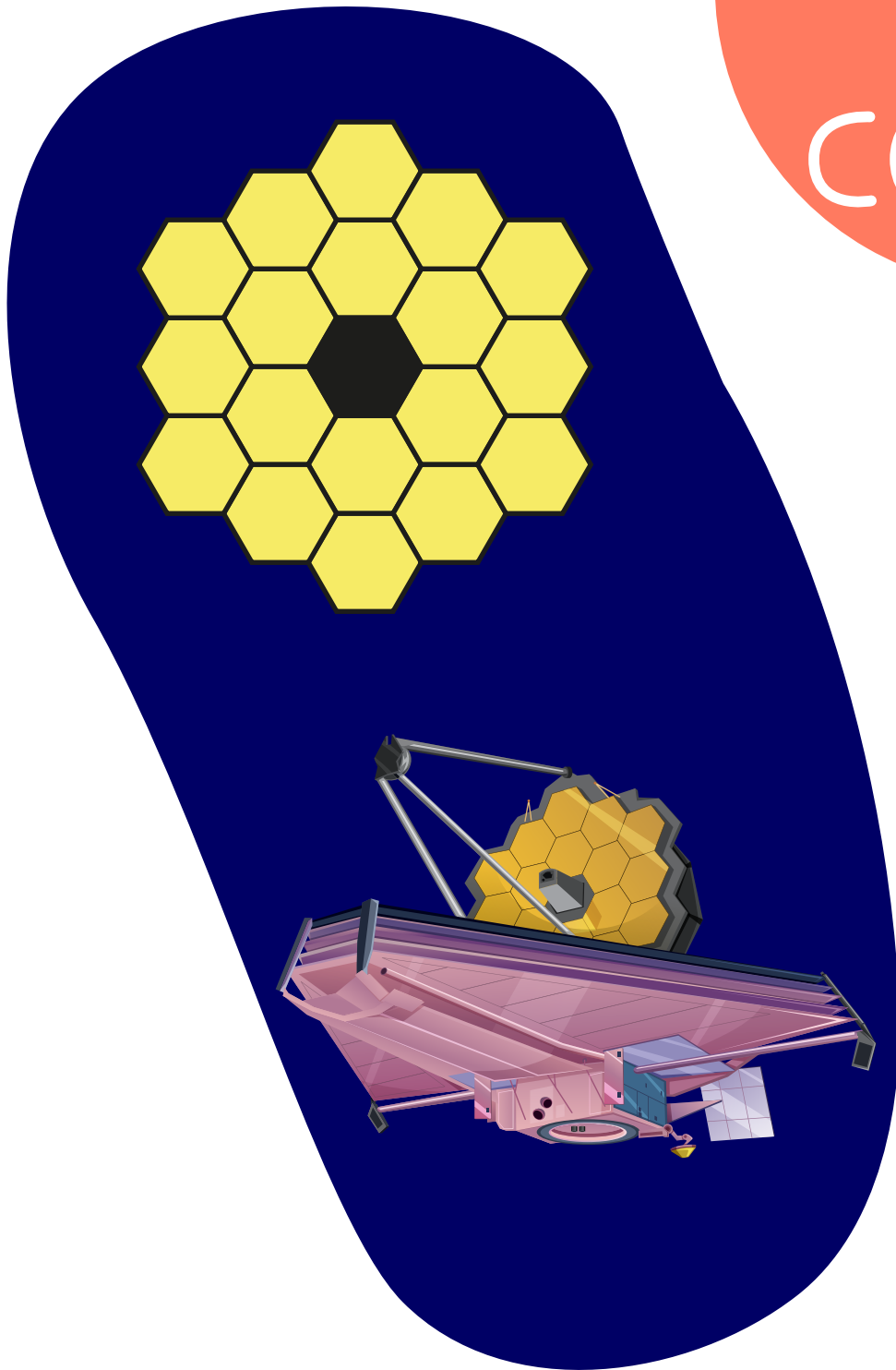


ASTRES

EN
COURS



LE TÉLESCOPE SPATIAL... JAMES WEBB - LE PROJET

N°6a

EDITO

Ce numéro de la gazette
Astres en cours s'adresse aux
enseignants, aux éducateurs
mais également à tous les
curieux des choses du ciel.

Le télescope spatial *James Webb* (JWST pour *James Webb Space Telescope*), avec son miroir de 6,5 m de diamètre, est l'instrument de tous les superlatifs. Dans ce premier document, le sixième numéro de la gazette *Astres en cours* vous propose de découvrir la raison d'être du JWST ainsi que l'histoire longue et complexe qui caractérise son développement et sa construction depuis la fin des années 1980.

Nous passerons en revue les objectifs très ambitieux qui lui sont assignés par les astronomes et présenterons les quatre instruments scientifiques qu'il embarque.

A la fin du document, nous abandonnerons notre télescope le jour de Noël 2021, alors qu'il attend son lancement dans la coiffe de la fusée *Ariane 5*... tel un cadeau au pied du sapin.

Pour exploiter au mieux ce document, nous vous conseillons la lecture préalable des dossiers « Lunette astronomique et télescope » (version collège ou lycée) et « Les exoplanètes ». Disponibles ici :

<https://www.cite-sciences.fr/fr/vous-etes/enseignants/ressources-en-ligne>

Département Éducation et Formation
Universcience
educ-formation@universcience.fr

1 LA GENESE
D'UN PROJET

Page 4

2 JAMES WEBB EST-IL LE
REEMPLACANT DE HUBBLE ?

Page 11

3 LES OBJECTIFS SCIENTIFIQUES
DU TELESCOPE JAMES WEBB

Page 12

4 PLAN DU TELESCOPE

Page 20

5 LES INSTRUMENTS
EMBARQUES A BORD

Page 22

1

LA GENESE D'UN PROJET

La prise de conscience de l'intérêt d'observer depuis l'espace remonte au sortir de la Seconde Guerre mondiale, bien avant l'envoi du premier satellite. Un télescope spatial présente deux avantages sur son équivalent terrestre :

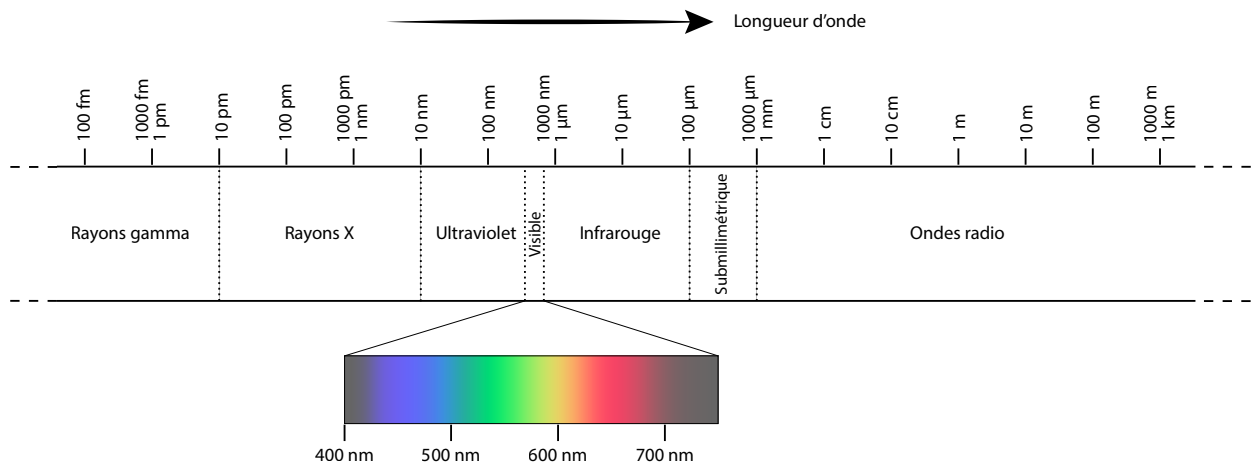
- 1) Son **pouvoir de résolution** (sa capacité à distinguer des détails) **n'est plus limité par les turbulences atmosphériques**, qui peuvent nettement dégrader les images.
- 2) **Il n'est plus restreint au domaine visible** mais peut observer l'intégralité du spectre électromagnétique. Il peut, en particulier, avoir accès au rayonnements infrarouge et ultraviolet, qui sont presque complètement diffusés ou absorbés par l'atmosphère.



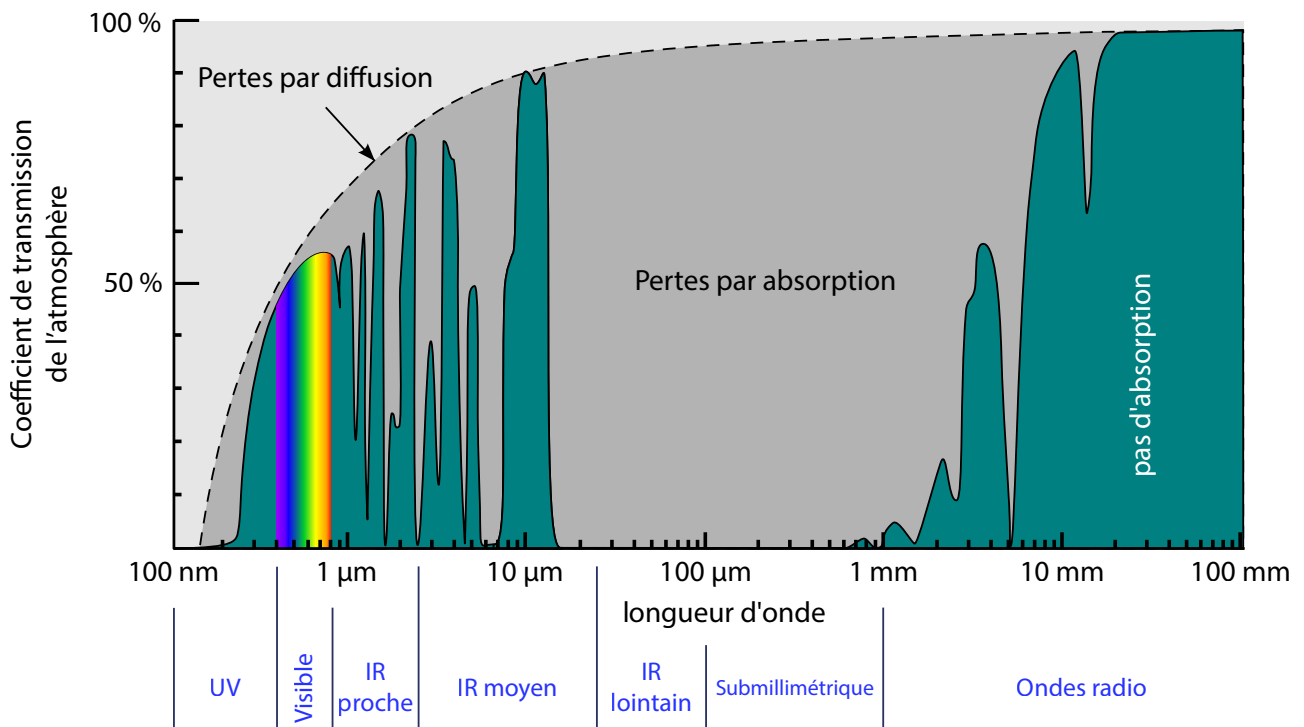
Le projet d'un grand télescope spatial fut mis sur les rails au tout début des années 1970. Imaginé dès l'origine pour être lancé par la navette spatiale américaine alors en cours de développement, conçu pour être réparé et amélioré en orbite, il reçut le nom de **Hubble Space Telescope** (HST) en 1983.

Il s'agissait d'abord, certes, d'un hommage au grand astronome Edwin Hubble (1889-1953), dont les observations montrèrent que certaines nébuleuses, comme celle d'Andromède, étaient des galaxies lointaines semblables à la nôtre et plus tard, que l'Univers était en expansion.

Ce nom ne laissait toutefois planer aucun doute sur les visées cosmologiques du télescope : mesurer l'âge de l'Univers et sa vitesse d'expansion, observer les premières galaxies.



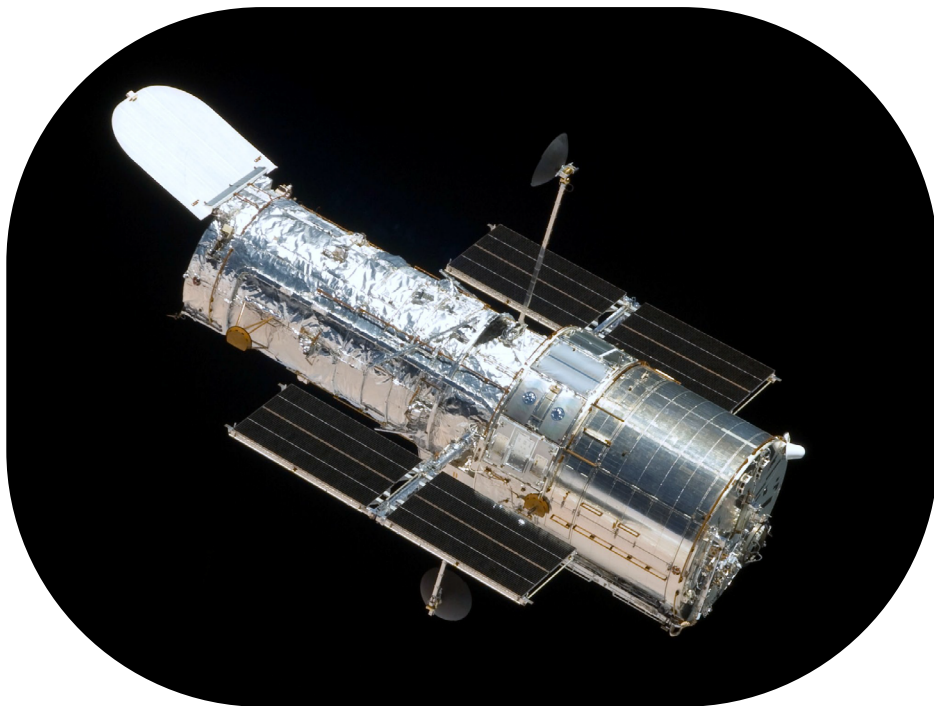
Le spectre électromagnétique, des rayons γ aux ondes radio. Le spectre visible n'en constitue qu'une infime partie.



Coefficient de transmission de l'atmosphère terrestre. Ce coefficient représente la fraction d'énergie (solaire ou autre) qui atteint le sol par rapport à l'énergie qui arrive au sommet de l'atmosphère. Dans le visible, les pertes résultent principalement de la diffusion Rayleigh (celle qui rend le ciel bleu) et dans l'infrarouge, de l'absorption par les molécules de l'atmosphère.

D'après https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atmosph%C3%A4rische_Absorption_fr.svg.

L'instrument pâtit de la désintégration tragique de la navette spatiale *Challenger* en janvier 1986 et ne put prendre le chemin de l'espace qu'en avril 1990. Enfin ! Cependant, les premières images qu'il envoya furent décevantes, un peu floues, en tous cas très loin des espoirs suscités dans la communauté astronomique. On comprit rapidement que le **miroir primaire du télescope**, d'un **diamètre de 2,4 m**, souffrait d'une aberration de sphéricité : il était trop plat à sa périphérie, de... 2,2 millièmes de millimètres : les rayons réfléchis par le centre et la périphérie du miroir ne convergeaient pas au même point. Heureusement, le défaut de courbure s'avérait homogène et, dans le cadre d'une mission de maintenance assurée par la navette spatiale *Endeavour* en 1993, on le corrigea via un dispositif optique présentant la même anomalie... mais inversée.



Photographie du télescope spatial *Hubble* prise durant l'ultime mission d'entretien de l'instrument en 2009, depuis la navette spatiale *Atlantis*.

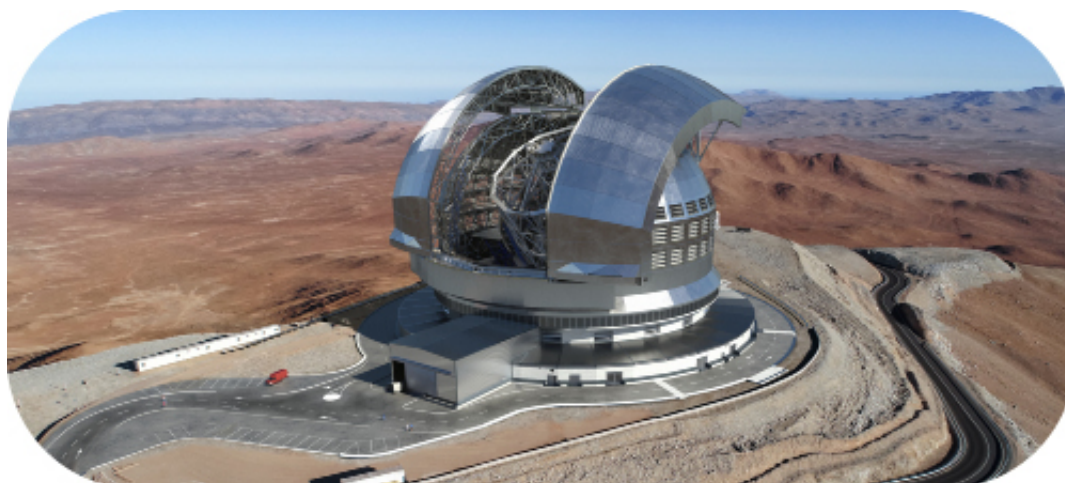
Crédit : <https://hubblesite.org/contents/media/images/3813-Image.html>.

34 ans après sa mise en orbite autour de la Terre, 15 ans après sa dernière maintenance, à 600 km au-dessus de nos têtes, le HST fonctionne toujours. Observant inlassablement l'Univers à des longueurs d'onde comprises entre 115 nm à 2500 nm (0,115 μm - 2,5 μm), soit de l'ultraviolet lointain à l'infrarouge proche, il a révolutionné nos connaissances dans le domaine de la cosmologie, de la planétologie, des trous noirs, des exoplanètes et de la vie des étoiles ainsi que des galaxies.

Toutefois, le HST vieillit et les défaillances techniques se sont multipliées (gyroscopes, instruments, électronique, etc.). De plus, le télescope ne se meut pas dans un vide parfait (la densité moyenne de la matière le long de son parcours est proche de $10^{-13} \text{ kg.m}^{-3}$!) et subit des frottements qui, à terme, le font spiraler de plus en plus rapidement vers les parties denses de notre atmosphère. Depuis le retrait des navettes spatiales en 2011, l'agence spatiale américaine ne dispose plus de vaisseau capable de réhausser son orbite : le HST est condamné à se désintégrer lors d'une rentrée atmosphérique qui devrait avoir lieu pendant la décennie 2030, la date exacte étant fonction de l'activité du Soleil et de son impact sur la haute atmosphère.

Le destin funeste qui attend *Hubble* est loin d'être la seule raison de lui trouver un successeur. En effet, durant les trois décennies séparant son lancement de celui du télescope *James Webb*, d'énormes progrès ont été réalisés sur les grands télescopes au sol :

- **Le diamètre de leur miroir a beaucoup augmenté.** Alors qu'au moment où le HST était lancé, le plus grand télescope optique du monde était le BTA-6 russe de 6 m de diamètre, il existe aujourd'hui 13 télescopes dont le miroir fait plus de 8 m ! Et ce n'est rien par rapport aux télescopes qui verront bientôt le jour. Songez au télescope géant Magellan, dont le miroir primaire sera constitué de sept miroirs de 8,4 m de diamètre et qui possédera le même pouvoir de résolution qu'un miroir unique de 24,5 m (2029, Chili). Pensez au Télescope de Trente Mètres (TMT) dont le miroir segmenté fera 30 mètres de diamètre (Hawaï ?, 203?). Et rêvez devant l'ELT (pour *Extremely Large Telescope*) européen dont le miroir segmenté de 39,3 m de diamètre ne comportera pas moins de 798 éléments hexagonaux parfaitement réfléchissants ;



Vue d'artiste de l'ELT. L'*Extremely Large Telescope* sera installé au sommet du Cerro Armazones, à une altitude de 3 046 m dans le désert d'Atacama au Chili. Le nivellement du sommet du Cerro Armazones, en vue de la construction de l'ELT, a été achevé en 2015. Crédit : ESO (<https://elt.eso.org/public/images/ELT4k-4-comp-Open/>).

- ils sont désormais munis de l'**optique active**. A l'aide d'actionneurs, on corrige les déformations du miroir, comme celles dues à son propre poids en fonction de son inclinaison, afin d'optimiser la qualité d'image et de corriger les différentes aberrations optiques. Bref, on maintient ce miroir dans sa forme optimale contre tous les facteurs environnementaux ;

- beaucoup utilisent l'**optique adaptative**, une technique qui consiste à corriger en temps réel les défauts de l'image dus à la turbulence atmosphérique. Ainsi, les télescopes au sol qui emploient cette technique obtiennent quasiment les mêmes performances que s'ils étaient dans l'espace ;

- les **instruments placés au foyer des télescopes au sol**, dont le rôle est d'exploiter la lumière collectée par la partie optique, se sont prodigieusement améliorés depuis le lancement du HST (imageurs, photomètres, bolomètres, spectromètres à haute résolution, spectroimageurs, interféromètres...), tout comme les détecteurs (caméras CCD, etc. Ainsi, le capteur numérique du futur télescope de l'Observatoire Vera-C.-Rubin (2025) aura 3,2 milliards de pixels !) et les techniques d'analyse et de traitement du signal (progrès dans son analyse mathématique, centres de calcul avec ses supercalculateurs, logiciels scientifiques, services de stockage et systèmes de sauvegarde).



- Clichés de la lointaine planète Neptune capturés par :
- à gauche, Yepun, l'un des quatre télescopes de 8,2 m de diamètre du *Very Large Telescope* (VLT) européen (Chili). L'image est floue ;
 - au centre, le même télescope muni de l'optique adaptative. L'image est nette ;
 - à droite, le télescope spatial *Hubble*. Les clichés ayant été acquis à des moments différents, ils ne montrent pas les mêmes détails à la surface de la planète.

Il est clair que l'optique adaptative permet, depuis le sol, d'obtenir des images dotées d'une définition au moins égale à celles acquises par le télescope spatial *Hubble*.
Crédit : à gauche et au centre ESO / P. Weilbacher (AIP), à droite NASA / ESA / M.H. Wong et J. Tollefson (UC Berkeley).

Le communiqué de presse est disponible en français ici :

<https://www.eso.org/public/france/news/eso1824/>.

Les premières études sur le successeur du HST furent esquissées à la fin des années 1980, avant même son lancement. En 1995, on avait convergé vers l'idée d'un télescope spatial de 8 m de diamètre travaillant dans l'infrarouge. Pourquoi observer dans l'infrarouge plutôt que dans le visible ? Parce que la lumière des premières étoiles et des premières galaxies, dont la détection et l'étude sont l'un des objectifs affichés de ce futur télescope, est fortement décalée vers le rouge par effet Doppler, du fait de l'expansion de l'Univers. Ainsi, la lumière qui a été émise dans le visible et l'ultraviolet par ces corps célestes doit-elle être observée dans l'infrarouge proche ou moyen.

Une étude de faisabilité s'étala de 1995 à 2001 et, pour des raisons de coût, le diamètre du miroir fut ramené à 6 m. On conserva l'idée d'un refroidissement passif et on décida que le télescope serait placé en orbite autour du point de Lagrange L_2 (voyez le second document pour apprendre ce qu'est ce point, où il se situe et quel intérêt il présente pour les télescopes spatiaux).

C'est en 2002 que le télescope prit le nom du deuxième administrateur de la NASA (février 1961 - octobre 1968), James E. Webb (1906-1992) qui joua un rôle essentiel dans le succès du programme *Apollo* et l'arrivée de l'Homme sur la Lune. Le *James Webb Space Telescope* (JWST) était né !

De la nécessité de refroidir les télescopes observant dans l'infrarouge

Observer dans l'infrarouge n'est pas chose aisée car le sol et l'atmosphère émettent avec un maximum d'intensité dans ce domaine de longueurs d'onde. Il convient donc de refroidir les instruments portés par les télescopes infrarouge au sol et de les maintenir aussi froids que possible, pour que les objets qu'ils observent ne soient pas confondus avec d'autres sources de chaleur comme celle émise par ces instruments eux-mêmes ! Et, bien que le milieu interplanétaire soit généralement considéré comme hostile et glacial, cette précaution doit aussi s'appliquer aux instruments des télescopes spatiaux, qui doivent impérativement être isolés thermiquement pour se protéger du rayonnement solaire... et de leur propre émission de chaleur due au simple fait qu'ils fonctionnent. Deux possibilités s'offrent aux ingénieurs :

- un refroidissement actif, accompli par une mise en contact avec de l'hélium liquide embarqué dans un grand réservoir. C'est la solution qui a été utilisée par le télescope infrarouge américain *Spitzer*, dont le stock d'hélium à -272 °C s'est finalement tari en mai 2009, après cinq ans et demi de bons et loyaux services ;

- un refroidissement passif, réalisé à l'aide d'un bouclier thermique. C'est la solution privilégiée pour le JWST. Elle permet à trois des quatre instruments qu'il embarque de travailler sans problème à -234 °C .

Toujours en 2002, la NASA sélectionna les constructeurs du télescope spatial ainsi que la fusée européenne *Ariane 5* pour le lancement. La surface du miroir, constitué de 18 segments en béryllium (choisi pour sa rigidité, sa légèreté et son faible coefficient de dilatation), fut, peu après, définitivement fixée à 25 m² pour un diamètre équivalent de 6,5 m. Après plusieurs années passées à définir précisément les caractéristiques techniques du télescope, après plusieurs passages en revue approfondis du projet par des commissions internes et externes à la NASA, l'agence fédérale donna son accord à la fin de l'année 2008 pour entamer la construction.

Le projet prit, une nouvelle fois, du retard. Sept années supplémentaires furent nécessaires pour fabriquer et tester à fond les 18 segments du miroir, les quatre instruments scientifiques, la plateforme, les parties mobiles, l'électronique... Il fallut ensuite vérifier que l'ensemble de ces différents éléments, testés individuellement, s'intégraient parfaitement les uns aux autres. Tous ces tests, débutés en 2017, furent onéreux et chronophages. Mais personne ne voulait revivre le traumatisme subi lorsqu'on découvrit le défaut du miroir de *Hubble*, peu après son lancement ! Passons sur les difficultés rencontrées par le système de propulsion, par le bouclier thermique lors des tests de déploiement, les conséquences de la pandémie de Covid-19... en juillet 2021, le JWST était enfin apte à être envoyé dans l'espace !

Ce projet pharaonique qui devait être lancé en 2007 et ne coûter qu'un seul milliard de dollars ne sera finalement achevé que quatorze années plus tard, pour un coût proche de dix milliards de dollars...



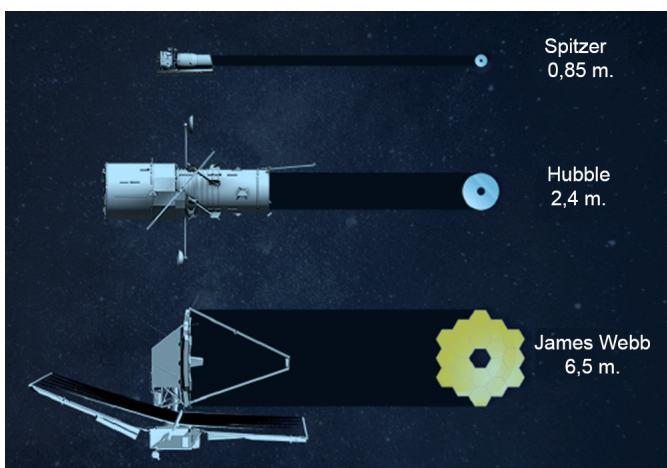
Entièrement assemblé, le télescope spatial *James Webb* se trouve ici dans une « salle blanche » à Kourou en Guyane. En position repliée, il est prêt à être installé sous la coiffe du lanceur *Ariane 5*. Photographie prise le 15 octobre 2021.

Crédit : NASA / Chris Gunn
(<https://www.flickr.com/photos/nasawebbtelescope/51604442070/>).

2

LE JWST EST-IL LE REMPLACANT DU HST ?

Voilà une question qui peut vous étonner ! N'avons-nous pas cessé de le proclamer dans ce document ? La NASA n'a-t-elle pas bâti sa communication sur cette affirmation ? En fait, le télescope spatial *James Webb* n'est pas le remplaçant de *Hubble*. Il en est un successeur, de la même façon qu'il succède également à *Spitzer*, un télescope spatial américain travaillant exclusivement dans l'infrarouge et le submillimétrique (de 3,6 μm à 160 μm), doté d'un miroir de 85 cm de diamètre et ayant fonctionné de 2003 à 2020.



Comparaison de la taille des télescopes spatiaux *Spitzer*, *Hubble* et *James Webb*, ainsi que de leur miroir respectif (0,85 m, 2,4 m et 6,5 m).

Crédit : <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Comparatif-JWST,-Spitzer-et-Hubble-fr.png>.

Le véritable remplaçant de *Hubble* pourrait être *Habitable Worlds Observatory*, un projet de télescope spatial qui serait lancé durant la décennie 2040. Doté d'un miroir de 6,5 m à 8 m, il effectuerait ses observations dans l'ultraviolet, le visible et l'infrarouge proche. *Habitable Worlds Observatory* pourrait mener un programme

complet dans tous les domaines de l'astrophysique mais serait optimisé pour rechercher des exoplanètes de la taille de la Terre, tournant à bonne distance de leur étoile pour héberger de l'eau liquide en surface... sous réserve qu'elles disposent de l'eau nécessaire, d'une surface, et des conditions atmosphériques indispensables à sa stabilité !

3

LES OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

Le JWST s'est vu assigner quatre objectifs ambitieux, qu'il tentera de remplir pendant les dix années - c'est une valeur minimale - que devrait durer sa mission :

1. Permettre l'étude des premières étoiles et des premières galaxies ;
2. Améliorer notre compréhension de l'évolution des galaxies ;
3. Lever le voile qui s'étend sur les premiers stades de la formation des étoiles et des systèmes planétaires ;
4. Permettre la détermination de la composition des atmosphères de nombreuses exoplanètes.

1. Les premières étoiles, les premières galaxies



Peu après le Big Bang, l'Univers n'était qu'une soupe informe de particules (neutrons, protons, électrons, neutrinos) et de lumière. L'Univers se refroidissant au cours du temps, neutrons et protons se réunirent pour former les premiers noyaux atomiques et leurs isotopes, très simples : l'hydrogène, l'hélium et le lithium. Cette phase de nucléosynthèse primordiale débuta une seconde après le Big Bang et prit fin lorsque la température passa sous le milliard de degrés, trois minutes plus tard.

La température de l'Univers poursuivit sa descente et lorsqu'elle tomba sous une valeur un peu inférieure à 3 000 °C, 380 000 ans après le Big Bang, les électrons célibataires se lièrent aux noyaux d'hydrogène pour former des atomes d'hydrogène. Cette recombinaison, comme on l'appelle bien improprement, fit chuter radicalement la densité d'électrons libres qui diffusaient jusqu'alors les photons et rendaient l'Univers opaque : la lumière put enfin se propager.

Il n'y avait alors aucune étoile, aucune galaxie. Il fallut attendre quelques centaines de millions d'années pour qu'apparaissent les premières sources de lumière, mettant ainsi fin à ces âges sombres.

Un changement se produisit après la formation des premières étoiles. Sans doute très massives (jusqu'à 300 fois la masse du Soleil), elles émettaient un puissant rayonnement ultraviolet capable

d'ioniser les atomes d'hydrogène. Cette époque, coincée entre la fin des âges sombres et un milliard d'années après le Big Bang est connue sous le nom de « l'époque de la réionisation ». Toutefois, les astronomes ne connaissent pas les caractéristiques des premières étoiles et ne savent pas quand elles sont apparues ni quand le processus de réionisation a commencé à se produire.

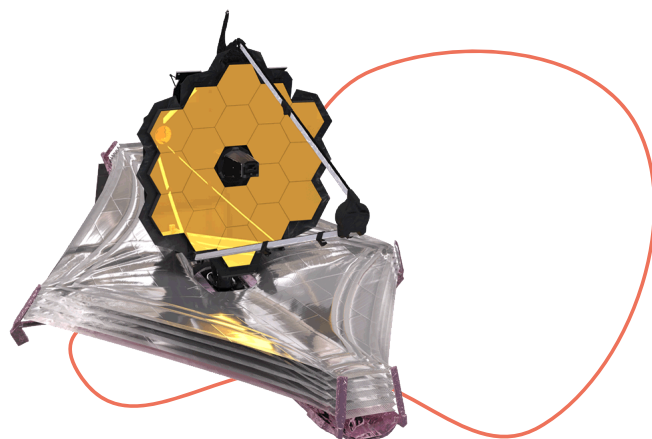
Questions clés

- Quand et comment la réionisation s'est-elle produite ?
- Quelles sont les caractéristiques des astres l'ayant engendrée ?
- À quoi ressemblaient les premières galaxies ?

L'apport technique du JWST

Pour trouver les premières galaxies, le JWST effectuera des relevés ultra profonds de l'Univers dans le proche infrarouge, puis effectuera un suivi avec la spectroscopie à basse résolution et la photométrie dans l'infrarouge moyen.

Pour étudier la réionisation, une spectroscopie proche infrarouge à haute résolution sera nécessaire.



2. L'évolution des galaxies

Les étoiles ne se répartissent pas au hasard dans l'Univers mais se concentrent au sein de gigantesques structures appelées galaxies. Nous-mêmes faisons partie d'une galaxie, la Voie lactée. On peut la voir la nuit, sous un ciel bien sombre, sous la forme d'une bande blanchâtre diffuse qui traverse le ciel. Il s'agit de notre galaxie, vue depuis l'intérieur et par la tranche.

Les galaxies, qui se comptent par milliards, sont souvent des objets très photogéniques. Toutefois, elles n'ont pas toujours ressemblé à ce qu'elles sont aujourd'hui puisqu'elles ont eu largement le temps d'évoluer depuis leur naissance il y a plusieurs milliards d'années. Ainsi, les galaxies spirales, à la beauté fascinante, se sont sans

doute formées par collisions entre galaxies plus petites. Les galaxies elliptiques géantes seraient nées de la fusion entre galaxies de même taille. On pense d'ailleurs que presque toutes les galaxies massives ont subi au moins une fusion d'envergure durant les dix derniers milliards d'années.

Les photographies des galaxies les plus anciennes nous renvoient une image bien différente des galaxies qui nous sont contemporaines : elles sont petites, ne possèdent pas vraiment de structure et sont le siège de naissances d'étoiles à profusion. Comment ces galaxies ont évolué et ont développé leur structure est encore une question ouverte...



Questions clés

- Comment les galaxies se sont-elles formées ?
- Quels processus leur ont donné leur forme au cours de leur évolution ?
- Comment les éléments chimiques sont-ils distribués dans les galaxies ?
- On sait désormais que des trous noirs supermassifs occupent le centre de la plupart des galaxies. De quelle façon les influencent-ils ?
- Pour expliquer les mouvements des étoiles dans les galaxies, les mouvements de ces dernières au sein des amas de galaxies et certaines propriétés du fond diffus cosmologique, les astronomes ont été amenés à postuler l'existence d'une *matière noire* encore énigmatique, qui n'interagirait avec la matière ordinaire que par l'intermédiaire de la gravitation. Les simulations numériques montrent d'ailleurs que la formation des grandes structures de l'Univers (galaxies, amas et superamas de galaxies) ne peut se comprendre qu'en incluant cette composante exotique de la matière. Quelle est donc la nature de cette mystérieuse matière noire et comment a-t-elle effectivement contribué à forger le contenu de l'Univers ?

L'apport du JWST

En raison de la finitude de la vitesse de la lumière, observer loin dans l'espace, c'est observer loin dans le temps. Avec son très grand miroir, le JWST a la capacité de détecter les galaxies les plus lointaines et donc de les étudier alors qu'elles étaient dans leur prime jeunesse, quelques centaines de millions d'années après le Big Bang. En les comparant aux galaxies d'aujourd'hui, il devrait permettre aux astronomes de comprendre leur croissance et leur évolution ainsi que de déterminer les caractéristiques des étoiles qu'elles hébergeaient.

L'établissement du spectre de milliers de galaxies de ces temps très reculés les aidera à comprendre comment les éléments plus lourds que l'hydrogène se sont formés et accumulés tout au long de l'histoire de l'Univers. Ces études révéleront également des détails sur la fusion des galaxies et mettront en lumière le processus de formation des galaxies lui-même.

3. La formation des étoiles et des systèmes planétaires

Les étoiles se forment à partir des nuages moléculaires de gaz froid et de poussières peuplant les galaxies. Devenus instables sous l'effet de perturbations intérieures (turbulences) ou extérieures (par exemple, l'explosion d'une étoile proche ou une surpression résultant de leur passage dans l'un des bras galactiques, dans le cas des galaxies spirales), ils se fragmentent et les fragments s'effondrent sous leur propre poids.

Au cours de l'effondrement, la température augmente et les fragments se mettent à tourner de plus en plus rapidement sur eux-mêmes. Ce mouvement de rotation conduit à leur aplatissement sous la forme de disques de gaz, au sein desquels se formeront des planètes, entourant des protoétoiles en croissance. Ainsi, enfouies dans une enveloppe de gaz et de poussière, ces protoétoiles ne peuvent qu'être observées dans le domaine radio puis, l'enveloppe s'amincissant, infrarouge et enfin visible.



Questions clés

- Comment les nuages de gaz et de poussières s'effondrent-ils pour former des étoiles ?
- Pourquoi la plupart des étoiles se forment-elles en groupes ou en amas ?
- Quelles sont les différentes étapes de la formation des systèmes planétaires ?
- Comment les étoiles en fin de vie libèrent-elles dans le milieu interstellaire les éléments lourds qu'elles ont forgés en leur cœur ? Comment ces éléments lourds sont-ils recyclés et incorporés dans les nouvelles générations d'étoiles et de planètes ?

L'apport du JWST

La lumière visible ne peut s'échapper du cœur des nuages denses et poussiéreux où se déroulent les premières étapes de la formation des étoiles. Toutefois, le rayonnement infrarouge le peut assez rapidement. Aussi, les capacités d'imagerie du JWST permettent aux astronomes d'étudier les étoiles au cours de leur formation. De plus, cet instrument est capable de prendre des photographies des disques de matière autour de ces étoiles jeunes. Enfin, grâce à la spectroscopie, il peut déterminer la nature et l'abondance des molécules organiques présentes dans ces disques qui donneront éventuellement naissance à des systèmes planétaires.

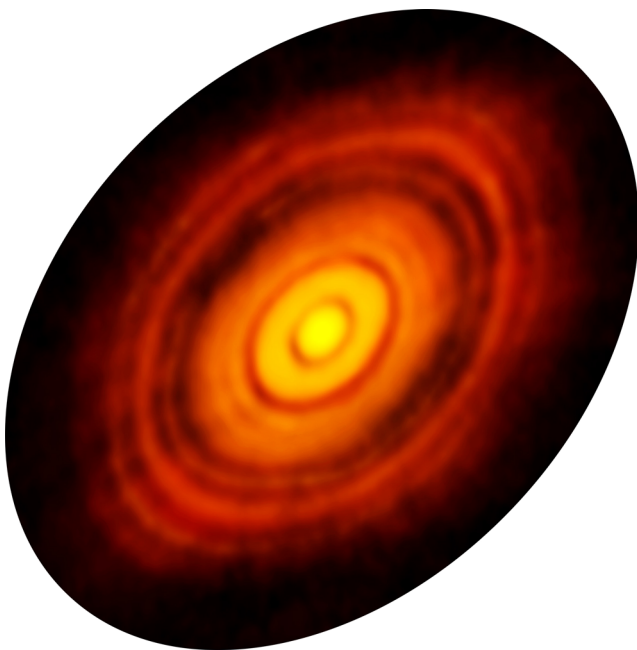


Image de l'étoile HL Tauri et de son disque protoplanétaire prise par le radiotélescope géant ALMA (pour Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) à une longueur d'onde de 1,28 mm. Le disque de cette étoile jeune (moins d'un million d'années) située à 450 années-lumière dévoile une série d'anneaux brillants séparés par des sillons sans doute créés par des planètes en formation. Crédit :

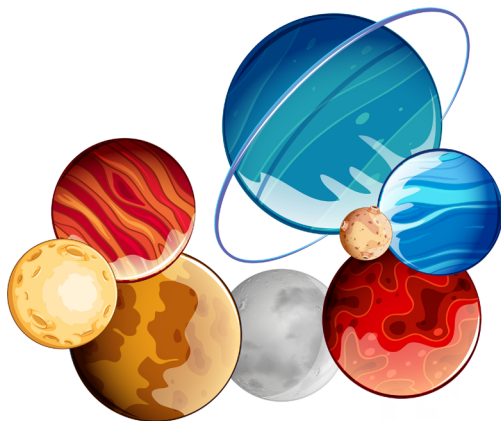
<https://www.eso.org/public/images/eso1436a/>.

4. Les exoplanètes

Les exoplanètes sont des planètes en orbite autour d'autres étoiles que le Soleil. Elles ne font donc pas partie du système solaire et sont extrêmement lointaines. Leur existence a longtemps été suspectée, faisant écho à la question *Y a-t-il de la vie ailleurs que sur Terre ?* La découverte des premières exoplanètes dans la dernière décennie du XX^e siècle les a fait entrer de plain-pied dans la réalité astronomique.

Près de 6 000 exoplanètes ont été découvertes à ce jour, et près d'un millier de systèmes planétaires comportant plus d'une planète. On a trouvé :

- des planètes autour de naines rouges de faible masse comme autour d'étoiles massives ;
- des planètes autour d'étoiles plus jeunes que le Soleil comme autour d'étoiles plus âgées ;



- des planètes dans des systèmes d'étoiles doubles et même triples ;
- des planètes autour d'étoiles enrichies en éléments lourds (c'est-à-dire plus lourds que l'hydrogène et l'hélium) comme autour d'étoiles en étant presque dépourvues ;
- des « Jupiter chauds », c'est-à-dire des planètes très massives dont la distance à leur étoile est très faible et se chiffre à quelques millions de kilomètres. Les modèles indiquent qu'elles n'ont jamais pu se former à des distances si réduites. On invoque donc des phénomènes de migration planétaire, phénomène qui décrit comment la planète, alors très jeune, aurait spiralé vers l'intérieur en interagissant avec le disque de gaz lui ayant donné naissance ;
- des planètes à l'orbite très elliptique, ce qui contraste singulièrement avec la quasi-circularité de l'orbite des planètes du système solaire. Il est vraisemblable qu'elles aient acquis leur orbite elliptique après une série de rencontres chaotiques avec d'autres planètes de leur système respectif, qui auraient été éjectées en retour ;
- de véritables systèmes planétaires. Ainsi, Trappist-1 possède au moins sept planètes.

Un catalogue complet se trouve sur l'encyclopédie des planètes extrasolaires (<http://exoplanet.eu>).

Questions clés

- Quelles sont les étapes précises qui mènent à la formation des planètes ?
- De quoi sont composés les disques protoplanétaires qui donneront naissance aux planètes ?
- Les planètes géantes se forment-elles à l'endroit qu'elles occupent aujourd'hui ou migrent-elles systématiquement vers leur étoile après s'être formées dans les régions externes de leur système ?
- Comment la formation des planètes géantes affecte-t-elle celle des planètes telluriques ?
- La Terre s'est sans doute formée dans une région pauvre en eau, trop proche du Soleil. L'eau qu'elle contient aujourd'hui est-elle exclusivement d'origine externe ? Aurait-elle été apportée par des comètes ou des astéroïdes ?
- Les comètes et les autres corps glacés que l'on trouve aux frontières du système solaire n'ont quasiment pas évolué depuis leur formation. Quels indices contiennent-ils sur nos origines ?

L'apport du JWST

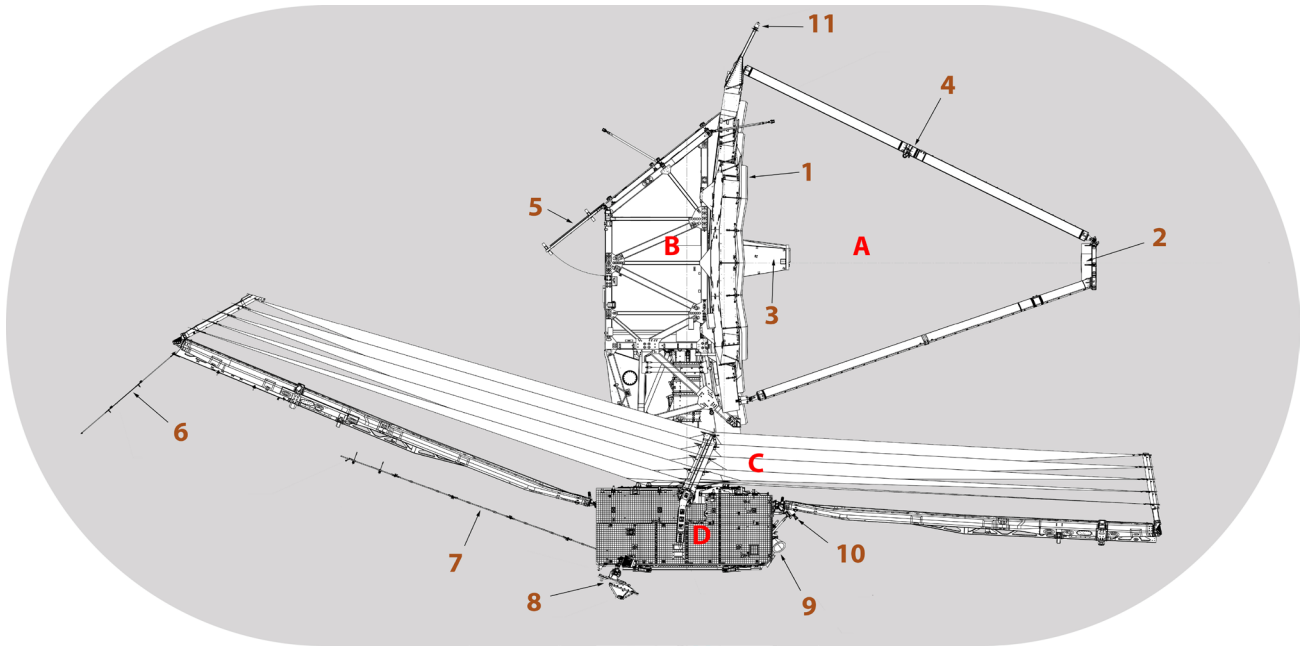
Deux des instruments embarqués sur le JWST sont équipés de coronographes. Ce sont de petits masques qui permettent de bloquer la lumière des étoiles pour mettre en valeur leur environnement immédiat et rendent ainsi possible la détection directe d'exoplanètes sous forme de points.

Le JWST peut également étudier l'atmosphère des exoplanètes grâce à la méthode des transits, dont voici une brève description du principe : si, par chance, la Terre se situe dans le plan de l'orbite d'une exoplanète, celle-ci passe alors, de notre point de vue, régulièrement devant son étoile. Ce transit se manifeste par une diminution périodique et mesurable de son éclat (quelques pourcents tout au plus), due au masquage partiel de sa lumière par la planète. Lors du transit, la lumière de l'étoile traverse l'atmosphère de l'exoplanète et subit alors, à certaines longueurs d'onde, une absorption caractéristique de la part des composés atomiques et/ou moléculaires de l'atmosphère de la planète. Il devient alors possible de déterminer ces composés ainsi que leur abondance.

En plus d'étudier les exoplanètes, le JWST examinera avec une sensibilité et une résolution sans précédent les corps de notre système solaire : Mars, les planètes géantes et leurs satellites, les objets de la ceinture de Kuiper, les astéroïdes et les comètes.

4

PLAN DU TELESCOPE



Le JWST comprend quatre sous-ensembles, notés **A**, **B**, **C** et **D** sur le schéma.

A : Partie optique

Elle permet de collecter le rayonnement émis par les corps célestes à l'aide de plusieurs miroirs et le renvoie vers les instruments scientifiques.

B : Instruments

Quatre instruments rassemblés dans un module analysent le rayonnement collecté et produisent des images et des spectres.

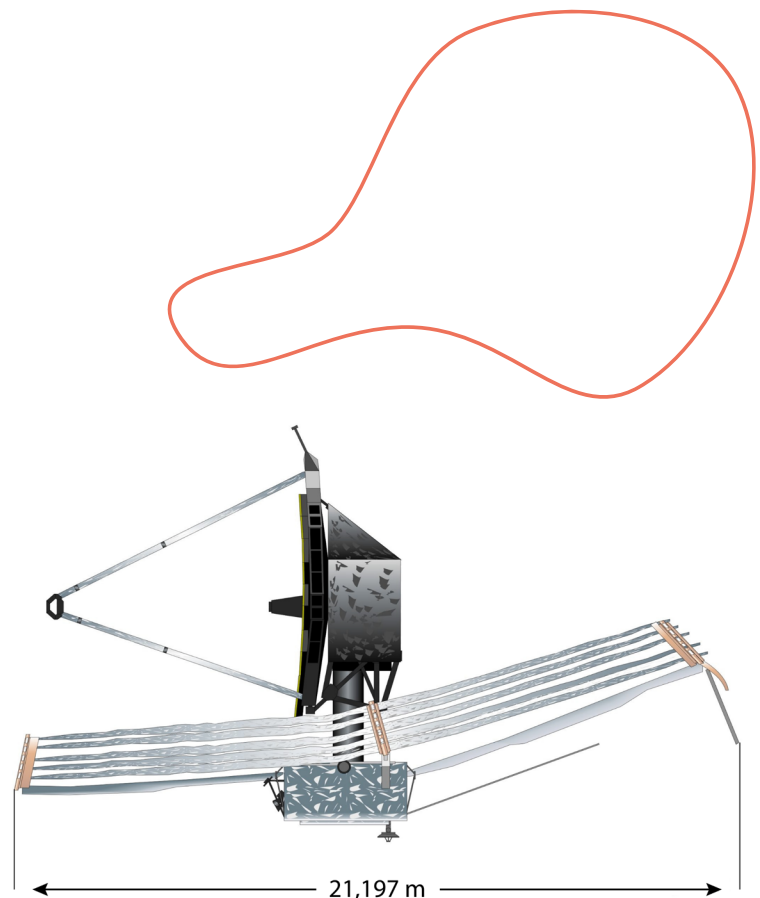
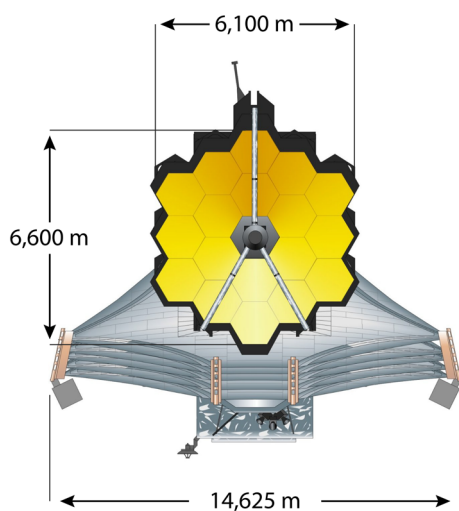
C : Bouclier thermique

Son rôle est de protéger les parties les plus sensibles du télescope (optique et instruments) du rayonnement infrarouge en provenance du Soleil, de la Terre et de la Lune, ainsi que de la plateforme.

D : Plateforme

Elle regroupe toutes les fonctions de support : contrôle et maintien de l'orbite, alimentation électrique, stockage des données collectées par les instruments et communications avec la Terre et entre les équipements du télescope.

- 1 : Miroir primaire.** Segmenté et fixé à une structure rigide il possède un diamètre de 6,5 m. Chaque segment est recouvert d'une très mince couche d'or, parfaitement réfléchissante dans l'infrarouge, qui lui donne sa couleur dorée.
- 2 : Miroir secondaire.** D'un diamètre de 74 cm, il renvoie la lumière du miroir primaire vers le miroir tertiaire
- 3 : AOS (Aft Optics Subsystem).** Il contient le miroir tertiaire et un petit miroir à orientation fine qui permet de stabiliser l'image durant les observations scientifiques.
- 4 : Support du miroir secondaire.** Il permet de maintenir le miroir secondaire suspendu au-dessus du miroir primaire. Il était replié le long du miroir primaire pour le lancement du télescope.
- 5 : Radiateur.** Il dissipe la chaleur générée par les équipement électroniques.
- 6 : Volet arrière compensateur de moment.** Il permet de stabiliser le télescope et donc de minimiser la consommation de carburant.
- 7 : Panneau solaire.** Il fournit son énergie au télescope.
- 8 : Antennes grand et moyen gain.** Elles permettent de communiquer les données vers la Terre et de recevoir des instructions.
- 9 : Viseur d'étoiles (x 2),** utilisé pour orienter le télescope vers sa cible.
- 10 : Moteur-fusée (x 20),** employé pour, entre autres, les corrections d'orbite.
- 11 : Capteur solaire.** Il détecte la position du Soleil et permet de s'assurer que jamais le télescope ne pointe dans sa direction. Il est donc l'un des garants de son intégrité.



5

LES INSTRUMENTS EMBARQUES A BORD

Le JWST embarque quatre instruments rassemblés dans le module ISIM (pour Integrated Science Instrument Module) fixé à l'arrière du support du miroir primaire. Chacun est conçu pour remplir plusieurs objectifs des missions présentées dans le chapitre 3.

NIRCam (pour Near-InfraRed Camera) fournit des images dans le visible, l'infrarouge proche et moyen (0,6 - 5 μm). Équipée d'un coronographe, il peut prendre des clichés des exoplanètes dont la lumière est habituellement masquée par celle, beaucoup plus intense, de leur étoile. Il peut également réaliser des spectres des atmosphères des jeunes exoplanètes (entre 2,5 et 5 μm) et permet l'analyse des disques protoplanétaires.

NIRCam a été conçu et construit par une équipe de l'Université de l'Arizona et par les entreprises américaines Lockheed Martin et Teledyne Technologies.

NIRSpec (pour Near-InfraRed Spectrograph) est un spectromètre travaillant entre 0,6 et 5 μm . Il dispose d'un mode multi-objets qui lui permet de réaliser le spectre simultanément de cent objets. Il est ainsi optimisé pour l'étude des galaxies très lointaines et peu lumineuses.

NIRSpec a été fourni par l'Agence spatiale européenne et son développement a été supervisé par le Centre européen de technologie spatiale (ESTEC) aux Pays-Bas. Il a été construit par Airbus Defence and Space (anciennement Astrium) en collaboration avec un groupe de sous-traitants européens. Certains éléments ont été fournis par le Centre spatial Goddard de la NASA.

MIRI (pour Mid-InfraRed Instrument) est le seul instrument à travailler exclusivement dans l'infrarouge moyen (5 - 28 μm) et aussi le seul à être refroidi activement par un cryoréfrigérateur jusqu'à $-266\text{ }^\circ\text{C}$. Il s'agit d'un spectro-imageur qui peut donc fournir à la fois des images et des spectres. Il dispose d'un coronographe. MIRI contribue d'une manière prépondérante aux quatre grands thèmes de recherche pour lesquels le JWST a été construit.

MIRI a été conçu et construit par un consortium composé de scientifiques et d'ingénieurs de dix pays européens différents sous l'égide de l'Agence spatiale européenne, ainsi que par une équipe du Jet Propulsion Laboratory de Californie et des scientifiques de plusieurs institutions américaines. Notons qu'un des deux sous-ensembles constituant MIRI a été développé et réalisé sous l'égide du CNES en France par le Département d'Astrophysique du CEA-Saclay, avec la participation du LESIA (Observatoire de Paris), de l'Institut d'astrophysique spatiale et du Laboratoire d'astrophysique de Marseille.

NIRISS/FGS (pour Near-Infrared Imager and Slitless Spectrograph/ Fine Guidance System) est un instrument qui combine le spectro-imageur NIRISS au système de guidage fin FGS. Les deux sont toutefois indépendants. NIRISS, qui étudie l'intervalle $0,8 - 5\text{ }\mu\text{m}$, possède quatre modes de fonctionnement. À titre d'exemple, l'un d'eux lui procure la capacité de réaliser le spectre à haute résolution d'un objet unique et brillant. Ce mode vise à observer une exoplanète en transit devant son étoile pour déterminer la composition de son atmosphère. Un autre lui fournit la possibilité d'obtenir les spectres à basse résolution de milliers d'objets à la fois. Un mode qui se prête très bien à l'étude des grands champs de galaxies et à la détermination de leur distance et de leur âge !

NIRISS/FGS a été conçu par l'Agence spatiale canadienne et construit par la société américaine Honeywell.

En mars 2014, l'instrument NIRCam est installé dans le module ISIM. NIRCam rejoint alors NIRISS/FGS et MIRI, déjà intégrés dans le module. L'instrument NIRSpect les rejoindra quelques jours plus tard.
Crédit : NASA / Chris Gunn
(<https://www.flickr.com/photos/nasawebbtlescope/13313063673/>).

