

LE TÉLESCOPE SPATIAL JAMES WEBB

Patrice Bouchet, Directeur de recherche au Département d'astrophysique du CEA-Saclay, chef de projet du Centre d'expertise JWST/MIRI

Après de nombreux déboires et des reports successifs le JWST est enfin parti dans les meilleures conditions. Ce nouveau télescope est porteur de beaucoup d'espoirs pour détecter les premières lueurs de l'Univers, la nucléosynthèse des premiers éléments lourds, la formation des étoiles et des galaxies... Ce dispositif est susceptible d'enrichir profondément notre connaissance de l'Univers.

Hubble, et après ?

Après plus de 30 ans la mission qui avait été impartie au télescope spatial Hubble (HST) pour scruter l'Univers proche a été accomplie *summa cum laude*¹. À tel point que la NASA a finalement décidé de lui redonner une nouvelle jeunesse. En effet, le 17 juillet 2021, après que l'ordinateur de bord a connu un problème (le 13 juin 2021), les instruments scientifiques du télescope ont pu être remis en service, et la collecte de données scientifiques a repris immédiatement.

Pour tous les scientifiques et les amateurs, Hubble est une icône qui leur a donné un aperçu incroyable du cosmos. Mais non seulement les télescopes vieillissent, à mesure que leurs utilisations nous aident à amplifier nos connaissances, mais celles-ci suscitent en nous de nouvelles interrogations, auxquelles ils ne peuvent pas toujours répondre, faute d'avoir été conçus pour ce faire.

Si l'on plaçait les objets de l'Univers local, vus par Hubble en lumière ultraviolette et visible, à des distances dites cosmologiques, ils ne seraient visibles que dans la lumière émise à des longueurs d'onde qui correspondent au rouge lointain et à l'infrarouge. Voir plus loin dans l'Univers cela ne consiste pas seulement à utiliser un télescope plus puissant : il faut prendre en compte l'expansion de l'Univers, qui décale le spectre des objets lointains vers le rouge. De plus, pour étudier les mécanismes de formation des étoiles et de leurs planètes, il faut « transpercer » les poussières, ce qui ne peut se faire qu'en observant dans l'infrarouge. Par conséquent, le nouveau télescope spatial ne devait pas être seulement un « Super-HST », mais il devait aussi être spécialement adapté pour « voir » de tels rayonnements.

¹ « avec la plus haute louange », la plus haute distinction de diplôme utilisée en particulier aux États-Unis (NDLR).

Un peu d'histoire

En 1989, Riccardo Giacconi, directeur du STScI (« Space Telescope Science Institute »), le centre des opérations du HST situé à Baltimore, et futur prix Nobel de physique (2002), prépara l'après-HST, qui était alors prévu pour 2005 (!).

Plusieurs projets de télescopes de 4 m furent alors proposés, mais, en 1995, le directeur de la NASA, Dan Goldin, mettait la communauté astronomique en instance de penser « Plus vite, Meilleur et Moins Cher » (le fameux « Faster, Better, Cheaper »), et demandait un projet de télescope de 8 m à un coût inférieur à celui des télescopes précédents. C'est ainsi que, dès l'année suivante, plusieurs études envisageaient la réalisation de miroirs de 8 m qui pourraient se déployer dans l'espace, pour la modeste somme d'environ 500 millions de dollars. Ce télescope encore dans les limbes fut dès lors baptisé sous le nom de NGST (pour « New Generation Space Telescope »). Hélas, les estimations budgétaires excédaient de plusieurs centaines de millions de dollars la somme qui pouvait être raisonnablement envisagée, et le miroir du NGST dut être réduit à un diamètre de 6,5 m en 2001.

En septembre 2002, le NGST reçut le nom de Télescope Spatial James Webb (du nom de l'administrateur de la NASA en charge du programme Apollo). Ceci fut rendu nécessaire après que la construction du télescope a été confiée au groupe industriel Northrop Grumman Space Technologies dont le sigle était... NGST !

Au cours de l'été 2007, la NASA et l'ESA d'une part, et la NASA et l'ASC d'autre part, signaient leurs protocoles d'accord respectifs. Le coût total du projet fut estimé, à l'époque, à 3,5 milliards de dollars. Il sera estimé, au moment du lancement, à près de 12 milliards ! (11 milliards NASA, 850 millions ESA, et 150 millions ASC). Le JWST devait fonctionner

pendant une durée minimum de 5 ans, mais les agences misaient sur au moins 5 années de plus : un budget de fonctionnement de 1 milliard pour 10 ans d'opération a donc été provisionné. À titre de comparaison, le HST aura coûté 4,1 milliards, entre la première phase de son étude et son lancement, auxquels il convient d'ajouter 250 millions par année pour son fonctionnement. Les agences envisagent maintenant une durée d'exploitation du JWST d'au moins 20 ans !

Finalisation du projet

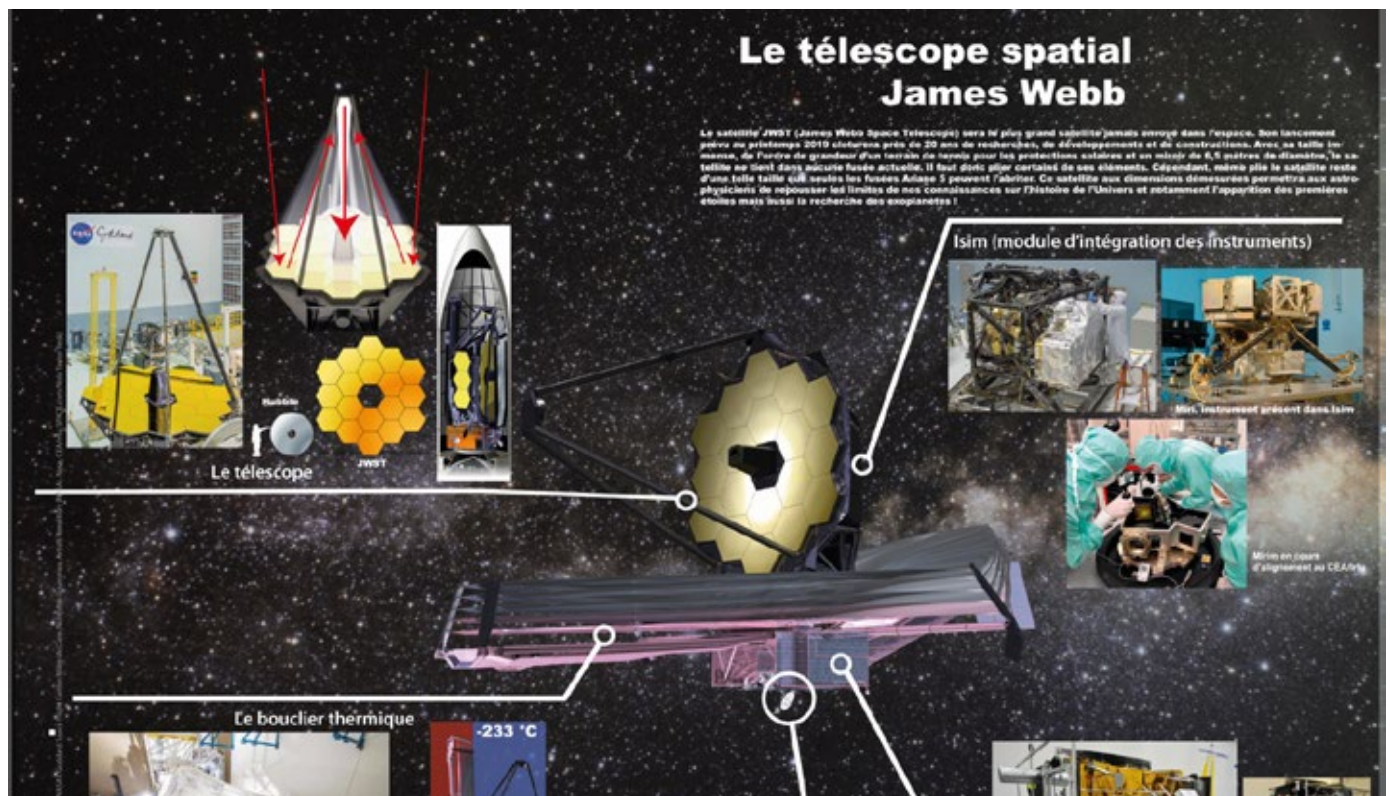
Si fabriquer un miroir de 6,5 m ne pose plus de problème de nos jours, le placer en orbite est une toute autre histoire : en effet, si le HST, qui n'a « qu'un » diamètre de 2,4 m, était mis à l'échelle du JWST, il serait beaucoup trop lourd pour pouvoir être placé dans l'espace ! De plus, aucune coiffe de fusée n'étant assez grande pour contenir un miroir monolithique de cette taille, il fallait donc le replier.

Tous les objets (y compris les télescopes !) émettent un rayonnement dans un domaine de longueurs d'onde qui dépend de leur température. Aux températures qui nous

sont familières, ce domaine correspond à celui couvert par les instruments du JWST. Pour autant, il faut éviter que le signal infrarouge extrêmement faible provenant des objets distants soit noyé dans le rayonnement ambiant du télescope et des instruments. Ceux-ci doivent donc être maintenus à une température la plus basse possible, pour qu'ils émettent dans des longueurs d'onde supérieures à celles auxquelles seront effectuées les observations. De plus, la température de fonctionnement des détecteurs infrarouge doit être impérativement très basse ($-266\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Le HST est en orbite proche autour de la Terre (à environ 570 kilomètres). Pour la moitié de chaque orbite, il traverse l'ombre de la Terre, où les températures plongent à $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ sous zéro. Quand il retourne à la lumière du Soleil, les températures extérieures sont supérieures à 100 degrés Celsius.

Ce qui n'est guère propice à des observations dans l'infrarouge. Le JWST devra être positionné beaucoup plus loin pour être plus froid et à une température stable. De plus, il devra être pourvu d'un grand écran qui bloquera la lumière du Soleil, de la Terre et de la Lune, qui sinon ne manqueraient pas de réchauffer le télescope. Ne serait-ce qu'en ce qui concerne la fabrication du miroir



Le JWST en détail, en haut à droite l'instrument MIRI.

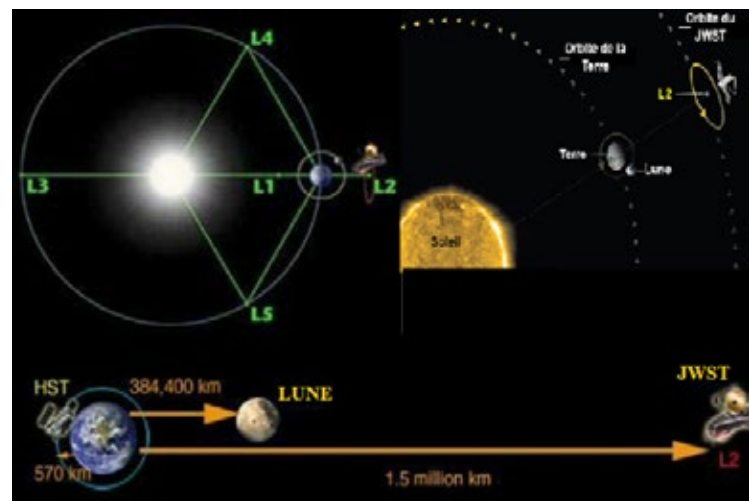
primaire, en particulier avec l'utilisation de béryllium pour qu'il soit ultraléger, mais aussi pour le rendre pliable et pour que sa forme puisse être ajustée dans l'espace, la conception du télescope a eu recours aux dernières avancées technologiques. Le JWST a aussi bénéficié

de développements réalisés sur les détecteurs pour pouvoir enregistrer des signaux extrêmement faibles, sur le contrôle de micro-obturbateurs par des systèmes de micro-électromécanique (pour le positionnement des objets à observer avec le spectrographe NIRSPEC)

et sur une toute nouvelle conception du système cryogénique requis pour refroidir le détecteur de MIRI jusqu'à une température de 7 K. Toutes ces technologies « de pointe » ont été « qualifiées », c'est-à-dire que leur efficacité et fiabilité ont été dûment démontrées, et certifiées conformes aux spécifications requises pour leur utilisation dans l'espace.

Pour masquer le Soleil, la Terre et la Lune ensemble de la manière la plus simple, le plus facile est qu'ils soient vus par le télescope dans la même direction. L'endroit le plus propice pour que cela soit, est ce que les mathématiciens appellent le « second point de Lagrange (L2) » du système Soleil-Terre : un point de Lagrange est une position de l'espace où les champs de gravité de deux corps en orbite l'un autour de l'autre, et de masses substantielles, se combinent de manière à fournir un point d'équilibre à un troisième corps de masse négligeable. C'est un point où l'attraction de la Terre ajoutée à celle du Soleil induit une période de révolution d'un an autour du Soleil, exactement égale à celle de la Terre, permettant un alignement constant Soleil -Terre - point L2.

Le point L2 se situe à 1,5 million de kilomètres. Non seulement l'accès y est direct, ce qui facilite les problèmes de navigation, mais de plus, les forces gravitationnelles



Orbite du JWST - Illustration des points de Lagrange.

combinées de la Terre et du Soleil permettent à elles seules de maintenir le satellite en position, ce qui évitera d'avoir trop souvent recours à des systèmes de propulsion auxiliaires, comme c'est hélas le cas pour Hubble dont les gyroscopes sont mis à rude épreuve.

L'intégration du télescope avec les instruments a été réalisée en 2017 au Centre spatial Johnson à Houston, et celle de l'ensemble de l'observatoire (télescope et vaisseau spatial) s'est terminée en octobre 2019 dans les locaux de Northrop Grumman, en Californie. La masse totale de l'observatoire est de 6,2 tonnes (seulement

Écran (ou bouclier) thermique.



705 kg pour le miroir primaire !) alors que celle du HST est de 12 tonnes.

Le JWST est le successeur du HST car ses objectifs scientifiques ont été motivés par les résultats de Hubble. Mais ils n'observeront pas dans la même gamme de rayonnement, et le miroir du premier est beaucoup plus grand que celui du second, ce qui lui permettra d'observer des objets célestes 400 fois plus éloignés. Il serait plus logique de comparer le JWST avec le télescope infrarouge spatial Spitzer (2003 - 2020), Ce télescope a réalisé de nombreuses découvertes au-delà de l'imagination de ses concepteurs, Le JWST avec son miroir géant et de nouvelles technologies, est environ 1 000 fois plus puissant, et sera en mesure de repousser les frontières des découvertes scientifiques de Spitzer (dont le miroir

primaire, rappelons-le, était de 83 cm !).

D'autre part, au-delà de ses découvertes scientifiques, Spitzer est également un pionnier pour le JWST en termes de fonctionnement d'un télescope qui doit être très froid. Spitzer a montré aux ingénieurs comment un observatoire infrarouge se comportait dans l'immensité de l'espace.

Les objectifs scientifiques

Le JWST a été construit pour l'étude de plusieurs grands thèmes, définis dès les années 1997 :

- (1) la détection des premières lueurs de l'Univers;
- (2) la formation et l'évolution des galaxies très lointaines;
- (3) les mécanismes physiques qui régissent la formation des étoiles et des planètes, et
- (4) l'étude des disques protoplanétaires.

En 2005, à la suite d'une importante augmentation de



Image de la nébuleuse de la Tête de Singe (à gauche dans la lumière visible, à droite dans la lumière infrarouge).
Crédits : télescope spatial Hubble.

budget du JWST, la NASA a remis en cause l'ensemble du programme, et plus spécialement ses objectifs scientifiques. Une des conclusions fut que le JWST ne devait pas rentrer en compétition avec les télescopes terrestres mais conserver toutes ses capacités innovantes. Se sont donc rajoutés à ces quatre thèmes initiaux :

- (5) l'étude de la nucléosynthèse des premiers éléments autres que l'hydrogène et l'hélium (que les astronomes appellent les éléments "lourds"), et
- (6) la recherche des supports à l'apparition de la vie.

Les quatre instruments embarqués se sont vu confier des responsabilités bien définies :

1. NIRCAM

C'est l'imageur principal du JWST dans le domaine de l'infrarouge proche (entre 0,6 et 5 microns). Construit par une équipe de l'Université d'Arizona et le Centre

de Technologie Avancée Lockheed Martin, sa haute sensibilité, son multiplexage de longueurs d'onde, et son grand champ de vue permettent de faire de l'imagerie à la limite de diffraction et des relevés profonds. C'est de plus l'instrument qui sera utilisé comme analyseur de front d'onde pour permettre de contrôler l'alignement et le phasage du miroir primaire du JWST. Il est aussi particulièrement adapté aux principaux thèmes de recherche pour lesquels le JWST a été conçu :

- détecter la lumière des premières étoiles, des amas d'étoiles ou des noyaux galactiques ;
- étudier la morphologie et les couleurs des galaxies très lointaines vues au cours de leur formation ;
- détecter la distorsion de la lumière due à la matière noire via des effets de lentilles gravitationnelles ;
- rechercher les supernovae dans les galaxies lointaines

et élaborer leurs courbes de lumière ;

- détecter, puis procéder à l'imagerie et à la spectroscopie de protoétoiles, disques protoplanétaires, et exoplanètes ;
- étudier la population stellaire dans les galaxies proches, les étoiles jeunes dans la Voie lactée et les objets de la ceinture de Kuiper dans notre Système solaire.

2. NIRSpec

C'est un spectrographe dispersif multi-objets qui opère dans l'infrarouge proche. Il a été construit pour l'Agence spatiale européenne (ESA) par le consortium Astrium. Cet instrument peut observer simultanément plus de 100 sources sur un champ de 3×3 minutes d'arc. C'est le premier instrument jamais envoyé dans l'espace à avoir cette capacité. Avec une sensibilité dans une gamme de longueurs d'onde qui correspond aux radiations des plus lointaines galaxies ses objectifs scientifiques clés sont :

- la formation des étoiles et des abondances chimiques des galaxies lointaines jeunes ;
- la recherche des structures dans les disques de gaz dans les noyaux galactiques actifs (galaxies très lumineuses et énergétiques, observables aux longueurs d'onde allant des ondes radio aux rayons X) ;
- la distribution des masses des étoiles dans les amas d'étoiles jeunes.

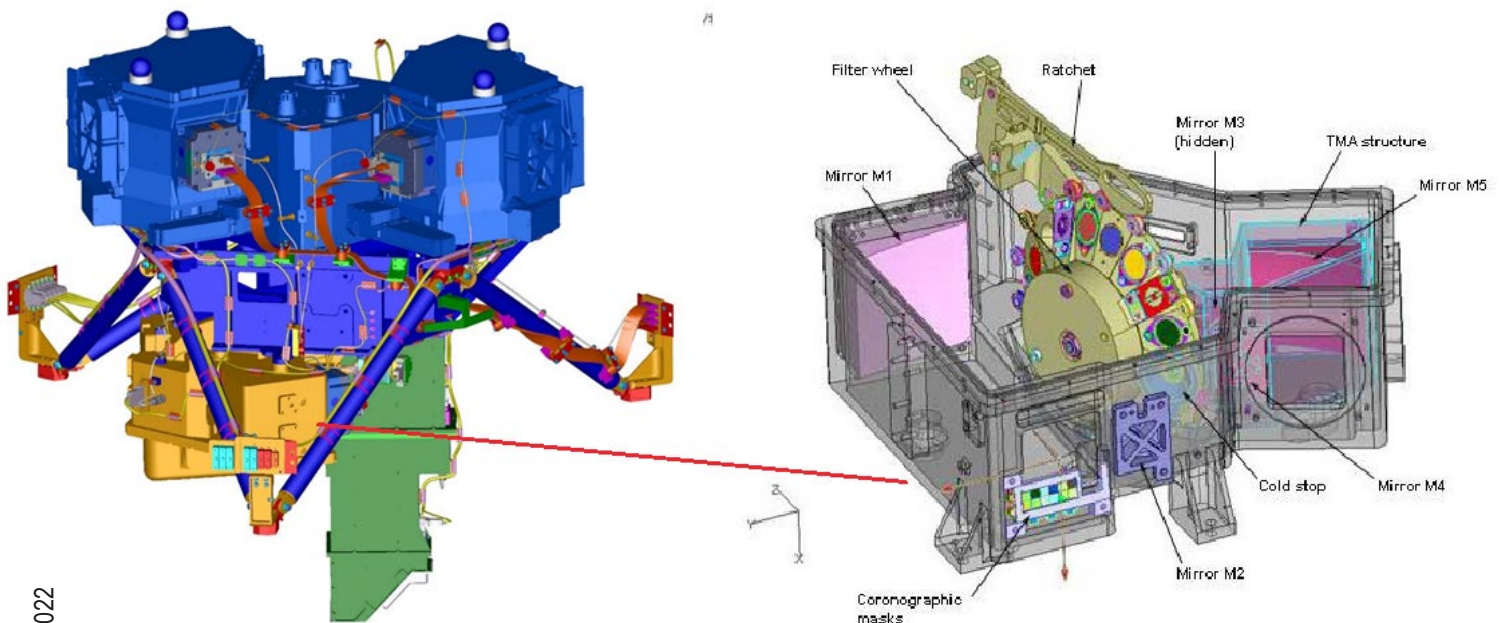
3. NIRISS

C'est l'instrument fourni par l'Agence spatiale canadienne (ASC), avec le détecteur de guidage de précision (FGS) (ces deux instruments étant couplés dos à dos dans une même structure mais fonctionnant d'une manière totalement indépendante). Cet instrument sera doté de capacités uniques lui permettant de :

- trouver les objets les plus anciens et les plus éloignés dans l'histoire de l'Univers ;
- découvrir de nouvelles exoplanètes semblables à Jupiter autour de jeunes étoiles proches de nous, et ce, malgré la lumière éblouissante de ces dernières ;
- détecter la mince couche atmosphérique de petites planètes habitables ressemblant à la Terre qui passeront devant leur étoile. On pourra alors déterminer la composition chimique de ces atmosphères et y chercher de la vapeur d'eau, du dioxyde de carbone et d'autres biomarqueurs potentiels comme le méthane et l'oxygène.

4. MIRI

C'est le seul instrument du JWST qui opérera dans l'infrarouge moyen (5 - 28 microns). Il a été proposé par un consortium européen, sous l'égide de l'ESA, La participation française à la réalisation de cet instrument s'est effectuée à travers le Centre national d'études spatiales (CNES). Cet instrument est composé de deux parties : l'imageur-coronographe-spectrographe de basse



À gauche MIRI : en bleu le MRS (Spectrographe de résolution moyenne), en orange MIRIM, (Imageur/Coronographe/Spectrographe de basse résolution) conçu et réalisé par les laboratoires français, sous la responsabilité du CEA et sous l'égide du CNES. À droite l'intérieur de MIRIM.

résolution, appelé MIRIm, et le spectrographe MRS/IFU de moyenne résolution, développé au Royaume-Uni. MIRIm a été conçu et réalisé au Département d'astrophysique de l'IRFU, CEA-Saclay, avec la participation du LESIA (Observatoire de Paris), de l'Institut d'astrophysique spatiale (IAS) de l'université Paris-Sud, et du Laboratoire d'astrophysique de Marseille (LAM).

Le grand diamètre du JWST, sa basse température ambiante, et les détecteurs à la pointe de l'art de MIRI permettent d'obtenir à 8 microns une sensibilité (flux limite de détection) 50 fois celle de Spitzer avec une résolution angulaire 7 fois supérieure. MIRI est donc sensé contribuer d'une manière prépondérante aux grands thèmes de recherche pour lesquels le JWST a été construit :

- l'émission d'hydrogène et la recherche des premiers objets lumineux ;
- la formation des premières galaxies dans l'Univers ;
- l'émission des éléments sombres dans les noyaux galactiques actifs ;
- la formation des étoiles et systèmes protoplanétaires.
- l'évolution des systèmes planétaires, la taille des objets de la ceinture de Kuiper et les comètes faiblement lumineuses ;
- l'observation des naines brunes et des planètes géantes ;
- la recherche des conditions favorables à l'apparition de la vie.

La séparation angulaire entre une étoile et son système planétaire étant très petite, l'utilisation de coronographes classiques à pastille de Lyot n'est pas adaptée. Une nouvelle génération de coronographes a été mise au point et étudiée par une équipe de chercheurs menée par Daniel Rouan, de l'Observatoire de Paris (LESIA). Ces coronographes appelés 4QPM (Four-Quadrant Phase Masks) permettent d'atténuer le flux de l'étoile et d'observer des objets angulairement très proches.

Beaucoup de déboires et de reports du lancement !

Initialement prévu pour 2013, la date du lancement a été sans cesse reportée, alors que les instruments étaient prêts depuis longtemps et installés confortablement dans l'ISIM (MIRI avait été livré à la NASA en avril 2012). Ces reports ont eu un côté somme toute positif puisqu'ils ont permis de réaliser de nombreuses activités pré-lancement (tests, finalisation des scripts, préparation de la recette en vol et des calibrations, ainsi que l'élaboration d'outils d'analyse de haut niveau).

Il fallait attendre l'issue des tests de l'OTIS (l'ensemble miroirs et instruments) qui se sont terminés en septembre 2018. Alors que les attentes pointaient vers une date de lancement ultérieure à mi-mai 2020, il n'y avait plus qu'à attendre que le SCE (bus du vaisseau spatial + boucliers thermiques + modules du propulseur) ait terminé ses propres tests et soit prêt pour l'intégration. Malheureusement, le SCE a souffert de problèmes liés au propulseur et surtout à la fragilité de l'écran thermique révélée par les tests de déploiement sous 1 g. Du coup, le lancement fut à nouveau reporté !

L'assemblage de l'observatoire au complet qui était prévu pour octobre 2018 n'a eu finalement lieu qu'en 2019. S'ensuivit ensuite une nouvelle batterie de tests acoustiques et de vibration simulant le fracas et les secousses du lancement, précédés et suivis par de nouveaux tests de déploiement de l'écran thermique. Le lancement fut alors prévu pour mars 2021. Puis, reporté au 31 octobre 2021 en raison de la pandémie de coronavirus (COVID-19) ainsi que de certaines difficultés techniques liées aux résultats des tests de vibration.

Mais les déboires n'étaient pas terminés ! Pour améliorer la sécurité, Ariespace fixait conjointement avec la NASA et l'ESA le 18 décembre 2021 comme date de lancement prévue pour le vol VA256. De fait, l'ESA, Ariespace et RUAG Space (la société suisse responsable du carénage de charge utile) ont dû modifier au tout dernier moment la conception des événements sur le bouclier d'Ariane 5 pour éviter qu'une dépressurisation endommage l'observatoire lors des largages du carénage. En effet, après analyse des données recueillies sur des vols antérieurs d'Ariane (en particulier lors du dernier lancement d'une fusée de ce type le 30 juillet 2020), il fut craint que l'air résiduel emprisonné dans les membranes de l'écran solaire cause une « surpression » au moment de la séparation, ce qui aurait pu l'endommager. Un nouveau matériel a dû être mis au point pour s'assurer que les événements autour de la base du carénage de la charge utile restaient entièrement ouverts lors du vol d'Ariane, ce qui permettait d'équilibrer la pression avant la séparation, et des orifices de ventilation ont été introduits sur le carénage.

Le 18 décembre a glissé vers le 22, suite à un incident survenu pendant les opérations d'installation du satellite à Kourou (un relâchement soudain et imprévu d'une bande de serrage – qui fixe le JWST à l'adaptateur du lanceur – et qui a provoqué une vibration dans tout l'observatoire). Mais le JWST ne voulait, semble-t-il décidément pas nous quitter ! Malgré une RAL (revue avant lancement) réussie la météo est devenue contraire (vents violents en altitude) et Ariespace s'orientait vers un tir le 25 décembre au plus tôt. Cette fois-ci, c'était la bonne ! Tout était en ordre de tir, les plus ultimes mesures de précaution étaient prises...



Ça y est ! Il est enfin lancé !

Le JWST est enfin parti le 25 décembre à 13 h 20 (heure de Paris). Ce lancement spectaculaire fut une réussite parfaite, et tous les événements se sont déroulés comme prévu, au moindre détail près. Un très grand succès pour Arianespace et le CNES.

C'est un moment que toutes les équipes qui avaient travaillé sur ce projet attendaient avec un mélange d'impatience et d'appréhension.

Le décompte final fut irrespirable. En dehors des coûts financiers pharamineux, il s'agissait surtout de plus de 40 millions d'heures de travail humain ! Puis soudain, une fumée au loin apparut, à 5 km du site d'observation le plus proche du pas de tir. Le moteur Vulcain s'est allumé. Il fallut encore attendre 7 secondes avant que les

gigantesques boosters à poudre qui flanquent la fusée ne s'allument dans une lumière éclatante. Alors que la fusée disparaissait rapidement dans les nuages, le son parvenait enfin aux spectateurs émus dans un vacarme crépitant. Aux dires de tous, le tonnerre métallique donnait la chair de poule.

Certains scientifiques impliqués dans la mission peinaient à retenir leur émotion. Certains pleuraient, discrètement. Tous étaient sidérés par la puissance du spectacle. Le lancement était un moment charnière, mais ce n'était que le début de la mission. Les 20 jours qui l'ont suivi ont vu le vaisseau spatial se déployer, la plus difficile et la plus complexe opération jamais tentée dans l'espace.

Après le lancement

Les premières données de télémétrie furent reçues environ cinq minutes après le lancement. Vingt-cinq minutes plus tard, le réseau solaire se déployait, et fournissait l'électricité requise. Peu après, la liaison de communication depuis la station au sol de Malindi au Kenya fut établie, et les premières commandes au vaisseau spatial pouvaient être envoyées.

Puis, une manœuvre d'ajustement de la trajectoire, suivie de l'activation des capteurs de température et des jauges de contrainte du télescope ; du déploiement de l'antenne à haut débit qui transmettra les données (au moins 28,6 Goctets, deux fois par jour) ; du positionnement de la tour déployable (DTA, « Deployable Tower Assembly »), qui s'étend sur 1,22 mètres, pour mettre l'espace nécessaire entre la section supérieure de l'observatoire, qui abrite les miroirs et les instruments scientifiques, et le bus de vaisseau spatial, qui détient l'électronique et les systèmes de propulsion, et qui laisse l'espace suffisant pour que les membranes de l'écran solaire puissent se déployer complètement.

Ensuite, le déploiement des deux « bras » de l'écran solaire, et qui étiraient avec eux, les différentes couches de cet écran pour l'étendre à sa pleine largeur de 14,32 mètres. Puis, la tension de chacune des couches, qui était sans doute l'opération la plus redoutée.

Finalement, la structure du support du miroir secondaire (soutenu par trois entretoises légères déployables qui mesurent chacune près de 7,6 mètres de long et sont conçues pour résister aux rigueurs de l'espace ; des systèmes de chauffage spécialisés ont été utilisés pour réchauffer les joints et les moteurs nécessaires à un fonctionnement continu).

Le déploiement complet fut finalisé le 8 janvier à 19 h 17 (heure de Paris), lorsque les deux ailes du miroir primaire, furent verrouillées dans leur position finale (ces ailes contiennent chacune trois des 18 segments hexagonaux revêtus d'une fine couche d'or – notons que pour l'ensemble des miroirs, un total de 48,25 g d'or, soit l'équivalent de 2 480 €, ce qui n'est pas exorbitant dans le budget global !).

C'est maintenant aux opticiens de jouer pour aligner l'optique du télescope, c'est-à-dire pour ajuster les 18 segments du miroir primaire du plus grand et le plus complexe observatoire spatial jamais réalisé – un alignement qui prendra des mois. Les instruments scientifiques pourront être alors calibrés, pour nous délivrer leurs premières images cet été.

Ce sera sans doute l'occasion d'un prochain article ! En attendant, je ne saurais que trop recommander aux lecteurs avides de renseignements de consulter le site officiel français jwst.fr.



«Ça y est ! Le 24 janvier 2022, à 20 h 05 (UTC+1, heure en France) le JWST est arrivé sur son orbite autour de L2, 30 jours après son lancement. La communauté a suivi minute après minute le déroulement des opérations, avec des sentiments mêlés, d'excitation, d'inquiétude, de joie et de crainte, qui ponctuaient la fin de l'odyssée du JWST vers son point de stationnement (une manière de dire puisqu'il ne restera pas dans une position vraiment fixe, mais se déplacera sur une orbite très large autour de L2). Sans oublier les extraordinaires prouesses techniques qui ont conduit au déploiement d'un origami au cours de ce voyage. Nous avons vécu et sursauté aux soubresauts des variations de la vitesse du JWST qui reflétaient les manœuvres des boosters qui mettaient l'observatoire dans son orbite. Nous avons vu la distance vers L2 qui se réduisait au fil des minutes, mais nous étions inquiets parce que la vitesse ne baissait pas : le JWST devait arriver sur son orbite avec une vitesse de 100 m/s, alors qu'il y est arrivé à une vitesse double. Les ingénieurs de la NASA nous expliqueront prochainement pourquoi, mais cela n'a plus d'importance.»