

**VOYAGE
DANS
L'ESPACE**

Épisode

77

LE TÉLESCOPE SPATIAL WEBB



La prochaine révolution astronomique

Le balado et les fascicules

Depuis janvier 2018, Claude Lafleur et Mathieu Rancourt produisent un balado consacré à l'exploration de l'espace. Intitulé *Voyage dans l'espace*, il est diffusé sur la plate-forme soundcloud.com. Chaque épisode vous fait parcourir une dimension particulière, qu'il s'agisse de l'exploration d'une planète, de la recherche de vie dans l'Univers ou de l'aventure des astronautes et de ceux et celles qui rêvent d'espace.

Pour la plupart des balados, ils préparent un exposé détaillé, sous forme de questions/réponses. Il peut s'agir d'une conversation entre l'animateur de *Voyage dans l'espace* Mathieu et le passionné d'espace Claude, ou d'une entrevue avec un spécialiste (souvent un astronome). Ils publient ces exposés sous forme de fascicules, comme celui-ci.

Notez que le balado diffusé s'inspire librement des questions/réponses préparées à cet effet. Le texte qui suit n'est pas un verbatim de l'émission, mais plutôt une autre version; le balado et ce fascicule se complètent l'un et l'autre.

Tous les fascicules sont offerts aux abonnés du balado *Voyage dans l'espace*, abonnement au coût de 5\$/mois, via la plate-forme patreon.com.

Mathieu Rancourt est géographe et professionnel de recherche. **Claude Lafleur** est journaliste scientifique qui suit au quotidien depuis cinquante ans les péripéties de l'exploration spatiale.

L'équipe des fascicules:
Rédaction: Claude Lafleur, René Doyon et Jean-René Roy (révision)
Couverture: Mathieu Rancourt
Illustrations: [NASA](#), [STSci](#), [NASA](#), UdeM,

Balado: <https://soundcloud.com/voyage-danslespace/>
Abonnement: <https://www.patreon.com/voyagedanslespace>
Facebook: <https://www.facebook.com/voyagedanslespace/>

Courriel: claude-lafleur1@videotron.ca

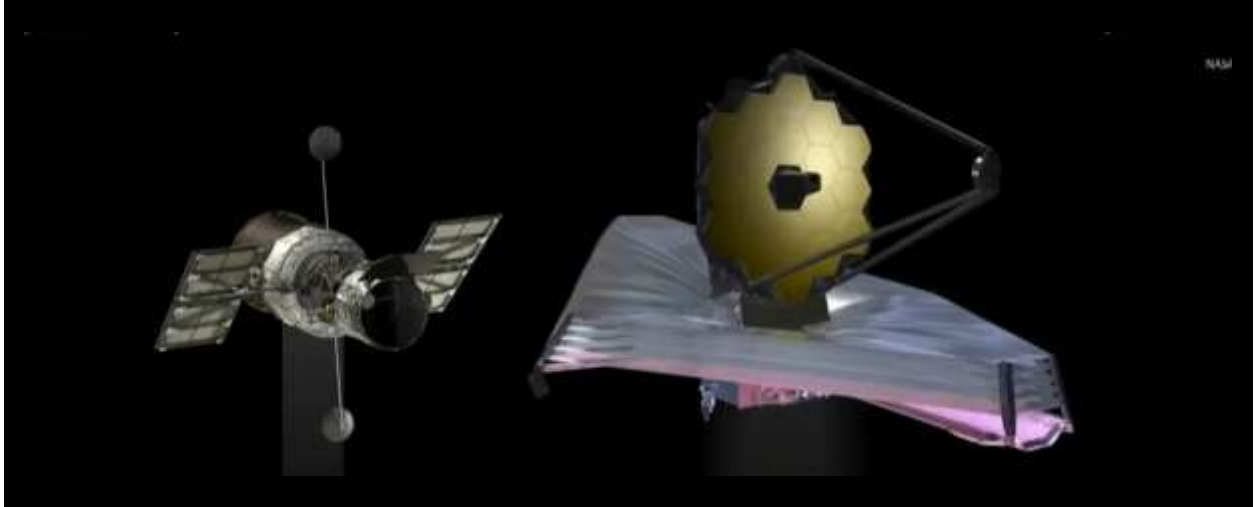
© Copyright, Claude Lafleur, 2021

ISBN 978-2-925106-45-6 (pdf)

ISBN 978-2-925106-46-3 (kindle)

Dépôt légal: Bibliothèque nationale du Québec, 2021

Dépôt légal: Bibliothèque nationale du Canada, 2021



Comparaison du télescope spatial Hubble (à gauche) et du télescope Webb.

Le télescope spatial Webb: la prochaine révolution astronomique

[Écoutez](#) le balado *Le télescope spatial Webb*, diffusé le 19 décembre 2021.

Le 24 avril 1990, un équipage de Navette place le télescope spatial Hubble en orbite terrestre. C'était le début d'une véritable révolution astronomique, une révolution qui s'étend maintenant sur plus de trente ans.



Largage de *Hubble* depuis la Navette spatiale.

Si tout va bien, prochainement, une fusée Ariane 5 placera en orbite autour du Soleil le *James Webb Space Telescope*, le successeur de *Hubble*. Doté d'une foule d'in-

novations technologiques et d'une puissance qui dépasse de loin celle de *Hubble*, le «*James Webb*» promet lui aussi de révolutionner nos connaissances scientifiques – notamment en nous permettant d'observer les premières galaxies apparues à la suite du Big Bang ainsi que d'ausculter l'atmosphère des exoplanètes.



Un lancement d'Ariane 5.

René Doyon, l'un des principaux chercheurs associés à la mission *Webb*, nous présente ce formidable instrument scientifique.

Professeur titulaire au département de physique de l'Université de Montréal, il est directeur de l'Institut de recherche sur les exoplanètes (IREx) de cette université – l'une des grandes équipes internationales en la matière. Il est en outre directeur de l'Observatoire du Mont-Mégantic où est formée la future génération d'astronomes québécois et où on conçoit d'importants instruments d'observation.

Natif de Thetford Mines, au Québec, il a obtenu son baccalauréat et sa maîtrise en physique à l'Université de Montréal, puis son doctorat en astrophysique à l'*Imperial College* de Londres en 1991.

Ses principaux champs de recherche portent sur l'étude des exoplanètes ainsi que sur le développement d'instruments astronomiques spécialisés dans la détection et la caractérisation des exoplanètes.

En novembre 2008, son équipe a été la première à photographier une exoplanète, un exploit qui a fait sensation.



L'astronome René Doyon.

Mais surtout, c'est le *chercheur principal* de l'un des quatre instruments scientifiques dont est doté le télescope *Webb*. Appelé NIRISS, cet instrument est conçu pour entre autre détecter l'atmosphère des exoplanètes afin d'en déterminer la composition chimique. Le professeur Doyon sera par conséquent l'un des grands utilisateurs de ce télescope qui, si tout va bien, prendra sous peu la relève du fameux télescope spatial *Hubble*.

Notons que ce projet de 10 milliards \$ est une collaboration entre la NASA, l'Agence spatiale européenne (ESA) et l'Agence spatiale canadienne (ASC).

1 – Une route qui mène à *Webb*

Commençons par parler un peu de vous. Racontez-nous comment, durant votre jeunesse, vous vous êtes intéressé aux sciences et, éventuellement, à l'astronomie?

En fait, mon intérêt est venu naturellement et assez jeune puisque déjà en 6^e année, je m'intéressais aux sciences. J'avais reçu en cadeau de mes parents un kit d'électronique pour faire des expériences «64 en 1». (Je l'ai aujourd'hui encore.) Pour moi, l'idée de pouvoir construire des choses et de réaliser différents projets a été une révélation. Ça m'a vraiment fasciné.

Je faisais également de la musique, puisque je viens d'une famille de six enfants où c'était très important. Je jouais du violon et du saxophone.

C'est au secondaire où j'ai découvert ma passion pour les sciences et, vers la fin de celui-ci, pour la physique. J'étais fasciné de lire des livres dans lesquels il y avait des équations que je ne comprenais pas. Mais je saisisais que ces équations

permettaient de décrire l'Univers qui nous entoure... et ça, ça m'a fasciné, complètement!

Je me considère privilégié d'avoir développé une passion pour les sciences très tôt dans ma vie puisque dès mon adolescence, je savais que je voulais devenir professeur de physique et enseigner dans une université, car c'était pour moi la façon d'assouvir cette passion.

Vers la fin du secondaire, ma passion pour l'astronomie s'est cristallisée. Je m'étais procuré un petit télescope qui me permettait de faire de belles observations depuis ma cour arrière; je suis natif de Thetford Mines, où il y a un ciel relativement sombre.

Je viens d'une famille où l'éducation était importante mais dans laquelle il n'y avait pas de scientifique comme tel. Je suis d'ailleurs le seul scientifique de ma famille.

Vous avez donc fait vos études en astronomie et vous êtes devenu astronome.

Qu'est-ce qui a fait que vous vous êtes passionné pour les exoplanètes?

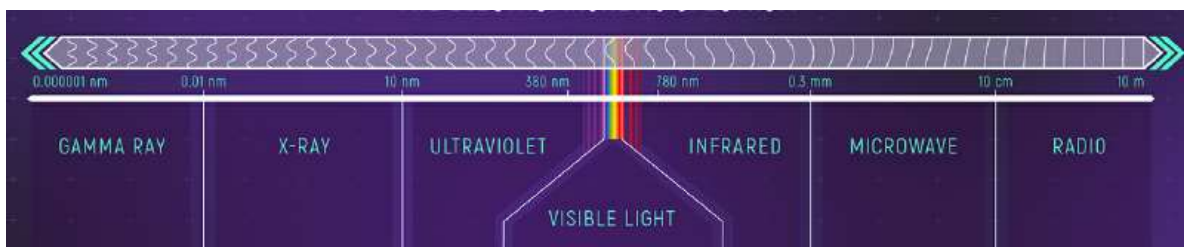
Ma carrière a commencé en astronomie infrarouge qui, comme vous allez le voir, a un lien important avec le télescope Webb. Vous verrez, il n'y a pas de hasard dans mon parcours.

J'ai d'abord complété un baccalauréat en physique à l'Université de Montréal, puis une maîtrise avec mon mentor (et à présent collègue) Daniel Nadeau. À l'époque, dans les années 1980, c'était l'un des rares experts en astronomie infrarouge – un domaine qui naissait alors.

Ma maîtrise portait sur un projet d'instrumentation, ce qui aura là-aussi un lien important avec le télescope Webb. Je me suis donc passionné pour cette nouvelle facette de l'astronomie – l'astronomie infrarouge – qui étudie la lumière au-delà du rouge et que l'œil humain ne peut percevoir. Ce n'est seulement qu'à la fin des années 1980 que les technologies infrarouges ont commencé à émerger.

Le domaine de l'infrarouge

La vue est un sens merveilleux qui nous permet de voir à distance ce qu'il y a autour de nous. Mais l'œil humain ne capte qu'une infime fraction de ce qu'on appelle le *spectre des ondes électromagnétiques*. Ce spectre comprend en effet les ondes radio, l'infrarouge, le visible, les ultraviolets, les rayons X et les rayons gamma. Or, nous ne sommes équipés que pour percevoir qu'une parcelle de ce spectre, essentiellement la lumière visible (et un peu le proche infrarouge, c'est-à-dire la chaleur en provenance du Soleil et qu'on ressent sur notre peau.)



Le spectre électromagnétique comporte (de g. à d.) les rayons X, les ultraviolets, la lumière visible, l'infrarouge, les microondes, etc. Comme l'illustre ce dessin, seule une toute petite portion de ce spectre nous est perceptible, grâce à nos yeux.

Ce qui distingue les différentes portions du spectre électromagnétique, c'est la longueur de l'onde; la bande des ondes visibles s'étend de 400 à 700 nanomètres, tandis que l'infrarouge débute à 700 nanomètres. (Entre les deux, on parle du proche infrarouge.)

Au même titre que la vue nous fournit énormément d'information, les autres longueurs d'ondes sont toutes aussi riches. C'est particulièrement le cas lorsqu'on observe l'Univers à l'aide d'appareils conçus pour capter les ondes radio, les rayons X, l'infrarouge, etc.

L'infrarouge, en particulier, nous permet de percer les «voiles» qui, en lumière visible, nous cachent quantité de phénomènes. C'est ainsi que grâce à l'infrarouge, on perce les nuages de matière au sein desquels naissent de nouvelles étoiles (voir exemple p. 21) ou encore des planètes en train de se former dans les nuages de poussière et de gaz qui englobent les jeunes étoiles (comme ce fut le cas de notre Système solaire à ses tout débuts). L'infrarouge nous permet également de voir ce qui se cache derrière les abondants nuages de poussière qu'on retrouve disséminés un peu partout dans notre galaxie et à travers l'Univers.

De notre point de vue, l'infrarouge observe la chaleur dégagée par un objet. C'est ainsi que la nuit, dans le noir, on peut difficilement voir autour de nous. Par contre, doté de lunettes qui captent l'infrarouge – donc la chaleur dégagée par tout objet – on peut clairement voir les êtres vivants qui s'y cachent. De même, en astronomie, observer le firmament dans l'infrarouge nous révèle... tout un Univers!

Dans les années 1980, il n'y avait cependant relativement peu d'expertise au Canada dans le domaine de l'infrarouge. Mais puisque je désirais compléter un doctorat dans ce domaine, l'un des endroits les plus avancés dans le monde se trouvait à Londres, à l'*Imperial College of Science and Medicine*. Ma thèse portant sur l'astronomie extragalactique, j'ai par conséquent étudié des galaxies en collision, dans l'infrarouge bien sûr! J'ai mené plusieurs campagnes d'observation, notamment à Hawaii [où se trouvent plusieurs des meilleurs télescopes au monde].

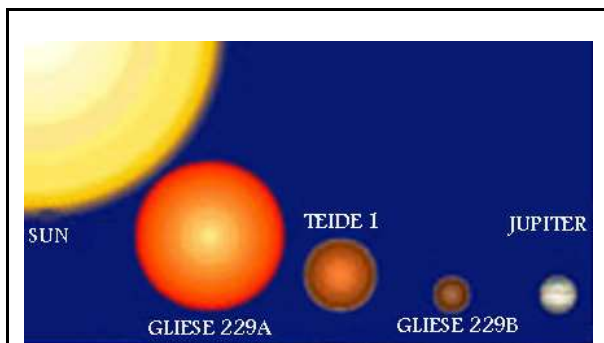
J'ai obtenu mon doctorat à la fin de 1990 et je suis revenu travailler comme chercheur postdoctoral à l'Université de Montréal, auprès de mon mentor Daniel

Nadeau. Celui-ci avait entrepris la conception d'une caméra infrarouge, la toute première au Canada et qu'on a baptisée Monica, pour *Montreal Infrared Camera*. Cette caméra devait équiper le télescope de l'Observatoire du Mont-Mégantic. Daniel ayant besoin d'aide pour la développer, je possédais tout le bagage requis!

Découvertes des premières exoplanètes et naines brunes

Arrive l'année 1995, un moment marquant pour l'astronomie grâce à deux découvertes importantes: une première exoplanète gravitant autour d'une étoile et deux naines brunes.

Les naines brunes sont des étoiles manquées, des étoiles qui n'ont pas suffisamment de masse pour déclencher des réactions nucléaires dans leur cœur. [Écoutez à ce propos notre balado 56 – Le monde méconnu des étoiles.] À l'époque, nous suspicions l'existence de tels corps célestes, mais nous n'en avons pas encore détectés.



Comparaison en taille du Soleil (à gauche), de deux naines brunes (au centre) et de deux planètes géantes (à droite).

Exoplanètes et naines brunes

En 1995, Didier Queloz et Michel Mayor repèrent une planète géante (une demie fois la masse de Jupiter) circulant à seulement 8 millions de kilomètres de son étoile, 51 Pegasi. Cette découverte prend tout le monde par surprise puisqu'on croyait impossible qu'une planète puisse exister si proche de son étoile – et encore moins une planète géante. Pourtant, depuis ce jour, on a repéré des centaines de planètes de ce type, qu'on appelle des *Jupiters chaudes*.

La même année, les astronomes débuisquent deux naines brunes, Teide 1 et Gliese 229A, des astres qui ont de 20 à 60 fois la masse de Jupiter (ou de l'ordre d'un centième de la masse du Soleil).

Ce qui différencie les naines brunes des planètes géantes, c'est le fait que leur masse est trop faible pour engendrer la fusion thermonucléaire de l'hydrogène (qui alimente les étoiles) mais suffisante pour la fusion du deutérium. La masse des naines brunes est comprise entre 13 et 75 fois celle de Jupiter. Quant aux astres de masse inférieure, qui ne génèrent aucune fusion, ce sont des planètes (géantes).

Les naines brunes sont des objets qui émettent surtout dans le domaine de l'infrarouge. Dans l'atmosphère des naines brunes nouvellement découvertes, on avait repéré la présence de méthane. Et nous nous attendions à ce que les planètes géantes possèdent également du méthane dans leur atmosphère.

C'est ainsi que mes collègues et moi, on s'est mis à rêver de détecter des planètes à l'aide d'une technique d'imagerie. Mais à l'époque, personne ne pensait que c'était possible. Nous venions, en quelque sorte, du champ gauche!

C'est pourtant ce que nous sommes parvenus à faire, en particulier grâce aux étudiants qui sont venus s'ajouter à mon équipe au début des années 2000, dont Christian Marois et David Lafrenière.

On a donc mis au point de nouvelles techniques qui nous ont permis d'observer des exoplanètes de manière directe. C'est ainsi que nous avons pris le premier cliché d'une exoplanète (page suivante)...

Tout ça pour dire que c'est à la suite de la découverte d'une exoplanète en 1995 – une découverte qui m'a fascinée – que j'ai carrément changé de domaine de recherche, passant de l'astronomie galactique à l'astronomie stellaire, et plus spécifiquement à celle des exoplanètes.

Ce que vous nous racontez là, c'est un cheminement éminemment logique puisque tout vous a mené où vous en êtes à présent?

Oui, tout à fait. Ce n'est effectivement pas un hasard, c'est mon parcours dans l'infrarouge qui a fait que je participe maintenant au télescope Webb.

Première photographie d'une exoplanète

Comme vous venez de le mentionner, en 2008, votre équipe est parvenue à prendre la photo d'une exoplanète. On parle souvent de la photo d'une exoplanète mais, en réalité, vous en avez repérée trois – trois pour le prix d'une!

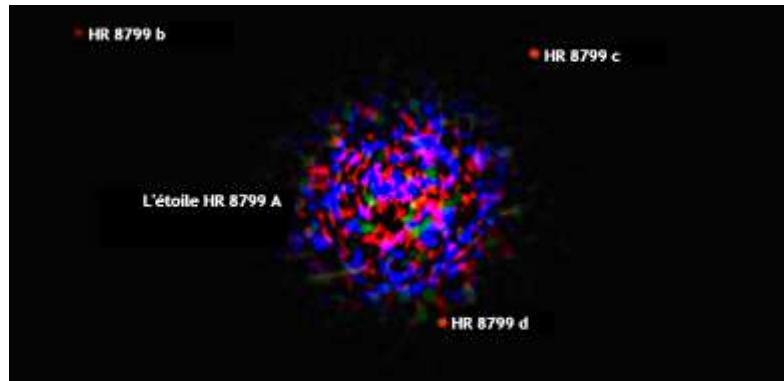
Oui, et cela a vraiment été une surprise. Nous rêvions de photographier une exoplanète et nous y sommes parvenus grâce à deux développements importants: l'*optique adaptative* et une technique de traitement des images pour en éliminer les défauts.

Il faut comprendre que l'ennemi juré des astronomes, c'est l'atmosphère terrestre! Lorsque nous regardons un corps céleste avec un télescope, l'image qu'on obtient est embrouillée à cause de la turbulence atmosphérique. Vous pouvez observer le même phénomène simplement en regardant votre grille-pain: la chaleur qui s'en dégage crée des vagues d'air. C'est le même phénomène de turbulence qu'on observe au télescope.

À la fin des années 1990, la technique dite de l'*optique adaptative* a été mise au point afin de corriger en temps réel la turbulence atmosphérique. Résultat: c'est

comme si vous preniez un télescope sur Terre et que vous l'amenez dans l'espace. Cette technique a marqué une véritable révolution en astronomie et elle a permis d'améliorer grandement nos chances de parvenir à détecter des exoplanètes.

Mais cette technique n'est pas parfaite, elle corrige l'image mais il reste encore beaucoup de défauts – ce qu'on appelle



La fameuse photo prise par l'équipe du professeur Doyon faisant découvrir trois planètes autour de l'étoile HR 8799.

des *artefacts* – dans l'image.

Or, ce que nous, nous avons développé, notamment grâce à Christian Marois, c'est de parvenir à corriger à peu près tous les artefacts que contiennent nos images. En fait, non seulement les corrigeons-nous, mais nous les éliminons!

Grâce à cette technique – une façon d'analyser les images qu'on obtient en opérant le télescope différemment –, on améliore les performances de détection des objets autour d'une étoile brillante par un facteur de près de 100.

Nous nous trouvons donc dans une position privilégiée puisque nous étions les seuls au monde à posséder cette technique. (Bien sûr, nous la partageons avec nos collègues.)

Finalement, le 14 juillet 2008, je reçois un appel de Christian qui me dit: «René, assieds-toi bien, parce que j'ai une image à te partager...» C'était l'image de l'étoile HR 8799 autour de laquelle on

avait repéré non pas une exoplanète, mais bien trois! (Plus tard, on en repérera une quatrième.)

Première image de trois exoplanètes

En 2008, l'équipe du Pr Doyon a été la première à observer de façon directe l'existence de planètes autour d'une étoile autre que le Soleil. Jusque-là, toutes les exoplanètes découvertes l'ont été au moyen de techniques d'observation indirectes.

Les astronomes de l'Université de Montréal ont ainsi photographié les parages de l'étoile HR 8799 située à 130 années-lumière de nous. Et, à leur grande surprise, ils y ont débusqué trois planètes géantes – de l'ordre de sept à dix fois la masse de Jupiter.

«Nous avons sauté au plafond, s'exclamait à l'époque René Doyon. C'est une double première: nous sommes parvenus non seulement à faire la première observation directe confirmée, mais aussi à établir l'orbite de ces planètes.»

Cette découverte a changé à tout jamais ma carrière, car elle est arrivée à un moment charnière dans le développement du télescope Webb. À partir de là, le développement d'instruments pouvant repérer des exoplanètes s'est accéléré (p. 28).

Qu'est-ce que ça nous donne de photographier une étoile pour parvenir à repérer des planètes? Cela permet-il simplement de débusquer des exoplanètes ou en retirons-nous davantage d'informations?

Eh fait, il y a plusieurs avantages.

Il y a d'abord une raison très sentimentale: notre principal sens étant la vue, de pouvoir *voir* les choses, c'est déjà très important.

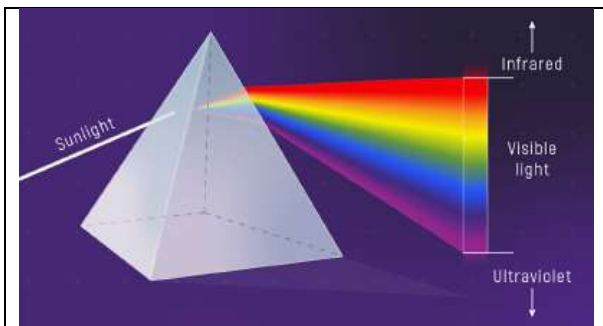
Plus fondamentalement, l'objectif ultime de la recherche d'exoplanètes, c'est bien sûr de trouver de la vie ailleurs. Or, il y a plusieurs façons pour y parvenir. L'une d'elles, c'est de prendre des images des exoplanètes et plus spécifiquement des spectres. C'est-à-dire de disséquer la lumière des exoplanètes que l'on détecte pour obtenir un spectre qui nous donnera des indications sur la composition de l'atmosphère. De cette façon, on pourrait déduire s'il y a de l'activité biologique sur une planète en y détectant par exemple la présence d'oxygène, de méthane, de CO₂, etc., dans une atmosphère – c'est-à-dire des composés chimiques qui témoigneront de la présence d'une vie.

L'une des techniques pour y parvenir – car il y en a plusieurs – c'est l'imagerie: être capable de prendre des images. Prendre des images, c'est un graal!

La spectroscopie: le microscope des astronomes

Comment parvient-on à déterminer de quoi sont faits le Soleil, les autres étoiles, les galaxies, ou encore la composition de l'atmosphère de Mars et de Vénus ainsi que de quels gaz sont constituées Jupiter, Saturne, etc., sans pourtant s'y rendre sur place?

Les astronomes sont des gens astucieux. Au 19^e siècle, ils ont découvert qu'en décomposant la lumière en provenance d'un astre, ils parviennent à identifier de quelle matière celui-ci est fait.



En passant au travers d'un prisme, la lumière du Soleil se décompose en un spectre de lumière.

Ainsi, en faisant traverser un rayon de Soleil au travers d'un prisme, ils décomposent cette lumière en bande de couleurs. Mais, surtout, ils observent de curieuses lignes noires tout au long de ce spectre de lumière. Or, les chimistes ont démontré que ces raies spectrales témoignent de la présence de différents éléments et composés chimiques.



Exemple du spectre d'une étoile qui recèle des lignes noires, ou raies spectrales, caractéristiques de la composition chimique de l'astre.

Dans le cas du Soleil, on a découvert que sa masse se compose à 73,5% d'hydrogène et 25% d'hélium, avec un peu d'oxygène, de carbone, de fer, de néon,

etc. De la même manière, on détermine la composition des étoiles et de l'atmosphère entourant une planète.

Cette technique formidable est appelée la *spectroscopie*, c'est-à-dire l'analyse du spectre de lumière en provenance d'un objet. Ces dernières décennies, les astronomes ont mis au point une foule de spectrographes spécialisés qui nous révèlent les secrets que recèlent les différents objets de l'Univers.

[Dans les années 2000], nous savions que nous ne pouvions pas commencer par tenter de photographier de petites planètes. On devait plutôt chercher à photographier des planètes géantes, des planètes qui sont également extrêmement chaudes. Nous savions aussi qu'il fallait le faire dans l'infrarouge puisque c'est dans cette portion du spectre électromagnétique qu'elles émettent leur lumière.

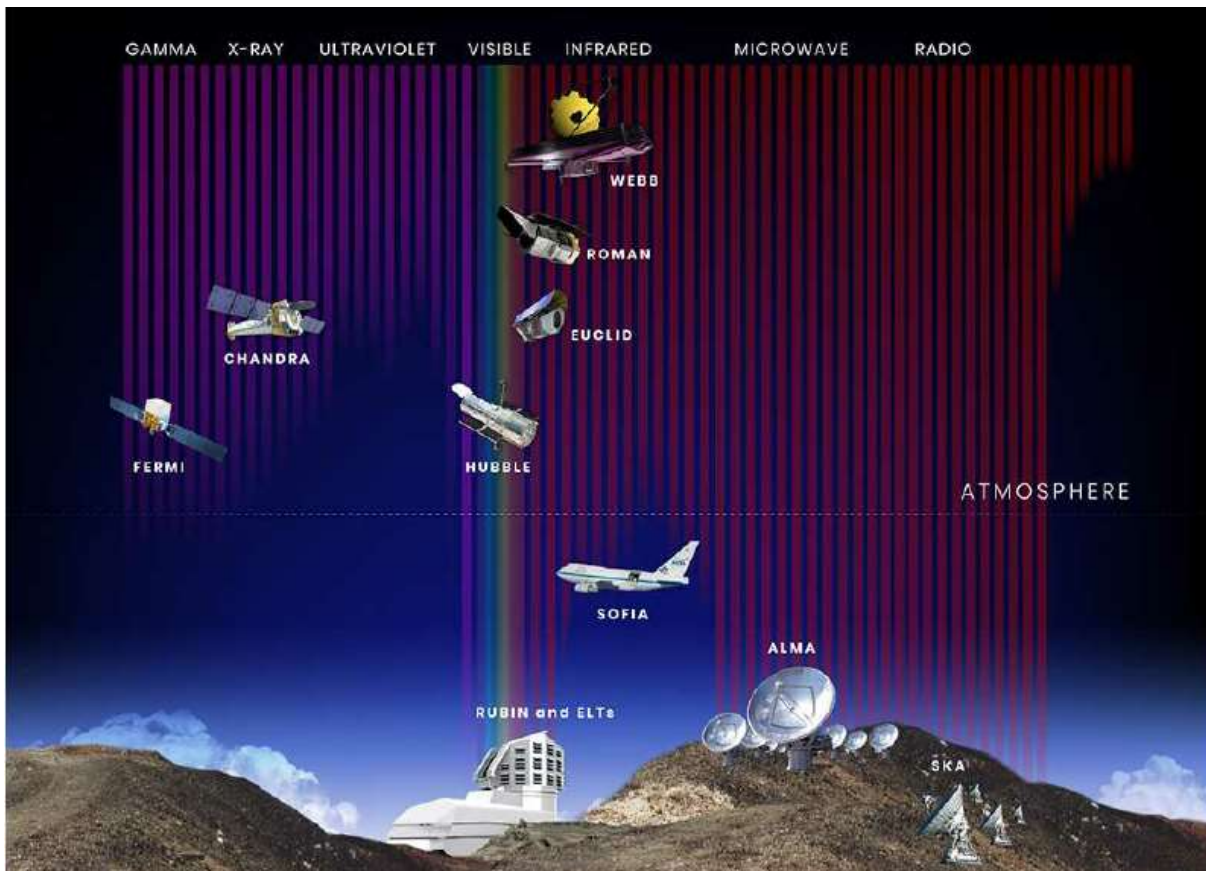
Le fait d'avoir repéré des planètes autour de l'étoile HR 8799 a été extrêmement important puisque cela montrait la voie pour le futur, pour repérer espérons-le des objets beaucoup moins lumineux... dont des planètes de la taille de la Terre.

2 – Télescopes terrestres et spatiaux

Parlons maintenant des télescopes spatiaux et terrestres. Depuis une soixantaine d'années, nous plaçons des télescopes dans l'espace, certains très spécialisés, pour étudier par exemple le Soleil ou pour observer l'Univers dans certaines longueurs d'ondes. Et bien entendu, il y a le télescope spatial Hubble...

J'aimerais que vous me parliez des avantages de placer un télescope dans l'espace. Comme vous l'avez mentionné, l'atmosphère terrestre est un peu l'ennemi des astronomes!

C'est là, en effet, un avantage: ne pas avoir la turbulence atmosphérique, ce qui permet d'améliorer grandement les performances d'un télescope d'une taille donnée pratiquement par un facteur de



Il existe une vaste gamme de télescopes, certains sur Terre (au bas de l'illustration), d'autres embarqués à bord d'avion ou de ballons, ou encore placés dans l'espace. Selon leur conception et leur localisation, ils peuvent observer différentes longueurs d'ondes, tel qu'indiqué au sommet de l'illustration.

100. C'est donc un avantage extrêmement important.

Bien sûr, il y a aussi la question du jour et de la nuit; on ne peut évidemment pas observer le jour dans les longueurs d'ondes du visible... Mais même dans le cas de *Hubble*, qui tourne autour de la Terre en 90 minutes, il ne peut pas observer tout le temps, en plus des contraintes imposées par la luminosité de la Lune et de la Terre... En général, *Hubble* peut observer de 20 à 25% de son temps passé dans l'espace.

Mais l'autre avantage des télescopes spatiaux, c'est de pouvoir observer par-delà le domaine du visible, donc dans l'infrarouge, comme on le fera avec le télescope *Webb*. Or, tout ce qui émet de la chaleur – tout ce qui a une température

– est observable dans l'infrarouge. Autrement dit, tout émet de la lumière dans l'infrarouge, par exemple, vous et moi. Si nous avions des yeux sensibles à la lumière infrarouge, nous brillerions dans le noir. Nous serions même très brillants.

Par contre, cela signifie que faire de l'astronomie en infrarouge, c'est extrêmement difficile puisque tout émet de la lumière! C'est comme si, dans le cas d'un télescope optique, on plaçait tout autour de lui des néons qui seraient allumés durant la nuit. Ça ne serait pas très malin!

Or, en infrarouge, tout le ciel émet une radiation parasite et pour diminuer cette lumière, il nous faut aller dans l'espace en se plaçant dans l'ombre du Soleil et en s'isolant le plus possible de sa chaleur.



Dessins d'origine du télescope spatial Hubble (années 1980), montrant le télescope dans l'espace ainsi que son anatomie.



Y a-t-il des inconvénients d'utiliser des télescopes dans l'espace?

Bien sûr! Le plus évident, c'est le coût. Il faut des technologies particulières pour opérer un télescope dans l'espace, étant donné qu'il s'agit d'un environnement extrêmement difficile au plan des radiations. Il n'est vraiment pas facile de concevoir des instruments qui survivront relativement longtemps dans l'espace. Tout cela se traduit par des coûts. Et plus on envoie un télescope au loin, plus ça coûte cher.

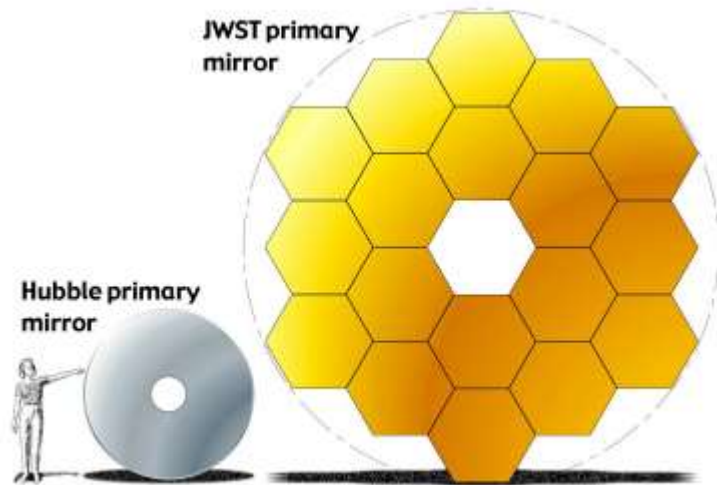
Et s'il y a un problème mécanique, on ne peut pas le réparer à distance.

Voilà! Plusieurs fois, on est allé réparer le télescope Hubble grâce à la Navette spatiale, ce télescope ayant été conçu pour que des astronautes puissent changer ses instruments. D'ailleurs, peu après son lancement, on s'est rendu compte qu'*Hubble* était myope, il y avait un sérieux problème avec son miroir primaire et on a dû envoyer un instrument pour corriger les aberrations de celui-ci. Ça, ça été un avantage absolument considérable pour ce télescope: la possibilité d'aller le revisiter environ tous les cinq ans.

Notons cependant qu'*Hubble* est une exception, véritablement, puisque ce fut le seul télescope spatial conçu pour être entretenu, mis à jour et réparé par des équipages de Navette. C'est ainsi que cinq équipages sont allés à sa rencontre, entre 1993 et 2009, afin de remplacer plusieurs de ses instruments ainsi que ses panneaux solaires. Mais la Navette n'est plus disponible tandis qu'aucun autre télescope spatial n'a été conçu pour un tel service.

On utilise néanmoins des télescopes sur Terre qui sont encore extrêmement utiles. Quels sont les avantages de ces derniers par rapport à leurs homologues spatiaux?

C'est encore relié aux coûts... De plus, on peut construire des télescopes terrestres nettement plus grands. Ainsi, présentement, on est à construire des télescopes de 30 à 40 mètres de diamètre. [Les miroirs de *Hubble* ne mesurant que 2,4 mètres et celui du *Webb* 6,5 mètres.] Le Canada a un projet de télescope de trente mètres de diamètre: le TMT, pour *Thirty*



Le télescope Hubble est doté d'un miroir de 2,4 mètres de diamètre (à gauche), tandis que *Webb* est équipé d'un miroir de 6,5 mètres. À droite, deux photos du miroir d'*Hubble* en forme de beigne. (Imaginez le gigantisme des futurs télescopes terrestres munis de miroirs de 30 à 40 mètres de diamètre.)

Meter Telescope. Les Européens préparent un télescope de 39 mètres qui sera disponible au milieu de la décennie. Ces télescopes coûtent cher mais, par surface collectrice de miroir, ils le sont beaucoup moins que des télescopes spatiaux, pour les raisons que nous venons d'évoquer. Évidemment, s'il y a un problème au sol, on envoie tout simplement quelqu'un le réparer.

Par contre, nous avons tous les désavantages causés par la turbulence atmosphérique. Mais nous avons aujourd'hui des techniques pour y remédier.

Un autre avantage, c'est de pouvoir régulièrement remettre à jour les instruments des télescopes terrestres, en y installant des instruments et des caméras de plus en plus perfectionnés – ce qu'on ne peut pas faire une fois le télescope placé dans l'espace.

Tout à fait. Je suis heureux que vous le soulignez puisque, lorsqu'on parle de télescopes, on pense davantage au miroir

qui collecte la lumière. Bien sûr, c'est ce qui définit en grande partie la puissance du télescope. Mais une autre composante extrêmement intéressante des télescopes, ce sont leurs instruments, la façon dont ceux-ci collectent la lumière et l'analyse. Et cela, c'est un domaine sans cesse en développement, il y a de nouvelles technologies qui apparaissent et qui permettent d'améliorer les performances des télescopes par l'entremise de leur instrumentation. Et ça, c'est très important.

Parlons brièvement du télescope spatial Hubble. Pour nous, du grand public, c'est un télescope qui a révolutionné notre vision de l'Univers – les merveilleuses images que nous transmet *Hubble*. Mais pour vous, astronomes professionnels, s'agit-il d'un instrument tout aussi exceptionnel?

Du point de vue scientifique, c'est de loin le télescope le plus performant, car tous les indicateurs de performance le démontrent: en termes de production d'ar-

ticles scientifiques comme de citations, *Hubble* remporte la palme de tous les télescopes. C'est une mission encore extrêmement productive.

Pourrait-on dire, en quelques mots, ce que nous a apporté *Hubble*? Qu'a-t-on appris grâce à lui?

En fait, l'une des grandes questions qu'*Hubble* a cherché à résoudre, c'est de déterminer précisément la vitesse d'expansion de l'Univers.

De par son appellation, ce télescope fait référence à Edwin Hubble, celui qui a découvert l'expansion de l'Univers. De fait, la mission première du télescope était de mesurer le rythme d'expansion de l'Univers.

Nous savons que l'Univers est en expansion selon une certaine vitesse. Dans les années 1980, la valeur de cette vitesse était un peu controversée, il y avait deux théories, deux écoles: c'était soit 50 ou 100 [kilomètres par seconde par mégaparsec]. Or, les observations de *Hubble* ont permis d'établir précisément le rythme d'expansion de l'Univers, ce qu'il a fait.

Mais ce qu'on n'avait vraiment pas prévu, c'est qu'*Hubble* a montré que le rythme d'expansion de l'Univers s'accroît. La vitesse d'expansion n'a pas toujours été la même, elle a varié par le passé, elle était plus faible... C'est là une découverte extrêmement importante qui a d'ailleurs donné lieu à un [prix Nobel](#).

Cette découverte fait référence à ce qu'on appelle l'énergie sombre de l'Univers et dont on ne comprend pas trop de quoi il s'agit. [Écoutez à ce sujet notre balado 44 – *Matière et énergie «noires»*.] C'est une découverte absolument fondamentale amenée par *Hubble*.

Une autre découverte importante et qui n'avait nullement été envisagée au départ a été l'observation des exoplanètes...

En effet, lorsqu'*Hubble* a été lancé en 1990, on était très loin de se douter qu'à partir de 1995, on allait repérer des planètes gravitant autour d'étoiles lointaines grâce à des télescopes terrestres. En conséquence, les instruments du télescope spatial n'ont pas été conçus pour cette tâche. Néanmoins, et presque contre toute attente, *Hubble* réalise d'importantes observations concernant les exoplanètes.

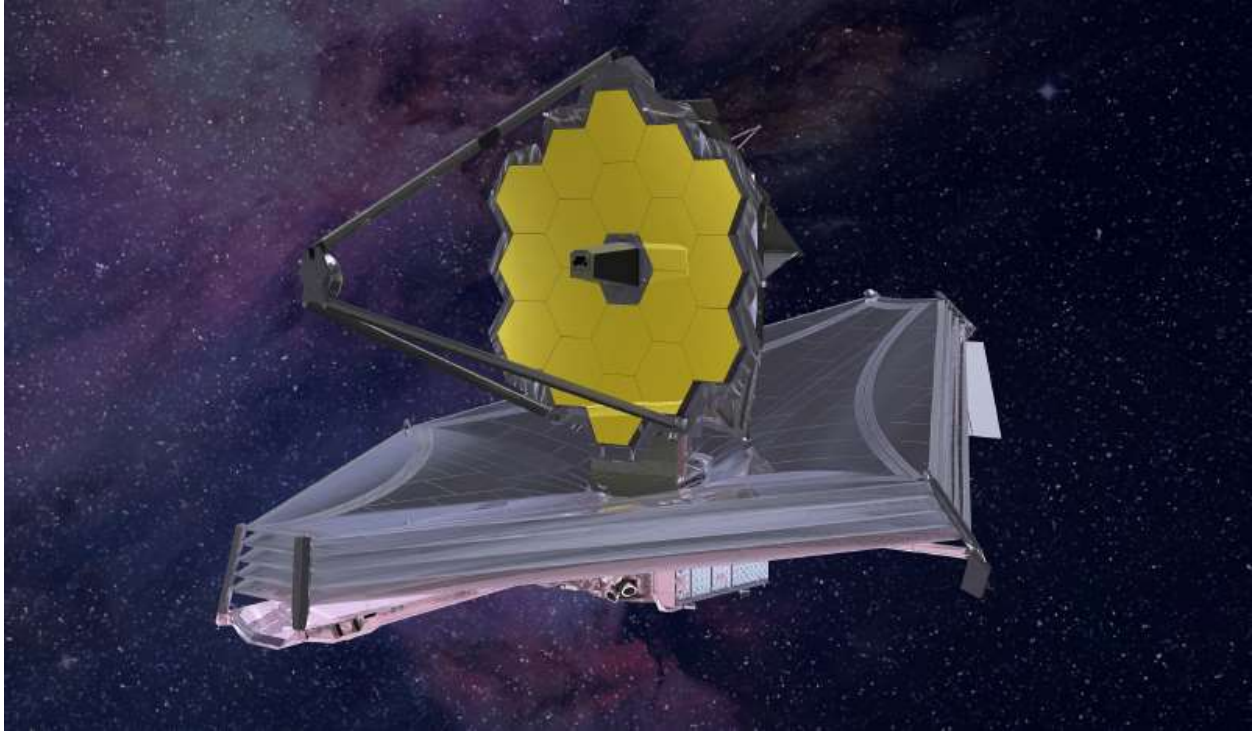
Voilà ce qui est troublant et intéressant avec l'astronomie en général: on n'avait nullement anticipé que les instruments d'*Hubble* allaient être utilisés pour observer l'atmosphère des exoplanètes. C'est ce que nous allons faire avec *Webb*, mais tout a commencé avec les instruments de *Hubble*.

En fait, on ne savait même pas qu'on pourrait repérer des exoplanètes à l'époque où *Hubble* a été conçu!

Exactement. C'est comme si vous m'aviez dit il y a trente ans qu'on allait un jour pouvoir détecter des exoplanètes à l'aide du télescope du Mont-Mégantic! J'aurais alors ri de vous! Et pourtant, c'est ce qu'on fait de manière routinière. C'est comme cela que la science avance.



Grâce aux télescopes terrestres et spatiaux, on a découvert des sortes de planètes qui n'existent pas dans notre Système solaire, dont des planètes dites «sub-neptuniennes».



Le télescope spatial Webb est principalement constitué du grand miroir doré installé sur un vaste écran de toile grise. Sous cette toile se trouvent des panneaux solaires et les équipements de communication avec la Terre (voir détails pages suivantes).

3 – Le *James Webb Space Telescope*

Nous voici parvenu au fameux télescope Webb. Présentez-nous-le, comme vous le faites sans doute souvent.

C'est un télescope qui est beaucoup plus grand qu'*Hubble*. Ce dernier a un miroir de 2,4 mètres, tandis que *Webb* en a un de 6,5 mètres. Mais un tel miroir est trop grand pour prendre place dans la coiffe d'une fusée. Il a donc fallu concevoir un télescope qu'on replie sur lui-même, comme une figure d'origami. Et c'est ce qui rend ce projet extrêmement complexe.

En outre, le miroir est si grand qu'il n'a pas été fabriqué en un seul morceau: il est segmenté. Il est en effet constitué de 18 segments hexagonaux mesurant 1,32 mètre de diamètre. On a également ce genre de télescopes au sol: les premiers télescopes segmentés, ce furent les [Keck](#) de 10

mètres à Hawaii. Chaque Keck comporte un ensemble de miroirs hexagonaux qui forment une mosaïque, ce qui a été une révolution au niveau technologique. C'est comme cela qu'on conçoit désormais les télescopes spatiaux. Cette technologie nous permet de fabriquer des miroirs beaucoup plus petits et plus légers.

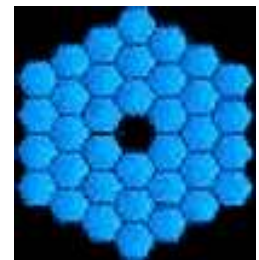
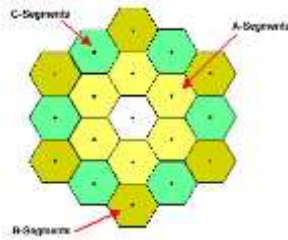


Schéma du miroir en segments d'un télescope Keck.

Autrement dit, au lieu de faire un seul grand miroir de 6,5 mètres de diamètre,

on en fait 18 petits qui se juxtaposent les uns aux autres pour constituer l'équivalent du miroir de 6,5 mètres?



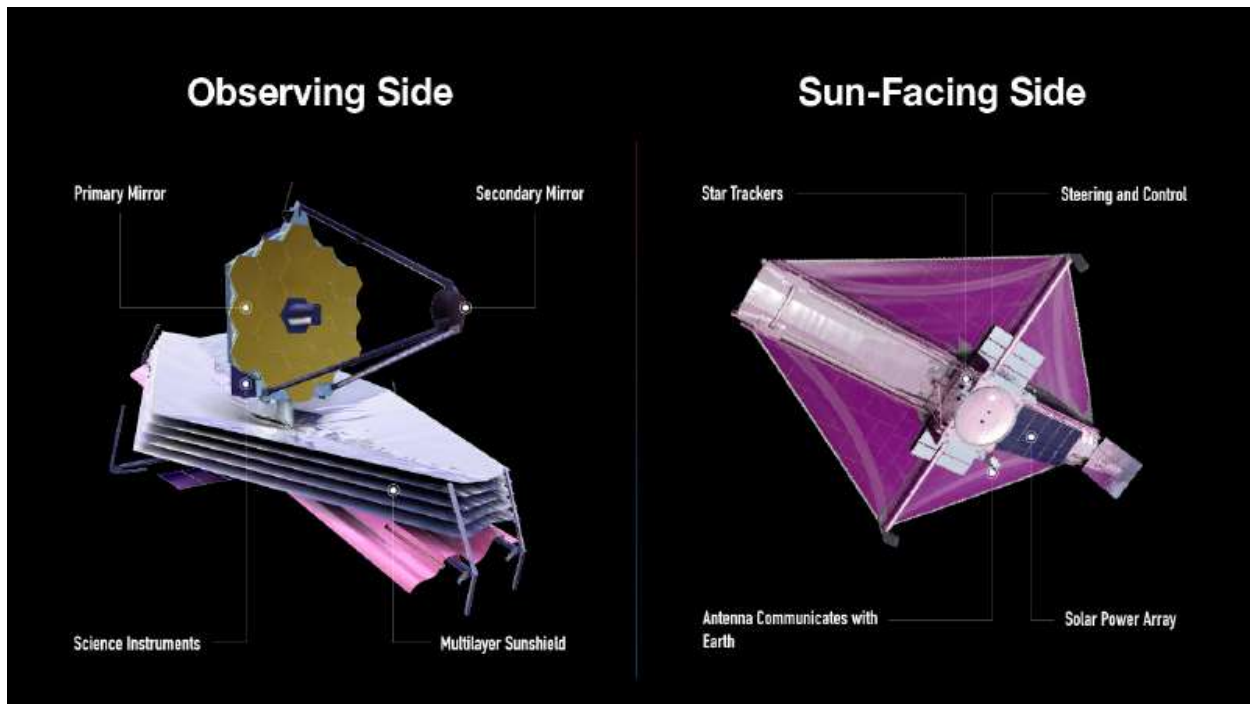
C'est exactement cela. Sauf qu'il faut ensuite *parfaitement* aligner ces miroirs. Il faut comprendre que les miroirs doivent être alignés les uns par rapport aux autres à une fraction de micron près. (Pour se donner une idée de ce que représente une telle précision, rappelons-nous que l'épaisseur d'un cheveu humain est d'environ 40 microns.) Il faut donc aligner ces miroirs d'une manière extraordinairement

précise afin qu'ils se comportent comme un seul miroir monolithique.

L'autre élément important de *Webb*, c'est qu'il a été conçu pour capter la lumière infrarouge – ce que ne fait pas *Hubble*. (En fait, ce dernier est doté d'instruments captant l'infrarouge, mais il est principalement conçu pour recueillir la lumière visible.)

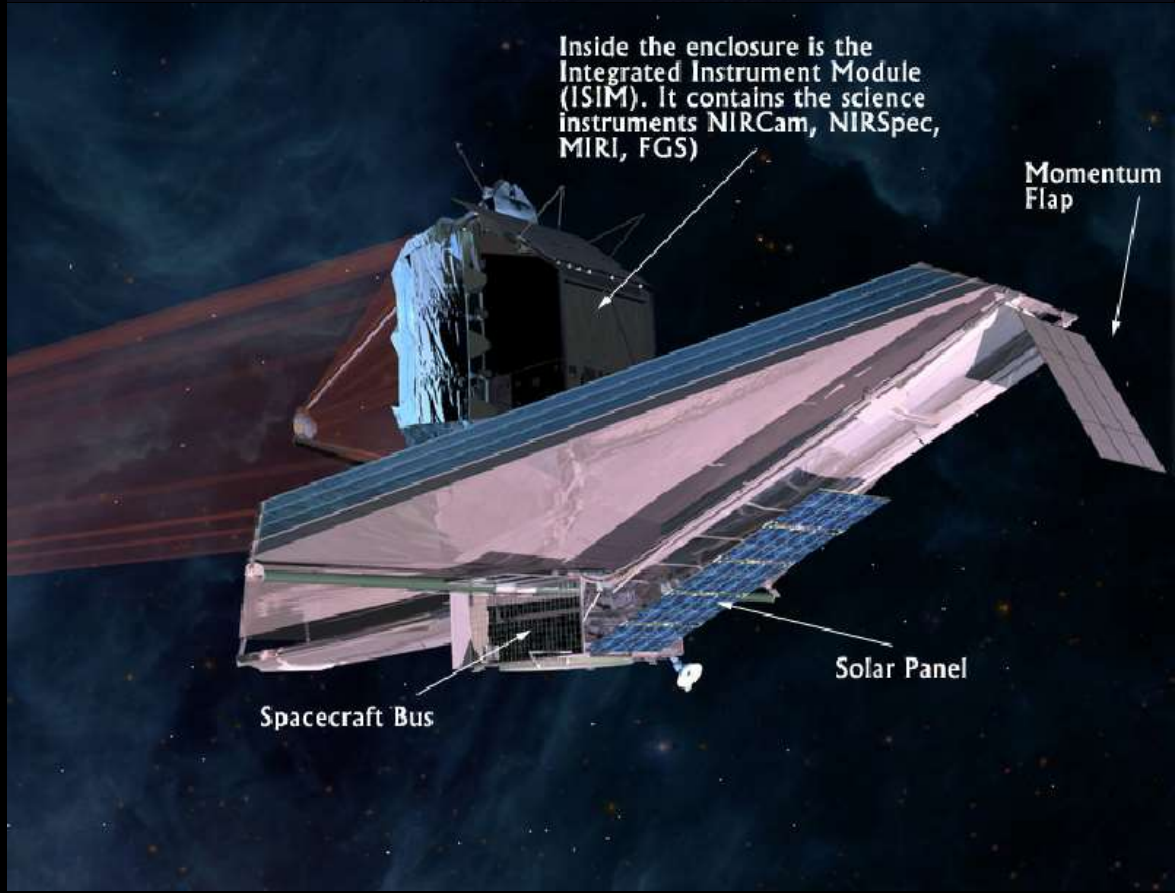
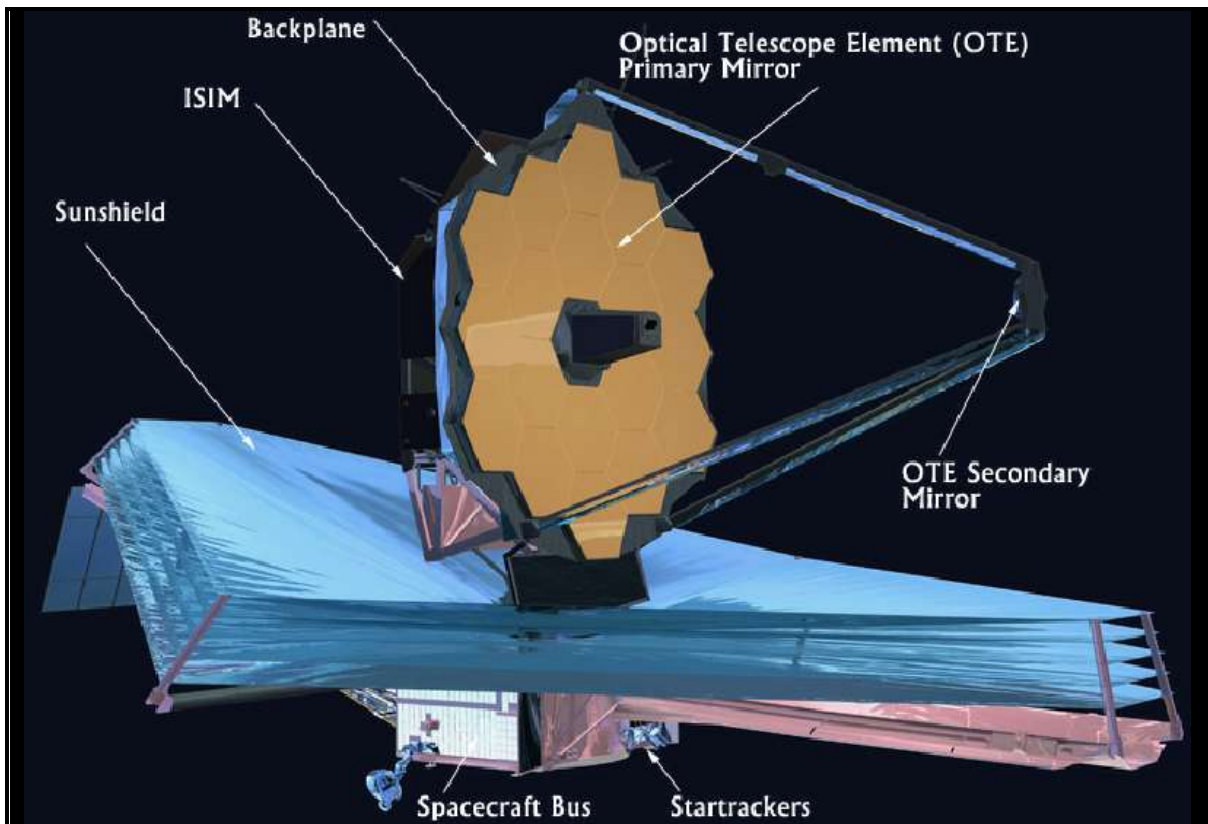
Comme je l'ai dit, la lumière infrarouge provient de partout, même des endroits de l'espace où il n'y a que de la poussière interstellaire, car celle-ci est chaude et émet par conséquent de la radiation infrarouge. Il y a donc partout dans l'Univers une importante radiation de fond dans l'infrarouge et on doit donc en protéger le télescope...

Les deux faces du télescope Webb



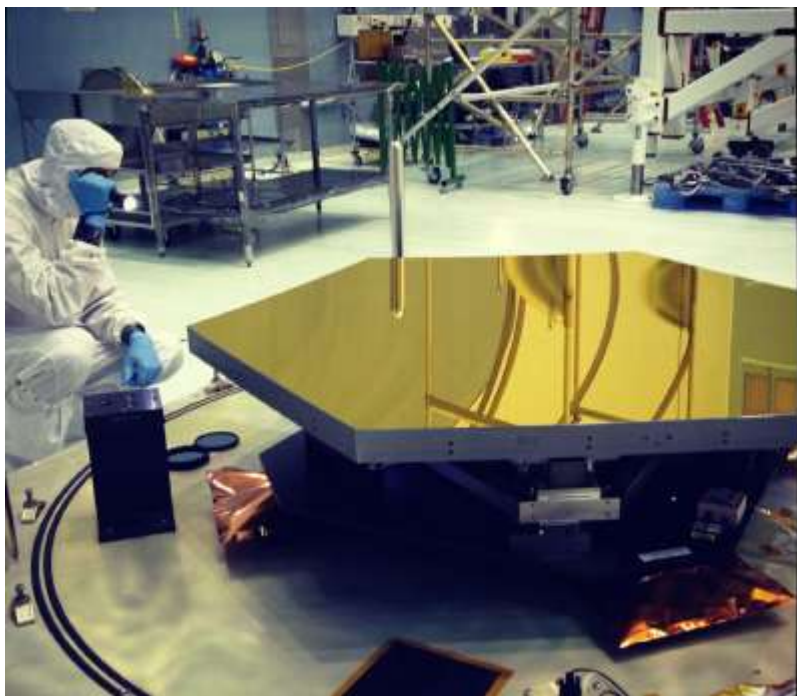
À gauche, la section qui observe l'Univers, dotée du grand miroir principal ainsi que du petit miroir secondaire tendu à bout de bras. Cet ensemble est fixé à un immense pare-soleil de la grandeur d'un terrain de tennis. Cette section est toujours exposée au froid cosmique (-240 C).

À droite, la portion toujours exposée au Soleil (ainsi qu'à la Terre). Elle comporte le long panneau solaire (s'étendant sur la gauche) qui alimente en énergie l'engin, les systèmes de communication avec la Terre ainsi que les systèmes d'orientation et de guidage du télescope.





Le miroir principal du télescope Webb, composé de 18 segments hexagonaux.
À droite, le miroir replié en prévision de son lancement à bord d'une fusée Ariane.



Ci-dessous, un technicien (en scaphandre blanc) travaillant sur l'un des 18 segments hexagonaux. À droite, dessin du télescope enfermé dans la coiffe de la fusée porteuse Ariane 5.





L'écran solaire, en cinq épaisseurs, qui protégera le télescope des trois principales sources de radiations infrarouges: le Soleil, la Terre et la Lune. Remarquez les personnes qui se tiennent au bas de la toile et qui donnent l'idée de sa taille.



Une portion du personnel participant au projet Webb devant une maquette du télescope, nous procurant ainsi une idée de la taille de l'engin.

Un autre élément important à prendre en compte: pour détecter la radiation infrarouge – donc la chaleur qui émane de tout corps céleste –, ça prend des instruments refroidis à des températures extrêmement basses. On parle ici de 30 ou de 40 degrés au-dessus du zéro absolu (soit aux environs de -240° à -230° Celsius).

On doit en fait refroidir tout le télescope, sans quoi celui-ci émettra dans l'infrarouge. Or, dans l'espace, il fait très chaud ou très froid, tout dépend d'où vous êtes. Si par exemple vous êtes exposé au Soleil, il fera 80° , donc très chaud. Mais si vous vous mettez à l'ombre, vous vous exposez à la température de l'Univers, c'est-à-dire 3° au-dessus du zéro absolu (3° Kelvin ou -270° Celsius). C'est dire que si vous êtes à l'ombre, vous allez vous refroidir naturellement.

Pour cette raison, on placera le télescope Webb derrière un écran solaire de la taille d'un terrain de tennis [voir page précédente]. Il s'agit d'un écran fait de cinq couches superposées qui sera déployé dans l'espace. Le télescope se trouvant du côté sombre de l'écran, il ne pointera jamais dans la direction du Soleil, de la Terre et de la Lune. En étant du côté sombre, il va naturellement se refroidir pour atteindre une température avoisinant les 37°K [soit -240°C].

Pourquoi est-ce si important d'observer l'Univers en infrarouge plutôt qu'en visible, étant donné que ça semble si difficile à faire?

Très bonne question! C'est en lien avec le principal objectif scientifique de la mission.

Au début des années 1990 (lors des premières ébauches du projet Webb) et surtout au début des années 2000 (à l'époque où ce télescope s'appelait encore le *Next*

Generation Space Telescope (NGST), car il devait succéder à *Hubble*), on qualifiait cet appareil de «*First light machine*», c'est-à-dire d'une machine servant à capter les toutes premières lumières de l'Univers. Cette «machine» devait avant tout être conçue pour détecter les premières galaxies qui se sont formées à la suite du Big Bang.

On pense que ces galaxies se sont allumées quelques centaines de millions d'années seulement après le Big Bang. Ce sont de véritables feux d'artifice, donc des galaxies où se forment des étoiles en très grande quantité. Il devait s'agir d'étoiles massives qui émettaient davantage dans le domaine de l'ultraviolet.

De véritables machines à remonter le temps

Rappelons-nous qu'une particularité étonnante de l'astronomie est le fait que plus on regarde au loin, plus on remonte dans le temps. Ainsi, observer un objet qui se trouve à 2,5 millions d'années-lumière de nous (telle que la galaxie d'Andromède), c'est voir ce qu'il y avait il y a 2,5 millions d'années.

C'est ainsi que lorsque le télescope Webb regardera les premières galaxies, qui se trouvent à plus de 13 milliards d'années-lumière de nous, il verra l'Univers tel qu'il était... il y a plus de 13 milliards d'années.

Bien sûr, entre-temps, ces galaxies ont évolué, elles n'existent plus telles qu'on les verra à 13 milliards d'années-lumière. Mais la lumière qui nous parvient du fin fond de l'Univers nous révélera tel que c'était aux tout débuts. Et sans doute aurons-nous des surprises!

Les télescopes sont donc de véritables machines à remonter le temps, et tout particulièrement le *James Webb Space Telescope*.

Mais cette lumière, à cause de l'expansion de l'Univers, est décalée vers le rouge – tellement décalée qu'elle dépasse le domaine du visible pour aboutir dans l'infrarouge! Ainsi, si on veut voir les galaxies qui sont apparues à la suite du Big Bang, on n'a pas le choix que de les observer dans l'infrarouge.

Red shift, le décalage vers le rouge

Le professeur Doyon fait ici appel à une notion très étonnante: un *red shift* extraordinairement décalé.

On sait que les galaxies ne sont pas fixes, mais qu'elles se déplacent par rapport à nous. Ce déplacement induit ce qu'on appelle un effet Doppler, c'est-à-dire une variation dans la fréquence des ondes lumineuses émanant d'elles.

L'effet Doppler nous est familier lorsqu'on entend venir une voiture de course ou une ambulance. En s'approchant de nous, on entend que la tonalité du son émis par le véhicule change. En s'approchant de nous, on entend un son plutôt aigu. Puis, lorsque la voiture nous dépasse et s'éloigne à vive allure, ce son devient plus sourd. C'est dire qu'une voiture – ou une galaxie – qui s'approche de nous émet des ondes de fréquence plus courte que lorsqu'elle s'éloigne.

Les astronomes observent que, puisque toutes les galaxies s'éloignent de nous, la lumière qu'elles émettent est décalée vers le rouge. Et ce décalage est d'autant plus prononcé que la vitesse d'éloignement est grande.

La lumière en provenance des galaxies étant toujours décalée vers le rouge, les astronomes parlent couramment d'un *red shift*. Et ce décalage est d'autant plus porté vers le rouge que les galaxies sont distantes de nous.

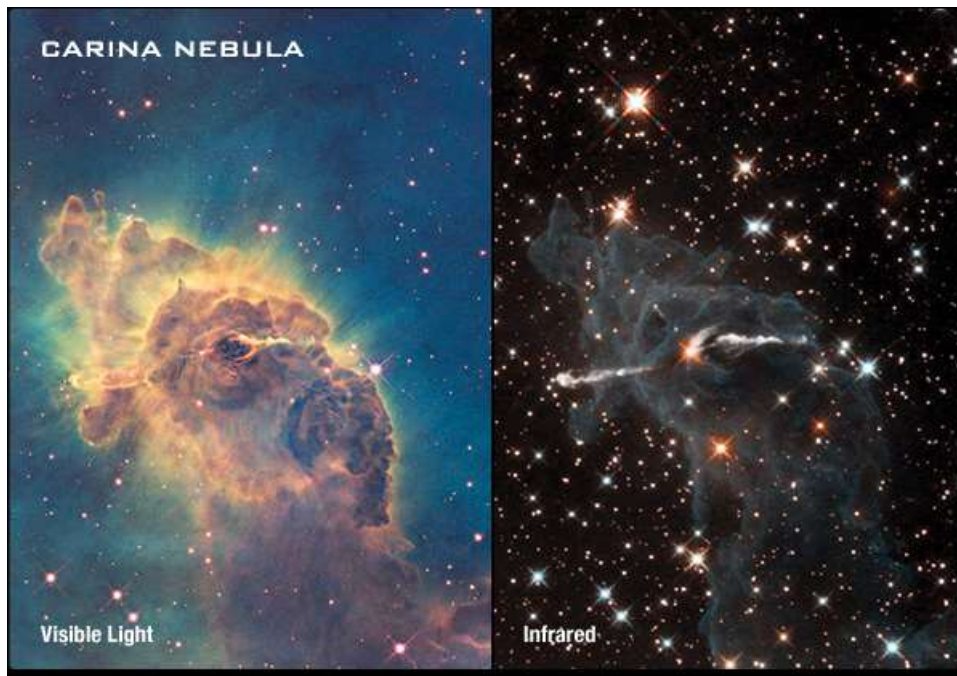
C'est ainsi que la lumière en provenance des premières galaxies est même décalée jusque dans les infrarouges. Elles sont donc peu ou pas visibles en lumière ordinaire, d'où la nécessité de concevoir un télescope sensible aux infrarouges.

Autrement dit, en visible, elles sont invisibles, ce n'est que dans l'infrarouge qu'on peut les voir?

Exactement. En fait, *Hubble* a pu en observer quelques-unes; on arrive parfois à repérer les signes d'une galaxie primitive. Mais la mission première de *Webb* sera d'étudier ces premières galaxies.

En outre, lorsqu'on a entrepris le développement du télescope, au début des années 2000, on repérait déjà des exoplanètes. On s'est par conséquent rendu compte du potentiel que *Webb* pourrait avoir pour ausculter les exoplanètes qui émettent aussi beaucoup dans l'infrarouge.

C'est dire que le volet exoplanète s'est développé sur le tard, mais il est tout de même devenu le second volet scientifique principal de la mission. C'est ainsi qu'on anticipe que le quart du temps d'observation du télescope y sera consacré.



La nébuleuse de la Carène observée en lumière visible et en infrarouge, ce qui permet de débusquer les étoiles qui se cachent dans les nuages de poussière.

Un télescope d'apparence inhabituelle

On a évoqué l'anatomie du télescope, qui est très différente de celle d'un télescope conventionnel. En effet, nous sommes habitués de voir qu'un télescope est un long tube au fond duquel se trouve le miroir principal. Ce miroir concentre la lumière vers un miroir secondaire qui la renvoie vers l'œil humain ou vers une caméra. Dans le cas de *Webb*, il a une apparence totalement différente. On dirait qu'il s'agit d'une table sur laquelle on aurait déposé une sorte d'antenne parabolique. Pourquoi *Webb* est-il fait si différemment des télescopes conventionnels?

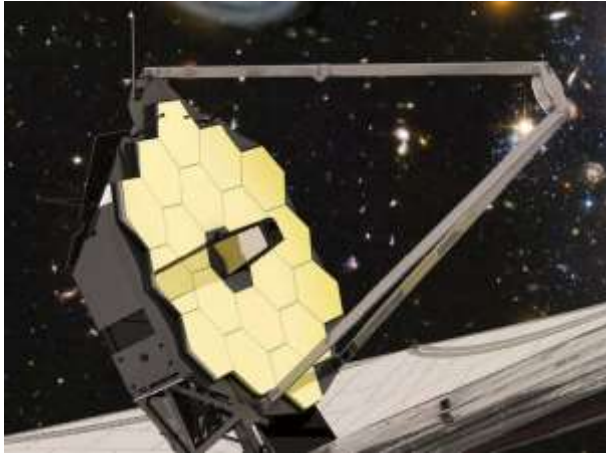
La première raison, c'est l'écran solaire qui lui donne cette allure très particulière, celle d'une plateforme... qui n'en est pas une! Il s'agit plutôt d'un écran solaire qui permet de mettre la totalité du télescope à l'ombre afin que celui-ci demeure au grand froid.

L'«antenne parabolique» que vous décrivez est en fait le miroir principal du télescope, comme celui de *Hubble*, mais conçu pour capter la lumière infrarouge.

On aurait bien aimé entourer ce miroir d'un tube, afin de le préserver des sources de lumière infrarouge provenant de tous les bords – comme dans le cas d'un télescope optique –, mais cela s'est avéré techniquement impossible.

En effet, un tube aurait été une structure gigantesque qui aurait ajouté énormément de masse à l'appareil. Et on s'est rendu compte au final qu'on pouvait s'en passer, dans la mesure où le télescope demeurera toujours à l'ombre grâce à un écran solaire.

La structure optique du télescope *Webb* est très similaire à celle d'un télescope conventionnel: il y a un miroir primaire («l'antenne parabolique») ainsi qu'un miroir secondaire, fixé au bout de longues tiges, qui concentre la lumière captée par le miroir primaire pour l'acheminer vers les quatre instruments. Le télescope *Hubble* a la même architecture.



Le miroir primaire (à gauche) capte la lumière infrarouge qu'il concentre vers le miroir secondaire (à droite). Ce dernier renvoie celle-ci vers le centre du miroir primaire où une ouverture donne accès aux instruments scientifiques situés derrière.

Le télescope Webb compte en fait quatre miroirs, dont l'un sert à corriger les vibrations et dérives du télescope. Ce miroir est alimenté par la caméra de guidage canadienne FGS (voir p. 28).

Sur les dessins de *Webb*, on voit que le miroir parabolique est toujours perpendiculaire à l'écran solaire – comme s'il était déposé sur une table. Ce miroir peut-il être incliné par rapport à la toile?

Non, il est toujours au même angle, mais on peut le tourner dans la direction où on veut observer. Le télescope peut être pointé entre 5° et 45° du Soleil. La taille de la toile fait en sorte qu'il n'y aura jamais une parcelle de rayon solaire qui atteindra le télescope. Il faut d'ailleurs éliminer absolument tout rayon; si vous étiez du côté sombre de la toile solaire, jamais vous ne verriez le Soleil, sinon, le télescope se réchaufferait d'une manière dramatique.

«14 jours de terreur!»

Bientôt, nous allons lancer le télescope Webb. Nous allons tous vivre un grand moment, mais également un moment de grande angoisse. Expliquez-nous le déroulement du lancement mais, surtout, la mise en place du télescope. C'est une opération complexe qui se déroulera sur plusieurs semaines.

Au moment du lancement, le télescope est complètement recroquevillé sur lui-même, on doit donc le déplier progressivement et éventuellement le placer non pas en orbite autour de la Terre, mais en orbite autour du Soleil, en un endroit très particulier...

Racontez-nous comment vont se passer les semaines à la suite du lancement.

Au moment où on se parle, mi-août, le télescope



Ariane 5 porteuse du télescope Webb.

est déjà dans sa configuration finale, prêt à son lancement. Nous sommes en train de l'emballer pour l'envoyer en Guyane française.

Le 12 octobre, le télescope Webb a été livré au Centre spatial de Kourou, au terme d'un périple de 16 jours et de 9500 km, qui l'a conduit des usines de la Northrop Grumman, au sud de Los Angeles – empruntant quarante kilomètres de routes à travers la mégapole américaine, escorté par voitures de police gyrophares allumés – jusqu'au port de la U.S. Navy.



Webb sera lancé depuis le Centre spatial guyanais, situé en Amérique du Sud. Construit en Californie, il a cheminé par bateau le long des côtes de l'Amérique centrale, puis passé par le canal de Panama, longé la rive nord de l'Amérique du Sud pour aboutir à Kourou.

L'appareil, d'une fragilité extrême, avait été placé dans un caisson climatisé le protégeant contre toutes vibrations et variations de température. Ce caisson a été acheminé par le porte-conteneurs français MN Colibri conçu spécialement pour transporter de gros satellites.



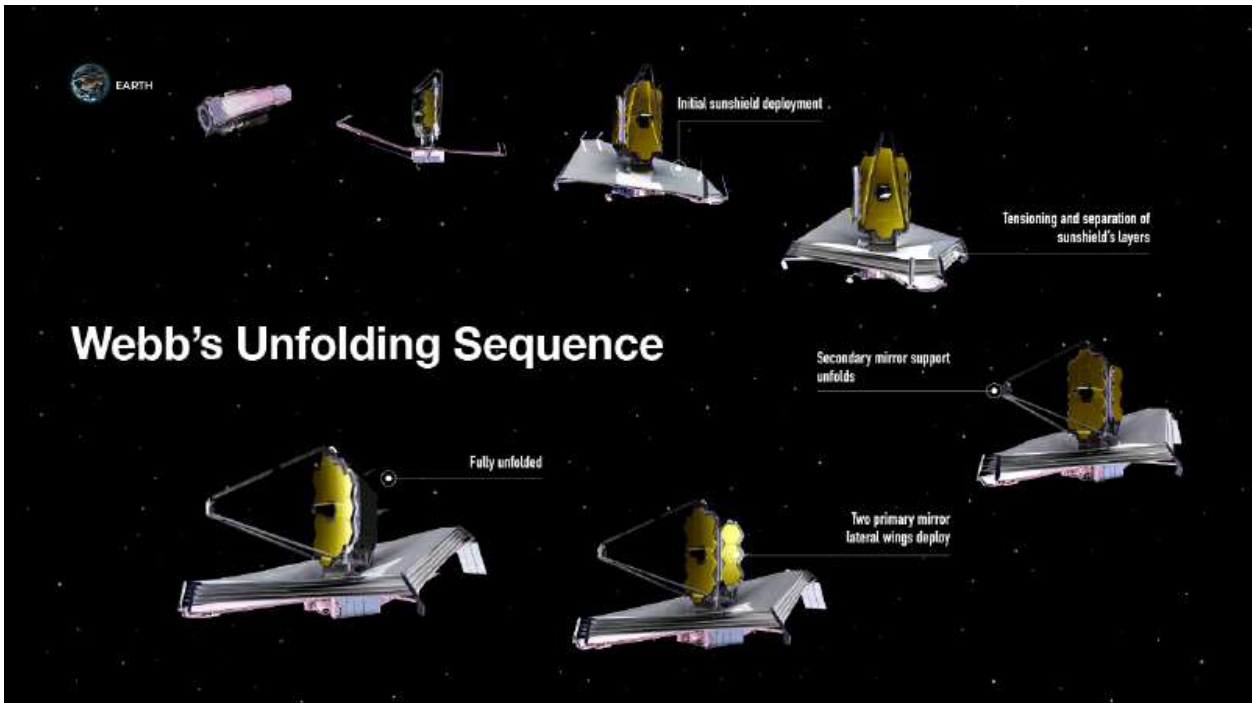
Arrivé à Kourou, le télescope Webb a été sorti de son conteneur protecteur.

Ensuite, ce sera ce que j'appelle les «14 jours de terreur», en référence aux sondes qui se posent sur Mars et qui nous font vivre 7 minutes de terreur [tel que nous le relatons dans le balado 47 – *A l'assaut de la planète Mars*].

Durant sept minutes, on perd contact avec la sonde, tandis que dans le cas de *Webb*, nous conserverons toujours un contact radio. Mais ce sera une opération critique qui se déroulera sur 14 jours; le déploiement du télescope va se faire sur 14 jours. [Voir sur [YouTube](#) la séquence.]

Au départ, tout s'enchaîne rapidement. Vingt minutes après le lancement, le panneau solaire de *Webb* est déployé. C'est la toute première étape puisqu'il faut alimenter l'engin en énergie. (Dans un premier temps, *Webb* fonctionnera sur des batteries, mais qui ne dureront que quelques jours.)

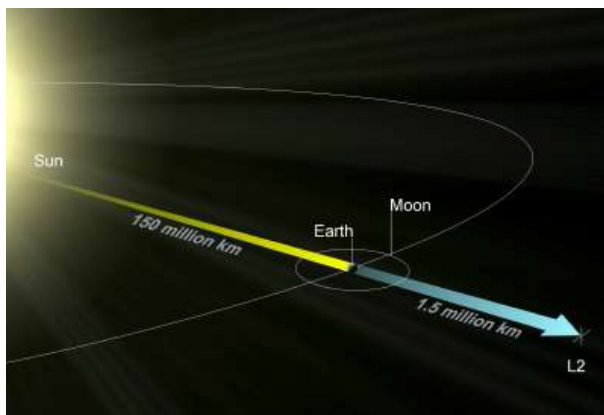
Ensuite, s'amorce le déploiement complexe des voiles de l'écran solaire, ce qui prendra 14 jours. Mais il n'y aura pas de drone pour nous montrer ce qui se passera. Nous allons toutefois percevoir la manœuvre puisque chaque mouvement a des actuateurs qui nous indiqueront que ça fait bien 'click'. Il s'agit d'une séquence programmée d'avance et qui a été pratiquée et repratiquée; il faut comprendre



Le déploiement du télescope depuis son lancement (en haut à gauche) jusqu'à sa mise en forme finale (en bas à gauche), une opération aussi délicate que complexe qui se déroulera sur deux semaines.

qu'on a fait de nombreuses pratiques générales, on a simulé tout ce qui va se passer, et ce depuis plusieurs années.

D'autre part, le télescope sera placé très loin de la Terre, à 1,5 million de kilomètres, où ce qu'on appelle le [point de Lagrange 2](#).



Placé en orbite autour du Soleil, le télescope sera stationné à 1,5 million de kilomètres au-delà de la Terre de sorte qu'il sera toujours en ligne droite avec le Soleil et la Terre. De ce point, dit Lagrange 2, il nous fera toujours dos.

Lorsque vous vous trouvez en ce point, vous êtes en orbite solaire et terrestre, dans le sens que vous tournez autour du Soleil, mais à la même vitesse que la Terre. Vous demeurez donc toujours aligné par rapport à ces deux astres. La raison pour laquelle on s'installe en un tel point, c'est afin que *Webb* demeure constamment à l'ombre du Soleil, de la Terre et de la Lune. Quant à *Hubble*, qui gravite autour de la Terre en 90 minutes, il se trouve la moitié du temps au Soleil, ce qui crée des instabilités thermiques que ressent très bien le télescope. Tandis qu'au point L2, on est dans un environnement beaucoup plus stable, ce que nous désirons pour atteindre les températures de refroidissement dont on a besoin pour observer l'Univers dans l'infrarouge.

Plusieurs autres télescopes ont d'ailleurs été placés au point de Lagrange 2, un site fort intéressant pour faire de l'astronomie spatiale.

En fait, là où il se trouvera, le télescope fera toujours dos au Soleil, à la Terre et à la Lune – tout en se trouvant au même point dans le ciel par rapport à nous.

Exactement. Si on était capable de le voir depuis la Terre, on n'apercevrait jamais *Webb*, on verrait plutôt l'écran solaire derrière lequel il se trouve.

Et c'est comme si le télescope pointait toujours en direction de l'orbite de la planète Mars, regardant vers l'extérieur du Système solaire.

En fait, le télescope observe selon une bande d'environ 45° du ciel. Et il y a des régions du ciel qu'on ne pourra pas observer toute l'année, comme sur Terre d'ailleurs. Il faudra parfois attendre six mois pour les observer à nouveau. Mais il y a aussi des zones d'observations continues, au nord et au sud, qui seront en tout temps observables avec *Webb*.

Qui est James Webb?

En astronomie, il est coutume d'attribuer un nom, généralement celui d'un grand astronome, aux télescopes d'importance. Dans ce cas-ci, il s'agit officiellement du *James Webb Space Telescope*, ou JWST en abrégé. Or, fait exceptionnel, [James Webb](#) n'était pas un astronome mais plutôt un «grand commis de l'État».

Il s'agit en fait du deuxième patron de la NASA, qui a dirigé l'agence spatiale de 1961 à 1968, soit à l'époque de la mise en œuvre du programme Apollo. On attribue à ses grands talents d'organisateur, de gestionnaire et de navigateur à travers les arcanes de la politique américaine le triomphe du programme



James Webb (1908-1992), à bord d'une capsule Gemini au sol. Il est l'architecte du programme Apollo et de la science au sein de la NASA.

Apollo. En particulier, on estimait au départ que le premier pas de l'homme sur la Lune allait coûter entre 20 et 40 milliards \$ (de l'époque). Or, sous la gouverne de Webb, cet effort a coûté moins de 20 milliards \$.

Qui plus est, indiquait récemment [Eric Smith](#), directeur scientifique des projets de télescopes spatiaux à la NASA, James Webb a accordé énormément d'importance à la science. «Webb savait que pour mener à bien les ambitions du président Kennedy, il aurait besoin de beaucoup de scientifiques et que pour les attirer, il devait leur permettre de mener quantité de travaux de recherche. Ainsi, la raison pour laquelle la science est si présente à la NASA, c'est grâce à James Webb qui, au départ, avait une formation d'avocat.»

James Webb a démissionné de la NASA en octobre 1968, juste avant le premier vol Apollo (Apollo 7), apparemment frustré par les politiciens de Washington qui réduisaient déjà sévèrement les budgets de son agence. Il est décédé en 1992, à l'âge de 85 ans et enterré au cimetière d'Arlington, réservé aux bâtisseurs des États-Unis.

Détecter de la vie sur d'autres planètes

Qu'espère-t-on pouvoir observer avec *Webb*? À quoi nous servira-t-il?

L'une des deux missions principales de *Webb* sera de détecter les premières lumières de l'Univers. *Hubble* a réussi à nous rapprocher à 500 ou à 600 millions d'années après le Big Bang – en observant des galaxies fort lointaines – mais il y a une limite, *Hubble* ne pouvant pas capter la lumière des premières galaxies. Voilà ce qu'on va faire avec *Webb*: on veut pouvoir prendre en flagrant délit le feu d'artifice cosmique le plus spectaculaire de toute l'histoire de l'Univers. C'est d'abord pour cela que ce télescope a été conçu: afin de nous permettre de comprendre l'évolution des galaxies; comment elles sont passées de ce qu'on voit avec *Hubble* à ce qu'elles étaient au tout début de l'Univers. Nous comprenons en partie comment cette évolution s'est faite, mais il y a encore beaucoup à apprendre.

L'autre élément, c'est de comprendre comment les étoiles se forment – en particulier les systèmes planétaires – et quelles sont les conditions qui mènent à la vie sur les exoplanètes... et sur Terre. Ce qui m'amène à parler du domaine des exoplanètes.

En effet, la prochaine phase d'étude des exoplanètes – qui est déjà en cours – consiste à étudier leur atmosphère. Comme je l'ai mentionné plus tôt, c'est la clé pour parvenir à déterminer s'il y a de la vie à la surface d'une exoplanète. Nous le déterminerons de manière indirecte, en

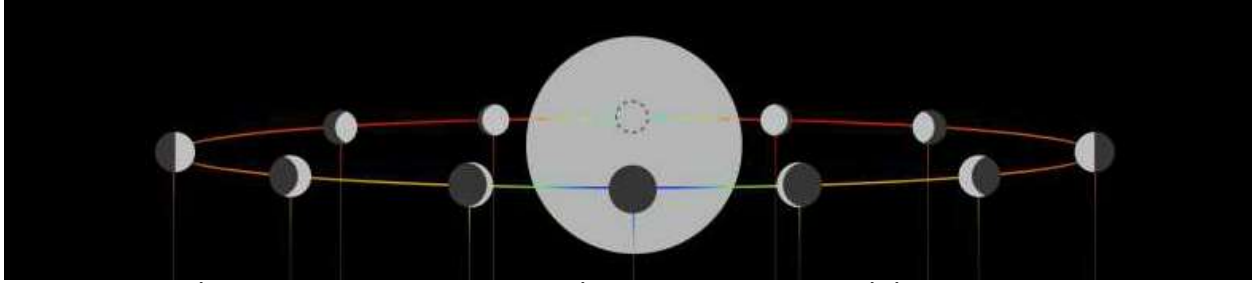
mesurant la composition chimique de l'atmosphère.

Prenons l'exemple de la Terre; notre atmosphère comporte beaucoup d'oxygène libre – c'est-à-dire des atomes d'oxygène qui ne se sont pas combinés à d'autres atomes pour former des composés chimiques. Or, l'oxygène libre provient des plantes puisque, naturellement, cet élément s'associe toujours à d'autres éléments chimiques. Ainsi donc, lorsqu'on détecte beaucoup d'oxygène libre dans l'atmosphère d'une planète, c'est signe qu'il y a la vie. Même chose pour le méthane...

Or, il est possible de déterminer la composition chimique de l'atmosphère d'une exoplanète, mais cela nécessite de puissants télescopes optimisés pour cette tâche. Et c'est ce que nous nous proposons de faire avec *Webb*. Les quatre instruments de ce télescope ont été conçus à cette fin, et en particulier l'instrument canadien.

Si nous observons l'atmosphère d'une exoplanète et qu'on y découvre de l'oxygène libre et du méthane, on pourrait en déduire qu'il y a probablement de la vie sur cette planète. Mais si nous découvrons une atmosphère dans laquelle il n'y a pas d'oxygène libre, ou peu ou pas de méthane, nous pourrions en déduire qu'il n'y a pas de traces de vie telle qu'on la connaît. C'est cela?

C'est un peu cela. Bien sûr, en pratique, c'est plus complexe, mais c'est essentiellement cela. Et la façon qu'on le fera, ce ne sera pas en prenant des images, mais grâce à une autre technique: la technique du transit.



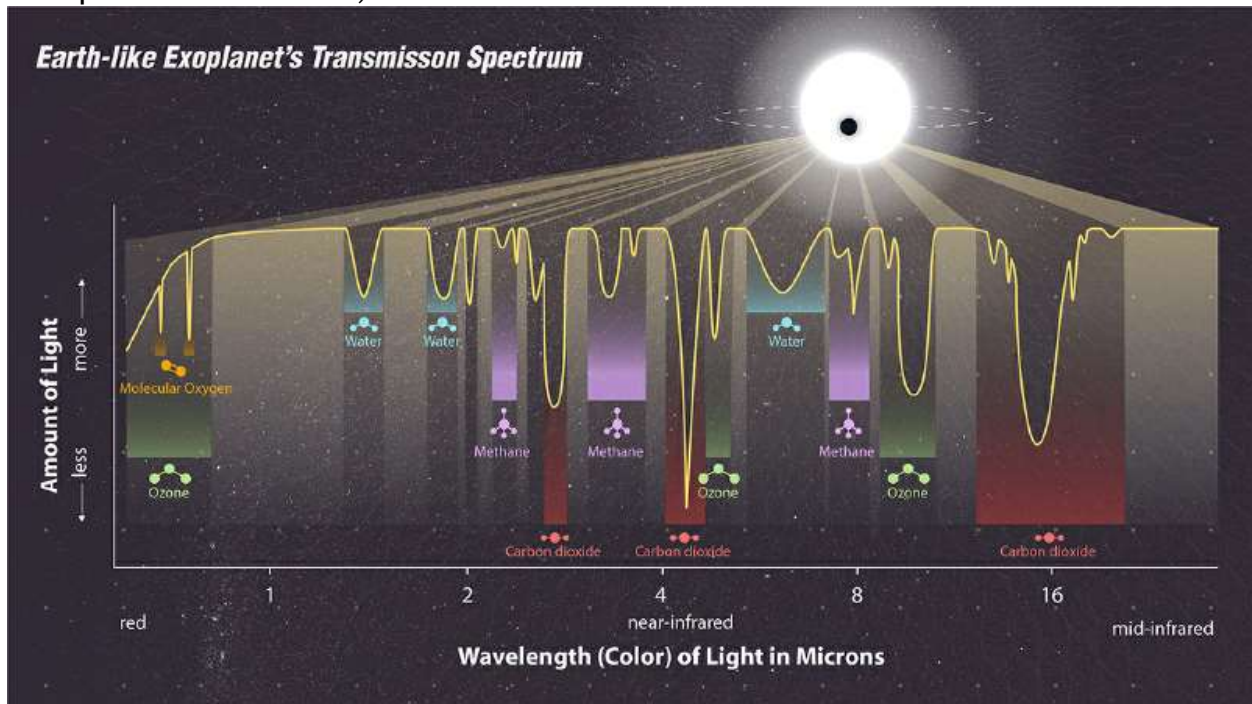
Lorsqu'une planète transite (passe) devant son étoile, elle l'assombrit légèrement, ce qui nous permet de la repérer. Dans le cas de *Webb*, sa puissance sera telle qu'on pourra même mesurer la composition de l'atmosphère de la planète (s'il y en a une, bien entendu).

Nous observerons des planètes qui, du point de vue d'où nous sommes, passent devant leur étoile. Au moment où elles passent devant celle-ci, on observe une petite baisse de luminosité puisque le disque de la planète bloque la lumière en provenance de l'étoile. Mais il n'y a pas que le disque de la planète qui bloque la lumière, il y a également son atmosphère qui va filtrer la lumière de l'étoile.

Donc, en prenant un spectre de l'étoile, avant, pendant et après le passage de l'exoplanète devant elle, on arrivera à dé-

duire le spectre de l'atmosphère de la planète. On arrivera ainsi à établir la composition chimique de l'atmosphère de la planète.

Ce sont des observations extrêmement délicates qui, comme je l'ai mentionné, ont commencé à être faites au sol, mais surtout par *Hubble*. Mais il faut bénéficier du plus grand télescope possible et de conditions d'observation extrêmement stables pour y parvenir et *Webb* est conçu pour cela.



En scrutant l'atmosphère d'une exoplanète avec le spectromètre canadien NIRISS, on parviendra à identifier les composantes de l'atmosphère de celle-ci au moment de son transit devant son étoile.

Webb va surtout observer les premières galaxies et les exoplanètes, mais va-t-on également observer tout le reste, un peu comme Hubble: les galaxies voisines, les nébuleuses et autres objets célestes?

Absolument. *Webb* va aussi observer les planètes du Système solaire. Il y a quantité de programmes scientifiques qui seront menés, notamment concernant certaines lunes de Jupiter et de Saturne. Ce sera entre autres le cas d'Encelade, on

sera capable d'analyser la composition chimique des geysers qui émanent de cette lune de Saturne. Il y a plein de choses absolument fascinantes que *Webb* va faire dans toutes les sphères de l'astronomie. De la même façon qu'*Hubble* a révolutionné l'astronomie, je pense qu'on peut attendre la même chose de *Webb*.

On me demande souvent: aura-t-on de belles images avec *Webb*? Absolument, les images seront toutes aussi spectaculaires que celles de *Hubble*.

4 – Contributions canadiennes à Webb: une histoire tumultueuse

Parlons maintenant de l'instrument pour lequel vous êtes le chercheur principal: le NIRISS. Le Canada fournit deux appareils à *Webb*: le système de guidage du télescope ainsi qu'un instrument pour observer les exoplanètes. Y a-t-il un lien entre les deux ou s'agit-il de deux appareils qui n'ont rien à voir l'un avec l'autre?

C'est une très bonne question, puisqu'ils sont liés à l'évolution du télescope *Webb* et à la contribution canadienne.

«Le meilleur système de guidage jamais conçu!»

Au début des années 2000, il était prévu que *Webb* emporterait trois instruments scientifiques. Mais le Canada faisait sans cesse des représentations pour y ajouter son propre instrument scientifique alors que cette proposition était sans cesse déclinée [par la NASA].

La contribution canadienne consistait à fournir le système de guidage du télescope, baptisé FGS pour *Fine Guidance Sensor*. Il s'agissait même d'une contribution essentielle à la mission, la NASA jugeant cet appareil comme «*mission critical*».

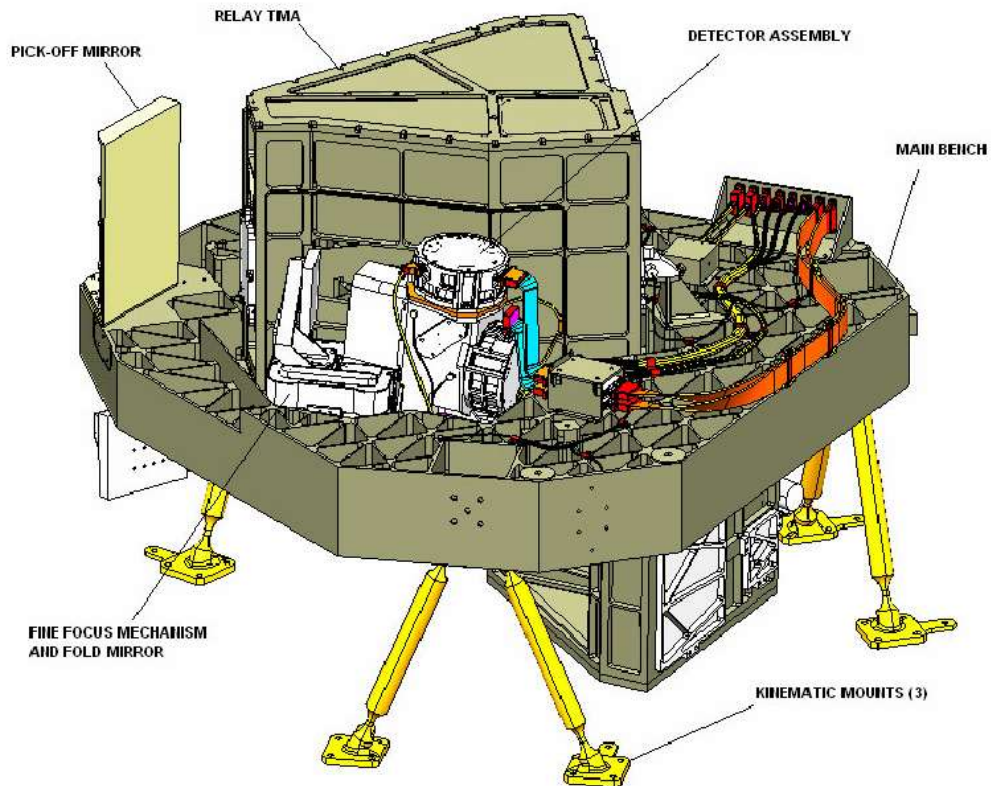
En quoi cet appareil est si vital? Lorsque vous observez un objet céleste – une galaxie ou une étoile – le télescope aura

beau être dans l'espace, il subira toujours des vibrations, de sorte que les images qu'il prendra seront nécessairement embrouillées. Pour pallier à ce problème, on ajoute un petit miroir qui permet de corriger en temps réel les mouvements vibratoires du télescope. Et ce qui guide ce miroir, c'est une caméra infrarouge de conception canadienne, la FGS.

Ainsi, lorsqu'un instrument scientifique de *Webb* fera une observation, la caméra infrarouge FGS observera une autre portion du ciel dans laquelle elle choisira une étoile très brillante. Alors, 16 fois par seconde, la FGS mesurera la position de cette étoile et, en la voyant bouger, elle enverra un signal de correction afin de compenser les mouvements du télescope.

Juste pour vous donner une idée de la précision de cette caméra: elle sera capable de détecter un mouvement du télescope équivalent à celui d'un cheveu observé à un kilomètre de distance! C'est sans doute le meilleur système de guidage

jamais conçu par l'humanité... et c'est une réalisation canadienne! L'instrument canadien a été conçu par la compagnie Honeywell Aerospace d'Ottawa et de nombreux partenaires industriels partout au Canada et ce en collaboration avec l'Université de Montréal et le Conseil national de recherche du Canada (division Herzberg Astronomie et Astrophysique de Victoria, en Colombie-Britannique).



Le [FGS/NIRISS](#) canadien – *Fine Guidance Sensor / Near Infrared Imager and Slitless Spectrograph* – servira à pointer très précisément le télescope tout en effectuant diverses observations ultra-précises.

Il faut vraiment que cette caméra fonctionne avec une telle précision sinon toutes les images prises par le télescope seront embrouillées. Sans cette caméra, ce sera l'équivalent d'avoir un télescope de un ou deux mètres seulement, au lieu d'un instrument de 6,5 mètres. C'est pourquoi la FGS est essentielle à la réussite de la mission.

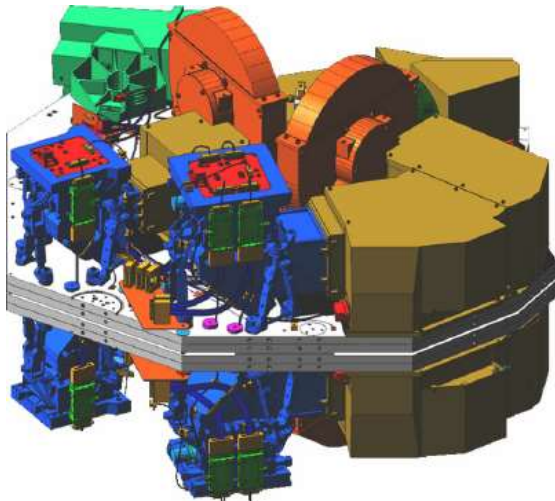
C'est aussi dire que chaque fois que nous verrons une image, un spectre, ou que l'on fera une découverte importante avec Webb, la caméra canadienne y aura contribué.

Comment tout a commencé

Ceci dit, le Canada faisait toujours pression pour disposer de son propre instrument scientifique. Et nous y sommes parvenus grâce, au départ, à notre participation à la caméra américaine NIRC*am* (*Near-Infrared Camera*). Nous devons fournir l'un des modules de cet appareil. Et c'est de cette façon que ma participation à Webb a débuté...

En 2001, la chercheuse principale Marcia Rieke, de l'Université d'Arizona, me téléphone pour me demander: «René, je fais une proposition à la NASA pour fournir la caméra NIRC*am*... Voudrais-tu te joindre à moi? J'aimerais que tu sois en

charge des filtres ajustables de la caméra.» Je lui ai répondu: «Wow, OK.» Puis je lui demande: «À quand le lancement du télescope?» En 2008, me répond-elle. «C'est bon.» Et c'est comme ça que je me suis joint au projet.



La caméra américaine NIRC2.

J'étais donc responsable de la contribution canadienne à l'instrument américain, tandis que mon collègue John Hutching, chercheur au Conseil national de recherche du Canada (CNRC) était en charge du guideur FGS.

Hélas, un an après le début du projet, le télescope Webb est confronté à d'importants dépassements de coût. Au départ, on envisageait concevoir un télescope de 8 mètres de diamètre, mais on a dû sabrer dans le projet. Non seulement est-on passé à 6,5 mètres, mais l'un des instruments est venu à un cheveu d'être éliminé.

Quant à la caméra américaine, la NASA nous a dit: «C'est intéressant ce que les Canadiens proposent, mais ce n'est pas essentiel à la mission scientifique... Donc, on vous enlève!»

Eh oui, j'ai été éjecté du projet! Et ça, ça été très dur à prendre.

Mais très rapidement, mon collègue Hutching et moi, nous nous sommes dits qu'on pourrait peut-être placer mes filtres ajustables dans la caméra infrarouge FGS, autrement dit: avoir deux instruments dans la même boîte! Très rapidement, nous avons fait cette proposition à l'ASC et à la NASA et elle fut acceptée. Nous avons donc intégré les filtres, ce qui est devenu l'instrument TFI (*Turnable Filter Imager*) placé dans la FGS.

C'est de cette façon qu'est né le quatrième instrument scientifique de *Webb*, qui s'appellera éventuellement NIRISS.

En catimini de la NASA!

Toutefois, ce que nous proposons n'était pas simple à faire, puisque ce type de technologie n'avait jamais été utilisé dans l'espace. On devait donc faire énormément de recherche et de développement pour s'assurer que les filtres ajustables allaient bien fonctionner dans les rigueurs de l'espace.

Or, vers 2006 ou 2007, on s'est rendu compte qu'il n'était pas certain que notre instrument allait fonctionner correctement dans l'espace. À tel point qu'à un moment donné, l'Agence spatiale canadienne m'a demandé: «Ce n'est pas sûr que nous puissions faire voler tes filtres ajustables, il faudrait peut-être que tu penses à envisager une solution de rechange pour un autre type d'instrument.»

Et c'est ce que nous avons fait. On s'est alors demandé: comment pourrait-on reconfigurer notre instrument pour faire autre chose? Et c'est là que nos problèmes sont devenus une opportunité!

En effet, si à cette époque, le domaine des exoplanètes était apparu depuis une quinzaine d'années, les appareils de *Webb* n'avaient pourtant pas été optimisés pour ce faire. C'est-à-dire que les caméras du

télescope allaient bien sûr être capables de faire beaucoup d'observations d'exoplanètes, mais elles n'étaient pas optimisées à cette fin. On s'est donc dit: peut-être pourrait-on développer un mode d'observation conçu pour étudier l'atmosphère des exoplanètes?

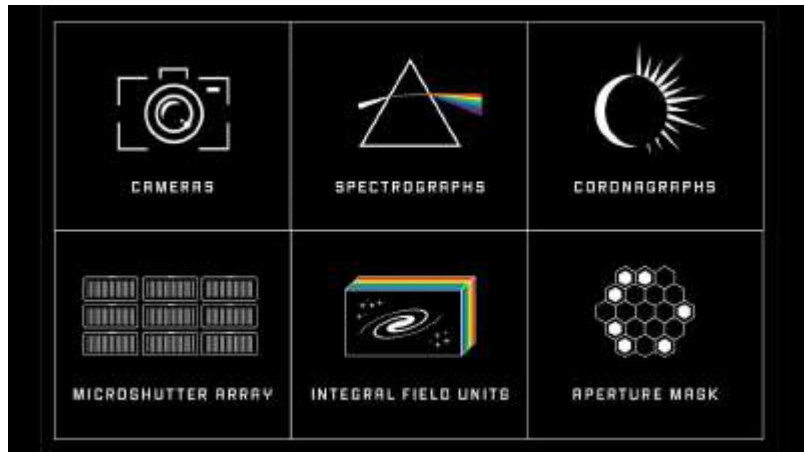
On a donc conçu un nouvel instrument... un peu en catimini puisque la NASA n'était même pas au courant!

Finalement, ce fut ma décision – d'abandonner les filtres placés sur la caméra FGS pour plutôt concevoir le NIRISS – puisque je me rendais compte qu'il fallait se décider rapidement: propose-t-on à la NASA de continuer avec des filtres ajustables et ainsi courir le risque de ne pas être embarqué (considérant que notre instrument était trop risqué), ou propose-t-on autre chose?

C'est ainsi qu'en juin 2011, je propose au groupe scientifique de *Webb* un nouvel instrument: NIRISS – le *Near-Infrared Imager and Slitless Spectrograph*.

Il s'agit d'une caméra infrarouge semblable à la NIRCam américaine, mais qui a des modes d'observation qu'aucun autre instrument de *Webb* ne possède. Ma proposition a d'ailleurs été très bien reçue.

Mon problème, par contre, a alors été qu'il nous fallait nous retourner très rapidement puisque nous sommes en 2009 alors que la NASA désire qu'on livre nos instruments en 2011 ou 2012. Il fallait donc se dépêcher, alors que tout ce qui est spatial demande toujours énormément de temps.



Le télescope *Webb* comporte une panoplie d'instruments scientifiques, dont des caméras, des spectromètres, un coronographe, etc. qui scruteront toutes les facettes de l'Univers, des planètes et satellites du Système solaire jusqu'aux toutes premières galaxies, en passant par les exoplanètes et leur atmosphère.

Mais tout compte fait, nous sommes parvenus à reconfigurer notre instrument sous une autre forme. Et c'est comme cela qu'est né le quatrième instrument scientifique de *Webb*, l'instrument canadien qui, initialement, n'était pas au programme!

C'est une performance absolument remarquable – impressionnante même – puisque vous êtes embarqué à bord du télescope *Webb* après tout le monde. C'est extraordinaire comme histoire, n'est-ce pas?

C'est en effet assez particulier. Nous sommes venus à un cheveu pour que l'instrument canadien ne vole jamais, alors que le système de guidage FGS a toujours fait partie de la mission.

Par ailleurs, une autre contribution au projet *James Webb* est le fait que le Canada fournit un historien. Il s'agit de Robert Smith, un historien des sciences qui suit le groupe scientifique afin un jour de raconter l'histoire de *Webb*. C'est ainsi que tout ce que je vous raconte-là va un jour être relaté dans ses moindres détails.

Que fera NIRISS?

La caméra NIRISS est-elle conçue uniquement pour observer l'atmosphère des exoplanètes ou fera-t-elle autre chose?

Oh, elle va faire beaucoup d'autres choses. Il y a à bord de *Webb* un instrument qui s'appelle NIRSpec (*Near-Infrared Spectrograph*) qui est spécialisé en spectroscopie, notamment pour faire la spectroscopie de plusieurs objets à la fois. Il s'agit d'un instrument extrêmement puissant qui peut observer une centaine d'objets à la fois.

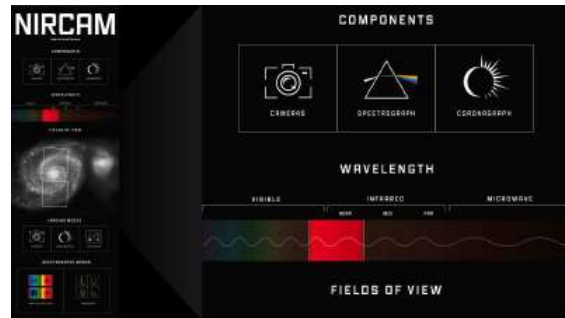
Mais avec NIRISS, nous offrons un autre mode d'observation spectroscopique complémentaire qui permet d'obtenir des spectres de tous les objets en même temps, mais avec moins de précision que l'instrument NIRSpec. Ainsi, l'un de nos importants programmes de recherche sera d'observer des amas de galaxies qui comprennent plus de 3000 galaxies dans une seule prise de vue de NIRISS. Ces amas de galaxies contiennent de la matière sombre qui dévie et amplifie la lumière de galaxies lointaines en arrière-plan. C'est ainsi, qu' en tirant profit de l'effet de [lentille gravitationnelle](#) de ces amas, on espère repérer des galaxies très lointaines.

Un autre mode d'observation important consistera à faire de l'imagerie. Ce mode d'observation pourrait nous fournir des images en extrême haute résolution angulaire; ce sera le seul instrument capable de faire ce genre d'observations.

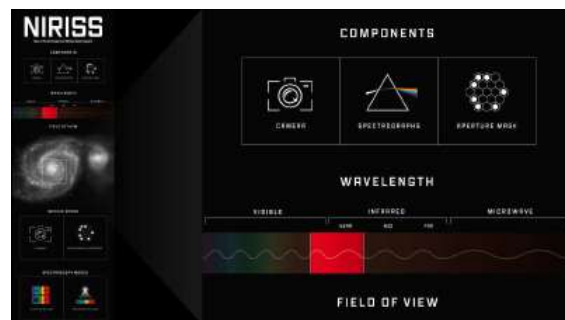
Vous êtes le chercheur principal du NIRISS. Que cela signifie-t-il? Vous allez disposer de quel pourcentage du temps pour utiliser votre propre instrument?

En échange de notre contribution au télescope *Webb* – qui équivaut à 180 mil-

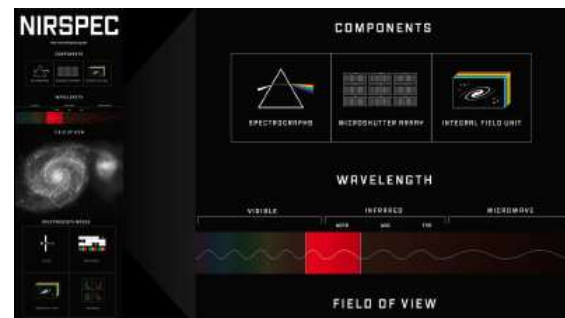
Caractéristiques des quatre instruments scientifiques de Webb



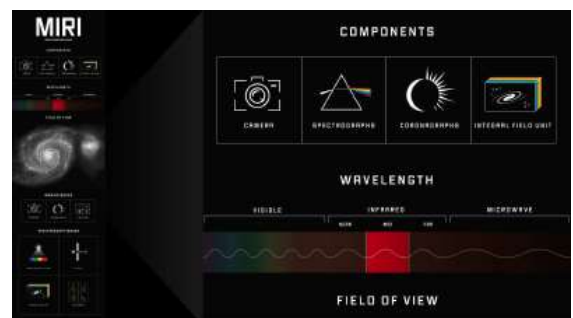
Tout sur [NIRCam](#) (en anglais).



Tout sur [NIRISS](#) (en anglais).



Tout sur [NIRSpec](#) (en anglais).



Tout sur [MIRI](#) (en anglais).

lions \$ – le Canada recevra 450 heures de temps garanti au cours des deux premières années d'utilisation du télescope. En plus, le Canada obtiendra 5% du temps de télescope octroyé à l'ensemble des astronomes du monde entier. D'ailleurs, le premier cycle de compétition est déjà passé et les chercheurs canadiens ont récolté environ 5%.

Nos 450 heures d'utilisation de NIRISS nous permettront d'observer ce que nous voulons. Près de la moitié de ce temps (200 heures) sera consacré à l'étude de l'atmosphère des exoplanètes. Ce programme sera dirigé par l'un de mes collègues de l'Université de Montréal: David Lafrenière.

Nous allons ainsi observer différents types d'exoplanètes, des plus grosses (Jupiter chaudes) jusqu'aux petites planètes terrestres qui sont potentiellement habitables. On considère ces dernières comme des planètes ou règnent potentiellement des conditions propices à la vie. C'est dire qu'on sera véritablement aux premières loges pour observer ces systèmes.

Vous avez de bonnes chances de faire des découvertes extraordinairement passionnantes?

Ce sera une année absolument folle.

Après le lancement et le déploiement du télescope *Webb*, il y aura une période de six mois de rodage et de tests afin de s'assurer que tout fonctionne bien. Il s'agira d'une période *très* intense! Les instruments scientifiques vont être mis en fonction vers le cinquième mois de cette période. J'y travaillerai presque à temps plein; je serai alors au Centre de contrôle du télescope à Baltimore durant plusieurs semaines – probablement en mai et en juin 2022. J'en suis déjà très excité!

Allez-vous assister au lancement?

[Note: à la suite de notre entretien d'août dernier, René Doyon a appris qu'il aura la chance d'assister au lancement du télescope depuis le Centre spatial guyanais, à Kourou, en Amérique du Sud.]

Et les dates de lancement qui changent constamment...

Je pense que ça va être décalé un peu par rapport au 31 octobre prévu actuellement, le lancement surviendra probablement en [décembre]. Mais on ne parle maintenant plus d'années de délais, mais de quelques semaines tout au plus... [De fait, le télescope a été lancé le 25 décembre 2021 et le P^r Doyon y était!]

5 – Des bijoux scientifiques québécois

En terminant, parlons brièvement du fait que Montréal recèle l'une des équipes importantes sur la scène internationale dans l'étude des exoplanètes. Nous possédons ainsi un joyau qui, me semble-t-il, est un peu ignoré des médias. J'aimerais que vous nous présentiez l'IREx, votre Institut de recherche sur les exoplanètes.

On a effectivement un groupe de recherche à l'Université de Montréal – et qui maintenant déborde largement de l'université pour englober l'Université McGill, l'Université Bishop ainsi que l'Université Laval.

Nous développons de nouveaux instruments spécialisés dans la détection et la caractérisation des exoplanètes. C'est dire que nous sommes très bien positionnés pour utiliser *Webb*.



L'[institut de recherche sur les exoplanètes](#) (iREx) de l'Université de Montréal.

On a aussi eu beaucoup de subventions pour développer d'autres instruments, dont des spectromètres qui permettront de mesurer la masse des exoplanètes, ce qui est très complémentaire avec ce que nous pourrons faire avec Webb.

Découvrir de la vie extraterrestre... grâce au Québec?

Il y a une dizaine d'années environ est venu l'idée de créer un institut afin de regrouper les chercheurs du domaine et de se procurer des ressources additionnelles.

Cette idée a été généreusement accueillie par la famille Trottier qui, en 2015, nous a appuyés dans la création de l'institut. À l'époque, nous étions une douzaine de personnes – chercheurs et étudiants – tandis qu'à présent, nous sommes soixante personnes.

Il s'agit du groupe de recherche le plus important du genre au Canada et parmi les plus importants à travers le monde. Nous n'avons vraiment rien à envier aux grandes équipes de Harvard ou du Caltech. Nous sommes dans le peloton de tête de l'étude des exoplanètes.

L'ultime but de cette recherche, c'est bien entendu de dénicher un jour de la vie ailleurs. Je suis convaincu que nous y parviendrons – mais ce sera peut-être au-delà de mon horizon professionnel. Mais un jour, on détectera de la vie ailleurs dans l'Univers et le Québec aura été l'un des acteurs importants de cette grande découverte fondamentale. En plus de notre mission de faire du Québec un pôle mondial de la recherche sur les exoplanètes, on travaille aussi activement à partager cette grande aventure scientifique avec le grand public.

Le Mont-Mégantic

N'oublions pas non plus l'Observatoire du Mont-Mégantic où les technologies infrarouges sont nées grâce à la petite caméra Monica. Ce n'est d'ailleurs pas un hasard si un Québécois est le directeur scientifique de ce programme au Canada; c'est parce que l'astronomie infrarouge est née au Québec, et plus particulièrement à l'Observatoire du Mont-Mégantic.

Je suis un enfant de l'observatoire et j'en suis maintenant le directeur. Et c'est pour cela que ma collègue Marcia Rieke s'est un jour tournée vers nous pour qu'on se joigne à son équipe; elle savait qu'au Québec se trouvait l'expertise canadienne dans le domaine de l'infrarouge.

Donc, si le Canada participe au télescope spatial James Webb, il faut dire un gros merci à l'Observatoire du Mont-Mégantic qui aura formé des chercheurs comme moi.

On connaît tous le Mont-Mégantic, mais ce qu'on sait moins, c'est qu'il s'agit d'un formidable laboratoire de développement d'expertise et d'instrumentation.



L'Observatoire du Mont-Mégantic, situé dans la région de Sherbrooke, au Québec.

Exactement. C'est un site d'observation, mais c'est aussi un laboratoire de développement instrumental qui alimente les grands télescopes de la planète, notamment le télescope spatial James Webb.

Ajoutons qu'on peut qualifier *Webb* de l'une des machines les plus complexes jamais construites par l'humanité. C'est le fruit d'un immense travail collectif.

Ainsi, le Canada y participe grâce à un travail d'équipe exceptionnel. Bien sûr, d'abord l'Agence spatiale canadienne qui a non seulement fourni les fonds nécessaires pour construire nos instruments, mais qui a également assuré la coordination, la gestion et la supervision technique du projet. Il y aussi l'industrie de haute

technologie du Canada, menée par Honeywell Aerospace, qui a construit l'instrument. Il y a bien sûr les universités et le Conseil national de recherche du Canada... En fait, tout ce que nous avons de bon au Canada a été mis en commun, ce qui a donné un travail d'équipe véritablement extraordinaire. Et tout cela va continuer, la partie ne fait que commencer!

Je dirais même que c'est la belle aventure qui ne fait que commencer. Souhaitons-nous bonne chance à tous, puisque ça va être palpitant de suivre la mise en place du télescope Webb et d'obtenir ses premières lumières, en principe au printemps de 2022.

* * *

Les Fascicules de *Voyage dans l'espace*



Note: les fascicules ci-dessus accompagnent les balados *Voyage dans l'espace* mais ce ne sont pas tous les balados qui sont accompagnés par un fascicule. Il «manque» donc des numéros.

Les Fascicules de *Voyage dans l'espace*

<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 26</p> <p>ALEXEI LEONOV</p>  <p>Le cosmonaute aux sept vies</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 27</p> <p>PARLOUS DE... CAPSULES SPATIALES</p>  <p>Pourquoi certaines sont revenues à l'aveugle (sans pilote) ?</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 28</p> <p>FRINGE, LA PARACHUTE RECHUËTE DE LA VOI... SUR MARS</p>  <p>Quand on se fait... au moment de la descente habitable</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 29</p> <p>LA GRANDE PEUR DE 1910</p>  <p>Quand le passé est garant de l'avenir</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 30</p> <p>PHOTONS D'EXPLORATION... LES ASTÉROÏDES</p>  <p>Et petits astères... qu'il nous surveillent tout le temps</p>
<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 31</p> <p>DES IDÉES PAS COMME LES AUTRES...</p>  <p>Quand on se rend... ailleurs que sur Terre... et se réalisent pas toujours !</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 32</p> <p>PRELUDES À APOLLO 11</p>  <p>La grande Fête de la course à la Lune</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 33</p> <p>APOLLO 11 DANS LES CORRIDORS DE L'HISTOIRE</p>  <p>Et qu'on n'a pas souvent raconté...</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 34</p> <p>NOTRE UNIVERS... BILAN, MYSTÈRES ET... (SPOILER ALERT!)</p>  <p>Si on se rend... à la frontière de nos connaissances... et même pas avec !</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 35</p> <p>NOTRE UNIVERS... BILAN, MYSTÈRES ET... (SPOILER ALERT!)</p>  <p>À la frontière de nos connaissances... et même pas avec !</p>
<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 36</p> <p>LES SURPRISES DE L'ÉTÉ 2019</p>  <p>Des surprises pour les amateurs de l'espace</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 37</p> <p>POURQUOI MARS...</p>  <p>... nous obsède-t-elle autant ?</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 38</p> <p>OU EN SERONS-NOUS EN 2040 ?</p>  <p>Comment envisage-t-on l'habitat des premières années du Qatar</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 39</p> <p>L'ASTRONOMIE PAR L'IMAGE</p>  <p>Avec un grand télescope spatial</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 40</p> <p>LA LUNE... CETTE INCONNUE</p>  <p>On croit tout savoir à son sujet... Mais non</p>
<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 41</p> <p>LA GRANDE EXPÉDITION DES VOYAGERS</p>  <p>1^{er} partie : le Grand Tour</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 42</p> <p>LA GRANDE EXPÉDITION DES VOYAGERS</p>  <p>2^e partie : destination Jupiter et Saturne</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 43</p> <p>LA VOIE LACTÉE... MYSTÈRE DE L'UNIVERS</p>  <p>Le plus grand système de notre univers... à découvrir</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 44</p> <p>ET SI ÇA C'ÉTAIT PASÉ AUTREMENT...</p>  <p>Pourquoi, le monde à l'envers n'existe-t-il pas ?</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 45</p> <p>ET SI ÇA C'ÉTAIT PASÉ AUTREMENT...</p>  <p>À la recherche d'un air de vie</p>
<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 46</p> <p>LES MEILLEURES PLANÈTES INCROYABLES</p>  <p>Une diversité à n'en plus finir...</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 47</p> <p>LA GRANDE EXPÉDITION DES VOYAGERS</p>  <p>3^e partie : aux confins du système solaire</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 48</p> <p>LES GALAXIES... AUX FRONTIÈRES DE LA COSMOLOGIE</p>  <p>Comment se fait-il... que nous existions ?</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 49</p> <p>LE SYSTÈME SOLAIRE... N'EST PLUS CE QU'IL ÉTAIT</p>  <p>Prochaine partie... Notre univers spatialement...</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 50</p> <p>LE MÉTIER D'ASTRONAUTE</p>  <p>Avec... partie de la mission... Claude Laffont Chapitre 1 Les multiples chemins vers l'espace</p>

Note: les fascicules ci-dessus accompagnent les balados *Voyage dans l'espace* mais ce ne sont pas tous les balados qui sont accompagnés par un fascicule. Il «manque» donc des numéros.

Les Fascicules de *Voyage dans l'espace*



Note: les fascicules ci-dessus accompagnent les balados *Voyage dans l'espace* mais ce ne sont pas tous les balados qui sont accompagnés par un fascicule. Il «manque» donc des numéros.