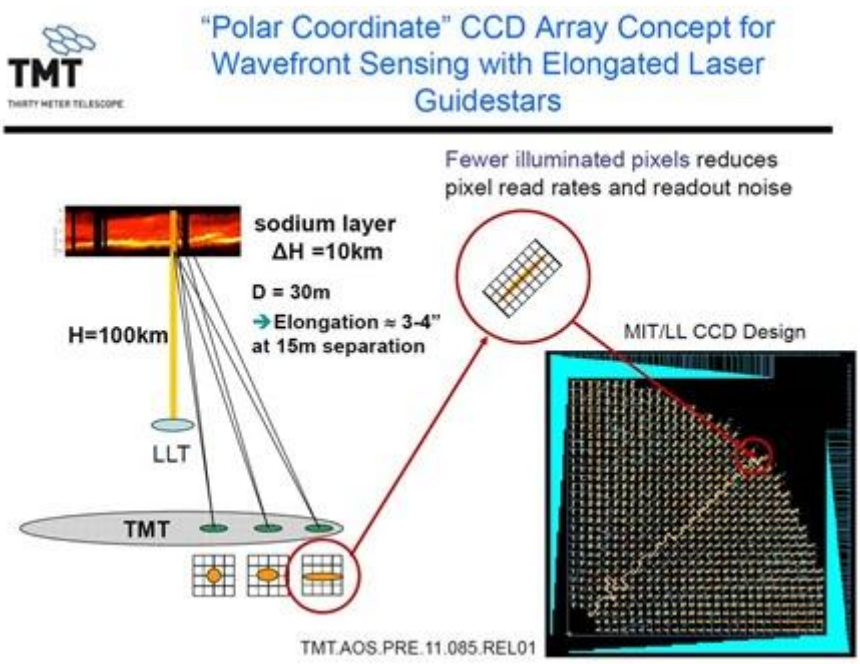


Le miroir secondaire (M2) fait 3,1 m, ce qui est la taille d'un bon télescope ! Il fait 10 cm d'épaisseur. Au centre du miroir principal se trouve un troisième miroir articulé (M3) de 2,5×3,5m qui envoie la lumière captée vers les instruments situés sur l'un des deux côtés du télescope. M3 fait aussi 10 cm d'épaisseur. Il peut très rapidement choisir les instruments d'un côté ou de l'autre du télescope. M2 est fabriqué en Californie et M3 en Chine.

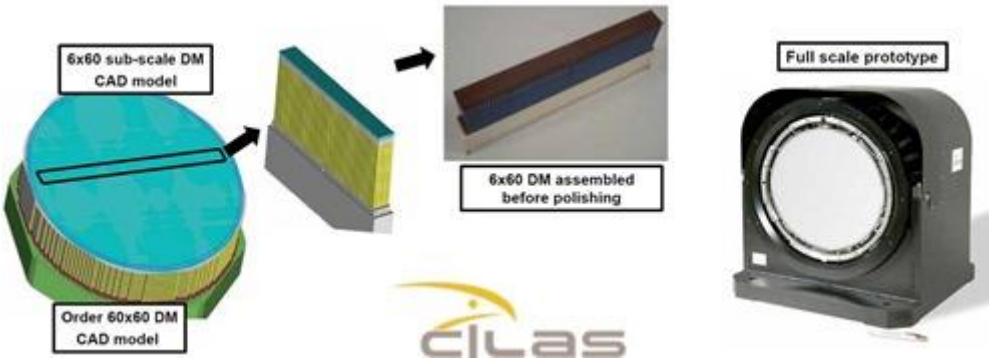


Les instruments d'observation prévus pour le TMT sont voisins de ceux que l'on trouve dans les télescopes généralistes déjà évoqués :

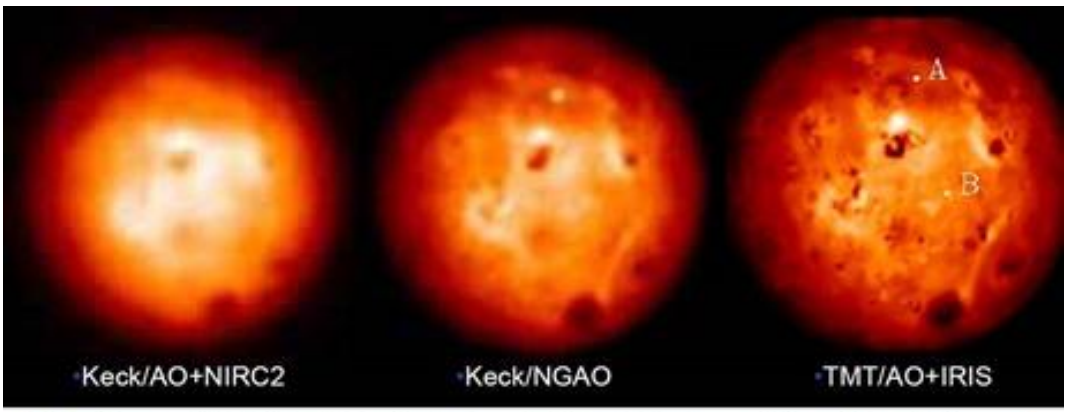
- **LGSF** (Laser Guide Star Facility) : le système de guidage laser d'origine chinoise. Il utilise plusieurs faisceaux qui créent quatre formes différentes d'astérisques, chacune d'entre elles étant dédiée au calibrage de l'un systèmes d'optique adaptative du télescope. Ce LGFS utilise un type de capteur CCD un peu particulier avec des pixels organisés en rectangles arrangés de manière polaire. Cela améliore la précision de la détection des points d'astérisques correspondant aux étoiles fictives créées par les laser au sodium dans la mésosphère.



- **NFIRAOS** (Narrow Field IR AO System) : l'outil de calibrage de l'optique adaptative, provenant du Canada. Le miroir adaptatif secondaire (M2) a été réalisé en France chez CILAS, une PME d'Orléans. La France n'étant pas l'un des financeurs du projet, CILAS n'est qu'un fournisseur. Cette PME créée en 1966 (Compagnie Industrielle des Lasers) est spécialisée dans l'optronique. Elle travaille beaucoup pour le CEA. Ses miroirs sont dotés de micro-vérins contrôlant leur forme. Il peut en avoir jusqu'à 5000. Et la correction peut intervenir à haute fréquence. Ces miroirs déformables sont déjà installés sur le VLTI, sur les télescope Gemini, sur le Grand Télescope des Canaries et sur le Subaru japonais.

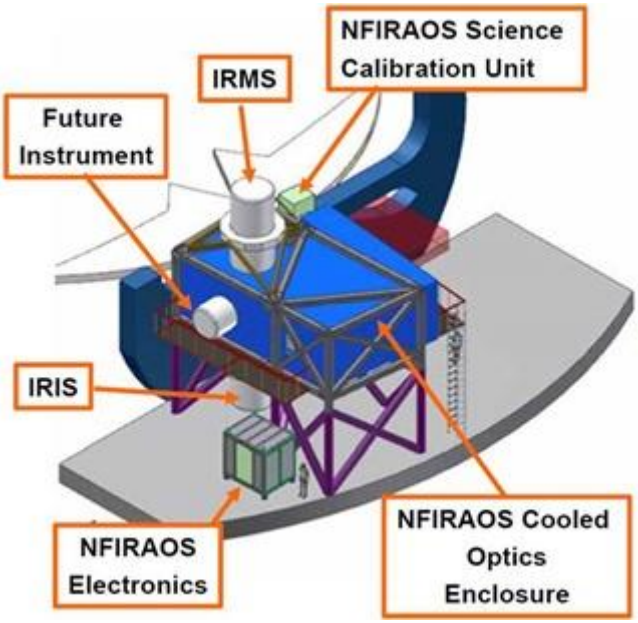


- **IRIS** (InfraRed Imager and Spectrometer) : un spectrographe et imageur dans le proche infrarouge, alimenté par l'optique adaptative NFIRAOS. Il permet de comprendre la formation des galaxies éloignées, celle des trous noirs et l'organisation du centre de la Voie Lactée. L'exemple dessous, qui est une simulation, illustre la différence entre une photo dans l'infrarouge du satellite Io de Jupiter avec le télescope Keck et son optique adaptative initiale, puis avec sa nouvelle optique adaptative et enfin avec le TMT, son optique adaptative et l'IRIS. La résolution est de 25 km sur ce satellite qui se trouve à 5 Unités Astronomiques (UA) de la Terre.



Simulations of Io Jupiter-facing hemisphere in H band (Courtesy of Franck Marchis)

- **IRMS** (InfraRed Multislit Spectrometer), un spectromètre multi-objets également dans le proche infrarouge, également alimenté par le NFIRAOS. Il permet l'analyse es débuts de l'Univers et des premières galaxies. Cet instrument reprend la conception du MOSFIRE du télescope Keck. L'IRMS et l'IRIS sont situé sur l'un des côtés du télescope et alimentés par le miroir orientable M3. Le schéma ci-dessous explique l'arrangement de l'optique adaptative NFIRAOS, de l'IRIS et de l'IRMS. A noter la taille d'une personne en bas qui illustre celle de ces instruments.



- **WFOS** (Wide-field Optical Spectrometer and imager), aussi dénommé MOBIE (Multi-Object Broadband Imaging Echellette), un spectrographe à large champ couvrant l'UV et le visible. Ses masques permettront d'observer 200 d'objets simultanément. Il sert à comprend la constitution des galaxies éloignées. L'instrument est sur l'autre côté du télescope en vis à vis de l'ensemble NFIRAOS / IRIS / IRMS.

Sachant que d'autres instruments sont prévus après la mise en service du télescope : IRMOS (Multi-IFU near-IR spectrometer pour la détection de la première lumière de l'histoire de l'Univers), NIRES (Near-IR AO-fed echelle spectrometer pour la détec-

tion d'exoplanètes autour d'étoiles naines et la compréhension de la chimie des étoiles), MIRAO et MIRES (Mid-IR AO-fed Echelle Spectrometer pour l'analyse de l'origine de la masses des étoiles, l'accrétion de matière autour des étoiles naissantes et évolution des disques planétaires), PFI (Platform Formation Instrument, pour la détection directe et l'analyse spectroscopique d'exoplanètes), HROS (High-Resolution Optical Spectrometer, pour la recherche d'exoplanètes par effet Doppler) et le WIRC (wide-field AO imager, pour analyser le centre et les étoiles de la Voie Lactée).

Pour ce qui est du logiciel, la documentation précise qu'ils sont réalisés en Scala, Java et Python et qu'ils tournent sur des dérivés de Linux : CentOS et Scientific Linux. Windows est interdit, sauf pour certains postes de travail de développement !

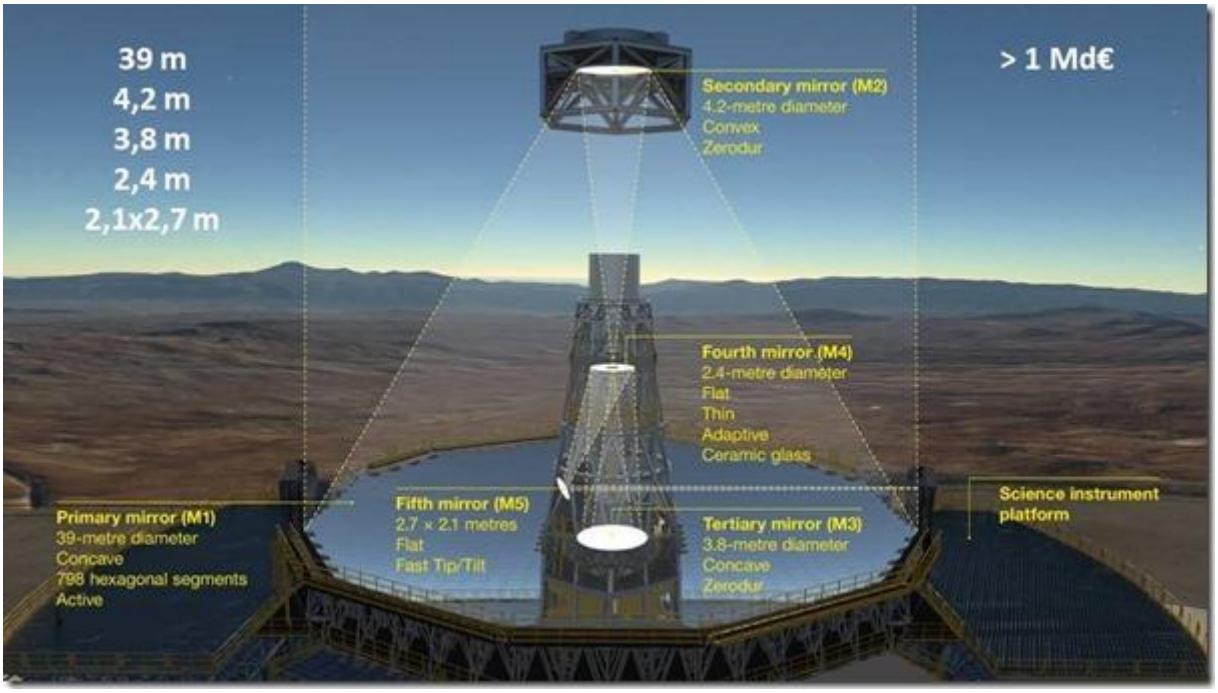
European Extremely Large Telescope

Le dernier télescope géant de cet inventaire est le plus grand ! Son miroir de 39,3 mètres de diamètre bat tous les records de taille des télescopes en cours d'achèvement. Du côté du lieu de construction, aucun soucis : il est au Chili sur l'observatoire de Silla dans le désert d'Atacama, là où les permis de construire sont plus faciles à obtenir qu'à Hawaï. Les travaux de terrassement ont d'ailleurs **démarré** fin mai 2017, à 2400 m d'altitude. La mise en service est prévue pour 2024.

Ce télescope est sous l'égide de l'organisation Européenne ESO qui a déjà sous ses ailes le VLT du Chili, vu dans l'épisode précédent ainsi, pas loin, de l'ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array), un radiotélescope interféromètre. L'European Souther Observatory est financé et supporté par 15 pays dont… le Royaume Uni. Le budget dépassera 1Md€ (un milliard d'Euros issus de financements publics).

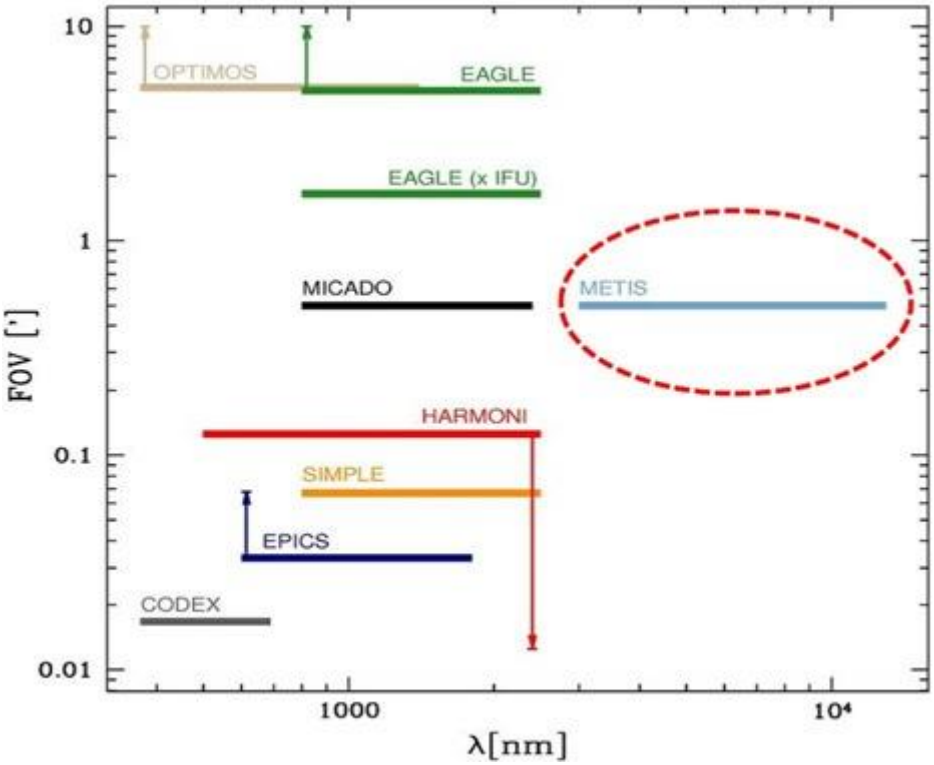
Le **programme scientifique** (148 pages, 2005) de l'E-ELT est un catalogue à la Prévert de toutes les questions que se posent les astronomes et que nous avons déjà parcourues pour les autres télescopes dans l'**épisode précédent**. En gros, tout est au programme ! A ceci près que la demande des scientifiques était de créer un télescope de 50 à 100 mètres. les contraintes économiques et technologiques ont fait atterrir le projet sur du presque-raisonnable avec un miroir de 39,5 mètres. Déjà quatre fois plus gros que le record existant ! Mais largement de quoi occuper les astronomes dans la recherche d'exoplanètes, étoiles et galaxies.

Le **programme de construction** (263 pages, 2010) détaille tous les aspects d'ingénierie du projet dont sont tirées une bonne part des informations ci-dessous. L'ESO a même créé un **trailer vidéo** de présentation du télescope.

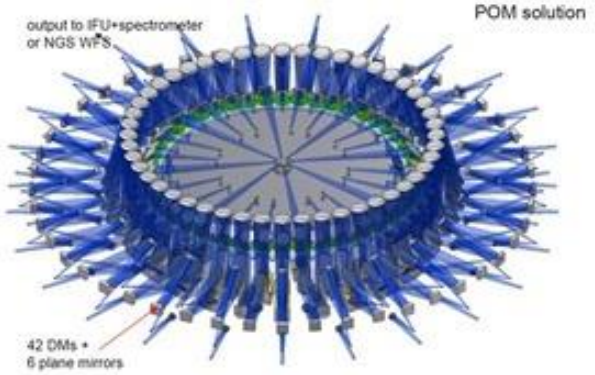


L'optique E-ELT est construite sur un système à base de cinq miroirs. Le miroir principal de l'E-ELT est composé de 798 segments hexagonaux de 1,5 mètre, ceux-ci ne faisant que 5 cm d'épaisseur. Ils sont en vitrocéramique et de forme asphérique. Le miroir secondaire fait 4,2 mètres, ce qui en ferait le 24e plus grand télescope terrestre à lui tout seul ! Les segments du miroir principal et de ce miroir M2 sont polis et testés par le français **Safran Reosc** dans un site situé à Poitiers. Le champ de vue (Field of View, FOV) du télescope fait le tiers d'une pleine lune. Suivent un miroir M3 de 3,8 m, puis un quatrième M4 de 2,4 m, doté de 5806 vérins adaptant sa forme jusqu'à 1000 fois par seconde pour tenir compte des perturbations de l'atmosphère détectées en temps réel par un système de guidage à base de 6 lasers, et enfin, un dernier miroir de 2,1×2,7 m qui envoie la lumière vers les instruments situés sur le côté du télescope.

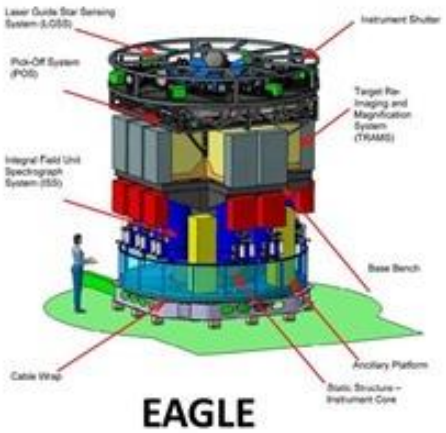
Les instruments optiques prévus pour l'E-ELT sont nombreux comme il se doit. Ils se positionnent sur des bandes de fréquences et des champs de vision différents (*schéma ci-dessous*).



- **CODEX** : un spectrographe optique à champ étroit dans le visible et à haute résolution spectrale de 130 000 (nombre de raies générées dans le spectre). Il est équipé de quatre capteurs CCD de 9Kx9K pixels. Deux pour le bleu et deux pour le rouge. Une bien belle résolution qui annonce d'excellentes images !
- **EAGLE** : un spectrographe à champ large multi-objets dans le proche infrarouge. Il est dédié à l'observation des premières galaxies, à l'étude de la formation des étoiles et à la croissance des trous noirs et des galaxies. Il reprend le concept du spectrographe KMOS du VLT vu dans l'article précédent, exploitant 42 miroirs captant une partie du champ visuel à analyser. Cet instrument est réalisé par le Laboratoire d'Astronomie de Marseille, l'ONERA et l'Observatoire de Paris, en collaboration avec des centres de recherche anglais.



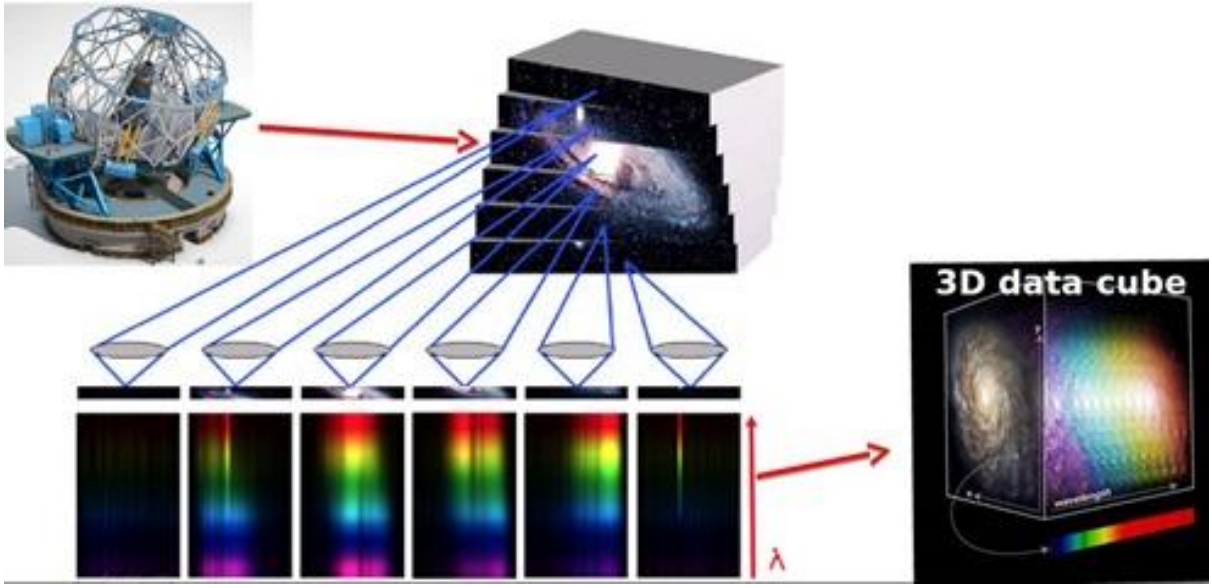
système d'acquisition multi-objets



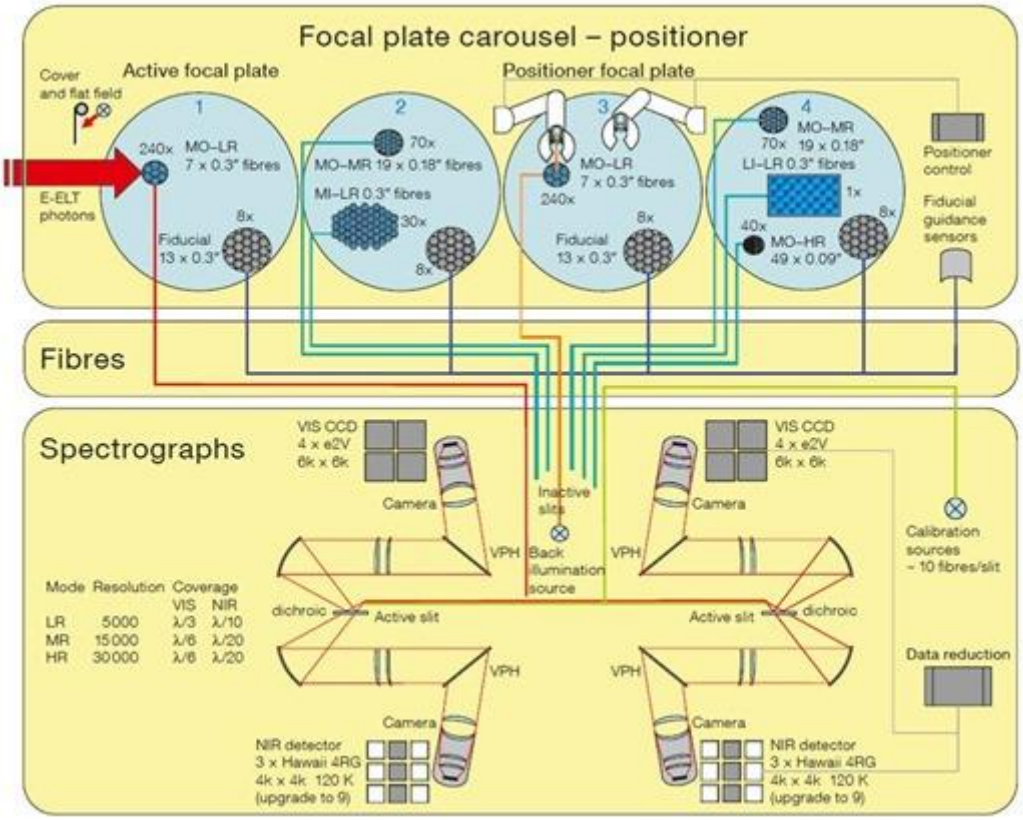
EAGLE

- **EPICS** : un imageur et spectrographe dans le visible et l'infrarouge couplé à l'optique adaptative et à un coronographe, adapté à la détection directe de planètes.

- **HARMONI** : un spectrographe large bande du visible au proche infrarouge. Il est réalisé avec le concours du LAM de marseille, l'ONERA et le CRAL de Lyon.



- **METIS** : un imageur et spectrographe dans l'infrarouge moyen. Il présente l'avantage d'avoir une très bonne résolution et une grande sensibilité. Il contient un coronographe permettant la détection directe d'exoplanètes et l'analyse de leur atmosphère. La spectroscopie peut être réalisée avec une grande résolution spectrale, de 100 000 raies. Le CEA a participé à sa conception.
- **MICADO** : une caméra dans le rouge et le proche infrarouge comprenant aussi un spectrographe, alimentant quatre CCD de 2Kx2K pixels. Il bénéficie aussi de contributions françaises (LESIA, GEPI, IPAG).
- **OPTIMOS** : un spectrographe multi-objet à large champ, alimenté par blocs de fibres optiques positionnables mécaniquement.



- **SIMPLE** : un spectrographe à haute résolution spectrale (130 000 raies) dans le proche infrarouge. Il servira à l'analyse de l'atmosphère des exoplanètes par la méthode des transits et au milieu intergalactique très éloigné.

Nul doute que les découvertes que fera ce télescope des records feront avancer la science. Rendez-vous aux alentours de 2024 pour découvrir ses premières images !

Radiotélescopes

Après une première partie dédiée à aux **dimensions de l'Univers**, et les trois suivantes consacrées aux télescopes optiques terrestres, je vais ici m'intéresser à une catégorie bien à part de télescopes, les radiotélescopes.

L'Univers nous arrose régulièrement en particules diverses (neutrinos, …), ondes électromagnétiques et aussi ondes gravitationnelles. Seules les ondes de lumière visibles et proches du visible, les ondes radio et les ondes gravitationnelles ne sont pas bloquées par l'atmosphère. Les autres ondes électromagnétiques comme les rayons X et gamma ou une bonne part de l'infrarouge moyen et lointain ne peuvent pas être captés sur terre et ne le sont que par des télescopes spatiaux que nous examinerons dans une autre partie de cette série d'articles.

Les ondes radio passant bien, tout du moins entre 1 cm et 30 m de longueur d'onde (10MHz à 30 GHz, sachant que plus la longueur d'onde est grande, plus la fréquence est faible et réciproquement) et moyennement bien dans les ondes millimétriques (entre 1 mm et 1 cm), pourquoi donc ne pas en profiter ? Qui plus est, elles sont observables jour comme nuit. Elles sont émises par de nombreux objets célestes : les galaxies de toutes sortes, et dans tous leurs états (naissance, développement, évolution, fin de vie), les phénomènes extrêmes (pulsars pour les étoiles à neutrons en rotation, quasars pour les galaxies avec un noyau très actif), les étoiles (idem), ainsi que les nuages de gaz comme de poussières et notamment ceux qui sont le prélude à la création d'étoiles. Elles sont même émises par l'Univers dans son histoire la plus reculée, 380 000 ans après le big bang, dans ce que l'on dénomme le bruit de fond diffus cosmologique, ou **CMB** pour Cosmic Microwave Background.

Pour capter ces ondes, les astronomes et astrophysiciens font appel à diverses catégories de radiotélescopes que nous allons examiner. Ce sont des engins à la fois très imposants, très originaux et variés. On y trouve des télescopes à antenne parabolique, à antenne non parabolique, et avec des arrangements à base d'antennes multiples dans les deux cas, mettant en œuvre de l'interférométrie pour créer des images à haute résolution à partir de l'information collectée par plusieurs antennes ou paraboles. Que captent-ils et comment fait-on pour reconstituer des images du cosmos dans les ondes radio ? Surtout dans la mesure où les longueurs d'onde sont grandes et qu'il n'existe pas de capteurs d'images à même de capter les ondes radio ? Ce sont ces mystères scientifiques et techniques que je vais essayer de lever. Vous découvrirez aussi des télescopes méconnus comme le **South Pole Telescope**, ceux de l'**IRAM** français installés à Nancay et en Espagne ainsi que l'étonnant **LOFAR**, un interféromètre géant déployé dans plusieurs pays européens.

Comme pour les articles précédents, j'ai compulsé un grand nombre de sources d'informations pour constituer et illustrer cette compilation de radiotélescopes. J'ai notamment apprécié les **excellents cours d'ASTRON**, l'organisme de radiotélescopes publics des Pays Bas, un des pionniers européens dans le domaine. Avec en tout, 11 présentations passionnantes. Face à cela, je suis comme un enfant dans un

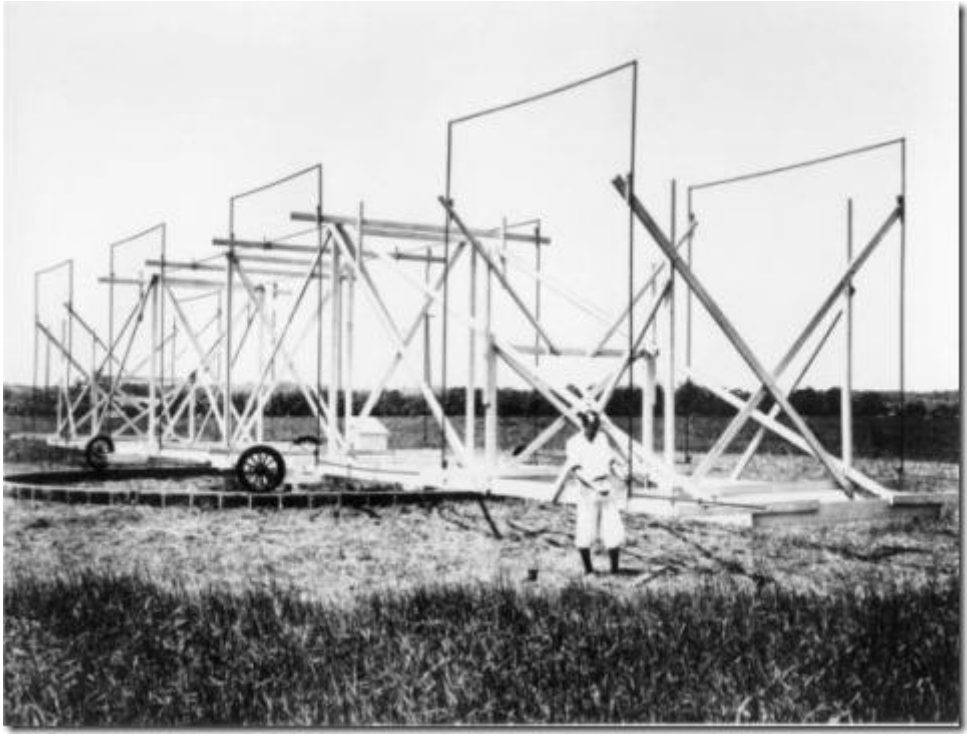
grand magasin de jouets. Tout est à portée de main et gratuit, mais le temps est la matière première la plus rare pour tout absorber (et parfois, comprendre) toute cette somme de connaissances ! Donc, je vais vulgariser ! Malgré la vulgarisation que les spécialistes du sujet jugeront plus qu'extrême, cet article fait tout de même 29 pages au format A4 ! Ce sont les devoirs de vacances 2017 !

Voici donc ce que j'ai pu en tirer !

Grandes découvertes de la radio astronomie

Un peu comme le Post-it de 3M, la radioastronomie est une découverte accidentelle. Elle résulte de travaux liés aux débuts du développement des télécommunications radio longue distance. Celles-ci ont été perfectionnées aux débuts du XXe siècle avec la première liaison à basse fréquence (<100 kHz) réalisée par Marconi en 1901, suivie de l'usage des ondes courtes en 1920 (1,5 MHz) puis des ondes longues en 1927 par AT&T (60 kHz) et puis en 1929, l'usage d'ondes courtes entre 9 et 21 MHz, toujours par AT&T. Ces télécommunications étaient gênées par des interférences dont l'origine n'était pas toujours comprise.

Travaillant dans les Bell Labs, l'ingénieur **Karl Jansky** (1905 – 1950) cherchait à déterminer les fréquences optimales dans les ondes courtes pour gérer ces télécommunications radio transatlantiques. Voulant déterminer l'origine de parasites qui interviennent dans les transmissions par ondes radio courtes qui se manifestaient sur la fréquence de 20,5 Mhz, il fabriqua une grande antenne directionnelle fixe mais captant les ondes au gré de la rotation de la terre (*ci-dessous*).



Après plus de deux ans d'observations, il constata que la fréquence de la perturbation radio était d'environ une journée (23 heures et 56 minutes correspondant au jour sidéral). Elle correspondait de plus au moment où l'antenne pointait dans une même di-

rection du ciel, la constellation du Sagittaire, qui correspond au centre de la Voie Lactée. Il en déduit que les parasites provenaient de celle-ci et pas d'une source terrestre. On était en 1932 et la découverte fut publiée début 1933. Karl Jansky publia même une carte du ciel indiquant la source de ces ondes radio.

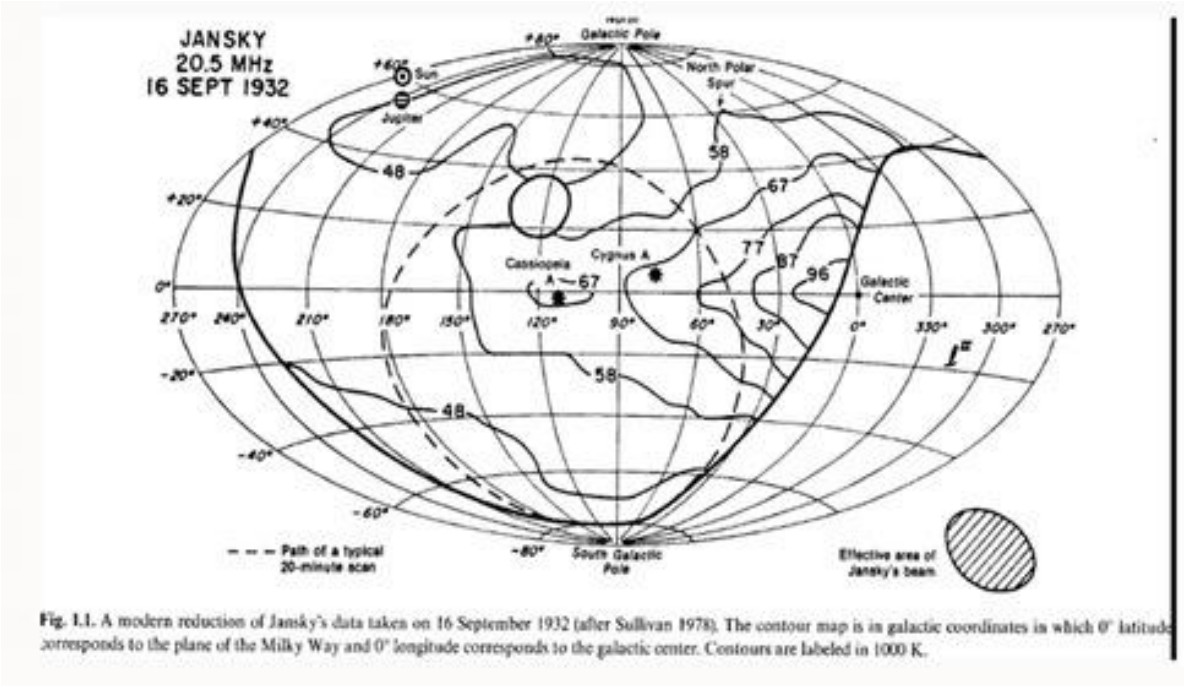
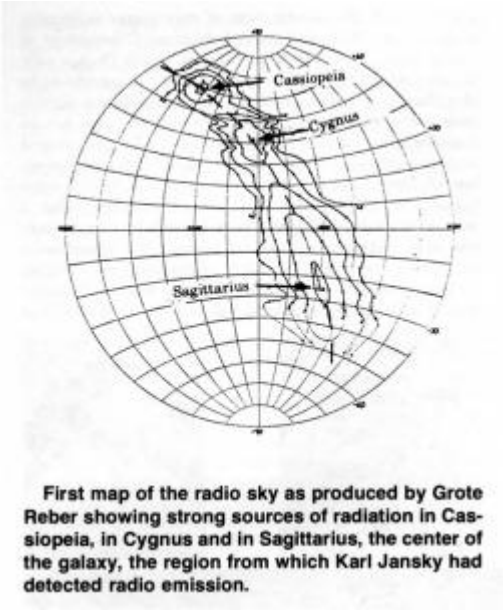


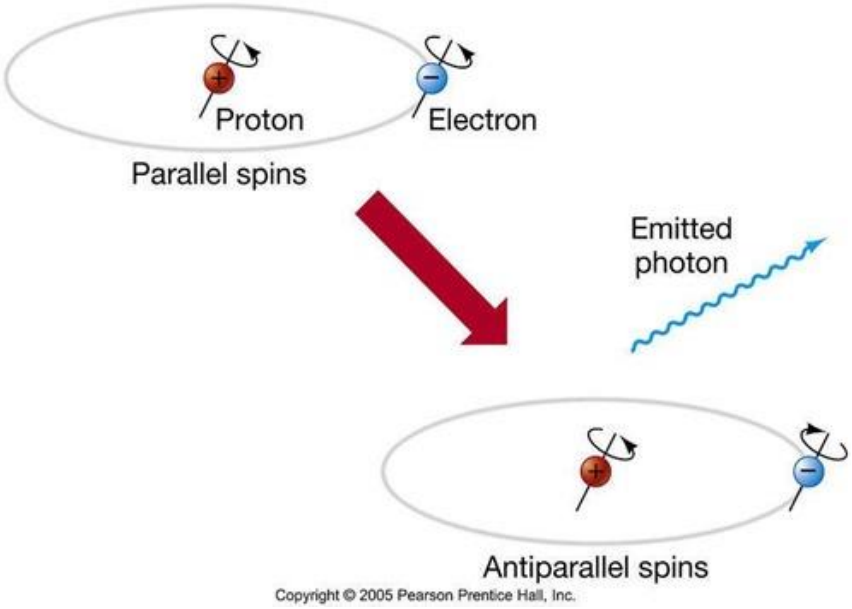
Fig. 1.1. A modern reduction of Jansky's data taken on 16 September 1932 (after Sullivan 1978). The contour map is in galactic coordinates in which 0° latitude corresponds to the plane of the Milky Way and 0° longitude corresponds to the galactic center. Contours are labeled in 1000 K.

L'ingénieur fut malheureusement affecté à d'autres tâches dans les Bell Labs. C'est un autre ingénieur radio américain, **Grote Reber** (1911 – 2002), qui en tira plus tard parti en devenant le premier véritable radioastronome. Il construisit le premier radio-télescope parabolique en 1938, permettant de concentrer les ondes radio sur un capteur dont nous découvrirons plus loin la nature. Entre 1939 et 1947, il explora plusieurs fréquences : 3300 MHz (9 cm) adaptée à la captation des ondes radio d'origine thermique, puis 910 MHz (33 cm), 160 MHz (187 cm) et 480 Mhz (62 cm). Il s'en servi pour détecter les structures de la Voie Lactée, (re)découvrant un pic d'ondes radio dans la constellation du Sagittaire et surtout, sa structure en disque aplati, ainsi que diverses autres galaxies dont la radio-galaxie Cygnus A, située à 600 millions d'années lumière. Il découvrit aussi que les ondes radio cosmiques étaient d'origine non thermique.



First map of the radio sky as produced by Grote Reber showing strong sources of radiation in Cassiopeia, in Cygnus and in Sagittarius, the center of the galaxy, the region from which Karl Jansky had detected radio emission.

Arrive un troisième larron, le hollandais **Hendrik Van Der Hulst**. Il prévoit en 1944 que la fréquence de changement de spin d'électron de l'hydrogène génère une onde radio de 25 cm qui devrait être détectable (1420 MHz) en radioastronomie. Elle correspond à un changement d'état énergétique de l'hydrogène neutre – non ionisé ou attaché à d'autres atomes dans des molécules – qui intervient dans les nuages de gaz des galaxies. Lorsque les atomes d'hydrogène rentrent en collision, ils changent de niveau énergétique. Après un certain temps, les atomes d'hydrogènes reviennent à leur niveau énergétique bas et émettent un photon dans cette fréquence de 1420 MHz. Et 5% à 10% de la Voie Lactée est composée d'hydrogène atomique ! Donc, une belle source de recherche !

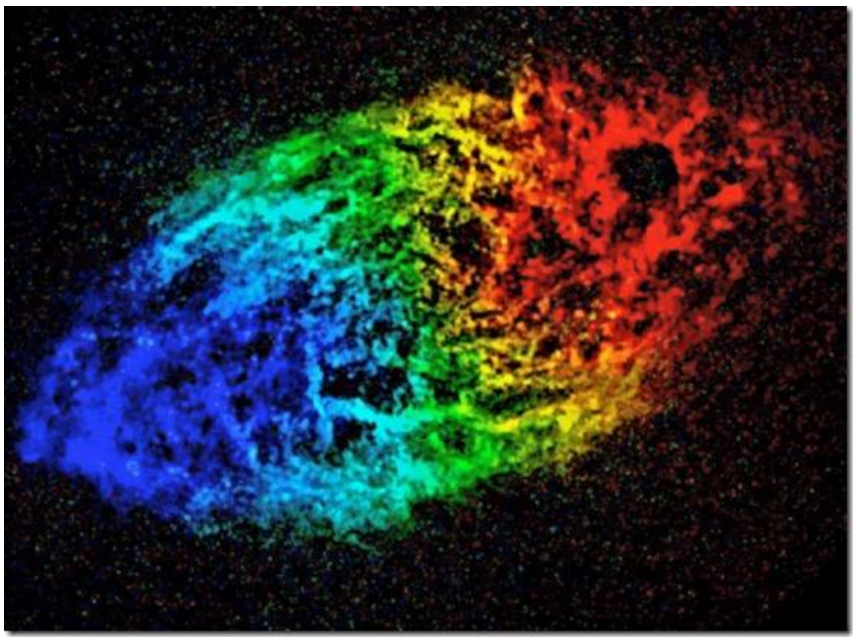


L'émission de cette fréquence de 1420 MHz par la Voie Lactée fut validée en mars 1951 par **Harold Ewen** et **Edward Purcell** de l'Université d'Harvard, exploitant une antenne en forme de corne (*ci-dessous*). Leurs données furent confirmées en mai de

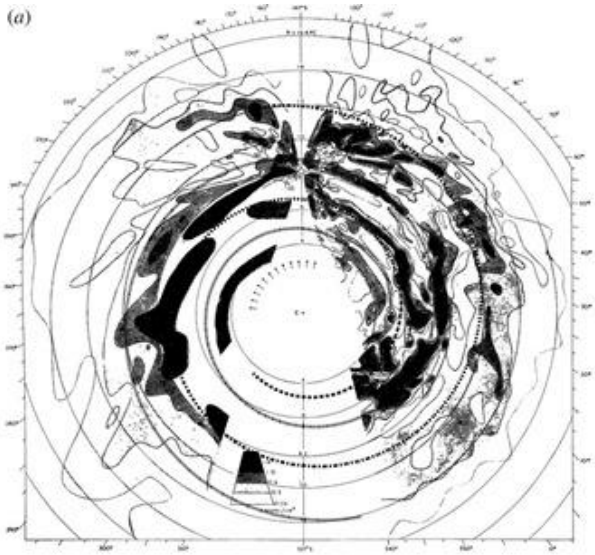
la même année par les astronomes hollandais **Richard Muller** et **Jan Oort** et les Autraliens **Wilbur Christiansen** et **Jim Hindman**.

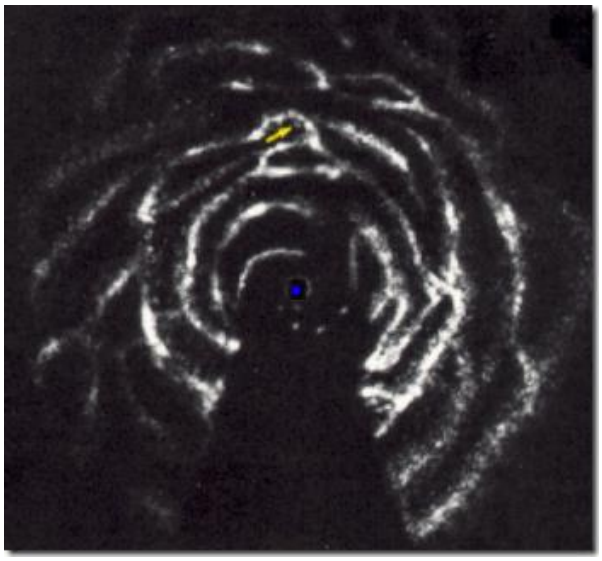
Elles permirent en 1952 de commencer à cartographier la structure en spirale de la Voie Lactée. En tenant compte de l'effet Doppler sur la raie spectrale de l'hydrogène, il était possible d'évaluer sa vitesse de rotation, comme, plus tard, de la rotation d'autres galaxies vues sur la tranche (comme ci-dessous avec la galaxie M33, la couleur artificielle reflétant l'éloignement ou le rapprochement des deux lobes de la galaxie).

On a notamment observé que la vitesse de rotation angulaire dans la Voie Lactée ne dépendait pas de la distance au centre. C'est ce qui sous-tend l'hypothèse de l'existence d'un halo de matière noire (de nature inconnue) complétant la poussière et les gaz connus de la galaxie. La matière noire est depuis plusieurs décennies une sorte de Graal de l'astrophysique. Tout le monde en parle mais personne ne l'a jamais observée directement. Son existence est inférée par d'autres observations et par l'application des lois connues de la physique (gravité, théorie de la relativité générale).



Le signal radio est analysé par transformées de Fourrier pour identifier la raie spectrale H1 et ses répliques correspondant aux différents bras de la Voie Lactée observée (**source**). Cette découverte marqua le véritable début de la radio astronomie comme une discipline scientifique bien à part. Ci-dessous à gauche, la cartographie de la Voie Lactée dans son état en 1958, réalisée par Jan Oort, Frank John Kerr et Gart Westerhout.





En 1955, **Bernie Burke** et **Kenneth Franklin** détectaient des ondes radio provenant de Jupiter avec l'antenne de Mills Cross alors que les émetteurs d'ondes radio étaient alors bien plus distants.

S'en suivirent de nombreuses découvertes qui continuent jusqu'à ce jour. A commencer par celle du premier quasar – ou quasi-stellar radio sources – découvert par **Maarten Schmidt** et **Bev Oke** en 1963 (3C 273) et situé à deux milliards d'années lumières de votre chaumière. Cette détection de quasar réalisée d'abord dans les radio-fréquences était ensuite confirmée optiquement par le télescope Hale du Mont Palomar, mettant en évidence un glissement vers le rouge de son spectre ra-

dio (longueur d'onde plus longue). Les ondes radios correspondantes ne sont pas d'origine thermique. Elles proviennent de phénomènes gravitationnels extrêmes.

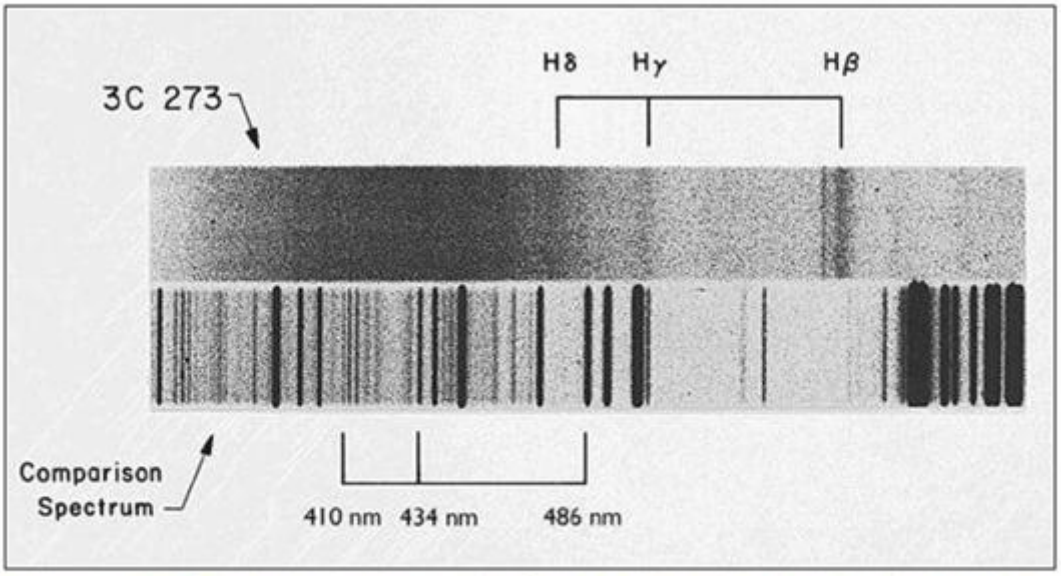
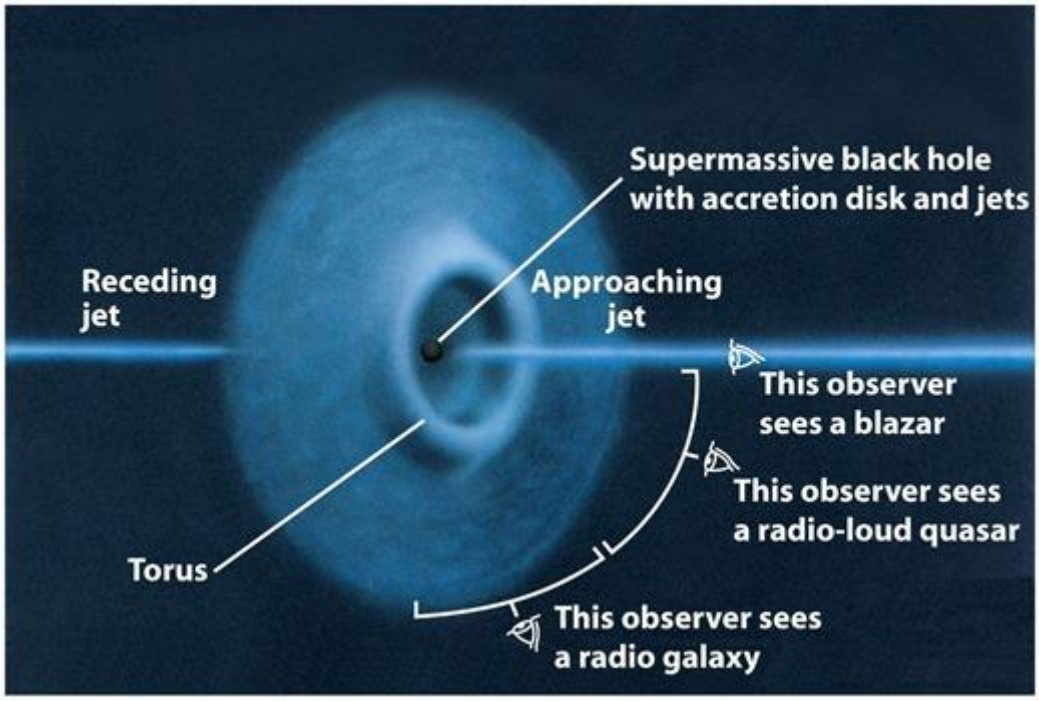


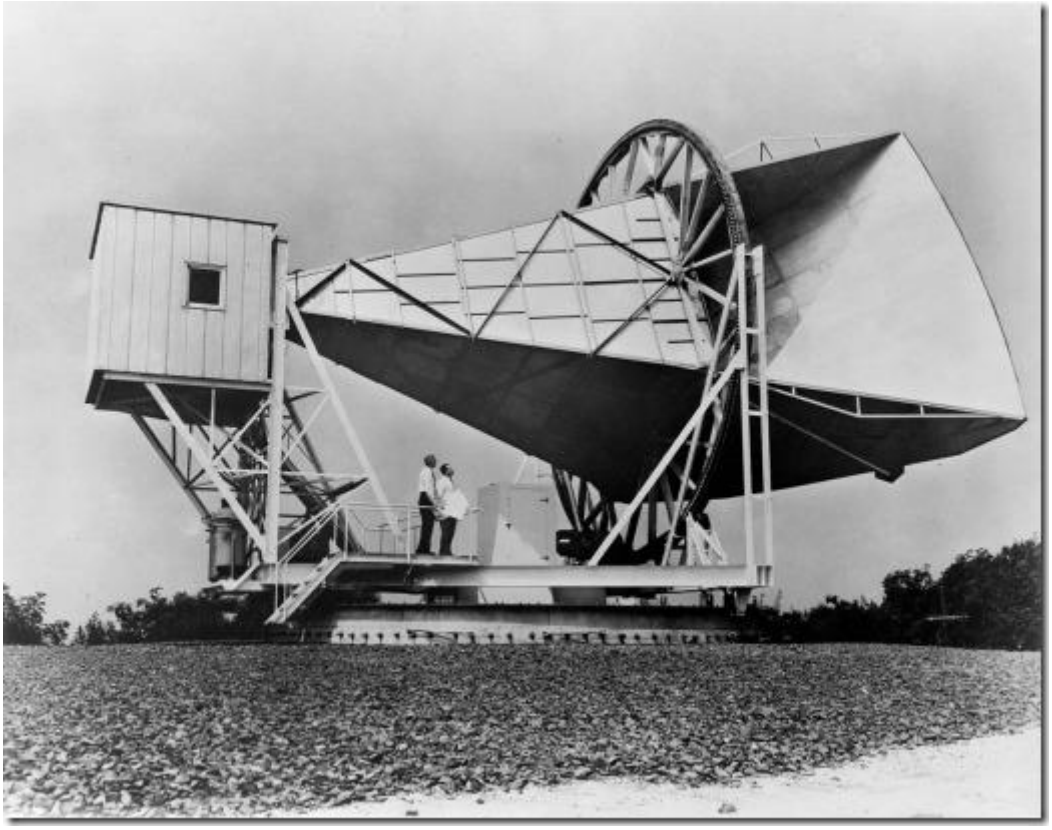
Figure 10: The spectrum of 3C 273 obtained with the 200-in Palomar telescope (courtesy: Maarten Schmidt).

Un quasar est une source très puissante d'ondes radio située à plusieurs milliards d'années lumières de la Voie Lactée. Elle peut être cent fois plus puissante qu'une galaxie. La fréquence élevée de leur luminosité qui se compte en semaines ou années implique que ces sources soient relativement petites, de l'ordre de quelques semaines à années lumières. Les quasars font partie du groupe plus large des noyaux galactiques actifs (AGN = Active Galactic Nuclei).

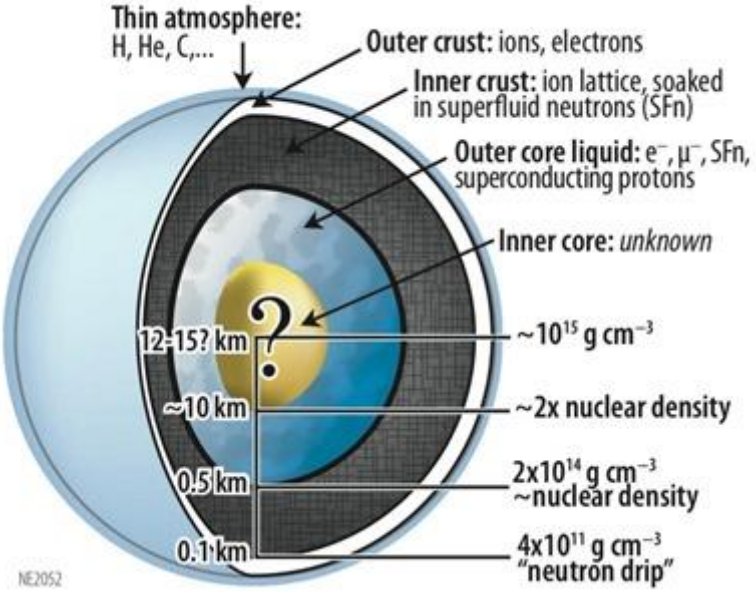
Les AGN sont des noyaux de galaxie dont l'intense activité énergétique n'est pas liée à leurs étoiles, mais en général à des trous noirs super-massifs qui avalent de la matière par effet gravitationnel, 10% de cette matière pouvant être transformée en énergie dans le processus, expliquant la forte luminosité observée. Ils sont entourés d'un disque d'accrétion de gaz et matière en rotation – évaluée par spectrométrie – et de jets de matière perpendiculaires à ce disque (*schéma ci-dessous*). Les AGN peuvent avoir été créés par la rencontre de galaxies, propulsant de la matière dans leur noyau au sein duquel se trouverait toujours un trou noir. Ce sont des phénomènes anciens dans l'histoire de l'Univers car on ne les observe pas à moins de quelques milliards d'années lumière de notre galaxie. Lorsque l'on observe un AGN de face, le jet de matière à son centre vire vers le bleu, indiquant qu'il va dans notre direction et sort donc du trou noir. On appelle cela un blazar !



En 1965, les radioastronomes des Bell Labs **Arno Penzias** et **Robert Wilson** découvraient le bruit de fond diffus cosmologique (CMB = cosmic microwave background), dont le pic de fréquences est situé autour de 160 GHz dans les bandes radio millimétriques. Ils utilisèrent pour cela un télescope doté d'une corne de 6 mètres de largeur, construit pat Harald Friis, le créateur de l'antenne de Karl Jansky deux décennies plus tôt (*ci-dessous*).



En 1967, c'était autour de **Jocelyn Bell-Burnell** et **Antony Hewish** de découvrir les pulsars à Cambridge au Royaume Uni alors que la première y était doctorante en astronomie (**vidéo** de son TEDx en 2013). Les pulsars sont des étoiles à neutrons très puissantes. Les étoiles à neutron sont des étoiles hyper-denses composées notamment de neutrons et de protons, en rotation rapide sur elle-même, jusqu'à mille fois par seconde. Elles émettent des ondes radio périodiques directionnelles à haute fréquence et un fort champ magnétique. Elles naissent dans les explosions de supernovas [**source du schéma**]. En 2013, 2200 pulsars avaient été détectés.



Puis, en 1970, **Arno Penzias**, **Robert Wilson** (déjà vus en 1965 pour la découverte du CMB) et **Keith Jefferts** découvraient la présence de monoxyde de carbone avec le télescope parabolique de 12 mètres à ondes radio millimétriques de l'observatoire de Kitt Peak en Arizona. Les découvertes issues de radiotélescopes n'ont fait que continuer depuis !

Types de radio télescopes

Les radiotélescopes sont de trois types principaux :

- A base de **réflecteurs**, le plus souvent paraboliques, qui renvoient les ondes radio vers un récepteur. Les exemples les plus connus sont les radiotélescopes d'Arecibo (Porto Rico), Effelsberg (Allemagne), Lovell (Angleterre) et Green Bank (USA). Les antennes sont fixes ou mobiles selon les cas. Comme pour les télescopes optiques, les télescopes paraboliques utilisent divers systèmes de réflecteurs secondaires voire tertiaires. Le montage le plus courant est de type grégorien avec antenne, réflecteur et instruments montés derrière une ouverture dans l'antenne et recevant les rayons d'un réflecteur secondaire monté en vis à vis de l'antenne principale. Il est aussi courant dans les télescopes optiques. Cela permet notamment d'obtenir une longue focale et de permettre un fort agrandissement sans que l'installation soit trop grande dans la longueur. Ces télescopes captent bien les signaux faibles mais avec une résolution moyenne.

- A base de **réseaux d'antennes** fixes sans pièces mobiles qui permettent de viser dans le ciel grâce au déphasage du signal reçu par les antennes en fonction de sa direction. On en trouve notamment à l'observatoire de Nancay en France avec le NDA et le LOFAR. Ils sont adaptés à la détection d'objets émettant un fort rayonnement, comme le cœur de la Voie Lactée, car ils sont peu sensibles. Par contre, ils apportent une bonne résolution à la détection.
- Des jeux de plusieurs télescopes de l'un des deux types précédents mettant en œuvre **l'interférométrie** qui améliore la résolution angulaire des observations sans avoir à créer de télescopes géants qui sont… impossibles à fabriquer. Comme pour l'interférométrie optique que nous avons survolée avec les télescopes optiques des deux parties précédentes, l'interférométrie radio utilise la combinaison des signaux captés par des antennes individuelles pour reconstituer une image 2D plus précise des objets observés. L'interférométrie apporte une bonne résolution aux images générées. Si les antennes sont des paraboles, cela ajoute aussi de la sensibilité à la détection qui est proportionnelle à la somme de la surface des antennes utilisées.

Les radiotélescopes captent tout ou partie du bruit large bande des objets observés, appelé émission continuum. Le continuum radio cumule la totalité du flux d'ondes radios reçues. Il est produit par trois principaux mécanismes :

- L'**émission thermique** dont l'intensité est proportionnelle à la température du corps observé selon la loi de Rayleigh-Jeans. Elle provient souvent de corps noirs, ceux qui absorbent toutes les radiations qu'ils reçoivent, comme le sont les étoiles. Ils en émettent en respectant la loi de Stefan-Boltzmann selon laquelle la luminance égale la constante de Stefan-Boltzmann multipliée par la température du corps.
- L'**émission non-thermique** qui résulte de l'interaction entre particules très énergétiques avec des champs magnétiques, que l'on trouve surtout dans les pulsars, les quasars, les galaxies radio et les restes de supernovas. Pour les électrons quasi-relativistes, ils s'agit d'émission synchrotron. Ces émissions peuvent être polarisées, d'où l'intégration de polarimètres dans les instruments des télescopes, aussi bien dans le visible que dans les ondes radio.
- Le **rayonnement continu de freinage** dit Bremßtrahlung, généré par l'accélération de particules chargées dans un champ électrique. L'analyse de ces émissions radio sert à estimer la densité électronique et les champs magnétiques en présence.

L'analyse de ce continuum passe le plus souvent par de la spectrométrie, l'analyse du spectre des fréquences reçues. Celui-ci comprend généralement des bosses diverses liées aux émissions des corps noirs, ainsi que des pics et des creux en fonction des fréquences absorbées ou émises par les corps analysés ou de ceux qui se sont intercalés entre la cible et le radiotélescope comme les nuages de gaz et de poussières. La spectrométrie en ondes radio est généralement réalisée via de l'interférométrie que nous verrons dans l'épisode suivant, et qui combine les signaux de plusieurs antennes.

Particularités des radiotélescopes à antenne parabolique

Les radiotélescopes à antenne parabolique ont quelques points communs et différences avec les télescopes à miroirs réfléchissants, que nous avons pu découvrir dans les deux dernières parties de cette série. Dans les similitudes, ces miroirs réfléchissent éventuellement les rayons électro-magnétiques vers un réflecteur secondaire voire tertiaire, puis vers un capteur. Mais cela s'arrête là.

Tout d'abord, la **résolution angulaire** des télescopes est toujours proportionnelle à la longueur d'onde observée divisée par le diamètre de l'antenne ou la distance entre les antennes pour un interféromètre. Les ondes radio ont des longueurs d'onde bien plus grandes que celle des rayons lumineux, ultra-violet ou même infrarouge. Les rayons visibles sont compris entre 380 et 780 nanomètres. L'infrarouge proche est situé entre 750 nm et 1,5 microns. L'infrarouge moyen, utilisé dans divers télescopes optiques, va de 1,5 à 4 microns. Les ondes radio couramment explorées dans les radiotélescopes vont de 1 mm à 30 cm, la longueur d'onde la plus observée initialement étant le 21 cm de l'hydrogène comme nous l'avons déjà vu. Les longueurs d'onde plus courtes permettent la détection de molécules dans les étoiles et galaxies, telles que l'eau, le CO, l'ammoniaque (NH3), le fer et le cyanure d'hydrogène (HCN). Les ondes millimétriques et centimétriques font partie des micro-ondes. Une bonne part des radiotélescopes récents fonctionnent dans ces bandes millimétriques. Certains télescopes spatiaux comme Herschel couvraient l'infrarouge lointain et les ondes millimétriques, qui sont adjacentes.

En prenant comme référence le vert à 500 nanomètres, le différentiel de taille d'antenne correspondant à l'observation de l'hydrogène en 21 cm est de 420 000 ! Vu autrement, un radiotélescope avec une antenne de 100 m va avoir une résolution angulaire 42 000 fois plus faible qu'un télescope optique doté d'un miroir de 10 m ! Cela explique pourquoi les images générées par les radiotélescopes sont généralement très pixélisées. Sur les grandes longueurs d'onde radio, la résolution angulaire sur la bande de 21 cm sur un radiotélescope de 100 m est équivalente au quart de celle du soleil, soient 500 secondes d'arc. D'où l'usage de l'interférométrie qui est plus fréquente en radiotélescopie que dans l'observation visible et infrarouge. Des interféromètres de plusieurs kilomètres voire centaines ou milliers de kilomètres de large permettent d'atteindre une résolution angulaire plus respectable, quoique toujours faible par rapport à celle des télescopes optiques.

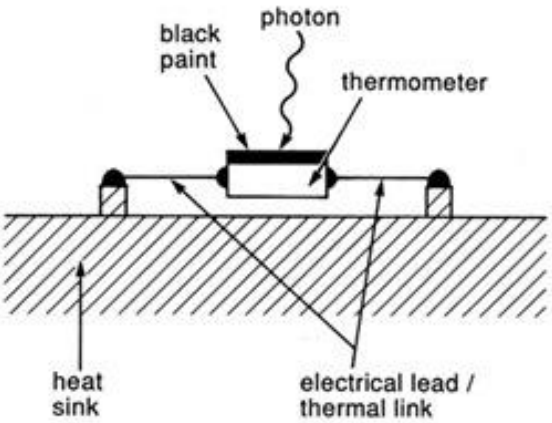
La longueur d'onde explorée a aussi un impact sur la **structure de l'antenne**. Celle-ci est maillée pour les grands télescopes. Le maillage ne doit pas être plus grand que la demi-longueur d'onde. Les télescopes de grande taille explorent des ondes plus longues et sont donc maillés. Ce qui tombe bien car cela permet de les alléger et de mieux résister au vent. Les lois scientifiques ont du bon ! A contrario, les télescopes opérant dans les ondes millimétriques ont une surface plane, sans trous, et qui doit être la plus parfaite possible avec une tolérance qui s'exprime en dizaines de microns. Les antennes principales ou les réflecteurs qui sont les équivalents des miroirs secondaires des télescopes optiques peuvent aussi être mobiles et adaptatifs pour corriger

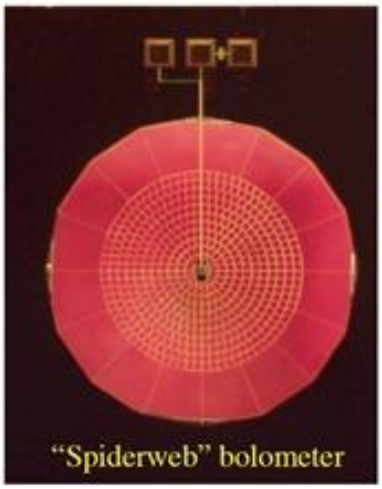
les effets de déformation des rayons électromagnétiques induits par l'atmosphère, en particulier dans les ondes millimétriques.

radiotélescope Parkes à ses débuts
gros maillage, grandes longueurs d'ondes

radiotélescope IRAM en Espagne
surface lisse, ondes millimétriques

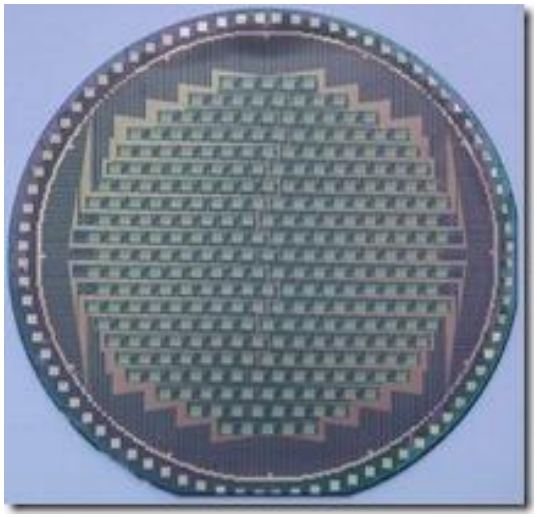
Autre différence clé, celle des **capteurs d'ondes radio**. Dans les télescopes optiques ou infrarouge, le capteur est un CCD qui met en jeu l'effet photo-électrique. Celui-ci consiste à convertir chaque photon reçu en électron mobile dans un capteur à base de semi-conducteur. Dans les radiotélescopes, les photons d'ondes radio reçus sont de puissance bien trop faible pour déclencher cet effet photo-électrique. On utilise donc des capteurs différents : des résistances dont la valeur en Ohm dépend de la température. Ce sont des thermistances. L'outil s'appelle un bolomètre. Recouvert de noir, il chauffe légèrement après avoir reçu les ondes radio, qui sont éventuellement amplifiées dans un tube métallique. Le courant qui traverse ce thermomètre est amplifié par des récepteurs analogiques qui sont très sensibles. On obtient une valeur analogique qui est ensuite convertie en valeur numérique. Les bolomètres peuvent être refroidis à très basse température pour avoir une grande sensibilité, en général avec de l'hélium liquide. Le refroidissement et l'amélioration de ces composants a permis d'améliorer rapidement la sensibilité des capteurs de radiotélescopes pendant les années 1960 et 1970.





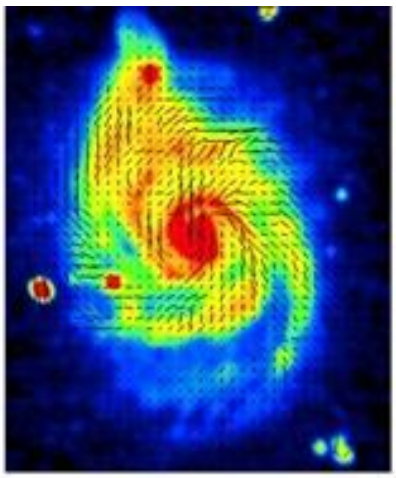
Les bolomètres servent à mesurer les ondes radio mais également les rayons X, l'infrarouge lointain, et les ondes radio sub-millimétriques. Leur taille qui est optimisée pour la déception de fréquences données. Plus la longueur d'onde est grande, plus doit l'être le bolomètre. Les hautes fréquences générées par un bolomètre sont généralement filtrées pour ne conserver qu'une bande étroite comme celle du changement de spin de l'électron de l'hydrogène atomique, à 1420 MHz – 21 cm.

Les bolomètres utilisés dans les radiotélescopes sont soient uniques, générant un seul pixel d'information, soit par groupes dont la taille varie en fonction de la longueur d'onde à observer, soit sous forme d'arrangements en toile d'araignée de capteurs (*ci-dessus*) ou matricielle (*ci-dessous*) pour les ondes les plus courtes comme les ondes millimétriques.

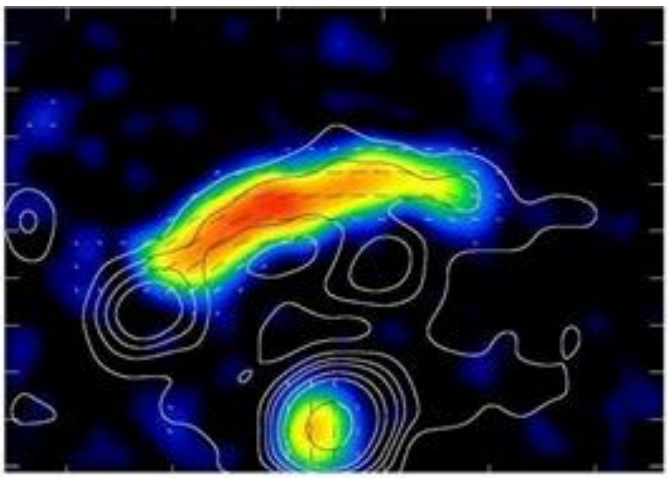


Une image de radiotélescope est générée en utilisant un télescope fixe et en laissant la Terre tourner ou en déplaçant l'antenne pour couvrir une partie du ciel, pixel par pixel ou bloc de pixels par pixels. Dans le cas de l'utilisation de matrices, l'image est générée par combinaison des images obtenues par les bolomètres matriciels, avec quelques transformations numériques au passage.

Les radiotélescopes sont aussi équipés de **spectrographes** qui analysent le spectre électromagnétique et permettent d'en déduire la composition de matière des objets observés. Ils sont aussi couplés à des **polarimètres** qui permettent de déterminer la polarité des ondes électromagnétiques reçues. Cette technique est d'ailleurs aussi utilisée dans les télescopes optiques. Une polarisation des ondes radio reçues est le signe de présence d'un fort champ magnétique dans la source d'émission de radio, source que l'on trouve par exemple dans les pulsars et dans les galaxies (exemples *ci-dessous*).



champs magnétique de la galaxie M51
obtenu en interférométrie avec le VLA
© Mpifr Bonn, Beck, Horellon, Neininger



amas galactique CIZA J2242+53 à 2 milliards d'années lumières
lignes d'intensité d'émission radio sur 3 cm vue par le radiotélescope Effelsberg en Allemagne. Les couleurs représentent les lignes de polarité magnétiques des ondes reçues.
© M. Kierdorf et al., A&A 600, A18

Nous avions évoqué la pollution lumineuse qui empêchait dans les zones peuplées d'observer les étoiles à l'œil nu. Les télescopes optiques sont généralement installés en altitude, là où la pollution lumineuse est minime, sans compter l'intérêt d'avoir une atmosphère sèche. La **pollution par ondes radio** est évitée en radioastronomie. Dans la pratique, les bandes de fréquences utilisées en radio-astronomie sont protégées dans les plans de fréquence officiels via l'ITU (International Telecommunication Union). Ainsi, les scientifiques ont obtenu que les bandes les plus critiques du spectre radio ne soient pas utilisées par les opérateurs télécoms et autres utilisateurs d'ondes radio, comme les transports aériens ou les militaires. Le plan d'allocation de ces bandes de fréquence bâti en 1959 a constamment évolué : en 1963, 1971, 1979, 1995 et 2003 [source : **Craft Handbook for Radio Astronomy, 2005**].

Ce sont notamment celles qui correspondent à l'observation de l'hydrogène neutre (à 1420 MHz), du radical OH (à 1612, 1665 MHz, 1667 MHz et 1720 MHz) et du deutérium (327 MHz). Ces fréquences entourent des bandes couramment utilisées comme le 433 MHz de certains objets connectés et télécommandes ou le 1,8 GHz de la 4G. Il n'empêche que certains télescopes comme le récent FAST chinois sont tout de même installés dans des zones non habitées pour éviter toute forme d'interférence d'origine humaine. Par contre, les radiotélescopes n'ont pas besoin d'être situés en altitude car l'atmosphère est transparente vue des ondes radio.

TAB. 1.1 – Bandes dédiées à la radioastronomie (extraits des allocations ITU).

Allocation ITU RR	Types d'observation
13.36 - 13.41 MHz 25.55 - 25.67 MHz	Soleil, Jupiter
37.5 - 38.25 MHz	Jupiter
73.0 - 74.6 MHz	Soleil
150.05 - 153.0 MHz	Continuum, pulsar, Soleil
322 - 328.6 MHz	Continuum, deutérium
406.1 - 410 MHz	Continuum
608 - 614 MHz	VLBI
1330 - 1400 MHz	Raie HI red-shiftée
1400 - 1427 MHz	Raie HI
1610.6 - 1613.8 MHz 1660 - 1670 MHz 1718.8 - 1722.2 MHz	Raies OH
2655.0 - 2700.0 MHz	Continuum, HII
3100.0 - 3400.0 MHz	Raies CH
4800.0 - 5000.0 MHz	VLBI, HII, raies H_2CO et HCOH
6650.0 - 6675.2 MHz	CH_3OH, VLBI
10.60 - 10.70 GHz 14.47 - 14.50 GHz 15.35 - 15.40 GHz	Quasar, raies H_2CO, Continuum
22.01 - 22.21 GHz	Raie H_2O red-shiftée
22.21 - 22.5 GHz	Raies H_2O
22.81 - 22.86 GHz	Raies NH_3, $HCOOCH_3$
23.07 - 23.12 GHz	Raies NH_3
23.6 - 24.0 GHz	Raie NH_3, Continuum
31.3 - 31.8 GHz	Continuum
36.43 - 36.5 GHz	Raies HC_3N, OH
42.5 - 43.5 GHz	Raie SiO
47.2 - 50.2 GHz	Raies CS, H_2CO, CH_3OH, OCS
51.4 - 59.0 GHz	
76.0 - 116.0 GHz	Continuum, raies moléculaires
123 - 158.5 GHz	Raies H_2CO, DCN, H_2CO, CS
164.0 - 167.0 GHz	Continuum
168.0 - 185.0 GHz	H_2O, O_3, multiples raies
191.8 - 231.5 GHz	Raie CO à 230.5 GHz
241 - 275 GHz	Raies C_2H, HCN, HCO^+
275 - 1000 GHz	Continuum, Raies moléculaires

Enfin, les antennes de radiotélescopes ont la particularité d'être **réversibles**. Elles peuvent être utilisées pour émettre des signaux. Ce sont elles qui permettaient de communiquer avec les missions Apollo, qui s'est appuyé sur le télescope australien Parkes, qui a aussi reçu les signaux TV de la mission. Ce sont aussi elles qui permettent de communiquer avec les satellites. Dans la pratique, on utilise des antennes paraboliques dédiées pour ces communications comme celles du **Goldstone Deep Space Communications Complex** de la NASA situé dans le désert de Mojave avec des antennes paraboliques de 34 et 70 mètres. Le radiotélescope d'Arecibo a été de son côté utilisé pour émettre des signaux codés à l'intention d'extra-terrestres !

Grands radiotélescopes paraboliques

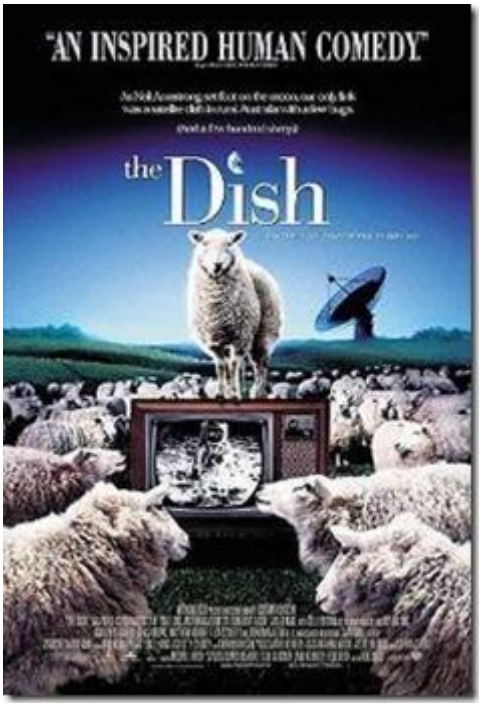
Passons maintenant en revue quelques-uns des plus grands radiotélescopes paraboliques (**source** de cette liste) par année de mise en service. Le schéma ci-dessous fait un inventaire des radiotélescopes européens et de quelques autres radiotélescopes étrangers, la **liste complète** étant bien entendu bien plus longue.

Dwingeloo (Pays-Bas, 1956) est doté d'une antenne de 25 m précise seulement à 1 cm près. C'était le premier grand radio télescope à antenne orientable. Il était calé sur les fréquences de 1390 MHz et 1420 MHz pour l'étude de l'hydrogène. Il a notamment permis de découvrir le centre de la Voie Lactée via son nuage d'hydrogène. Suivirent des études affinant la connaissance de la structure complexe de notre galaxie, de sa rotation et la découverte de galaxies invisibles avec les télescopes à miroirs et de nuages d'hydrogènes dans d'autres galaxies comme celle d'Andromède. Ce radiotélescope a été décommissionné en 1998 mais est utilisé depuis les années 2000 par des astronomes amateurs.

Jodrell Bank Lowell Telescope (UK, 1957) a une antenne orientable de 76 m qui pèse 1500 tonnes (**source photo**). Située au sud de Manchester, c'était la plus grande antenne du monde lors de sa mise en service. Il permis la détection du satellite Spoutnik envoyé par l'URSS la même année que sa mise en route puis celle de la mission Luna 15. Il servit à récupérer les images de la lune captées par la sonde Luna 9 en 1966. Il a participé à une expérience d'interférométrie avec un autre radiotélescope dans les années 1960. Il contribua à la découverte du quasar 3C 273 en 1963. Il fut modernisé en 1972. Il couvre les fréquences de 610 MHz à 5 GHz, étant équipé de têtes de 1,4, 1,8 et 5 GHz refroidies à 15K (K = Kelvin, échelle de température qui démarrre au zéro absolu autour de -273°C). Il contribua en 1998 au projet Phoenix de recherche de vie extraterrestre du SETI, ce qui lui permis d'observer de près 820 étoiles de caractéristiques voisines du Soleil et à moins de 200 années lumière. La surface de son antenne a été entièrement refaite en 1974. Le télescope participe au programme d'interférométrie MERLIN associant deux puis, progressivement, six radiotélescopes du Royaume-Uni depuis les années 1970 et 1980. Il est aussi intégré au programme d'interférométrie VLBI qui sera évoqué plus tard.

Parkes (Australie, 1961) a une antenne de 64 m. Sa base en forme de moulin est des plus vintage. Il dépend du CSIRO, le Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation qui est l'organisme de recherche spatiale australien. Son site a été choisi car il est isolé et dénué d'interférences radio. A ses débuts, il permis la communication avec la sonde d'exploration spatiale Mariner 2 en 1962 dans la bande de 960 MHz. En 1969, il servi à récupérer les images TV en direct du premier pas sur la lune de Buzz Aldrin, qui étaient de meilleure qualité que celles que récupéraient les antennes du site américain de Goldstone. Il servit aussi au tracking de l'arrivée sur Mars de Curiosity en août 2012. Mais ces missions liées à la NASA ne correspondent qu'à une toute petite partie de l'activité de ce radiotélescope qui est surtout consacré à l'étude des galaxies, notamment au niveau de l'hydrogène (bande de 21 cm) ainsi qu'à l'étude de quasars. Son antenne a été modernisée plusieurs fois, la dernière en 2003, intégrant des panneaux métalliques plats au lieu d'une structure en treillis métallique.

Ce radiotélescope est une “star” du film “The Dish” sorti en 2000 et qui raconte son rôle lors de la mission Apollo 11 [**bande annonce**]. L’antenne que l’on est voit est celle de 2000 avec son revêtement métallique. Elle n’a pas été reconstituée dans son état de 1969 qui n’en avait pas, un détail que les non experts ne peuvent pas remarquer, comme on en trouve dans tout un tas de films.

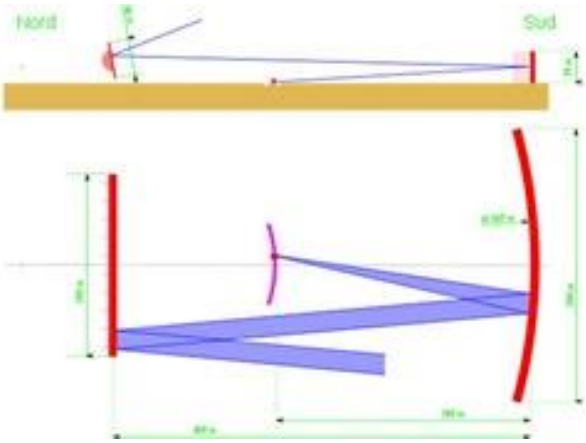


Large Transit Telescope (USA, 1962) avait une antenne de 90 m et pesant 500 tonnes. Elle s’est effondrée sur elle-même en 1988, du fait d’un défaut de structure. Ce n’était pas lié aux intempéries. Heureusement, le télescope avait déjà atteint sa limite d’âge à l’époque. C’était donc une entreprise de démolition efficace même si involontaire.

Arecibo (USA/Porto Rico, 1962) avec une antenne fixe qui permet d'observer le ciel soit en profitant de la rotation de la terre soit en utilisant le réflecteur mobile qui donne une latitude d'observation de +/- 20°. A cet effet, l'antenne d'Arecibo n'est pas parabolique mais sphérique. Elle focalise les rayons non pas sur un point mais sur un plan horizontal. Et sa forme se rapproche de celle d'un parabole en son centre. Les rayons sont ensuite convergés via un réflecteur secondaire puis tertiaire situés dans une coiffe sphérique suspendue par trois filins. Le télescope peut ainsi suivre une source radio donnée pendant 2 à 3 heures. Le récepteur est constitué de 7 bolomètres couvrant différentes bandes de fréquences. C'était le grand radiotélescope circulaire au monde jusqu'à l'arrivée du FAST chinois en 2016. Il est notamment dédié à l'observation des galaxies, quasars, pulsars mais aussi de planètes du système solaire et d'astéroïdes. Côté programmes d'observations : des analyses de galaxies, de champs magnétiques, et, de concert avec d'autres instruments, des études de pulsars, d'ondes gravitationnelles, et d'interférométries.

Radio télescope de Nancay (France, 1965) et son antenne principale verticale qui fait 7000 m². Il s'appuie sur un grand réflecteur orientable. Installé en Sologne, il capte

les ondes radio entre 10 m et 3 cm (10 GHz à 30 MHz). Il est toujours opérationnel (**source photo**).



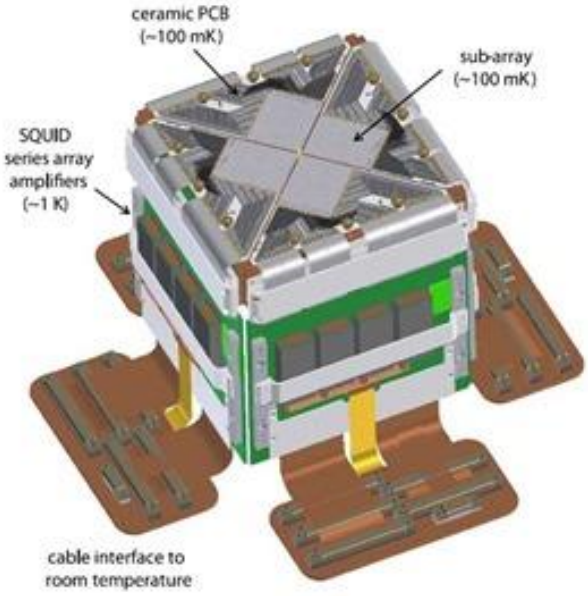
Effelsberg (Allemagne, 1972) et son antenne de 100 m, construite entre 1967 et 1971. Elle lui permet d'atteindre une résolution angulaire de 33 secondes d'arc, double de celle de l'œil humain pour les longueurs d'ondes de 1,3 cm. Il pèse 3200 tonnes. L'antenne tourne horizontalement à 360° et verticalement à 90°, permettant une observation complète du ciel. Il couvre les longueurs d'onde allant de 3 mm à 1 m (90 GHz à 300 MHz) avec un système à 7 bolomètres calé sur 21 cm et des bolomètres allant de 7 mm à 11 cm. La construction de l'antenne tenait compte des déformations différentes entre les positions verticale et horizontale pour qu'elle conserve une forme parabolique. La focale changeait juste de 10 cm, nécessitant un ajustement dynamique de la position du bloc de récepteurs. Le radiotélescope a été plusieurs fois upgradé entre 1981 et 2010. Son miroir secondaire appelé sous-réflecteur a été remplacé en 2006 par un système de surfaces actives avec 96 segments et autant de systèmes de contrôle de position. Il est toujours opérationnel et continue d'évoluer.

Nobeyama (Japon, 1982) est un radiotélescope opérant dans les ondes millimétriques et doté d'une antenne de 45 m, installé au Nord-Ouest du Mont Fuji. Faible longueur d'onde oblige, sa surface est très précise, à 0,1 mm près. Il couvre les ondes de 2,6 mm à 1,5 cm couvertes par 9 récepteurs (qui sont en train de passer à 5 qui sont plus performants). Il a permis la découverte de nombreuses molécules dans l'Univers dont des précurseurs de la glycine, un l'acide aminé, ainsi que de la vapeur d'eau autour du trou noir au centre de la Voie Lactée. Il est toujours opérationnel.

IRAM 30 meter telescope (Espagne, 1984) est un radiotélescope de l'IRAM français (Institut de RAdioastronomie Millimétrique). Avec son antenne de 30 m, c'était au moment de son lancement le plus grand télescope captant les ondes millimétriques entre 0,8 et 3 mm. Il est complémentaire du JCLMT lancé peu de temps après (ci-dessous). Sa surface est précise à 55 microns près et son pointage l'est à 1 arcsec près. Il est doté d'une série de récepteurs à pixel unique opérant à 3, 2, 1 et 0,8 millimètres et de deux caméras à 1 millimètre : HERA avec 9 pixels, afin de cartographier le gaz moléculaire dans des nébuleuses étendues, et MAMBO, une caméra de 117 pixels, développée à l'institut de radioastronomie Max-Planck en Allemagne, servant à observer l'émission de la poussière des nuages moléculaires proches aux galaxies les plus lointaines.

James Clerk Maxwell Telescope (USA, 1987) est un radiotélescope dédié à la captation des ondes sub-millimétriques, situées juste après l'infrarouge dans le spectre électromagnétique. La réception de ces ondes est gênée par l'atmosphère terrestre. Mais elle est possible en altitude dans des lieux où l'atmosphère est très sèche. C'est pourquoi ce radiotélescope est installé sur l'observatoire de Mauna Kea à Hawaï à 4092 m d'altitude, à proximité de nombreux télescopes optiques comme le CFHT Franco-Canadien ou le Keck américain. Son miroir primaire fait 15 m. C'est le plus grand radiotélescope observant les ondes de cette catégorie. Il est utilisé pour étudier le système solaire, la poussière et les gaz interstellaires et les galaxies distantes. Il était financé initialement et jusqu'en 2015 par le Royaume Uni, le Canada et les Pays-Bas. En 2015, il est passé sous le contrôle de l'East Asian Observatory, une association à but non lucratif d'Hawaï.

Au milieu des années 2000, ce radiotélescope a été équipé d'un nouvel instrument, le SCUBA-2, doté d'un bolomètre matriciel de 10 000 pixels à base de quatre matrices et permettant de scanner le ciel très rapidement dans les bandes sub-millimétriques (**source** du schéma ci-dessous du SCUBA-2). Il est refroidit à 100mK, soit 0,1°C au-dessus du zéro absolu !



le bolomètre du SCUBA2 du JCMT
quatre matrices de bolomètres
refroidies à 100 mK
longueurs d'onde de 450 et 850 microns
(submillimétriques)

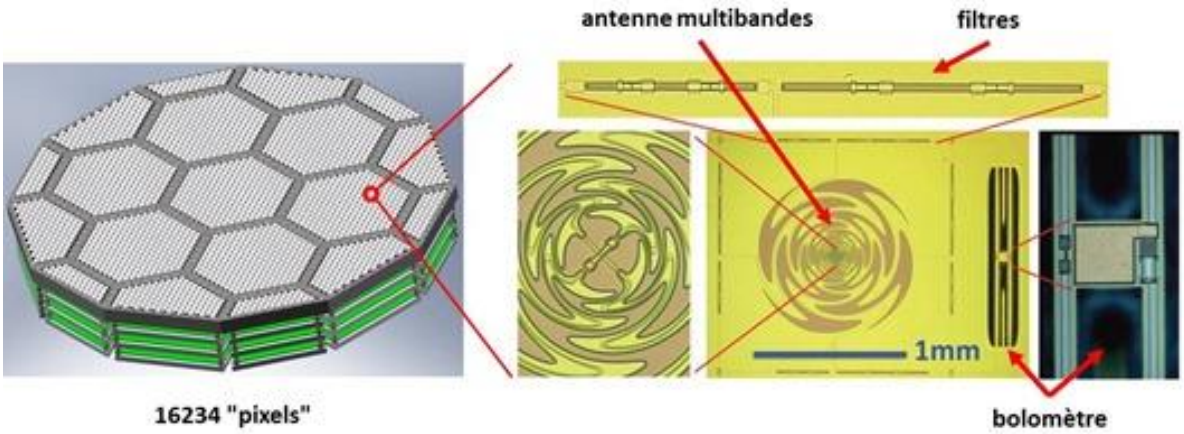
source: *SCUBA-2: The 10000 pixel bolometer camera on the James Clerk Maxwell Telescope*

D'un point de vue de la construction, c'est l'un des rares grands radiotélescopes qui soit entièrement caréné, comme le Caltech Submillimeter Telescope de Mauna Kea à Hawaï qui est doté d'une antenne de 10,4 m et le Heinrich Hertz Telescope en Arizona avec son antenne de 10 m.

Green Bank Telescope (USA, 2000) est le plus grand télescope orientable du monde avec son antenne de 100 m qui a remplacé le Large Transit Telescope qui s'était effondré sur lui-même en 1988. Il a mis 9 ans à être construit ! Il est installé en Virginie occidentale. Son antenne est constituée de 2004 surfaces indépendantes dont la position est ajustée par 2209 vérins mettant en œuvre la version radio de l'optique adaptative. Ses récepteurs lui permettent de capter les ondes radio sur un spectre large allant de 320 MHz à 100 GHz. Il permet aussi de faire de la spectroscopie entre 67 et 93 GHz. 15% de son temps d'observation est consacré à l'interférométrie multi-télescopes dans le cadre du VLBI (voir plus loin). Doté d'une dizaine de récepteurs bolométriques, il couvre un large champ de longueurs d'ondes allant de 4 mm à 1 m. Parmi ses nombreuses applications, ce radiotélescope sert à la détection de mégamasers, des galaxies qui émettent des micro-ondes directives comme un laser et à très forte puissance.

South Pole Telescope (Pôle Sud, 2007) est un radiotélescope de 10 m couvrant les ondes sous-millimétriques, millimétriques et micro-ondes. Il est situé à 2800 m d'altitude dans la base scientifique américaine Amundsen-Scott de dans l'Antarctique qui est pile-poil au Pôle Sud ! Il y bénéficie d'un air très froid (jusqu'à -70°C) et par conséquence, peu humide, ce qui évite l'absorption par l'atmosphère des ondes radio captées. Les nuits sont plutôt longues car elles durent six mois. Mais le jour de six mois permet aussi de faire des observations, le Soleil étant très bas à l'horizon. La zone n'est accessible que par avion de transport C-130. Le miroir principal de 10 m est utilisé sur un diamètre de 8 m. Sa précision est de 20 microns (0,02 mm). Le miroir secondaire du télescope est refroidi à 10K (-263°C) et l'instrument de capture à seulement 250mK (0,25°C au-dessus du zéro absolu). C'est un télescope à large champs de vue, de un degré [**source**].

Sa caméra a déjà bénéficié de deux mises à jour. La première version (SPT-SZ) faisait 960 pixels, la seconde (SPT-pol) faisait 1600 pixels et la dernière (SPT-3G, déployée en 2017) comprend 16 234 bolomètres couvrant chacun les ondes millimétriques 1,4, 2 et 3 mm et fait aussi office de polarimètre. Le système de capture fait 44 cm de large. Chaque pixel comprend une antenne tribandes couplée à deux filtres qui alimentent six bolomètres, un par bande x les deux polarités, le tout recouvert par une lentille hémisphérique. Cela lui donne une excellente résolution angulaire de 1 à 1,6 arcminutes selon la longueur d'onde observée [**source**].

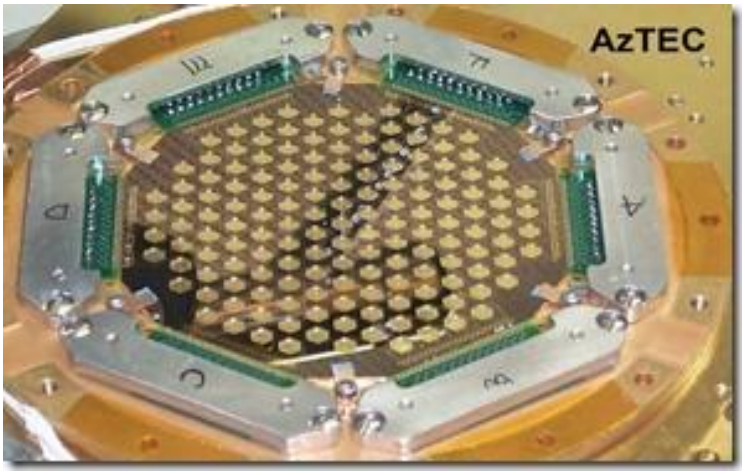


Le South Pole Telescope est notamment dédié à l'analyse du fond diffus cosmologique (CMB en anglais pour Cosmologic Microwave Background) ainsi que des clusters de galaxies et de l'évolution des galaxies les plus anciennes de l'Univers. Son analyse du CMB est maintenant plus précise que celle qui est générée par le satellite d'observation Planck lancé en 2009. Il permet de remonter très tôt dans l'histoire de l'Univers, à seulement 380 000 années depuis le big bang.

A noter qu'il existe deux autres télescopes du même type, mais avec une antenne moins grande : le Atacama Cosmology Telescope (6 m) ainsi que Huan Tran Telescope (2,5 m) qui est également installé dans le désert d'Atacama au Chili.

Sardinia Radio Telescope (Italie – Sardaigne, 2011) est un grand radiotélescope opérant dans les ondes allant de 3 mm à 1 m avec une grande antenne de 64 m, dont 50 utiles, ajustée par 1116 vérins, et un réflecteur géant de 7,9 mètres. L'instrumentation comprend l'imagerie, la spectrographie et la polarimétrie. L'imagerie s'appuie sur une matrice hexagonale de 144 bolomètres (AzTEC), quatre bolomètres millimétriques (SPEED) et une matrice de récepteurs hétérodynes ajustable entre 2,5 et 3,7 mm de longueur d'ondes (SEQUOIA). Le site retenu en Sardaigne présente la particularité d'être l'un de ceux qui reçoit le moins de précipitations pluvieuses de toute l'Italie avec le sud de la Sicile. Ce radiotélescope des pulsars dans le centre de la Voie Lactée, des galaxies éloignées ("high z") ainsi que de l'eau et de l'ammoniaque.

Large Millimeter Telescope (Mexique, 2011) est situé à 4850 m d'altitude et doté d'une antenne active de 50 m et de positionnement précis à 50 microns près grâce à un système de positionnement holographique à micro-ondes s'appuyant sur des satellites géostationnaires (je n'ai pas encore trouvé comment cela fonctionnait…). Il a de quoi couvrir les ondes millimétriques allant de 0,8 à 4 mm. C'est le plus grand télescope à ondes millimétriques à ce jour. Sa résolution n'est cependant pas extraordinaire, son principal bolomètre captant "seulement" 144 pixels (*ci-dessous*). Il est par contre très précis et sensible grâce à la taille de l'antenne. Ceci compense cela.



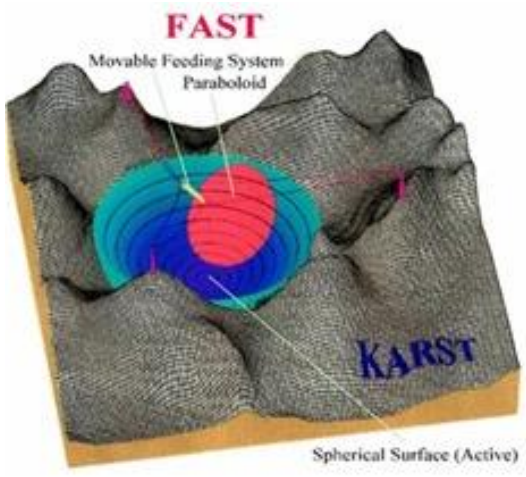
Shanghaï Tian Ma (Chine, 2012) et son antenne de 65 m. La construction a duré seulement deux ans. Pesant 2700 tonnes, il couvre les longueurs d'onde allant de 7 mm à 21 cm, étendue ensuite aux bandes Ku et Ka (1 m). Comme il est tout récent, son an-

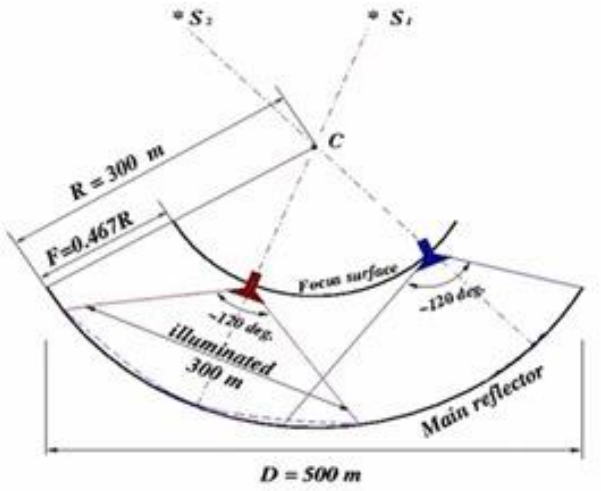
tenne est tout logiquement active. Comme tous les télescopes associés à des réseaux d'interférométrie internationaux, il est doté d'une horloge atomique. Il contribue notamment aux recherches de pulsars.

FAST (Chine, 2016) est le plus grand télescope mondial construit d'un seul tenant, quelle que soit la technologie utilisée. Alors que la Chine n'est pas dans le peloton de tête des télescopes optiques ! Son antenne fait 500 m de diamètre ! Le cercle blanc ci-dessous indique la taille de l'antenne d'Arecibo en comparaison. Le projet a beau avoir l'air d'être pharaonique en taille, il ne représente qu'un investissement de $180m ce qui est sommes toutes modeste au regard de nombreux autres projets, et notamment ceux des **télescopes géants** à plus d'un milliard d'Euros. La partie "travaux publics" d'un tel projet coute relativement moins cher que l'optique et les instruments d'un télescope classique. Et le télescope n'est pas installé en altitude comme les sont les télescopes géants.

L'antenne est constituée de 38 778 panneaux d'aluminium perforés triangulaires de 1 par 2 m qui sont contrôlables individuellement par vérins. Avant sa mise en service, près de 10 000 personnes résidant dans un rayon de cinq kilomètres autour du radio-télescope ont été déplacées pour créer une zone blanche sans nuisance électromagnétique d'origine humaine. Une méthode qui n'est pas sans rappeler celle de la construction du barrage des Trois-Gorges !

La forme de l'antenne est sphérique comme celle d'Arecibo, mais les miroirs sont mobiles contrairement à ceux de ce dernier. Ils permettent de créer dynamiquement une forme parabolique de 300 m qui se déplace dans l'antenne de 500 m (*ci-dessous*).





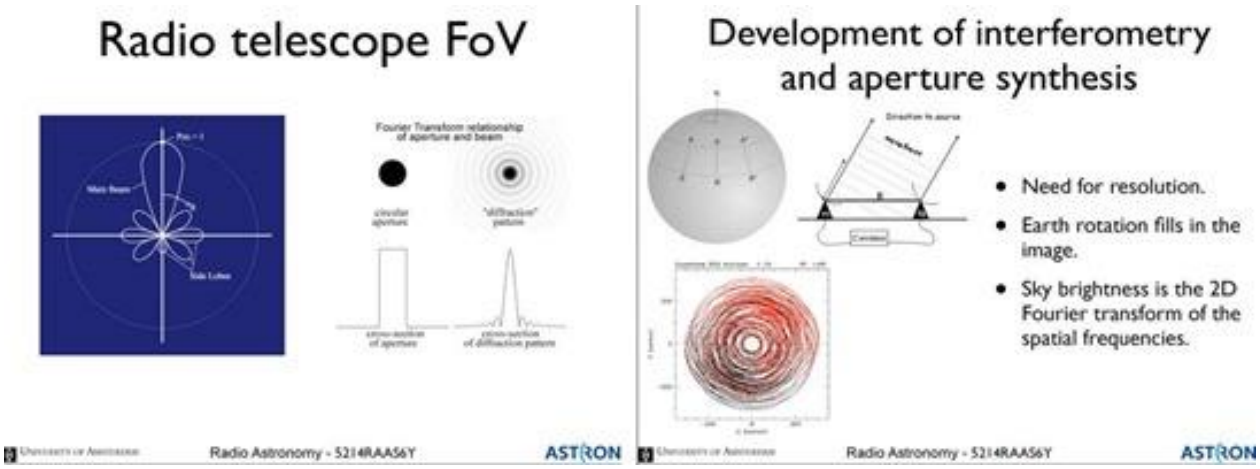
Le récepteur aérien bénéficie alors de rayons bien concentrés. Les fréquences d'observation vont de 70 MHz à 3 GHz. La cabine de réception contient 9 récepteurs dont un qui est dédié à la bande de l'hydrogène (1,23–1,53 GHz, autour du 1,4 GHz, permettant de détecter du redshift de sources éloignées) et comprend 19 bolomètres. C'est du très gros ouvrage !

Les objectifs du FAST sont d'observer à grande échelle les nuages interstellaires et gaz dans les galaxies et les pulsars. Il est au passage l'un des nouveaux composants du réseau géant d'interférométrie VLBI que nous évoquerons plus tard.

Interféromètres

Voici la suite des devoirs de vacances dédiés à l'astronomie avec de nombreux épisodes portant sur ses outils de travail. Après une première partie dédiée aux **dimensions de l'Univers**, et les trois suivantes consacrées aux **télescopes optiques terrestres** puis un aux **radiotélescopes**, nous allons passer aux interféromètres radio.

Les interféromètres radio utilisent des antennes fixes comme des dipôles ou des paraboles orientables. Leur résolution angulaire est liée à la distance maximale entre les éléments d'où une incessante course à l'échalote dans la dimension de ces interféromètres qui associent maintenant des radiotélescopes répartis un peu partout sur la planète quand ce n'est pas également dans l'espace. Leur capacité de collecte d'ondes dépend de la surface totale des antennes. La création d'images par interférométrie n'est pas triviale à expliquer. Elle s'appuie sur des transformées de Fourier inverses pour la reconstitution d'images à partir des signaux récupérés par les capteurs des différents radiotélescopes ou antennes utilisés. Cela nécessite de grandes puissances de calcul, centralisées généralement dans des data centers spécialisés.

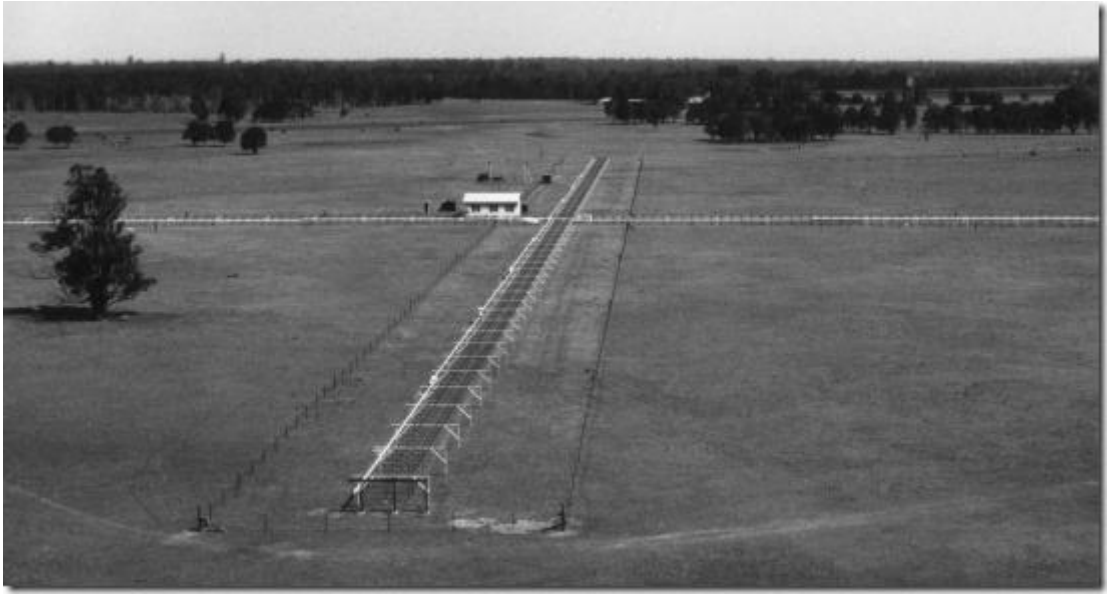


Les interféromètres présentent des économies d'échelle que l'on ne trouve pas dans les radio-télescopes et télescopes optiques traditionnels. En effet, ceux-ci sont réalisés à partir d'unités en générales identique ce qui permet une industrialisation à petite échelle de leur fabrication alors que la grande majorité des télescopes à un seul miroir primaire ou antenne principale sont uniques en leur genre.

Les grands interféromètres

C'est parti pour les visites sachant que je ne vais pas parcourir tous les interféromètres du monde, mais seulement quelques-uns parmi les plus importants ou les plus impliqués dans des découvertes marquantes.

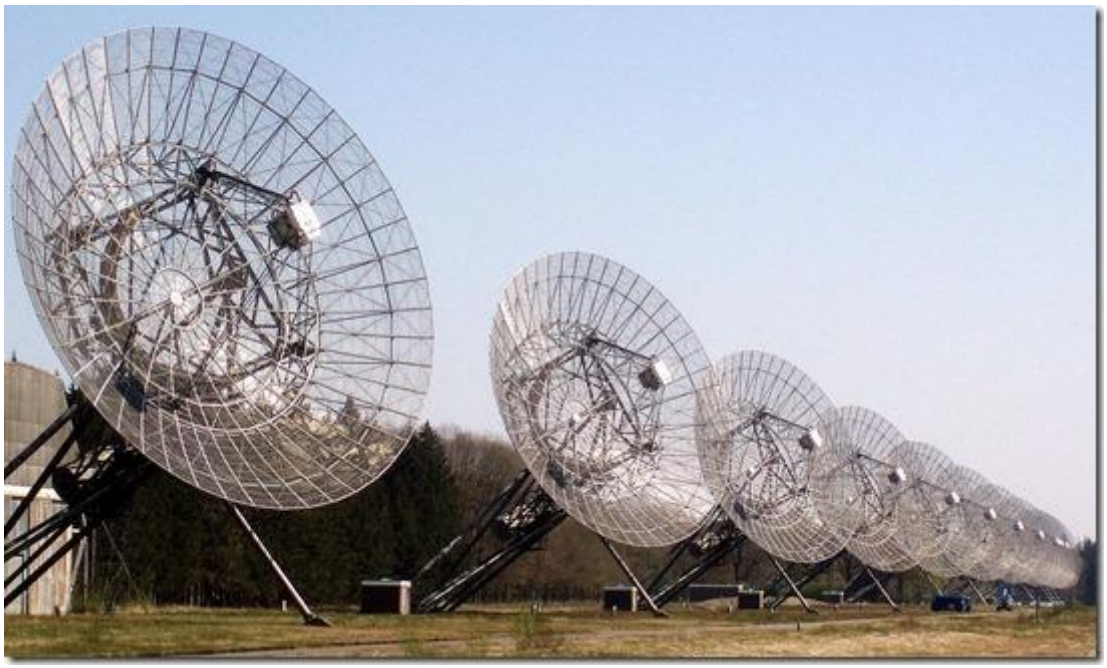
Mills Cross (Australie, 1954) avec ses deux bras de 450 d'antennes arrangées orthogonalement. Il a notamment servi à faire un premier inventaire de milliers de sources radio que les astronomes et astrophysiciens ont pu interpréter seulement des décennies plus tard. Il a été fermé en 1991.



One Mile Telescope (UK, 1964) est un interféromètre à base de trois radio-télescopes paraboliques dont l'un était déplaçable et opérant dans les bandes de 1407 MHz et 408 MHz. Il a été en fonctionnement pendant une vingtaine d'années et a permis le catalogage des sources radio dites 5C (pour Fifth Cambridge Survey).

Westerbork Synthesis Array Telescope (Pays-Bas, 1970) est un interféromètre à synthèse d'ouverture qui comprend 14 antennes paraboliques de 25 mètres alignées sur 2,7 km. 4 des 10 télescopes peuvent être déplacés sur un rail, les autres restant fixes. Le télescope a été upgradé entre 1995 et 2000 puis après 2013 dans le cadre du projet APERTIF (APERture Tile In Focus) qui remplaçait les détecteurs par des "focal plane arrays" de 8×8 éléments, des matrices de capteurs élargissant le champ de vision pour l'aider dans la recherche d'hydrogène et de pulsars dans la bande de fré-

quences 1300-1700 MHz. Le WSAT opère dans les fréquences allant de 120 MHz à 8,3 GHz. Sa résolution spectrale est de 8092 lignes. Le télescope est opéré par ASTRON, la fondation hollandaise de recherche en astronomie, très active en Europe. Il faut dire que nombre de pionniers de la radio-astronomie étaient hollandais comme Jan Oort (qui a donné son nom au nuage de matière après l'héliosphère) et Hendrik Van Der Hulst (celui qui prédit l'émission radio à la fréquence de 1420 MHz).



Very Large Array (USA, 1976) est un interféromètre spécialisé dans les ondes centimétriques situé au Nouveau Mexique et à 2124 m d'altitude. Il comprend 25 antennes paraboliques organisées sur une forme en Y installées sur des rails et permettant leur déplacement. Le VLA a notamment permis la détection de disques d'accrétion planétaires, de trous noirs et de filaments magnétiques au centre de la Voie Lactée. Il est géré par la NRAO qui dépend de la NSF.

Voici un exemple d'image composite réalisée avec télescope optique (étoiles) et le VLA (nuage bleu en couleur artificielle) de la nébuleuse W50 (Manatee).

Interféromètre du Plateau de Bure (France, 1990) de l'IRAM, un réseau de six antennes de 15 mètres de diamètre dans les Hautes-Alpes françaises. Situé à 2550 mètres d'altitude dans les Hautes-Alpes, cet interféromètre comprend 6 antennes paraboliques de 15 mètres installées sur deux rails orthogonaux étalés sur 760 m et équipées de récepteurs de haute sensibilité dans les ondes millimétriques. Cet instrument a permis diverses découvertes comme celle de flots bipolaires de la proto-étoile HH 211, du disque circumbinaire GG Tauri, de l'étoile TT Cygnus, de la galaxie M51, et de la galaxie SMM J16359 située à 5 milliards d'AL de la Terre.

VLBA (USA, 1993) est un interféromètre constitué d'une dizaine de radio-télescopes identiques de 25 m situés sur l'ensemble du territoire américain et qui sont pilotés à partir du Nouveau Mexique. Il met en œuvre de la VLBI : Very Long Baseline Interferometry, soit de l'interférométrie à longue distance. La distance entre les antennes les plus éloignées est de 8611 km. La construction des antennes s'est étalée entre 1986 et 1993 pour un total de $85m, ce qui est somme toute modeste au regard de

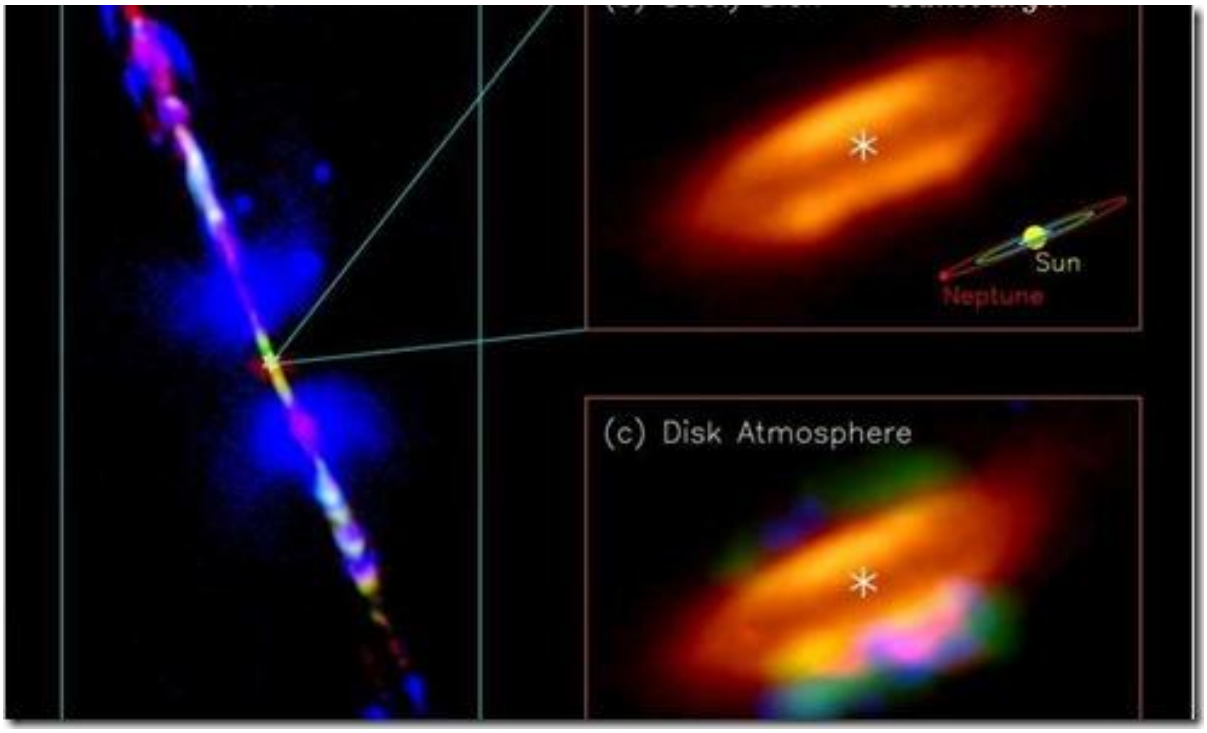
nombreux autres instruments d'astronomie. Les données enregistrées sur chaque télescopes sont horodatées par une horloge atomique, permettant ensuite leur synchronisation parfaite pour les calculs d'interférométrie. Cet instrument a notamment détecté les jets sortant de la galaxie M87 (**source**) et, après une dizaine d'années de recherche, deux **trous noirs super-massifs binaires**, dénommés **0402+379**, issus de la fusion de deux galaxies. Cette détection s'est appuyée sur l'analyse de la fréquence de signaux dans les bandes centimétriques de 5, 8, 16 et 22 GHz (1,36 à 6 cm) sur une douzaine d'années.

LOFAR (Europe, 2010), ou LOw Frequency ARray, est un ensemble d'interféromètres à base de grilles d'antennes plates. Il regroupe une aire d'antennes de plus de un kilomètre carré rassemblant 50 000 antennes regroupées dans 48 stations, réparties aux Pays-Bas, en Allemagne, en France (sur le site de Nancay), au Royaume Uni et en Suède. Elles captent des ondes radio courtes émises par les gaz froids de formation des exo-planètes, des étoiles et des galaxies. Les données collectées à environ 3 Gbits/s sont envoyées par fibre optique vers un superordinateur basé aux Pays-Bas. Deux types d'antennes sont utilisés : des Low Band Antenna sur les fréquences 15-80 MHz et des High Band Antenna sur 120-240 MHz.

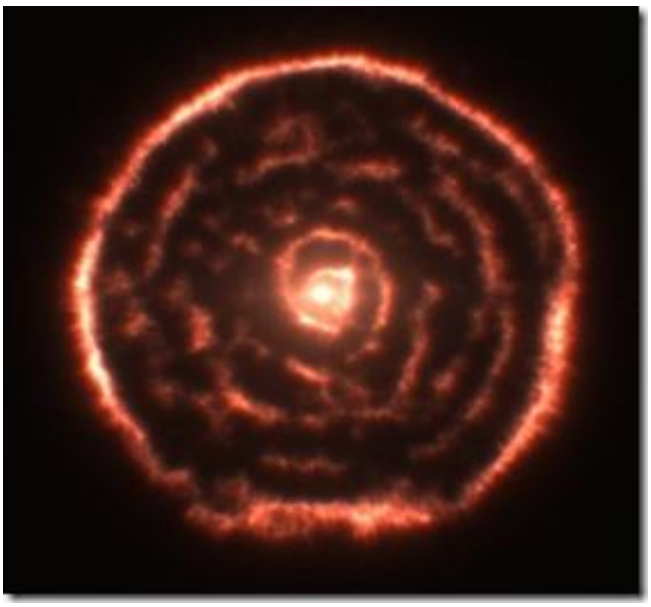
ALMA (Chili, 2014) ou Atacama Large Millimeter Array détecte les ondes millimétriques allant de 0,3 à 3,5 mm. Il est situé dans le désert d'Atacama à 5000 mètres d'altitude et associe l'Europe, les USA, le Japon et le Chili. Il opère dans les ondes millimétriques et submillimétriques. Il comprend 54 antennes de 12 m de diamètre et 12 antennes de 7 m de diamètre. ALMA a déjà détecté le nuage moléculaire Orion, puis le quasar 3C84 avec ses deux premières antennes de 12 mètres de diamètre qui sont séparées de 159 m. Puis HL Tau et, en 2016, le système planétaire en formation HL Tauri qui est situé à 450 AL du Soleil. ALMA sera complété par le Giant Magellan Telescope qui se focalisera sur la poussière chaude et le disque intérieur de galaxies en formation tandis qu'il étudiera les gaz froids de la périphérie de ces disques.

ALMA génère plus de 6 Mo/s pendant ses observations et 10 To d'archives d'images traitées par an !

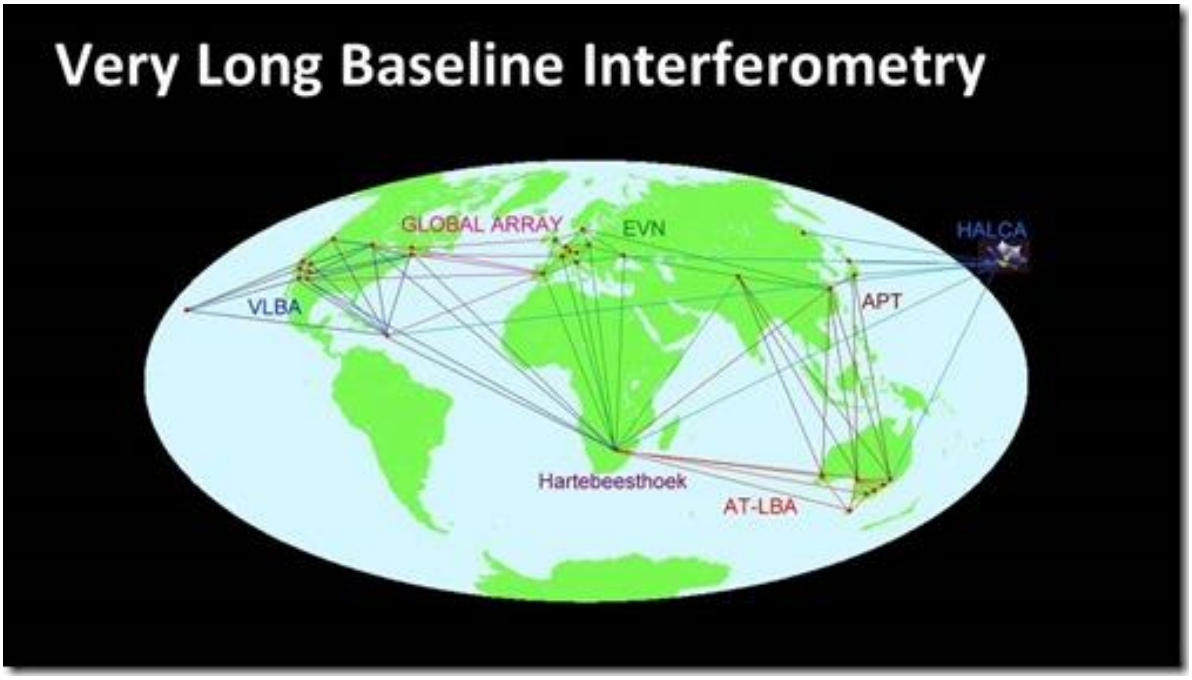
ALMA a été impliqué dans la découverte récente de molécules organiques comme le méthanol qui sont des précurseurs d'acides aminés dans un disque d'accrétion autour d'une étoile en formation située à 1300 années lumière dénommée Herbig-Haro (HH) 212 (**source**). L'image ci-dessous est une composite obtenue avec ALMA et le Very Large Telescope de l'ESO (examiné dans **cette partie**).



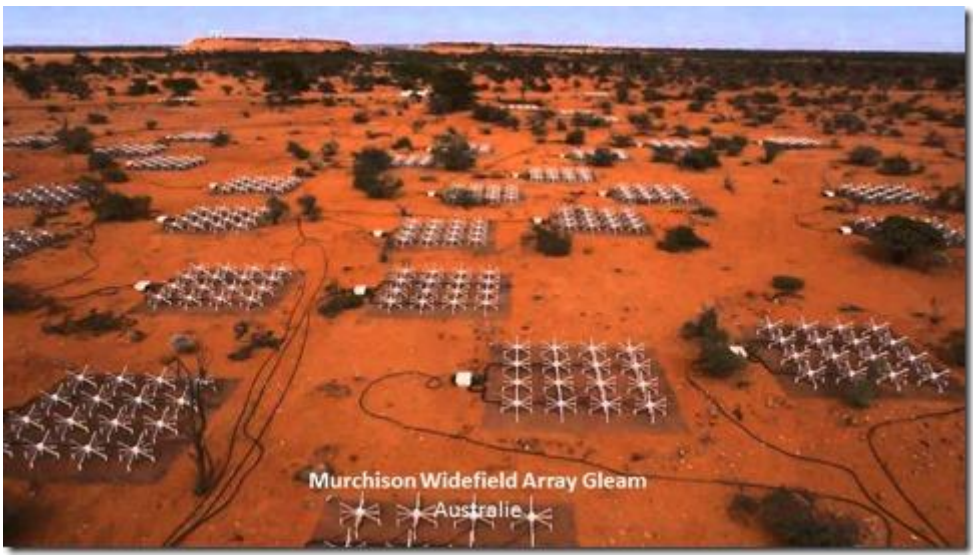
Voici un autre exemple d'image générée par ALMA en 2012, celle de d'une étoile géante rouge, R Sculptoris, située à 1500 AL dans la Voie Lactée, qui est dotée d'une enveloppe sphérique extérieure et d'une spirale intérieure [**source**].



VLBI (monde, en cours) est un programme d'interférométrie qui associe une grande variété de radio-télescopes situés sur tous les continents. Cela lui permet de capter les ondes radio avec une précision inégalée qui dépasse celle des meilleurs télescopes optiques.



Murchison Wildefield Array Gleam (Australie, 2013) est un réseau de 128 ensembles d'antennes bipolaires étalées sur 14 km2 totalisant 4000 antennes. Il a déjà catalogué 307 456 galaxies entre 2013 et 2014 dans le cadre du programme **GLEAM** ainsi que le centre de la voie lactée en ondes radio après avoir collecté 600 To de données. L'intégration des données issues de ces nombreuses antennes demande beaucoup de puissance de calcul. Ci-dessous, en bas, une vue redressée du centre de la Voie Lactée.



High-Altitude Water Cherenkov (USA, 2017) est un interféromètre réalisé avec 300 réservoirs d'eau au Mexique. Il sert à détecter les rayons gamma à très haute énergie émis par des pulsars et par les gaz situés entre les étoiles. Les rayons gamma sont situés à l'opposé des ondes radio dans le spectre électromagnétique. Dans leur version à très haute énergie, ils permettent de détecter l'Univers dit relativiste, lié à ses phénomènes les plus extrêmes après le big bang.

SKA (USA, 2012-2030), ou Square Kilometric Array, s'appuiera sur quatre mille antennes paraboliques de 15 m dans les fréquences moyennes et 200 000 mètres carrés d'antennes en réseau dans les basses fréquences totalisant un km2 de surface collectrice d'ondes radio répartis sur une distance de 3 000 kilomètres, étant installé en Afrique du Sud et en Australie. L'objectif est d'obtenir une puissance de captation cinquante fois supérieure à celle des plus puissants radiotélescopes actuels, dans les fréquences 100 MHz à 25 GHz, extensible à 60 MHz -35 GHz. Il permettra de scanner différentes portions du ciel en simultané. Le déploiement de ces antennes se fera en différentes phases étalées jusqu'à la fin de la décennie 2020. Les premières observations pourraient démarrer en 2020. Ce projet international associe l'Afrique du Sud, l'Australie, le Canada, la Chine, l'Inde, l'Italie, la Nouvelle-Zélande, la Suède, les Pays-Bas et le Royaume-Uni. La France est l'un des pays observateurs du projet.

L'un des défis du SKA sera de collecter et gérer les péta-octets qui sont générés par seconde et exa-octets par heure! Ils seront traités par plus d'une centaine de serveurs.

La recherche d'astéroïdes

La détection d'astéroïdes pouvant impacter la Terre est aussi au programme des radio-télescopes. C'est l'un des rôles dévolus au Goldstone Deep Space Communications Complex de la NASA qui comprend cinq antennes radar normalement dédiées à la communication avec les satellites et sondes spatiales. Quatre antennes font 34 m et l'une d'entre elles, la DSS-14 construite à la fin des années 1960 pour le programme Apollo, fait 70 m. Ces antennes gèrent les télécommunications avec une trentaine de satellites et sondes.

DSS-14 (*ci-dessous*) a servi aux communications avec les vaisseaux lunaires du programme Apollo. Elle sert aussi aux communications avec les sondes Voyager qui sont maintenant sorties de l'héliosphère. Elle utilise les micro-ondes dans les bandes S (2,29 à 2,30 GHz), X (8,40 à 8,50 GHz) et la bande Ka (31,8 – 32,3 GHz) qui est aussi utilisée par les satellites de diffusion de TV et d'Internet pour les zones faiblement denses. Elles émettent des signaux vers les vaisseaux spatiaux.

L'antenne DSS-14 héberge des instruments dédiés au Goldstone Solar System Radar qui explore les planètes et autres objets du système solaire. Il s'appuie sur un émetteur et un récepteur de la bande X (8500 MHz) de l'antenne, lui permettant de jouer le rôle de radar actif. En plus des planètes du système solaire, il permet de visualiser les astéroïdes et comètes avec une résolution de quelques mètres, complétant l'imagerie issue de satellites tels que **Dawn**. Voici un exemple de **vidéo d'astéroïde** générée avec DSS-14 !

Un autre projet va dans le même sens, avec le nom prophétique de **KaBOOM** pour "Ka-Band Objects Observation and Monitoring Project". Il s'appuie sur un réseau de radars permettant de détecter des Near Earth Objects plus éloignés et avec une meilleure résolution.

Les radars peuvent aussi servir à détecter et cartographier les objets en orbite proche de la Terre issus de satellites. Ceux-ci présentent un risque pour les vols habités et non habités en orbite basse. Sans compter les risques côté pollution une fois qu'ils retombent sur Terre, surtout s'ils ne brulent pas lors de leur rentrée dans l'atmosphère.

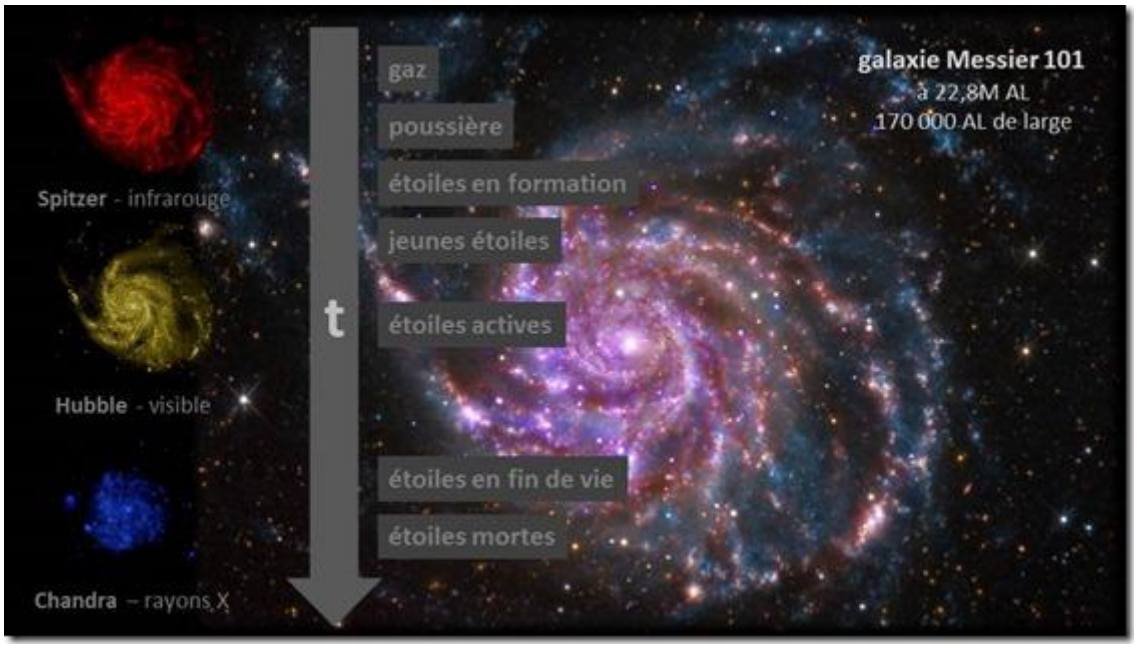
Ce ce jour, plus de 17 000 objets d'origine humaine sont en orbite autour de la terre, dont plus de 1400 satellites opérationnels. En 2013, plus de 170 millions de débris divers de moins de 1 cm, 670 000 de 1 à 10 cm et 29 000 encore plus grands avaient été identifiés. La concentration de ces débris est maximale autour de 800/900 km d'altitude. Cela tombe bien car l'ISS (International Space Station) est à 400 km d'altitude !

Télescopes spatiaux

Les télescopes spatiaux ont été imaginés pour la première fois par Hermann Oberthin en 1923 puis proposés par Lyman Spitzer en 1946 dans “Astronomical Advantages of an Extra-Terrestrial Observatory” pour s’affranchir de l’atmosphère qui empêche l’observation de certaines ondes (rayons X, gamma, UV lointain) et qui déforme la lumière qui la traverse.

De nombreux télescopes spatiaux ont ainsi été envoyés dans l’espace, en orbite basse, pour observer le Soleil, la Voie Lactée, les galaxies, et tout cela en couvrant presque tous les pans du spectre électromagnétique, bien au-delà du visible. Entre temps, des progrès significatifs ont été réalisés avec les télescopes terrestres, notamment ceux qui opèrent dans le visible et le proche infrarouge. Comme nous l’avons vu dans les deux précédentes parties de cette série, les perturbations de l’atmosphère (diffraction, diffusion) sont désormais traitées en grande partie grâce aux optiques adaptatives et aux systèmes de calibrage utilisant des lasers au sodium. Ces systèmes rendent quasiment obsolète un télescope spatial comme Hubble fonctionnant uniquement dans le domaine du visible, du proche ultra-violet et du proche infrarouge, au point qu’il est maintenant plus simple et surtout moins cher de construire un grand télescope sur terre dans le visible que d’en envoyer un dans l’espace. Ainsi de nos jours, les télescopes spatiaux complètent les télescopes terrestres.

Les télescopes spatiaux servent parfois à réaliser des repérages qui sont ensuite approfondis par des télescopes terrestres. Ils se complètent aussi les uns les autres comme le montre cette image composite de la galaxie Messier 101, dite du Moulinet, réalisée en fausses couleurs à partir de prises de vue dans l’infrarouge avec le télescope spatial Spitzer, dans le visible avec Hubble et dans les rayons X avec Chandra.



Nous allons d'abord nous intéresser aux particularités des télescopes spatiaux avant de les étudier catégorie par catégorie dans les parties qui suivront. Vous ne voyez pas encore la couleur des entrepreneurs de l'espace promis par le titre de cette longue série d'articles ? Patience ! Cela arrivera surtout vers la fin !

En préparant cette partie et en parcourant les spécifications techniques de nombre de satellites, j'en ai extrait leurs particularités qui sont nombreuses et que voici. Cela permet de répondre à quelques questions de bon sens : quels sont les instruments embarqués dans les télescopes spatiaux ? quelle est leur source d'énergie ? comment les pointe-t-on avec précision dans la bonne direction ? comment récupère-t-on les données qu'ils produisent ? quelle est leur durée de vie et combien coûtent-ils ?

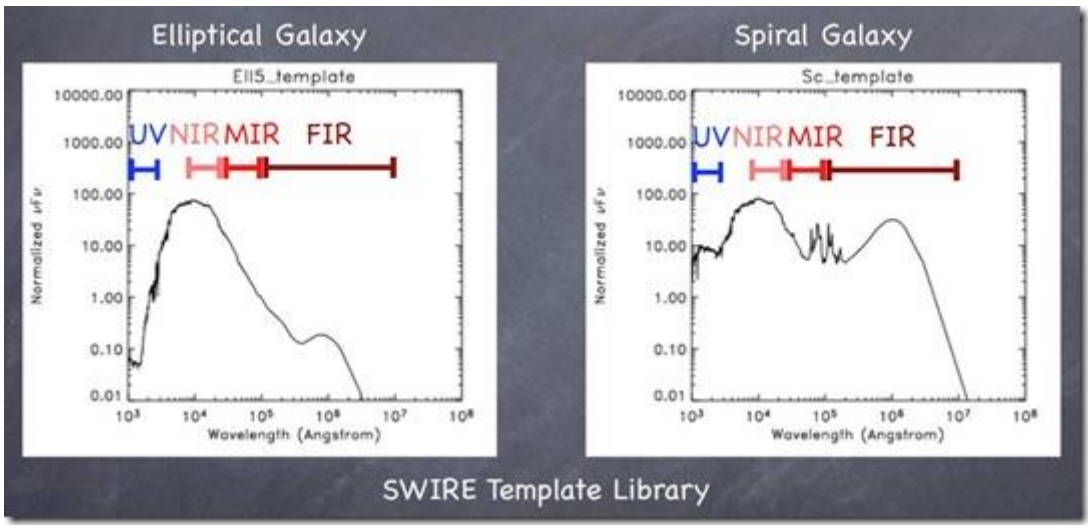
Les bandes de fréquences observées

Faisons le tour du spectre électromagnétique exploré par les télescopes spatiaux et des domaines d'application de chaque bande de fréquences :

- Les **rayons gamma** sont une des composantes des rayons cosmiques qui comprennent aussi des particules chargées comme des protons et des électrons. Ils sont notamment générés par la fission nucléaire et la dégradation d'isotopes radioactifs (cf tableau *ci-dessous*), l'interaction de particules chargées (protons, électrons) à haute énergie avec des champs de radiation intenses ou encore par l'annihilation de matière et d'antimatière. Ils permettent notamment de détecter la naissance des trous noirs résultant de l'effondrement gravitationnel d'étoiles très massives, qui produisent des sursauts gamma brutaux, ainsi que des pulsars et des restes de supernovas. Les rayons gamma révèlent aussi les interactions entre les rayons cosmiques et le milieu interstellaire. Ce sont les rayons électromagnétiques connus les plus énergétiques. Les ondes électromagnétiques sont transportées unitairement dans des photons et l'énergie de ces photons est proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique. Or, les rayons gamma sont de fréquence électromagnétique très élevée tandis qu'à l'autre bout du spectre, les rayons infrarouges et les ondes radio sont les moins énergétiques. A noter que les rayons gamma de très haute énergie, au-delà du TeV, sont captés par des détecteurs terrestres de type Cherenkov. J'ai fait l'impasse sur ce type de télescope dans les parties précédentes !

Isotope	Mean Lifetime	Decay Chain	γ-Ray Energy (keV)
^{7}Be	77 d	$^{7}Be \rightarrow {}^{7}Li^{*}$	478
^{56}Ni	111 d	$^{56}Ni \rightarrow {}^{56}Co^{*} \rightarrow {}^{56}Fe^{*}+e^{+}$	158, 812; 847, 1238
^{57}Ni	390 d	$^{57}Co \rightarrow {}^{57}Fe^{*}$	122
^{22}Na	3.8 y	$^{22}Na \rightarrow {}^{22}Ne^{*} + e^{+}$	1275
^{44}Ti	89 y	$^{44}Ti \rightarrow {}^{44}Sc^{*} \rightarrow {}^{44}Ca^{*}+e^{+}$	78, 68; 1157
^{26}Al	1.04 10^{6}y	$^{26}Al \rightarrow {}^{26}Mg^{*} + e^{+}$	1809
^{60}Fe	2.0 10^{6}y	$^{60}Fe \rightarrow {}^{60}Co^{*} \rightarrow {}^{60}Ni^{*}$	59, 1173, 1332
e^{+}	.... 10^{5}y	$e^{+}+e^{-} \rightarrow Ps \rightarrow \gamma\gamma..$	511, <511

- Les **rayons X** visualisent les étoiles en fin de vie, les restes d'étoiles mortes et les étoiles à neutrons ainsi que les émissions de gaz chaud. Nombre de télescopes spatiaux couvrent à la fois les rayons X et gamma. Les rayons gamma et X sont décrits par leur énergie, en keV/MeV/GeV/TeV – kilo/méga/giga/tera électrons-volts, et non pas en fréquence ou longueur d'onde comme pour les fréquences allant de l'ultra-violet aux ondes radio qui sont de très basse énergie.
- L'**ultra-violet** permet de détecter les objets célestes qui se rapprochent de nous par effet Doppler, dans ce cas, avec une longueur d'onde qui raccourci. L'UV détecte bien la matière baryonique (atomes) et la composition chimique des objets observés : planètes, étoiles, amas d'étoiles, nuages intergalactiques, galaxies et galaxies à noyau actif. Les UVs détectent les transitions par résonance des atomes et ions, servent à étudier les plasmas de température comprise entre 3 000K et 300 000 K. Ils détectent aussi les transitions électroniques de molécules abondantes comme l'hydrogène neutre H2 (qui est aussi détecté en radiofréquence à 1420 MHz), OH, CO et les PAH (Polycyclic aromatic hydrocarbon), des composés organiques simples. On se sert donc des UV pour qualifier l'atmosphère des exoplanètes.
- Le **visible** (0,3 à 0,7 microns) sert à observer les étoiles actives similaires au Soleil, les galaxies proches, les planètes du système solaire et les exoplanètes d'étoiles proches dans la Voie Lactée, par interférométrie optique qui est peu pratiquée avec les télescopes spatiaux. Il est notamment employé par Kepler (détection d'exoplanètes par la méthode des transits que nous détaillerons dans un prochain article) et Gaia (cartographie des étoiles de la Voie Lactée).
- Le **proche infrarouge** (0,7 à 2 microns) détecte la poussière chauffée par la lumière des 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. On s'en sert beaucoup dans la détection et la caractérisation d'exoplanètes.
- L'**infrarouge moyen** (2 à 4 microns) explore les planètes, les comètes, les astéroïdes, la poussière chaude, les disques protoplanétaires, les galaxies très distantes (à fort décalage vers le rouge, ou "high redshift"), les molécules complexes (PAH, comme pour l'UV). L'IR lointain sera l'apanage du JWST.
- L'**infrarouge lointain** (4 à 1000 microns) 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 (cf leur spectre caractéristique à droite du schéma *ci-dessous*).



- Les **ondes radio millimétriques** (1 mm à 1 cm) ou micro-ondes) permettent d'observer le CMB (fond diffus cosmologique), les nuages denses et froids et le gaz CO. Le CMB était notamment observé par le télescope spatial Spitzer qui est maintenant à la retraite.
- Les **ondes radio centimétriques** (1 cm à 1m) permettent de détecter les nuages d'hydrogène neutre qui déterminent la structure des galaxies et du milieu interstellaire. On les détecte avec la raie d'émission de l'hydrogène H1 de 21 cm comme vu dans la partie sur les radiotélescopes. On y détecte aussi l'eau. Et aussi le rayonnement d'électrons énergétiques que l'on trouve dans les régions chaudes autour des étoiles.

La tendance générale est à délaisser l'exploration dans le visible. Tout d'abord, il ne représente qu'une toute petite partie du spectre électromagnétique, qui est de mieux en mieux couverte par les télescopes terrestres maintenant généralement dotés d'optiques adaptatives. Ensuite, les rayons gamma, X, ultra-violet et infrarouge lointains ne peuvent être étudiés sur Terre et promettent des découvertes scientifiques : l'infrarouge permet de mieux remonter dans le temps dans l'histoire de l'Univers, et les rayons X et gamma permettent de détecter des phénomènes extrêmes générés par les étoiles à neutrons et trous noirs, améliorant notre compréhension du cycle de vie des galaxies. Le visible reste cependant utilisé dans l'espace pour la détection des exoplanètes par la méthode des transits.

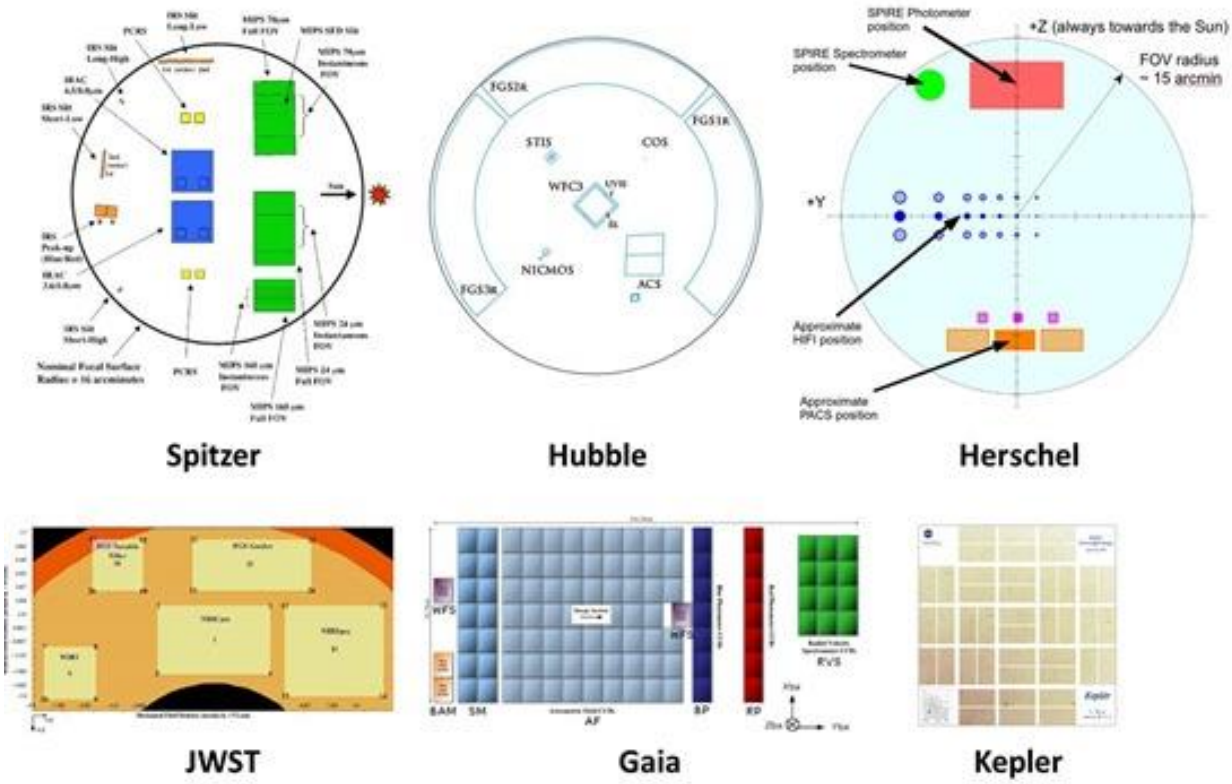
Nombre de télescopes spatiaux exploitent plusieurs de ces bandes de fréquences, notamment autour du visible, ou associant rayons gamma, X et ultra-violet. Ces derniers télescopes peuvent aussi réaliser leur pointage à l'aide d'une caméra dans le visible qui se repère sur des étoiles connues de la voûte céleste.

La diversité de leurs instruments

Du fait des limitations physiques des coiffes des fusées qui les envoient dans l'espace, les télescopes spatiaux sont pour l'instant limités par la dimension totale de leur **miroir**. Ils excèdent rarement trois mètres, ce qui a aboutit aux solutions de miroirs en plusieurs parties et qui se déplient après leur lancement. C'est le cas pour le

James Webb Space Telescope avec son miroir (déplié) de 6,2 m d'envergure, ou pour le LUVOIR qui sera envoyé dans l'espace bien plus tard.

Le cheminement de la lumière dans les télescopes spatiaux est voisin de celui des télescopes terrestres entre l'ultra-violet et l'infrarouge. Il passe souvent par un miroir principal puis par un miroir secondaire qui éclaire alors un plan de focale (c'est le dispositif Cassegrain). Sur ce plan de focale, la lumière est récupérée selon un agencement assez variable selon les télescopes. Elle suit alors un chemin plus ou moins tortueux pour atteindre divers capteurs CCD ou autres, via des miroirs semi-réfléchissant ou dichroïques (qui laissent passer certaines couleurs/fréquences d'un côté et de l'autre), et différents prismes pour la spectrographie et autres filtres. On trouve des agencements dans un cercle comme pour Spitzer, Hubble et Herschel, ou en rectangle pour le JWST, Gaia et Kepler. Cela va d'une très grande diversité de capteurs comme pour Hubble, JWST ou Spitzer à une matrice de capteurs identiques comme pour Kepler (*ci-dessous*, un assemblage de plans de focale variés). Ne vous inquiétez pas, nous allons revenir sur chacun de ces télescopes un par un.



Les rayons X nécessitent un traitement particulier : passant au travers des miroirs à faible incidence, on est obligé d'utiliser des miroirs concentriques parabolique où les rayons sont réfléchis avec une incidence proche de 90°, qui est la seule possible. Quand aux rayons gamma, ils traversent toute matière donc ne peuvent être réfléchis par un miroir. On utilise d'autres artifices pour capter leur orientation comme des masques d'encodage que nous aurons le loisir d'explorer dans l'article les concernant.

Les instruments embarqués dans les télescopes spatiaux peuvent être aussi nombreux que sur certains télescopes terrestres. Ils sont cependant un peu plus miniaturisés et plus légers que leurs homologues terrestres.

Ils utilisent des **capteurs CCD** divers pour l'imagerie dans l'ultraviolet, dans le visible et l'infrarouge proche et moyen et d'autres types de capteurs pour les rayons gamma, X et radio.

Les CCDs sont complétés de **filtres de couleur** interchangeables pour décomposer la lumière, plus qu'avec les trois couleurs primaires utilisées dans le visible par nos yeux et appareils photo, et jusqu'à une dizaine. Dans certains télescopes, les instruments semblent parfois redondants. Ils ont cependant diverses caractéristiques qui les distinguent et avec des compromis différent : en angle de vue (champ large, champ étroit), en sensibilité, en dynamique, en résolution angulaire et en résolution spectrale dans le cas des spectrographes.

Pour l'infrarouge, les capteurs CCDs utilisent des semi-conducteurs qui possèdent une bande interdite plus étroite qui est le différentiel d'énergie entre les électrons mobiles et les électrons de valence qui ne participent pas aux phénomènes de conduction électrique [**source**]. Les semi-conducteurs les plus couramment utilisés pour ces CCDs sont le tellurure de mercure-cadmium et l'antimoniure d'indium pour le proche infrarouge et l'arséniure de silicium pour l'infrarouge moyen.

Des **bolomètres** sont utilisés pour capter l'infrarouge lointain ainsi que les ondes radio. Ce sont en fait des thermomètres qui sont chauffés par les rayons électromagnétiques et dont on mesure la résistance qui dépend de la température.

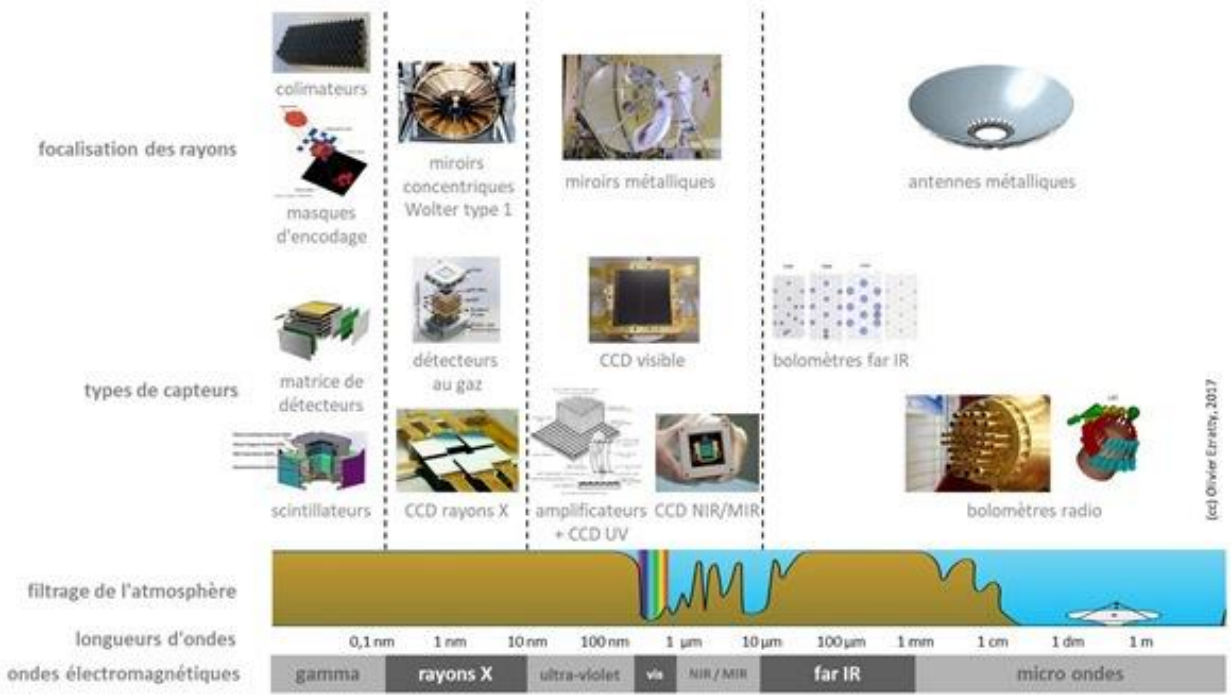
Des **scientillateurs**, **capteurs au gaz** et autres capteurs divers servent à la détection des rayons gamma et des rayons X à haute énergie.

Les **spectrographes** décomposent le spectre reçu en fréquences. La forme du spectre révèle la nature des objets observés, comme celle de corps noir, ou le type de galaxie et d'étoile. Les étoiles en formation, jeunes ou en déclin ont toutes un spectre très caractéristique. Les pics d'émission ou les creux d'absorption permettent d'identifier les matières et gaz émetteurs ou absorbés. Et comme la durée de vie des satellites est finie, le rendement des observations est important. Cela explique l'effort mis dans la conception de systèmes de spectrographie d'objets multiples tels que le NIRspec du JWST que nous verrons plus loin.

Les **polarimètres** sont des instruments qui mesurent la polarité des champs électromagnétiques reçus. Les champs polarisés révèlent des objets où l'activité magnétique est très intense, comme autour des étoiles à neutrons et des trous noirs.

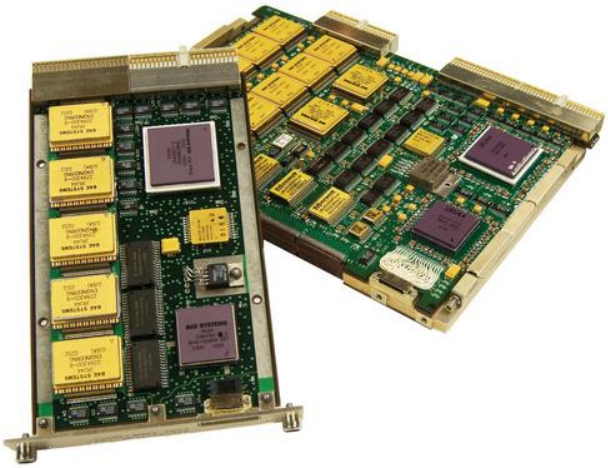
Les **coronographes** servent à occulter une étoile ou tout autre objet céleste pour analyser son environnement tel que les exoplanètes d'une étoile. Cela permet aux capteurs de ne pas être éblouis par l'objet caché.

Voici une synthèse visuelle des moyens de focaliser les rayons captés et de les analyser selon les bandes de fréquences. C'est très approximatif pour ce qui concerne les rayons gamma, où les moyens de détection sont très nombreux.



A noter que certains télescope spatiaux ne sont pas indépendants, mais peuvent être installés dans des installations plus grandes comme l'ISS. C'est le cas de NICER qui sert à l'étude des étoiles à neutrons et de CREAM pour l'étude de rayons cosmiques.

Dernier point sur l'instrumentation, les ordinateurs embarqués. Vous remarquerez qu'ils sont souvent construits sur des technologies anciennes, comme les processeurs Intel 486 qui sont installés dans le télescope spatial Hubble. Des sociétés comme BAE Systems conçoivent des processeurs durcis pour résister aux difficiles conditions de l'espace (exemple *ci-dessous*).



Leur dernière génération, les cartes RAD750 6U-160, date de 2010, et est basée sur les architectures RISC PowerPC ! Ils sont gravés en 45 nm et sur des wafers utilisant la technologie française SOI (silicon on insulator). On en trouve aussi chez Boeing, Honeywell, IBM, GE et GEC-Plessey. Ils ont d'ailleurs des applications dans les centrales nucléaires.

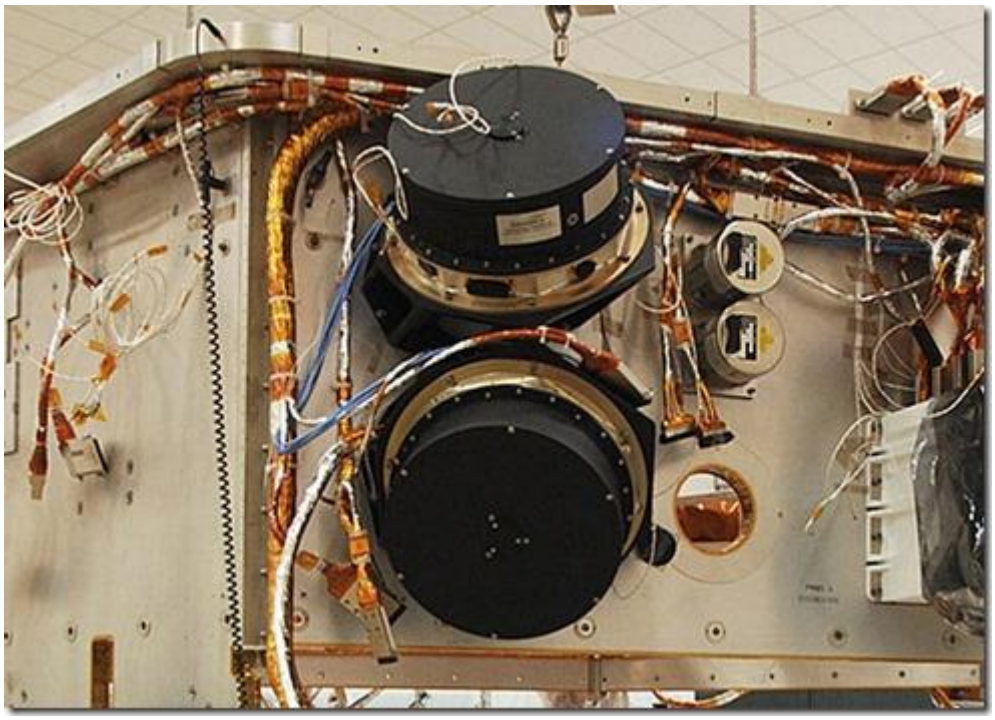
Il s'agit non seulement de résister durablement aux rayons cosmiques et divers mais aussi de supporter de fortes variations de température, ou tout du moins, des températures extrêmes.

Leurs sources d'énergie

Les instruments de bord des télescopes spatiaux sont généralement alimentés par des panneaux solaires et des batteries associées. Leur durée de vie n'est pas un facteur limitant pour ces télescopes même si les panneaux solaires peuvent se dégrader avec le temps, via la réception de micro-météorites. L'alimentation nécessaire au télescope peut représenter plusieurs centaines de Watts.

Pour se déplacer en orbite ou maintenir leur orbite, les télescopes spatiaux peuvent faire appel à de petites tuyères qui envoient du gaz de propulsion ou un comburant et un carburant. La réserve de gaz étant finie, cela peut limiter la durée de vie du télescope. Ces propulseurs qui utilisent souvent de l'hydrazine servent surtout à maintenir le télescope sur son orbite.

L'alimentation électrique provenant des panneaux solaires permet aussi d'actionner des roues d'inertie qui permettent au télescope de changer d'orientation, sans changer de position. Une roue tourne dans un sens et le reste du satellite dans l'autre sens par réaction. Il faut de trois à quatre roues pour pouvoir se placer dans n'importe quelle direction. La rotation du télescope sur ses trois axes est assez lente, les roues ayant une masse très inférieure à celle du satellite.



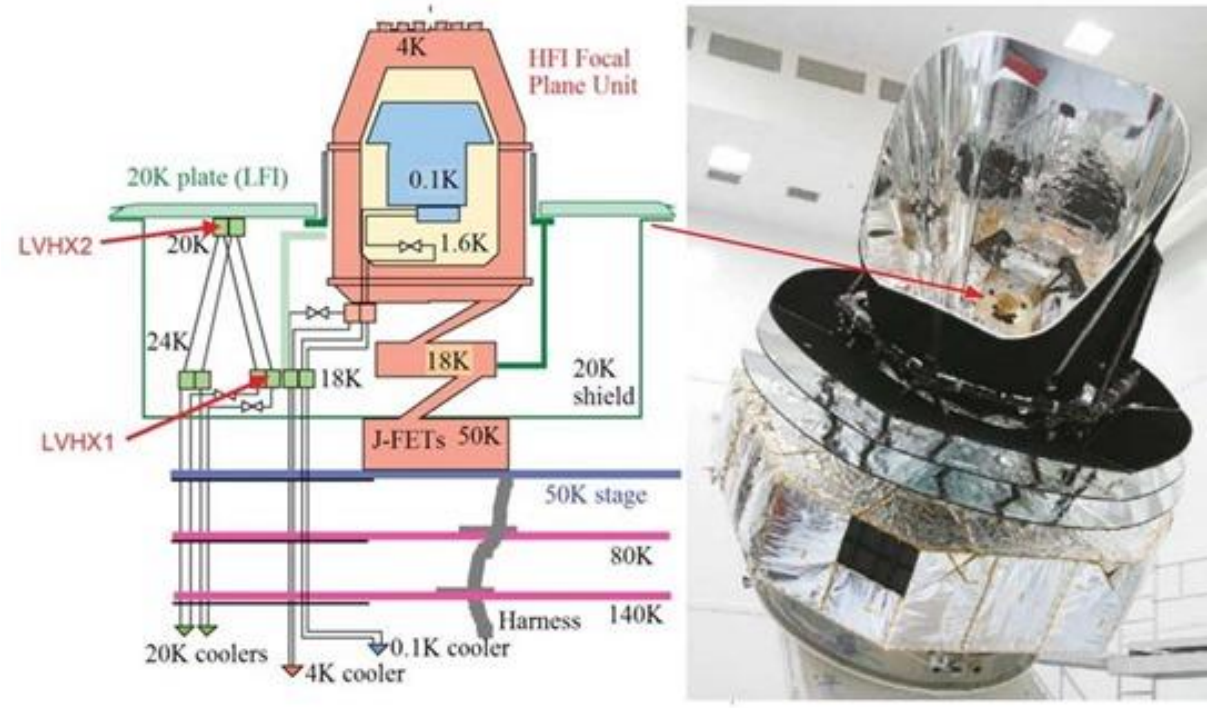
L'une de ces roues de positionnement a fait défaut au télescope Kepler qui a du rester dans une orbite stable et utiliser ses propulseurs à la place pour bien rester en position (*ci-dessus*, deux des quatre roues de positionnement de Kepler). Cela a mis en danger sa mission en 2013 mais celle-ci a toutefois pu se poursuivre presque sans encombres depuis lors [**source**].

La cryogénie des instruments

Pour diminuer la captation de bruit ambiant ("dark current"), les capteurs infrarouges des télescopes doivent être refroidis. Sur Terre, cela ne pose pas de problème particulier. Il y a de la place et de l'énergie à volonté.

L'espace est plus contraignant car le refroidissement cryogénique des instruments utilise soit de l'hélium soit de l'azote liquide. La réserve correspondante va limiter la durée d'usage des instruments dans l'infrarouge moyen. Les instruments dans l'infrarouge proche doivent être refroidis à 77K (77 degrés au-dessus du zéro absolu qui est à -273°C), ceux de l'infrarouge moyen doivent l'être à 4K et ceux de l'infrarouge lointain doivent l'être à seulement 100 mK, soit un dixième de degré au-dessus du zéro absolu.

Les instruments qui fonctionnent dans le visible et le très proche infrarouge peuvent être refroidis de manière passive avec des radiateurs en deux parties : des collecteurs de chaleur près des instruments, et des radiateurs qui la diffusent dans l'espace. Cela reprend le principe du refroidissement passif des CPU et GPU des ordinateurs personnels. Sans ventilation car la chaleur se dissipe par rayonnement… et un ventilateur ne sert à rien dans l'espace car on est dans le vide !

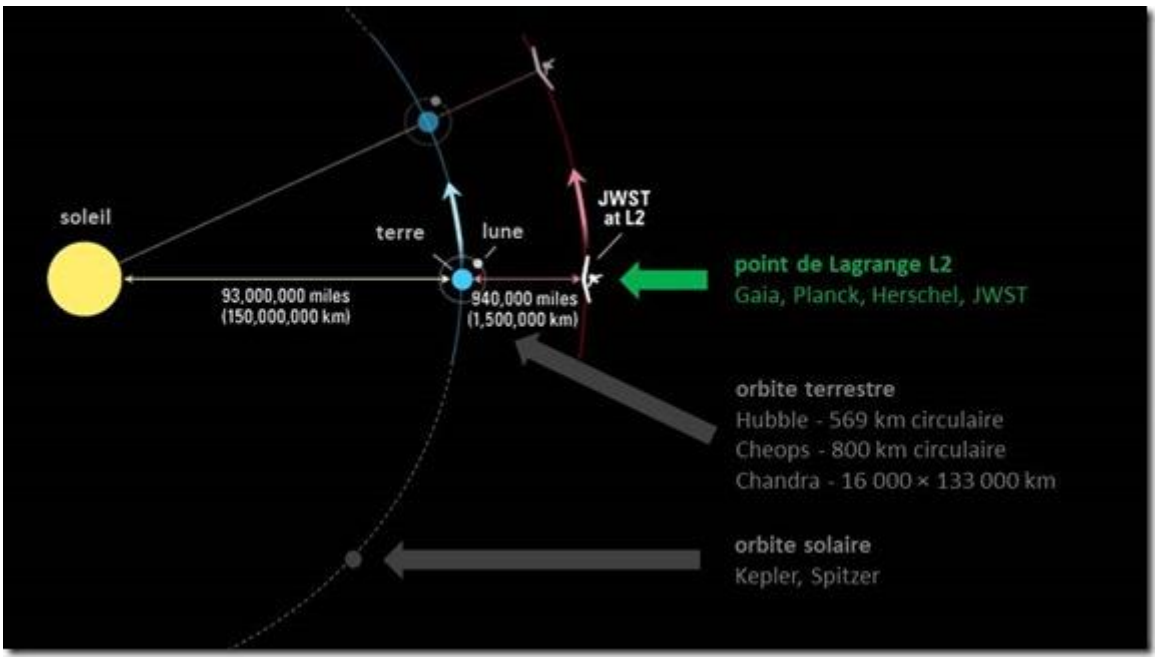


Ci-dessus, l'installation de cryogénie du télescope infrarouge Spitzer avec ses différents étages.

Leur orbite

Les télescopes spatiaux sont placés sur des orbites qui sont habituellement de quatre types que l'on choisit en fonction de contraintes diverses comme le coût du lancement, l'objectif de rentabilité du télescope et les objectifs d'observation :

- En **orbite basse** autour de la Terre comme Hubble, à environ 500 km d'altitude. L'avantage est que cela n'est pas compliqué d'envoyer le télescope en orbite et que l'on peut éventuellement le réparer comme la navette spatiale américaine l'a fait pour Hubble. L'inconvénient est que les observations de l'espace ne peuvent avoir lieu que la moitié du temps, lorsque le télescope est dans la nuit. Sachant que l'orbite dure environ 96 minutes à cette altitude. A cette altitude, les télécommunications spatiales sont facilitées pour le haut débit, ou tout du moins un haut débit d'ADSL de zone faiblement dense ! Pour prendre un exemple, Hubble doit éviter de regarder dans la direction du Soleil dans un cône de 45° et il doit bien entendu éviter la Terre. Cela donne un temps d'observation compris entre 45 minutes sur les 96 minutesd'une orbite et la totalité des orbites selon la direction observée (tant que la Terre et le Soleil sont évités). Deux régions d'un rayon de 18° sont observables en permanence, ce qui peut servir pour des temps de pose de très longue durée liés à la captation de galaxies très lointaines comme dans les programmes Hubble Deep Field et Hubble Ultra-Deep Field. Qui plus est, l'anomalie magnétique de l'Atlantique Sud empêche la Terre de protéger le télescope de bombardement de particules, ce qui met hors service une partie des instruments pendant 25 minutes par orbite. A ceci s'ajoutent d'autres contraintes comme la position des panneaux solaires qui doivent être aussi orthogonaux que possible avec le Soleil – heureusement, ils peuvent pivoter sur leur axe de support – et diverses contraintes thermiques.
- En **orbite elliptique** autour de la Terre, ce qui va donner un temps d'exploration bien plus grand, le télescope étant alors rarement dans l'ombre de la Terre. L'envoi des données collectées par le télescope peut être réalisé lors de la périgée de l'orbite elliptique, lorsqu'il est le plus près de la Terre. Le télescope à rayons X Chandra est sur ce type d'orbite avec une périgée élevée à 16 000 km et une apogée à 133 000 km.
- En **orbite autour du Soleil** sur la même orbite que la Terre mais décalée. Cela permet de pouvoir observer tout le temps l'espace, dans la direction opposée au Soleil. Les télescopes Kepler et Spitzer sont sur ce type d'orbite. Elle permet aussi d'éviter les perturbations des instruments générées par l'anomalie magnétique de l'Atlantique Sud qui se manifeste en orbite basse.



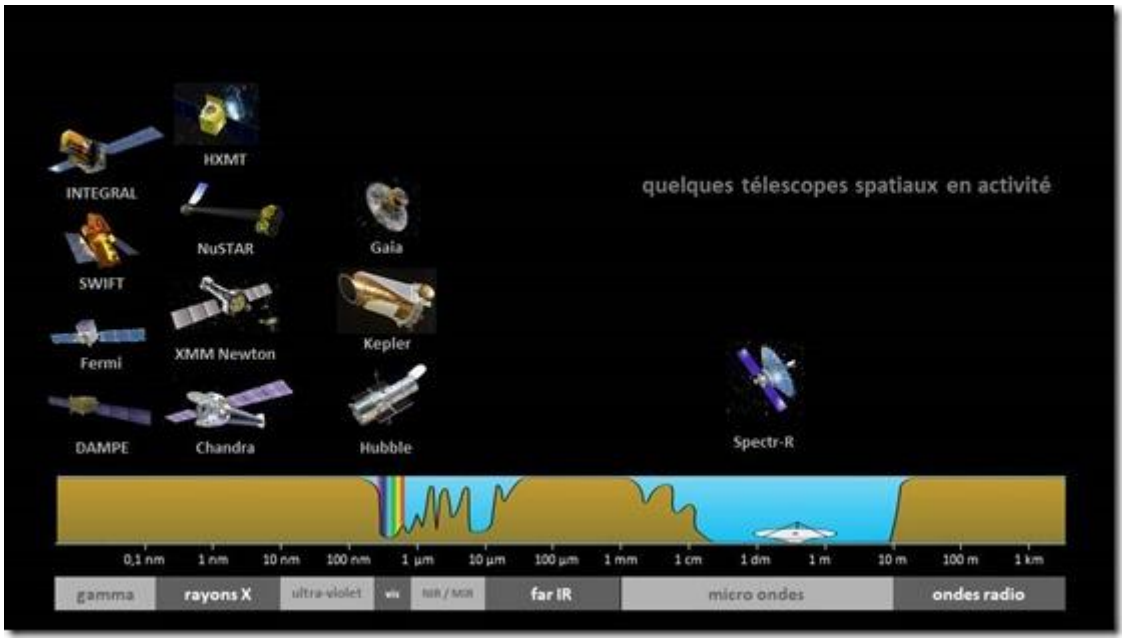
- En **orbite sur ou autour du point de Lagrange L2** qui permet au télescope d'être dans l'ombre de la Terre et donc, de ne pas être éclairé par elle, ce qui facilite les observations. Le télescope est cependant éclairé par le Soleil qui a une taille apparente plus grande que celle de la Terre, et qui alimente au passage ses panneaux solaires. Cette orbite particulière permet au télescope de tourner autour du Soleil à la même vitesse angulaire que la Terre. Elle est située à 1,5 millions de km de la Terre sachant que cette dernière est à 150 millions de km du Soleil et que la Lune est à environ 330 000 km de la Terre. Les inconvénients de cette orbite ? Elle est éloignée donc cela peut limiter la vitesse des télécommunications. Le placement du télescope sur cette orbite est compliqué. Enfin, il est alors impossible d'y réparer le télescope, comme cela a pu se faire dans les années 1990 pour Hubble qui était en orbite terrestre accessible par la Navette Spatiale. Les télescopes Gaia, Planck et Herschel sont sur cette orbite et elle accueillera le James Webb Space Telescope en 2018. Comme Herschel, un télescope spatial peut être envoyé sur une orbite de Lissajous autour de ce point de Lagrange.

Leur durée de vie

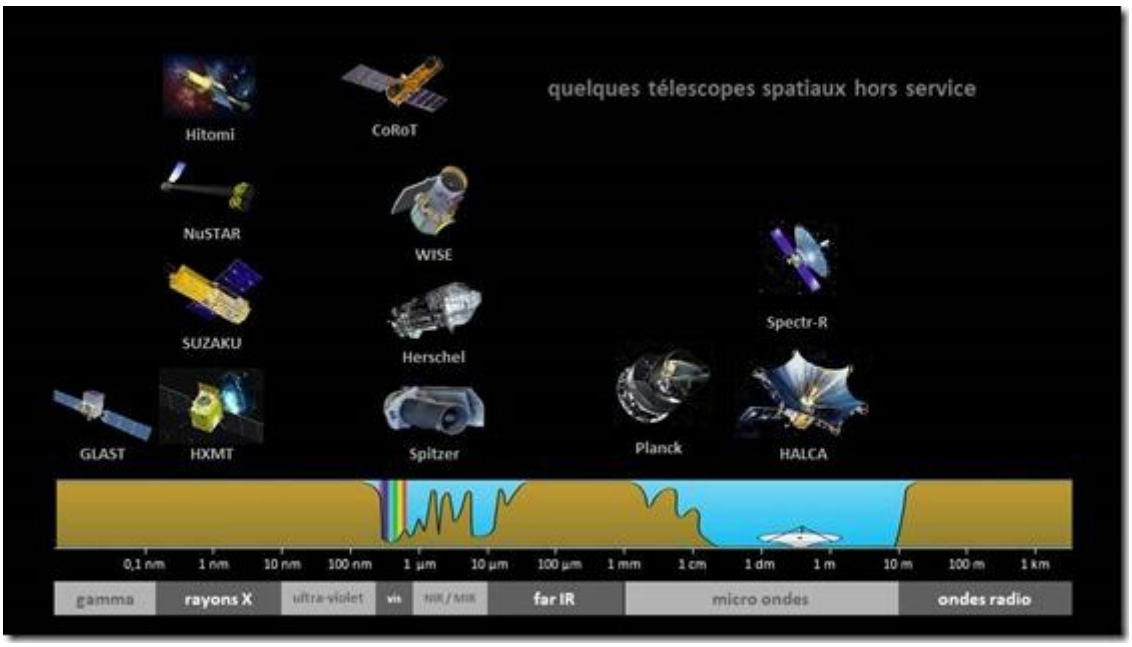
La durée de vie opérationnelle des télescopes spatiaux est couramment située entre trois et dix ans alors que celle des grands télescopes terrestres se compte en décennies voir demi-siècles.

Elle dépend du type d'instrument embarqué. Les télescopes infrarouges sont ceux dont la durée de vie est la plus contrainte, par les gaz liquides de cryogénisation des capteurs infrarouge. La limitation de la durée provient aussi des ergols qui servent à ajuster la position du satellite, à le maintenir dans la bonne altitude en orbite, parfois aussi pour changer de position pour scruter l'Univers. Les télescopes infrarouge peuvent fonctionner dans une période étendue et en mode limité, sans la captation dans l'infrarouge moyen.

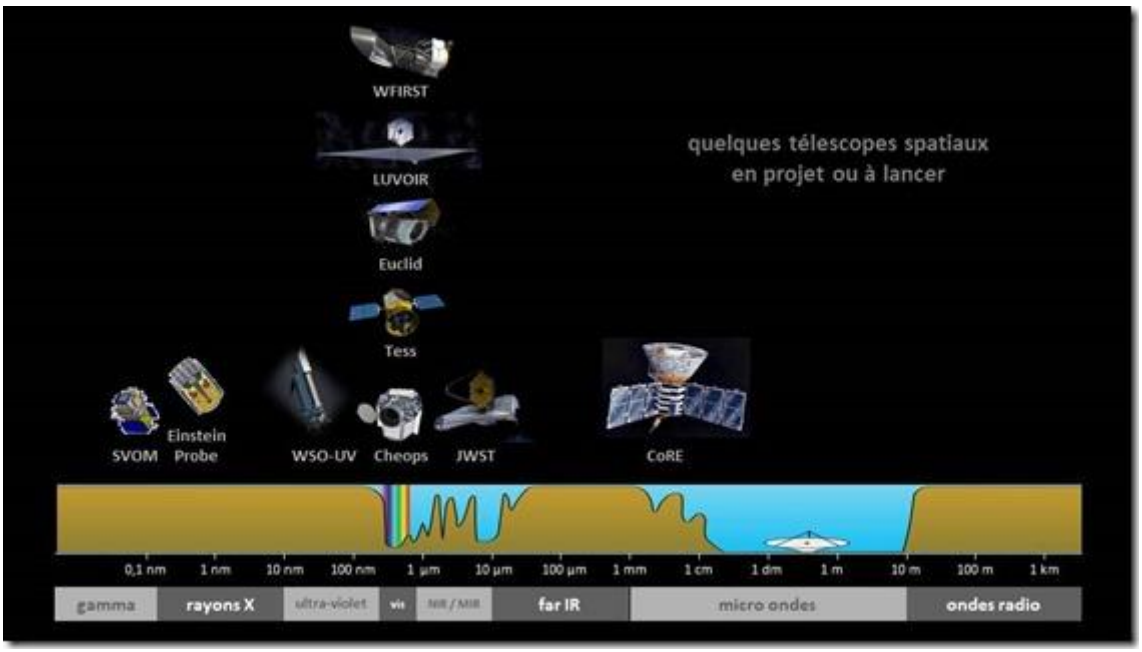
Le record a été obtenu avec Hubble qui a été réparé et modifié plusieurs fois grâce à la navette spatiale. C'est difficile à faire depuis la fin du programme de la Navette Spatiale américaine. Hubble est actuellement proche de sa fin de vie.



Dans la pratique donc, le nombre de télescopes spatiaux en activité est relativement faible (*ci-dessus*). Et les télescopes inactifs sont des plus nombreux, et le schéma n'intègre que les plus récents (*ci-dessous*).



Les sondes spatiales dotées de capteurs photo qui s'éloignent du Soleil ne peuvent alors plus être alimentées par des panneaux solaires photovoltaïques. Lancées en 1977, Voyager 1 et 2 sont ainsi alimentées par des piles au plutonium. Celles-ci s'épuisent progressivement et ces sondes ne pourront plus émettre d'images vers la Terre d'ici une vingtaine d'années.

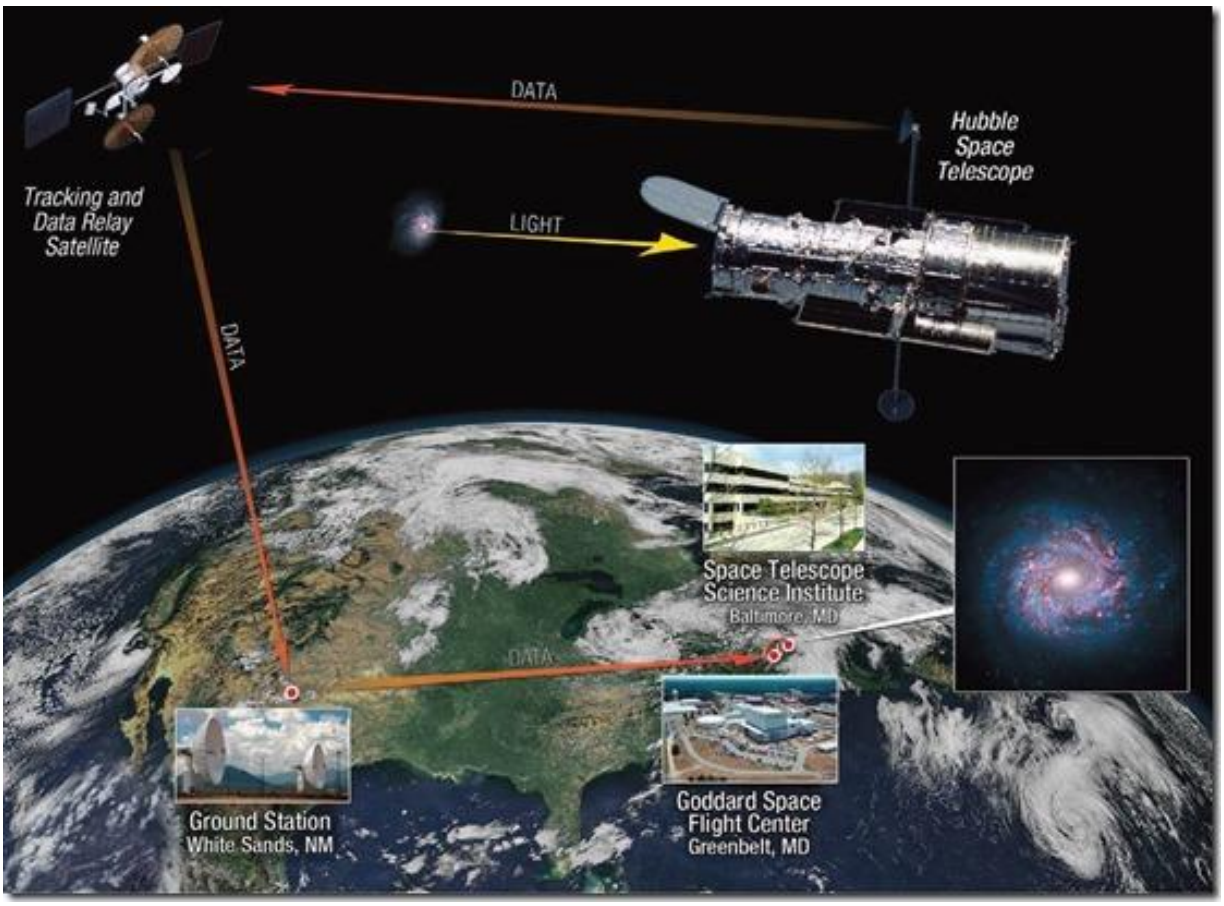


Les télécommunications avec les télescopes spatiaux

Les télescopes spatiaux utilisent des bandes de fréquences différentes selon leur type d'orbite et leur distance à la terre. Plus ils sont proches de la Terre, plus grand sera le débit. Un peu comme votre liaison ADSL et le DSLAM auquel il est connecté chez votre opérateur télécom. Plus il est loin, plus lent est le débit ! Les télécommunications montantes vers les télescopes pour les piloter sont moins exigeantes en débit que les envois de données des télescopes spatiaux à la Terre.

Les bandes de fréquences utilisées sont la bande S (2 GHz), la bande X (7 à 8 GHz) et la bande Ka (32 à 34 GHz), utilisée depuis environ 2004, sachant que plus la fréquence est élevée, meilleurs sont les débits.

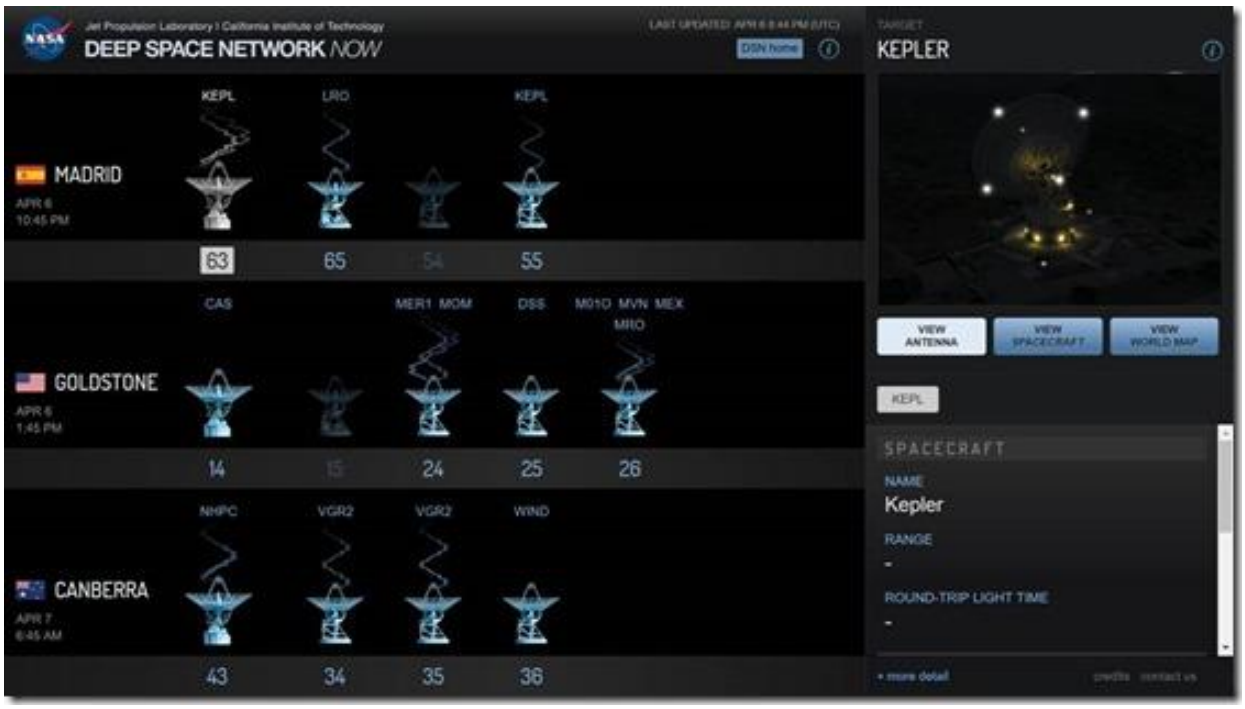
Hubble (ou HST pour Hubble Space Telescope) envoie ses données dans la bande S située à 2,2 GHz, pas loin de celle du Wi-Fi abgn, qui est à 2,4 GHz ! Le débit associé est de 1 Mbits/s ! Il stocke les données avant de les envoyer dans une mémoire de masse à base de semiconducteurs de moins de 2 Go ! Les antennes de Hubble sont orientables et communiquent avec les satellites géostationnaires TDRS de la NASA qui sont tout le temps visibles de Hubble. Ces derniers retransmettent alors les données aux stations terrestres [**source** du schéma ci-dessous].



Keppler utilise une liaison en bande Ka (20 GHz) avec un une vitesse maximale de 550 Kbits/s.

JWST s'appuiera aussi sur la bande Ka mais atteindra 8 MBits/s représentant 30 Go de données par jour.

A noter le **site** du **Deep Space Network** de la NASA qui permet de faire le tour des antennes de réception des signaux des satellites, des télescopes spatiaux et sondes spatiales comme Juno, utilisés par l'agence américaine. Le DSN utilise une dizaine d'antennes paraboliques situées aux USA, en Espagne et en Australie. Des antennes de 70 m de diamètre servent à l'émission de données vers les télescopes et celles de 34 m servent à la réception de leurs données.



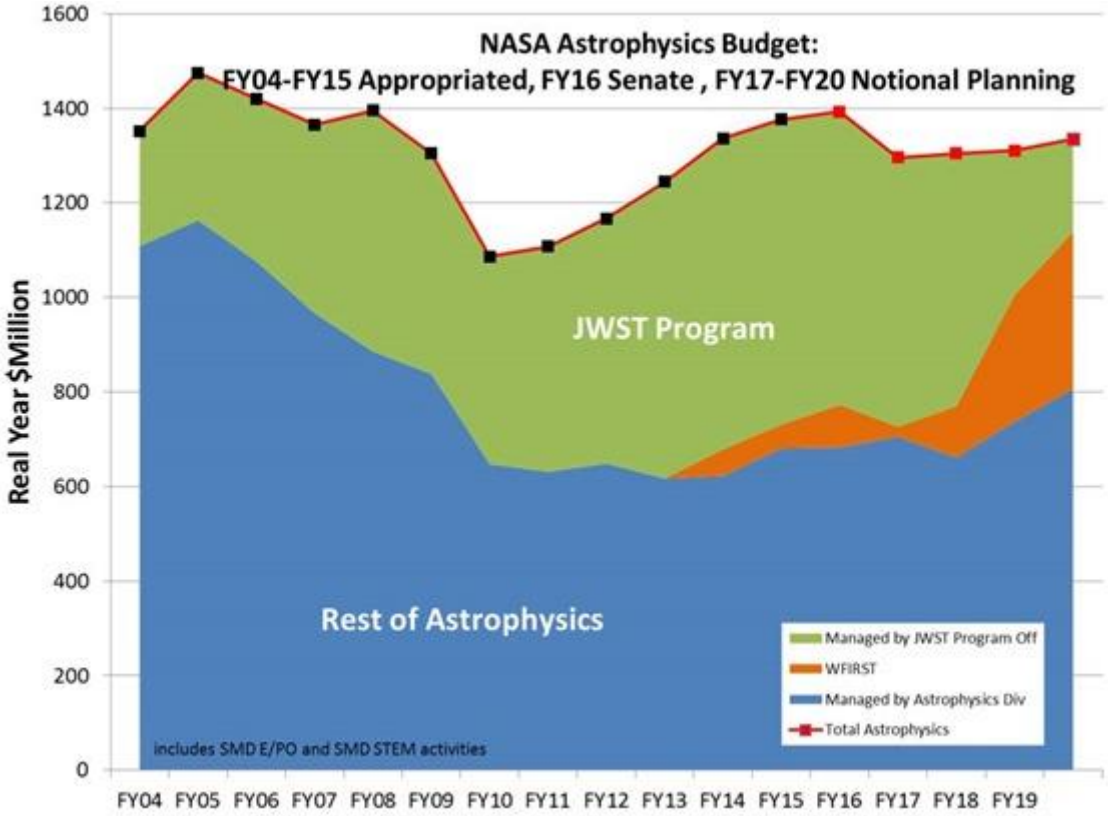
Les données reçues permettent aussi d'ajuster le positionnement précis des satellites. Différentes techniques sont utilisées pour déterminer avec précision la position des télescopes spatiaux : certaines exploitent les signaux radio reçus (pour mesurer la distance, la vitesse via l'effet Doppler, et l'orientation via de l'interférométrie) ainsi que ceux des capteurs embarqués (gyro, suivi d'étoiles repères, suivi du Soleil).

Des liaisons optiques plus rapides pourraient être utilisées et atteindre 10 Mbis/s jusqu'à Saturne et 50 Mbits/s en orbite basse. Elles sont pour l'instant réservées aux télescopes observant la Terre, et pas encore à ceux qui sont tournés vers l'espace.

Des budgets élevés

Les budgets des télescopes spatiaux sont très élastique et peuvent aller de $100m à $10B. Le télescope spatial le plus cher sera probablement JWST, dont le budget sans cesse révisé à la hausse est actuellement d'environ $9B. Cela représente un ordre de grandeur de plus que le budget des télescopes géants vus dans une **partie précédente**. Leur budget est compris entre $1B et $1,5B. Comme pour les grands télescopes terrestres, ces budgets peuvent être mutualisés à l'échelle internationale. Une bonne part des satellites européens sont financés par plusieurs pays européens regroupés notamment dans l'ESA.

Le plus gros financeur est sans doute la NASA. Son budget total annuel est d'environ $19B. Elle consacre $1326m à l'astronomie en 2017 dont $569m rien que pour le JWST et elle se prépare à dépenser sans compter pour le WFIRST que nous examinerons dans ces lignes.



De son côté, l'agence spatiale européenne est dotée d'un budget annuel de 5,25 Md€ (2016), la France en étant le second contributeur derrière l'Allemagne (22,6% et 844 M€ vs 23,3% et 872 M€) et le premier contributeur en effectifs (510), le siège étant basé à Paris. La partie de ce budget dédiée à l'astronomie semble être de 9,7% et 508 M€, soit moins de la moitié de l'investissement de la NASA dans le domaine. La plus grosse part du budget est consacrée aux lanceurs (Ariane), pour 20% et à l'observation de la Terre (30,5%).

Les programmes scientifiques de l'astronomie sont concertés pour agencer la complémentarité entre télescopes terrestres et spatiaux, comme dans la planification des **Decadal Surveys** de la NASA. Les télescopes spatiaux servent souvent d'éclaireurs de l'exploration de l'espace. Les objets identifiés sont ensuite analysés par divers instruments complémentaires installés sur les télescopes terrestres. Typiquement, avec les radiotélescopes qui n'ont pas d'équivalents dans les télescopes spatiaux et n'ont pas besoin d'être envoyés dans l'espace car l'atmosphère laisse passer les ondes radio.

Les réservations des créneaux

Comme pour les télescopes terrestres, les astronomes et astrophysiciens doivent faire des demandes en ligne d'observation. Un cinquième environ d'entre elles sont honorées et avec un délai de plusieurs mois. Il faut donc prendre son temps et bien documenter ses demandes ! Pour le 25e cycle d'appels à projets du Hubble Space Telescope, les demandes devaient être formulées entre janvier et avril 2017 et les **résultats** notifiés en 2017, avec quatre laboratoires français retenus. Les demandes d'observations sont gérées par le **Space Telescope Science Institute** (STScI)

qui est un organisme privé indépendant de la NASA créé en 1981 et opéré par l'AURA, l'Association des 39 Universités US de recherche en astronomie.

Cycle 25 Approved Programs

Phase II	First Name	Last Name	Institution	Country	Type	Resources	Title
15328	Jessica	Agarwal	Max Planck Institute for Solar System Research	DEU	GO	5	Orbital period and formation process of the exceptional binary asteroid system 288P
15090	Marcel	Agueros	Columbia University in the City of New York	USA	GO	35	A UV spectroscopic survey of periodic M dwarfs in the Hyades
15091	Marcel	Agueros	Columbia University in the City of New York	USA	SNAP	86	A UV spectroscopic snapshot survey of low-mass stars in the Hyades
15092	Monique	Aller	Georgia Southern University Res. & Svc. Foundation, Inc	USA	GO	6	Testing Dust Models at Moderate Redshift: Is the z=0.437 DLA toward 3C 196 Rich in Carbonaceous Dust?
15193	Alessandra	Aloisi	Space Telescope Science Institute	USA	GO	22	Addressing Ionization and Depletion in the ISM of Nearby Star-Forming Galaxies
15194	Alessandra	Aloisi	Space Telescope Science Institute	USA	GO	18	The Epoch of the First Star Formation in the Closest Metal-Poor Blue Compact Dwarf Galaxy UGC 4483
15299	Julian	Alvarado Gomez	Smithsonian Institution Astrophysical Observatory	USA	GO	13	Weaving the history of the solar wind with magnetic field lines
15093	Jennifer	Andrews	University of Arizona	USA	GO	18	Dwarfs and Giants: Massive Stars in Little Dwarf Galaxies
15222	Iair	Arcavi	University of California - Santa Barbara	USA	GO	1	What Type of Star Made the One-of-a-kind Supernova iPTF14hls?
15223	Matthew	Auger	University of Cambridge	GBR	GO	1	The Brightest Galaxy-Scale Lens
15300	Thomas	Ayres	University of Colorado at Boulder	USA	GO	49	Ecliptic-poles Stellar Survey (EclipSS)
15160	Andrew	Baker	Rutgers the State University of New Jersey	USA	GO	4	High-resolution imaging of four lensed dusty star-forming galaxies
15224	Eduardo	Banados	Carnegie Institution of	USA	GO	25	The host galaxy and environment of a bright QSO at z=7.54

Un processus qui rappelle celui des appels à projets divers des Programmes d'Investissements d'Avenir. A ceci près que les laboratoires de recherche ont un droit de tirage lié au financement de leur pays. L'Europe ayant contribué à 15% au financement de Hubble, cela lui donne un droit de tirage correspondant dans les observations. A noter que pendant les années 1990, 13 demandes d'observation d'astronomes amateurs ont été satisfaites. Mais ce programme a été supprimé faute de budget.

Les entrepreneurs

Vous remarquerez qu'aucun entrepreneur dans le vent ne s'est aventuré dans la production de télescopes spatiaux comme de télescopes terrestres. Ce n'est pas seulement lié au fait qu'ils servent à la recherche fondamentale et qu'ils sont financés par les deniers publics. Les entrepreneurs cherchent les économies d'échelle. Or, il y n'y en a quasiment pas les télescopes spatiaux qui sont tous uniques en leur genre. La seule économie d'échelle se situe dans les lanceurs, un business potentiellement lucratif et qui est notamment bien investi par Space-X, la société d'Elon Musk. Ses fusées Falcon peuvent servir à lancer des télescopes spatiaux mais elles sont majoritairement utilisées pour lancer des satellites commerciaux dans les télécommunications.

Mais entrepreneur n'est pas synonyme de startups. On peut entreprendre dans des entreprises technologiques qui n'ont pas les économies d'échelle des startups. C'est dans ce registre que l'on trouve diverses PME françaises actives dans le secteur spatial. Ce sont des équipementiers et des fournisseurs de composants critiques comme les miroirs (Boostec), les capteurs CCD ou des instruments complets.

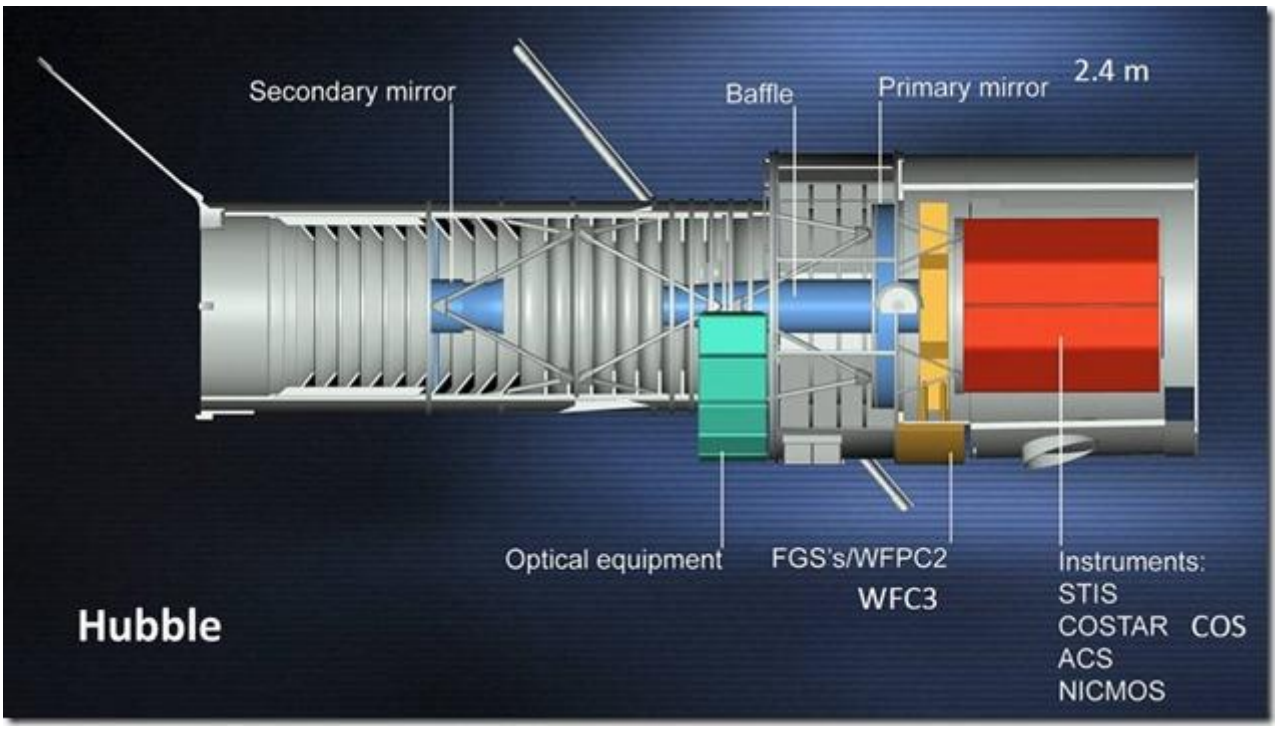
Télescopes spatiaux dans le visible

Dans ce vaste tour d'horizon des technologies et entreprises de l'astronomie, et après un apéritif sur les **particularités des télescopes spatiaux**, partons à la découverte des grands télescopes opérant principalement dans le visible avec **Hubble** et **Gaia**. Le télescope spatial **Kepler** est aussi dans cette catégorie mais nous le dissèquerons dans un prochain article à venir sur la recherche d'exoplanètes.

Dans les épisodes suivants, nous ferons la même chose pour les télescopes spatiaux dans l'infrarouge, les rayons gamma, les rayons X, l'ultra-violet et les ondes radio. Bref, nous allons faire le tour de l'exploration de tout le spectre électromagnétique !

Hubble Space Telescope (1990-2021)

C'est de loin le télescope spatial le plus connu. Le projet de télescope spatial Hubble a été imaginé au début des années 1970, approuvé par le Congrès US en 1977, après une annulation en 1974. Conçu pendant les années 1970 et 1980, il était prêt pour son lancement par la navette spatiale en 1986. L'accident de Challenger cette même année entraîna un retard de plusieurs années pendant lesquelles le télescope finalisé fut conservé dans un local dédié rempli d'azote inerte pour éviter qu'il se mette à rouiller ! Alors que la navette spatiale avait repris ses vols en 1988, Hubble était lancé en 1990 par la mission STS-31, la 31ème des navettes spatiales, embarqué dans la soute de Discovery.



Mais ce chat noir de Hubble voyait trouble à cause d'un défaut d'aberration sphérique sur les bords de son miroir principal de 2,4 mètres, construit en 1981. L'erreur de 2,2 microns était due à un défaut d'assemblage et d'alignement de l'optique du système

de test du miroir par interférométrie, et pour seulement 1,3 mm (*ci-dessous*)! Ce sont peut-être les mm les plus chers de l'histoire des sciences ! Ces défauts avaient d'ailleurs été détectés après la fabrication du miroir chez Perkin Elmer mais considérés comme des erreurs de mesure selon le **rapport de la NASA** de l'époque.

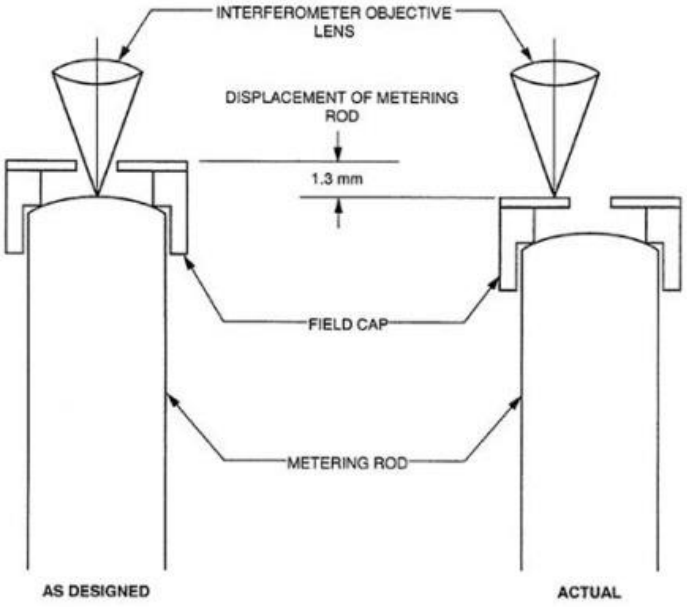


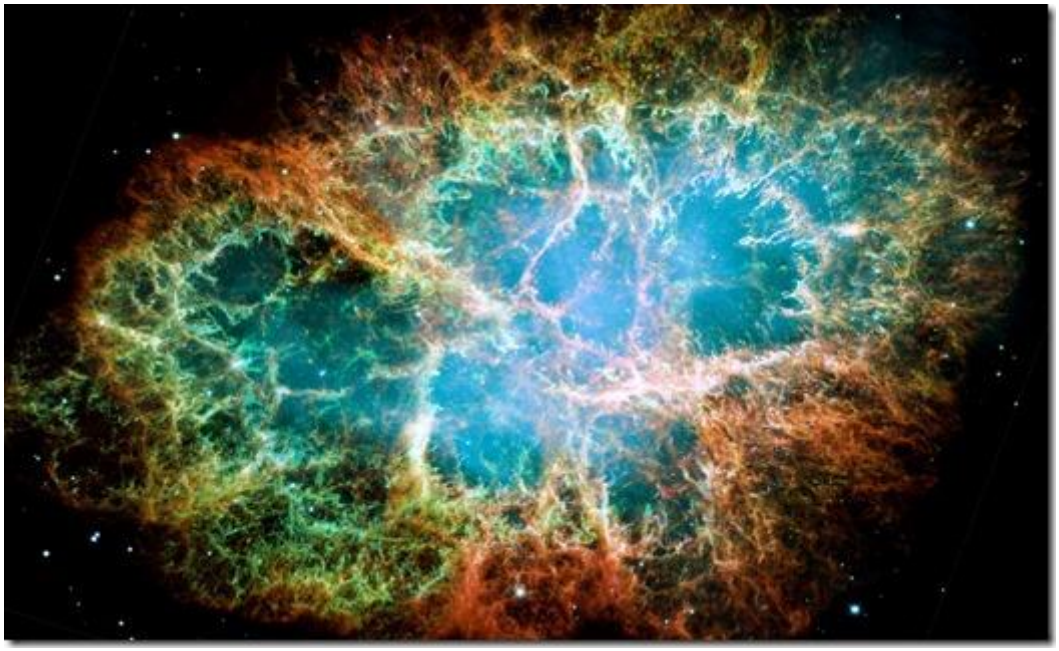
Figure 7-4. Displacement due to the interferometer focusing on the field cap instead of the metering rod.

Ce défaut handicapait une bonne part de la mission du télescope. Pour y remédier, les ingénieurs de la NASA et de ses sous-traitants lui taillèrent un COSTAR, le Corrective Optics Space Telescope Axial Replacement, un système de correction optique s'intercalant entre le miroir principal et divers instruments sachant que la caméra principale était remplacée par une seconde génération de caméra, la WFPC2, dotée elle aussi d'une optique corrective annulant le défaut d'asphéricité du miroir principal.

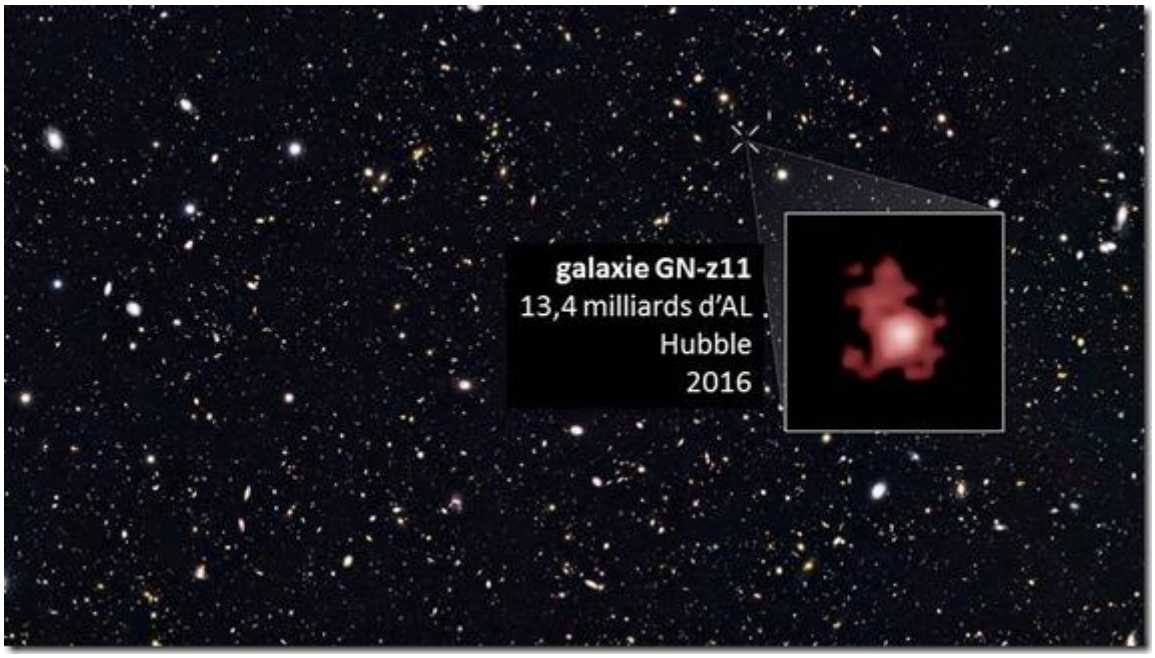
L'ensemble fut installé en 1993 et la vue nette vint au télescope pour la plus grande joie des astronomes qui purent alors scruter l'Univers comme on ne l'avait jamais fait avant ! Ce d'autant plus que les optiques adaptatives n'étaient pas encore courantes dans les télescopes terrestres.

Depuis maintenant 24 ans, Hubble alimente sans relâche les astronomes avec de belles images (mais pas que) : la nébuleuse de Carina et les piliers de la création dans

la Voie Lactée, des supernovas comme la nébuleuse du crabe à 6100 années lumières (*ci-dessous*), de magnifiques photos des planètes du système solaire comme Saturne, des lunes de Pluton ou la vue ultra-détaillée de la galaxie Andromède pour n'en citer que quelques-unes. Une grande majorité des plus belles photos de l'Univers nous vient de Hubble !

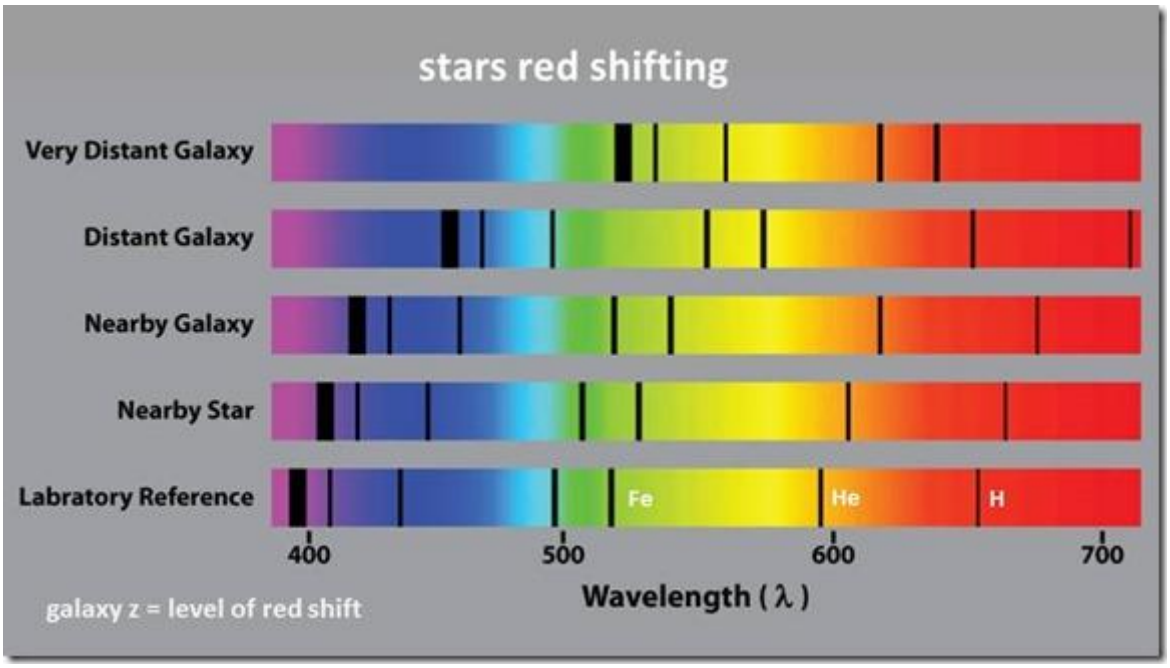


Hubble a aussi détecté en 2016 la galaxie la plus éloignée qui soit connue, située à 13,4 milliards d'années lumière (GNz11.1, *ci-dessous*). Elle est donc positionnée dans le temps environ 400 millions d'années après le Big bang. La numérotation GNz11.1 de cette galaxie éloignée indique juste son niveau (z) de glissement spectral vers le rouge (red shift). Plus cette valeur est élevée, plus la galaxie est éloignée.



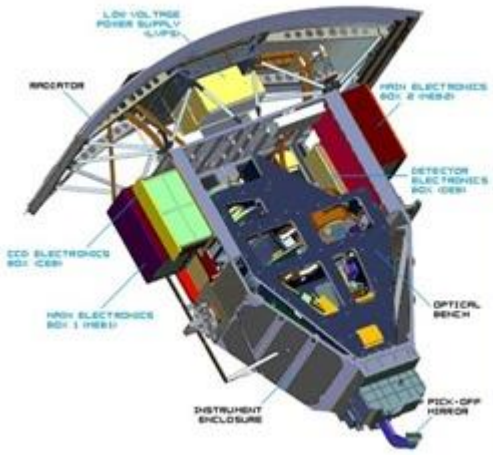
La valeur du décalage vers le rouge est basée sur une échelle de repérage dans le spectre électromagnétique de lignes spécifiques de détection de l'hydrogène, de

l'hélium, du fer, du calcium et d'autres éléments divers comme l'oxyde de titane. Le red shift s'évalue comme suit avec z = (longueur d'onde observée/émise) – 1 ou longueur d'onde observée = (z+1)*longueur d'onde émise (**source**).



Hubble a été mis à jour plusieurs fois par des astronautes de la navette spatiale, en plus de la première intervention en 1993. La seconde fois eu lieu en 1997 avec l'ajout du spectrographe STIS, permettant la confirmation de l'existence de trous noirs au centre de galaxies, et de la caméra et du spectrographe infrarouge NICMOS. En 1999, son ordinateur central conçu pendant les années 1970 fut remplacé par 4 PCs, déjà dépassés pour l'époque, équipés de processeurs Intel 80486 et de 2 Mo de mémoire volatile et de 1 Mo de mémoire non volatile. C'est toujours avec cet équipement que le bon vieux Hubble fonctionne aujourd'hui.

En 2002, le système de réfrigération de la caméra/spectrographe infrarouge NICMOS qui était tombée en panne fut remplacé, une nouvelle caméra installée, l'ACS (Advanced Camera for Surveys) et les panneaux solaires remplacés par une version à plus haut rendement et plus petite, générant 5270 W au lieu de 4600 W. Ils sont complétés par 428 Kg de batteries permettant de tenir lorsque le télescope est dans la nuit terrestre. Celles-ci ont été remplacées en 1999. Certaines de ces missions visaient aussi à réparer ou remplacer différents autres instruments tombés en panne, donnant fort à faire aux astronautes de la Navette Spatiale jouant le rôle de techniciens de maintenance de télescope.

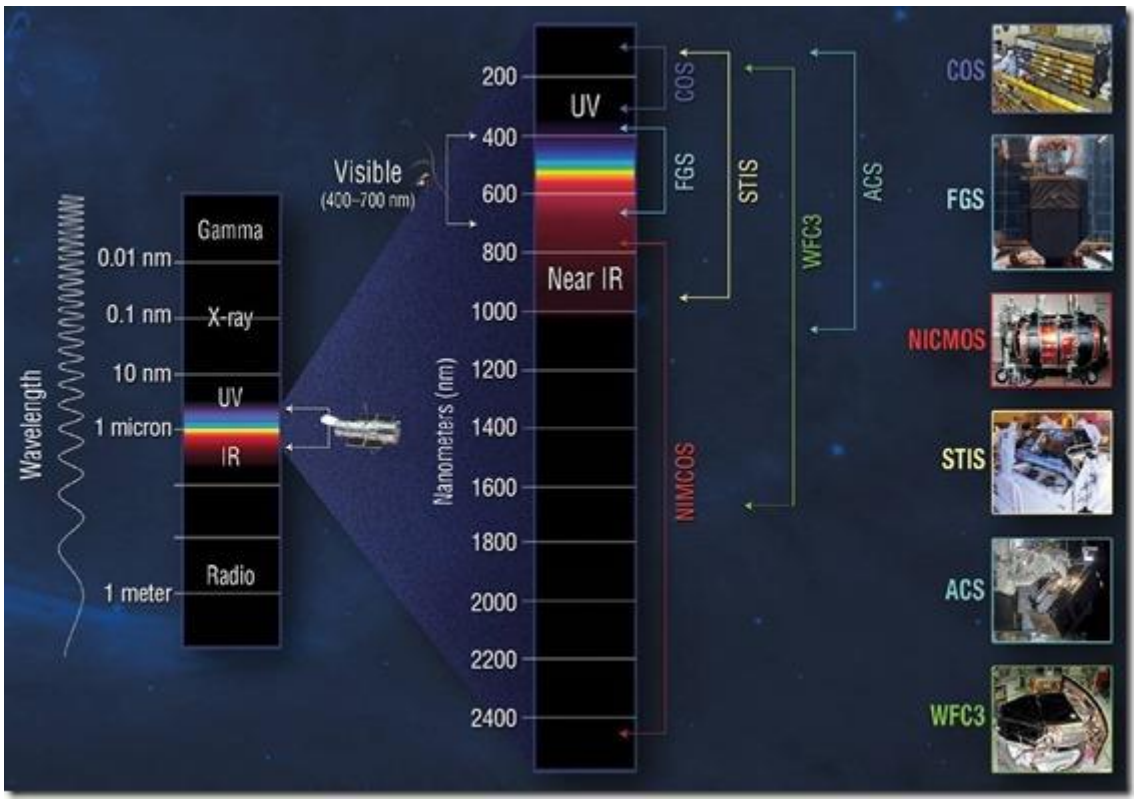


La dernière mission était celle de 2009 pour l'installation de sa dernière génération de caméra, la WFC3 (*ci-dessus*), couvrant l'ultraviolet, le visible et le proche infrarouge avec imageurs et spectrographe, et un spectrographe ultraviolet ultra précis, le COS. Au passage, le gyroscope et les batteries étaient mis à jour et le COSTAR retiré, une fois rendu inutile par l'ajout de correctifs directement sur les instruments. L'intervention de 2009 a été filmée en 3D avec une caméra IMAX, générant un film de 46 mn "IMAX Hubble 3D" [**bande annonce**].

Toutes ces interventions furent possibles grâce à une architecture modulaire du télescope dans le compartiment des instruments. Il était prévu que des astronautes puisse démonter et remplacer le plus facilement possible de gros modules de la zone des instruments. Ce genre d'évolutions à répétition n'est plus envisageable depuis que la navette spatiale a cessé de fonctionner en 2013 et tant que l'on ne disposera pas de satellites-robots dignes de ce nom.

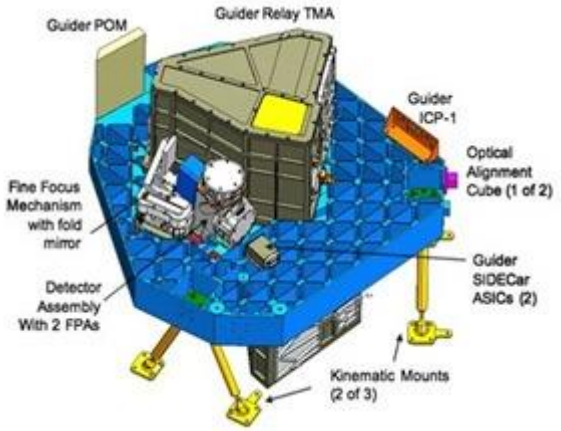
Les caractéristiques de Hubble sont imposantes : il fait 13,2 m de long, 4,2 m de diamètres et pèse 11 tonnes. Il tiendrait d'ailleurs dans la coiffe d'Ariane 5. Il est positionné en orbite terrestre basse à environ 540 km d'altitude. Ce n'est pas une orbite idéale pour un télescope spatial mais cela permettait sa maintenance par la Navette Spatiale. Sa structure supportant l'optique est dans un matériau à base de résine époxy et de graphite qui reste stable aux variations de température subies par le télescope. Il utilise quatre roues de réaction pour s'orienter, un mécanisme standard dans les télescopes spatiaux comme nous l'avons vu dans la partie précédente.

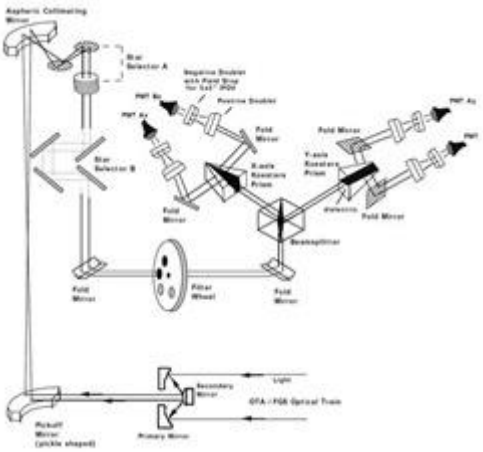
Les principales entreprises ayant participé à sa création sont **Corning** (miroir en verre), **Perkin Elmer** (polissage du miroir et dépôt de la couche d'aluminium de 65 nm d'épaisseur), **Lockheed-Martin** (vaisseau dans son ensemble) et **Ball Aerospace & Technologies Corp** (caméra ACS).



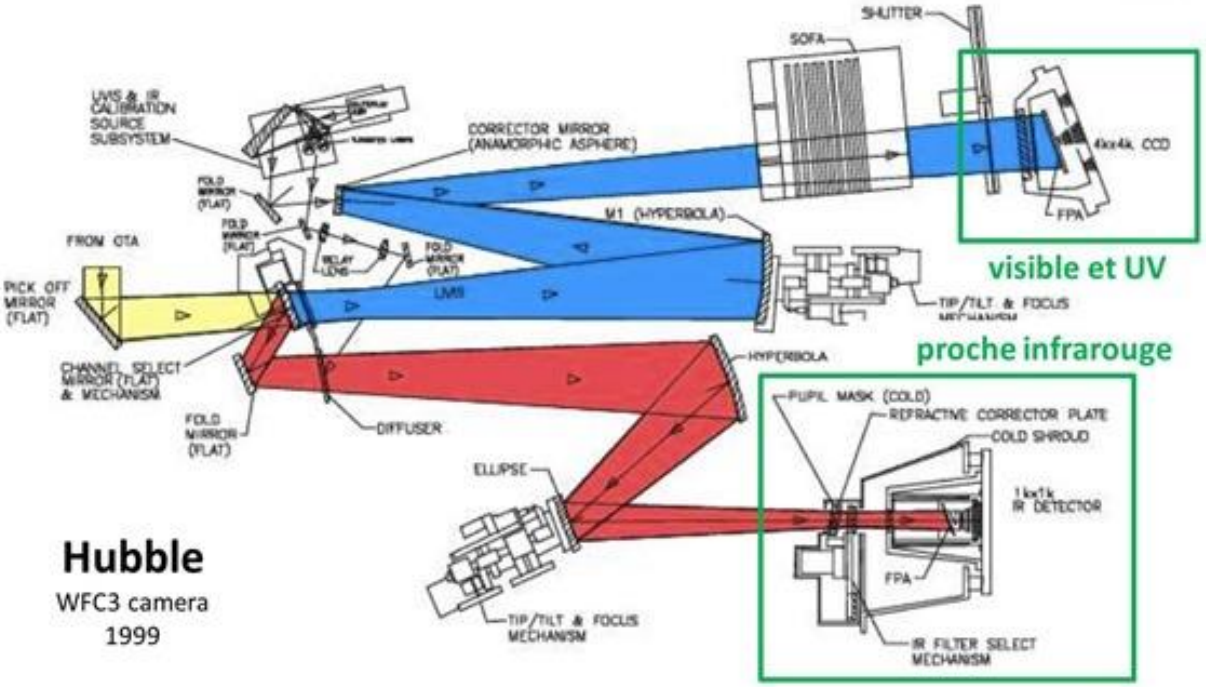
Voyons maintenant dans le détail quels sont les instruments qui équipent le Hubble Space Telescope à ce jour [**source** du schéma ci-dessus] :

FGS (Fine Guidance Sensors) est le système de positionnement du télescope qui s'appuie sur au moins deux étoiles guides. L'actuel FGS a été mis à jour lors de l'intervention sur Hubble de 2009. Le FGS contient trois instruments comprenant chacun un interféromètre et quatre photomultiplicateurs à tubes qui ne font que compter les photons reçus, les FGS ne générant pas d'images. L'interférométrie fonctionne en séparant le faisceau lumineux capté en deux faisceaux polarisés à 90° via un prisme de Koesters [détails dans le **FGS Instrument Handbook**]. Des trois FGS, deux servent au positionnement et un à l'astrométrie pour des usages scientifiques. Cette dernière sert notamment à détecter le diamètre d'étoiles géantes de la Voie Lactée, des étoiles binaires et des exoplanètes.

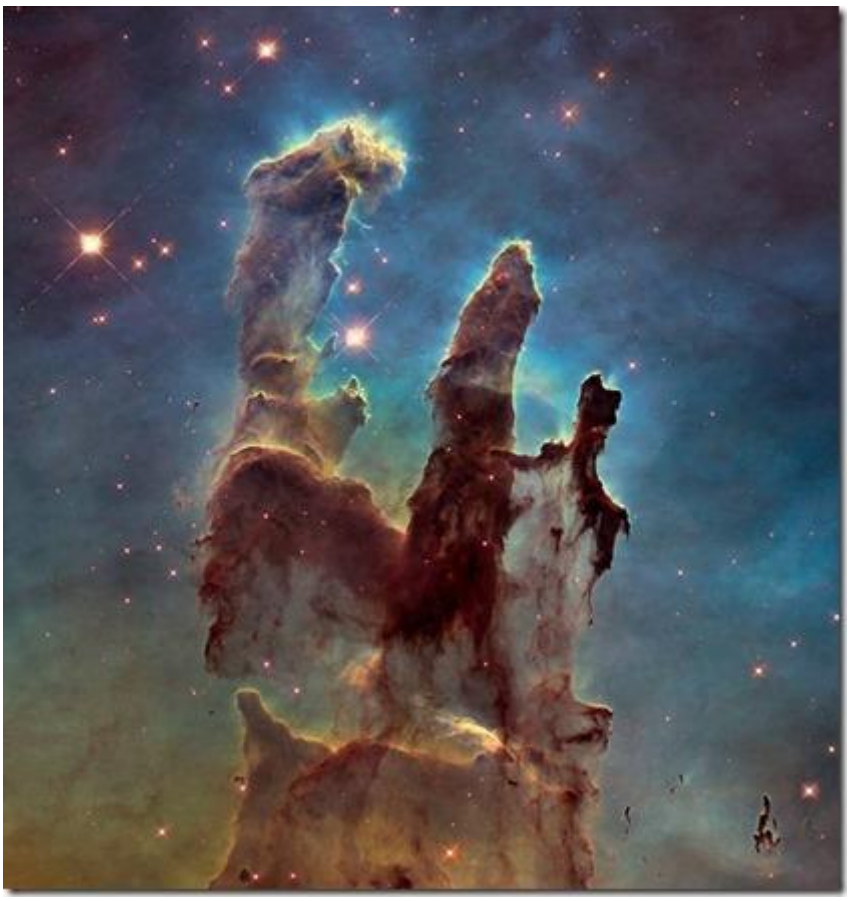




WFC3 (Wide Field Camera 3) est une caméra à champ large couvrant l'ultraviolet, le visible et le proche infrarouge. Elle est dédiée à l'observation des galaxies les plus lointaines, le milieu interstellaire ainsi que les planètes du système solaire. La lumière est envoyée par un miroir orientable vers le UVIS pour l'ultraviolet avec deux capteurs CCD de 2Kx4K pixels et 64 filtres différents, et dans le visible (200 à 1000 nm) ou le proche infrarouge (800 à 1700 nm) dans un CCD de 1Kx1K pixels via 15 filtres sélectionnables. Les capteurs ont une haute efficacité quantique, captant au moins 60% des photons pour ceux de l'UVIS et de 75% pour ceux de l'IR.

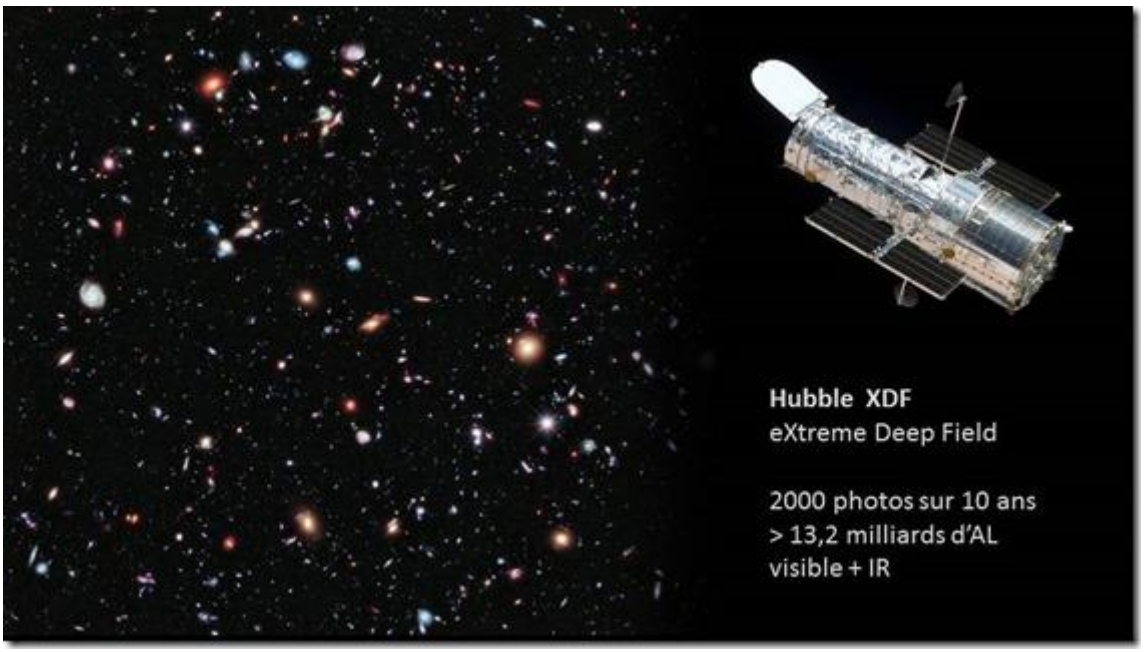


C'est au WFC3 que l'on doit la seconde photo des Piliers de la Création (*ci-dessous*) captée en 2015, un nuage de poussières de la Voie Lactée situé à environ 6500 années lumières. L'image est en fausses couleurs obtenues en mélangeant des photos réalisées dans le visible et l'infrarouge.

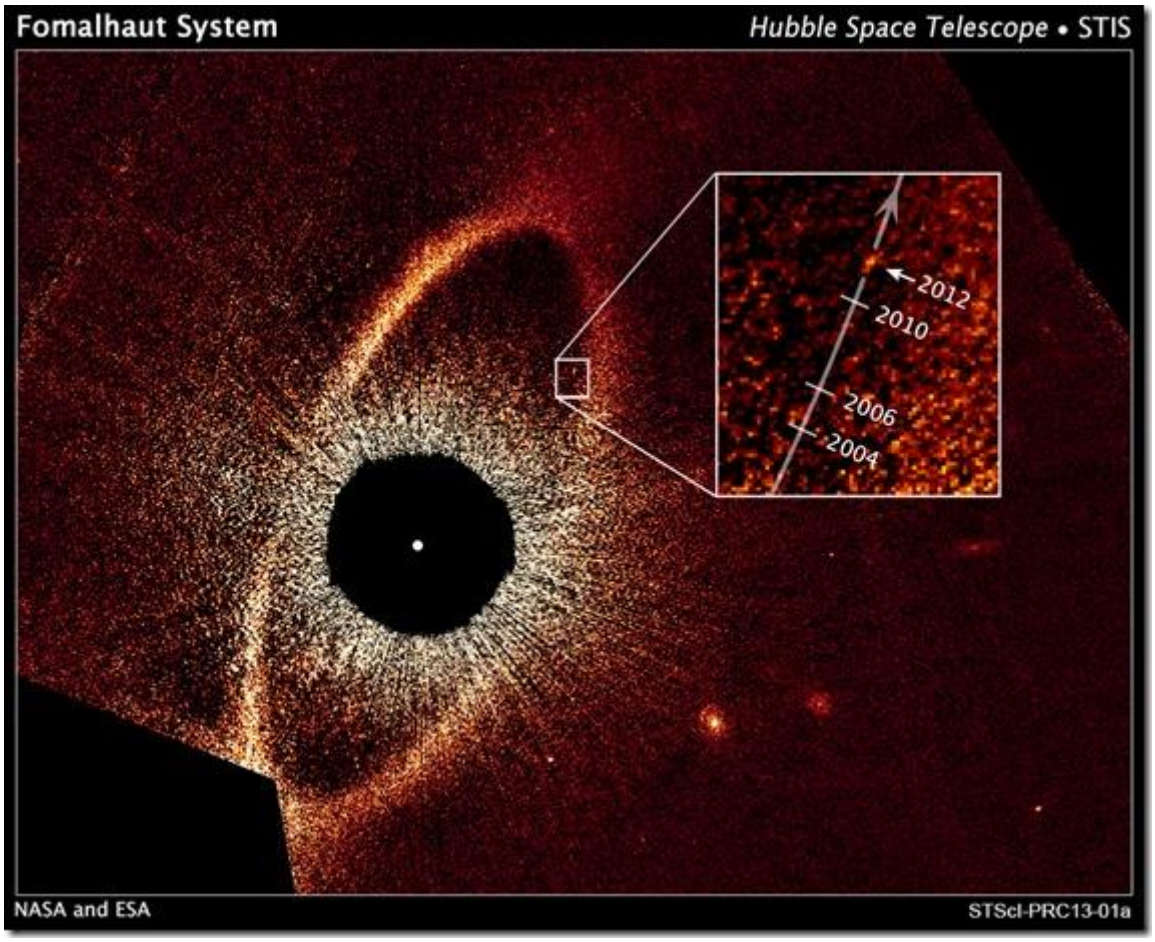


ACS (Advanced Camera for Surveys) est un instrument d'observation dans le visible et l'UV doté de plusieurs caméras : une à grand champ (WFC), une à haute résolution (HRC, hors service depuis 2007), les deux dans le visible et le proche infrarouge et enfin, une caméra dans l'UV dotée d'un spectrographe basse résolution (SBC – Solar Blind Channel). La WFC est équipée de deux capteurs CCD de 2Kx4K pixels et complétée par des filtres de couleur disposés sur deux roues concentriques superposées, un coronographe et un polarimètre. Le remplissage du buffer mémoire pour chaque prise de vue dure la bagatelle de 5 grosses minutes !

L'ACS a un gros recouvrement fonctionnel avec le WFC3. Elle est plus sensible tandis que la WFC3 a une meilleure résolution angulaire. Cet instrument a été utilisé pour générer la vue du eXtreme Deep Field (*ci-dessous*) dans la constellation du Fourneau (**source**). Les captures de photos ont duré une dizaine d'années à partir de 2003 ! L'image complète recense environ 5 500 galaxies. Elle a permis de revoir à la hausse, à 2 trillions, l'estimation du nombre de galaxie dans l'Univers observable. Hubble a servi à trois campagnes successives de détection de galaxies éloignées : la première était Hubble Deep Field en 1995 dans la Constellation de la Grande Ourse, puis Hubble Ultra Deep Field entre 2003 et 2004 dans la Constellation du Fourneau. L'eXtreme Deep Field est la troisième campagne, utilisant dix années de photos prises également dans la constellation du Fourneau.

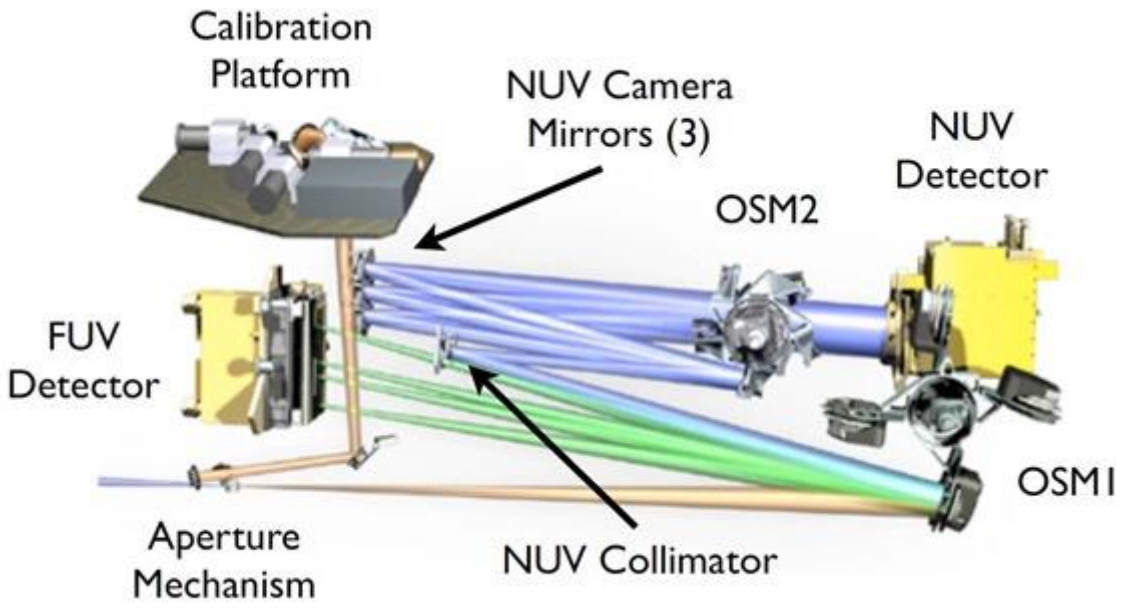


STIS (Space Telescope Imaging Spectrograph) et une caméra et un spectromètre à champ étroit fonctionnant dans l'ultraviolet, le visible et le proche infrarouge. Elle sert surtout à faire de la spectrographie de galaxies. Elle exploite trois capteurs CCD dont deux sont associés à des MAMA (Multi-Anode Micro-channel Array), des amplificateurs de lumière tubulaires qui alimentent les capteurs.

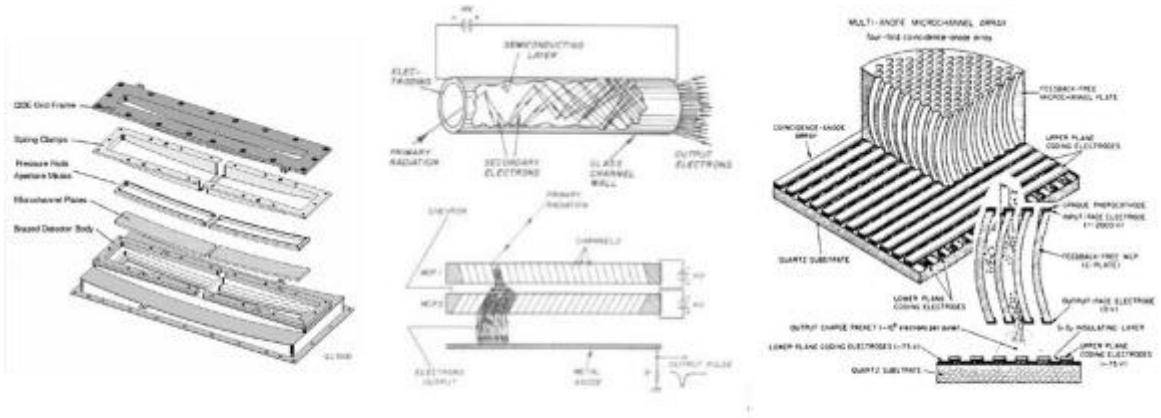


L'instrument a notamment permis de détecter une exoplanète autour de l'étoile Formalhaut située à seulement 25 années lumières, suivant une orbite elliptique (*ci-dessus*). C'est la caméra de Hubble qui descend dans l'ultraviolet le plus lointain, à 115 nm.

COS (Cosmic Origins Spectrograph) sert à spectrographier des objets ponctuels dans l'ultraviolet lointain et l'ultraviolet proche. Il aide à détecter la matière contenue dans les galaxies et à comprendre comment elles se forment. Il scanne le champ de vision d'un seul coup et propose une résolution spectrale allant jusqu'à 17 000 raies.



La partie du COS dédiée à l'ultraviolet lointain (FUV, de 115 à 205 nm) est équipée de deux capteurs UV de 16 384 x1024 pixels alimentée par des MCP (Micro-Channel Plates) qui amplifient la lumière dans des nanotubes. Celle qui est dédiée au proche ultraviolet (NUV, 170 à 305 nm) utilise un MAMA et un capteur de 1Kx1K pixels.



COS FUV
2 capteurs de 16 384 x 1024 pixels

COS NUV
1 capteur de 1024 x 1024 pixels

NICMOS (Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer) est une caméra et un spectromètre infrarouge entre 0,8 et 2,5 microns de longueur d'onde qui sert à dé-

tecter les galaxies lointaines ayant un fort “red shift” (décalage du spectre électromagnétique vers le rouge lié à l’effet Doppler qui s’accentue avec la distance car la vitesse d’éloignement des galaxies est proportionnelle à leur distance du fait de l’inflation continue de l’Univers). L’instrument de 370 kg qui est installé dans un véritable frigo électrique à 72 K (72° au-dessus du zéro absolu) est hors service depuis 2013 en raison d’une avarie. Il était doté de trois caméras proposant un facteur d’agrandissement différent. NICMOS avait servi à produire la première photo des Piliers de la Création.

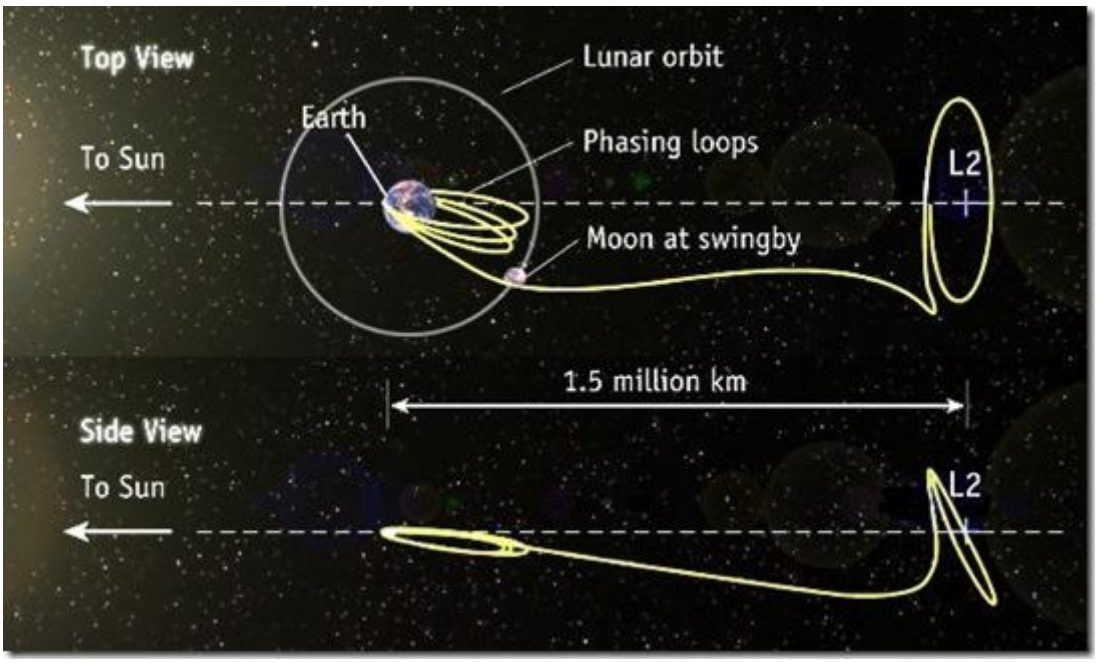
Voilà pour l’outillage bien riche embarqué dans le Hubble Space Telescope ! Pour vos recherches de photos prises par Hubble, vous pouvez utiliser le **Hubble Legacy Archive**, le **HubbleSite** et le **Mikulski Archive**. La documentation technique sur Hubble est abondante. Elle est assez bien concentrée **dans ce guide** de 132 pages lié à la dernière mission de sa mise à jour en 2009.

Hubble devrait rester en service au plus tard jusqu’à 2021, moment où il quittera son orbite pour rentrer dans l’atmosphère et s’y consumer. D’ici là, le télescope JWST que nous décortiquerons dans l’épisode suivant aura en partie pris le relais de ses observations, lui qui sera opérationnel en 2019. Mais seulement dans l’infrarouge, la spécialité du JWST alors que Hubble couvre l’ultraviolet, le visible et un bout du proche infrarouge.

Gaia (2013-2023)

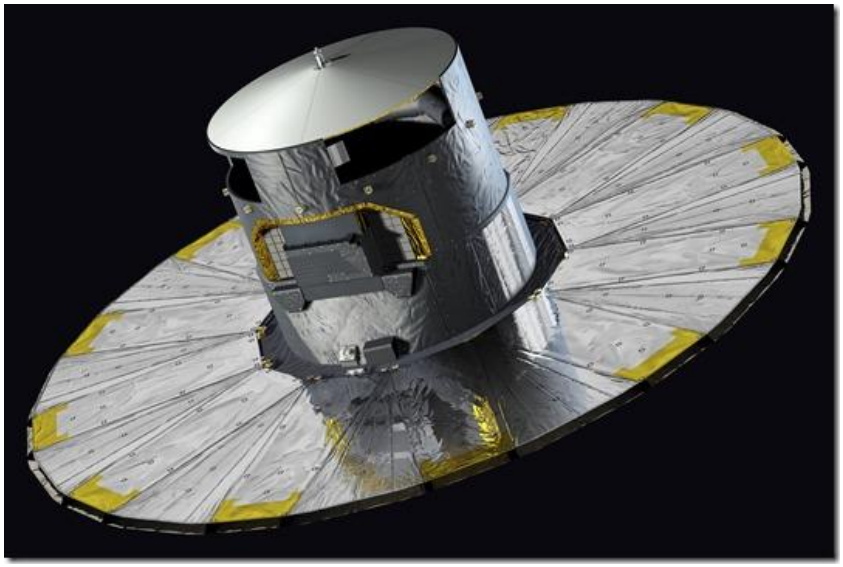
Gaia est un autre télescope spatial qui opère dans le visible. C’est une initiative européenne ambitieuse ayant coûté 960M€. Il vise à détecter un milliard d’étoiles de la Voie Lactée, les plus brillantes, soit moins d’un % de ce qu’elle contient, et d’en apprécier la distance et les mouvements avec précision. Le tout en effectuant la même observation à six mois d’intervalle, exploitant entre les deux mesures la distance de deux unités astronomiques résultant de la demi-orbite parcourue autour du soleil, comme si on disposait d’une paire d’yeux séparés de 300 millions de kilomètres pour percevoir le relief des étoiles.

Le télescope doit aussi inventorier un million de galaxies, 500 000 quasars, 10 000 supernovas, 250 000 astéroïdes, 15 000 exoplanètes de la taille de Jupiter, 200 000 étoiles naines blanches et 50 000 naines brunes. Ces différents objets seront captés 70 fois pendant la durée du vie du télescope. Le tout sera cartographié en 3D, à l’instar de la cartographie de galaxies réalisée par le Sloan Foundation Telescope vu dans une **partie précédente**. Il permettra de mieux comprendre la structure et la dynamique de la Voie Lactée.



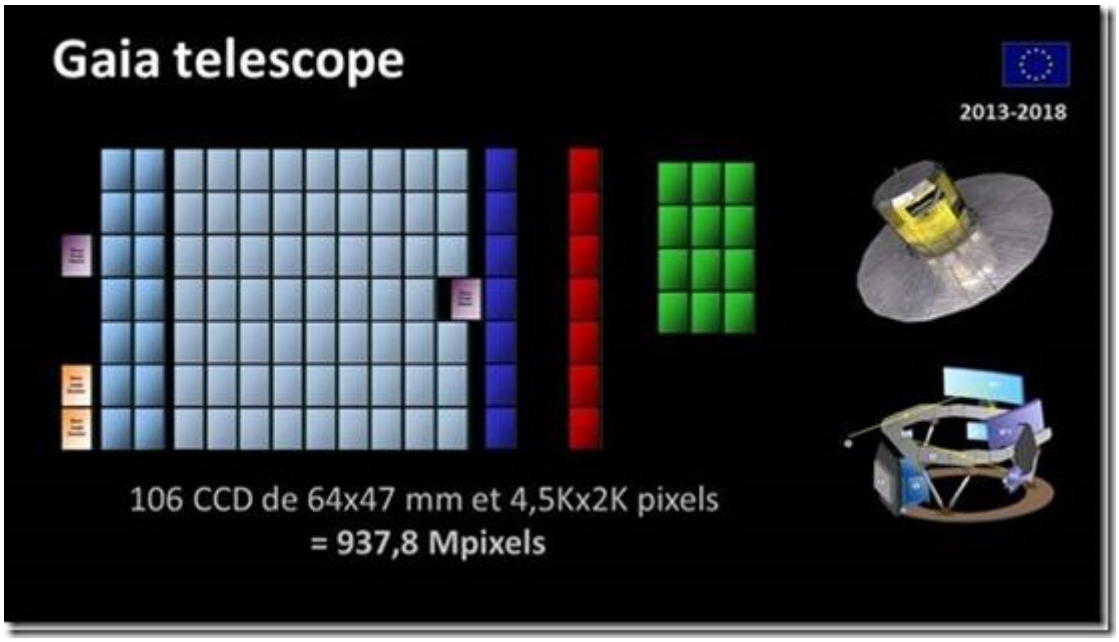
Le télescope a été lancé en 2013 à partir de la base de Kourou en Guyane française via un lanceur russe Soyouz et placé en orbite solaire autour du point de Lagrange L2 situé à 1,5 millions de kilomètres dans l'axe Soleil-Terre. Il est en fait positionné sur une orbite elliptique de Lissajous de 340 000 x 90 000 km et de 180 jours de période, autour de ce point de Lagrange (*ci-dessus*). Cette orbite a une apogée voisine de celle de l'orbite circulaire de la Lune autour de la Terre.

La fin de la mission est prévue en 2023, concluant une mission d'une durée de 10 ans classique pour ce genre de télescope. Le consommable ? Un microgramme d'azote est éjecté par jet d'ajustement de la position du télescope. Il est construit par le français Astrium (Airbus Defense & Space Systems depuis 2014). Les miroirs et la structure porteuse des instruments sont réalisés en carbure de silicium par le français Boostec.



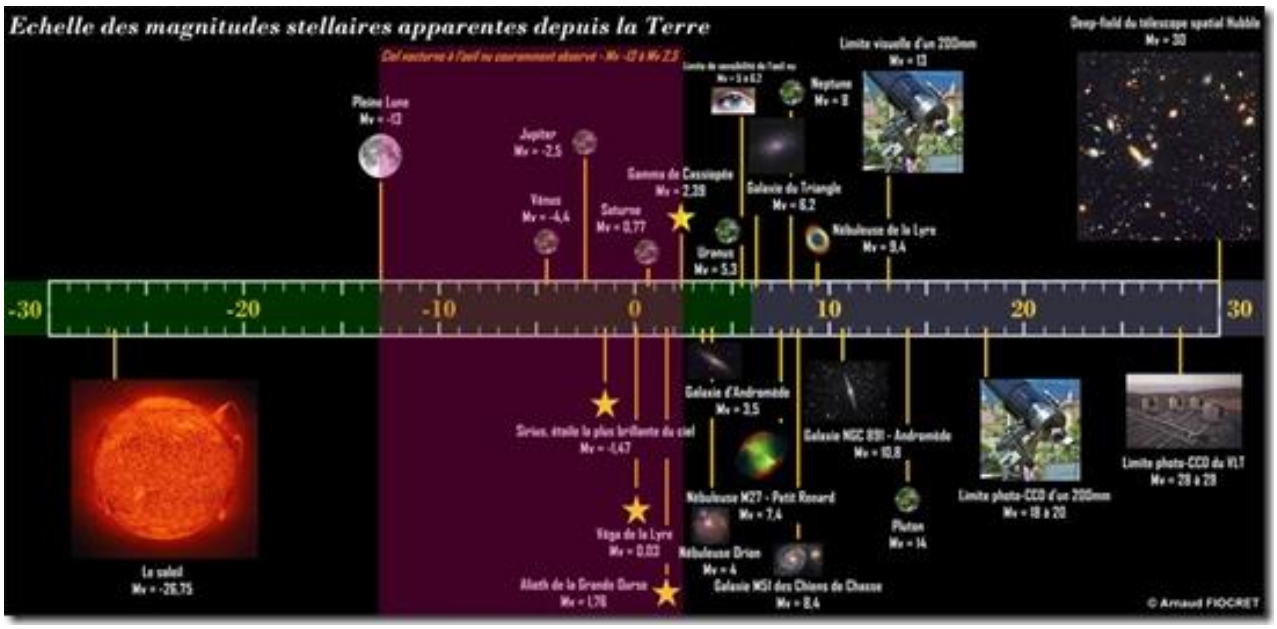
Gaia comprend un arrangement original avec deux miroirs primaires de 1,45 m x 0,45 m qui alimentent un plan de focale comprenant 106 capteurs CCD de 4500 × 1966

pixels totalisant 937,8 mpixels et faisant 45 x 59 mm soit à peu près l'équivalent d'un capteur double-format d'appareil photo de studio Hasselblad, mais avec des pixels bien plus grands et sensibles, de 10×30 microns. L'ensemble de ces capteurs fait un total de 93 cm x 42 cm, un record dans un télescope spatial.



Le satellite est orienté à 45° par rapport au Soleil et tourne sur lui-même par périodes de 6 heures. Les deux miroirs lui donnent deux angles de vue séparés de 106,5° et illuminent simultanément le même plan de focale. Ce plan comprend quatre catégories de capteurs :

- Le **Wavefront Sensor** (WFS) qui sert à corriger l'optique du télescope avec deux CCD.
- Le **Sky Mapper** (SM) qui détecte les objets de magnitude 20 entrant dans le champ de vision par la gauche, avec 14 capteurs CCD, 7 par miroir primaire.
- L'**Astrometric Field** (AF), avec 62 CCD, qui mesurent la position angulaire et fournissant pour chaque objet leur position (deux angles), leur vitesse (deux dérivées de leur position) et leur parallaxe (distance).
- Les **BP** et **RP** (photomètres bleus et rouges), avec chacun 7 CCD, fournissant une mesure spectro-photométrique des objets dans le bleu (330–680 nm) et le rouge (640–1050 nm).
- Le **Radial-Velocity Spectrometer** (RVS), avec 12 CCD dans un arrangement de 3 × 4, récupérant le spectre des objets dont la luminosité dépasse une magnitude de 17. Dans l'échelle des magnitudes observables, plus le nombre est élevé, moins l'objet observé est lumineux. Chaque point de magnitude ajouté correspond à une division par 2,5 de la radiance. Les objets les moins lumineux observés à ce jour ont une magnitude de 30. Le télescope européen E-ELT étudié dans une **partie précédente** atteindra une magnitude de 34.



Les trois dernières catégories de capteurs CCD fonctionnent de manière sélective : seule la partie des CCD qui détecte des objets est lue. Jusqu'à 20 objets peuvent être identifiés simultanément.

Ces capteurs génèrent 50 Go de données par jour, soit 1 Po pendant la durée de vie du télescope. L'envoi des données par le télescope consomme 300 W et est réalisé dans la bande X – entre 8 et 12 GHz – avec un débit inférieur à 8,7 Mbits/s. Leur réception a lieu sur Terre avec les antennes Cerebros d'Avila en Espagne et de New Norcia à Perth en Australie. Pour exploiter ces données, il faut une équipe de 300 personnes sur 7 ans d'étude qui sont notamment installées à Cambridge (UK).

En effet, ce n'est pas le tout de capter des zillions d'images ! Il faut pouvoir en tirer parti !

Télescopes spatiaux dans l'infrarouge

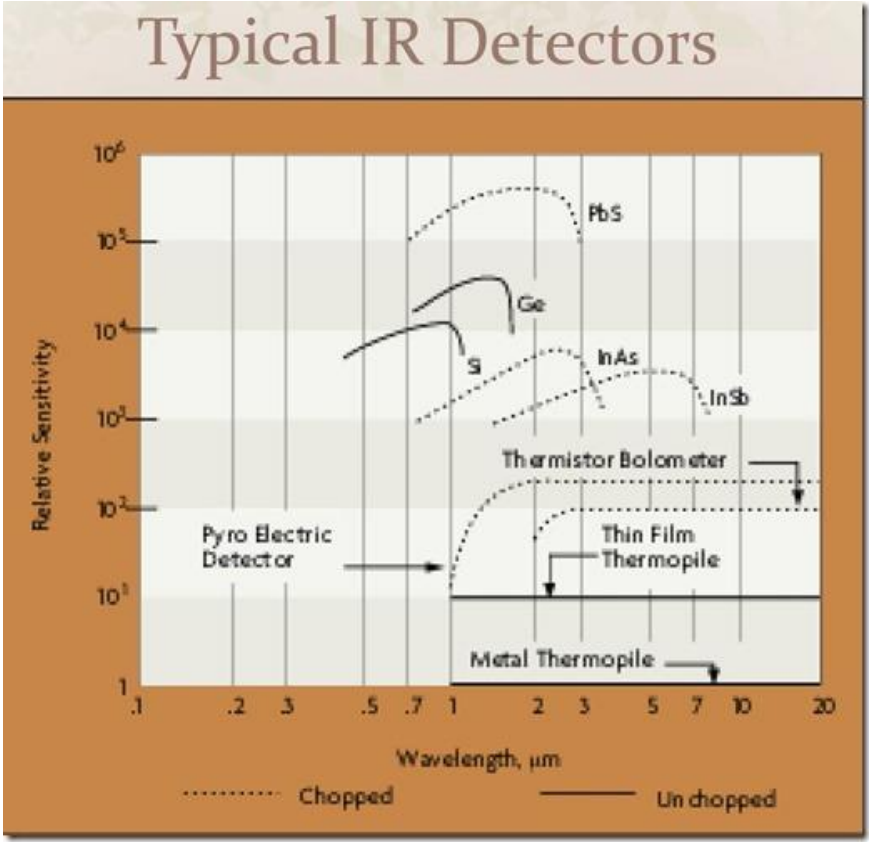
Nous poursuivons ici une longue série estivale de découvertes scientifico-technico-entrepreneuriales sur l'astronomie **démarrée mi juin**. J'y épluche en particulier des techniques et des instruments qui permettent d'analyser la composition de l'Univers, au-delà de notre système solaire.

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 tellurure de mercure-cadmium (HdCdTe), 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.

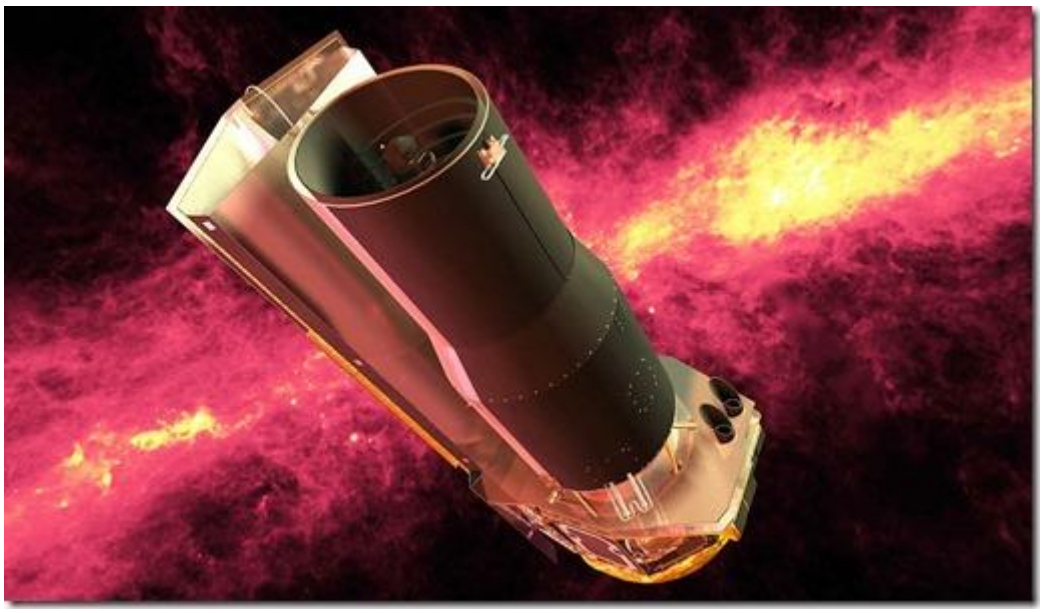


Comme pour les deux parties précédentes, les télescopes spatiaux que nous allons examiner ici sont classés par date de mise en service. Tous ces télescopes était doté de nombreux superlatifs au moment de leur lancement, et très attendus par les astronomes et les astrophysiciens.

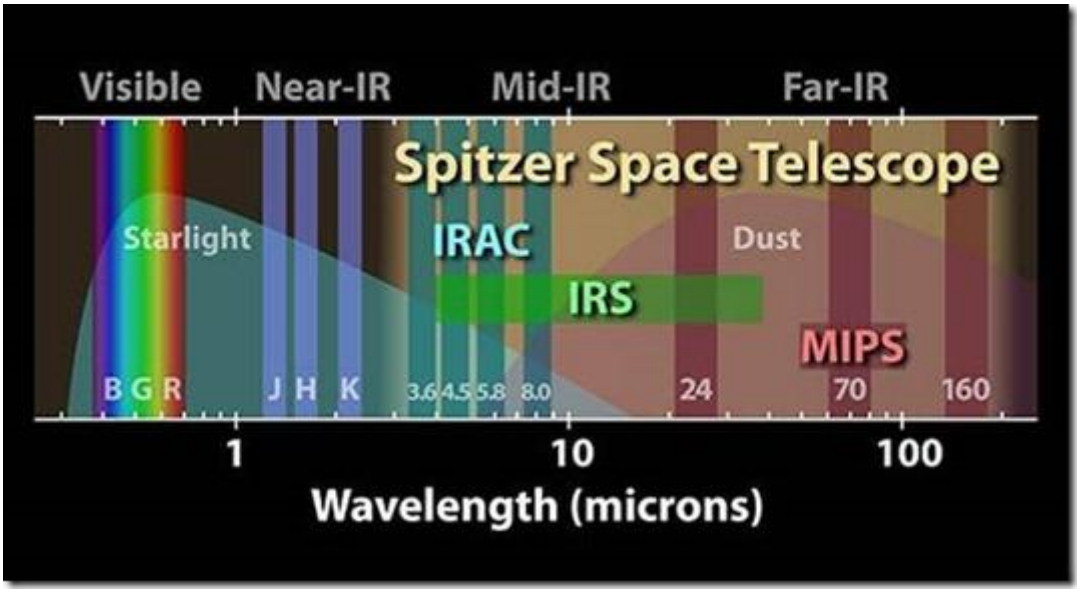
Spitzer (2003-2020)

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.

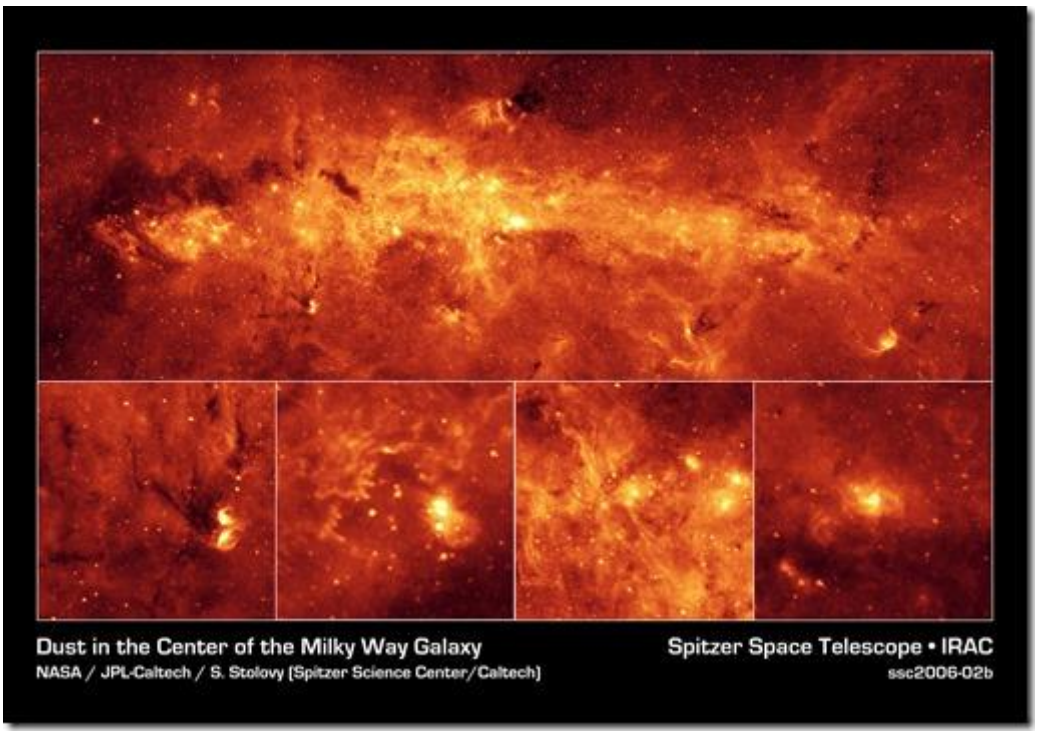
Le projet a été initié par la NASA en 1984 et le télescope lancé en 2003. Il succède à d'autres télescopes opérant dans l'infrarouge : **IRAS** (1983) et **ISO** (1995) et bénéficie notamment des améliorations en sensibilité et résolution des capteurs infrarouges. Le miroir principal du télescope est 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.



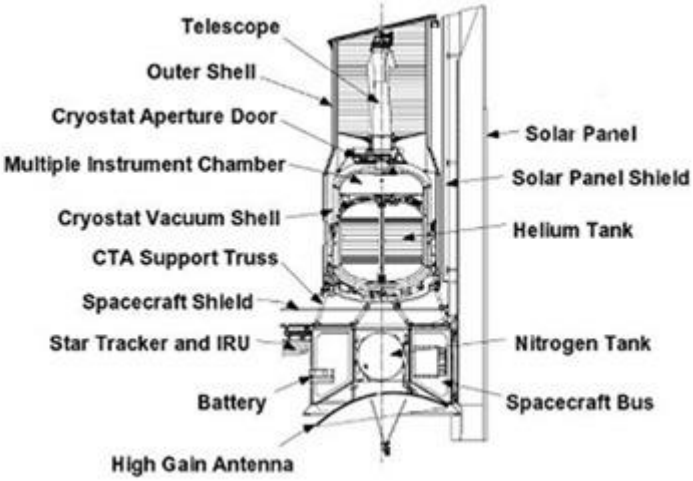
Les instruments de Spitzer comprennent l'**IRAC** (InfraRed Array Camera), un photomètre imageur en proche et moyen infrarouge (de 3 à 8 microns) équipé de quatre capteurs CCD de 256×256 pixels, l'**IRS** (InfraRed Spectrograph), un spectroscope dans l'infrarouge moyen (5 à 40 microns) et le **MIPS** (Multiband Imaging Photometer for Spitzer), 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 CO2, 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*).

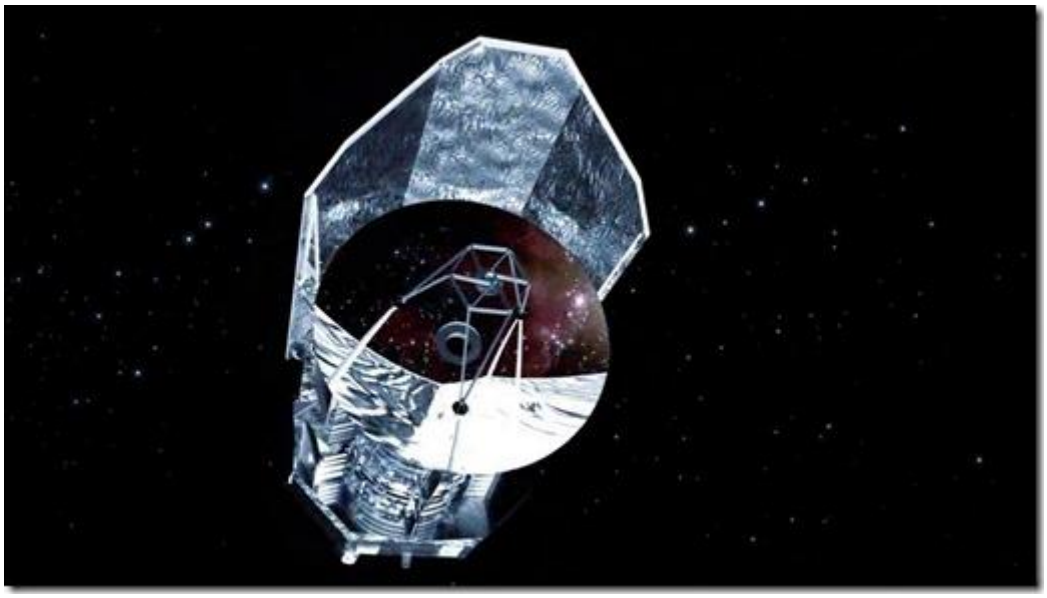
Herschel (2009 – 2013)

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.

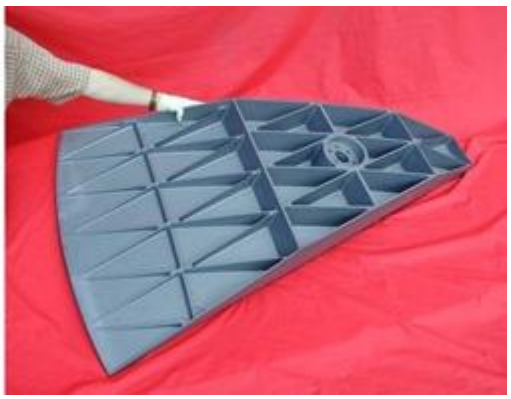
Dans la pratique, ils proviennent notamment de nuages de poussières chaudes et d'objets célestes froids. Ils correspondent également aux objets qui s'éloignent avec fort décalage vers le rouge ("redshift") aussi appelées les galaxies "high-z", du fait de l'expansion de l'Univers dont on cherche toujours 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 avions 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).



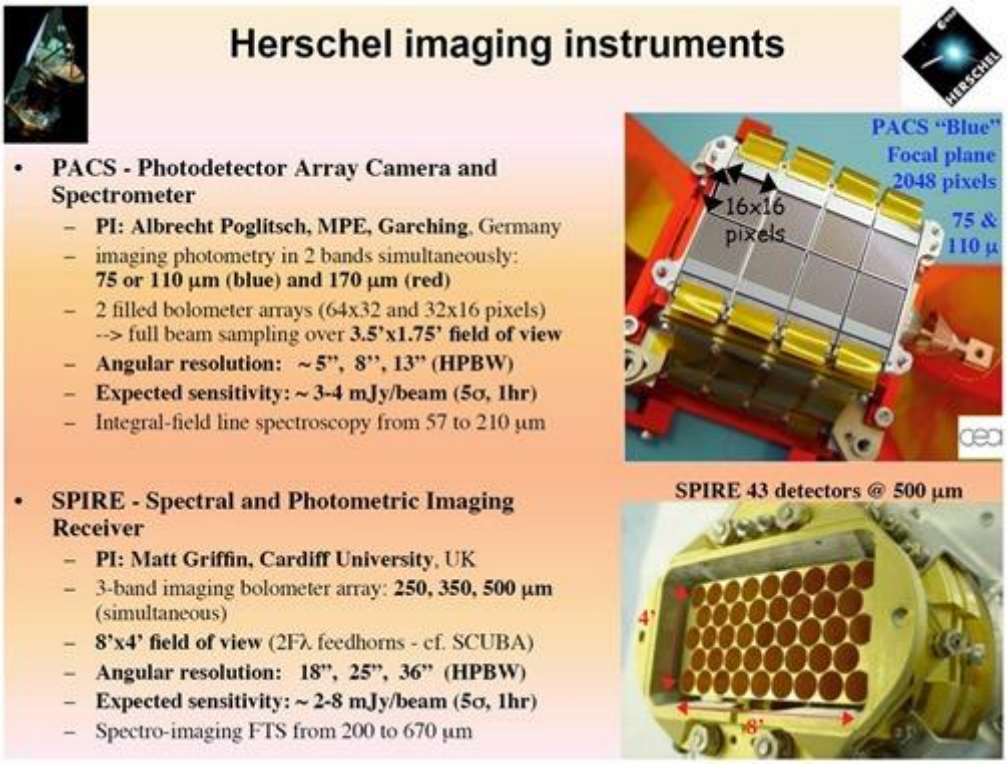
Son miroir primaire circulaire de 3,5 m ne pèse que 315 Kg. Sa masse a été fabriquée en carbure de silicium fritté (SiC), une céramique technique produite par la société française **Boostec**, dont c'est la spécialité. La société basée près de Tarbes dans les Hautes-Pyrénées a été crée en 1999 et fait 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.

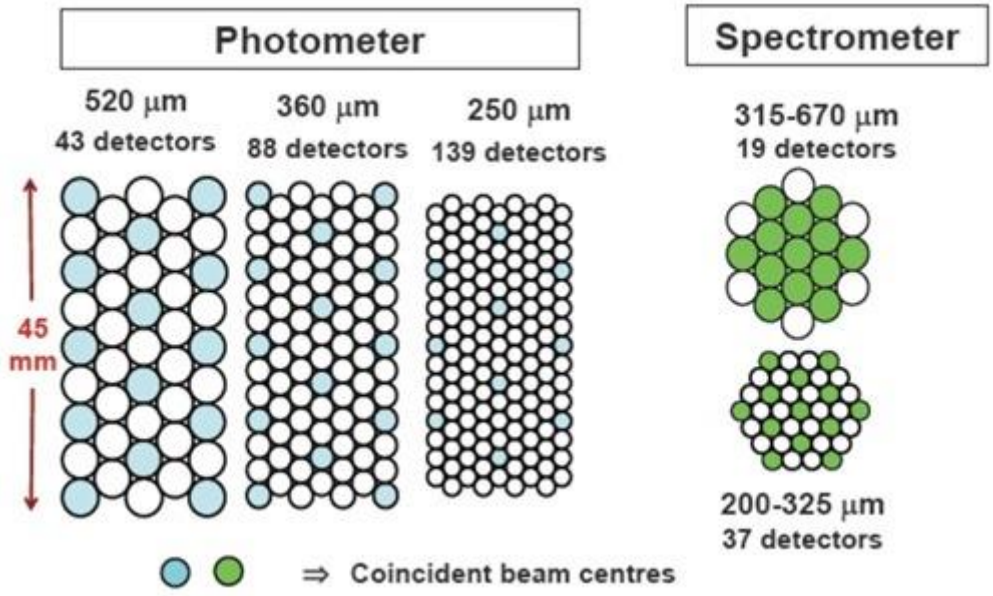


Il comprend trois grands instruments :

- **PACS** (Photodetector Array Camera and Spectrometer) est une caméra de matrice de bolomètres de 64×32 et 32×16 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.

- **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 !

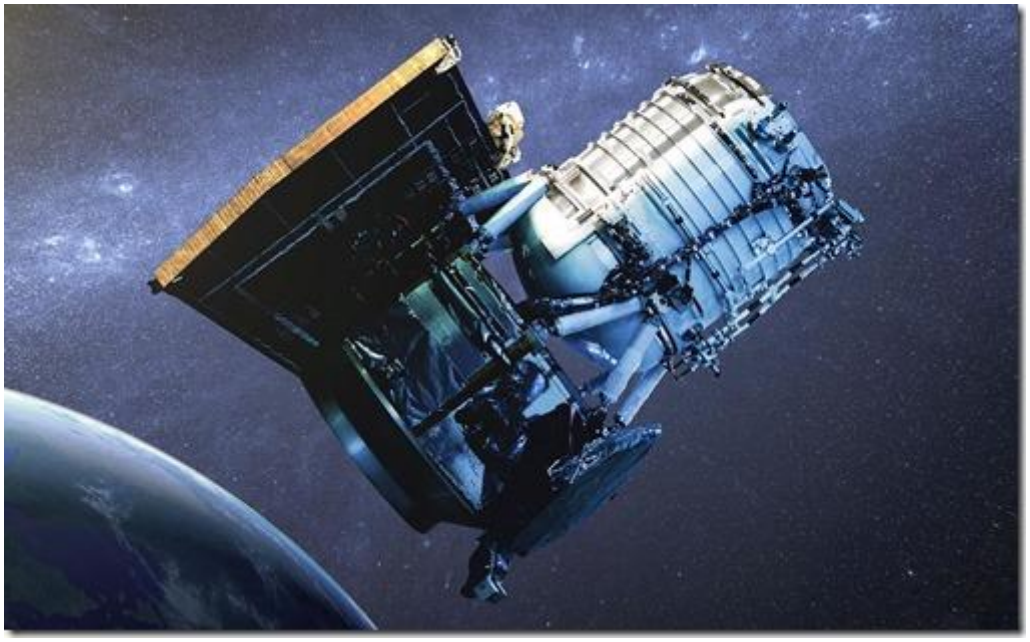
La durée de vie opérationnelle de ce télescope était, comme pour les autres engins de ce type, conditionnée par son réservoir de réfrigérant, indispensable pour le fonctionnement des instruments dans l'infrarouge moyen et lointain. Spécifié pour durer 3,5 ans, il les a dépassés de peu pour rester opérationnel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

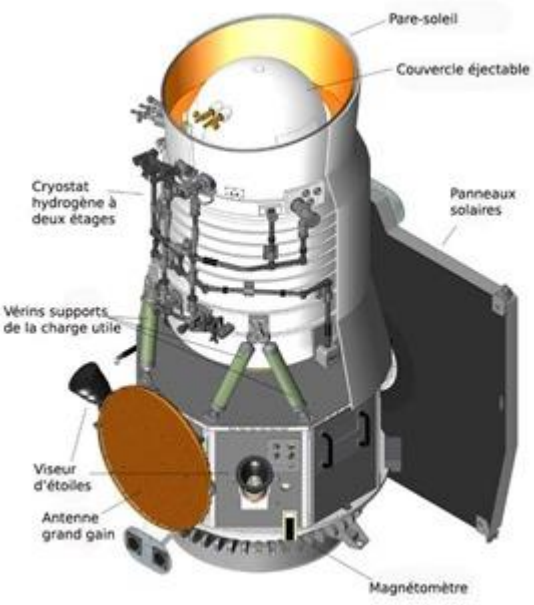
gnées, de leur formation et évolution, l'émission d'infrarouge lointain par les jets associés aux trous noirs, la composition chimique des planètes, comètes et lunes dans le système solaire.

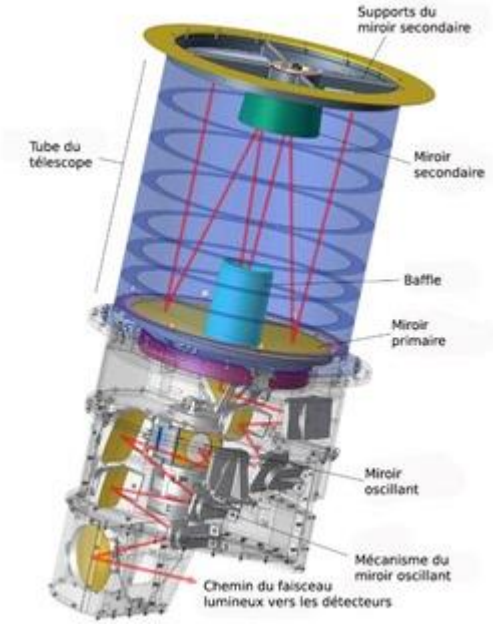
Sa mission initiale qui devait durer moins d'un an lui a permis de découvrir 21 comètes, 34 000 astéroïdes et 135 géocroiseurs, qui sont des astéroïdes de grande taille. Placé en hibernation après cette mission en février 2011, il a été réactivé en 2013 pour poursuivre sa recherche d'astéroïdes, activité 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 HdCdTe (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.

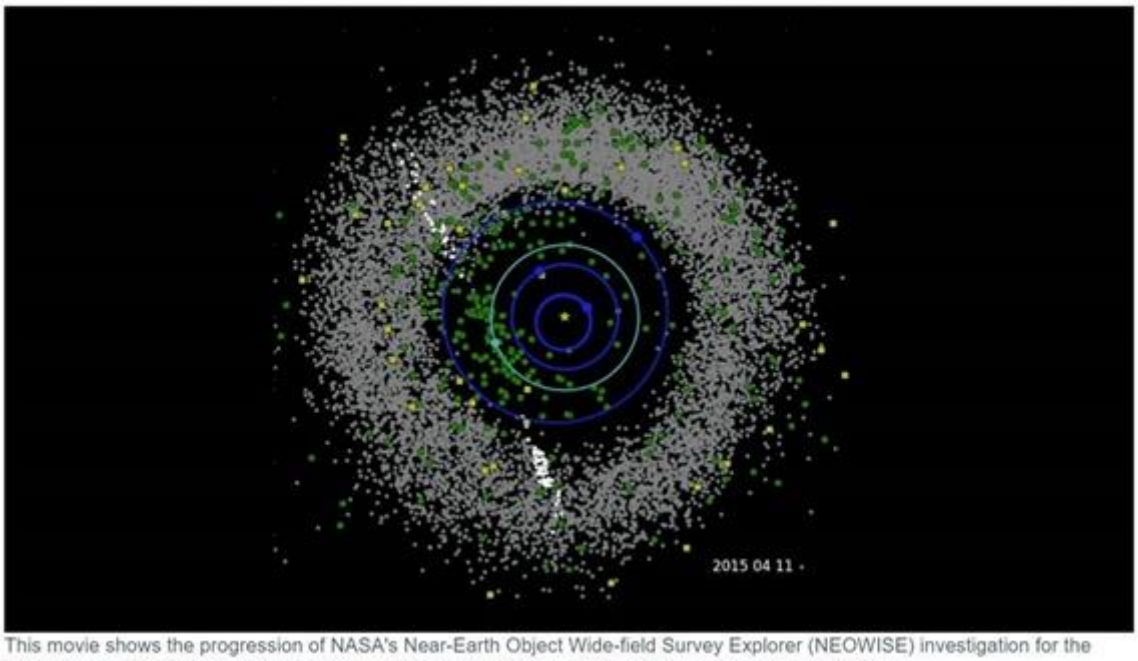




Pour couvrir le ciel avec un champ assez grand de 47 minutes d'arc, il a fallu prendre 1,5 millions de photos avec des temps de pose de 11 secondes. La cartographie du ciel est exhaustive avec ce télescope tandis que son homologue Spitzer ne couvre que des cibles précises avec son champ de visée étroit.

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 a 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

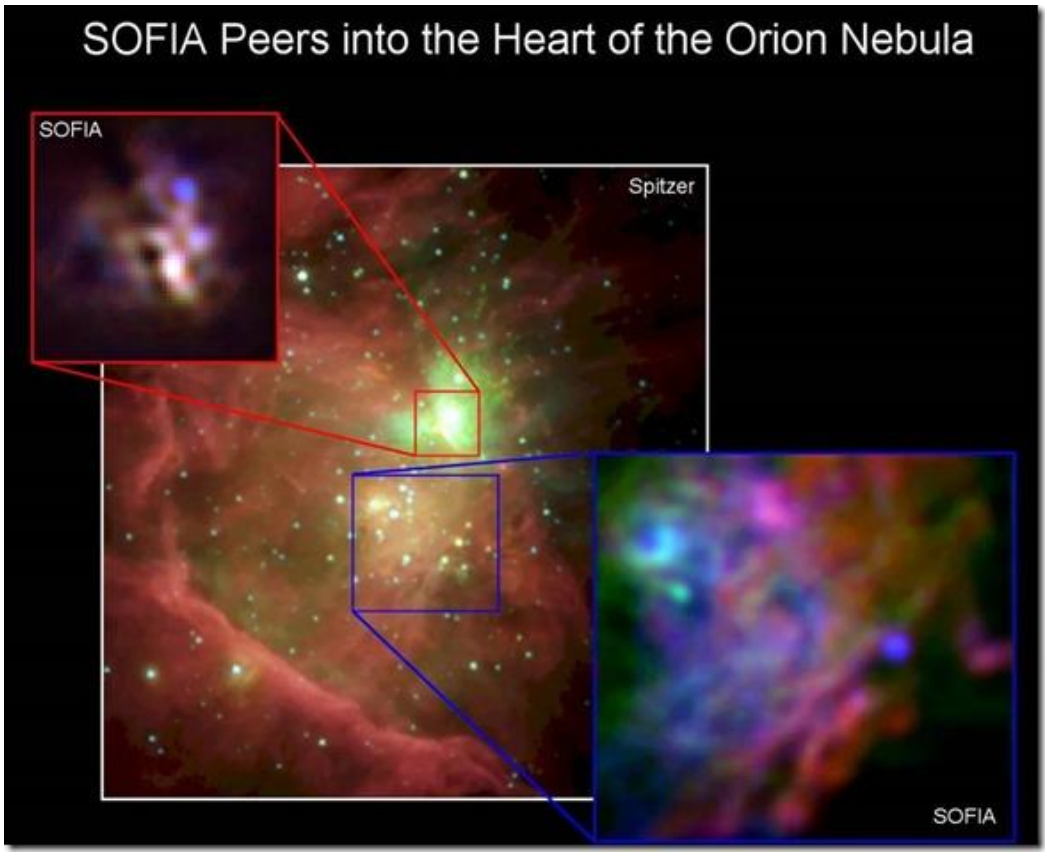
Le télescope a aussi permis la découverte de plusieurs étoiles naines brunes proches du Soleil notamment **WISE 0855–0714**, **WISE 1049-5319** ainsi que l'**étoile de Scholz** et en 2015, de **WISE J224607.57-052635.0**, la galaxie la plus lumineuse connue à ce jour, située à 12,5 milliards d'années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

SOFIA (2010-2030)

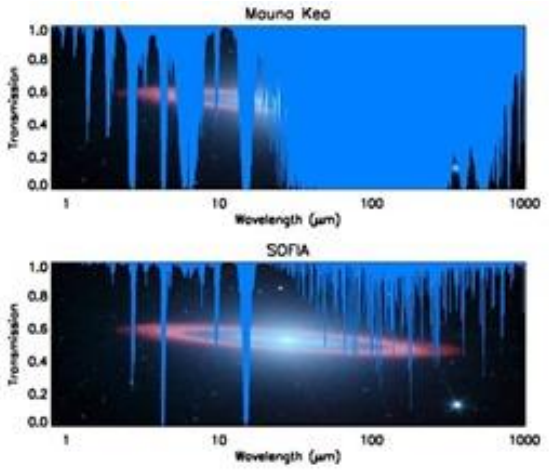
SOFIA est un télescope unique en son genre de la NASA qui est installé dans un ancien Boeing 747SP de la PanAm modifié. C'est un programme commun entre les USA et l'Allemagne. Il est opérationnel environ 900 heures par an et vole à 12-14 km d'altitude, soit un peu plus haut que les 747 commerciaux qui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

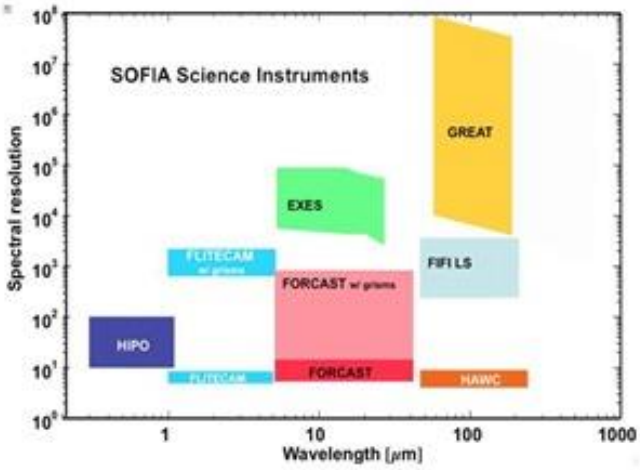
Le télescope dont le miroir fait 2,5 m est embarqué à l'arrière de l'avion et protégé au décollage par une porte coulissante vers le haut (*ci-dessus*). L'avion supporte bien son ouverture en altitude sans que son enveloppe de vol en souffre. Le télescope comprend de nombreux instruments, caméras et 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.

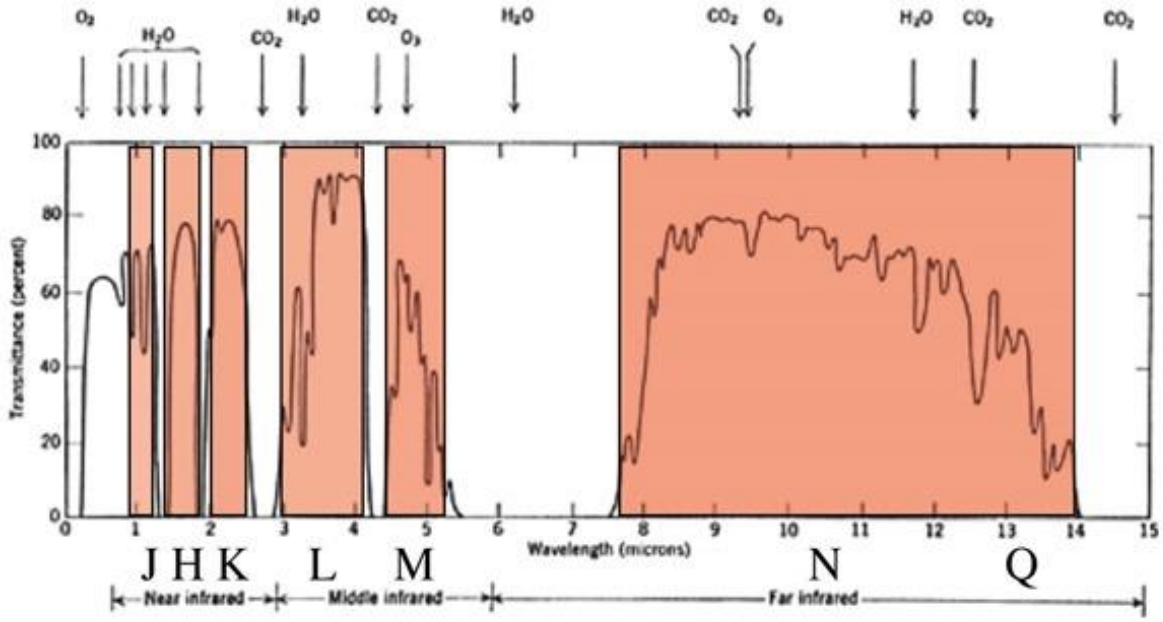


Maintenant que Spitzer et Heschel sont hors service dans l'infrarouge lointain, SOFIA est la seule solution pour les astronomes et astrophysiciens ! Il est même complémentaire du JWST que nous verrons plus loin car il couvre l'infrarouge au-delà de 28 microns et jusqu'à 600 microns, et une haute résolution 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)

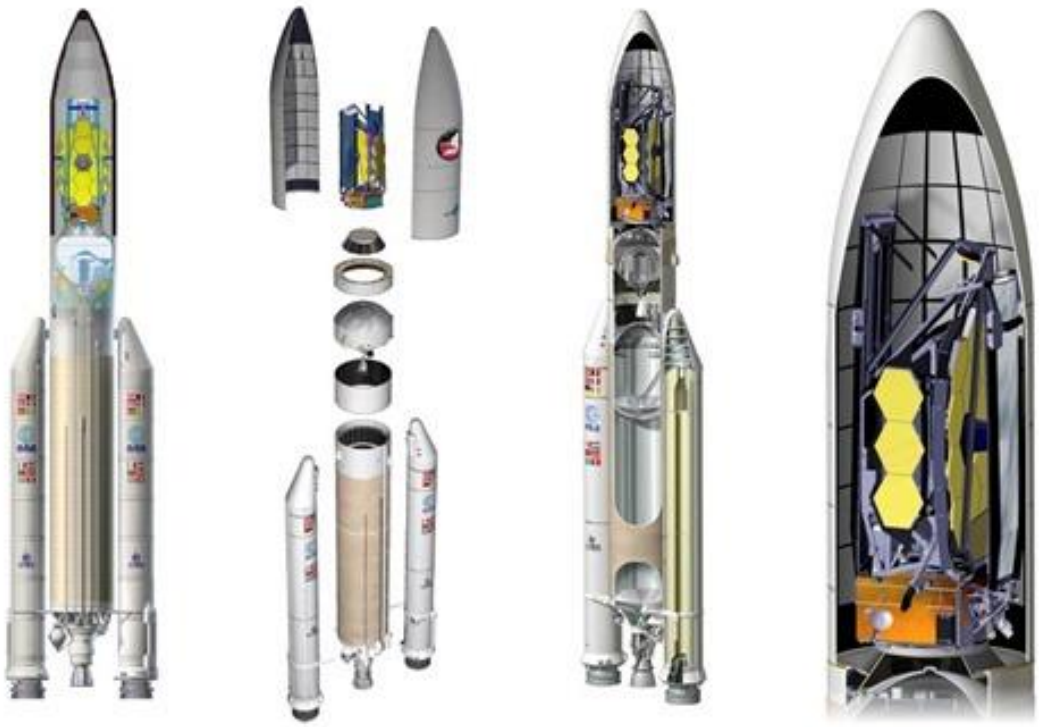
Le JWST est le télescope spatial de tous les records depuis Hubble. C'est celui qui aura le plus grand miroir (6,2 mètres de diamètre) et qui coûtera le plus cher depuis Hubble avec un budget actuel total situé aux alentours de $9B. Son lancement est prévu pour octobre 2018 et sa mise en service pour 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 rapprocher 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

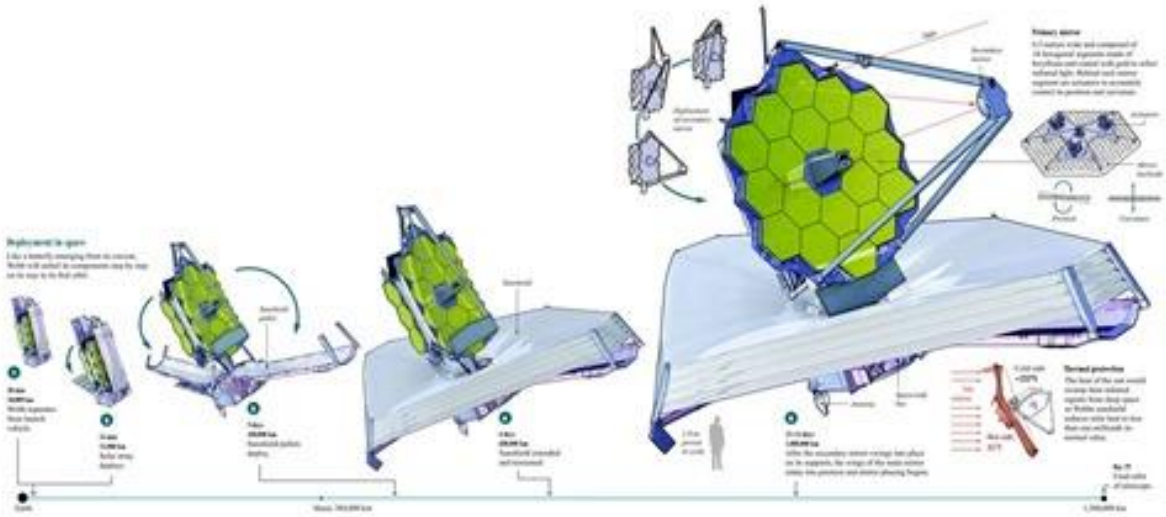
devraient pas pouvoir s'approcher à plus de 3 minutes du Big Bang, moment où les plus anciennes lumières théoriquement observables ont été émises, bien avant la formation des premières étoiles et galaxies. Mais JJWST n'ira pas jusque là. Accessoirement, il contribuera aussi à la détection d'exoplanètes 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.

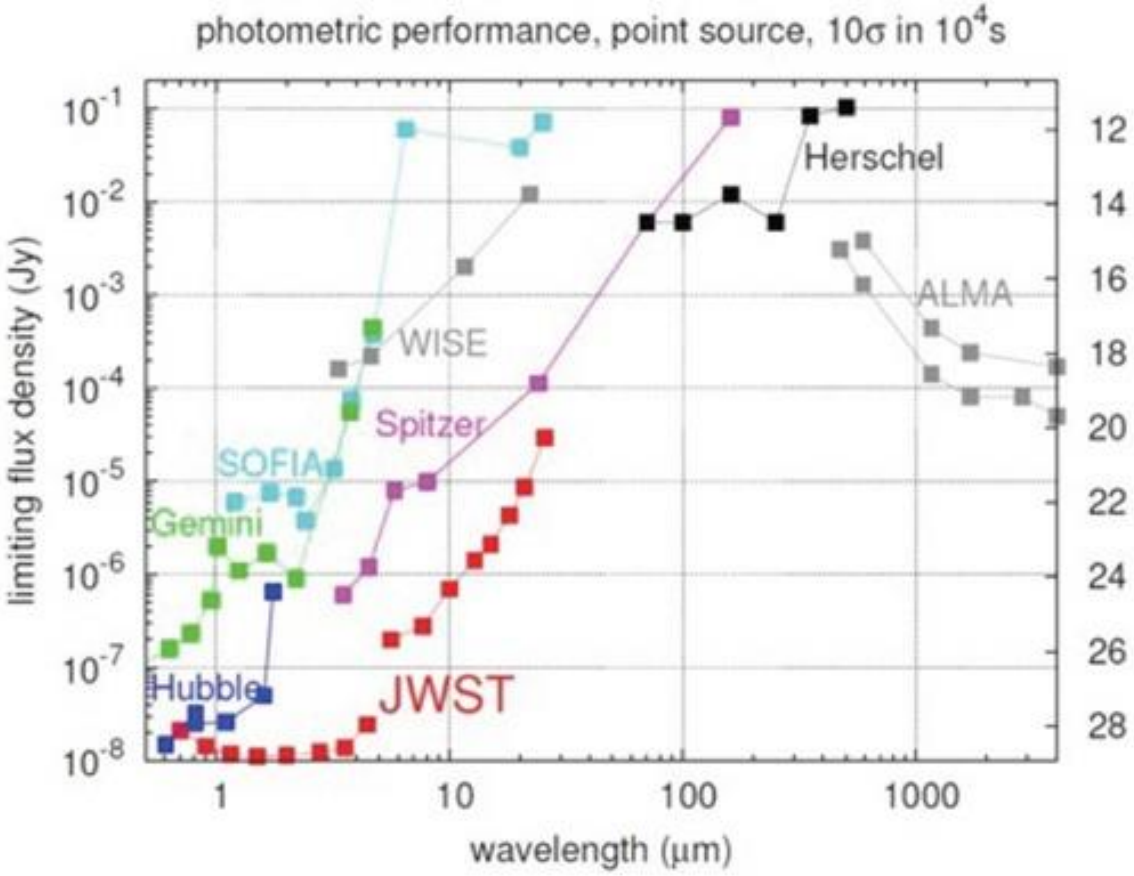
Le télescope est un véritable **origami** à déplier. Prévu pour être lancé par Ariane 5, dont la coiffe fait un diamètre intérieur de 4,57 m, le télescope de 6,2 tonnes doit être replié sur lui-même à plusieurs niveaux : pour le miroir de 6,5 m de diamètre tout comme la protection contre les rayons du 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.



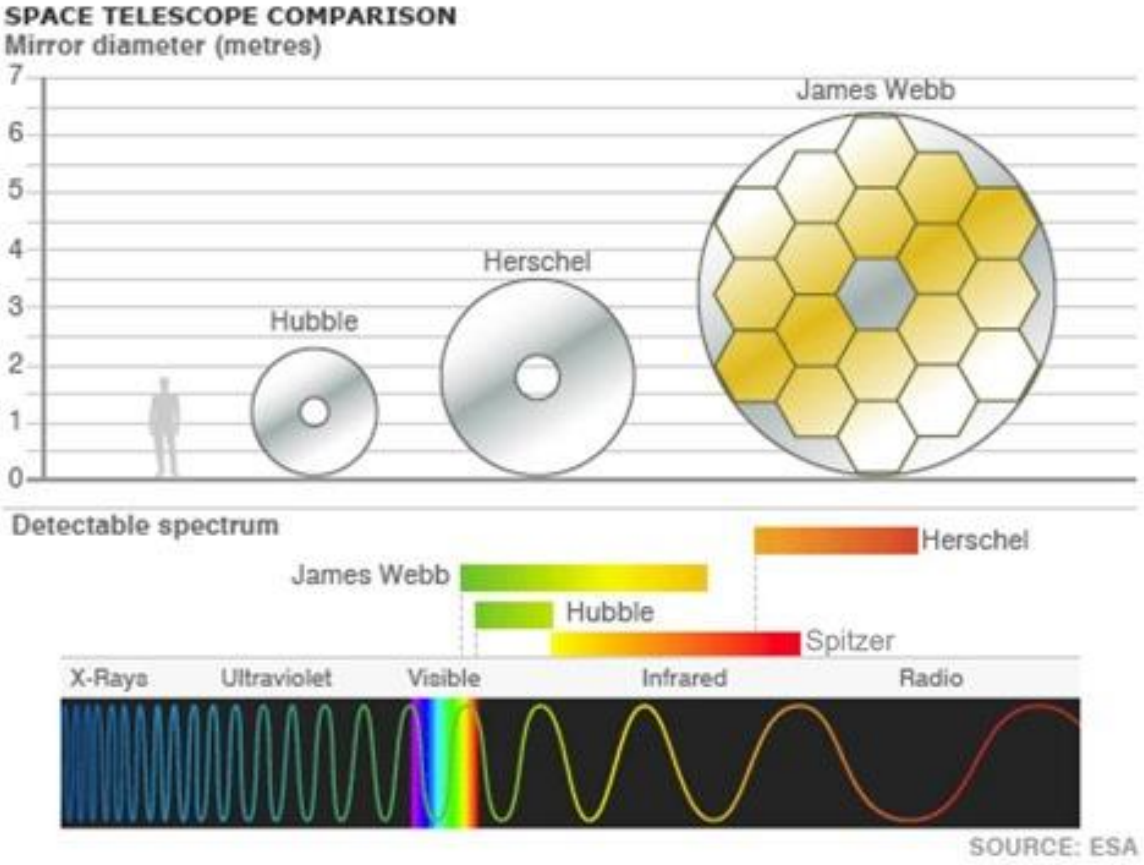
JWST sera placé sur le point de Lagrange L2. Le trajet pour y parvenir dure un mois. La première moitié de ce parcours sera consacrée au lent dépliement du télescope. Celui-ci est magistralement présenté dans cette **simulation vidéo** de 5 minutes. Pour ce dépliement, 178 vérins mécaniques sont activés et 40 structures différentes sont à déployer. La plus critique à déplier est le système de protection contre les rayons solaires en kepton 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.



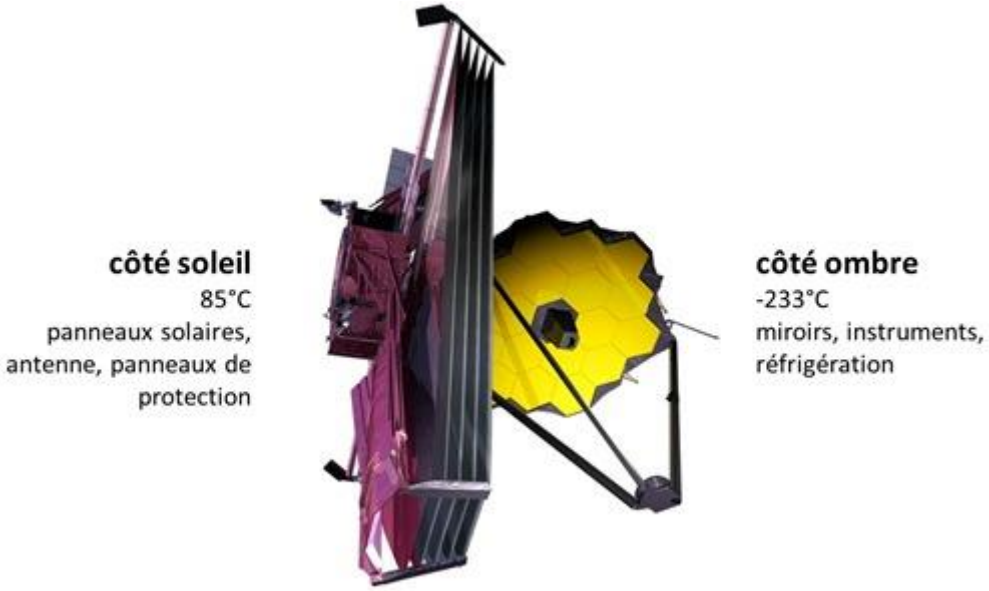
Le placement sur le point de Lagrange qui interviendra fin novembre 2018 ne sera que le début d'un processus de mise en route qui durera encore cinq mois avant que le télescope capte les premières images. En cause, le lent refroidissement de ses instruments infrarouge et leur calibrage. C'est le prix 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*).



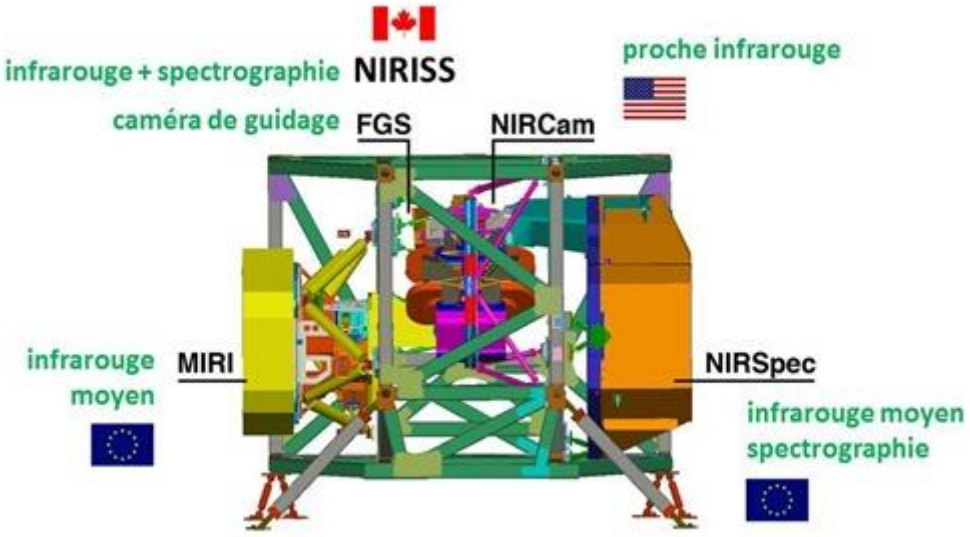
Le **miroir primaire** est constitué de 18 miroirs hexagonaux en béryllium de 1,32 m de côté. Ils sont recouvert d'or, 38g en tout, qui réfléchi bien les rayons infrarouges. L'or est ensuite recouvert d'une fine couche de protection en verre. Ce miroir utilise une optique adaptative pilotée par 144 vérins 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 actuateurs 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 −269 °C à 400 °C. Le côté ombre comprend les miroirs et les instruments.

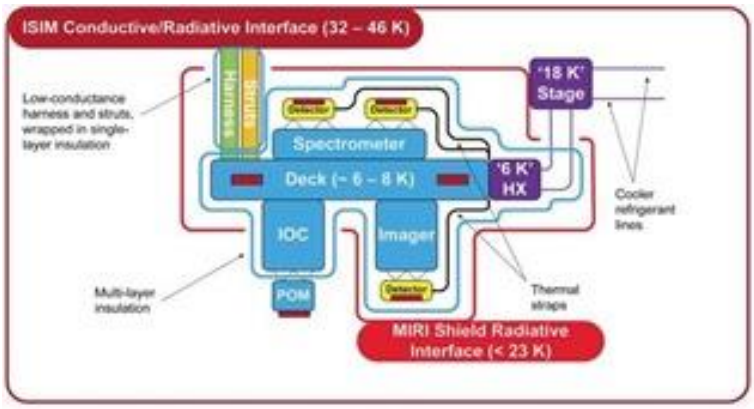


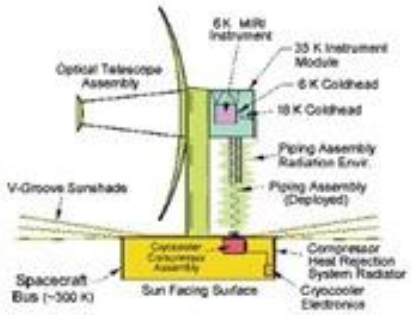
Les **instruments** embarqués dans JWST sont nombreux et intégrés dans l'ISM, l'Integrated Science instruments Module. On y trouve un FGS pour le guidage, une caméra dans le proche infrarouge NIRcam, une caméra et un spectrographe dans le proche infrarouge NIRISS, un spectrographe multi-objets dans le 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.



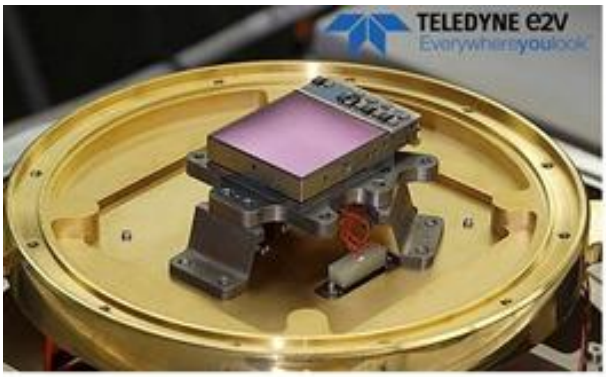
Le **refroidissement** est assez classique. L'ensemble des instruments est placé dans une enceinte à une température de 40K et ses différentes parties sont refroidies via une trentaine de radiateurs alimentant un grand radiateur placé à côté de l'ISM. Le MIRI qui fonctionne dans l'infrarouge moyen est 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.

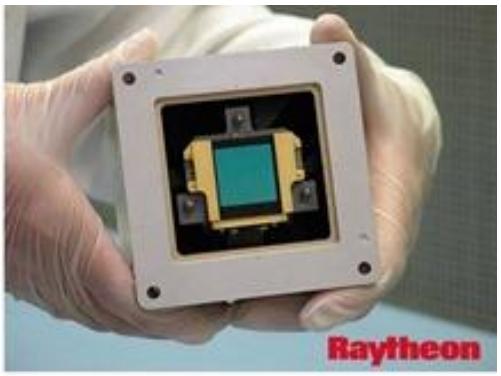




Les **capteurs CCD** intégrés dans ces instruments sont de deux types : ceux qui fonctionnent dans le proche infrarouge sont des classiques capteurs HdCdTe (tellurure de mercure-cadmium) H2RG issus de Teledyne E2V, le leader de ce marché. Intégrés dans les instruments NIRISS, NIRCam et NIRSpec, ils démarrent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

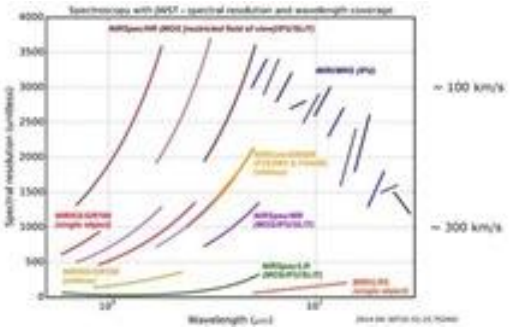


MIRI
1 capteur 1Kx1K
IR 5-28µm
silicium dopé à l'arsenic

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 µm. 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.

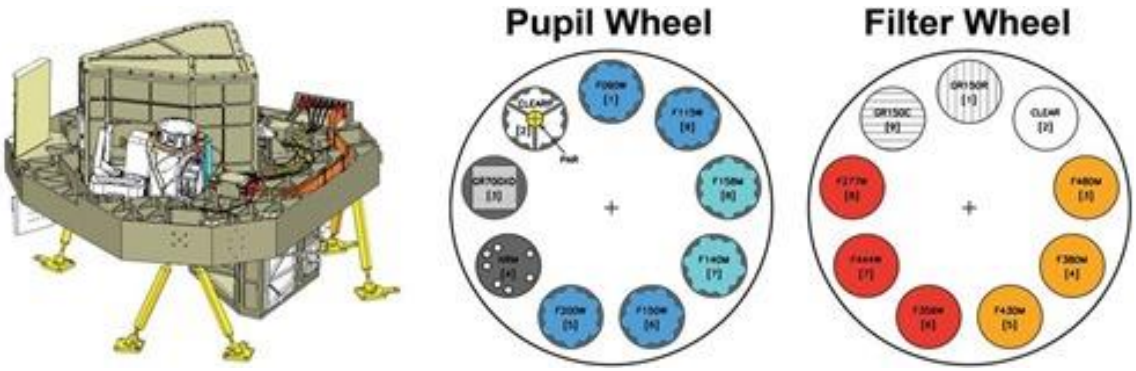
Tous les instruments comprennent leur propre **spectrographe**, et avec des variantes. En effet, presque tous les modes de spectrographie sont embarqués dans le télescope pour découper les images en morceaux divers (bandes, points, etc) et les les décomposer en fréquences, avec des résolutions variables 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



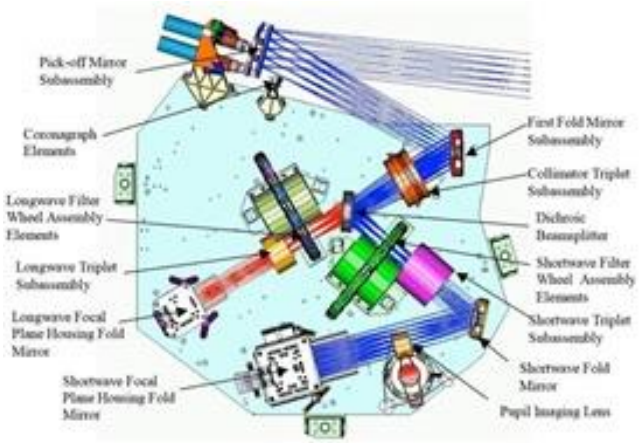
Voyons donc maintenant les cinq grands instruments du JWST…

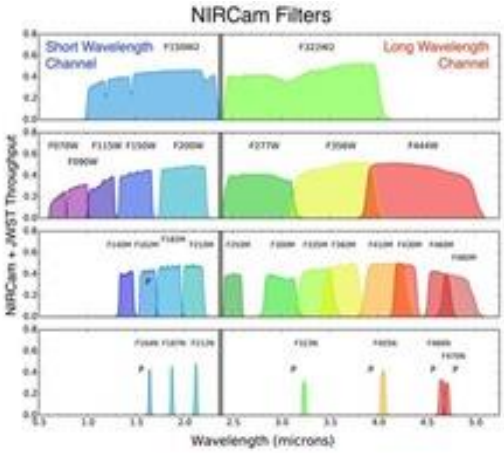
Le **FGS** (Fine Guidance Sensor) et le **NIRISS** (Near-InfraRed Imager and Slit-less Spectrograph) sont construits dans un même ensemble mais leurs chemins optiques se séparent à l'entrée. Ils ont été réalisés par l'agence spatiale canadienne et livrés en 2012 ! Il s'agit du système de visée et d'un 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 le bonne direction.



Le **NIRcam** 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.



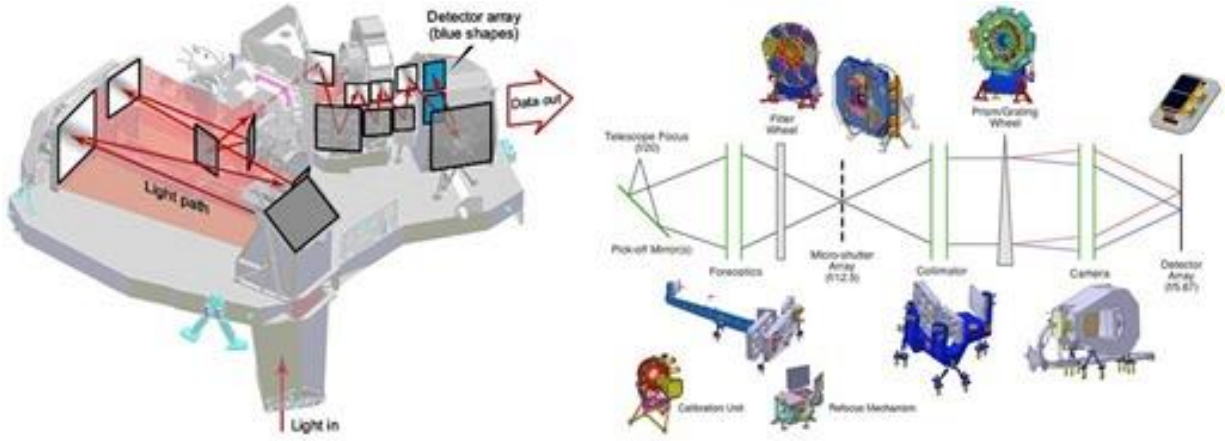


La caméra peut supporter des temps de pose de près de trois heures pour observer des objets de très faible magnitude. Elle permet d'observer les exoplanètes de manière directe, via l'usage de coronographes qui occultent les étoiles pour la visualisation d'exoplanètes tournant autour. Cela fonctionne 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.

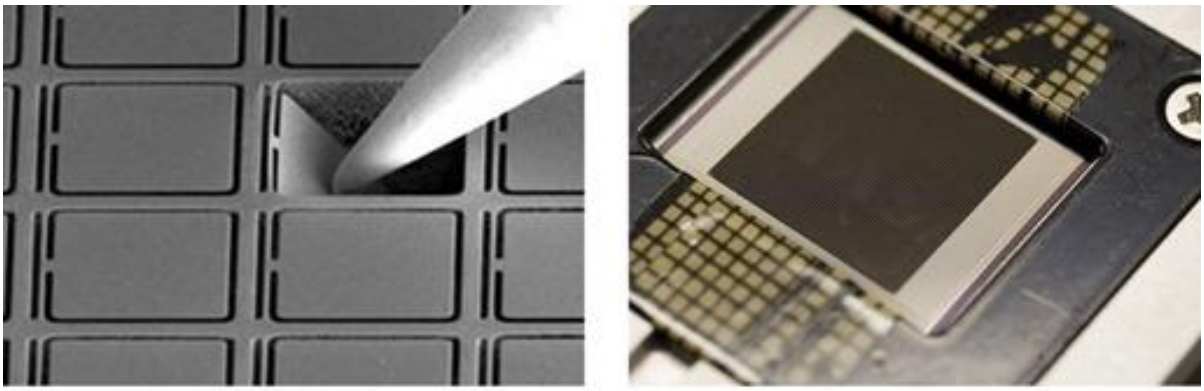
Le coronographe permet aussi d'analyser les nuages de poussières autour d'étoiles en formation, dans ce que l'on appelle les disques proto-planétaires, qui sont les disques de poussières et de gaz servant de préludes à la formation des planètes. Chaque chemin optique traverse un filtre situé dans un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

NIRCam 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.

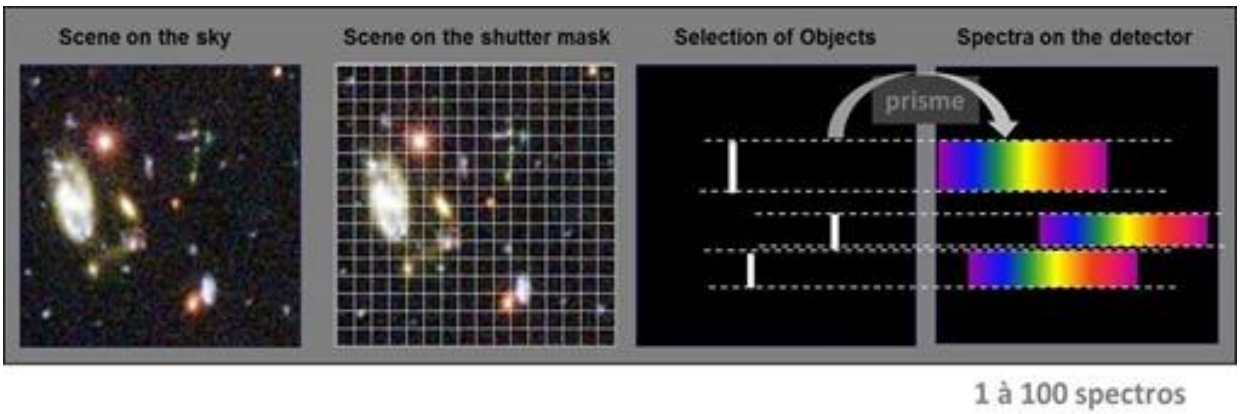


La lumière passe par un système à base de micro-miroirs qui n'est pas sans rappeler le fonctionnement des projecteurs vidéo utilisant les puces DLP de Texas Instruments ou leur équivalent SXRD chez Sony. Quatre puces comprennent chacune 171 colonnes et 365 lignes de micro-miroirs, ce qui fait un total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



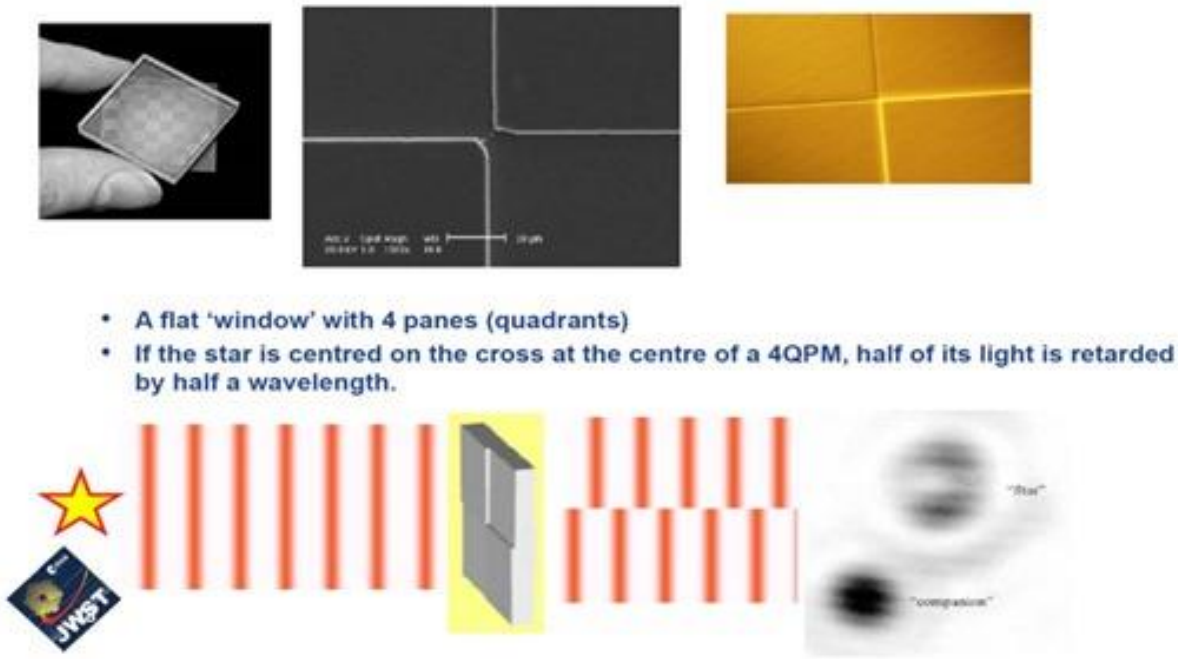
365 x 171 = 62 415 micro-obturateurs (x4)

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 réfléchie 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.

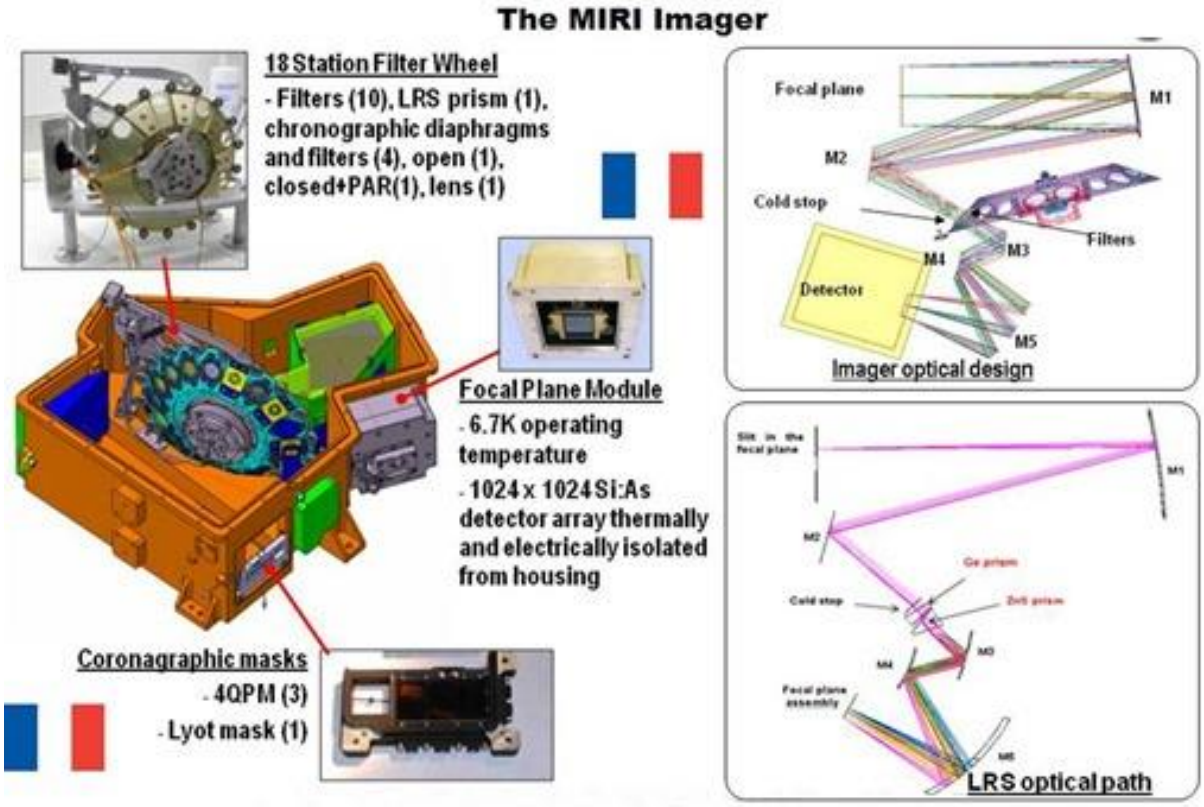


La spectrographie peut être réalisée dans un autre mode faisant appel à un IFU (Integral Field Unit) qui découpe le champ de vision en bandes étroites qui peuvent être spectrographiées individuellement. Ce qui permet de créer une sorte de “cube” du champ de vision avec deux dimensions spatiales et une troisième dimension spectrale pour chaque pixel de l’image.

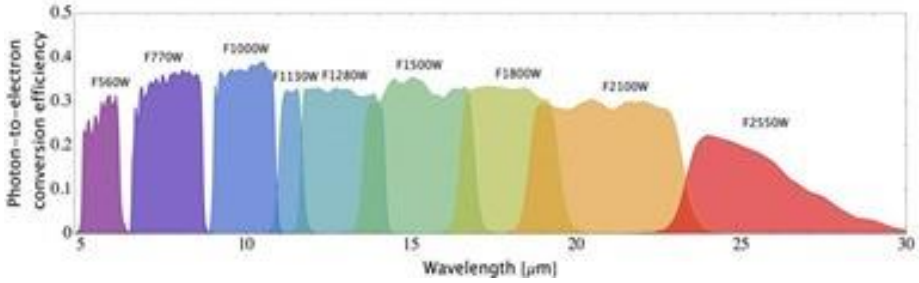
Le **MIRI** est une caméra fonctionnant dans l’infrarouge moyen, de 5 à 28 microns. Elle est dotée de quatre coronographes qui permettent d’observer et analyser de manière directe des exoplanètes. Dont un qui repose sur un filtre à quadrants, 4Quadrant, qui déphase d’une demi-longueur d’onde deux quadrants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



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 !



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, CH4, CH3OH, NH3, OCN–, C2H2, 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 instru-

ments 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 déplie sans encombres en 2018 pour qu'il puisse nous informer ensuite convenablement sur les origines de l'Univers à partir du printemps 2019 !

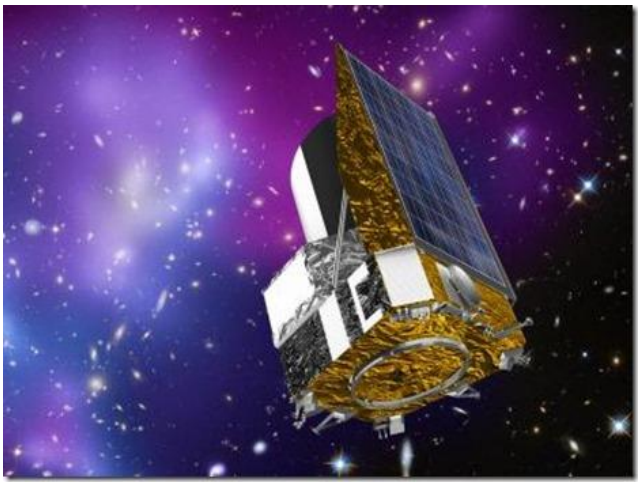
Il nous reste maintenant à étudier trois autres télescopes dédiés aux merveilles célestes de l'infrarouge. Il sont encore en gestation et leur mise en service aura lieu au mieux d'ici 2020.

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.

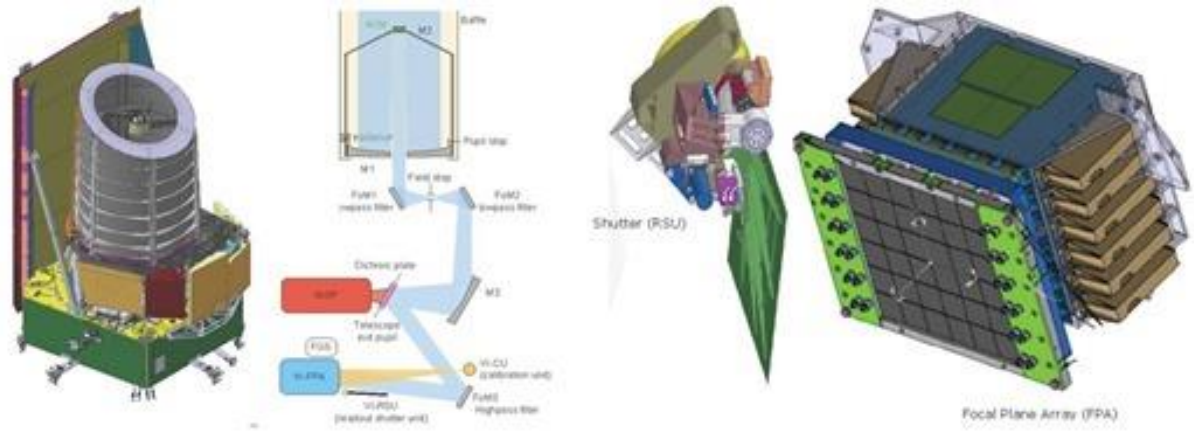


L'optique d'Euclid sépare le champ lumineux issu du miroir primaire de 1,2 m, réfléchi par trois miroirs, via un filtre dichroïque avec d'un côté le visible et de l'autre le proche infrarouge. Les deux instruments alimentés sont :

- **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 mi-

crons, 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 et ses instruments | alimentation du spectrographe et imageur infrarouge (NISP) et de l'imageur dans le visible (VI-FPA) | plan de focale du VI-FPA avec ses 30 capteurs CCD et son obturateur

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.

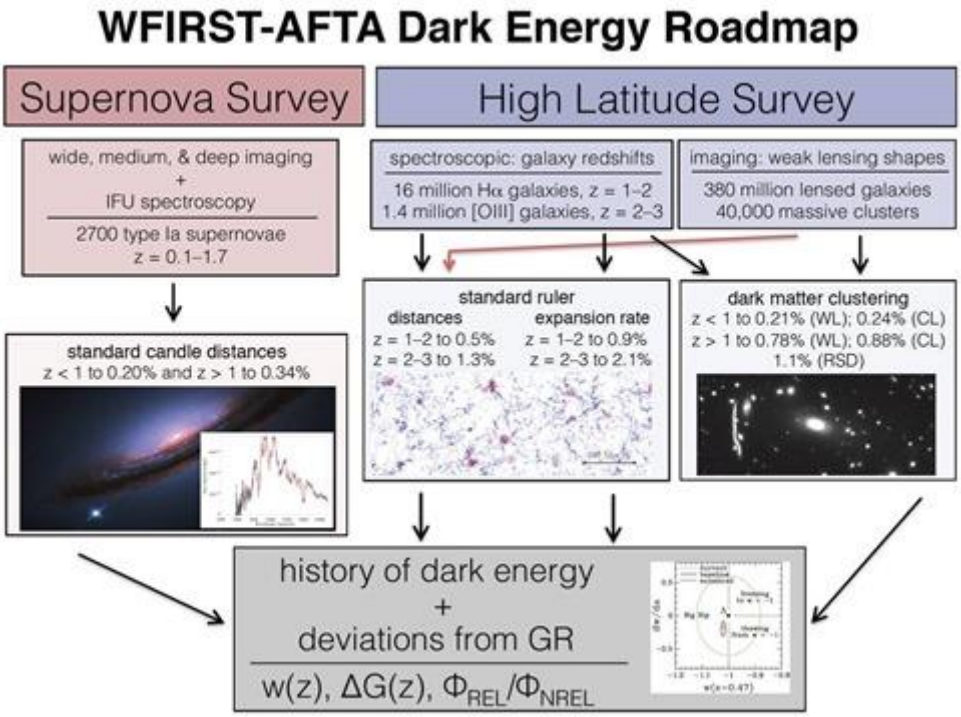
Lui aussi doit aider les astrophysiciens à étudier l'existence et l'impact de la matière et de l'énergie noires dans l'expansion accélérée de l'Univers et remonter pour cela assez loin dans l'histoire de l'Univers.

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.



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.

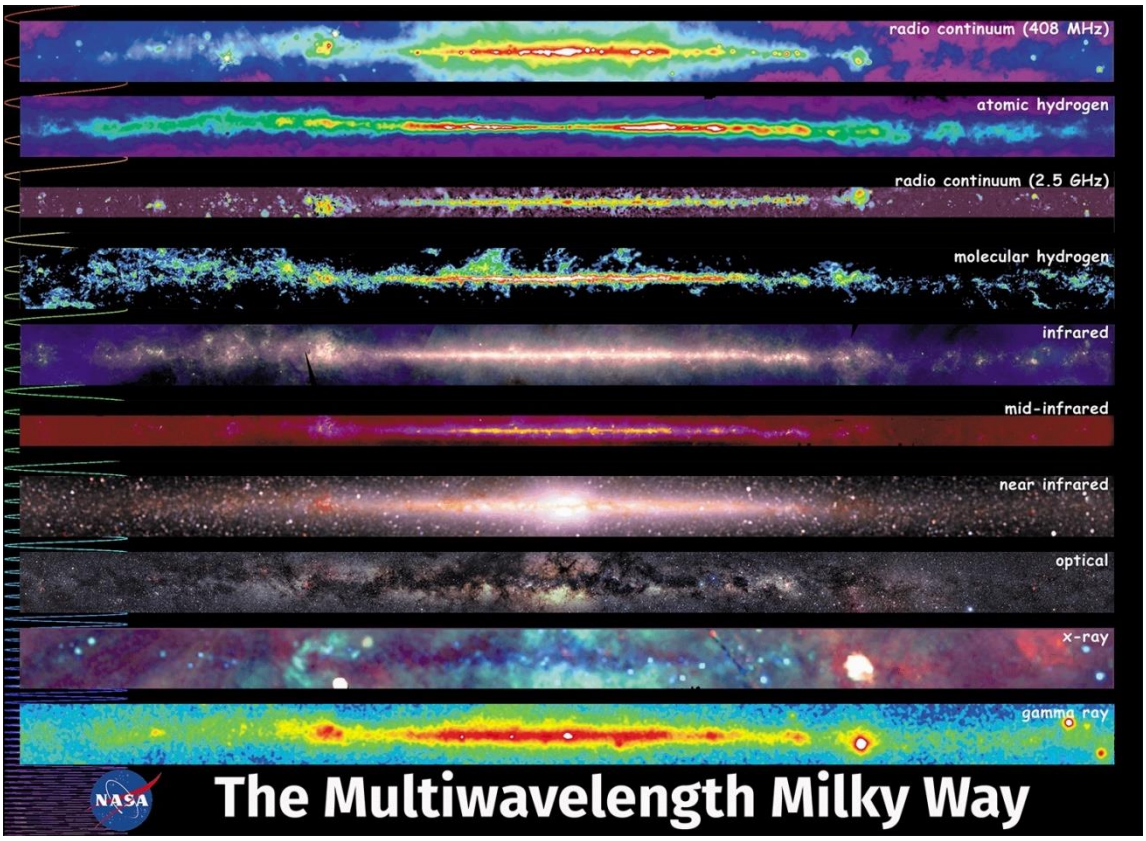
Pour en savoir bien plus, direction cet imposant document "**Wide-Field InfraRed Survey Telescope-Astrophysics Focused Telescope Assets WFIRST-AFTA 2015 Report**" de 319 pages qui détaille la mission scientifique et l'instrumentation de ce télescope. A ce stade, vous devez en avoir marre de l'infrarouge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

Télescopes spatiaux dans les rayons gamma, X et UV et ondes radio

Après un tour des généralités sur les **télescopes spatiaux**, sur ceux qui couvrent la lumière visible puis ceux qui sont dédiés à l'infrarouge, nous allons passer aux télescopes spatiaux qui explorent d'autres parties du spectre électromagnétique non visible autour du visible et de l'infrarouge :

- Dans les rayons gamma avec **Integral**, **SWIFT**, **Fermi**, **DAMPE** et **SVOM** sachant que ces derniers couvrent souvent également les rayons X et ultra-violets.
- Dans les rayons X avec **Uhuru**, **Suzaku**, **XMM-Newton**, **Nustar**, **Hitomi**, **Chandra, HXMT** et **Einstein Probe**, certains de ces télescopes couvrant aussi l'ultra-violet.
- Dans l'ultraviolet avec **WSO-UV** et **LUVOIR**.
- Dans les ondes radio avec **Spectr-R**, **HALCA**, **Planck** et **CoRE**.

Comme nous l'avions vu initialement sur les généralités des télescopes spatiaux destinés aux études astronomiques, chaque portion du spectre électromagnétique présente une utilité pour analyser les étoiles et galaxies, notamment les plus éloignées, ainsi que les phénomènes extrêmes type quasars, pulsars ainsi que le bruit de fond cosmologique. Les astronomes et astrophysiciens déploient des prouesses pour en tirer le maximum. Ces différents télescopes sont très complémentaires les uns des autres.



La complémentarité des observations dans différentes bandes de fréquences est parfaitement illustrée par cette vue de la Voie Lactée couvrant tout le spectre électromagnétique (**source**). Les rayons gamma ainsi que les ondes radio présentent l'intérêt de facilement traverser les nuages de poussières et de gaz qui se situent entre nous et le centre de la Voie Lactée. Les rayons infrarouges permettent au contraire d'analyser ces gaz et poussières chauffés par la lumière des étoiles.

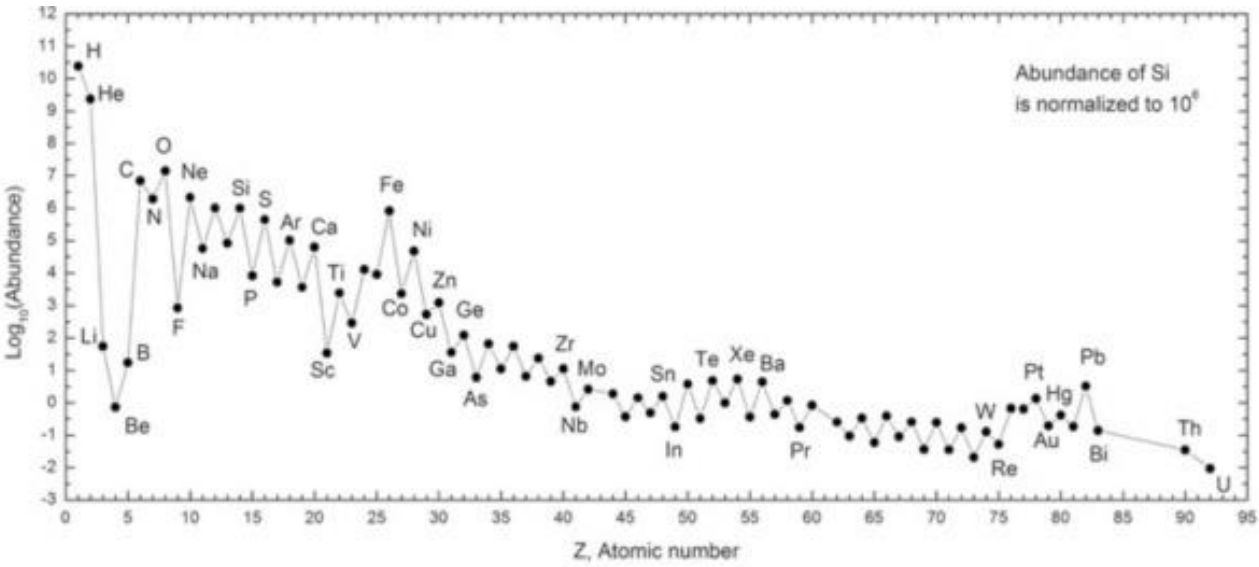
C'est aussi le théâtre d'une compétition un peu particulière entre astronomes et astrophysiciens. Les astrophysiciens cherchent des théories physiques expliquant les observations des astronomes. Inversement les astronomes cherchent à confirmer ou invalider les théories des astrophysiciens. Nombre des télescopes que nous allons examiner ici sont ainsi dédiés à la résolution de questions qui taraudent les astronomes et astrophysiciens depuis près d'un siècle : qu'est-ce que la matière noire et l'énergie noire qui semblent expliquer la cohésion des galaxies et l'expansion de l'Univers ? Quel domaine de la physique des particules nous échappe qui les expliquerait ? Quelles sont les grandes constantes cosmologiques qui déterminent l'évolution de l'Univers et notamment son futur ?

Télescopes spatiaux dans les rayons gamma

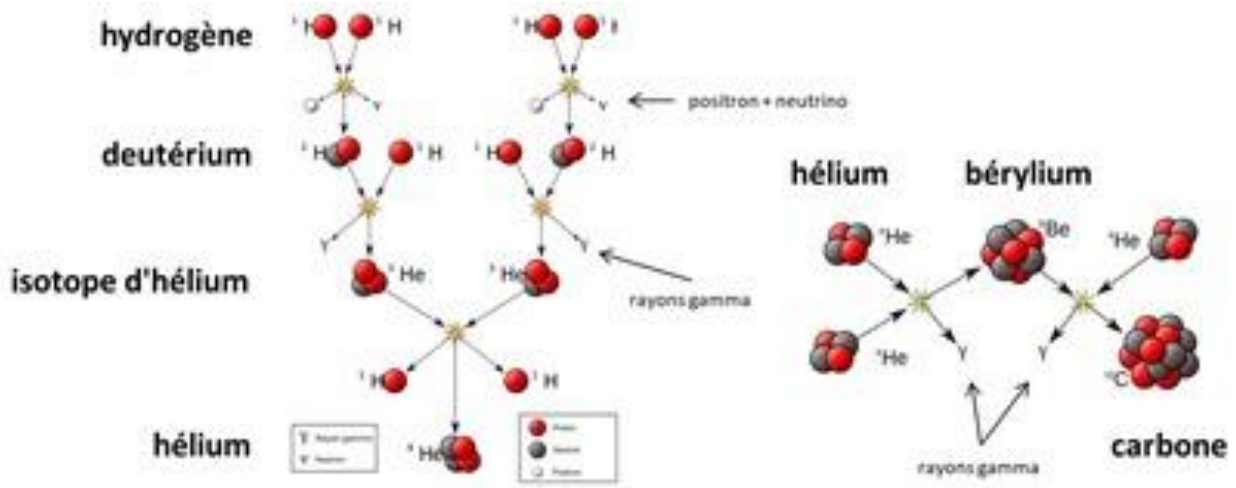
Les rayons gamma sont les rayons les plus énergétiques et de fréquences les plus élevées que l'on puisse observer. Chaque photon gamma transporte plus d'énergie que tous les autres photons, cette énergie étant proportionnelle à leur fréquence. Elle est d'ailleurs mesurée en électron-volts. Les rayons gamma se découpent en tranches énergétiques avec les rayons gamma faibles (100 keV), à énergie moyenne (1 MeV) et à forte énergie (1 GeV). Par comparaison, un photon dans le visible est autour d'un électron-Volt.

Faisons un petit détour par la composition en éléments atomiques de l'Univers. Le schéma ci-dessous présente l'abondance des éléments telle qu'observée dans l'Univers (**source**). L'hydrogène est de loin l'élément le plus abondant, avec 92% des atomes, suivi de l'hélium. Afin de comparer les autres éléments qui sont bien plus rares, la courbe est une logarithmique décroissante, avec des hauts et des bas. On observe surtout qu'en plus du carbone, de l'azote, du sodium et de l'oxygène, le fer est le sixième élément le plus abondant, dépassant tous les autres qui sont compris entre le sodium et le fer en poids atomique.

Cette abondance relative du fer s'explique par l'équilibre énergétique de cet atome. Pour les éléments plus légers que le fer, la **fusion** atomique émet de l'énergie et des rayons gamma en générant des atomes plus lourds. Pour les éléments plus lourds que le fer, c'est la **fission** atomique qui émet également énergie et rayons gamma mais génère des atomes plus légers. Les fusions et fissions tendent à converger vers la stabilité atomique du fer, d'où l'abondance de cet élément dans l'Univers, qui est d'ailleurs croissante dans le temps. La fission intervient dans des réactions nucléaires

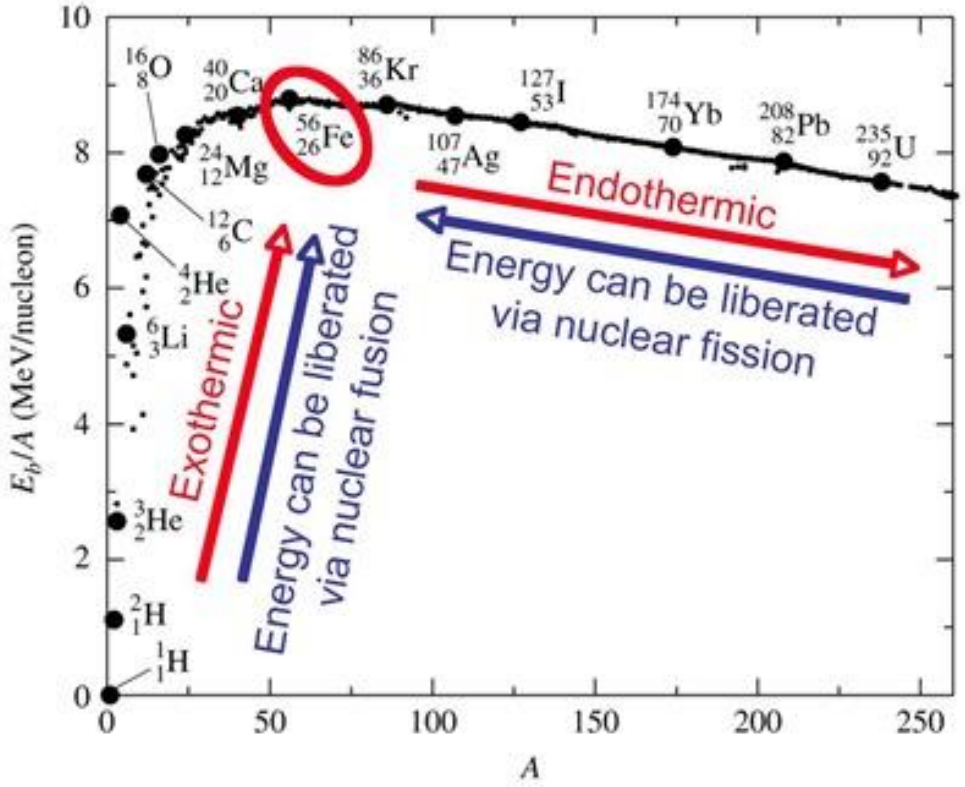


D'où proviennent ces différents atomes ? Essentiellement des étoiles qui transmutent l'hydrogène résultant du Big Bang. Le carbone est généré par la fusion de quatre atomes d'hélium (deux protons, deux neutrons) eux-mêmes venant de la fusion d'atomes d'hydrogène (un proton), via le deutérium (un proton, un neutron). L'énergie de fusion libérée correspond à la différence de masse entre l'atome de carbone résultant de la fusion et celle des quatre atomes d'hélium de départ. Chacune de ces réactions de fusion génère des rayons gamma d'un niveau d'énergie spécifique que l'on détecte ensuite ! On peut donc détecter dans quels objets célestes sont fabriqués tels ou tels éléments. L'hélium est par exemple fabriqué au sein des étoiles comme le Soleil.



La création d'éléments plus lourds que le fer nécessite l'apport d'énergie que l'on trouve par exemple dans les explosions de supernovas. Les éléments plus lourds que le fer se dégradent vers des éléments plus légers par fission nucléaire. Bref, le fer est l'élément le plus stable d'un point de vue nucléaire, d'où son abondance. On retrouve cette abondance dans les planètes telluriques comme la Terre. Notre planète est ainsi principalement constituée de fer en-dessous de la croute terrestre. On trouve de tout à sa surface, comme du carbone, de l'azote, de l'oxygène, de l'hydrogène et du phosphore, associés en molécules plus ou moins complexes (CO2, H20, acides aminés,

…) jusqu'aux molécules complexes du vivant (protéines, ADN, …). En termes de masse, la Terre est un gros aimant solide et liquide en fer et nickel recouvert d'une fine croute terrestre plus diverse en éléments ! Le champ magnétique terrestre est généré par les mouvements de convection du métal liquide dans le noyau externe (**source**).



Revenons donc aux rayons gamma. Ils sont notamment générés par les réactions de nucléosynthèse, celle qui permet la création d'éléments lourds à partir de l'hydrogène et des éléments suivants. Ils sont aussi générés par des particules relativistes, dont la vitesse d'approche de celle de la lumière. On les trouve dans les noyaux galactiques actifs, pulsars, quasars, blazars à rayons gamma (un blazar est un quasar très compact, un quasar est noyau galactique actif avec un trou noir au milieu), et, près de chez nous, dans les éruptions solaires.

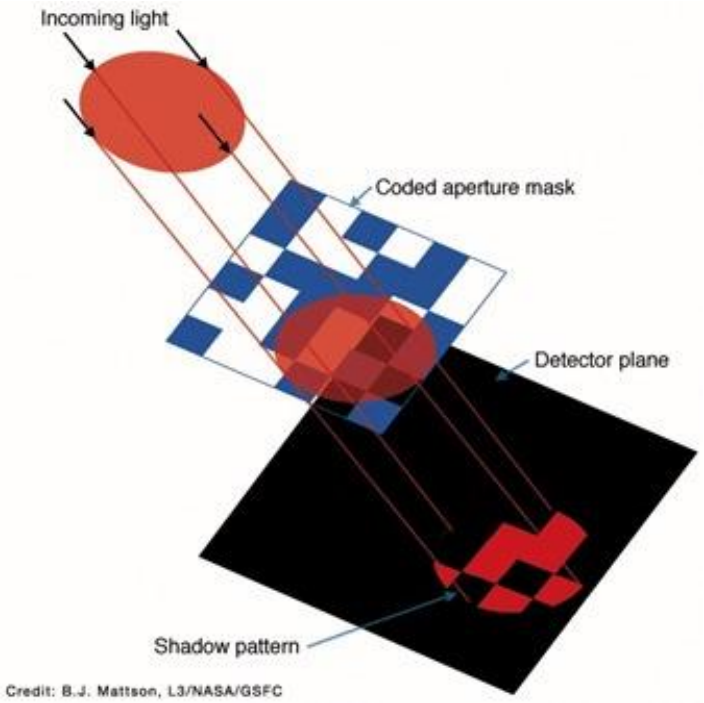
Le premier instrument spatial permettant de capter les rayons gamma fut **Explorer XI**, lancé par la NASA en avril 1961. Il servait à l'origine à la détection des explosions nucléaires provenant de l'URSS qui elles aussi en émettent. Il avait capté 31 évènements de rayons gamma en sept mois, ce qui fait peu mais qui ne provenaient pas de tests nucléaires soviétiques. Suivit le **Small Astronomy Satellite 2** en 1972 qui a fonctionné également sept mois, puis le **COS-B** européen entre 1975 et 1982 et **EGRET** entre 1991 et 1996. Ils ont notamment permis de cartographier les sources de rayons gamma de la Voie Lactée. Et puis le GRANAT entre 1990 et 1997 qui permis la découverte de micro-quasars et le **Compton Gamma Ray Observatory** entre 1991 et 2000 qui détecta des sursauts gamma diffus.

Il existe plusieurs sortes d'instruments de détection des rayons gamma : les détecteurs simples, les télescopes à masques et matrices de détecteurs, les télescopes à focalisa-

tion couplés à des matrices de détecteurs et les télescopes Compton. Qui plus est, ces télescopes sont aussi équipés de spectrographes à rayons gamma. Je vais essayer de comprendre et expliquer comment ils fonctionnent au fil de l'eau ! Ces capteurs doivent tenir compte des contraintes des rayons gamma :

- Ceux-ci ne peuvent pas être réfléchis sur quelque surface que ce soit pour converger sur un plan de focale car leur longueur d'onde est inférieure à la distance entre les atomes. Ils passent donc entre les mailles du filet de la matière.
- Les photons émis par les objets observés sont rares et les observations doivent donc être de longue durée pour en récupérer.
- Les capteurs peuvent être perturbés par la réception de rayons cosmiques parasites et il faut donc faire le tri entre les bons rayons gammas et les rayons gamma parasites. Qui soit dit en passant, sont plus nombreux que les rayons gamma que l'on cherche à détecter.

Le système le plus étrange est celui du capteur de rayons gamma à masque (coded mask). Un masque laisse passer à certains endroits et pas à d'autres les rayons gamma qui sont ensuite détectés par un capteur. L'empreinte récupérée par le capteur permet d'identifier la direction des rayons gamma incidents. L'image reçue par le capteur a en effet une forme unique qui correspond à l'ombre du masque et permet d'en identifier l'origine de manière unique, et donc la directivité. Pour ce qui est de la spectroscopie gamma, elle fonctionne sur le principe d'un tri des rayons reçus par niveau d'énergie, les capteurs étant capables de mesurer ce niveau d'énergie pour les rayons reçus.



A passage, nombre de télescopes dédiés aux rayons gamma sont aussi équipés de détecteurs pour les rayons X et ultra-violet qui suivent les rayons gamma dans le spectre électromagnétique.

INTEGRAL (2002 – 2020)

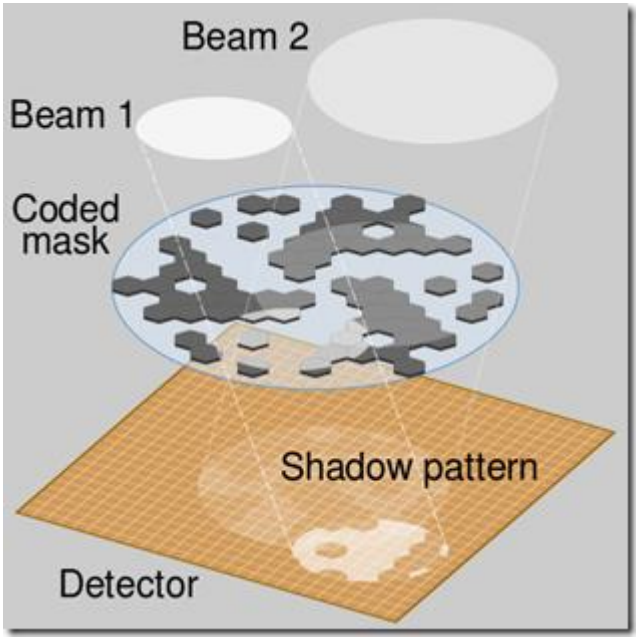
L'INTErnational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory est un télescope dédié aux observations à la fois dans les rayons gamma, les rayons X et le visible. Il a été lancé par l'ESA en collaboration avec l'agence spatiale russe et la NASA.

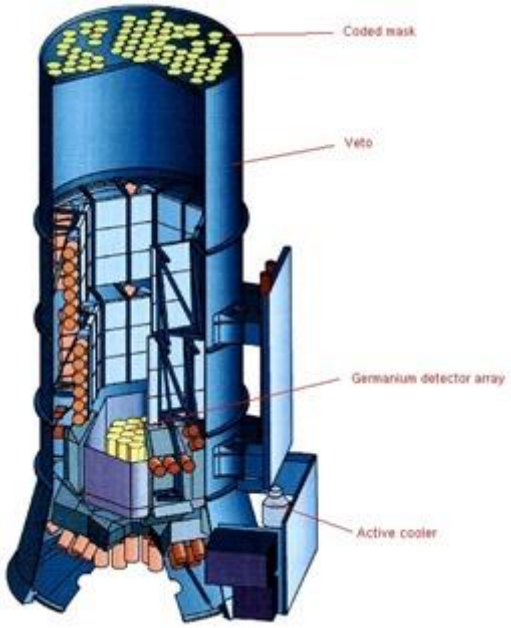
Il est propulsé pour l'ajustement de son orbite par de l'hydrazine avec quatre réservoirs en titane totalisant 544 kg. Il dispose aussi de roues inertielles pour gérer son orientation. Ses panneaux solaires génèrent 2400 W d'alimentation électrique, stockée dans deux batteries nickel-cadmium. Le satellite est en sur une orbite elliptique qui dure 72 heures avec une périgée à 10 000 km de la Terre et une apogée à 153 000 km.

INTEGRAL est doté de quatre instruments :

- **IBIS** (Imager on-Board the INTEGRAL Satellite) est un imageur dans les rayons gamma et les rayons X extrêmes qui lui sont adjacents. Il utilise une matrice de 95 x 95 masques en tungstène avec 128 x 128, l'ISGRI (Integral Soft Gamma-Ray Imager pour les rayons X) qui est à base de tellurure de cadmium complétée d'une autre de 64 x 64 panneaux de iodure de césium, le PICsIT(Pixellated Caesium-Iodide Telescope, pour les rayons gamma).
- **SPI** (SPectrometer for INTEGRAL) est un spectromètre de rayons X et gamma originaire du CNES français. Il comprend 19 détecteurs au germanium arrangés dans une matrice hexagonale, un capteur et filtre au BGO (germanate de bismuth) qui élimine en partie les rayons parasites et un capteur au tungstène. L'instrument est imposant : il fait 2,5 m de long pour 1,1 m de diamètres et 1300 kg. Il réalise la

spectrographie gamma dans la gamme 20 keV à 8 MeV. Pour ce qui est du fonctionnement exact de la spectrographie, je donne ma langue au chat ! Les capteurs au germanium sont refroidis passivement à 85K pendant les observations mais doivent être périodiquement réchauffés à 106°C pour que leur résolution reste stable. Le SPI est aussi doté d'un masque d'encodage (coded mask) qui obstrue certains rayons et pas d'autres et permet d'identifier leur incidence. Le SPI a été co-développé par l'IRAP de Toulouse et l'institut Max Planck allemand.





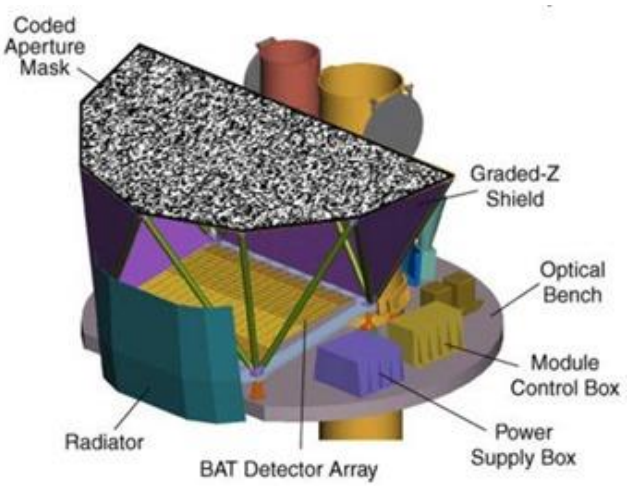
- Deux unités **JEM-X** qui font de l'observation dans les rayons X, de 3 à 35 keV avec une grande précision d'imagerie. Les détecteurs sont des scintillateurs à gaz utilisant du xénon et du méthane en couches minces.
- L'**OMC** (Optical Monitor) est un capteur optique dans le visible focalisé sur 500 à 580 nm. C'est l'équivalent d'un système visée (AGS) servant à cadrer les observations du satellite. Il sert aussi à détecter les variations d'activité dans le temps des sources les plus brillantes.
- **IREM** (INTEGRAL Radiation Environment Monitor) capte les rayons cosmiques de fonds pour le calibrage des instruments.

INTEGRAL a notamment permis l'identification de sursauts de rayons gamma et la détection d'un quasar de fer.

SWIFT (2004 – 20xx)

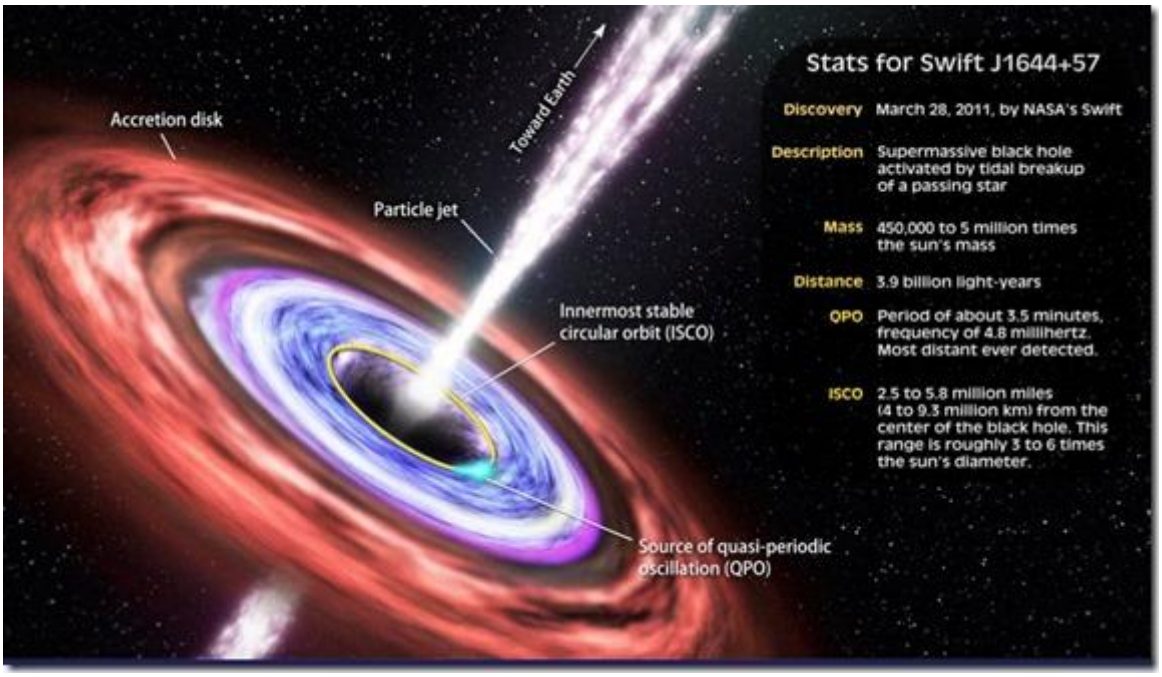
Ce télescope de la NASA pesant 1470 kg comprend trois instruments séparés pour l'étude des rayons gamma, des rayons X et de l'ultra-violet. Donc tout ce qui est en-dessous du spectre lumineux dans le spectre électromagnétique. SWIFT est en orbite à 600 km d'altitude. Il dispose comme tous les télescopes spatiaux de roues d'orientation pour son changement de position.

L'UV est capté grâce à un petit miroir principal de 30 cm couvrant les rayons entre 170 et 650 nm, couvrant ainsi une bonne part du visible. La captation des rayons X s'appuie comme il se doit sur des miroirs concentriques de type Wolter 1.



Il étude les rayons gamma des noyaux de galaxies actives (AGN), détecte les trous noirs dans les AGNs ainsi que les blazars à rayons gamma et les supernovas (explosions d'étoiles). Il utilise comme INTEGRAL un masque codé mais de plus grande résolution, pour récupérer l'incidence des rayons gamma reçus. Le détecteur est une matrice de capteur au tellurure de cadmium-zinc.

Il a ainsi détecté en 2009 le noyau actif GRB 090423 qui est éloigné de 13,04 milliard d'années-lumières puis un Magnetar dans Kes 73. En 2015, il avait détecté plus de 1000 blazars à rayons gamma.

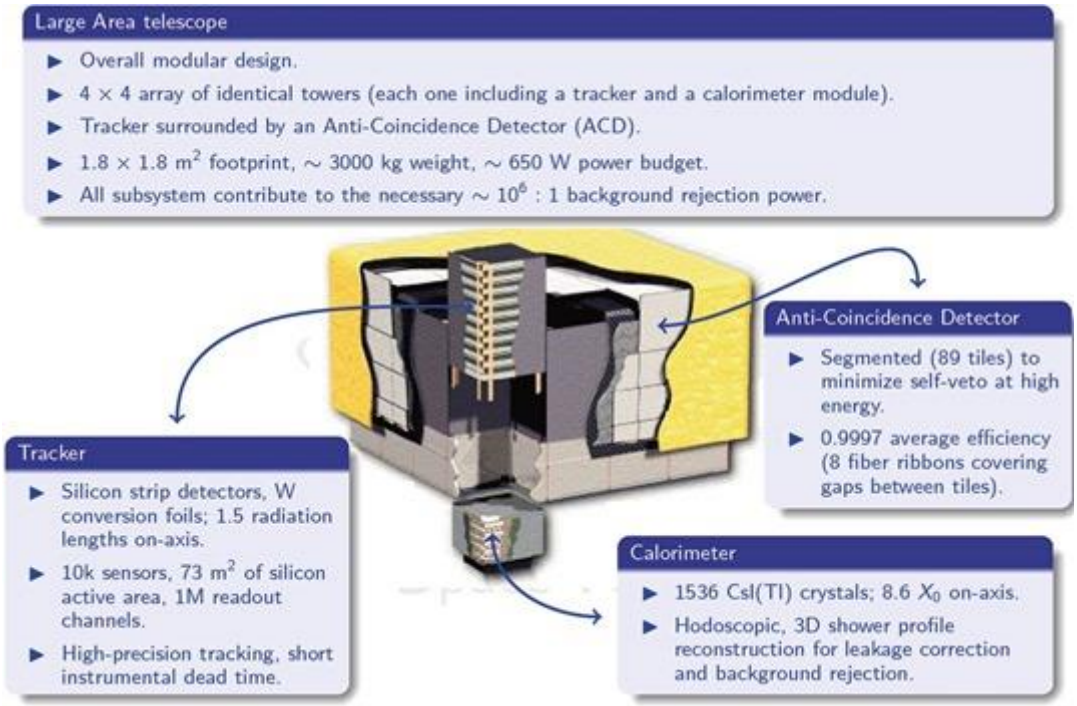


Fermi (2008 – 2018)

Anciennement GLAST (Gamma ray Large Area Space Telecope), ce télescope américain a été lancé en orbite terrestre à 565 km d'altitude et avec une fin de mission

étendue prévue en 2018. Il comprend deux instruments : un télescope et un détecteur de rayons gamma. Il communique avec la Terre en bande Ku à 40 Mbits/s. Il a été conçu avec la participation de la France (CEA, CNRS), de l'Allemagne (Max Planck Institute, DLR, leur équivalent de notre CNES), de la Suède, de l'Italie et du Japon. Il est doté de deux instruments : le LAT et le GMB.

Le **Large Area Telescope** (LAT) est doté d'un très grand champ de vue de 5° qui lui permet de couvrir tout le ciel toutes les deux orbites. Les rayons gamma qui entrent dans le LAT sont convertis en particules dont l'énergie et la directivité sont alors mesurées. Il capte les rayons gamma d'énergie très élevée, comprise entre 20 MeV et 300 GeV. C'est le seul télescope spatial atteignant ce niveau.



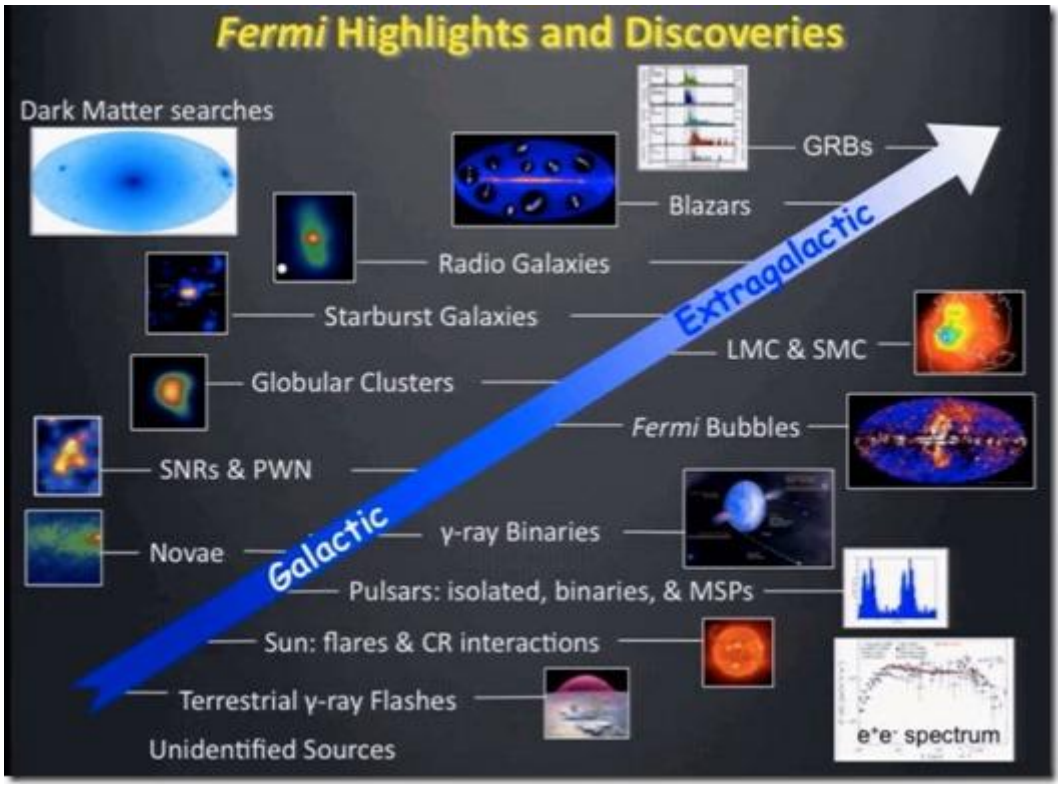
Le LAT comprend 16 modules identiques de 37 cm de côté, mis côte à côte, qui contiennent chacun 18 couches de détecteurs de position au silicium, 8 couches de calorimètres CsI (à l'iodure de césium), 12 calorimètres NaI (à l'iodure de sodium) et des scintillateurs BGO (au germanate de bismuth). Une quincaillerie dont je vous passe les détails et qui permet de détecter les rayons gamma, leur origine et leur énergie, tout en éliminant les particules à haute énergie. En gros, lorsque les rayons gamma

traversent la première couche de détecteur, ils se transforment en électrons et positrons à haute énergie qui vont percuter les couches suivantes.

Le **Gamma-ray Burst Monitor** (GBM) comprend 14 scintillateurs couvrant les énergies de 8 keV à 30 GeV également capable de réaliser de la spectrométrie.

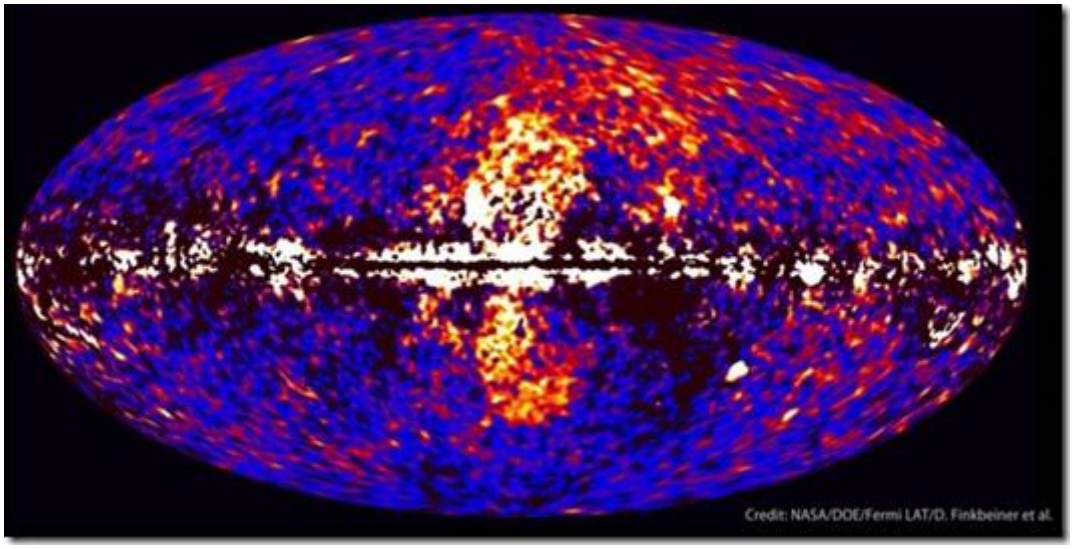
La captation des rayons gamma doit tenir compte de la grande quantité de rayons cosmiques qui arrive dans le détecteur. Elle est supérieure à celle des rayons gamma ! Il faut donc analyser la trajectoire individuelle de chaque rayon dans les couches empilées de capteurs pour faire le tri. C'est le rôle des logiciels d'analyse ! Celui de Fermi a été régulièrement mis à jour pour améliorer l'exploitation des résultats et éliminer un maximum de détections qui ne relèvent pas de rayons gamma. La dernière version est **Pass8**, sortie en 2015, et réalisée en partie par Philippe Bruel de l'Ecole Polytechnique. Elle permet d'ailleurs d'étendre les mesures à des rayons gamma atteignant 3 TeV [cf cette vidéo où il intervient "**Fermi Gamma Ray Telescope's 4K Ultra HD Upgrade**"].

Dans la conférence "**Gamma Ray Bursts and Recent Results from the Fermi Mission**" de Peter Michelson de 2015, ce dernier fait un panorama par que voici des différentes découvertes permises par Fermi depuis sa mise en service.



Le télescope spatial Fermi a notamment détecté en 2010 d'énormes bulles de rayons gamma de 25 000 années-lumière de diamètre au-dessus et en-dessous du centre de la Voie Lactée (*ci-dessous*). Elles émanent du noyau de la galaxie au centre de laquelle se situe un trou noir faisant une masse équivalente à quatre millions de notre Soleil. Les deux bulles pourraient témoigner d'une activité récente de ce trou noir, qui est normalement inactif et en équilibre avec son environnement, tout du moins à une

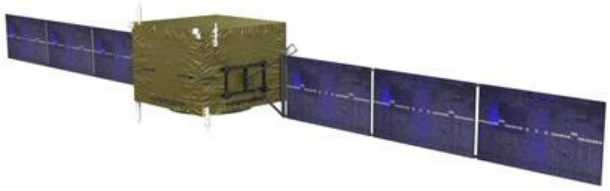
échelle de temps cosmique (quelque dizaines de millions d'années). Ces bulles pourraient aussi provenir de supernovas du centre de la galaxie.

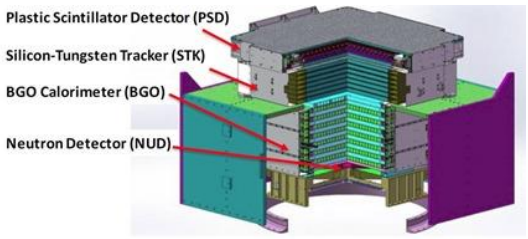


Fermi a sert aussi à la recherche de noyaux galactiques actifs (AGN). Il a permis de découvrir que les tempêtes sur Terre généraient de l'antimatière, via la détection de rayons gamma d'un niveau d'énergie de 511 KeV qui correspond à l'annihilation d'un électron par un positron (**source**).

DAMPE (2015 – 2018)

Le DArk Matter Particles Explorer est un télescope spatial chinois développé avec des participations Suisse et Italienne et lancé en orbite terrestre basse à 500 km d'altitude. Il explore les rayons gamma ainsi que les rayons cosmiques qui sont des particules et pas des rayons électromagnétiques, électrons et neutrinos. Il est dédié à l'étude indirecte de la matière noire.





Le satellite fait une masse de 1850 kg et 1,2 x 1,2 x 1 m. Il consomme 500W qui sont générés par ses panneaux solaires. Il émet 16 Go de données par jour. Il sera suivit du télescope HERDE qui sera embarqué dans la station spatiale chinoise en 2025.

DAMPE comprend quatre instruments de mesure qui sont empilés les uns sur les autres sachant qu'ils ne sont pas du tout associés à une optique ou à un miroir :

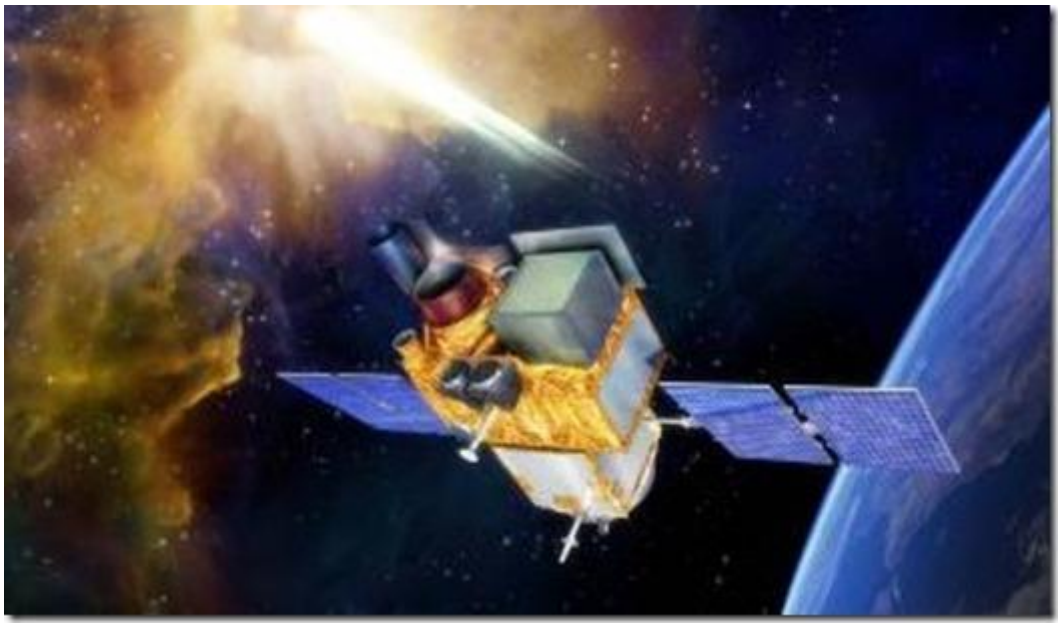
- **PSD** (Plastic Scintillator Detector) composé de scintillateurs en plastique sur 82 x 82 cm.
- **STK** (Silicon-Tungsten Tracker) qui mesurent les électrons à forte énergie mais ne sont pas très directifs. Ils sont constitués de supports en fibres de carbone et tungsten de 76x76cm sur 7 étages sur lesquels sont placés des capteurs de 9,5 x

9,5 cm qui sont des détecteurs au silicium provenant de Hamamastu Photonics, à raison de 32 par étage.

- **BGO Calorimeter**, un calorimètre BGO d'imagerie à 14 niveaux de 60 x 60 cm qui capte les photons (rayons gamma) et électrons à haute énergie (rayons cosmiques).
- **NUD** (Neutrons Detector), un détecteur de neutrons.

SVOM (2021 – 2031)

Le Space Variable Objects Monitor est un projet de télescope issu d'un partenariat scientifique entre le CNES français la China National Space Administration. Il sera dédié à l'étude des sursauts de rayons gammas (GRB = Gamma Rays Bursts) générés par les explosions d'étoiles massives, prenant le relai de SWIFT qui aura alors atteint sa fin de vie opérationnelle. Il doit capter le visible pour gérer son pointage, ainsi que les rayons X et les rayons gamma faibles. Le satellite sera en orbite terrestre à 625 km d'altitude.



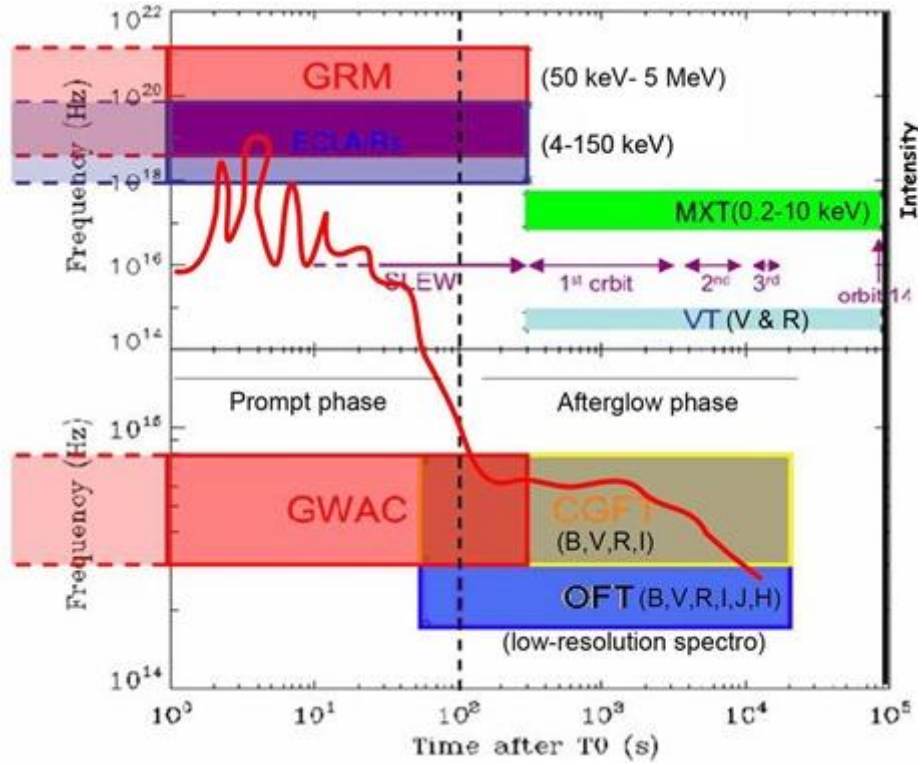
Les instruments embarqués dans ce télescope seront :

- **GRM** (Chine), Gamma Ray Monitor pour capter les rayons gamma faibles et moyens, de 50 keV à 5 MeV, avec trois capteurs NaI (sodium-indium) donnant une précision angulaire de 2°, soit quatre fois le diamètre apparent de la Lune. C'est pour la pêche au gros des GRBs !
- **ECLAIR** (France), une caméra de détection et de pointage captant les rayons gamma faibles, de 5 keV à 150 keV. Elle utilise un système de masque (Coded Mask Telescope) et une surface sensible avec 80×80 (6400) capteurs en tellurure de cadmium. Il doit détecter 80 phénomènes GRB par an. Elle aussi a un champ large de vue.

- **MXT** (France, Allemagne, UK), Multichannel X-ray Telescope, avec un miroir ne pesant qu'un kilogramme et un capteur CCD de 256×256 pixels. Agit entre à 0,2 et 10 keV.
- **VT** (Chine), un télescope avec un miroir de 40 cm opérant dans le visible de 400 à 950 nm, couvrant donc un bout du proche infrarouge, et doté de deux capteurs de 2Kx2K pixels.

L'instrument fonctionnera de concert avec les outils de détection des sursauts gravitationnels comme le LIGO américain pour détecter une poignée de sursauts gamma. Pour ce faire, il peut détecter ces sursauts et envoyer des alertes au sol en moins de 30s dans deux tiers des cas, permettant d'utiliser dans la foulée divers instruments terrestres dont le LIGO.

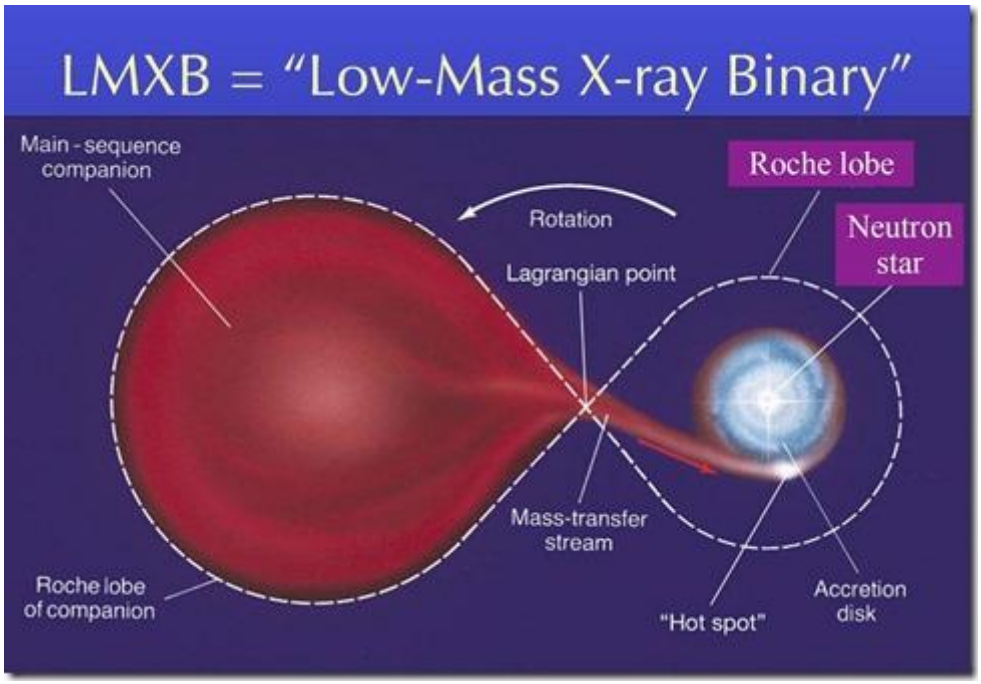
Il peut aussi être orienté avec l'aide du GFT1 (Chine) et du GFT2 (France, Mexique), deux télescopes terrestres robotisés (à venir) dotés d'un miroir de 1m et servant à la captation dans le visible des évènements qui seront ensuite détectés par l'instrument ECLAIR du SVOM. Le système comprend aussi le GWAC (Chine), Ground Wide Angle Camera, un autre instrument terrestre fonctionnant dans le visible, de 450 à 900 nm, et doté de 36 capteurs (4 modules avec une matrice de 9 capteurs).



Les instruments fonctionnent en série dans le temps avec une détection de rayons gamma par le GRM ou ECLAIR dans le télescope déclenchant une analyse par le MXT et le VT. Dans le même temps, une détection sur terre par le GWAC déclenche une analyse par le GFT1 et 2 dans le visible et une spectrographie avec d'autres instruments terrestres.

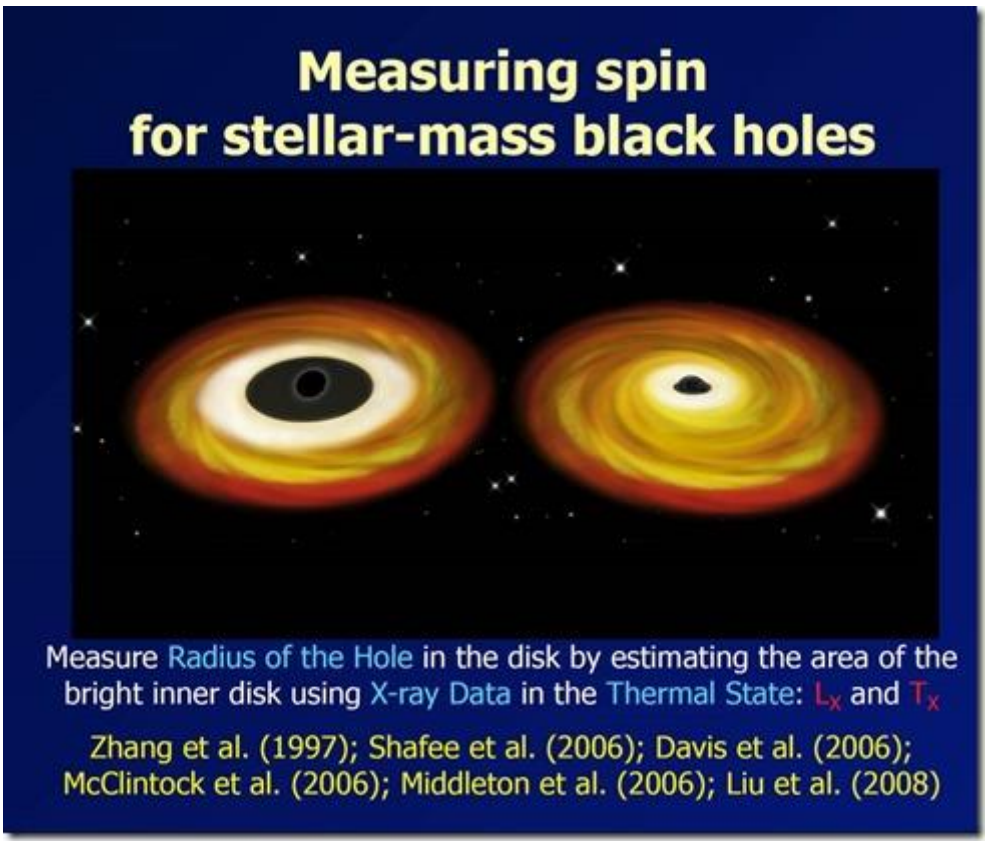
Télescopes dans les rayons X

Le premier télescope spatial à rayons X était **Uhuru**, lancé par la NASA en 1970 et opérationnel jusqu'en 1973. Nous allons parcourir ici ceux qui ont été lancés relativement récemment comme **XMM-Newton**, **Suzaku**, **Chandra et Nustar**, puis ceux dont le lancement est à venir avec **Hitomi**, **HXMT, Einstein Probe** et **NICER**, sachant que certains de ces télescopes couvrent aussi l'ultra-violet et que nombre de télescopes vus dans la partie précédente sur les rayons gamma couvrent aussi les rayons X.



Les photons dans les rayons X sont émis lorsqu'un électron d'une couche externe d'un atome vient combler un trou des couches internes lorsqu'un électron en est éjecté.

Comme les rayons gamma, les rayons X permettent la détection de phénomènes extrêmes autour des trous noirs, comme les LMXB (Low-Mass X-ray Binary qui associent une étoile et une étoile à neutrons), les noyaux galactiques actifs, les quasars et les pulsars. Ils permettent aussi d'étudier les éruptions solaires. Ils permettent aussi d'évaluer la taille d'un trou noir par celle de l'anneau lumineux qui est autour.



Les télescopes à rayons X utilisent généralement un système de miroirs concentriques paraboliques et hyperboliques de type Wolter 1 adaptés à la focalisation des rayons X sur un plan de focale. Pourquoi un tel montage que l'on dénomme miroir de Bragg ? Parce que des miroirs traditionnels et orthogonaux à la source de lumière absorberaient les rayons X. Pour l'éviter, il faut qu'ils arrivent sur les miroirs avec une forte incidence, au minimum 89° et pour des rayons de moins de 10 keV. Le principe est décrit dans des schémas plus loin pour XMM-Newton et Chandra.

La seconde particularité de ces télescopes concerne leurs capteurs CCD. Comme l'énergie des photons en rayons X est élevée, les photos sont très énergiques mais plus rares. Les temps d'exposition n'ont donc pas besoin d'être longs. Les temps d'exposition longs pour détecter les faibles sources de rayons X, et sans générer de surexposition, sont obtenus avec une succession de temps d'exposition courts. Les capteurs CCD enregistrent la position, l'énergie et la position dans le temps de chaque photon X reçu en fonction de l'indice de l'exposition l'ayant généré. Comme le temps de lecture des CCD peut être un facteur limitant, celui-ci est réduit en limitant la surface d'exposition à la zone d'intérêt, éventuellement détectée par un télescope dans le visible adjoint au télescope rayon X. Les capteurs à rayons X génèrent beaucoup de bruit qu'il faut arriver à distinguer du signal utile. Les statistiques entrent alors en ligne de compte. L'augmentation des temps de pose sert aussi à augmenter le rapport signal utile sur bruit.

La captation de rayons X peut être aussi réalisée avec des calorimètres, dont le principe est voisin de celui des bolomètres que nous avons étudiés dans la partie sur les radiotélescopes. Ce sont des thermistances qui chauffent en fonction de l'énergie reçue par les photons X. Dans la pratique, elles ne sont pas exploitées, l'une des raisons

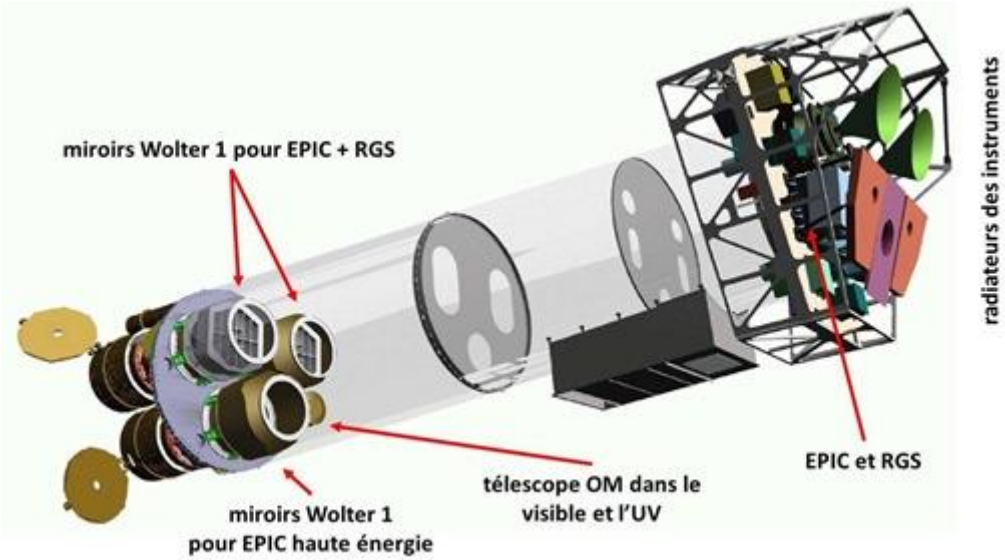
étant le besoin de cryogénisation à 0,1K qui utilise trop de consommable comme de l'hélium liquide.

XMM-Newton (2000 – 2018)

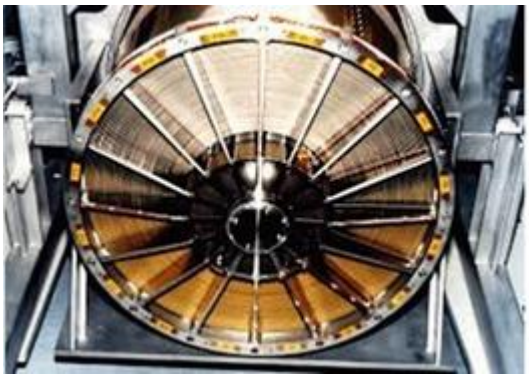
Ce télescope de l'ESA (X-ray Multi-Mirror Mission) est capable de réaliser simultanément des observations dans le visible, les ultra-violets et dans les rayons X, y compris de la spectroscopie des rayons X. Il étudie les régions de formations d'étoiles, la formation et l'évolution des amas de galaxies, l'environnement des trous noirs super massifs ainsi que la cartographie (indirecte) de la matière noire. Il comprend plusieurs miroirs pour alimenter ses instruments.

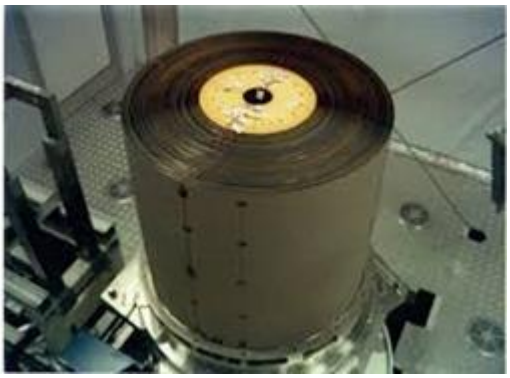
Il a été lancé fin 1999 en orbite elliptique avec une périgée de 838 km et une apogée de 112 473 km durant environ 48 heures et est opérationnel depuis juin 2000. Cette orbite permet d'avoir des périodes d'observation de 40 heures d'affilée. Il représente un budget de près de 700 Md€. Donné pour fonctionner deux à trois ans, sa mission a été plusieurs fois étendue du fait de la bonne santé des instruments, des panneaux solaires et de ses réserves en carburant de positionnement. C'est une forme d'underpromise/overdeliver courante avec les télescopes spatiaux.

Le télescope fait 10,8 m de long et une envergure de 16,16 m avec ses panneaux solaires déployés. Il pesait 3764 kg au lancement. Il est orientable dans toutes les directions pour gérer ses observations avec une précision de 0,25 arcsecondes, à la vitesse d'escargot de 90° par heure. Il communique avec la Terre en bande S. Les source des illustrations sont dans le **XMM-Newton Users Handbook**.



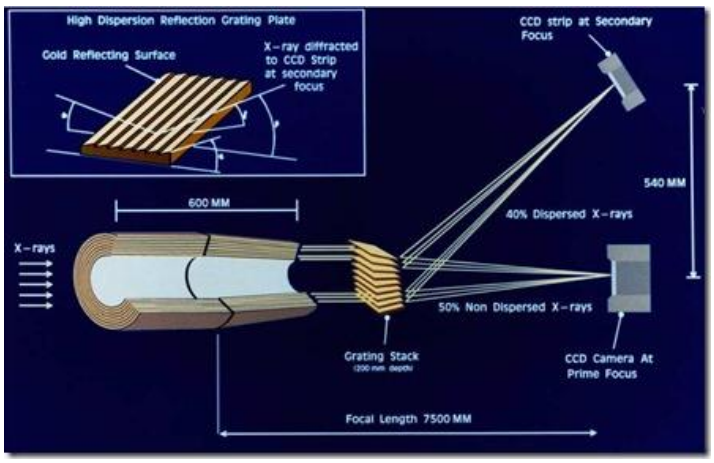
XMM-Newton comprend en fait quatre optiques distinctes qui alimentent six instruments pouvant fonctionner simultanément. Trois optiques sont dédiées aux rayons X et une au visible et à l'UV. Les trois optiques à rayons X sont basées sur un système de 58 miroirs concentriques de type Wolter 1 (*ci-dessous*). Ces miroirs sont en aluminium recouvert d'une couche d'un quart de micron d'or puis de nickel.

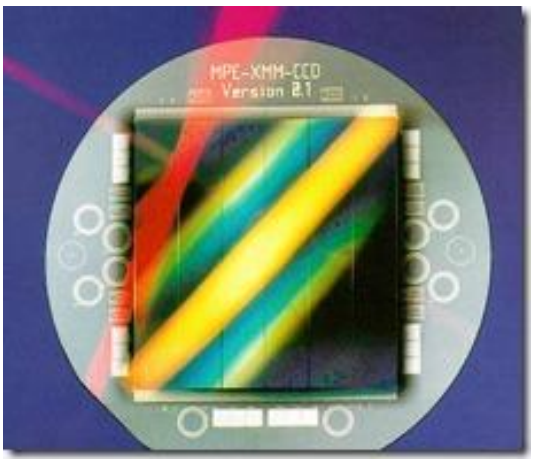




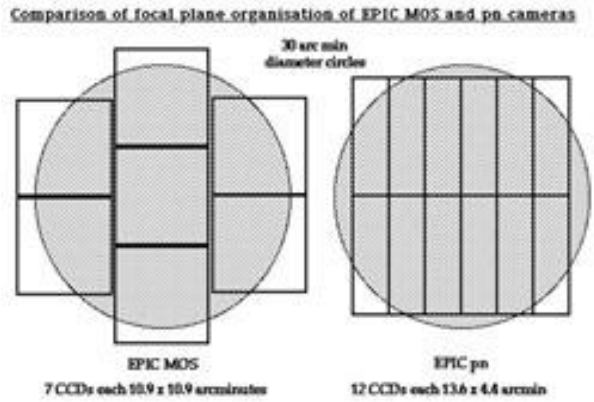
Deux de ces systèmes alimentent à la fois une caméra EPIC et un spectrographe RGS. Le troisième alimente une caméra EPIC pour les rayons X à haute énergie. Dans le détail :

- Les trois **EPIC** (European Photon Imaging Camera) utilisent deux sortes de capteurs CCD et une roue à six positions avec quatre filtres transparents aux rayons X, une totalement ouverte et une totalement fermée, pour les tests de calibrage qui exploitent aussi une source radioactive. Deux capteurs MOS-CCD sont dédiés aux rayons X à basse énergie et comprennent sept capteurs CCD de 600×600 pixels de 40 microns leur donnant une résolution totale de 2,5 mpixels. La troisième caméra détecte les rayons X à haute énergie avec 12 capteurs CCD montés sur un seul chipset et totalisant 145 000 pixels de 150 microns sur 36 cm2. Elle est montée sur le télescope qui n'est pas doté de spectrographe RGS. Les deux EPIC identiques servent à la tolérance de pannes, un point clé dans les satellites. Et elle fut bien utile car l'un des capteurs CCD fut endommagé en 2005, handicapant partiellement l'un des EPIC.

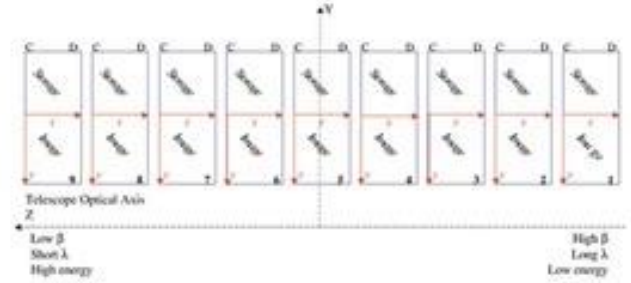




- Deux **RGS** (Reflection Grating Spectrometers) analysent par spectrographie les rayons X reçus par deux des trois télescopes à rayons X selon le montage optique présenté ci-dessus. Ils servent à déterminer la composition des objets observés, notamment en carbone, azote, oxygène, néon, magnésium, silicium et fer. Les caméras utilisent neuf MOS-CCD de 384×1024 montés de manière incurvée, ce qui donne 3,5 mpixels en tout. La résolution spectrale est moyenne avec de 200 à 800 raies spectrales.



CCD des caméras EPIC

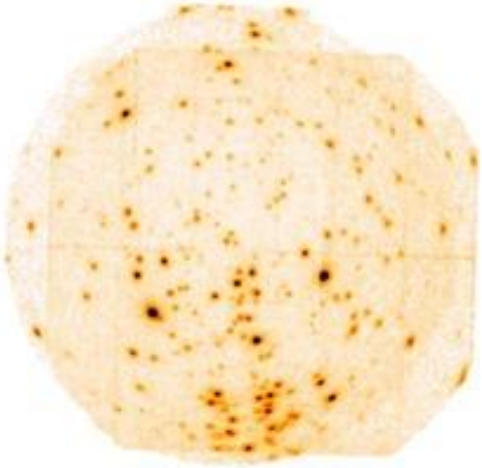


CCD des spectrographes RGS

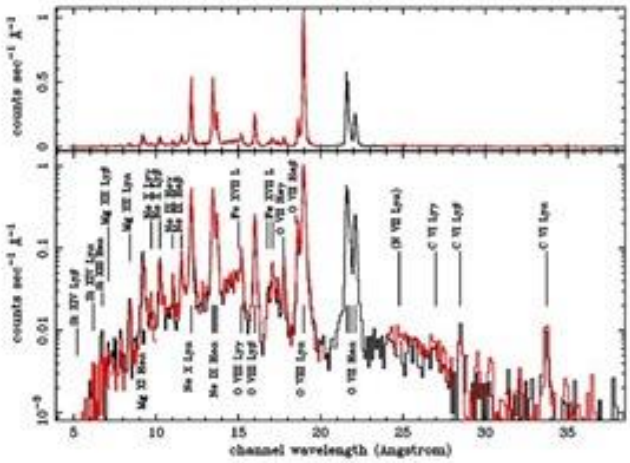
- Un **OM** (Optical Monitor), un petit télescope indépendant avec un miroir de 30 cm couvrant le visible et l'UV, de 170 à 650 nm. La lumière traverse un filtre sélectionné dans une roue en comprenant 11 dont un grisme permettant de faire de l'interférométrie, puis un intensifieur de lumière qui l'amplifie un million de fois. Le CCD fait 2Kx2K pixels. Ce système permet l'identification simultanée d'objets dans les rayons X et le visible.

Les instruments sont refroidis de manière passive avec des radiateurs pour éviter les effets des radiations ionisantes sur les capteurs CCD en plus de celles du *dark current* habituel. La température de refroidissement compris entre -120°C et -110°C a été sélectionnée après des tests de performance à différentes températures.

Et voilà ce que cela donne en pratique avec un exemple d'image en rayons X générée avec deux caméras EPIC et un spectre de reste de supernova générée avec un spectrographe RGS.



nuage moléculaire d'Orion
capté en rayons X par deux EPIC



spectre de reste de supernova
capté en rayons X par un RGS

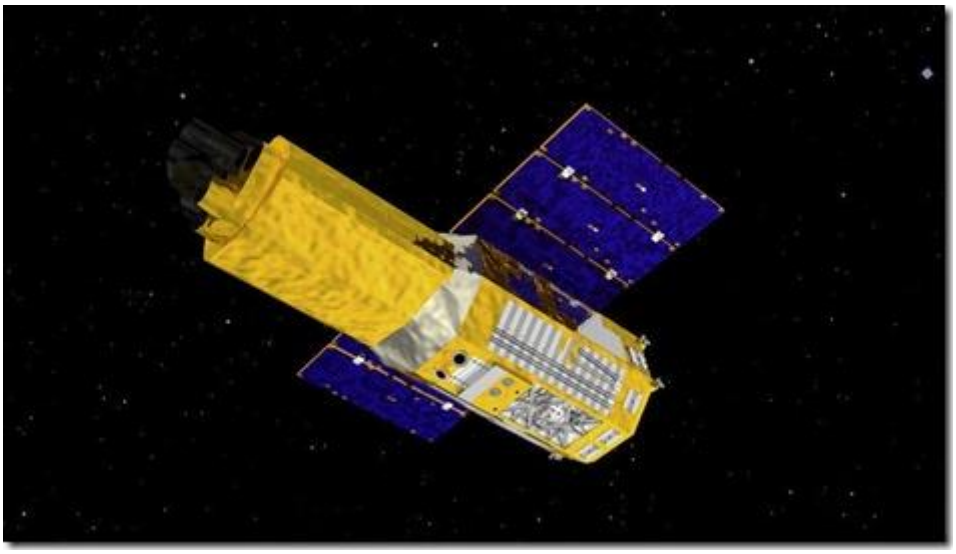
XMM-Newton a permis la découverte d'un **magnétar**, dénommé 3XMM J185246.6+003317. Qu'est-ce donc qu'un magnétar ? Il s'agit d'un type particulier d'étoile à neutrons qui présente un champ magnétique ultra intense et dont l'existence a été suggérée en 1992 par Robert Duncan et Christopher Thompson. Ce type d'étoile se constituerait environ une fois sur dix lors de l'implosion d'étoile en étoiles à neutrons lors de supernovas. Ce champ a un impact sur les rayons gamma et X émis. Ces étoiles à neutrons font environ 20 km de large et ont une masse d'environ 2 à 3 fois celle du Soleil. Ils tournent plus lentement sur eux-mêmes que les étoiles à neutrons habituelles, avec une période de une à dix secondes alors que celle des étoiles à neutrons peut descendre jusqu'à quelques dizaines de millisecondes.

Cela génère un champ magnétique caractéristique détectable via les rayons gamma et X émis. Un magnétar décline en environ 10 000 ans au bout desquelles le champ de rayons X décline. Il y aurait plus de 30 millions de magnétars inactifs dans la Voie Lactée. Il y a même des sortes de tremblements d'étoiles dans les magnétars qui génèrent des sursauts de rayons gamma. Dans les magnétars, les photons X se séparent en deux ou fusionnent. Le magnétisme polarise les rayons X et gamma. Les atomes sont déformés et s'allongent. Bref, ne comptez pas sur la vie pour y prospérer ! Elle y serait pulvérisée, ce même des milliers de kilomètres avant de se rapproche d'un magnétar ! A ce jour, on a identifié quelques dizaines de magnétars, en associant les données de télescopes spatiaux opérant dans les rayons gamma et X ainsi que des télescopes terrestres.

SUZAKU (2001- 2015)

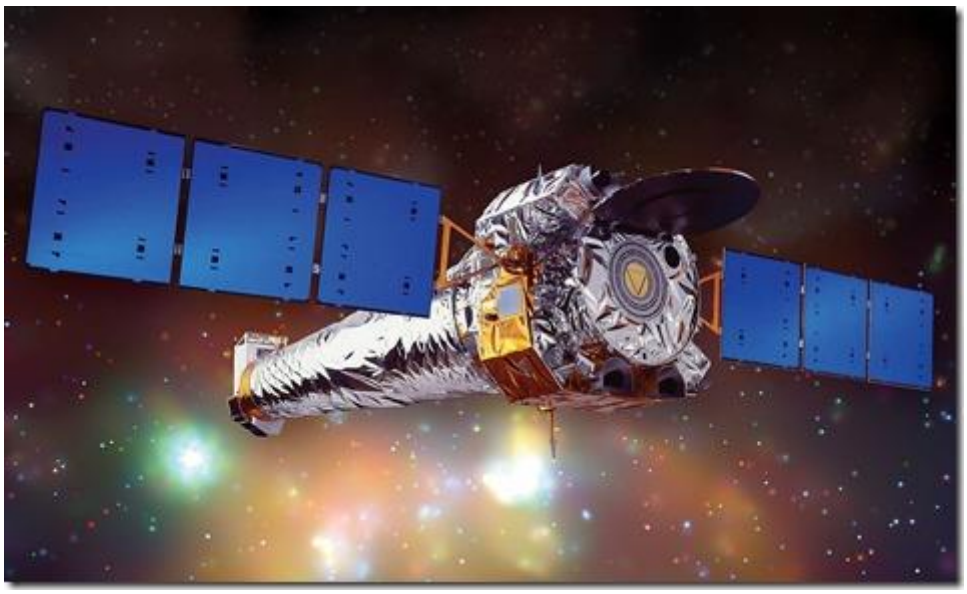
Suzaku est un télescope à rayons X japonais aussi dénommé ASTRO-E2. Mouton noir du secteur, son lancement avait été raté en février 2000 après l'explosion de la fusée M-V-4. C'est une copie du télescope qui fut lancée en 2001. Il est doté de

quatre télescopes rayons X avec caméras CCD et d'un détecteur de rayons X à haute énergie (HXD) allant de 10 à 600 keV. Il était aussi doté d'un calorimètre permettant une mesure précise des rayons X mais celui—ci n'a jamais marché.



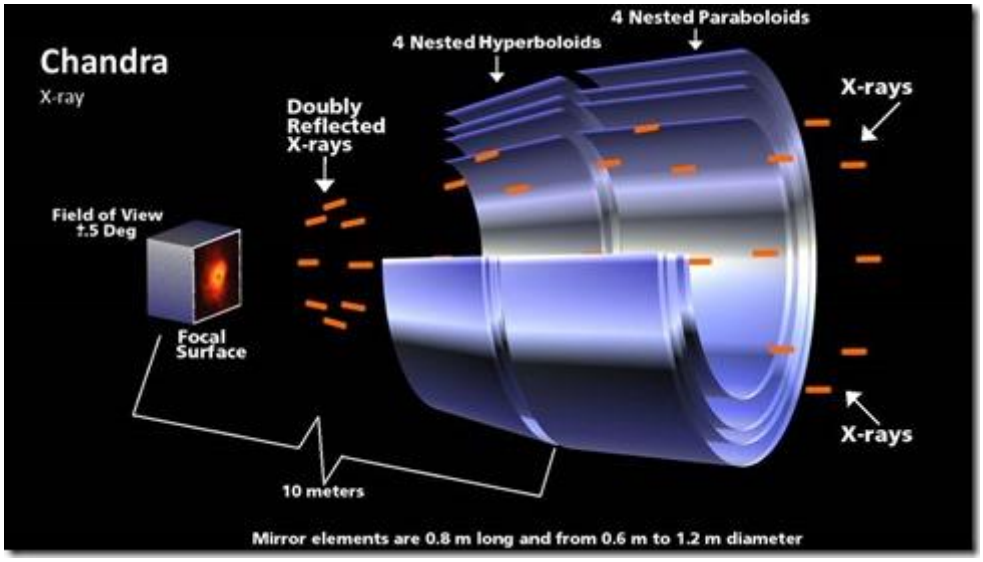
Chandra (2011 – 2016+)

Chandra est un télescope à rayons X de la NASA qui est toujours en activité. Il est aussi sur orbite elliptique, avec une périgée assez éloignée de la terre, à 16 000 km, et une grande apogée de 133 000 km. Cela lui procure une capacité d'observation continue de 55 heures, sur les 65 heures de durée de son orbite. Il pesait environ 6 tonnes au lancement dont une d'hydrazine et de peroxyde d'azote qui servent à ses propulseurs d'ajustement d'orbite.



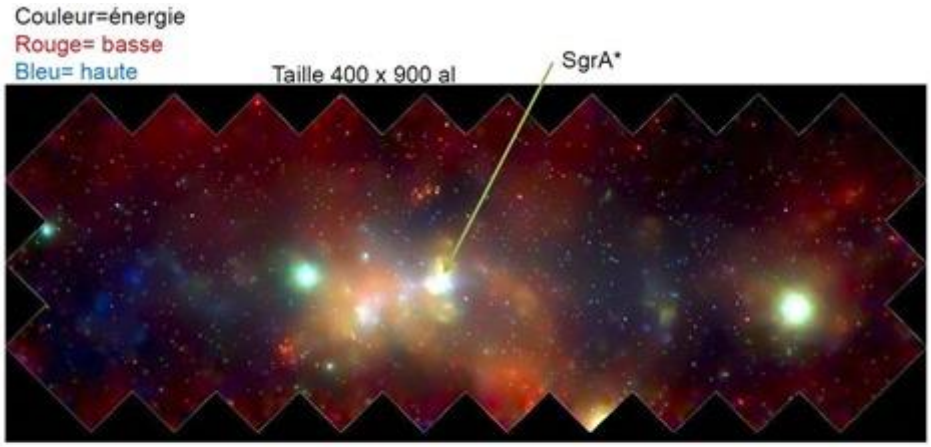
Le télescope utilise un système unique de miroirs Wolter 1 à quatre couches concentriques, faites de verre Zerodur de 2 cm d'épaisseur avec un revêtement en iridium. Leur diamètre respectif est de 65, 87, 99 et 123 cm (cf le schéma *ci-dessous*). L'épaisseur de ces miroirs, bien plus grande que celle des miroirs en aluminium du XMM-Newton lui confère une meilleure stabilité et permet au télescope d'obtenir

une excellente résolution. Par contre, cela se fait au détriment de la couverture du champ de vision par le télescope. En gros, c'est un compromis résolution contre sensibilité. Mais le polissage des miroirs doit être des plus précis, avec une tolérance d'à peine un nanomètre, bien plus exigeante que celle des grands miroirs de télescopes terrestres dans le visible.



Il est doté d'une résolution angulaire de 0,5 arcsecondes à comparer avec les 15 arcsecondes des caméras EPIC du XMM-Newton. Cette résolution provient notamment de la caméra utilisée, faite de 69 millions de nanotubes de verre en oxyde de plomb qui amplifient les électrons générés. Le télescope est aussi équipé d'un spectrographe (ACIS), à base d'une dizaine de CCDs plus classiques.

Il s'oriente comme tous les satellites avec des roues, ici, qui sont 6. Enfin, il envoie ses données à la Terre à une vitesse maximale de 1 Mbits/s sachant qu'il peut emmagasiner 16 heures d'observations dans sa mémoire royale de plus de 2 Go !



Le centre Galactique en rayons X, vu par le satellite Chandra

Des centaines de naines blanches, étoiles à neutron, trous noirs stellaires + gas chaud (qq$10^{6°}$) qui s'échappe en partie

Voici ci-dessus un exemple d'utilisation de Chandra, l'observation du centre de la Voie Lactée, issu de la conférence **Le trou noir au centre de notre Galaxie**, de Françoise Combes, donnée au Collège de France.

NuSTAR (2012 – 2018)

Le Nuclear Spectroscopic Telescope Array de la NASA observe les rayons X les plus énergétiques, de 6 à 79 keV, en complément des capacités d'observation de XMM-Newton et Chandra qui sont focalisés sur les rayons X faiblement énergétiques. Il est dédié à l'évaluation de la masse des trous noirs de la Voie Lactée et à la cartographie des explosions récentes de supernovas. Il détecte aussi les sources d'énergie les plus puissantes de la Voie Lactée : les trous noirs super massifs et les magnétars.

NuSTAR exploite deux optiques de type Wolter-I avec 133 miroirs paraboliques et hyperboliques cylindriques concentriques. Il est équipé de capteurs en tellurure de cadmium-zinc à haute sensibilité. Pourquoi donc est-il séparé en deux parties reliées par une sorte d'échafaudage d'une dizaine de mètres de long ? Parce que la première contient le miroir Wolter 1 et l'autre les récepteurs avec une longueur de focale très longue.

Contrairement à XMM-Newton et Chandra qui sont sur orbites elliptiques, il est placé sur orbite basse à 600 km d'altitude.

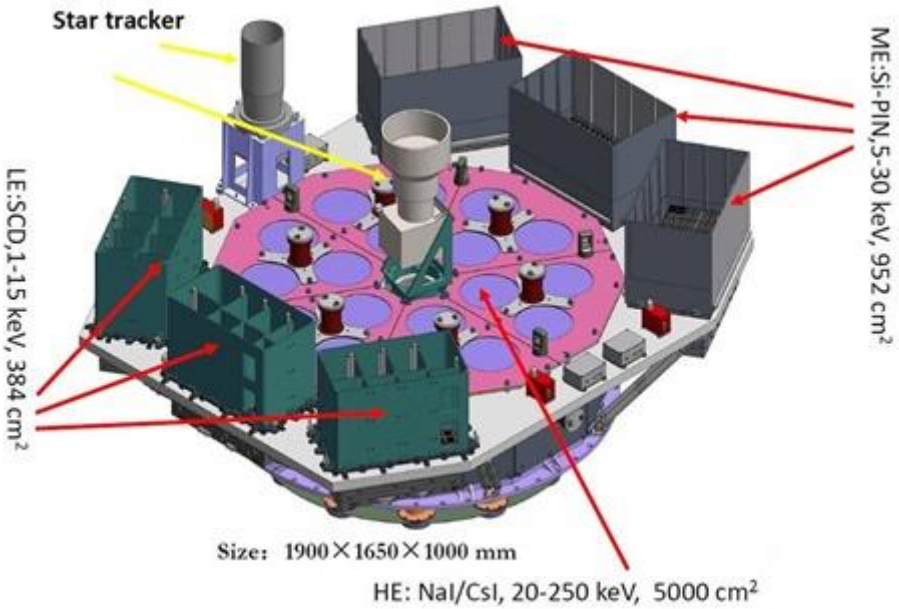
Hitomi (2016)

Egalement dénommé ASTRO-H avant son lancement, ou NeXT pour New X-ray Telescope, ce télescope japonais est placé en orbite terrestre basique à 575 km d'altitude. Il devait exploiter plusieurs télescopes à rayons X de type Wolter 1 couplés à des imageurs et spectrographes. Il couvrait les rayons X mous (0,3 à 12 keV) et durs (5 à 80 keV) ainsi que les rayons gamma mous (10 à 600 keV).

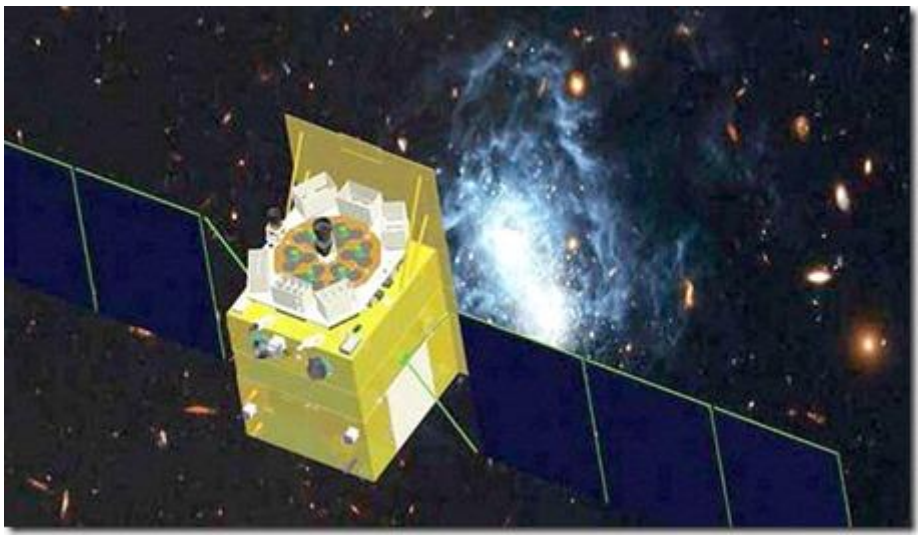
Manque de bol, son déploiement ne s'est pas passé comme prévu. Son système de navigation a mal fonctionné peu après sa mise en orbite et une cascade d'erreurs ont généré une rotation de plus en plus rapide du télescope sur lui-même, ce qui l'a démantelé et rendu hors service.

HXMT (2017 – 2021)

Ce télescope chinois a été lancé en juin 2017. Il est issu d'un partenariat technologique avec la Suisse et la Pologne. Pesant 2,5 tonnes, il est placé lancé sur orbite terrestre à 550 km d'altitude. Il est doté de trois capteurs à rayons X dans les basses, moyennes et hautes énergies.

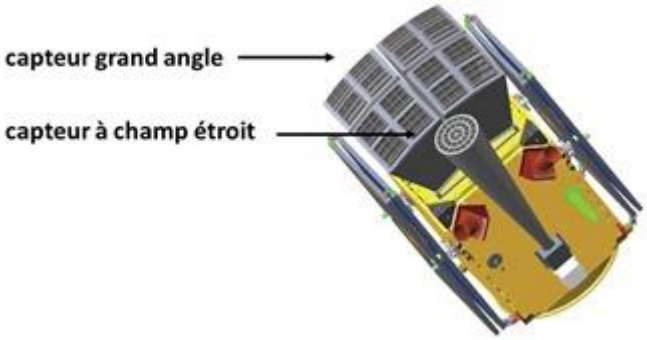


Il est dédié au scan de la Voie Lactée, à la recherche de sources brillantes, de sursauts rayons X associés à des étoiles à neutrons et des trous noirs. Il recherche aussi des trous noirs supermassifs et faiblement visibles. Comme nombre d'autres satellites, il s'intéresse aussi à la formation et à l'évolution des galaxies.



Einstein Probe (2020 – 2022)

L'Einstein Probe est un projet chinois de petit télescope à rayons X destiné à l'étude des objets transitoires et variables. Il doit couvrir les rayons X mous avec deux instruments : un télescope grand angle (36° carré) de résolution spatiale et énergétique moyenne et un télescope à champ étroit de 1° carré doté d'une meilleure résolution.



Les capteurs à rayons X du télescope utilisent des concentrateurs à galette de micro-canaux. La société française Photonis a créé le capteur du télescope à champ étroit, comprenant des pixels de 20 microns dans un chipset de 4×4 cm, soient 2Kx2K pixels.

Le satellite est léger avec ses 245 kg et sera placé en orbite terrestre à 650 km d'altitude. Il ne consomme que 45 W. C'est l'équivalent d'un smartphone face à un PC de gamer, comparativement aux gros satellites listés dans ces pages.

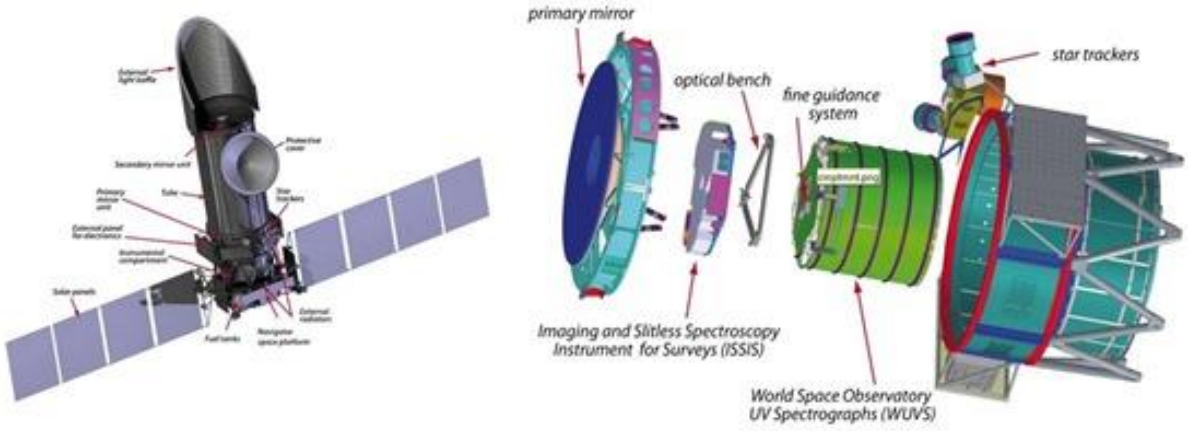
Télescopes spatiaux dans l'ultra-violet

Peu de télescopes dédiés aux observations dans l'ultra-violet ont été lancés. Nous avons vu précédemment que nombre de télescopes dédiés aux rayons gamma et rayons X avaient aussi de quoi capter l'ultra-violet.

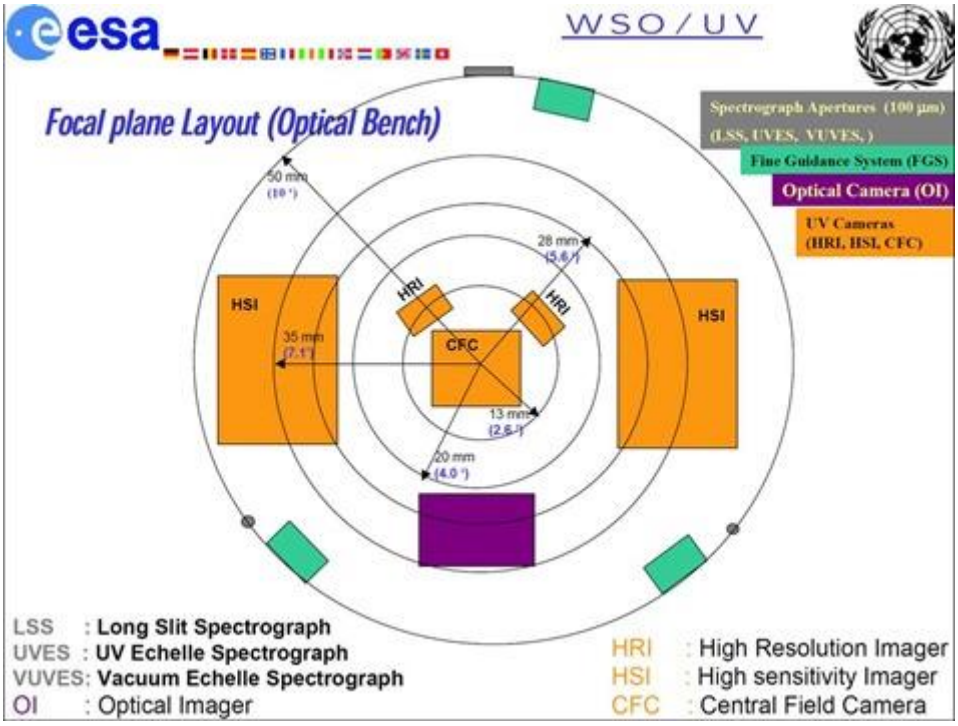
WSO-UV (2020 -202x)

Ce "World Space Observatory" à venir est un projet commun entre la Russie et l'Europe avec des participations de l'Espagne, de l'Allemagne, de l'Ukraine et de

l'Italie. Le projet a été proposé en 1997 et lancé en 1999, rappelant le long terme qui a cours dans ce milieu. Il sera installé en orbite solaire sur le point de Lagrange L2.



Pesant 2,9 tonnes, son miroir primaire fait 1,7 m, poli avec une précision de 1 nm. C'est le premier télescope construit avec une armature principale en fibres de carbone qui lui apporte légèreté et solidité. Il enverra 1 Mbits/s de données vers la Terre, sa mémoire "buffer" locale étant de 8 Go.



Ses instruments comprennent :

- **OI** (Optical Camera), une caméra dans le visible équipée de capteur CCD 4Kx4K 12 bits.
- **FGS** : un système de positionnement équipé de trois capteurs de 1Kx1K pixels.
- **HRI**, **HSI**, **CFC** : trois caméras dans l'UV faisant respectivement 1Kx1K, 1Kx1K et 2Kx2K pixels en couvrant l'UV de 115 à 310 microns.

- **HIRDES** (High Resolution Double Echelle Spectrograph) : trois spectrographes (LSS, UVES, VUVES) couvrant les longueurs d'onde de 102 à 310 nm (UV proche). La résolution spectrale des spectrographes va de 1000 à 50 000 lignes.

D'où un plan de focale, ci-dessus, qui est bien rempli !

Ses objectifs scientifiques comprennent l'exploration de la réionisaion de l'Univers après le big bang, la nucléosynthèse d'atomes plus lourds que l'hélium jusqu'au fer, la distribution de la matière baryonique (atomes, électrons, …), la géométrie, la structure et la croissance des trous noirs super massifs au centre des galaxies, la formation des étoiles, la composition chimique des galaxies etc. Il vise aussi à analyser la composition de l'atmosphère des exoplanètes par la méthode des transits, à la recherche de signatures d'une forme de vie quelconque, surtout carbonée. Ceci grâce au fait que la spectrographie des UV observés permet d'identifier les transitions électroniques de plusieurs molécules clés : CO2, CO, OH, O3 (ozone) et les PAH (hydrocarbures aromatiques).

LUVOIR (202x – 202y)

LUVOIR (Large UV/Optical/IR Surveyor) est un grand télescope à venir de la NASA qui couvre l'ultra-violet, le visible et l'infrarouge. Comme nombre de télescopes spatiaux, ses objectifs scientifiques sont variés, allant de la formation et de l'évolution des galaxies à celles des étoiles et planètes. Il vise surtout à améliorer notre connaissance des exoplanètes et surtout de celles qui seraient habitables selon nos critères.

Ses spécifications ne semblent pas encore finalisées. Il devrait avoir un miroir primaire compris entre 9 et 15 mètres, reprenant le format du JWST, mais avec un plus grand nombre de miroirs hexagonaux le constituant. Il aurait un coronographe fonctionnant dans le visible et le proche infrarouge et doté d'un spectrographe à faible résolution spectrale (150 raies) complété d'un spectrographe à haute résolution spectrale (> 100 000 raies). Puis un LUMOS, un système d'imagerie et de spectrographie couvrant tout le spectre de l'ultra-violet. Et une caméra dans le visible et le proche infrarouge à haute définition, sorte d'upgrade du WFC3 du télescope Hubble.

Au rythme où vont les choses, la première lumière de ce télescope du futur n'arrivera pas avant la fin de la décade 2020 !

Télescopes spatiaux dans les ondes radio

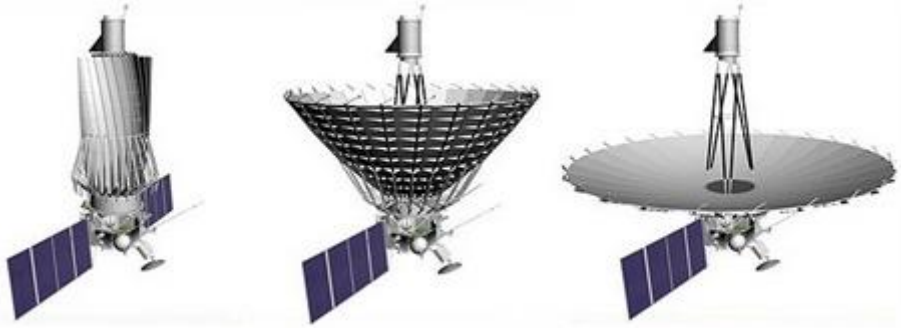
Nous avons vu dans les deux parties dédiées aux radiotélescopes que ceux-ci n'ont que faire de l'atmosphère qui laisse passer quasiment intégralement les ondes radio. Alors donc, pourquoi envoyer des radiotélescopes dans l'espace ? L'une des motivations est de créer des interféromètres à très grande ouverture couplant des antennes sur Terre et une antenne dans l'espace. On peut ainsi agrandir significativement l'ouverture d'un interféromètre reposant sur des antennes placées de part et d'autre du globe terrestre, selon l'orbite retenue. Avec en cadeau, des images radio de meilleure résolution, quoique ne changeant quasiment rien côté sensibilité car celle—ci dépend de la surface cumulée des antennes.

HALCA (1997 – 2003)

Le HALCA (Highly Advanced Laboratory for Communications and Astronomy) est un radiotélescope japonais lancé dans les années 1990 et décommissionné en 2005. Il est doté d'une antenne de 8 mètres qui était utilisée dans le cadre de l'interféromètre VLBI (traité ici). C'était le premier du genre. Il était en orbite elliptique durant 6,5 heures avec une périgée de 560 km et une apogée de 21 400 km. Il fonctionnait dans les bandes de 1,6 GHz et 5 GHz, soit des longueurs d'ondes de 16 cm et 6 cm.

Specktr-R (2011 – *)

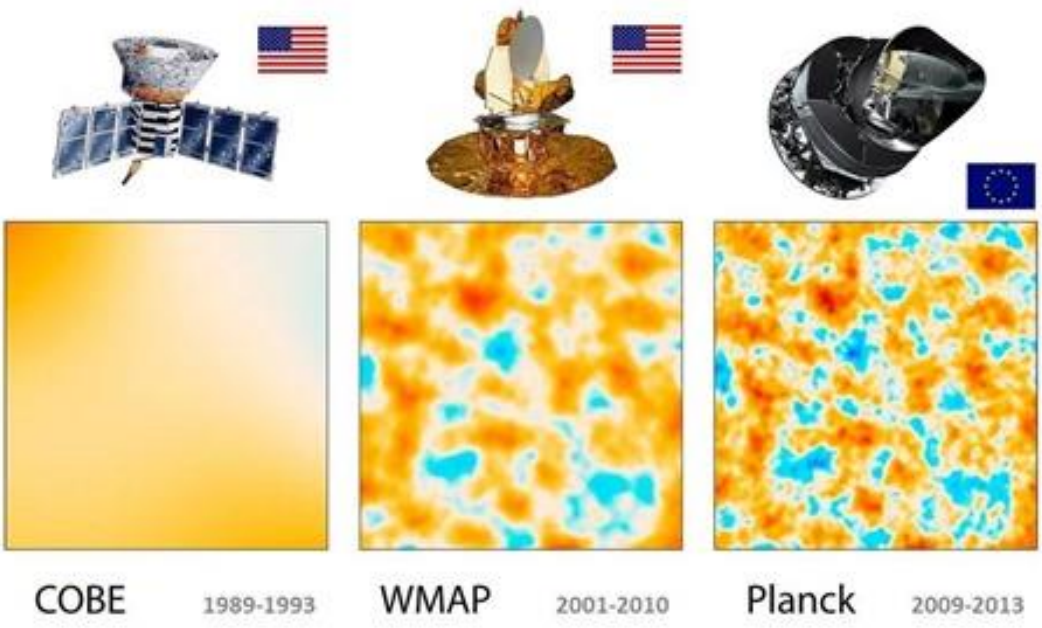
Ce radiotélescope spatial russe de 3 660 kg explore les ondes centimétriques 0,3 cm, 1,6 cm, 5 cm, 18-25 cm et 92 cm. Il est équipé d'une antenne de 10 m qui s'ouvre avec ses 28 "pétales de fleurs" recouverts d'aluminium hautement réfléchissant. Elle alimente des récepteurs d'onde radio dits "LNA", "Low Noise Amplifier".



Il permet de faire de l'interférométrie avec une bien meilleure résolution que HALCA grâce à son orbite elliptique atteignant 390 000 km en apogée, soit un peu plus que la distance Terre-Lune. Il transmet ses données à un maximum de 144 Mbits/s sur 15 GHz lorsqu'il est en périgée à 10 000 km de la Terre.

Planck (2009 – 2012)

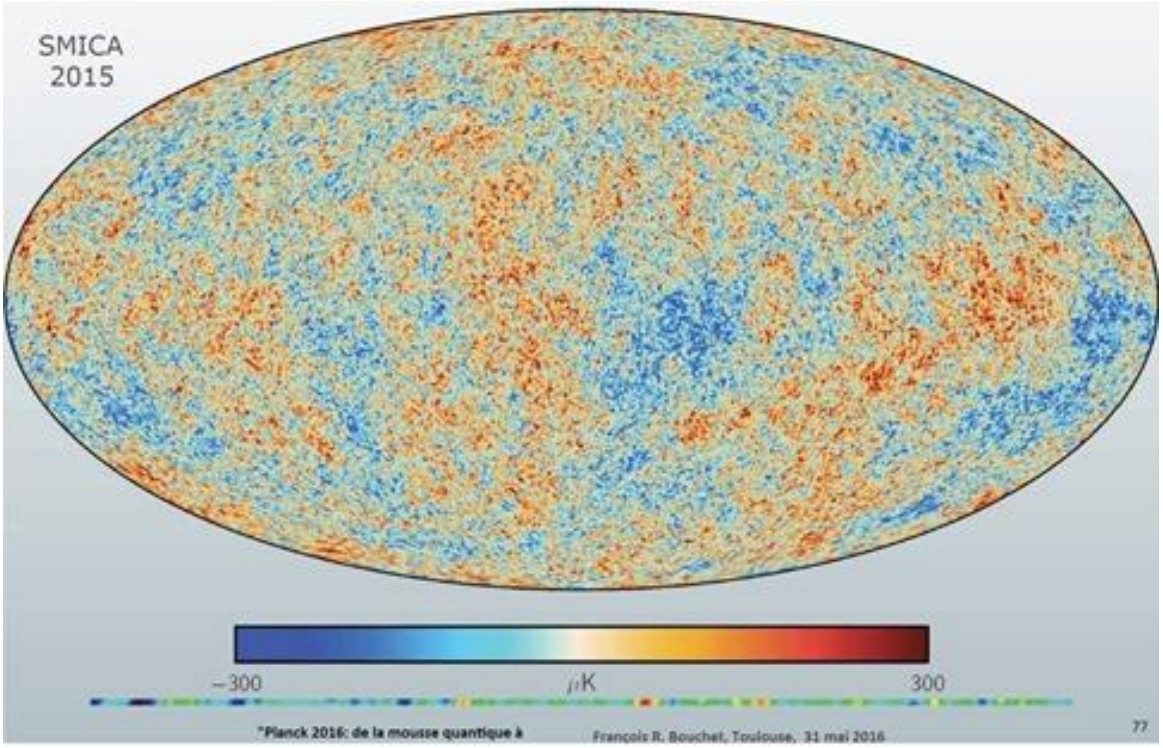
Planck était un observatoire spatial de l'ESA et la NASA dont l'objectif était de cartographier les variations de température du fond diffus cosmologique dans les micro-ondes, ou rayonnement fossile, illustrant l'état de l'univers 380 000 ans après le big bang. Il faisait suite à deux télescopes dont c'était aussi la mission : **COBE** (années 1980) et **WMAP** (2001). Son instrument principal, le HFI, était bien plus précis que celui de ses deux prédécesseurs (cf la comparaison *ci-dessous*). Planck a été construit à Cannes – Mandelieu chez Thales Alenia Space.



Les deux instruments de Planck sont le LFI (Low Frequency Instrument) et le HFI (High Frequency Instrument). Ils détectent l'intensité et la polarité des photons captés dans les micro-ondes allant de 30 (1 cm) à 857 GHz (300 microns) et valident le pic des ondes primordiales situé à 160,2 GHz (1,9 mm).

Le HFI était refroidi à 0,1 K pour réduire toute influence du bruit provenant de l'instrument, d'où sa durée de vie limitée par ses réserves de liquide pour la cryogénie, un refroidissement passif étant largement insuffisant pour obtenir cette température. Le télescope faisait 4,2 x 4,2 m et pesait 2 tonnes. Il consommait 1600 W générés par ses panneaux photovoltaïques. Son miroir faisait 1,5 m. Planck était positionné en orbite solaire sur le point de Lagrange L2.

Après sa collecte de données sur plusieurs années, cartographiant tout le ciel, les résultats compilés ont été publiée par étape de 2013 à 2015 (cf la grande carte d'anisotropie *ci-dessous*). Ils confirmèrent les principales théories sur la naissance et l'évolution et l'inflation de l'Univers, sur son âge et sa composition initiale.



L'anisotropie du fond diffus cosmologique s'explique notamment par l'accrétion de matière noire. Le décalage par effet Doppler vers le rouge ou le bleu (en fait, vers des longueurs d'onde plus grandes ou plus courtes, pas dans le visible) fournit des indications sur la dimension accrétions, et de l'ordre de seulement 1°. Ces variations s'expliquent aussi par les fluctuations quantiques des débuts de l'Univers. Les ondes gravitationnelles générées par les débuts de l'Univers polarisent les photons du fonds diffus, et cette polarisation était détectée par Planck. Elles permettent de faire ensuite le lien avec les études sur la structure en filaments des amas de galaxies.

Ceci étant, lorsque l'on améliore la résolution des recherches avec d'autres instruments, le bruit cosmologique révèle des galaxies très éloignées, remettant en cause la notion même de fonds diffus (source : cours du Collège de France 2008/2009 : "Exoplanètes, étoiles et galaxies : progrès de l'observation", selon le programme HerMES.

CoRE (2025-2028)

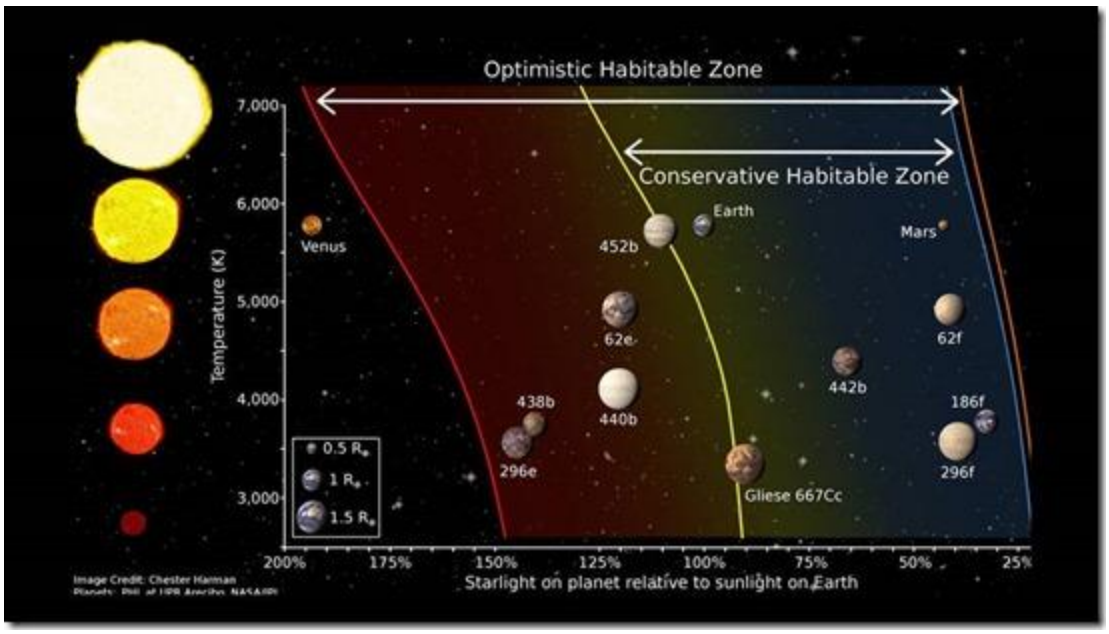
Cosmic ORigin Explorer veut aller plus loin et plus précisément que Planck pour remonter aux origines de l'Univers. Il aura un miroir de 11 m et 49 bolomètres à 44 GHz, 4 à 140 GHz, 7 bolomètres multi mode à 140, 220 et 240 GHz. Il fonctionne dans les ondes millimétriques et capte leur polarisation. Il aura une faible durée de vie à cause de la cryogénisation d'une partie des instruments à 0,1K, comme Planck. Le budget de CoRE est estimé à 550 M€. Mais 2025, c'est loin. Après la fin d'un hypothétique second mandat de Donald Trump et après le JO de Paris ! C'est dire ! L'échelle scientifique dépasse de loin l'échelle politique et sportive !

Exoplanètes

Dans les épisodes précédents de cette longue série sur l'astronomie, ses technologies et ses entrepreneurs, nous avons surtout fait le tour de tous les télescopes imaginables : **terrestres dans le visible**, **terrestres dans les ondes radio** puis les télescopes spatiaux dans toutes les ondes électromagnétiques imaginables (**visible**, **infrarouge**, **autres**). A chaque fois, j'ai rapidement décrit les objectifs scientifiques de ces grands instruments. Deux objectifs revenaient quasiment systématiquement : d'un côté, remonter aussi loin que possible dans l'histoire de l'Univers pour en comprendre l'origine, la formation et l'évolution, et de l'autre, participer à une course effrénée et relativement récente aux exoplanètes, de préférence similaires à la Terre.

Cette recherche est en effet incessante depuis deux décennies. La première découverte d'exoplanète remonte à 1995. Elle a été réalisée par une équipe franco-suisse pilotée par Michel Mayor et Didier Gueloz de l'Université de Genève et en exploitant l'Observatoire de Haute-Provence, situé près de Forcalquier et équipé de divers télescopes, dont un de 1,93 m dont le spectrographe a servi à cette découverte. C'était une planète géante située autour de Pegasi 51, une étoile de type voisine du Soleil située à 51 années-lumière de la Terre et dont l'orbite est de seulement 4 jours. La découverte a été réalisée en s'appuyant sur la méthode de la vitesse radiale, exposée plus loin. La planète découverte fait la moitié de la masse de Jupiter. En juillet 2017, selon la NASA, 3496 exoplanètes avaient été détectées autour de 2606 étoiles, dont une toute petite proportion qui ressemblent à la terre. Le décompte sur Wikipedia du 30 juin 2017 est de 3502 exoplanètes. Les données peuvent varier d'une source à l'autre car certaines exoplanètes candidates peuvent être comptabilisées et augmenter ces valeurs.

Les recherches ont en effet d'abord démarré sur les grosses planètes autour de grandes étoiles, du fait de la sensibilité des instruments utilisés et des méthodes de recherche passant au départ sur la méthode des transits. Avec les progrès techniques, l'exploration a permis d'identifier des exoplanètes telluriques de plus petite taille et ressemblant le plus possible à la Terre. Elles sont situées dans la zone dite habitable autour de leur étoile, permettant notamment à l'eau d'y exister à l'état liquide et à une atmosphère de s'y développer. Cette zone est parfois dénommée la zone Goldilocks en référence à un **conte d'enfants** anglais du 19e siècle**.** On arrive progressivement à classifier les étoiles en fonction de la probabilité d'y trouver des planètes telluriques et gazeuses en orbite.



Pourquoi toutes ces recherches ? C'est le résultat d'une quête qui peut paraitre insensée. Il s'agit soit de découvrir des sources de vie extraterrestres, soit des planètes où celle-ci pourrait se développer, voir d'identifier une planète cible pouvant hypothétiquement permettre à l'humanité de s'y installer. Une sorte de "planète B". Ce d'autant plus que la vie sur Terre n'y sera pas éternelle. Elle est menacée à court terme par le réchauffement climatique – qu'il soit induit ou pas par les activités humaines – et à plus ou moins long terme par diverses catastrophes sismiques, par la chute d'un astéroïde géant qui arrive environ tous les 100 millions d'années, ou par l'arrêt progressif du magnétisme terrestre qui nous laissera sans protection face au vent solaire qui dispersera dans l'espace notre atmosphère. Enfin la vie sous quelle que forme que ce soit ne sera plus possible sur Terre d'ici quelques milliards d'années, le Soleil devant gonfler et engloutir la Terre sachant que, bien avant, la Terre aura tellement réchauffé qu'il sera impossible que la vie y perdure.

Mis à part le réchauffement climatique actuel, ces divers évènements vont se produire sur une échelle de temps cosmique bien supérieure aux échelles de temps de notre civilisation. Homo sapiens a quelques centaines de milliers d'années au compteur. La civilisation humaine organisée n'en a que quelques milliers. Nous avons surtout besoin de répondre à une question existentielle : sommes-nous le seul monde vivant dans l'Univers ou tout du moins dans la Voie Lactée ?

Pour ce qui est de la conquête, nos ambitions se heurtent à un problème épineux de distance. Il est pour l'instant insurmontable. Quelle est en effet la distance nous séparant de la planète ressemblant le plus à la Terre et qui soit la plus proche du système solaire ? Au mieux, elle est de plusieurs dizaines d'années-lumière. Pour y voir ce qu'il y a sur place avec une sonde, il faudrait 20 000 fois ce nombre d'années. C'est à peu de choses près la vitesse de déplacement des sondes Voyager 1 et 2 qui, après quarante ans de parcours, en sont à peine sorties du système solaire au niveau de l'héliosphère. La sonde spatiale la plus rapide ayant été pour l'instant créée est Helios 1, lancée en 1974 et qui navigue, maintenant inactive, avec ses 370 kg, autour du Soleil à 70 km/s, ce qui donne 0,02% de la vitesse de la lumière (ou 1/4285 fois).

Pour ce qui est d'y envoyer un vaisseau spatial avec de vrais gens, on n'a à ce jour pas la moindre idée de la manière de s'y prendre dans un temps raisonnable et en maintenant en vie son équipage sur une telle durée, même en hibernation, ou de subvenir aux besoins vitaux de centaines de générations d'hommes et de femmes qui se reproduiraient de génération en génération pendant ce laps de temps. Ce d'autant plus que cette reproduction serait fortement exposée aux rayons cosmiques, connus pour leur effet délétère sur l'ADN.

Qui plus est, l'énergie à mettre en œuvre, par exemple avec un système de propulsion à antimatière, seul capable d'accélérer un vaisseau autour de quelques pourcents de la vitesse de la lumière, nécessiterait probablement un multiple de la consommation annuelle d'énergie humaine. On peut aussi s'arque-bouter sur des hypothèses de science-fiction du style trou de ver ou autres, tels que vus dans Interstellar. Et de dire : on ne sait pas prédire à l'avance ce que l'Homme va inventer, donc on ne sait jamais ! Déménager la population terrestre vers une planète de rechange relèvera encore très longtemps de la science-fiction. Mais notre soif de connaissance reste difficile à rassasier. On continue donc de dépenser des milliards d'Euros et de dollars pour découvrir des exoplanètes.

Cela génère d'ailleurs une petite concurrence entre astronomes. Certains sont spécialisés dans l'étude des galaxies, pulsars, quasars et des débuts de l'Univers. D'autres sur les exoplanètes. Les premiers jugent curieux que des instruments très chers et polyvalents tels que le JWST soient aussi utilisés pour rechercher des exoplanètes alors que leur temps d'usage est extrêmement contingenté. Les chercheurs d'exoplanètes trouvent de leur côté que leur discipline a un côté plus "appliqué" même si c'est, comme nous l'avons vu, une vue de l'esprit.

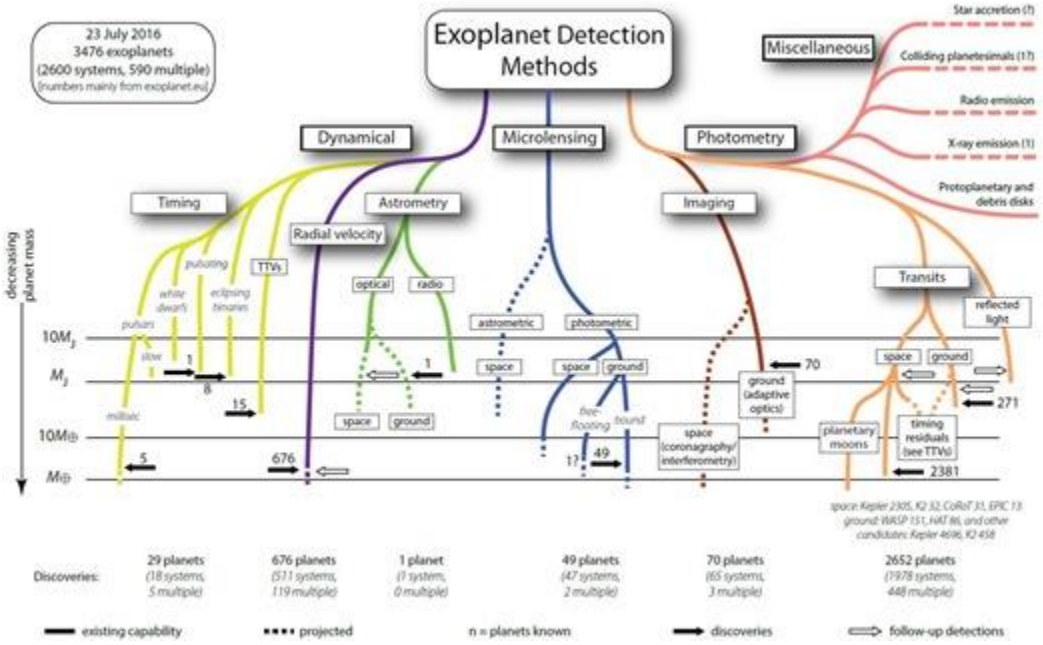
Et Mars ? C'est la première planète sur laquelle poser le pied. Mais elle n'est franchement pas très accueillante. Elle n'a pas quasiment pas d'atmosphère, sa gravité y est du tiers de celle de la Terre, la météo se résume à des tempêtes de poussière, et il y fait en moyenne -55°C avec comme extrêmes -145°C et +25°C. Et il faut au minimum six mois pour s'y rendre avec de quoi survenir aux besoin d'un équipage, et lui permettre de redécoller de Mars pour revenir sur Terre, ce qui est plus compliqué que sur la Lune car la gravité y est plus forte. Mais faute de mieux, c'est bien là que nous irons un jour.

Mais vous pouvez faire le voyage vers l'exoplanète de votre choix avec votre ordinateur et ce beau logiciel de la NASA développé par l'université Caltech : **NASA's Eyes**. Vous avez ci-dessous une copie d'écran de la visualisation des exoplanètes détectées avec le télescope spatial Kepler.

Les méthodes de recherche d'exoplanètes

En attendant l'interminable voyage, revenons aux techniques de détection des exoplanètes. Comme dans les autres parties de cette série d'article, je m'intéresse beaucoup au "comment" technologique des découvertes que les médias relaient régulièrement.

Ces techniques mettent en œuvre tout l'attirail que nous avons déjà vu et une belle panoplie d'astuces techniques insoupçonnables. Le schéma ci-dessous en fait un bon inventaire. Il indique notamment la proportion des découvertes par méthode, mettant nettement en avant la méthode des transits. Quelques sites comme **exoplanets.org** et **exoplanet.eu**proposent des inventaires à jour des exoplanètes candidates et détectées



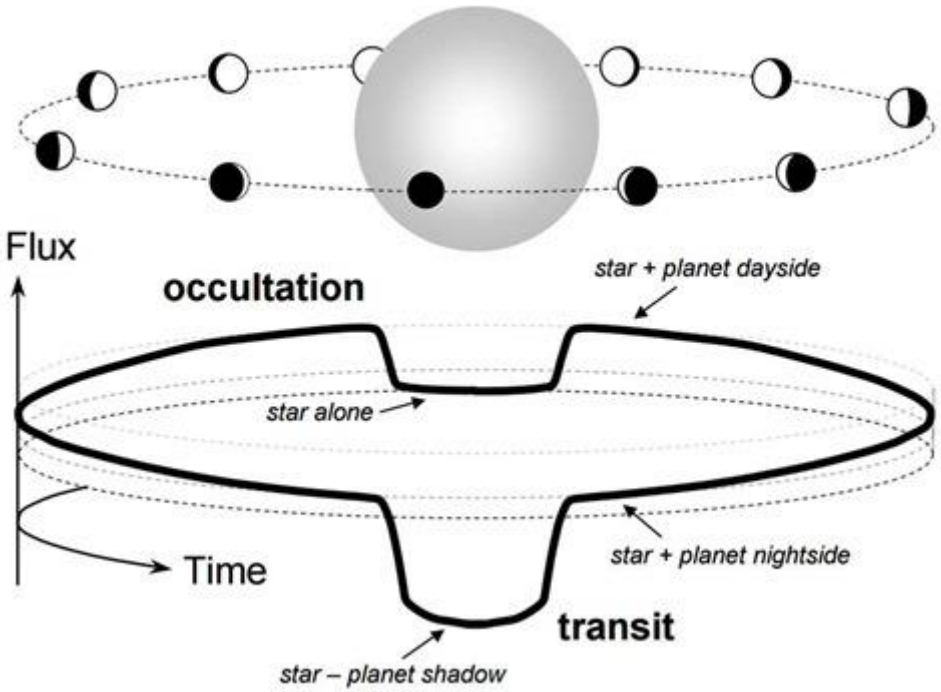
La détection des exoplanètes est rendue difficile par la grande différence de luminosité entre elle et leur étoile. Dans le cas de Jupiter qui est la plus grande planète du système solaire, le différentiel de luminosité planète/étoile est de 1 pour 460 millions ! Ce décalage de luminosité est cependant mille fois moins important dans l'infrarouge que dans le visible, d'où l'intérêt des télescopes spatiaux comme le JWST pour mener ce genre d'observations.

La majorité des méthodes de détection d'exoplanètes est indirecte. On observe surtout l'impact qu'elles ont sur leur étoile au niveau de leur luminosité (méthode des transits), dans leurs mouvements (astrométrie) ou leur variation spectrale par effet Doppler (vitesse radiale). Les premières planètes observées étaient des planètes géantes gazeuses type Jupiter, de taille comparativement élevée par rapport à leur étoile. Avec l'amélioration des techniques d'observation, la taille minimale des exoplanètes observées a graduellement baissé. On est passé au stade des "super-Terres", des planètes telluriques faisant entre une et dix fois la masse de la Terre. On est aujourd'hui capable d'observer des planètes de taille comparable à celle de la Terre, ce qui permet de commencer à chercher des planètes dites habitables. Et si possible, avec une atmosphère et une gravité similaires à celles de la Terre.

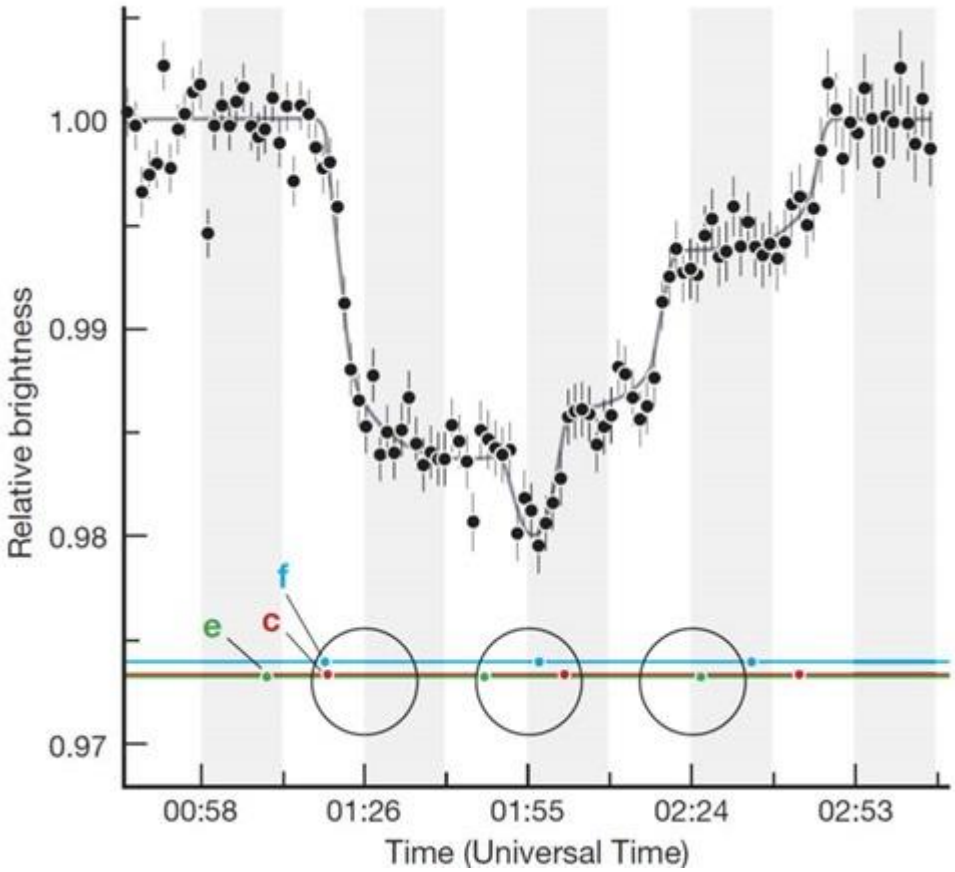
Plus on se rapproche des caractéristiques de la Terre, plus on ajoute de critères : la durée de l'orbite (si possible proche de l'année), l'inclinaison de la rotation (qui se mesure notamment par polarimétrie), l'existence d'océans (qui pourrait être détectés également par polarimétrie car l'eau réfléchie par les océans peut être polarisée, **source**), d'eau et d'oxygène dans l'atmosphère (mesurable par spectrographie) ou encore celle d'un champ magnétique généré par un noyau ferreux en fusion et en rotation (qui se détecte en analysant la composition de l'atmosphère, **exemple**).

Méthode des transits

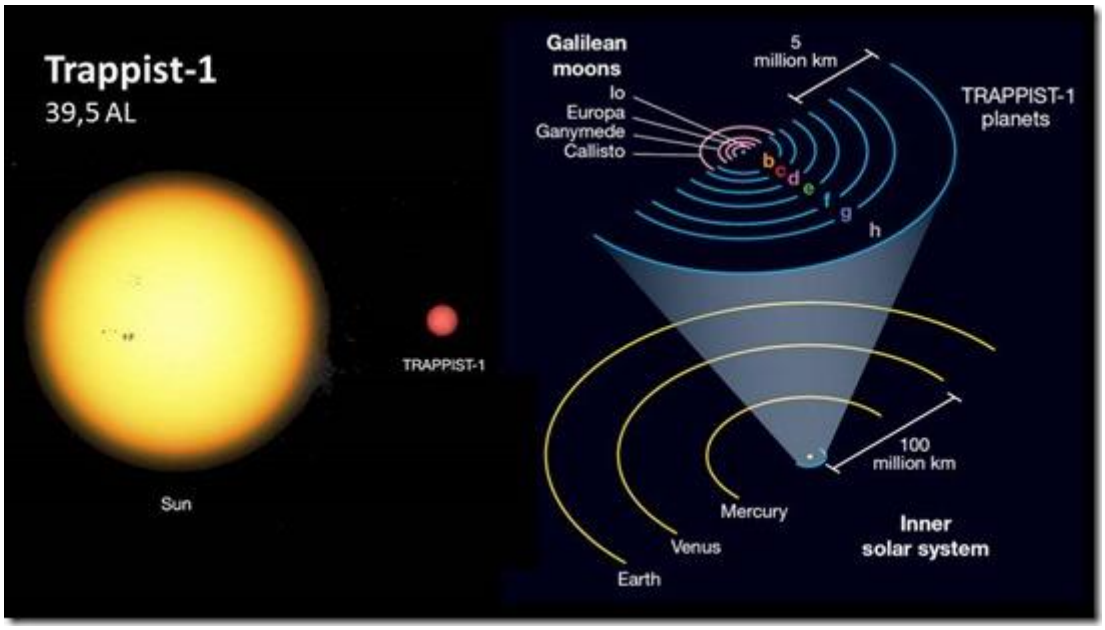
C'est la méthode la plus courante depuis une quinzaine d'années puisqu'elle correspond à 78% des découvertes. Elle s'appuie sur l'analyse des très légères variations de la lumière apparente des étoiles observées via la technique de la photométrie. Lorsqu'une planète passe devant l'étoile, celle-ci s'obscurcit car la planète occulte avec son diamètre une partie de la surface de l'étoile. Pour que cela fonctionne, il faut que l'orbite de la planète croise la ligne qui relie notre Terre à cette étoile. Il faut aussi que la planète soit suffisamment grande pour que nos instruments détectent la légère variation de luminosité de l'étoile. Lors que la planète passe derrière l'étoile, la luminosité de l'ensemble baisse également car la planète qui renvoyait la lumière provenant de l'étoile ne le fait alors plus. Le schéma ci-dessous explique cela très bien. La variation de luminosité observée est située autour de 1 à 2% pour les planètes géantes.



Et la voici appliquée à l'étoile **Trappist**, une naine blanche située à 39,5 années-lumière du Soleil, ou pas moins de 7 planètes y ont été découvertes par cette méthode. Les variations de luminosité sont très faibles. Ici, elles ne sont que de 1% à 2%. Elles peuvent être encore plus faibles si les planètes sont très petites [source : Sky & Telesccope, juin 2017].



Le plus fort dans la méthode des transits est qu'elle permet aussi de déterminer le diamètre approximatif des planètes, grâce à la durée de la pente de luminosité qui se produit lorsque la planète rentre ou sort du diamètre de l'étoile. S'il y a plusieurs pentes, cela signifie que plusieurs planètes passent devant l'étoile. Trappist est une toute petite étoile comparativement au Soleil, proche de la taille de Jupiter. Ses planètes sont donc à une distance très courte de l'étoile. La méthode des transits est en effet plus efficace pour trouver des planètes de grande taille par rapport à leur étoile, et ayant une orbite relativement proche de leur étoile.



On déduit beaucoup de choses sur les exoplanètes et leur étoile avec cette méthode, comme la durée de l'orbite des planètes via la fréquence de répétition du signal. La taille de la planète sera déduite de la variation du signal. En associant la photométrie qui étudie la variation de luminosité de l'étoile, à de la spectrographie qui décompose son spectre lumineux avec ou sans la planète devant elle, on va pouvoir en déduire la composition de l'étoile et de l'atmosphère des planètes étudiées. L'analyse peut se faire dans le visible ou dans d'autres longueurs d'ondes, surtout dans l'UV et l'infrarouge. Les ondes extrêmes (gamma, X, radio) sont peu utilisées dans cette méthode.

La majorité des découvertes récentes d'exoplanètes a été réalisée par des télescopes spatiaux et en particulier avec Kepler, et environ un cinquième par des télescopes terrestres.

Les techniques de Machine Learning peuvent ici intervenir pour analyser la luminosité de milliers d'étoiles cibles et identifier celles dont la variation ressemble à celle qui est générée par une ou plusieurs planètes. Ces méthodes permettent de regrouper les timelines lumineuses des étoiles pour identifier les transits. Puis, elles identifient et quantifient les transits eux-mêmes. Le Deep Learning et les réseaux neuronaux sont tout juste en train de faire leur apparition pour améliorer la technique [cf **Searching for Exoplanets using Artificial Intelligence** de juin 2017].

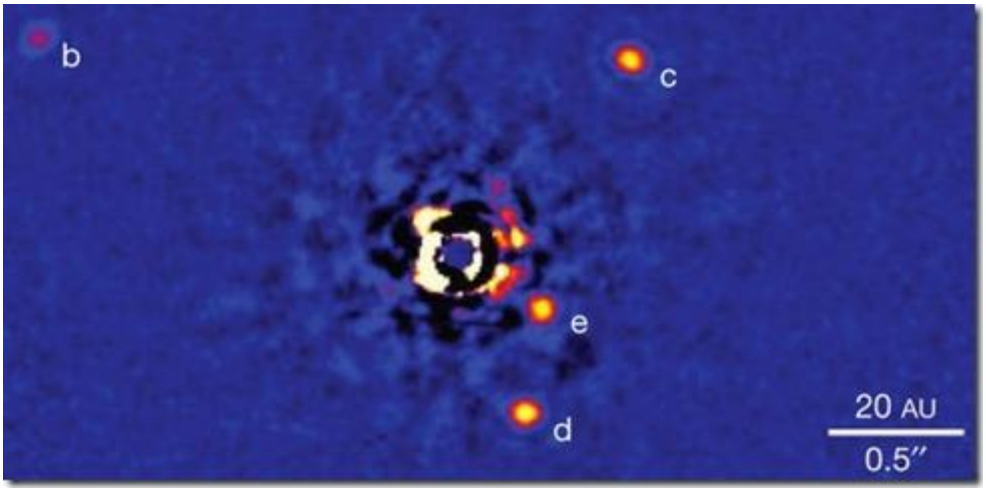
MNRAS 000, 1–15 (2017) Preprint 15 June 2017 Compiled using MNRAS LaTeX style file v3.0

Searching for Exoplanets using Artificial Intelligence

Kyle A. Pearson,* Leon Palafox, and Caitlin A. Griffith
Lunar and Planetary Laboratory, University of Arizona, 1629 East University Boulevard, Tucson, AZ, 85721, USA

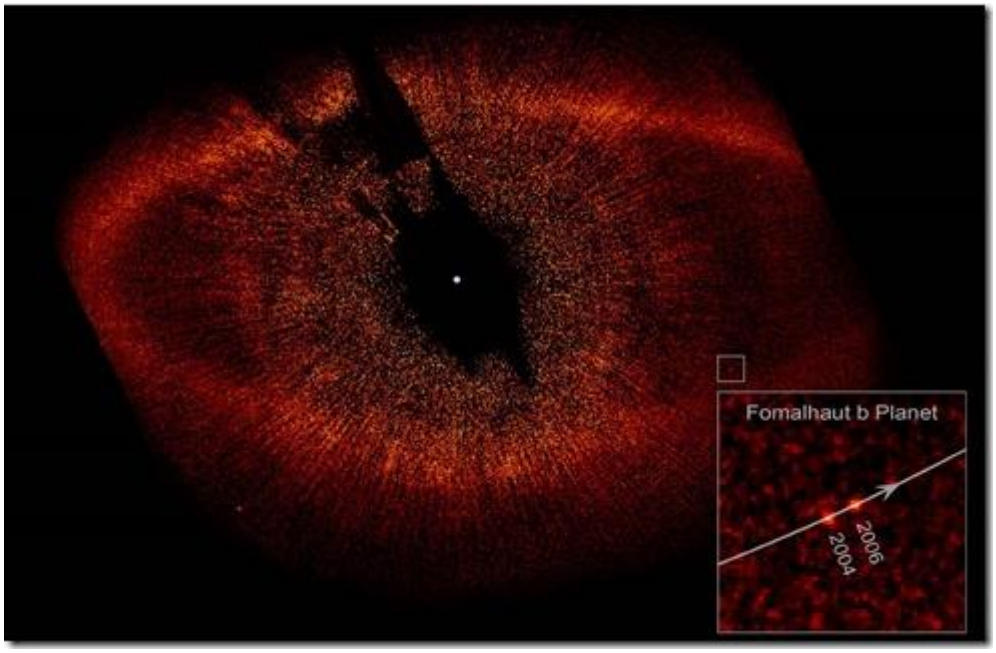
Imagerie directe

Une seconde méthode consiste à visualiser directement les exoplanètes par imagerie. On utilise pour cela le principe de la coronographie ou de l'interférométrie. La coronographie consiste à occulter l'étoile observée avec un masque pour faire apparaitre son entourage. L'image est fortement dégradée par les phénomènes de diffraction optique autour du masque du coronographe. Les traitements numériques permettent de supprimer le bruit et les ondelettes associées et de faire apparaitre une ou plusieurs planètes.

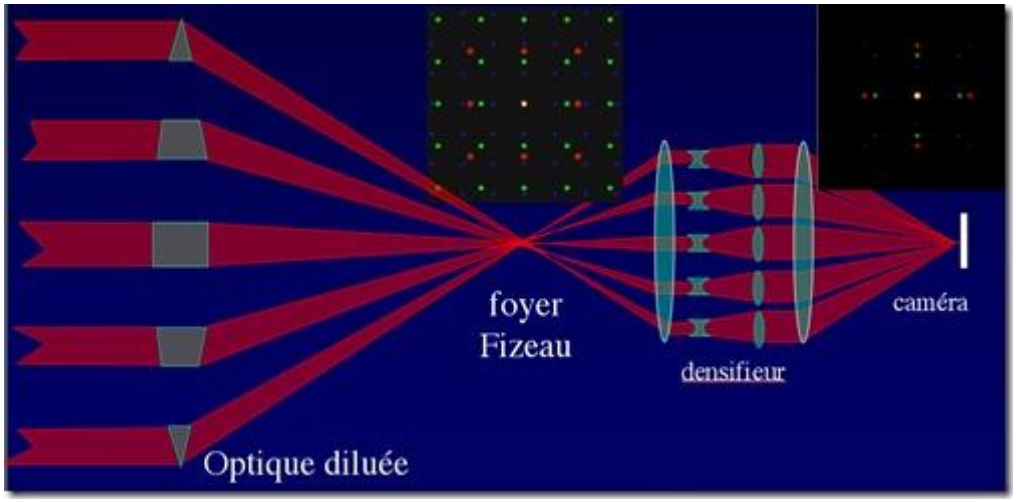


On utilise généralement cette méthode après avoir détecté une étoile à exoplanète avec la méthode des transits. Les télescopes terrestres comme spatiaux sont utilisés dans cette tâche. Cela nécessite une grande précision de pointage dans la durée vers l'étoile analysée.

Voici un autre exemple capté par Hubble en 2008, une planète détectée autour de l'étoile Formalhaut, située à 25 années-lumière.



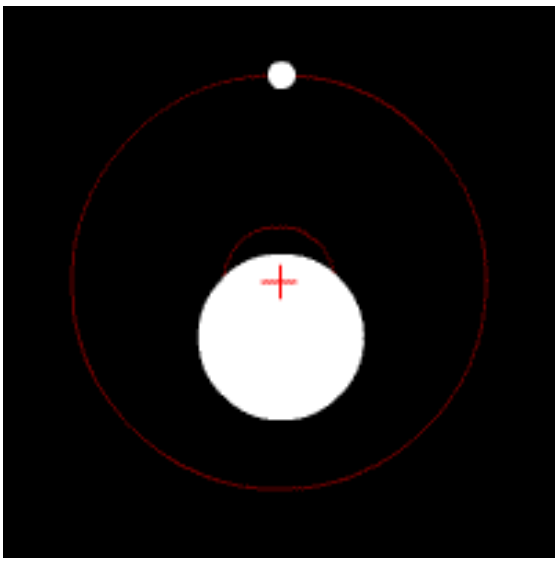
Une variante de l'interférométrie dans le visible est aussi mise en œuvre dans les hypertélescopes, un concept promu en particulier par les astronomes français. Il s'agit d'un interféromètre opérant dans le visible qui recombine de manière optique les images provenant de plusieurs télescopes ou miroirs. Elle génère une image à haute résolution angulaire.



A ce jour, seules 1,3% des exoplanètes ont été identifiées avec cette méthode.

Vitesse radiale

Lorsqu'une ou plusieurs planètes tournent autour d'une étoile, leur centre de gravité commun est stable mais les planètes comme l'étoile bougent autour de ce centre de gravité. Le mouvement est elliptique et ample pour les planètes. Les étoiles se déplacent également légèrement autour de ce centre de gravité pour compenser le mouvement des planètes autour d'elles. Le GIF animé ci-dessous illustre le phénomène vu de dessus.



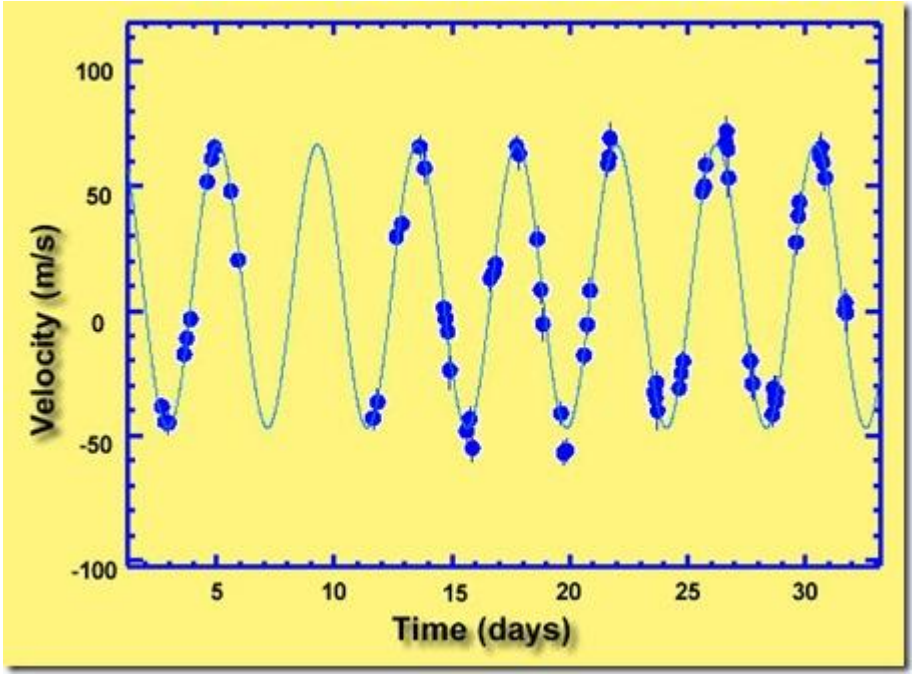
Cela conduit l'étoile à bouger sur un tout petit cercle ou une toute petite ellipse et donc à s'éloigner et à se rapprocher de nous à faible dose si le plan de l'orbite de la planète croise le vecteur reliant notre Soleil à l'étoile (la vue de dessus, vue de la tranche). On peut mesurer ce mouvement via l'effet Doppler de la lumière émise par l'étoile. Avec un spectrographe doté d'une résolution spectrale élevée, on va ainsi pouvoir détecter ces légers mouvements des étoiles et en déduire la présence d'exoplanètes. Cette méthode fonctionne lorsque le plan des orbites des planètes croise la ligne reliant l'étoile au point d'observation. On voit en gros le système planétaire par la tranche.

Cette méthode comme la suivant présente aussi l'intérêt de permettre l'évaluation de l'excentricité de l'orbite des planètes. Une orbite excentrique est elliptique. Et une orbite elliptique est plutôt éliminatoire pour l'émergence d'une vie sur cette planète du fait des trop fortes variations de température que ce type d'orbite génèrerait.

C'est la seconde méthode après celle des transits en terme d'exoplanètes détectées, avec 18% d'entre elles.

Astrométrie

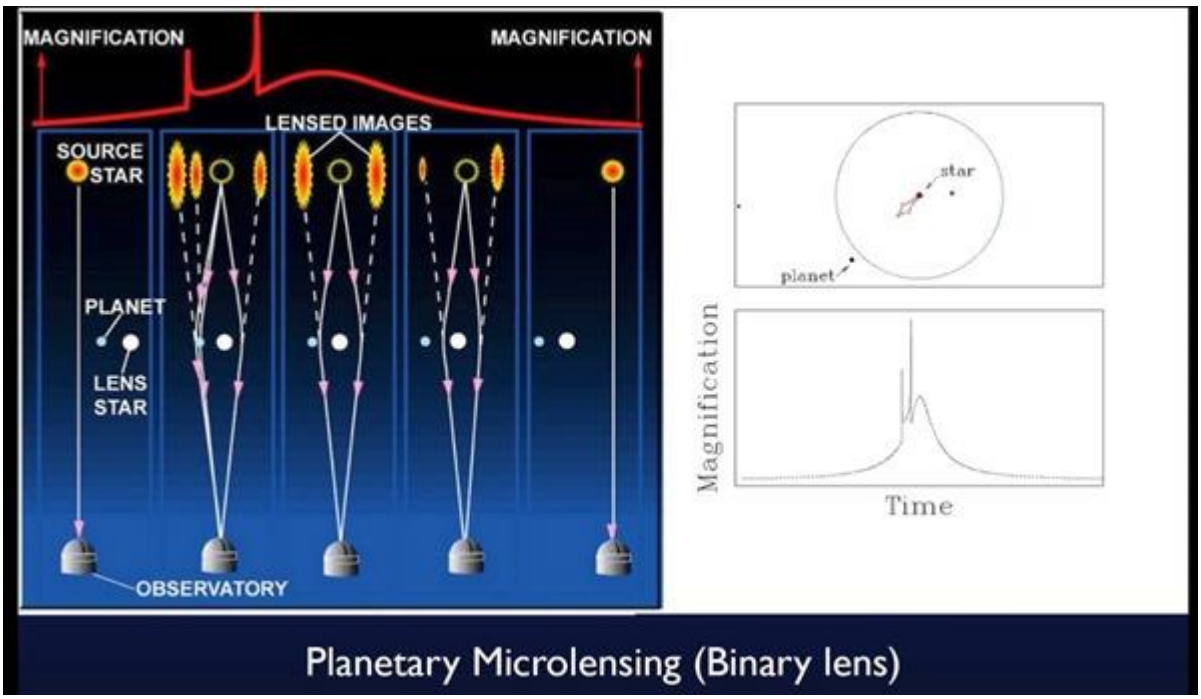
Cette méthode complète la précédente et s'applique dans le cas où l'on observe un plan de système planétaire par le dessus comme dans le GIF animé ci-dessus. Du fait des effets de la gravité liant l'étoile à ses planètes, l'étoile suit un mouvement elliptique léger que l'on détecte en appréciant les très faibles mouvements cycliques des étoiles. Cela demande des instruments très précis. En 2016, seule une exoplanète avait détectée via cette méthode. Ce n'est pas la gloire !



La période de l'orbite permet d'identifier la distance entre la planète et l'étoile et l'amplitude permet de déterminer la masse de la planète. Des amplitudes irrégulières peuvent témoigner d'une orbite elliptique. Ce type d'orbite est plus courant que les orbites circulaires qui ont court dans le système solaire. Les orbites elliptiques sont très peu favorables au développement de la vie, du fait des grandes variations de température qu'elles doivent entrainer sur leur planète.

Lentilles gravitationnelles faibles

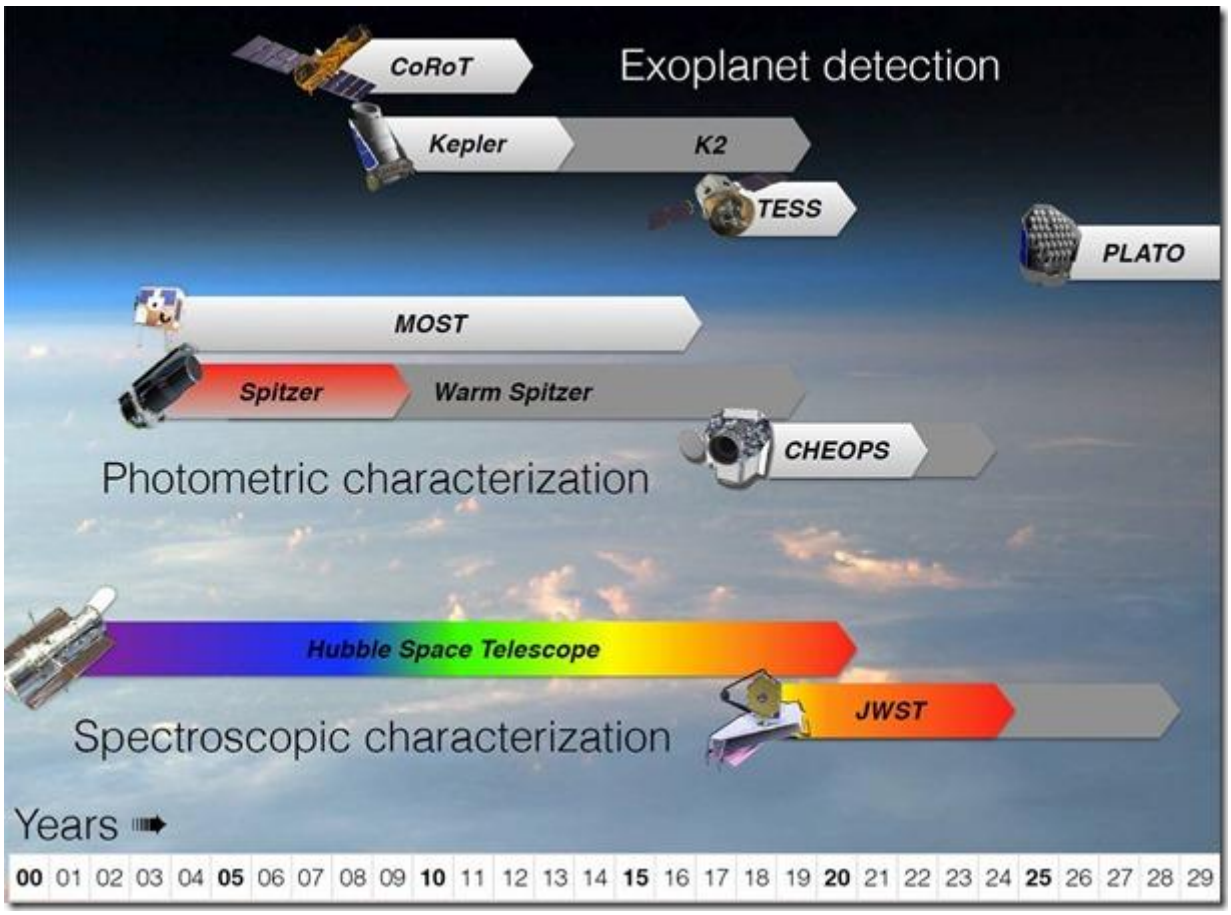
C'est une variante de l'imagerie directe qui utilise les variations d'effet de lentille gravitationnelle générés par l'étoile observée et ses exoplanètes, appliqués à une autre étoile qui serait située derrière l'étoile dont on recherche des exoplanètes. Une lentille gravitationnelle est une étoile ou une galaxie de forte masse qui déforme les rayons lumineux issus de l'étoile et de ses planètes. On parle ici de micro lentille gravitationnelle car la variation de cet effet dû au mouvement des planètes est infinitésimale. On a à ce jour détecté quelques dizaines d'exoplanètes par ce biais [source du schéma : **Astrophysics Introduction 7B**].



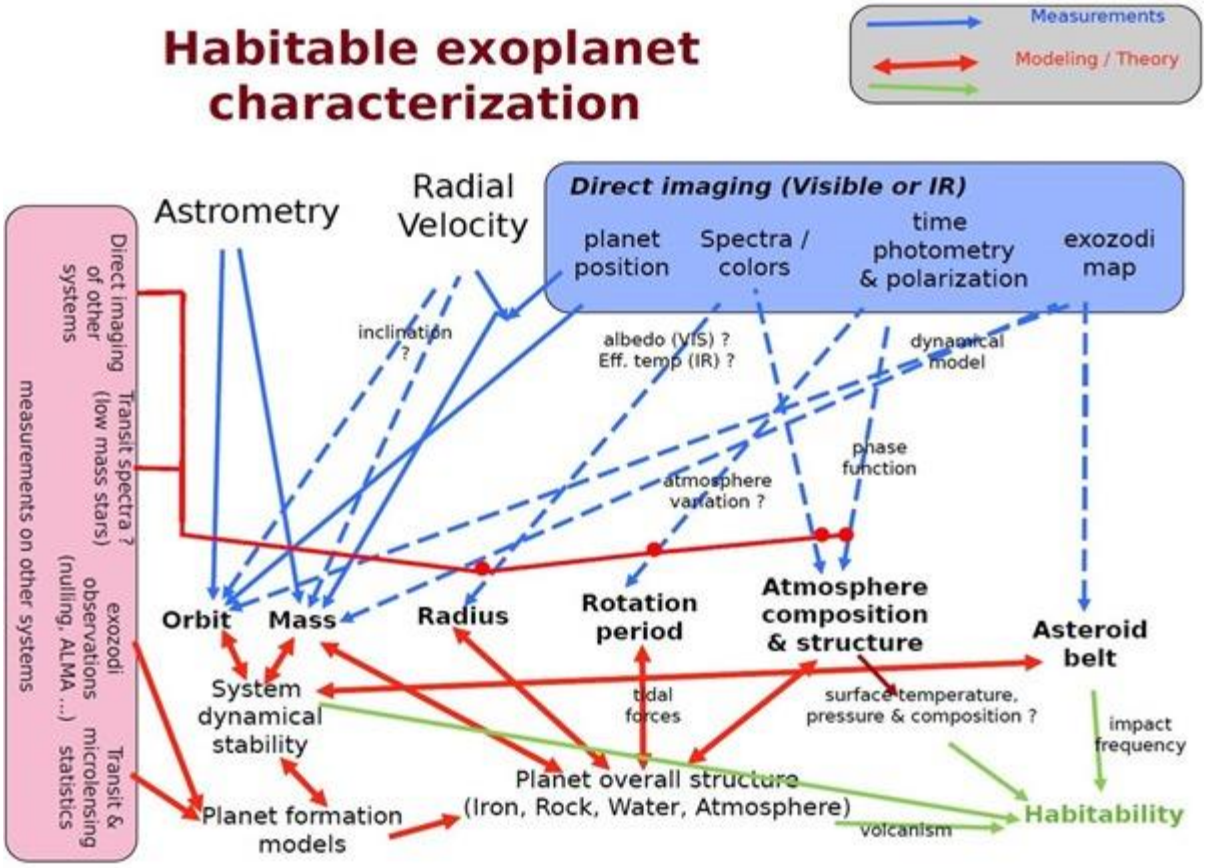
Cette méthode a été employée en 2005 par une astronome amateur, Jennie McCormick de Nouvelle Zélande, avec son propre télescope, un Meade LX200 ACF de 14 pouces (miroir de 36 cm), qui lui a permis de découvrir une vingtaine d'exoplanètes. 1,3% des exoplanètes ont été découvertes avec cette méthode.

La combinaison des méthodes de recherche d'exoplanètes

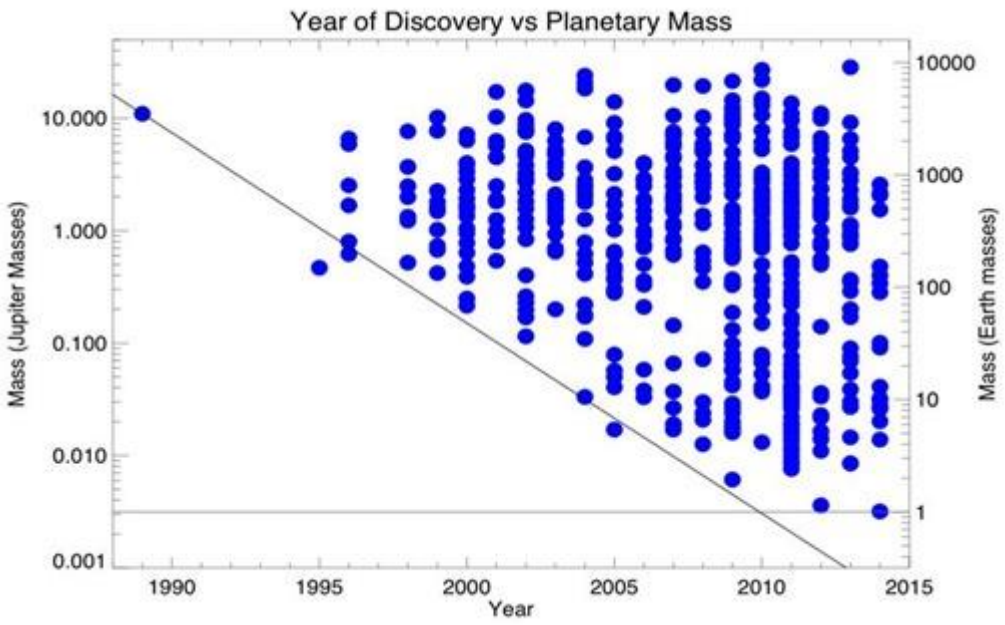
Différents télescopes sont régulièrement associés à ces recherches d'exoplanètes. Les télescopes spatiaux comme Kepler servent en général à identifier l'existence d'exoplanètes. Suivent des télescopes permettant de réaliser de la photométrie sur les étoiles pour mieux caractériser les exoplanètes. Puis la spectrographie réalisée par des télescopes terrestres, avec Hubble et bientôt, le JWST que nous avions décortiqué dans un épisode précédent.



La combinaison de tous ces différents moyens d'observation directe et indirecte des exoplanètes permet comme le montre le schéma ci-dessous de déterminer un nombre incroyable de paramètres : leur durée d'orbite, leur rayon et la composition de leur atmosphère.

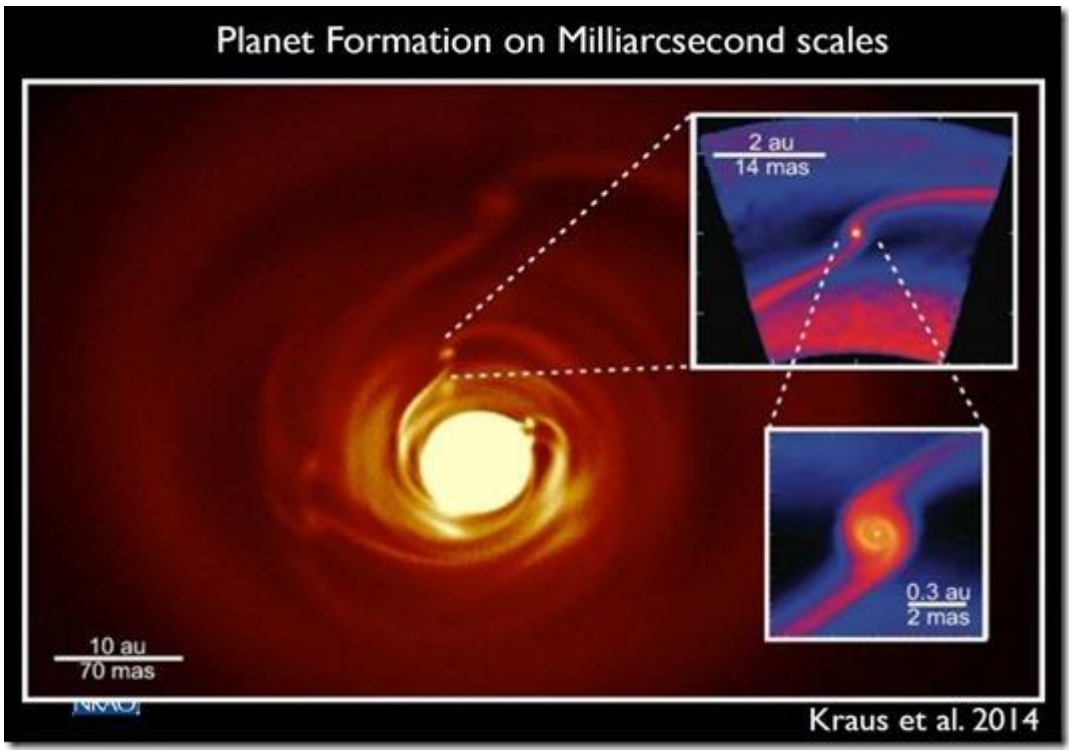


Plus on avance dans le temps et l'expérience, plus la taille des exoplanètes détectées diminue comme l'indique le schéma *ci-dessous*. On devrait donc découvrir de plus en plus d'exoplanètes telluriques ayant une masse voisine de celle de la Terre. Au passage, on découvre parfois des exoplanètes qui ne tournent pas autour d'étoiles. Elles ont pu être créées autour d'une étoile, mais être éjectées de leur système planétaire pour différentes raisons (choc avec autre objet, orbite instable, …). Il y aurait aussi des étoiles sans planètes, même si ceci est doublement hypothétique : d'abord parce que nos observations ne garantissent pas que l'on détecte toutes les planètes d'une étoile, et ensuite, car nos théories actuelles du processus de formation des étoiles mènent à génération systématiquement de planètes, par accrétion des gaz et poussières du nuage qui a servi à créer l'étoile par accrétion gravitationnelle.



Se pose au passage la question de la définition d'une planète et d'une étoile. Comment la frontière entre les deux est-elle définie sachant que certaines étoiles ont la taille de grandes planètes gazeuses ? La réponse est simple : une étoile a une masse suffisamment grande pour que la fusion nucléaire se produise en son sein, avec du deutérium, de l'hélium et ou de l'hydrogène. Cette masse doit être au minimum d'environ 13 fois celle de Jupiter. Sinon, les étoiles se forment à partir d'un nuage de gaz tandis que les planètes se forment à partir de nuage de poussières et de matière plus lourde (métaux, calcium, …) même si leur surface peut-être gazeuse pour les planètes géantes.

L'étude des exoplanètes comprend également celle de leur formation. La Voie Lactée regorge de systèmes planétaires à des stades de développement divers : nuages de poussières, apparition d'une étoile, nuages protoplanétaires, et premières planètes en formation dans ces nuages.



Les astronomes ont donc suffisamment d'observations pour reconstituer l'histoire de ces systèmes planétaires. En voici un exemple *ci-dessus* avec deux à trois planètes en formation dans un système protoplanétaire.

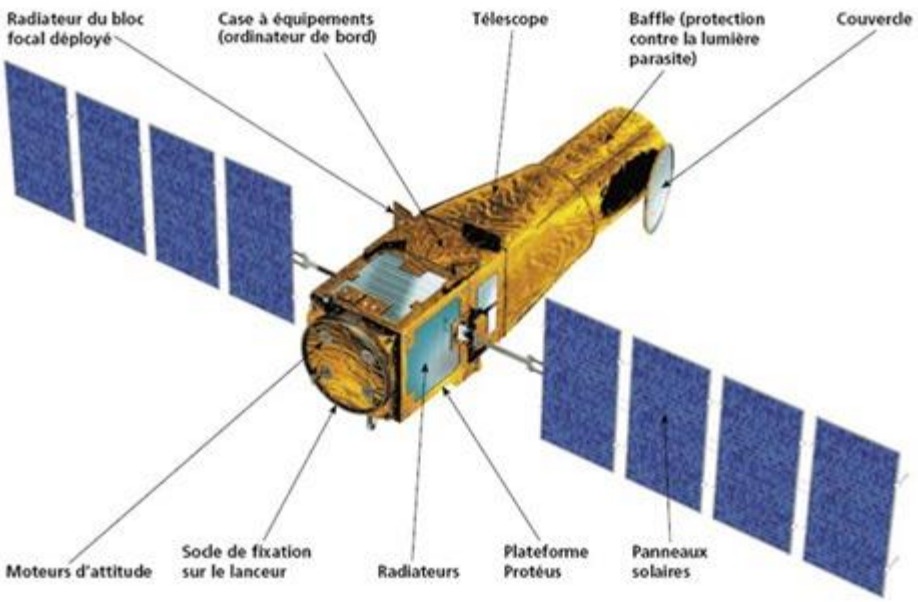
Ces études permettent de comprendre les conditions de création des systèmes solaires et leur organisation. Par exemple, pour savoir si l'apparition de planètes telluriques proches de l'étoile et de planètes géantes plus éloignées, complétées de ceintures d'astéroïdes, est une sorte de loi immuable.

Les télescopes spatiaux dédiés à la recherche d'exoplanètes

Nous avons déjà eu l'occasion dans quatre parties de cette série de faire le tour d'un grand nombre de télescopes spatiaux. J'en ai conservé quelques-uns pour le dessert, qui sont dédiés à la recherche d'exoplanètes. Nous avons donc dans l'ordre CoRoT, Kepler, TESS et Cheops. Sachant que nombre de télescopes déjà traités, tels que le JWST, servent aussi à détecter et caractériser des exoplanètes, sans que cela soit leur principale ou unique mission.

CoRoT (2006 – 2012)

Ce télescope spatial lancé par la France et en orbite terrestre relativement haute, à 896 km d'altitude. CoRoT (COnvection ROtation and planetary Transits) est dédié à l'observation des étoiles par l'astrosismologie et des exoplanètes par la méthode des transits. Dans les deux cas, l'observation est basée sur la photométrie, l'étude de la variation de la luminosité des étoiles. Les fortes variations permettent d'identifier le passage de planètes devant l'étoile tandis que les autres variations permettent de mieux comprendre la structure interne des étoiles.



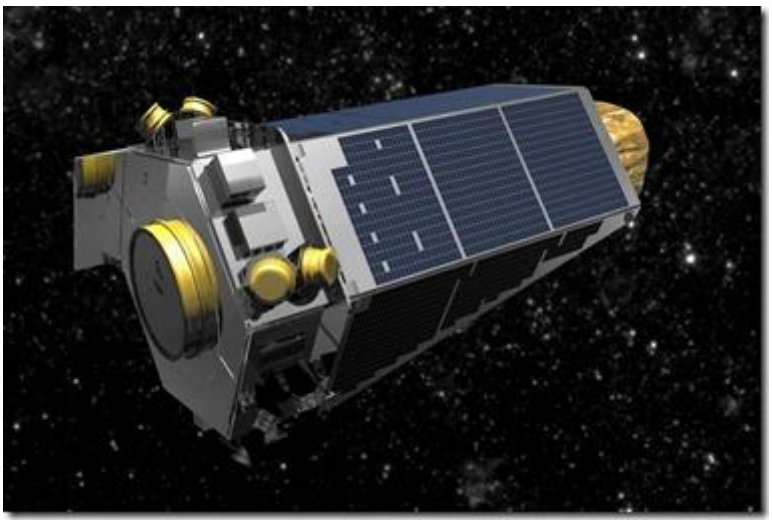
C'est un satellite de taille moyenne, pesant environ 600 kg. Il fait 4 m de long pour 1 m de large (hors panneaux solaires). La plateforme a été développée par Alcatel à Cannes (devenu depuis Thalès Alenia). Les autres entreprise françaises ayant contribué à sa conception sont Sagem, SODERN (Limeil, spécialisé dans la conception de viseurs d'étoiles) et SODITECH (Cannes, un bureau d'études).

L'équipement est relativement standard avec un télescope dont le miroir principal fait 27 cm de diamètre. Il fonctionne uniquement dans le visible. Son plan de focale comprend quatre capteurs CCD de 2Kx2K pixels de 13 microns, une moitié étant dédiée l'observation des faibles variations de luminosité des étoiles (astrosismologie) et l'autre à la méthode des transits, via un prisme de spectrographie servant à distinguer les transits de planètes d'autres phénomènes comme des tâches se déplaçant sur la surface de l'étoile observée. Ils observent chacun un champ de 3×3° (6 fois la largeur de la Lune). L'instrument est refroidi passivement à -40°C.

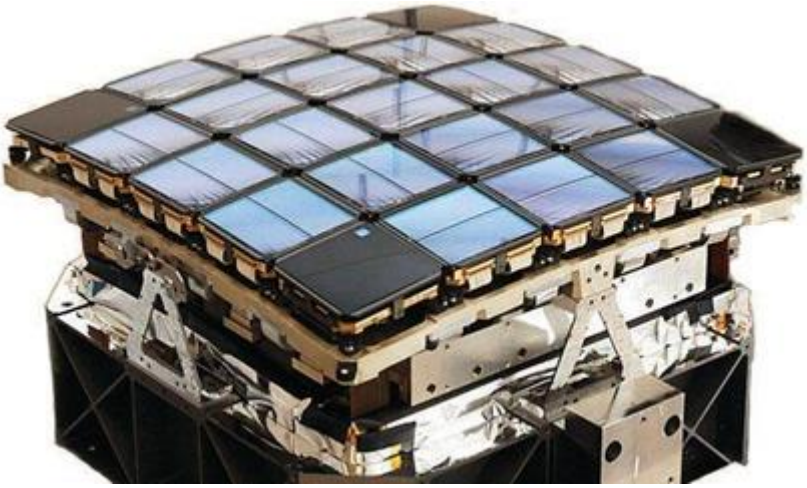
Kepler (2009 – 2017+)

Ce télescope de la NASA est principalement dédié à la recherche d'exoplanètes mais il peut aussi observer des galaxies et faire de la photométrie dessus. Son miroir fait 98 cm avec 95 cm d'ouverture utile. Il pèse une tonne et 651 W de courant sont produits par ses panneaux solaires.

Son objectif est d'observer dans la durée la luminosité de plus de 150 000 étoiles de la Voie Lactée. Dans la pratique, il envoie ses images de manière répétée à des stations terrestres et ce sont les astronomes qui les analysent avec force logiciels.

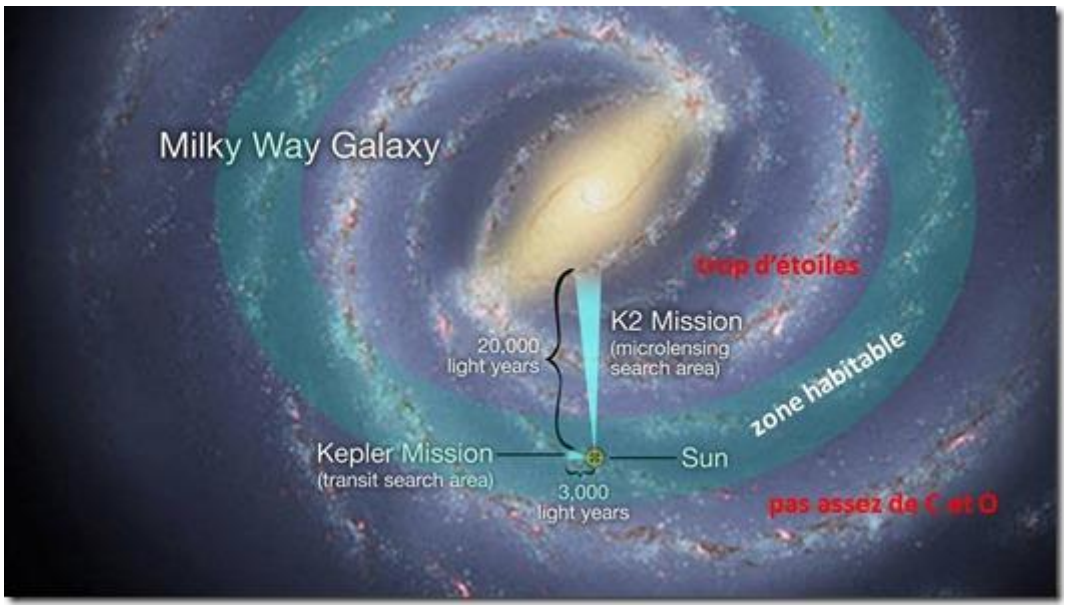


Il a une focale assez large qui alimente un ensemble de 27 cm de côté et légèrement arrondi comprenant 42 capteurs CCD allongés de 50×25 mm et 2Kx1K pixels. Ils totalisent 94,6 Mpixels. Ce n'est pas le record puisque le télescope spatial Gaia que nous avons déjà vu en totalise 10 fois plus.

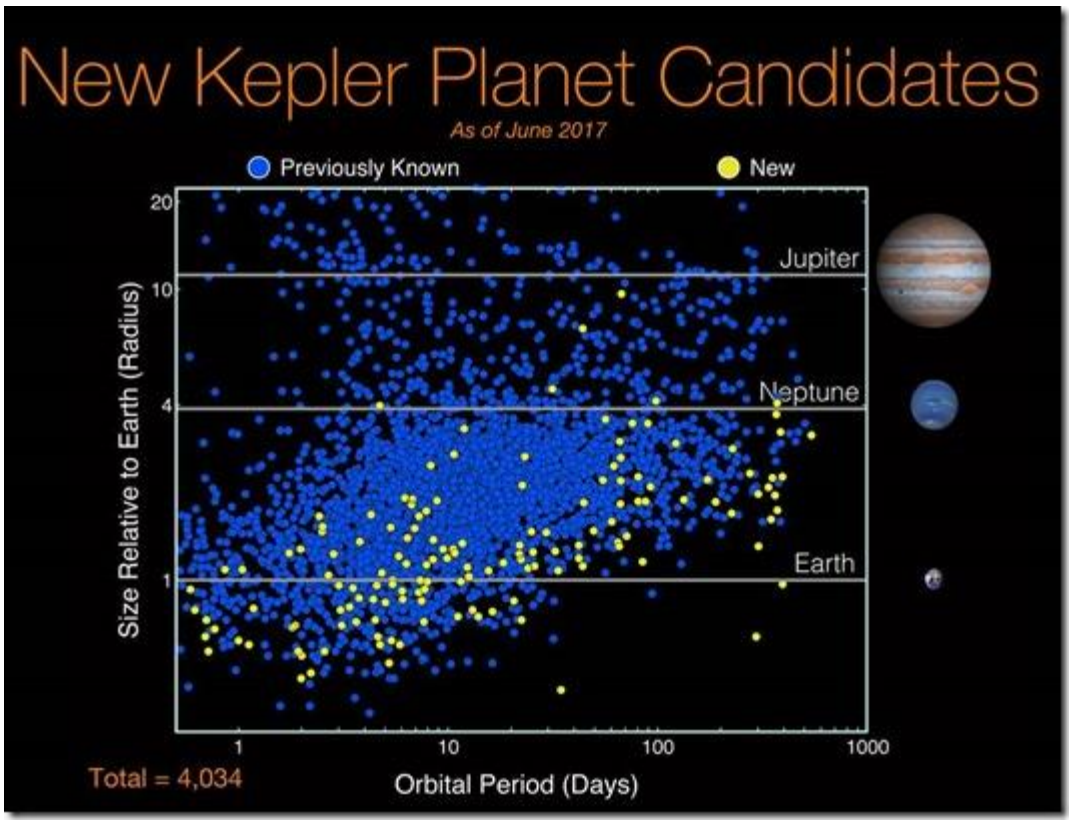


A ce jour, Kepler a permis d'identifier plus de 4500 exoplanètes candidates en orientant son télescope latéralement par rapport au centre de la Voie Lactée et en cherchant des étoiles situées jusqu'à 3000 années-lumières. Cela se justifiait car la distance entre le Soleil et le centre de la Voie Lactée est une zone dite "habitable" de la galaxie. Quand on se rapproche du centre, l'activité est plus chaotique. Quand on s'éloigne, il y a moins d'éléments plus lourds nécessaires à la vie comme le carbone et l'oxygène. En cherchant latéralement, on a plus de chances de trouver des zones similaires à celle du Soleil.

En 2013, la NASA a lancé une seconde mission dite K2, qui cible les étoiles en direction du centre de la galaxie et jusqu'à 20 000 années-lumière de distance. Dans le cadre de cette mission, Kepler a observé plus de 200 000 étoiles en 4 ans. Dans la pratique, les observations se font dans toutes les directions autour de la zone habitable comme le montre le logiciel NASA Eyes évoqué plus haut.



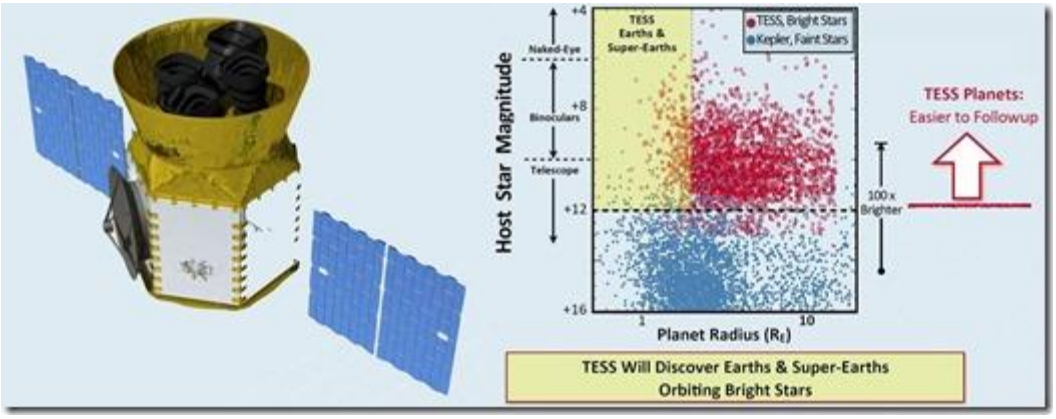
En pratique, on cherche donc des planètes habitables dans à peine un pouillème de % de la galaxie. Sachant qu'il y aurait au moins 2 trillions de galaxies dans l'univers observable, selon les derniers décomptes empiriques réalisés. Pourquoi ne cherche-t-on pas d'exoplanètes dans les autres galaxies ? Probablement à la fois parce ce qu'elles sont bien trop lointaines pour être explorées un jour et aussi, parce que la précision des instruments est insuffisante pour les détecter à de telles distances. La galaxie Andromède qui est la plus proche de la Voie Lactée est à 2,5 millions d'années-lumières du Soleil. Donc 5000 fois plus loin que le périmètre courant de nos recherches d'exoplanètes observations actuelles qui est limité dans la pratique à quelques milliers d'années-lumière. L'exoplanète la plus éloignée détectée à ce jour serait à 28 000 années-lumières, soit donc 90 fois moins loin qu'Andromède (voir la **liste complète**).



En juillet 2017, Kepler a permis une nouvelle découverte, toujours par la méthode des transits : celle d'une exolune, autour d'une exoplanète ! Elle s'appelle Kepler 1625b i, tourne autour de Kepler 1625b, une planète géante ayant plusieurs fois la masse de Jupiter, et ferait elle-même la taille de Netptune. Bref, une très grosse Lune [**source**] !

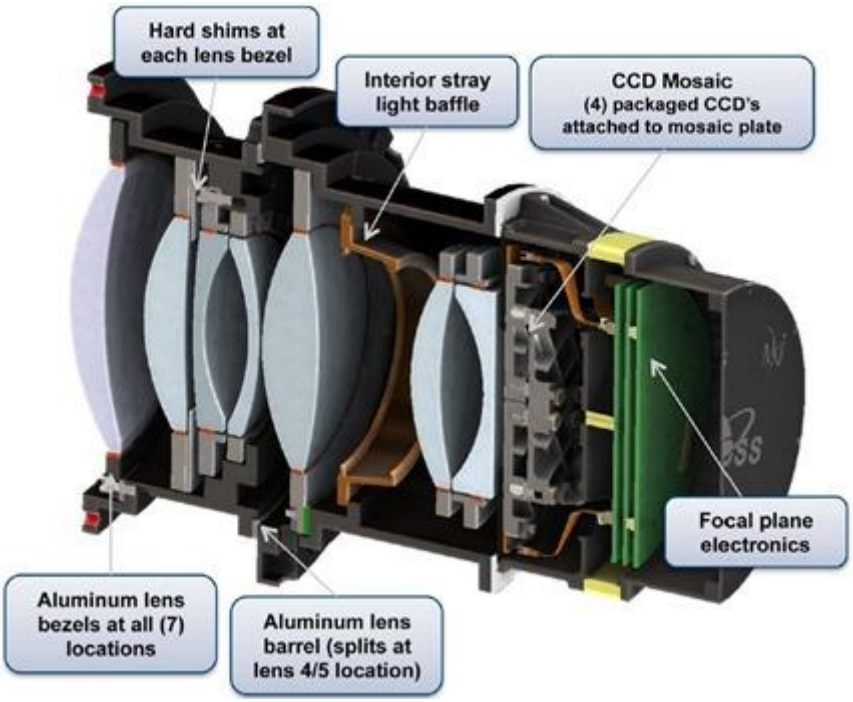
TESS (2018 – 2020)

TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) est un télescope spatial créé par le MIT pour la NASA. Il sera lancé par une fusée Falcon 9 de Space-X, la société d'Elon Musk. Son principal objectif est de détecter jusqu'à 300 planètes telluriques voisines de la Terre et situées dans la zone habitable de la Voie Lactée à moins de 100 années-lumière du système solaire. Il détectera aussi des planètes plus grandes du type de Jupiter et Neptune. Il vise les étoiles de petite taille du même type que le Soleil ce qui fait tout de même 200 000 étoiles à scanner. Il vise des étoiles plus brillantes et grandes que celles que détectait Kepler.



S'appuyant sur la méthode des transits, il alimentera les instruments plus puissants d'autres télescopes comme JWST (à partir de 2019). Les observations d'étoiles durent 72 jours. Sachant que TESS sera sur une orbite elliptique stable dépassant la distance Terre-Lune et d'une durée de 13,7 jours. Ce qui lui permettra de faire ses observations pendant 95% du temps. Les périodes orbitales des planètes recherchées seront donc plus courtes que celle de la Terre qui est de 365 jours. Son pointage est réalisé grâce à quatre roues de positionnement. Et son maintien en orbite est assuré par quatre moteurs à hydrazine. C'est un petit satellite de 325 kg avec 400 W d'alimentation électrique par panneaux solaires.

TESS comprend en fait quatre télescopes identiques, les **FOV Cameras**, qui contiennent chacun une optique à lentilles traditionnelles avec une grande lentille de 105 mm, un champ de vision très large de 24°x24° et quatre CCD de 4Kx4K pixels couvrant de 600 à 1000 nm, soit le rouge et le proche infrarouge. Il totalise donc 4 télescopes x 4 capteurs x 4Kx4K pixels, soient 256 Mpixels. Il transmettra ses données à 100 MBits/s en bande Ka, soient 200 Go en 4 heures lors de son périgée, la partie de son orbite qui est la plus proche de la Terre.

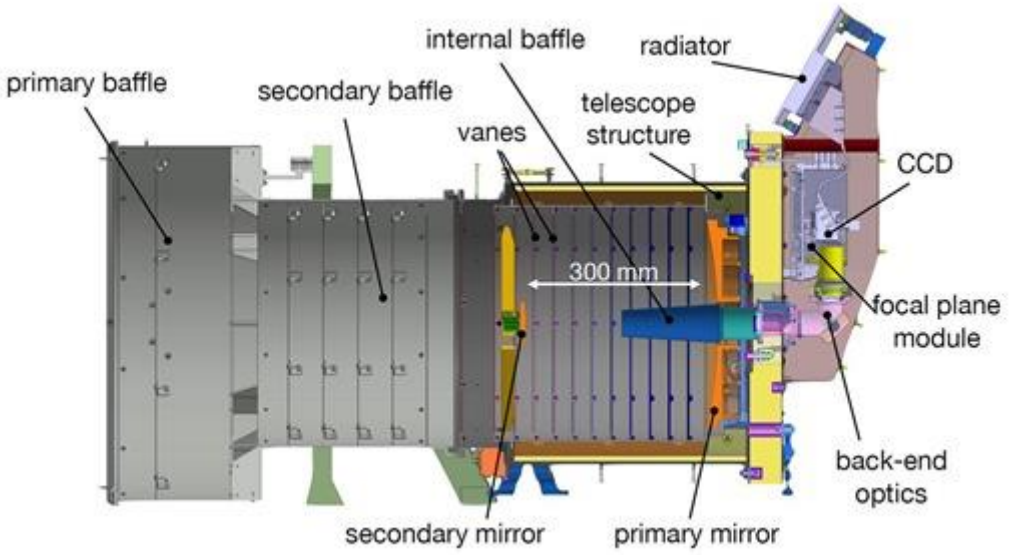


CHEOPS (2018 – 2022)

CHEOPS (CHaracterizing ExOPlanet Satellite) est un télescope de moins de 150m€ lancé par un consortium européen piloté par la Suisse. Le Laboratoire d'Astronomie de Marseille contribuera à l'optimisation du pipeline de données. CHEOPS servira à analyser des exoplanètes de type super-Terre, de masse comprise entre 1 et 5 fois celle de la Terre et de petites planètes de type Neptune. Il utilisera la méthode des transits autour d'étoiles naines de type G5 où l'on a déjà repéré des exoplanètes ainsi que des exoplanètes qui seront détectées dans le futur.

Il pèse 280 kg et fait juste 1,3 m de long. Son miroir principal fait 30 cm. Il utilise un capteur CCD Teledyne E2V avec des pixels de 13 microns, mais de seulement 1Kx1K pixels, avec une zone principale au centre du CCD comprenant 200×200 pixels captant des images à de fortes cadences de 20 à 60 s. C'est lié au fait qu'il ne surveille qu'une seule étoile à la fois alors que les Kepler et TESS en surveillent des dizaines de milliers simultanément. Il défocalise légèrement les images d'environ 3,5 mm et les traite ensuite avec la méthode PSF (Point Spread Function) pour déterminer la distance de l'étoile.

Il fonctionne dans le visible et le proche infrarouge, de 400 à 1100 nm. Il est refroidi passivement à -40°C et stable à 10mK près, soit 0,01°. Le télescope téléchargera ses images à une vitesse de 1 Gbits/s par jour en bande S.



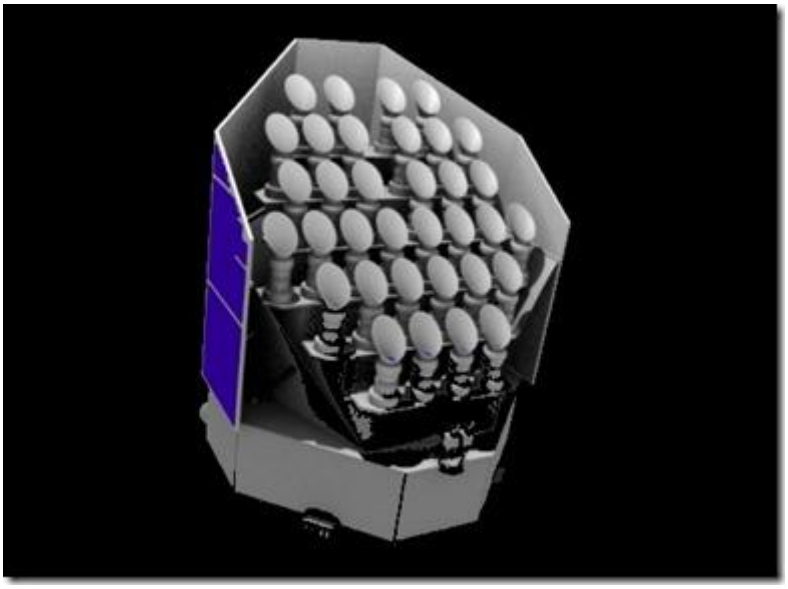
Il vise les étoiles de faible magnitude, de 6 à 9. Il analysera notamment les 6 heures pendant laquelle les planètes observées sont devant leur étoile, correspondant au transit d'une planète ayant une orbite de 50 jours.

Fabriqué par la filiale satellite d'Airbus, le télescope sera en orbite terrestre synchrone avec le Soleil, à savoir que le satellite voit toujours le Soleil d'un côté et l'espace de l'autre. L'orbite fait un disque orthogonal à l'axe Terre-Soleil et est située entre 500 à 800 km d'altitude.

Plato (2026 – 2030)

PLATO (PLAnetary Transits and Oscillations of stars) est un observatoire spatial de l'ESA développé avec une forte contribution française (CNES, CNRS, Observatoire de Paris, CEA, LAM de Marseille, etc). Son budget est situé autour de 450 m€.

Lui aussi doit permettre de découvrir des planètes telluriques similaires à la Terre et dans notre voisinage immédiat de la Voie Lactée, toujours par la méthode des transits. Il captera la luminosité d'un million d'étoiles en continu et sur trois ans minimum. La durée d'observation permettra de découvrir des exoplanètes ayant une orbite de durée voisine à celle de la Terre. Ce type d'orbite est nécessaire pour que la planète soit habitable et notamment que son eau y soit liquide.



PLATO est un satellite de 2 tonnes dont 1200 kg pour la charge utile. Il sera positionné sur une orbite de 500 000 x 400 000 km autour du point de Lagrange L2. Cette orbite apporte une bonne stabilité thermique au satellite, une orbite stable et permet d'observer une grande partie de la voute céleste.

Il est équipé de 32 petits télescopes avec des optiques à lentille et 120 mm d'ouverture (un peu comme TESS) organisés en quatre groupes de 8, chaque groupe couvrant un champ large de 37°, l'ensemble couvrant un champ de 50°. Chaque télescope comprend 4 capteurs CCD de 4510×4510 pixels (20 mpixels). Cet ensemble de 2,5 Gpixels est complété par deux télescopes équipés de CCD à capture rapide pour le guidage de PLATO. PLATO va générer un énorme volume de données : 106 Go de données par jour, après compression !

PLATO cumulera deux méthodes de mesure :

- La **photométrie** à ultra-haute précision pour appliquer la méthode du transit qui peut détecter une baisse de luminosité de 1 / 200 000 fois celle de l'étoile comme c'est le cas pour la Terre vis à vis du Soleil.

- L'**astrosismologie** qui évalue les oscillations des étoiles pour déterminer la masse, l'âge et le rayon de l'étoile observée. Avec la période orbitale des planètes, on en déduit la masse de ces dernières.

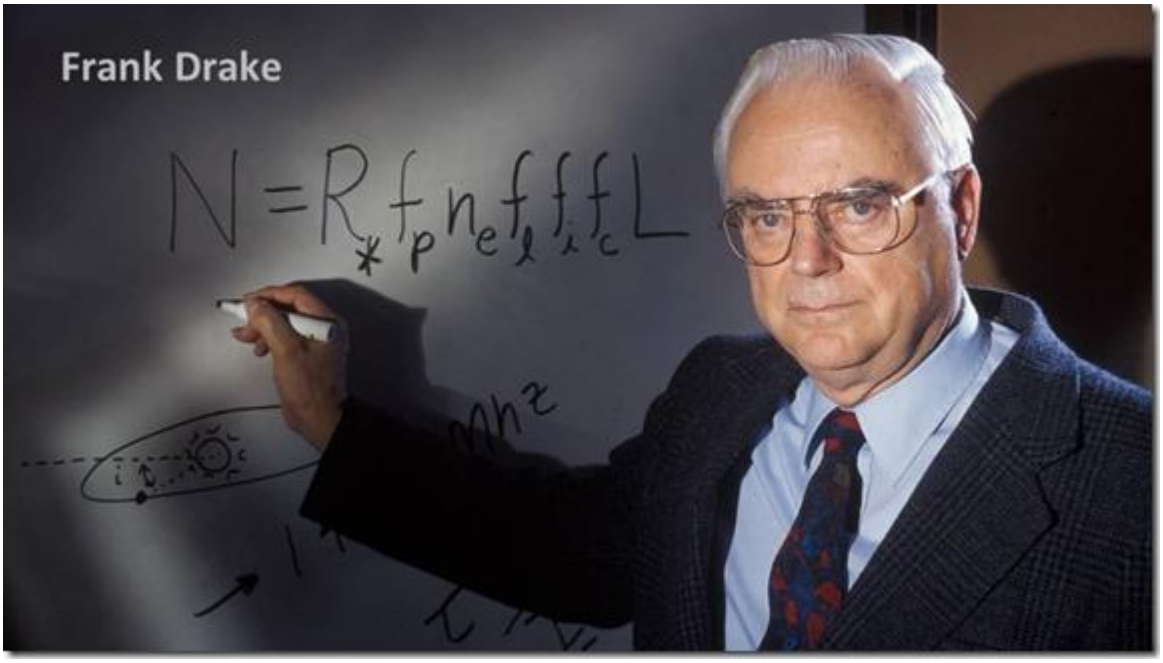
Elles seront complétées par la méthode des **vitesses radiales** appliquée par des télescopes terrestres qui servira à déterminer la masse des planètes les plus massives détectées par PLATO.

Le ciblage des planètes sera opéré à partir des observations de télescopes terrestres et spatiaux de prochaine génération comme le JWST (télescope spatial dans l'infrarouge) et l'E-ELT (télescope terrestre géant européen). Ces télescopes serviront aussi à évaluer les caractéristiques de leur atmosphère.

La mission sera organisée en deux phases. La première, pour l'observation en continu de deux régions de la Voie Lactée denses en étoiles naines froides similaires à notre Soleil pendant un total de 4 ans. Cette durée permettra d'observer deux orbites de planètes similaires à celle de la Terre. Une seconde phase consistera à observer plusieurs régions de la Voie Lactée mais sur des périodes courtes de quelques mois.

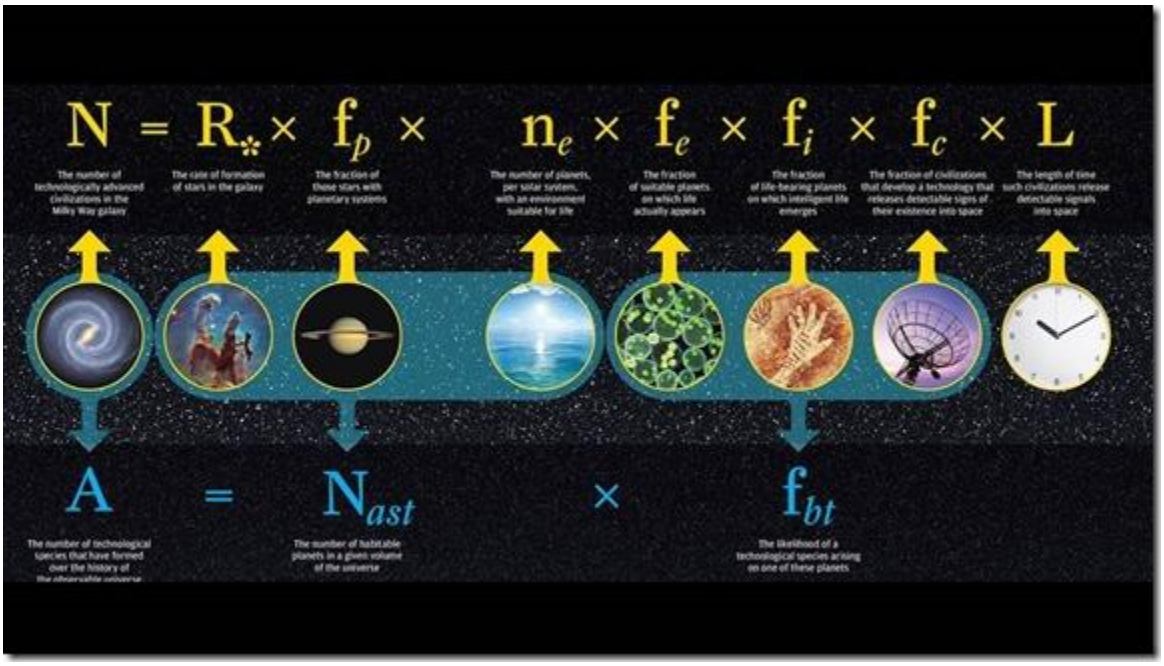
Les équations de Franck Drake et Sara Seager et le paradoxe de Fermi

Frank Drake est un astronome américain connu pour l'équation qu'il a proposée en 1961. Elle vise à déterminer avec méthode le nombre probable de planètes habitables et de civilisations extraterrestres dans la Voie Lactée. Cela permet de rationnaliser un peu l'estimation de la probabilité que nous ne soyons pas seuls.



Selon la valeur de chacun des facteurs de cette équation, on peut aboutir à des résultats évidemment très différents : soit nous sommes seuls dans la Voie Lactée, soit elle comprend des dizaines de milliers de civilisations. Franck Drake milite plutôt pour des valeurs hautes et il est toujours très actif au sein du SETI dont il est le créateur,

l'organisme de recherche américain qui cherche par tous les moyens de découvrir des signes d'existence de civilisations extra-terrestres. En 1961, Frank Drake avait abouti à 10 000 civilisations. Plus tard, Carl Sagan était plus optimise et était monté à 1 million. Mais avec des paramètres très conservateurs, on arrive à une civilisation (nous), voire moins, alimentant la thèse de la "Terre rare" selon laquelle l'enchainement de circonstances ayant mené à la création de la Terre sont multiples et très rares dans la Voie Lactée.



Voyons donc quels sont les termes de cette équation de Drake qui fournit le nombre de civilisations extraterrestres dans la Voie Lactée avec lesquelles l'Humanité pourrait entrer en contact. C'est le produit des facteurs suivants :

- Le nombre d'**étoiles en formation** par an dans la Voie Lactée. Il serait situé entre 5 et 15. Les dernières estimations sont de 7 selon la NASA et l'ESA.
- La part de ces **étoiles entourées de planètes**, un pourcentage qui augmente régulièrement au gré des découvertes d'exoplanètes. On est maintenant plutôt proche de 100%, la création d'une étoile entrainant quasiment systématiquement celle d'un disque protoplanétaire générant des planètes plus ou moins grandes et dont la composition varie en fonction de la distance à l'étoile.
- Le nombre moyen de **planètes où la vie peut se développer** par étoile. On commence à le savoir en découvrant des planètes similaires à la Terre. Mais les paramètres de développement d'une vie carbonée sont nombreux : la gravité, la présence d'eau, d'oxygène, de carbone, d'azote, de phosphore, la température, un champ magnétique protecteur lié à un cœur métallique, sans compter l'influence de la Lune et des marées, et l'inclinaison de la Terre qui génère le cycle des saisons [cf **Stellar Influences on the Emergence of Intelligent Life**]. Ce paramètre de Drake serait proche de 40% mais sans tous ces critères. On commence tout juste à découvrir des exoplanètes similaires à la Terre, comme **Kepler 452b** en 2015, à 1400 années-lumière.

- La part de ces planètes sur lesquelles la **vie est apparue**. Sachant que les formes que peut prendre la vie sont peut-être insoupçonnées. La vie est-elle nécessairement carbonée par exemple ? Le taux serait de 13% mais il est sujet à caution. Là-dessus intervient la dimension temporelle. La vie a mis plus de 3,8 milliards d'années pour se développer sur la Terre pour atteindre notre stade actuel de développement, sachant que l'Humanité ne représente que quelques centaines de milliers d'années de cette longue durée. Et de nombreux accidents ont perturbé le développement de la vie sur Terre. Ils peuvent se reproduire sur d'autres planètes : ères de glaciations, astéroïdes meurtriers, activité volcanique, fluctuations brutales des étoiles, orbites non circulaires perturbant fortement le climat.
- La fraction de ces planètes où **la vie qui s'y est développée est devenue intelligente**. On manque de recul pour évaluer cette proportion.
- La fraction de ces dernières civilisations **capables et désireuses de communiquer**. A partir d'un certain niveau de développement, cela semble fort probable.
- La **durée de vie moyenne d'une civilisation** en années pendant laquelle elle peut communiquer avec l'espace. Les pessimistes estiment que l'Humanité (et non pas la vie sur Terre) n'en a plus pour longtemps. La durée de vie des civilisations de l'Histoire est plutôt courte : quelques siècles seulement en moyenne ! On peut aussi conjecturer sur l'issue de toute civilisation dont le développement initial s'est basé sur l'exploitation d'énergies fossiles, avec le déclin de leurs réserves et l'impact de leur usage sur l'atmosphère et le réchauffement planétaire. Mais des civilisations peuvent se développer à plusieurs reprises sur une même planète, comme la vie après les nombreuses extinctions massives sur Terre.

L'Américaine **Sara Seager**, du MIT, produisait une mise à jour de l'équation de Drake en 2014 mettant en jeu des critères plus fins sur les chances pratiques que nous aurions de découvrir des civilisations extraterrestres dans les systèmes exoplanétaires de la Voie Lactée que nous visons avec les moyens d'exploration à notre disposition, en y intégrant le futur télescope spatial JWST (*ci-dessous*, **source**). Elle se focalise sur les planètes disposant d'une signature gazeuse produite par des organismes vivants (méthane, etc). Elle aboutit à un résultat bien plus faible qu'avec l'équation de Drake, proche de 2 exoplanètes.

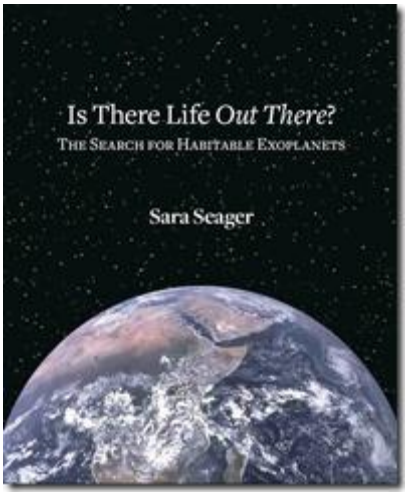
$$N = N_* F_Q F_{HZ} F_O F_L F_S$$

N number of planets with detectable biosignature gases
N_* number of stars within the sample
F_Q fraction of quiet stars
F_{HZ} fraction with rocky planets in the HZ
F_O fraction of observable systems
F_L fraction with life
F_S fraction with detectable spectroscopic signatures

A "revised" Drake Equation
For any star types, any well defined survey

Sara Seager est aussi l'auteure du très bon petit livre "**Is there life out there**" de 48 pages sur les grandes questions que l'on peut se poser sur les exoplanètes, comment on des découvre, lesquelles cherche-t-on, pourra-t-on y aller un jour (réponse : non)

et pourquoi les cherche-t-on ? Sa conférence **Mapping Nearby Stars for Habitable Exoplanets** chez Google en juin 2017 est aussi très intéressante.



Là-dessus intervient le fameux paradoxe du physicien **Enrico Fermi**, datant de 1950. Fermi trouvait paradoxal qu'il puisse y avoir autant de civilisations extraterrestres potentielles dans l'Univers et que dans le même temps, elles ne se soient pas encore manifestées. C'est bien expliqué par Tim Urban dans un de ses **légendaires longs posts**.

Des dizaines d'explications sont avancées dont certaines ne sont que pure spéculation sur le développement des civilisations et leurs objectifs (prédation ou pas). Je vais me concentrer sur les raisons les moins anthropomorphiques qui sont généralement avancées :

- Les **civilisations sont trop dispersées** dans la galaxie. Selon les paramètres optimistes de l'équation de Drake, la civilisation extraterrestre la plus proche serait à environ 800 années-lumière du Soleil, ce qui est déjà très loin pour communiquer. Un ping avec une latence de 1600 ans est un bel exercice de patience ! Sans compte le temps qu'il faudrait pour se déplacer à une telle distance et aussi pour freiner une fois arrivé. Dans le cas le plus extrême, à un dixième de la vitesse de la lumière, cela ferait tout de même au minimum 8000 ans de trajet ! Et une fois le vaisseau, habité ou pas, arrivé sur place, il faudrait encore 800 ans pour savoir ce qu'il a trouvé ou pas !
- Nous **avons été visités**, mais avant l'arrivée de l'espèce humaine. C'est lié à la question de la synchronicité des civilisations et de leurs moyens d'exploration. Mais cela ne tient pas trop car la Terre aurait pu être colonisée même si l'espèce humaine n'y existait pas encore. Et on n'en a aucune trace, sauf dans le "Cinquième élément". Donc, il est fort probable que la Terre soit restée isolée à tous points de vue depuis sa création.
- Le **Soleil est relativement jeune** dans l'histoire de la Voie Lactée et de l'Univers. Nombre d'autres civilisations potentielles nées dans des systèmes planétaires plus anciens sont donc théoriquement plus développées. Mais elles peuvent aussi être éteintes.

- La **faible durée des civilisations**, qui s'autodétruisent avant de trouver les moyens de conquérir d'autres étoiles et planètes [**détails**]. Sans compter les catastrophes naturelles qui peuvent les détruire. Sur Terre, un ELE (Extinction of Life Event) comme un astéroïde du type de celui qui est l'une des causes de la fin des dinosaures il y a 65 millions d'années intervient environ tous les 100 millions d'années. N'oublions pas non plus les risques de remise à zéro des civilisations basés sur notre dépendance technologique et aux tempêtes solaires. Nous l'avons d'ailleurs échappé belle **en juillet 2012** ! Une tempête solaire avait aussi mis hors service une bonne part des télégraphes en 1959 et l'alimentation électrique au Québec en 1989.
- Le **plafond technologique insurmontable** pour se déplacer dans l'espace à grande vitesse avec la masse nécessaire pour survivre sur plusieurs générations sachant que la principale source d'énergie, celle des étoiles, s'atténue rapidement quand on quitte un système planétaire. On a encore du pain sur la planche pour trouver un moyen de coloniser la galaxie avec une nuée de sondes qui théoriquement pourraient arriver à le faire en quelques millions d'années. L'équation de Drake n'évoque d'ailleurs jamais la recherche de vie et d'exoplanètes dans d'autres galaxies. Elles sont bien trop loin. La galaxie la plus proche de la notre, Andromède, est à 2,5 millions d'années-lumière. C'est bien trop loin pour communiquer de quelque manière que ce soit. Ou alors, on obtient une information d'un très lointain passé et si on envoie un message, la réponse arrive 5 millions d'années plus tard. Quand aux voyages via des trous de vers popularisés par le film Interstellar, ils sont **plus qu'hypothétiques**.
- La **galaxie est colonisée** mais nous serions dans une zone isolée et de faible intérêt. Ce qui manque d'explications car la zone de la Voie Lactée où nous nous trouvons n'a rien de bien particulier à part qu'on la situe dans une "zone habitable". Au sens où sa distance du centre de la Voie Lactée fournit un bon équilibre entre stabilité stellaire et éléments disponibles (carbone, oxygène, azote).

Le futurologue Nick Bostrom **espère** se son côté que nous soyons seuls. J'intuite pour ma part que nous ne sommes pas seuls dans l'Univers mais que les premiers signes de vie intelligente doivent être très éloignés. C'est déjà la cas de l'étoile la plus proche du Soleil ! Nous pourrions bien être condamnés à rester isolés du fait des contraintes évoquées ci-dessus qui rendent difficile les déplacements et la communication à très longue distance dans la Voie Lactée et a fortiori, à l'échelle des galaxies.

Même si on la cherche un peu désespérément, il n'existe donc probablement pas de planète B accessible à notre civilisation comme l'évoquait Emmanuel Macron en juin 2017 après le retrait des USA des Accords de Paris de 2015. Il nous reste donc à prendre bien soin de notre planète pour éviter le pire et que la civilisation humaine ne devienne qu'un simple microscopique microblip temporel dans l'histoire de l'Univers !

Les entrepreneurs

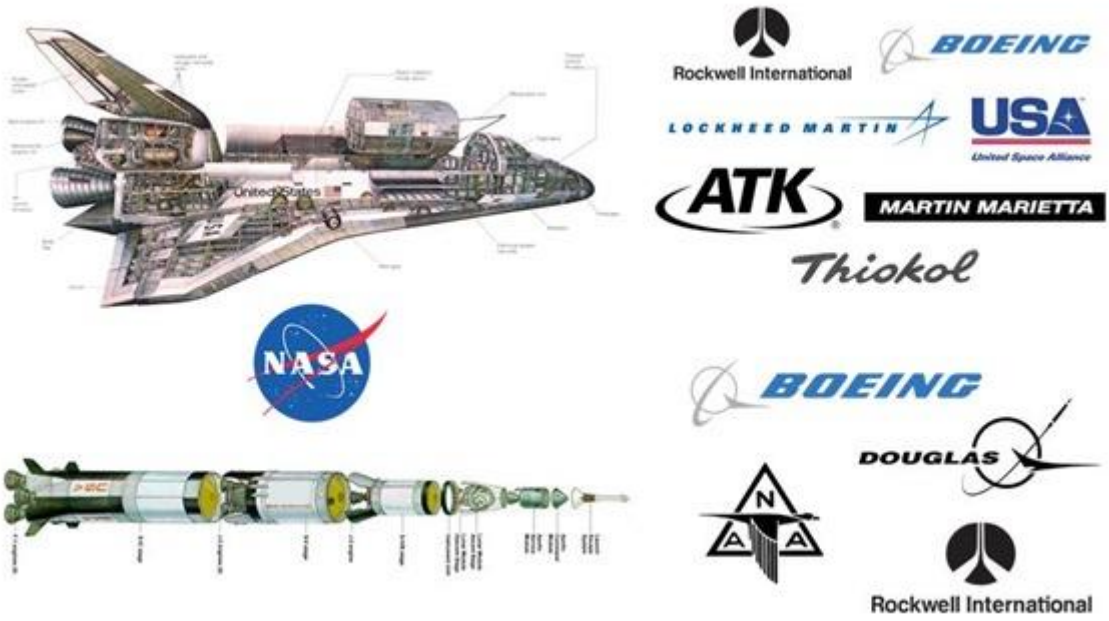
Après onze longs épisodes passés à décortiquer les objectifs scientifiques et l'incroyable diversité de l'outillage des astronomes et astrophysiciens, voici la chute tant attendue sur les entrepreneurs de l'espace. Je n'ai fait qu'effleurer la question dans les parties précédentes, détaillant parfois l'activité de quelques entreprises et PME françaises contributrices dans la fabrication de télescopes terrestres ou spatiaux.

Nous allons ici nous intéresser aux entrepreneurs focalisés sur l'espace et si possible, ceux qui ambitionnent de créer des startups dans le secteur. A savoir, des entreprises avec un produit et des économies d'échelles, capables de révolutionner un domaine d'activité. Nous allons aussi voir comment la science fiction et l'espace influence les technologies et startups d'applications … terrestres.

La conquête spatiale dans le secteur privé

Dans l'imaginaire public, les programmes Apollo et de la navette spatiale sont intiment associés à la NASA. Mais derrière l'agence spatiale américaine se trouvaient de nombreuses entreprises privées à qui étaient sous-traitées la conception et la fabrication de la plupart des systèmes de ces missions. Ainsi, Boeing et Rockwell étaient-ils les principaux artisans du programme Apollo et on les retrouvait dans celui de la navette spatiale. L'un des sous-traitants de la navette spatial, Thiokol, s'est fait connaitre après l'accident de Challenger en 1986. Ils étaient en effet à l'origine des boosters dont les joints ont lâché et provoqué l'explosion de Challenger une minute après son décollage.

Dans ces programmes, la NASA était un donneur d'ordre et un intégrateur. Elle jouait aussi le rôle d'opérateur, gérant ses bases de lancement et de contrôle. A l'apogée du programme Apollo, la NASA employait 34 000 personnes et ses sous-traitants, 375 000. Donc, un total de 400 000 personnes impliquées, même si ce chiffre est difficilement vérifiable. On peut imaginer qu'il agrégeait alors la totalité des salariés de certains sous-traitants et pas seulement ceux qui travaillent sur le programme Apollo. Qu'en est-il par exemple des équipes d'IBM ayant créé le système IBM 360 utilisé à la fin du programme Apollo ?



Ces sociétés n'étaient pas des startups mais des groupes du complexe militaro-industriel déjà habitués aux projets dans l'aérospatial. Est-ce différent aujourd'hui ? Certainement. On a d'abord de grands projets lancés par des milliardaires ayant déjà réussi dans d'autres secteurs d'activité (Virgin, Amazon, Paypal). Et on voit aussi apparaitre quelques startups sur des projets moins ambitieux mais toutefois gourmands en capital.

Le point commun de tous ces projets ? Ils visent à générer des économies d'échelle dans l'exploration de l'espace, surtout en orbite basse autour de la Terre, histoire d'en démocratiser l'accès, aussi bien pour le lancement de satellites que pour y développer une nouvelle forme de tourisme. Autre point commun : ils sont généralement américains. Enfin, les projets majeurs ont déjà plus de 10 ans d'ancienneté ! Le spatial en Europe et ailleurs reste l'apanage d'organismes publics comme le CNES en France, ou de collaborations publiques internationales comme l'ESA, l'ESO (observatoire du Chili) ou encore la société Arianespace.

Autre caractéristique : nombre de ces grands projets ont été lancés par des entrepreneurs ayant déjà réussi dans d'autres domaines, le plus souvent dans le numérique comme Elon Musk (Paypal), Jeff Bezos (Amazon), Yuri Milner (DST) ou Paul Allen (Microsoft). Ils sont déjà milliardaires. L'espace est une nouvelle frontière et un hobby pour eux, histoire de dépasser le toit de la pyramide de Maslow. C'est aussi un monde d'hommes. Je n'ai pas vu de femmes entrepreneuses se lancer dans ce secteur.

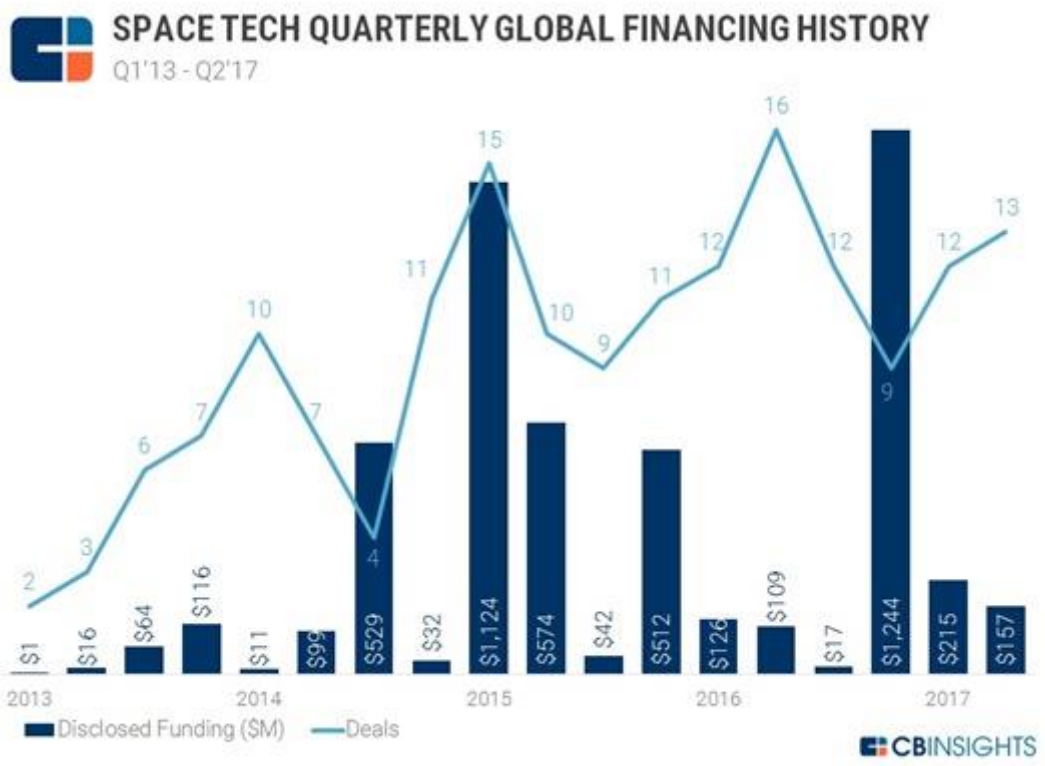
Pour le reste, le marché est dominé par de nombreuses sociétés d'ingénierie et de bureaux d'études, adaptés à un business où il n'y a pas de grandes économies d'échelle et qui fonctionne surtout en mode projet, comme **SpaceWorks**.

Investissements dans les startups de l'espace

CBInsights est toujours une excellente source d'information sur les volumes d'investissements dans les startups par secteurs d'activité, tout du moins aux USA. Ils

suivent même ceux qui concernent le **marché de l'espace** ! Les investissements sont précisés en montant et en nombre de deals. 2015 a été une année avec un pic de $1,8B d'investissements.

Depuis début 2017, il y a tout de même eu 25 investissements publics totalisant $371m, pour 49 deals en 2016. Dans le tableau ci-dessous des investissements le spatial, les gros montants concernent les grands du secteur que sont Blue Origin et SpaceX, qui ne sont plus du tout des startups. En 2017, le plus gros investissement est allé à la startup néo-zélandaise **Rocket Lab** pour $75m dont je fais le portrait dans cet article. Le second allait à **Kymeta** qui est à l'origine d'une technologie d'antennes satellites à base de nano-matériaux.

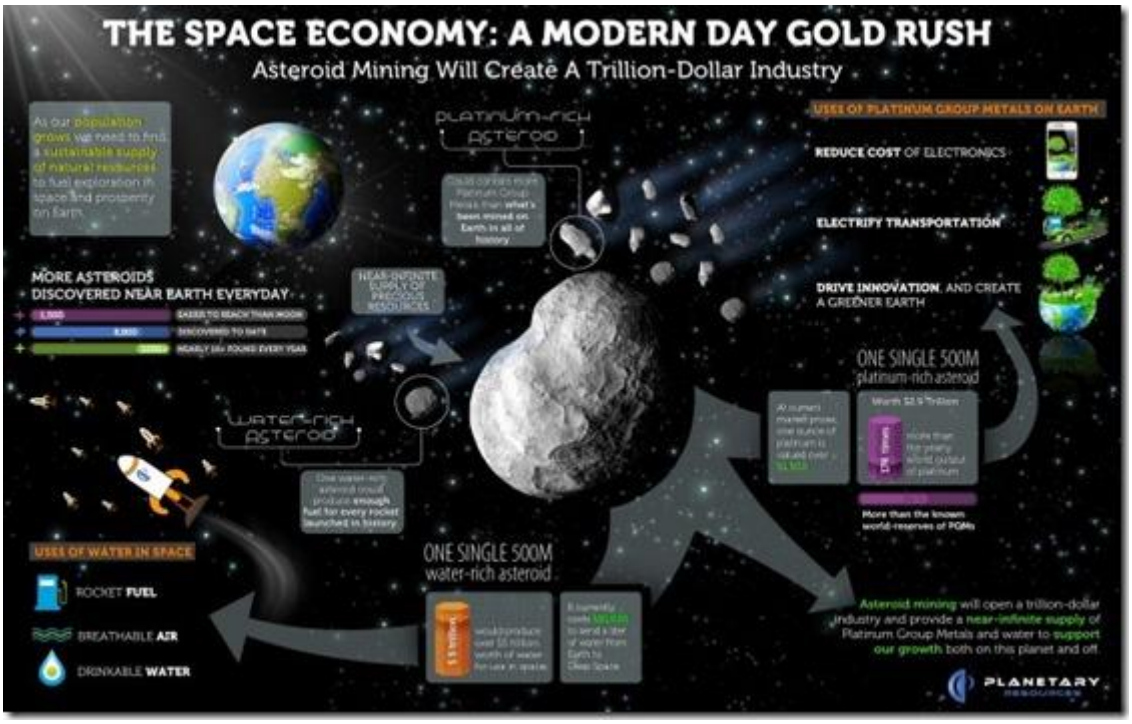


Quelles sont donc ces startups ? En voici une cartographie, toujours originaire de CBInsihgts et datant du printemps 2017 :

Voici quelques startups parmi les plus originales dans le lot.

Planetary Resources, cofondée par Peter Diamantis, ambitionne de créer des robots d'exploitation des ressources des astéroïdes (**vidéo**) et même d'y récolter de l'eau (**vidéo**). Selon la société, les ressources minières des astroïdes vont générer une économie d'un trillion de dollars (mille milliards). On se demande donc pourquoi Donald Trump s'évertue vainement à relancer l'activité des mines de charbon aux USA qui

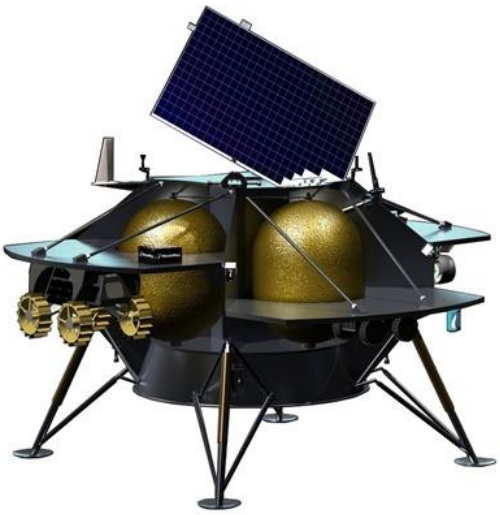
ne sont pas compétitives face au gaz ! Comme de nombreux projets qui sont à la bordure de la science fiction (style **Neuralink chez Elon Musk**), la société utilise son ambition démesurée pour vendre des services d'ingénierie plus traditionnels. Elle a levé $48,1m.



Deep Space Industries souhaite aussi exploiter les ressources minières des astéroïdes et a levé de son côté un tout petit $1m. En attendant les mines, elle développe des satellites de taille variable : le Nanosatellite (1 à 10 kg), le Microsatellite (10-100 kg), le Small Satellite (100-500 kg) et le Standard Satellite (au-delà de 500 kg).

Moon Express veut faire la même chose pour exploiter les ressources de la Lune avec ses atterrisseurs allant du petit MX-1 au grand MX-9 permettant entre autres d'en extraire l'eau et de la transformer en hydrogène et oxygène liquide pour servir de station de carburant intermédiaire de la conquête spatiale (**vidéo**). La capsule MX-1 est aussi capable de revenir sur Terre, en décollant de MX-9 qui lui sert de plate-forme (*ci-dessous*).

Astrobotic Technologies, une autre startup américaine visant aussi la Lune avec son atterrisseur Peregrine (*ci-dessous*), de 2,5 m de large et 1,8 m de haut, livrant vos colis sur la Lune à raison de $1,2m le kilogramme à concurrence de 35 kg pour les premières missions et jusqu'à 265 kg ensuite. La charge emportée peut communiquer en liaison série ou en Wi-Fi 802.11n avec le Peregrine qui de son côté communique avec la Terre en bande S et X ! La première livraison est prévue en 2019 ! La société créée en 2008 n'a à ce jour levé que $2,5m.



Interorbital Systems, créé en 1996, un opérateur américain qui mange à tous les râteliers avec ses fusées Neptune, ses "SDK" de micro-satellites TubeSat et CubeSat et enfin, Synergy Moon, son projet de rover destiné à la Lune. Celui-ci s'inscrit dans le cadre d'une réponse au concours Google Lunar X Prize lancé en 2007 et qui doit récompenser avec $30m d'ici fin 2017 le premier projet capable d'envoyer un rover commercial sur la Lune capable de s'y déplacer sur 500 mètres et de filmer ses exploits.

Spaceflight Industries est un intermédiaire de lancement de satellite. Il sous-loue l'allocation de slots de lancement de satellites par les SpaceX Falcon 9, Orbital ATK Minotaur et Soyouz russes. Le service comprend une étude de faisabilité des lancements. La société a été créée en 1999 à Seattle et a levé $53,5m.

A noter également l'émergence de **satellites à propulsion électrique**, proposés notamment par Airbus et Thalès, qui est une appellation aussi trompeuse que celle des moteurs à eau. En effet, ces satellites à propulsion électrique ont tout de même besoin de matière éjectable, une sorte de carburant ionisé, car on ne peut faire accélérer un satellite dans le vide qu'en projetant de la matière dans le sens inverse de la direction souhaitée. La matière est ici éjectée après avoir été accélérée électriquement à très haute vitesse et non par la pression générée par une combustion entre un comburant et un carburant. C'est un processus très lent. Par contre, on économise pas mal de poids côté satellite.

D-Orbit est une société qui propose des solutions permettant de mettre des satellites hors service "proprement". Ce sont des moteurs d'appoint installés sur les satellites avant leur lancement qui vont permettre le retour sur Terre des satellites usagés ou leur envoi sur orbite de dégagement. Ils ont un moteur qui sert à placer rapidement sur orbites les satellites à propulsion électrique.

MadeInSpace est une société spécialisée dans la création de systèmes d'impression 3D spatiaux, dont un est installé dans l'ISS.

Grands projets entrepreneuriaux de la conquête spatiale

Je les classe par ordre chronologique de création.

Blue Origin (2000)

La société lancée par Jeff Bezos, le fondateur d'Amazon, est la plus ancienne de cet inventaire. Ce n'est pourtant pas la plus connue, SpaceX faisant beaucoup plus jaser, du fait du statut de génie sanctifié de son vivant de son fondateur Elon Musk, alors que Jeff Bezos ne serait qu'un boutiquier un peu malin en comparaison. Jeff Bezos finance Blue Origin en vendant chaque année depuis 2015 un milliard de dollars d'actions d'Amazon.

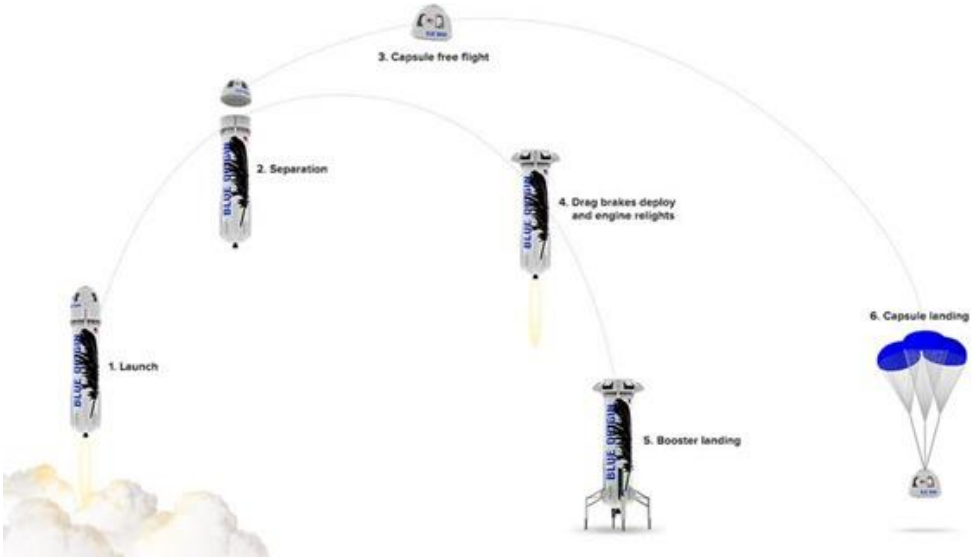
L'objectif de Jeff Bezos est de démocratiser les vols dans l'espace, notamment les vols humains. Blue Origin s'appuie sur une gamme de fusées récupérables pour des vols suborbitaux et orbitaux.

Depuis 2015, sa fusée New Shepard a plusieurs fois réussi des vols suborbitaux à 100 km d'altitude avec récupération de la fusée ainsi que de sa capsule. La fusée revenait sur Terre et atterrissait verticalement, ralentie par ses propulseurs. La capsule revenait de son côté via un parachute, comme un vaisseau Soyouz. Blue Origin est aussi fabricant et fournisseur de moteurs de fusées, les BE-3 (celui de New Shepard) et le BE-4 (plus puissants).

A l'origine, Blue Origin a démarré grâce à des contrats d'études et de recherche menés pour la NASA de quelques dizaines de millions de $ sur les vols habités en 2009 portant notamment sur les systèmes d'évacuation des astronautes, sur la conception de capsules et sur une nouvelle génération de moteurs.

Blue Origin a conçu et lancé une première fusée **Charon**, équipée de moteurs d'avion Rolls-Royce Viper MK 301 en 2005, à 96 petits mètres d'altitude. Pour un unique vol de test. Puis une autre fusée test Goddard PM1 en 2006.

Les choses devenaient sérieuses avec **New Shepard**, un véhicule suborbital atteignant 100 km d'altitude, comportant une fusée récupérable et une capsule permettant d'embarquer trois passagers. La fusée récupérable revient sur Terre et atterrit verticalement tandis que la capsule revient sur Terre en étant freinée par un parachute. La propulsion s'appuie sur le moteur maison BE-3 qui fonctionne à l'hydrogène et à l'oxygène liquides, qui génèrent peu de fumées au décollage. Un vol complet dure 10 minutes en tout, retour compris (**vidéo** montrant un cycle complet). Le premier test de New Shepard a eu lieu en 2015 avec une récupération de la capsule mais pas de la fusée. La même année avait lieu le premier vol avec récupération de la fusée. Cette fusée a été réutilisée quatre fois pendant 2016 pour un cycle complet décollage/atterrissage.



Blue Origin a aussi dans ses cartons une fusée plus grande, **New Glenn** avec deux ou trois étages de 7 m de diamètre. Prévue pour 2020, son premier étage est équipé de moteurs plus puissants, les BE-4, qui associent méthane et oxygène liquides, tandis que le second étage utilise les BE-3 de New Sheperd. Le premier étage est réutilisable mais ni le second ni le troisième. Elle sera capable de mettre des satellites en orbite basse. Elle servira aussi à des vols habités à partir de 2018. Jeff Bezos prévoit ensuite d'aller sur la Lune.

Blue Origin fait rêver en promettant des voyages suborbitaux pour Monsieur Millionnaire Toutlemonde dans ses capsules attachées à New Shepard, mais dans la pratique, l'activité principale de la société est le lancement commercial de satellites.

SpaceX (2002)

Créée par Elon Musk peu après la revente de Paypal qui avait fait sa fortune, la société a dans la pratique des objectifs assez voisins de ceux de Blue Origin : révolutionner le marché de l'envoi de charges utiles et d'hommes dans l'espace. Les moyens techniques sont assez voisins avec des lanceurs réutilisables avec un prix très compétitif. Seule diffère l'ambition affichée et la communication qui va avec, Elon Musk visant la conquête de Mars tandis que Bezos se contente d'évoquer de faire le tour de la Lune. La société est dirigée par Gwynne Shotwell (President & COO) avec un nom bien adapté à la mission de la société !

Le choix de SpaceX est l'intégration verticale : la société conçoit tous les sous-systèmes de ses lanceurs, moteurs compris, un peu comme Tesla, l'autre société de Musk, le fait pour ses véhicules électriques. Les objectifs de Musk sont de réduire les coûts et d'améliorer la fiabilité de l'accès à l'espace d'un facteur dix. Il vise un coût de $1000 par kilo envoyé en orbite basse. Le succès commercial est aussi au rendez-vous. A ce jour, SpaceX aurait un carnet de commande équivalent au double de celui d'Arianespace, soient environ $9,3B pour $5B. A noter que Google et Fidelity Investment ont investi $1B dans SpaceX en 2015.

SpaceX a démarré avec sa fusée Falcon 1 qui a lancé en 2009 un satellite malaisien après avoir connu trois échecs successifs en 2006, 2007 et 2008 puis un succès en 2008.

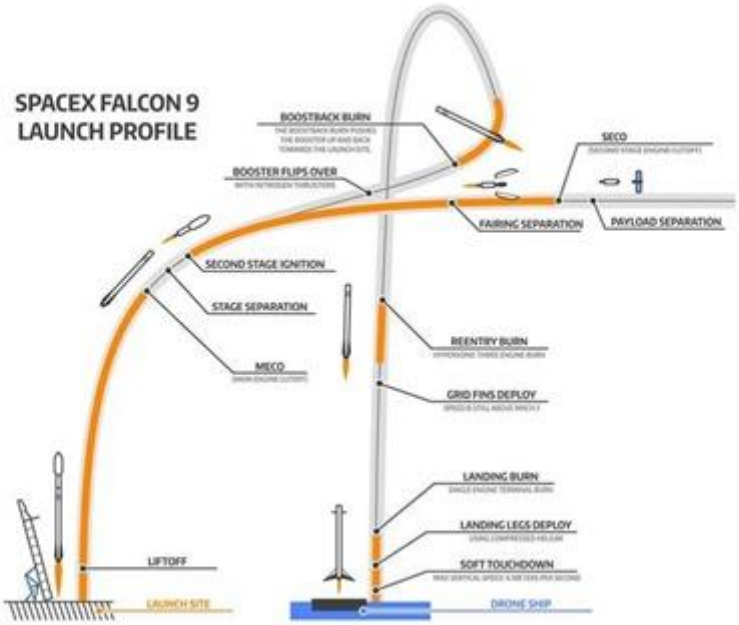
Le produit phare de SpaceX est sa fusée **Falcon 9**, équipée de moteurs maison Merlin utilisant de l'oxygène liquide (LOX pour Liquid Oxygen) et du RP1, un hydrocarbure léger moins dangereux que l'hydrogène liquide et moins toxique que l'hydrazine, une combinaison courante, déjà utilisée par Saturn V du programme Apollo. Sa charge utile est un vaisseau cargo Dragon (*ci-dessous*) dont une version habitable, la Dragon V2, est prévue. Le premier étage comprend 9 moteurs Merlin et le second étage, un seul. Il fait 3,66 m de diamètre tandis que la coiffe d'emport en fait 5,2. La coiffe d'Ariane 5 fait 5,45 m de diamètre pour 4,57 m d'utilisable par la charge emportée. La coiffe de Falcon 9 a un diamètre utile interne de 4,6 m. Falcon 9 a une capacité de mise en orbite de 10,5 tonnes.

Le cargo spatial Dragon permet notamment le ravitaillement de l'ISS pour le compte de la NASA. SpaceX a remporté un contrat associé, parallèlement à un autre opérateur privé, **Orbital Sciences**. Falcon 9 a été annoncée en 2005 et lancée la première fois en 2010. Un contrat d'un total de $5B, options comprises. Cela permet à la NASA d'éviter d'être dépendante des fusées russes Soyouz depuis que la Navette Spatiale a été mise à la retraite en 2013. Fusées Soyouz qui sont en partie lancées à partir de la base de Kourou en Guyane française, dont la position équatoriale permet aux Soyouz de placer en orbite des satellites près de trois fois plus lourds qu'en décollant de Baïkonour !

SpaceX lance ses fusées à partir de trois bases : celle de Cap Canaveral en Floride (les pads SLC-40 et 39A, ce dernier ayant servi aux lancements de la Navette Spatiale), celle de la base Vandenberg de l'US Air Force en Californie et une base en propre en construction au Texas. Blue Origin avait concouru contre Space X pour opérer le pad 39A mais SpaceX en a obtenu l'exclusivité en 2014.

L‘un des objectifs de SpaceX était de rendre sa fusée Falcon 9 réutilisable. Après plusieurs tentatives ratées, SpaceX a réussi à récupérer le premier étage du lanceur via un atterrissage à la verticale en 2015, sur la base de Cap Canaveral (**vidéo**), puis en 2016 et 2017 sur une base maritime (**vidéo**). Le tout après la mise en orbite réussie de satellites ! La récupération nécessite de rallumer l’un des moteurs Merlin de la fusée et de le faire fonctionner à bas régime, car la fusée est alors quasiment vide à son retour. Le second étage n’est pas récupéré.

Et en mars 2017, un lancement était réussi avec une fusée réutilisant un premier étage ainsi récupéré. Quelques lancements ont été ratés en parallèle, comme celui d’une Falcon 9 devant lancer le satellite israélien Atmos-6 en septembre 2016. En tout cas, la récupération des fusées Falcon 9 est probablement la principale prouesse technique de SpaceX et elle est de taille. Elle doit probablement beaucoup aux progrès dans les systèmes de pilotage automatique temps réel équivalents à ceux que l’on trouve aussi dans les drones ! Ce processus de récupération est maintenant une routine, le **dernier en date** étant le lancement d’un satellite d’observation terrestre Taïwanais le 24 aout 2017.



SpaceX est positionné comme l'opérateur low cost du marché. Les lancements de fusée Falcon 9 sont opérationnels et revenaient chacun à $56m en 2013. Avec ses fusées récupérables, SpaceX ambitionne de descendre à terme le prix de ses lancements en-dessous de $7m. Cela permettrait de poursuivre la baisse continue du prix de l'envoi d'un kg de charge utile en orbite basse, qui frôle actuellement les $1000. SpaceX essaye d'associer la rigueur de son secteur avec la souplesse du mode de fonctionnement des startups. C'est bien expliqué dans **cette présentation** qui décrit leurs méthodes de travail et qui date de 2012. Selon SpaceX, l'intégration verticale élimine une bonne part des tests d'intégration que doivent faire les concurrents de SpaceX qui doivent intégrer des composants d'origine bien plus variée.

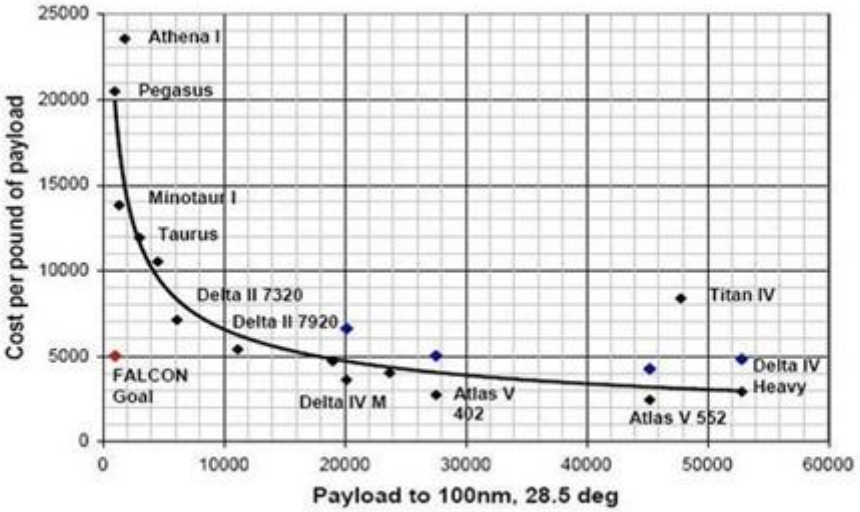


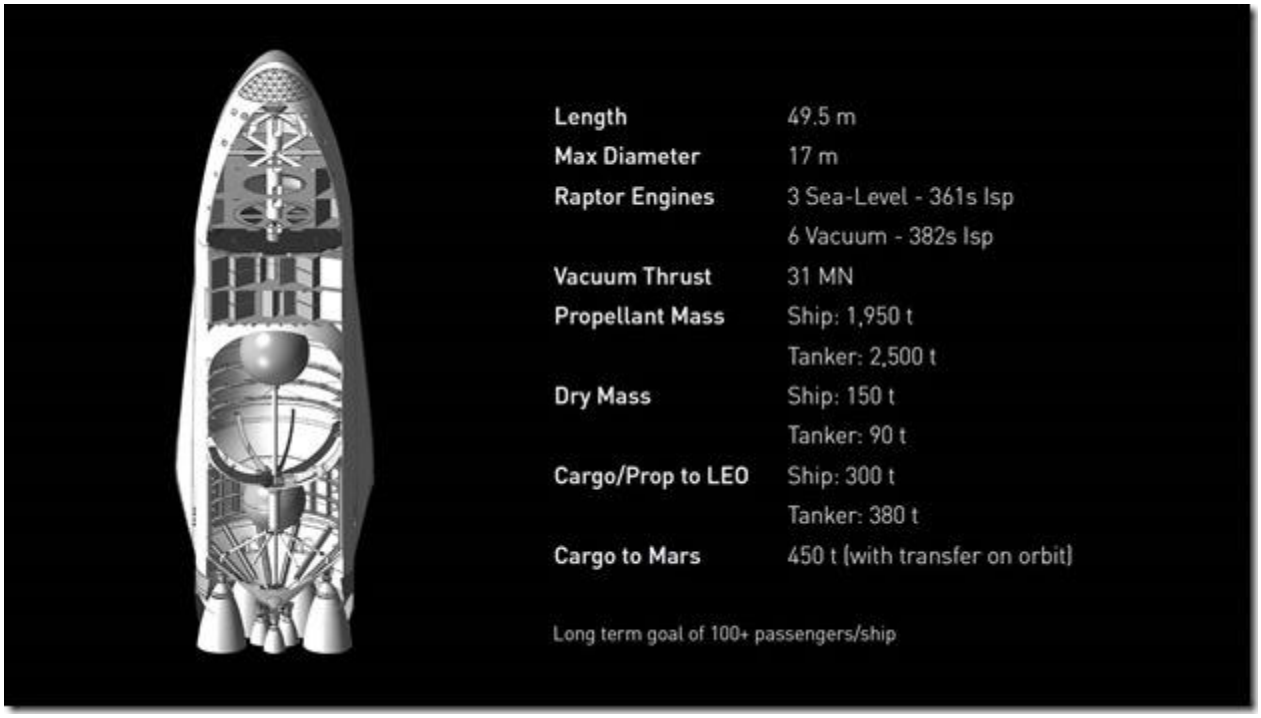
Figure 2. Launch Costs of Common Space Launch Systems

SpaceX augmente régulièrement sa cadence de lancements, avec 10 charges envoyées en orbite basse pendant les 6 premiers mois de 2017, le dernier en date étant l'envoi

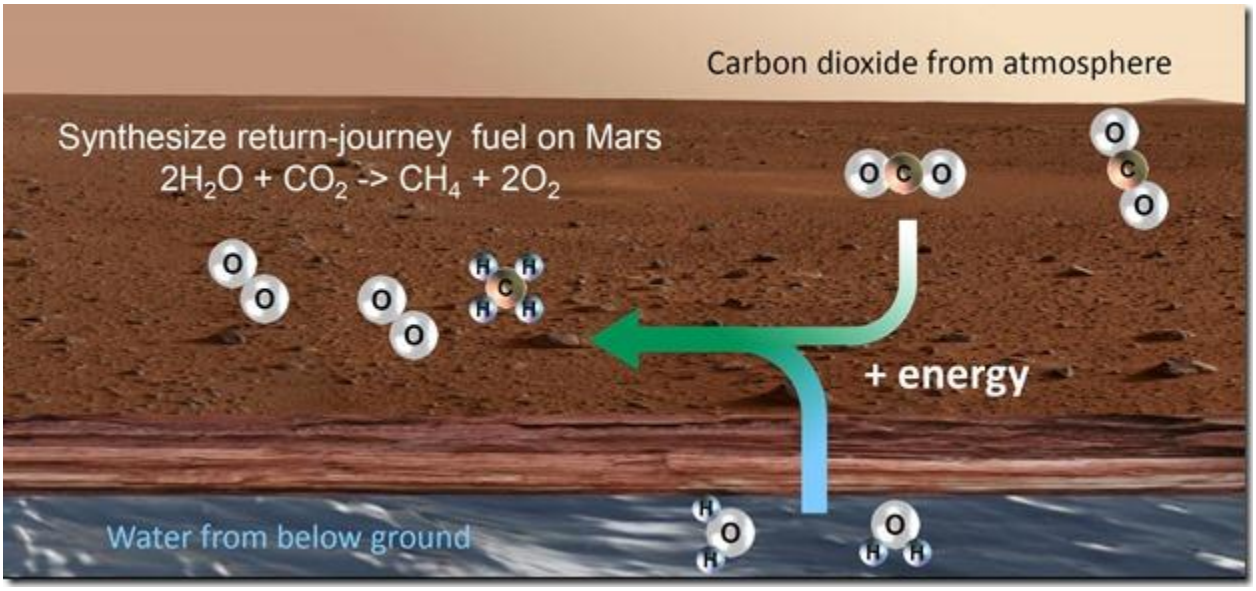
début juillet 2017 d'Eutelsat 35e en orbite géostationnaire, un satellite de télécommunications de 6,8 tonnes. Cette révolution surtout économique a eu un sérieux impact sur la concurrence traditionnelle, à commencer par Arianespace et l'opérateur américain ULA. Les clients exercent une pression sur les prix des lancements. Cela a poussé Arianespace à lancer le programme Ariane 6. Avec à la clé un gros débat sur la capacité d'emport et l'optimisation complexe d'Ariane 5 avec sa coiffe qui n'est rentable qu'en lançant deux satellites à la fois.

Mais Elon Musk ne veut pas se contenter d'être une sorte d'Easyjet de l'envoi de satellites en orbite basse. Il vise plus loin et plus haut et notamment Mars. Et pas simplement pour explorer la planète rouge d'ici 2025 mais aussi pour la terraformer et coloniser ensuite avec des millions de terriens. Elon Musk a expliqué son projet comme suit : "*Une voie est de rester sur Terre pour toujours, avec l'éventualité qu'un évènement d'extinction survienne. [...] L'alternative est de devenir une civilisation spatiale et une espèce multi-planétaire [...] Nous devons juste changer les populations parce que nous sommes actuellement sept milliards de personnes sur Terre et aucune sur Mars [...] nous pourrions la réchauffer, lui redonner une épaisse atmosphère*".

Le plan est construit par étapes, les deux premières étant de créer la version habitée de la capsule Dragon et le **Falcon Heavy**, un lanceur plus lourd doté de 28 moteurs Merlin, de deux boosters eux aussi récupérables et d'une plus grande charge d'envol (**vidéo** de simulation d'un vol complet). L'étape suivante est l'ITS (Interplanetary Transport System), capable d'envoyer en orbite 300 tonnes, une fusée plus grande que Saturn V du programme Apollo. Faisant 122 m de hauteur et équipée de 42 moteurs Raptors, elle enverrait un vaisseau spatial sur Mars de 49,5 m de long, 17 m de diamètre et rempli avec 4450 tonnes de carburant (*ci-dessous*).



Deux versions de ce vaisseau seraient envoyées sur Mars. Dans les deux cas, il serait d'abord envoyé en orbite basse à vide puis chargé en carburant par un autre vaisseau envoyé juste après. Un premier vaisseau non habité serait envoyé sur Mars qui servirait d'usine de production de carburant pour le retour du vaisseau habité. Ce carburant qui associerait du méthane (CH4) et de l'oxygène (O2) serait produit sur Mars à base de trois composants : de l'eau gelée extraite du sous-sol de Mars, du CO2 de l'atmosphère et de l'énergie solaire récupérée avec des panneaux photovoltaïques.



Elon Musk veut réutiliser le savoir développé dans le percement de tunnels avec Hyperloop One pour en creuser sur Mars, à la fois pour créer des stations habitables ou pour récupérer l'eau souterraine (source : **intervention d'Elon Musk à l'ISS R&D Conference de juillet 2017**).

L'atterrissage sur Mars est délicat pour un véhicule de cette taille. Il est en effet difficile d'atterrir sur Mars dont l'atmosphère est très faiblement dense et oblige à freiner le véhicule habité avec un moteur, un parachute étant insuffisant pour un véhicule lourd de ce type contrairement à Curiosity en 2012. Le vaisseau de SpaceX sera donc freiné par ses moteurs et grâce au carburant embarqué. Dans cette même conférence, Elon Musk annonçait qu'il allait revoir ses plans pour aller sur Mars, notamment en revoyant sa copie sur la fusée et sur l'atterrissage sur Mars.

Le second vaisseau serait habité et reviendrait sur Terre grâce au carburant fabriqué par le vaisseau arrivé avant lui.

L'atmosphère sur Mars est insuffisamment dense pour y maintenir de l'eau à l'état liquide. Au-dessus de 0°C, l'eau sous forme de glace se transforme illico en vapeur. Qu'à cela ne tienne, Elon Musk a la solution pour terraformer Mars : utiliser des armes nucléaires pour pulvériser l'eau glacée contenue dans les pôles, l'envoyer dans l'atmosphère et l'épaissir ainsi pour augmenter l'effet de serre et la température moyenne sur la planète. Il oublie que Mars a perdu sa protection magnétique contre les vents solaires lorsque son noyau métallique s'est solidifié il y a trois milliards d'années, contrairement à celui de la Terre qui est encore actif. Cela expliquerait le fait que l'atmosphère de Mars, initialement d'épaisseur voisine de celle de la Terre, ai

a été soufflée par le vent solaire. Une tentative de dégazage de Mars se heurterait donc au même problème et n'est, pour l'instant, pas scientifiquement réaliste.

Le gradient de températures est élevé sur Mars avec une moyenne de -55°C et des maximales autour de 20°C. Il est bien plus élevé sur la Lune, allant de -200°C à +200°C. Les astronautes du programme Apollo étaient protégés par leur combinaison qui réfléchissait l'essentiel des rayons reçus et par un sol poussiéreux faiblement conducteur de la chaleur. Donc, la température sur Mars ne devrait pas être un problème majeur.

Coloniser à grande échelle le Pôle Sud ou les fins fonds du désert d'Arabie Saoudite est bien plus aisé que de s'installer sur Mars, choses que l'on ne fait pourtant que de manière sporadique.

Histoire de créer une étape intermédiaire plus réaliste, Elon Musk annonçait aussi en 2016 et 2017 vouloir envoyer autour de la Lune deux passagers (fortunés) payants avec une capsule Dragon V2 lancée par une fusée Falcon Heavy dont le premier vol est prévu avant fin 2017. Tout ça en 2018 ! Juste pour faire le tour de la Lune et revenir sur Terre, un peu comme l'ont fait Apollo 8 en 1968 et Apollo 13 en 1970, ce dernier, de manière improvisée.

Bref, Elon Musk fait rêver les uns avec de la science-fiction et fait du business relativement classique de lanceur avec de l'innovation incrémentale et une belle intégration verticale.

Virgin Galactic (2004)

Virgin Galactic ne joue pas dans la cour de l'utilitaire. La société de Richard Branson propose des vols commerciaux suborbitaux allant jusqu'à 110 km d'altitude dans un avion à moteur fusée, le SpaceShipTwo lancé à partir d'un avion porteur, le WhiteKnightTwo.

La solution technique n'a toutefois pas germé dans la tête de Richard Branson qui rêvait de créer un opérateur de vols spatiaux, mais dans celle de Burt Rutan, le cofondateur de Scaled Composites, une société californienne conceptrice d'avions originaux. Le SpaceShipTwo de Virgin Galactic est en effet un descendant direct du SpaceShipOne lancé par Burt Rutan en 2003 pour le compte de Paul Allen. Mais ce dernier ne souhaitait pas en faire un business commercial. Dans la pratique, les deux véhicules sont conçus par une joint venture de Scaled Composites et Virgin Galactic, The Spaceship Company.

Le SpaceShipTwo est un avion fusée de six places commerciales en plus des deux pilotes. Son voyage dure en tout trois heures comprenant quelques minutes en apesanteur. Il vole à 4000 km/h, propulsé par un moteur à ergols solides et liquides, RocketMotorTwo. L'avion porteur WhiteKnightTwo est un quadriréacteur à deux carlingues qui comprend un seul pilote dans la carlingue gauche et permet le transport de personnes accompagnant les passagers de l'avion fusée.

Comme tout projet du genre, il a connu des déboires. D'abord, sur le moteur de l'avion-fusée, qui a explosé en test au sol en 2007, et dû être remplacé après. Puis le crash de l'avion-fusée lors d'un vol de test en 2014, tuant le copilote et blessant le pilote, à cause d'un problème de déploiement d'ailettes au retour. Cela a aboutit à une nouvelle version du SpaceShipTwo dont le premier test a eu lieu début 2017 (**vidéo**).

Les vols commerciaux sont proposés entre $200K et $250K. Plusieurs centaines de clients sont en liste d'attente depuis 2008. Les premiers vols commerciaux annoncés initialement pour 2014 n'ont toujours pas eu lieu. Des tests doivent encore réalisés pour que Virgin Galactic obtienne l'agrément de la FAA américaine avant de lancer son activité commerciale.

United Launch Alliance (2006)

Inconnue du grand public, United Launch Alliance (ULA) est un partenariat entre Lockeed Martin et Boeing qui avait le monopole du lancement de satellites militaires pour le Pentagone, dont le prix unitaire est très élevé, jusqu'à ce que SpaceX gagne son premier contrat avec l'US Air Force en 2016. L'opérateur s'appuie sur trois lanceurs polyvalents : Delta II, Delta IV et Atlas V, qui seront suivis par le Vulcan en 2019.

La société est en difficulté depuis au moins 2014 est lourdement endettée et financée par la commande publique américaine. Elle a du se restructurer plusieurs fois pour réduire ses coûts et mieux résister à la concurrence venant principalement de SpaceX. En 2014, ULA a lancé un "partenariat" avec Blue Origin pour le développement du moteur BE-4 de ce dernier, une appellation style novlang pour indiquer que la société fait l'acquisition de ses moteurs auprès de Blue Origin.

Rocket Lab (2006)

Cette société américano-néo-zélandaise révolutionne encore plus le marché que les précédents. Elle construit des fusées low-cost dont la structure est fabriquée en im-

pression 3D métallique. Cette fusée est destinée à lancer de petites charges utiles totalisant 150 kg, notamment des nano-satellites, sur des orbites de 500 km d'altitude. On peut réserver ses lancements "au kilo" par trimestre directement sur leur site web.

Le financement de la société a démarré avec un contrat avec le gouvernement américain pour le développement d'un lanceur low-cost, puis avec du capital risque provenant de Khosla Ventures (2013), Callaghan Innovation et Bessemer Venture (2014) et enfin, un gros tour de financement de $75m en mars 2017.

Le premier vol du lanceur Electron a eu lieu en mai 2017 (**vidéo**) à partir d'une base en Nouvelle Zélande. Les lancements commerciaux doivent démarrer d'ici fin 2017 à raison de $5m l'unité. Electron doit notamment lancer la sonde lunaire MX-1 de Moon Express citée au début de cette partie. Le moteur Rutherford d'Electron a quelques particularités comme un système d'alimentation à base de moteurs électriques en lieu et place des traditionnels et complexes générateurs à gaz.

Stratolaunch (2011)

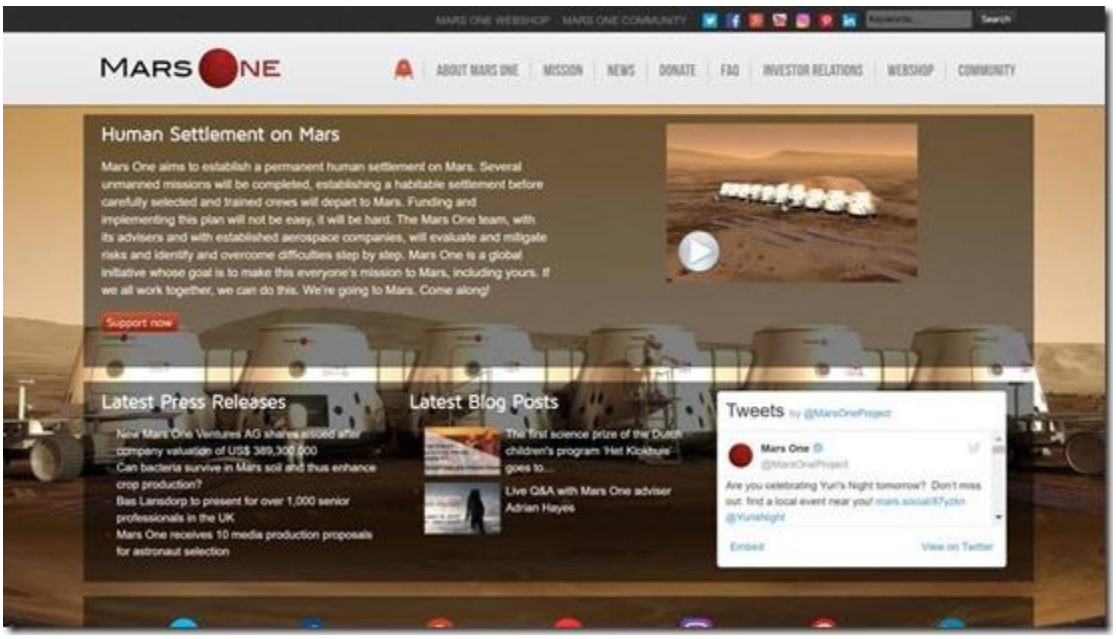
Cette société a été crée par Paul Allen et Burt Rutan, le fondateur de Scaled Composites impliqué dans la création du SpaceShipTwo utilisé par Virgin Galactic. Elle vise l'envoi de petites fusées en orbite à partir d'un gros aéronef de 114 m d'envergure et 550 tonnes (charge comprise qui peut atteindre 230 kg) qui n'est pas sans rappeler le Spruce Goose de Howard Hughes qui n'a volé qu'une seule fois en 1947. Par comparaison, un A380 au décollage pèse un maximum de 562 tonnes. Depuis 2015, Stratolaunch est devenu une filiale d'une autre société de Paul Allen, Vulcan.

L'avion porteur est conçu et fabriqué par Scaled Composites, la société de Burt Rutan en collaboration avec une autre société d'ingénierie américaine, **Dynetics** (1500 personnes, créée en 1974). L'avion porteur est sorti de son hangar en mai 2017 et doit prendre son envol d'ici fin 2017 dans le désert de Mojave. L'avion est propulsé par six réacteurs Pratt & Whitney PW4000 récupérés de Boeing 747 usagés. Bref, une sorte de "maker" à grande échelle.

La société américaine **Orbital ATK** planche sur le véhicule à lancer dans l'espace, le Pegasus XL, une fusée de 17,6 m de long permettant d'envoyer 443 kg en orbite. Stratolaunch a érigé deux hangars de 8200 et 8607 m2 pour la construction et l'assemblage de l'avion porteur. Les premiers lancements sont prévus d'ici 2019.

MarsOne (2011)

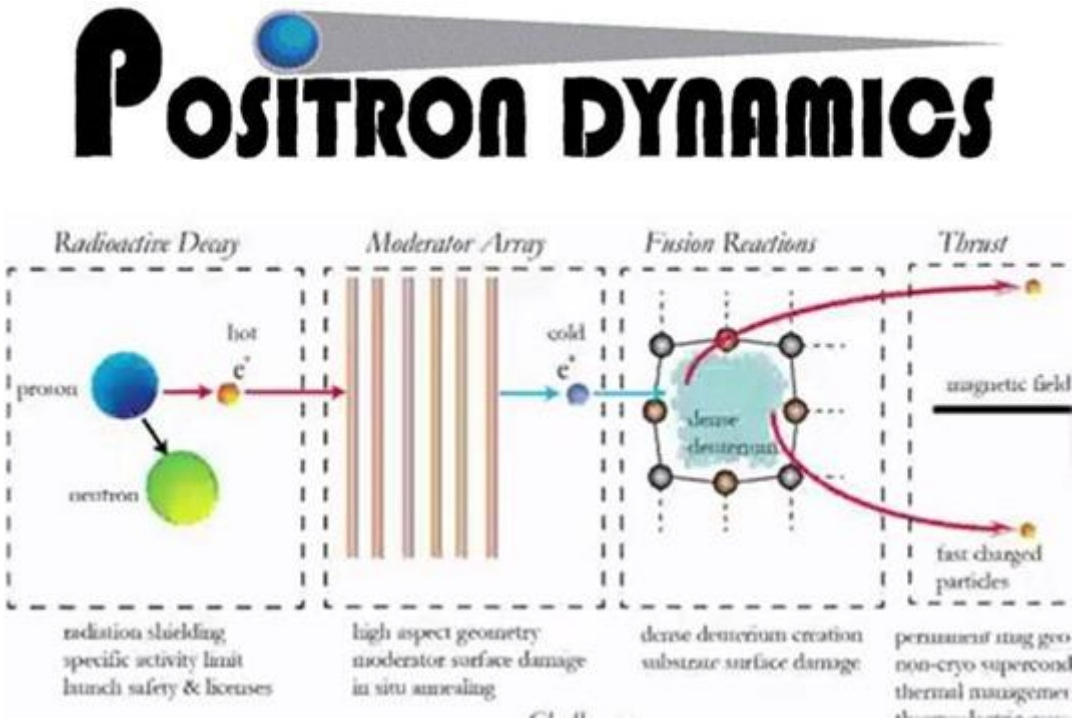
Mars One est un curieux animal. Il s'agit d'une ONG des Pays Bas qui ambitionne d'envoyer des hommes sur Mars et d'y installer une colonie permanente. Elle a déjà commencé à sélectionner des astronautes. L'ONG est structurée avec d'un côté une association à but non lucratif, Mars One Foundation, qui doit gérer la mission, et Mars One Ventures, qui va en monétiser les droits. Le plus loufoque est que cette entité veut financer le projet via les droits d'un documentaire TV.



Pour le reste, c'est totalement fantaisiste, même si il est prévu de s'appuyer sur des ressources technologiques du marché, comme les lanceurs de SpaceX. La société veut "lever des fonds" pour financer son projet. Environ $100B. Une petite levée en crowdfunding fera l'affaire à moins qu'il s'agisse d'un prêt à long terme ! Donc, à moins de ponctionner l'intégralité du fonds récemment créé par l'Arabie Saoudite et Softbank, on ne voit pas trop comment cela pourrait être financé. Bref, il est plus facile de passer de la réalité TV à la Maison Blanche que d'aller sur Mars.

Positron Dynamics (2011)

J'ai découvert cette startup américaine dans la conférence Hello Tomorrow en octobre 2016 à Paris. Ryan Weed (**vidéo**) y présentait son concept de moteur à antimatière permettant l'exploration de l'Univers à une vitesse d'environ le dixième de la vitesse de la lumière. A une telle vitesse, on pourrait explorer les exoplanètes autour d'Alpha du Centaure en quarante ans.



L'antimatière désigne des éléments dont les particules ont une charge opposée aux particules ordinaires : positrons par opposition aux électrons et antiprotons pour les protons, les protons étant inchangés. On a pu reconstituer en labo des atomes d'antihydrogène avec un positron et un antiproton. Nous avons aussi vu dans l'épisode sur les télescopes spatiaux dans les rayons gamma que ceux-ci produisaient un électron et un proton lorsqu'ils rencontraient de la matière. Lorsque de la matière rencontre de l'antimatière, cela dégage une très grande quantité d'énergie. Bien plus grande que dans la fusion ou la fission nucléaire. On pourrait ainsi aller sur Mars en se propulsant avec un gramme d'antimatière.

Seulement voilà, un, cette antimatière coute très cher à produire, dans des accélérateurs de particules, tout aussi cher à conserver avec de grands aimants supraconducteurs pour l'isoler, et à utiliser ensuite de manière contrôlée. On a déjà bien du mal à contrôler la fusion nucléaire ! Donc, on est dans le domaine d'une potentialité scientifique théoriquement possible mais très lointaine d'un point de vue pratique.

Là-dessus, comment expliquer que cette startup ait pu lever $1,5m alors que son projet est plus proche de la science-fiction que de la science et du business ? La raison est simple : l'antimatière a d'autres usages qui sont, eux, terrestres. Sa production

peut aussi servir au contrôle de qualité de certains matériaux. La société planchait sur un appareil d'émission de positrons pour le contrôle non destructif utilisant un procédé breveté en 2011. La société semble avoir fermé selon la Crunchbase.

Elle n'est cependant pas la seule sur ce créneau. Un équivalent français existe avec **Posithot**, basées à Sceaux dans les Hauts de Seine. Elle se concentre plus sagement sur le contrôle non destructif avec, également, un générateur de positrons, exploitant un procédé provenant du CEA. D'ailleurs, les positrons sont utilisés en imagerie médicale dans les PET Scanners, PET signifiant Positron Emission Tomography. Cette technique détecte les rayons gamma émis par des sources radioactives de positrons qui traversent le corps à examiner.

World View Enterprises (2013)

World View Enterprises est une startup créée dans l'Arizona qui veut proposer des voyages en ballon à hélium à l'altitude de 32 km, voisine de celle qu'avait atteint l'autrichien Felix Baumgartner dans son fameux saut en 2012 sponsorisé par Red Bull (39 km, **vidéo**). Les marchés visés sont le tourisme spatial, l'expérimentation scientifique et d'autres applications commerciales à déterminer. Le tout de ferait dans une capsule emportant six passagers et deux membres d'équipage. Les premiers voyages sont prévus d'ici fin 2017 mais cela risque de prendre du retard comme tout projet de ce genre. Ceci étant, les défis techniques ne sont pas du même ordre de grandeur que ceux des projets précédents. Sauf peut-être la conception de la nacelle avec des grandes vitres qui devront supporter le différentiel de pression entre l'intérieur et l'extérieur qui est proche du vide.

J'ai découvert cette initiative via Rachel Delacour, fondatrice de BIME Software, acquis en 2015 par l'américain Zendesk. Elle s'est inscrite dans la liste d'attente des passagers de cette opération et a été visiblement acceptée (le mail correspondant *ci-dessous*) !

From: **Andrew Antonio** <andrew@worldview.space>
Date: Wed, Jan 11, 2017 at 5:20 PM
Subject: World View
To: "rdelacour@zendesk.com" <rdelacour@zendesk.com>

Ms. Delacour,

I'd like to officially welcome you to our community of World View Voyagers. We appreciate your reservation and look forward to making your dream of spaceflight come true in the very near future. It's very rare that we receive reservation deposits without any form of contact prior – so if you have any questions whatsoever about the experience you can expect to receive or the progress of our R&D effort itself, don't hesitate to ask. We're available 24/7 for our Voyagers.

Based on our existing backlog of tickets, you're currently slotted in right at #183 (very much contingent upon safe and comprehensive completion of our R&D program.)

We'd love to meet you or speak to you via phone soon. If you're able, we'd love you to join our new HQ and Spaceport Tucson Grand Opening celebration. It's from 4-7pm on Thursday, February 23rd in Tucson, AZ. It'll be a great opportunity to see our facility, learn about our progress, and meet other Voyagers, investors, government officials, and friends. Here's a link with more information about that event: https://worldviewgrandopening.splashthat.com/?

World View Enterprise a levé $15m auprès du fonds d'investissement américain Canaan Partners, qui est plutôt spécialisé dans la santé. La société n'est pas seule sur ce créneau. Il y a aussi **Zero 2 Infinity**, une initiative espagnole basée à Barcelone lancée en 2009. Les premiers vols commerciaux sont prévus d'ici 2019.

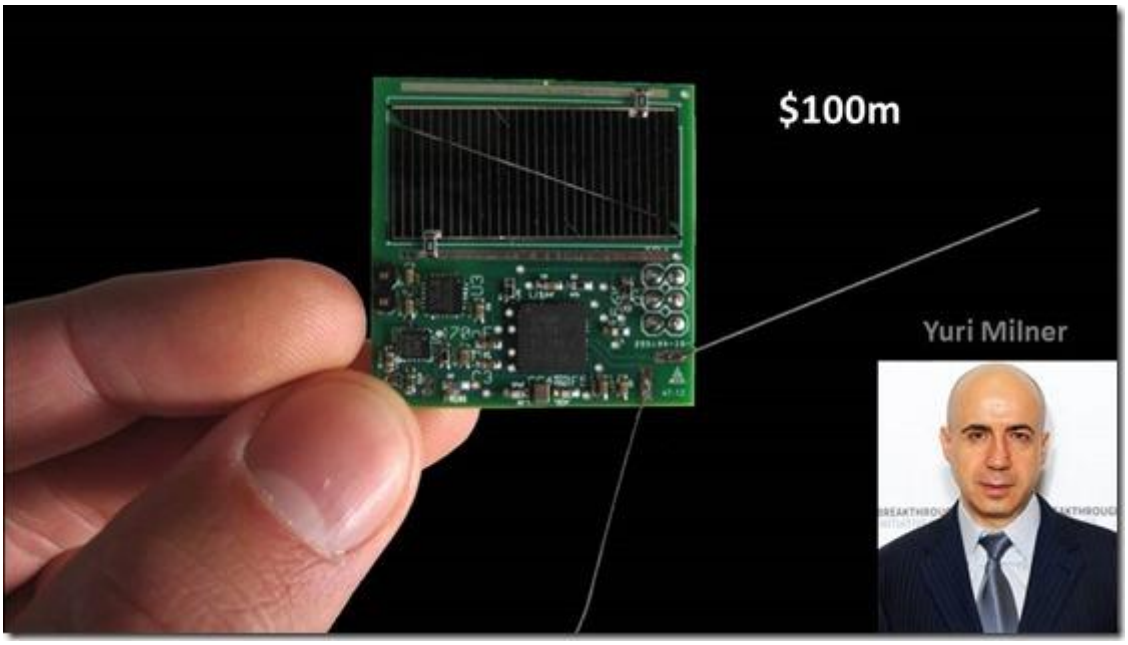
Breakthrough Initiatives (2015)

Breakthrough Initiatives est un programme de recherche d'intelligence extraterrestre lancé par le milliardaire russe Yuri Milner, qui a fait fortune dans l'investissement, notamment avec son fameux fonds DST qui est actionnaire, entre autres, de Facebook, Alibaba, Twitter et Spotify.

Le programme doté de $100m finance des projets indépendants sur une décennie et structuré en quatre initiatives :

- **Breakthrough Listen** : pour écouter ce qui vient d'un million d'étoiles et identifier des sources extraterrestres. Il permettra notamment de poursuivre les efforts lancés par le SETI depuis les années 1960, celui-ci étant financé par la NASA. Le projet exploite deux radiotélescopes que nous avons **déjà vus**, le Green Bank Telescope aux USA et le Parkes en Australie. Il s'appuie aussi sur des observations dans le visible avec le télescope de 2,4 m de l'observatoire Lick aux USA.
- **Breakthrough Message** : est le pendant émission du précédent, consistant à créer un message descriptif de l'humanité à envoyer vers ces étoiles, dans la continuité de celui qui est intégré dans les sondes Voyager lancées en 1977 et qui sont tout juste en train de sortir du système solaire.
- **Breakthrough Starshot** : pour l'envoi de sondes vers les étoiles les plus proches et à plus de 20% de la vitesse de la lumière. Cette initiative annoncée en 2016 consiste à envoyer un millier de nano-sondes de quelques grammes, les StarChip, vers Alpha du Centaure et la planète Proxima du Centaure b récemment découverte. Ces sondes équipées d'une voile solaire d'environ 1 m2 de surface seront

propulsées par un réseau de laser à impulsions sur Terre cumulant 100 GW et accélérant les sondes en moins de 10 mn à la bonne vitesse. Les sondes utiliseront des caméras CMOS pour photographier les planètes et étoiles explorées et renvoyer ces photos sur terre, avec au minimum 4,5 ans de patience pour les récupérer. Le projet est bien documenté dans "**A Roadmap to Interstellar Flight**" de Philip Lubin (67 pages) qui date d'avril 2016. Et les premières sont on été envoyées **en orbite basse** en juillet 2017 ! Il faudra bien calculer les dimensions des antennes des radio-télescopes chargés de capter les signaux émis par ces sondes !



- **Breakthrough Watch** : pour détecter des exoplanètes ressemblant à la Terre, autour d'étoiles situées à moins de 20 années lumière.

Finalement, ce Yuri Milner est le seul des grands entrepreneurs qui s'intéresse à autre chose que le système solaire !

Les outils de l'astronomie amateur

L'astronomie amateur est un marché de niche depuis des décennies. Les leaders de ce marché sont américains avec des sociétés telles que **Celestron**, **Meade**, **Astro-Tech** ou **Sky-Watcher** qui proposent depuis quelques années des télescopes connectés à votre smartphone ou tablette.

En France, nous avons deux startups qui se sont lancées dans le secteur :

- **Unistellar**, qui exposait au CES 2017 et propose un télescope connecté doté d'un amplificateur de lumière améliorant sa sensibilité par rapport aux télescopes amateurs de focale équivalente (**vidéo**). Le principe consiste à accumuler la lumière avec un capteur CMOS avec plusieurs poses courtes d'affilée qui sont traitées numériquement et envoyées ensuite dans le viseur numérique du télescope. Leur télescope équipé d'un miroir de 6,3 cm équivaudrait à celui d'un télescope optique de 1 mètre côté sensibilité (mais pas en résolution angulaire…). La société a annoncé l'été 2017 un partenariat avec le SETI. Son eVscope pourra ainsi alimenter

en mode “crowdsourcing” les bases de données du SETI aux USA. La société est basée près d’Aix en Provence.

- **Vaonis**, qui planche sur le Stellina, un télescope portable compact également connecté (**vidéo**). Il sera commercialisé en deux versions, l’une à 2000€ pour commencer, et l’autre à 4000€, avec une caméra de respectivement 3096 x 2080 pixels (un Sony CMOS IMX178) et 4656 x 3520 pixels (refroidie). La société est basée à Montpellier.

Les télescopes peuvent être complétés par une caméra CCD ou CMOS comme celles de **Atik** et **SBIG** voire un appareil photo numérique reflex.

Les télescopes géants ont toutefois des capacités énormes que n’ont pas les télescopes amateurs et qu’ils ne sont pas prêts d’avoir. Mais les astronomes amateurs jouent un rôle significatif dans la recherche scientifique. Certains identifient des astéroïdes et des exoplanètes. Ils exploitent parfois la grande quantité de données ouvertes qui est publiée par les observatoires. Les astronomes amateurs bénéficient de ressources communautaires comme **Cosmostory**, **Star-Guide** et **Stelvision** qui proposent notamment des guides des étoiles.

Enfin, ce milieu a aussi ses propres margoulins et notamment les sociétés qui vous proposent de donner le nom que vous souhaitez aux étoiles. Des noms qui ne se retrouvent que dans leurs bases de données propriétaires et n’ont aucune valeur dans la communauté scientifique internationale ! L’escroquerie est expliquée **ici**.

Progrès technologiques issus de la conquête spatiale

L’une des justifications économiques de la conquête spatiale souvent avancée sont ses retombées économiques industrielles. En effet, nombre d’avancées dans les technologies de pointe issues du spatial se sont démocratisées, à commencer par tout ce qui a trait au numérique. Des ponts naturels existent aussi entre les industries spatiales, dans l’aviation et dans les applications militaires. Ce n’est pas pour rien que l’on évoque les industries aérospatiales.

Voici quelques-uns des nombreux domaines sont impactés :

Le **big data** et le **machine learning** : qui sont particulièrement mis à contribution avec les télescopes terrestres et spatiaux. Ceux-ci génèrent d’énormes volumes de

données qu'il faut capter, transmettre, stocker, traiter et distribuer aux astronomes et astrophysiciens. Les volumes s'évaluent maintenant en Peta-octets voire Exa-octets. Les data-centers des télescopes sont parmi les plus puissants au monde. Le machine learning et le deep learning interviennent pour aider les astronomes dans l'exploitation de ces gros volumes de données, notamment pour identifier des exo-planètes. Tout cela fait progresser le secteur avec des retombées indirectes dans les autres secteurs d'activité.

Les **batteries** : leur densité énergétique et fiabilité dans la durée sont essentielles pour les vaisseaux spatiaux de toutes sortes. Toute avancée dans le spatial peut avoir des retombées dans des domaines divers tels que pour les batteries des véhicules électriques.

Les **capteurs photo** : les avancées régulières dans les capteurs CCD des télescopes n'ont pas de retombées directes dans la photo numérique grand public, ce d'autant plus que celle-ci fait désormais appel de manière dominante à des capteurs CMOS. Par contre, les applications de contrôle non destructif ainsi que celles de la surveillance, ces dernières faisant appel à des capteurs infrarouge, peuvent tirer parti des avancées du spatial.

L'**imagerie médicale** : elle aussi profite des technologie spatiales. Deux exemples français l'illustrent avec d'anciens astronomes chercheurs d'exoplanètes devenus entrepreneurs dans l'imagerie médicale : Emmanuel Chereul de Voxscan basé à Lyon qui améliore les technique d'imagerie médicale des animaux de laboratoire et Sasha Loiseau de Mauna Kea Technologies (du nom du site d'observatoires de Hawaï que nous avons plusieurs fois cité au sujet des télescopes terrestres) qui propose des solutions d'endoscopie laser.

Emmanuel Chereul

VOXCAN
→ Animal Medical Imaging Services

imagerie médicale pour petits animaux

Sasha Loiseau

Mauna Kea Technologies

endoscopie laser

La **santé** : le thermomètre infrarouge électrique, inventé en 1991 à partir des capteurs infrarouge (en **voici quelques autres**).

Les **matériaux innovants** : les matériaux isolants, les nano-matériaux, les matériaux composites sont autant d'avancées croisées entre les applications civiles, militaires et spatiales. Exemples avec de nombreux matériaux isolants : le PICA (Phenolic Impregnated Carbon Ablator) qui est utilisé chez Space X, le PCCM (Protective Ceramic Coating Material) qui est réutilisé dans l'industrie des fours pour économiser l'énergie

ou le diborure de magnésium, une céramique supraconductrice qui est réutilisée dans l'IRM.

La **gestion de projets complexes** : est un apanage de nombreux projets que nous avons pu examiner dans ces lignes, notamment ceux qui sont pilotés à l'échelle européenne par l'ESO, l'ESA, ou qui associent l'ESA à la NASA. La communauté des astronomes et des astrophysiciens a une grande habitude de gestion de projets complexes, où il faut savoir prendre des décisions à plusieurs, gérer des priorités et arbitrages, avoir en tête les objectifs (scientifiques) et aussi, gérer une bonne collaboration internationale.

La **robotique** : c'est l'apanage des sondes spatiales qui doivent fonctionner souvent de manière autonome et tenir compte de temps de latence de plusieurs dizaines de minutes pour les communications avec la Terre pour les sondes et rovers posées sur Mars. La robotique jouera certainement un rôle dans la construction de structures dans l'espace. La NASA a créé Robonaut, un robot avec deux membres supérieurs utilisé dans l'ISS depuis 2011. Chacun de ses membres est doté de 150 capteurs dont des capteurs de position, thermiques, tactiles, de force et de torsion. Exemple de réutilisation : Renault-Nissan a annoncé au CES 2017 un partenariat avec la NASA pour récupérer ses logiciels de robotique et les exploiter dans ses véhicules autonomes.

RENAULT NISSAN

NASA

La **science fiction** : est aussi source d'inspirations depuis des décennies. Barbara Belvisi du Hardware Clubd l'avait évoqué avec brio lors de la conférence Leade.rs en avril 2017 à Paris ("**When fiction ends and science begins**"). Le téléphone mobile a été inventé par Martin Cooper de Motorola, s'inspirant du communicator de Star Trek qu'il avait découvert dans la série TV dans les années 1960. Le téléphone à clapet des années 2000 en est aussi issu. Et Siri ou Amazon Alexa pilotant des objets connectés est dans la même lignée.

On retrouve cela dans le concours Qualcomm XPrize de Tricorder qui cherche à rendre concret un autre appareil de Star Trek, celui qui intègre toutes les technologies de diagnostic de santé. L'un des finalistes de ce concours était le français Archimej, à l'origine d'un appareil d'analyse sanguine capable de mesurer plusieurs dizaines de paramètres.

Epilogue entrepreneurial

Nous voici arrivés au terme de ce long voyage dans l'astronomie. Il comprend au total plus de 200 pages de découvertes focalisées sur les outils de l'astronomie, les télescopes terrestres et spatiaux, dans toutes les longueurs d'onde. Ces articles visaient à répondre à des questions que je me posais : mais comment font-ils pour détecter, qui un trou noir, qui un pulsar, qui une exoplanète ? Et qui sont les sociétés ou organisations qui les conçoivent et construisent ? Et comment se positionnent les entrepreneurs stars du spatial dans le domaine ? Ces derniers étaient surtout un prétexte pour faire un tour scientifique et technologique du sujet.

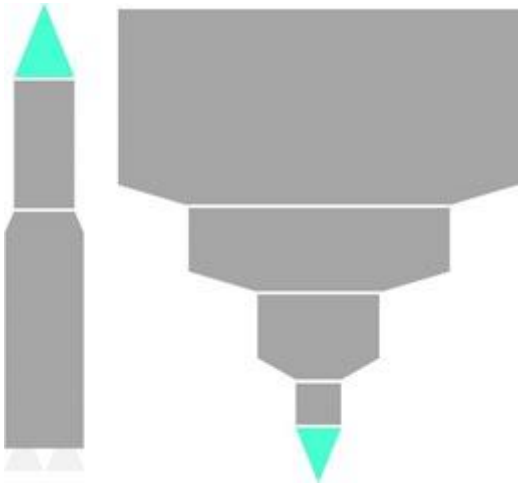
Au jeu des analogies, ce parcours permettait aussi de prendre un peu de recul sur l'entrepreneuriat en général et sur les startups en particulier. La conquête spatiale et l'astronomie présentent quelques différences et similarités clés avec l'entrepreneuriat startupien, surtout dans le numérique.

Les **sciences fondamentales** (mathématiques, physique, astrophysique, optique, mécanique quantique, physique des particules) sont clés dans la discipline. Nombre de startups dans le numérique sont créées sans bagage scientifique particulier. Ce sont des innovations dites d'usages qui s'appuient sur des technologies de commodité largement disponibles, même si les développeurs sont devenus une ressource humaine rare et convoitée par les startups. Dans l'entrepreneuriat du spatial, il est difficile de se lancer sans un sérieux bagage dans ces différents domaines.

Mais le monde des startups est en train de **revaloriser l'innovation scientifique et technologique**. Que l'on appelle cela les hard techs, les deep tech ou les frontier tech, il s'agit à chaque fois de startups qui créent ou valorisent un patrimoine scientifique et technologique clé faisant avancer un domaine comme dans la santé, dans l'intelligence artificielle et la robotique, dans les nanotechnologies, dans l'énergie ou

les transports. Les passerelles entre les domaines sont de plus en plus nombreuses et pas seulement via le point commun technologique que constitue le numérique.

Le **modèle de développement** de la startup est inverse de celui de la fusée à plusieurs étages du côté des besoins en énergie et en financement. Pour libérer une fusée de la gravité, il faut un premier étage puissant et un second et troisième étages moins puissants. Ils doivent être financés d'un seul coup, pas par étape. En haut de la fusée se trouve la charge utile, le produit. Si le premier étage ne fonctionne pas, le produit est généralement détruit au décollage. Avec la startup, on commence par le produit, et le financement vient ensuite progressivement au gré de la rencontre avec le marché. Les gros étages de financement arrivent plus tard. Le succès est immédiat pour la fusée et progressif pour la startup. En tout cas, comme les fusées, les startups ont besoin de vélocité pour atteindre leurs objectifs, surtout de croissance exponentielle. Les moyens sont juste un peu différents. Mais l'Univers a quelque chose de fascinant par son côté justement exponentiel en terme de potentiel !



Le **succès de la fusée** est la conséquence d'un énorme travail en amont : ingénierie, intégration et tests. L'échec est une option mais il est très couteux. La méthode des MVP ou du RAD (Rapid Application Deployment) n'a pas trop cours dans l'espace, surtout pour les plus grands projets. Nous avons vu plus haut comment Elon Musk a contourné ce problème en mettant en place ce type de méthode via le choix de l'intégration verticale. RAD, Agile, Pivot, toussa, c'est bien, mais moins se planter, c'est mieux. Vous avez bien entendu plus droit à l'échec que les équipes du JWST ou de celles qui vont envoyer les premiers hommes sur Mars. Vous pouvez vous rassurer en évoquant les catastrophes que furent Apollo 1 (1967, en phase de test au sol !), Soyouz 11 (1971), Challenger (1986) et Columbia (2003). Ce n'est pas une raison pour faire n'importe quoi. Cela ne fait pas de mal de réfléchir un peu avant de se lancer bille en tête. Bref, l'entrepreneur a à la fois la tête dans les étoiles, les mains dans le cambouis et les pieds sur terre !

Ce qui est long terme et lointain est **financé par le secteur public** comme dans l'astronomie et la connaissance de l'Univers. L'espace commercial relève de la proximité et d'un relatif court terme : la Terre et les orbites basses. L'espace commercial est étroitement associé à l'envoi de satellites, surtout dans les télécommuni-

cations. C'est un métier de transporteur. Et les charges transportées proviennent de chercheurs, de services publics, de la défense, d'ONG diverses, ou enfin, d'opérateurs commerciaux traditionnels comme les diffuseurs de TV satellite. Dès que l'on s'éloigne de la Terre, cela ressort quasiment exclusivement de la recherche publique. Avec une rare exception, l'initiative de Yuri Milner que nous avons évoquée dans ces lignes. Les grands entrepreneurs de l'espace ont des objectifs voisins de ceux des startups habituelles comme générer des économies d'échelle pour réduire les coûts. C'est l'objectif d'Elon Musk avec SpaceX.

Comme dans le numérique, le rôle des **femmes** est insuffisant dans les métiers de l'espace et de l'astronomie. J'ai valorisé dans le **premier article** autant de femmes que d'hommes astronomes. Dans la pratique, les femmes astronomes sont essentiellement contemporaines, comme Vera Rubin, Sara Seager ou les françaises Hélène Courtois (Lyon) et François Combes (Collège de France). Comme dans la Silicon Valley, les femmes, en particulier noires, sont victimes de discriminations directe ou indirecte dans le **secteur de l'astronomie**. La photo *ci-dessus* du directoire de l'European Space Observatory génère un impression de déjà-vu ! Une rare exception symbolique ? L'émission "Sky at Night" de BBC Four, qui est coanimée par la physicienne et astronome **Maggie Aderin-Pocock**. Emission très bien faite et hebdomadaire qui, au passage, n'a pas d'équivalent dans le paysage audiovisuel français, à ma connaissance en tout cas !

Pour terminer, les startups ont besoin d'**autonomie**. Dans l'espace, personne ne vous entend crier. C'est presque pareil dans un accélérateur. C'est pour cela que l'on ne part généralement pas seul, comme dans les vols habités. A part pour les premiers vols du début des années 60, les astronautes partent toujours à plusieurs : 2 (Gemini), 3 (Apollo) puis 7 (Navette Spatiale) et de 3 à 7 (ISS). Comme un vaisseau spatial, la startup doit apprendre à être autonome tout en bénéficiant de l'écosystème (les stations au sol, Eugene Kranz…). Vous devez aussi avoir votre Houston en cas de problème, qu'il soit coach, mentor, business angels ou les trois à la fois.

So what ? A vous de voir et de rêver. Nous savons maintenant comment les astronomes s'y prennent pour remonter aux sources de l'Univers ou découvrir des exoplanètes. Ils utilisent plein de technologies dont certaines ont des applications dérivées Terre à Terre. C'est en tout cas terminé pour ces devoirs de vacances ! Je vais vous les compiler rapidement dans un ebook en PDF pour ceux qui apprécient les lectures séquentielles.