La moisson de lumière du **télescope spatial James Webb**

Olivier Berné (olivier.berne@gmail.com)
Institut de recherche en astrophysique et planétologie, 9 avenue du Colonel Roche, 31027 Toulouse.

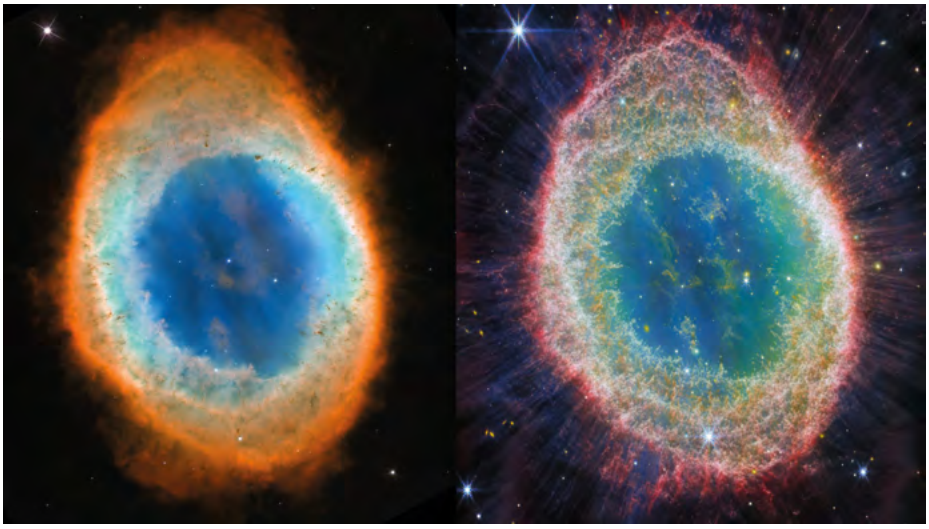
Avec son miroir de près de 7 mètres de diamètre optimisé pour l'infrarouge, le télescope *James Webb* (ou JWST) est le plus grand observatoire spatial jamais envoyé dans l'espace. Depuis son lancement fin 2021 il a fourni des données qui ont déjà permis des petites révolutions en astronomie. Pourquoi un télescope aussi grand, fonctionnant dans l'infrarouge nous permet-il d'en apprendre plus sur l'Univers ? Et qu'avons-nous appris, justement, grâce au JWST depuis qu'il a commencé à fonctionner il y a deux ans ? Retour sur son fonctionnement et sur certains de ses premiers résultats.

Un défi technique hors norme

La lumière est le messager privilégié des astronomes et un télescope n'est ni plus ni moins qu'un « entonnoir » à lumière. Il nous permet de collecter la lueur des astres les plus lointains, les photons, ces grains de lumière qu'ils émettent. Plus précisément, le miroir primaire du télescope est celui qui joue ce rôle de filet à photons, tandis que le miroir secondaire permet de réfléchir la moisson de lumière vers les instruments scientifiques (caméras ou spectromètres).

Plus le miroir primaire qui compose le télescope est grand, plus il pourra récupérer un nombre important de photons. C'est pour cette raison que les astronomes veulent toujours disposer des plus grands télescopes possibles : pour récolter plus de lumière et, ainsi, voir plus loin.

À cela il faut ajouter un autre avantage des grands télescopes. La finesse des détails qu'ils peuvent distinguer dépend d'un paramètre, la limite de diffraction, soit un angle qui vaut 1,22 x λ/D, où λ est la longueur d'onde de la lumière observée et D le diamètre du télescope. Pour un télescope de 1 mètre qui observe dans le visible à λ = 500 nm, on a donc $\delta = 6{,}1 \times 10^{-7}$ radian, soit $3{,}5 \times 10^{-5}$ degré, ou encore 0,12". C'est une précision (ou « résolution ») remarquable : cela correspond à la capacité à réaliser l'image d'un dé qui serait à 10 km, et, à titre de comparaison, la taille angulaire de Jupiter observée depuis la Terre est d'environ 30". Les plus grands télescopes sur Terre font désormais plus de 10 mètres, ce qui en principe devrait permettre d'observer avec une finesse de détail inférieure à 0,10". Malheureusement, ils font face à un autre problème : l'atmosphère de la Terre est turbulente et brouille les images qui viennent du cosmos. Dans les meilleures conditions atmosphériques, comme celles que l'on peut trouver les nuits de beau temps dans le désert d'Atacama au Chili, on arrive à limiter cet effet de la turbulence au mieux autour de 0,5". Il faut donc user de stratagèmes complexes et couteux pour corriger ces effets atmosphériques (en utilisant par exemple « l'optique adaptative »[(a)]). L'alternative est, bien sûr, de s'affranchir totalement de l'atmosphère en se positionnant dans l'espace, ce qui génère évidement d'autres contraintes. Construire un télescope avec un grand miroir comporte donc



© NASA, ESA et C. Robert O'Dell (Vanderbilt University)

© ESA/Webb, NASA, CSA, M. Barlow, N. Cox, R. Wesson

Image obtenue en lumière visible avec Hubble (à gauche) de la nébuleuse de la Lyre et image obtenue avec JWST (à droite) dans l'infrarouge avec l'instrument NIRCam. Cette nébuleuse est formée par une étoile en fin de vie qui éjecte de la matière et l'irradie d'un puissant rayonnement ultraviolet. Dans l'image JWST, de nombreux grumeaux ou structures de forme spongieuse sont révélés grâce à la lumière infrarouge qui permet de traverser la poussière présente dans la nébuleuse, qui absorbe le rayonnement visible (les grumeaux sont ainsi en noir dans l'image visible Hubble).

Article disponible sur le site https://www.refletsdelaphysique.fr ou https://doi.org/10.1051/refdp/20258209

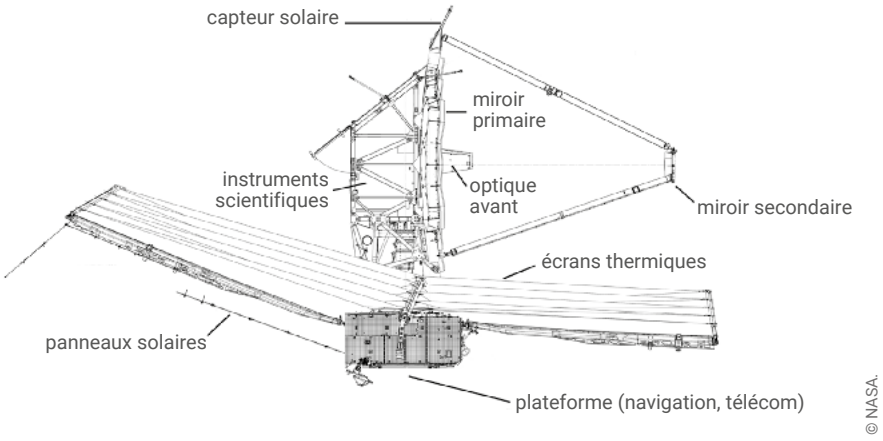
deux avantages pour l'astronomie : voir des objets peu lumineux, donc distants, et permettre de distinguer des détails infimes de ces objets, pour peu qu'on arrive à s'extraire des effets de l'atmosphère.

Le deuxième élément important pour comprendre l'intérêt d'un télescope comme James Webb est lié à une propriété fondamentale : la vitesse de la lumière est fixe et vaut c = 299 792 kilomètres par seconde. Cela signifie que le signal d'un astre situé à 299 792 kilomètres met précisément une seconde à nous parvenir. La lumière qui nous vient de la Lune, située à environ 380 000 kilomètres de la Terre, met un peu moins de 2 secondes à arriver sur Terre, celle du Soleil 8 minutes, etc. En astronomie, nous ne voyons pas les objets tels qu'ils sont, mais tels qu'ils étaient dans le passé. En regardant au loin, nous pouvons donc littéralement remonter dans le temps, ce qui est avantageux mais implique de nouvelles contraintes. En effet, en raison de l'expansion de l'Univers, les astres les plus lointains, c'est-à-dire les galaxies situées à des milliards d'années-lumière, s'éloignent de nous à des vitesses colossales, proches de celle de la lumière. Ainsi, en raison de cette dilatation de l'Univers, la longueur d'onde de leur signal lumineux est augmentée ; elle est décalée vers le rouge[(b)]. Pour les galaxies les plus lointaines, le signal est tellement affecté qu'il est transposé dans l'infrarouge. Impossible de l'observer par exemple avec le télescope spatial Hubble, qui n'observe que la lumière visible. Pour capter ce précieux signal, il faut donc un télescope qui observe la lumière infrarouge. Et il faut impérativement un télescope spatial car l'atmosphère de la Terre absorbe le rayonnement infrarouge (c'est d'ailleurs cela qui cause l'effet de serre).

En résumé, le seul moyen de remonter dans le passé de notre Univers pour y voir la lumière des étoiles provenant des galaxies les plus anciennes est de construire un grand télescope spatial qui observe dans l'infrarouge. C'est exactement cette idée qui a poussé les scientifiques, dans les années 1990, à concevoir le JWST (fig. 1), un télescope spatial géant optimisé pour les longueurs d'ondes allant de λ = 0,6 à 28 μm. La conception du JWST remonte en effet aux années 1990, car il a fallu des décennies pour développer cet instrument d'une complexité inégalée.

Premier défi, de taille : comment envoyer un grand télescope dans l'espace, alors même que la coiffe d'une fusée comme Ariane 5 ne mesure pas plus de 5 mètres de diamètre ? La solution est à la fois simple et complexe : il faut concevoir un télescope pliable. Simple à comprendre, mais complexe à mettre en œuvre ! En effet, on ne parle pas ici de tente de camping dépliable en 3 secondes, mais du miroir d'un télescope requérant précision d'alignement micrométrique et stabilité du dispositif sur plusieurs années, voire décennies, et le tout automatiquement dans l'espace. Mais ce défi a été relevé : le miroir primaire du JWST est composé de 18 miroirs hexagonaux, chacun mesurant près d'un mètre, qui, une fois assemblés en nid d'abeille, forment un miroir primaire de près de 7 m de diamètre et d'une surface de plus de 20 m^2. Au moment du lancement, l'ensemble a été replié afin de tenir dans la coiffe de la fusée Ariane 5. Après le lancement, une fois le satellite sur sa trajectoire orbitale, tout a été déplié. Une prouesse jamais réalisée dans le domaine spatial, qui s'est déroulée avec succès.

Second défi : quand on observe dans l'infrarouge, il faut se prémunir contre l'émission thermique du miroir. En vertu de la loi de Planck, un corps noir à environ 100 K émet avec un maximum d'émission de longueur d'onde situé près de 30 μm (soit, approximativement la longueur d'onde maximale du JWST). Il faut donc que le miroir reste le plus possible en dessous de cette température de 100 K. Pour ce faire, le télescope est protégé du rayonnement du Soleil par un dispositif d'écrans thermiques, qui sont en réalité des voiles en kapton (un polymère recouvert d'aluminium) de 21 m x 14 m. Grâce à ces voiles qui agissent comme un parasol, le télescope est conservé à l'ombre de la lumière du Soleil, et, en pratique, sa température descend même au-dessous de 50 K, ce qui permet de limiter grandement la contamination due à l'émission thermique du miroir primaire.



1. Schéma technique du télescope spatial *James Webb* vu de profil. Les dimensions du vaisseau complet sont : environ 22 m de longueur, 13 m de hauteur, 12 m de largeur. Le diamètre du miroir primaire est de 6,5 m et celui du secondaire d'environ 1 m. Le poids total de la mission est de 6 tonnes, ce qui reste néanmoins près de deux fois moins que celui du télescope spatial Hubble (11 t).

Des images spectaculaires

Après son lancement et son déploiement dans l'espace, le JWST a pu commencer à observer. Dès les premières images, obtenues au printemps 2022, les astronomes ont compris que les performances de l'instrument étaient extraordinaires et promettaient donc des résultats inattendus [1]. Particulièrement frappant dans ces nouvelles images est la quantité de détails que l'on peut y observer, et la

capacité du JWST à pénétrer plus profondément dans les objets grâce à la lumière infrarouge. Cela est visible par exemple dans l'image de la nébuleuse de la Lyre (voir page 9), où de nombreux détails apparaissent lorsque l'on compare avec l'image d'Hubble. Ces détails dans les images ne sont pas seulement esthétiques ; ils permettent de mieux comprendre la structure physique des objets astrophysiques qui sont observés, que ce soit pour des astres proches de nous (dans le système solaire ou dans notre galaxie) ou loin de nous (les galaxies).

Il est important de rappeler que ces images ne sont pas en lumière naturelle. En effet, le JWST observe dans l'infrarouge, à des longueurs d'ondes que notre œil est incapable de détecter. Ces images sont donc colorisées grâce à un code couleur (fig. 2) que notre œil peut voir. Il s'agit d'une simple traduction (comme si on passait de l'anglais au français), plutôt que de « fausses couleurs » comme on peut souvent l'entendre.

>>>

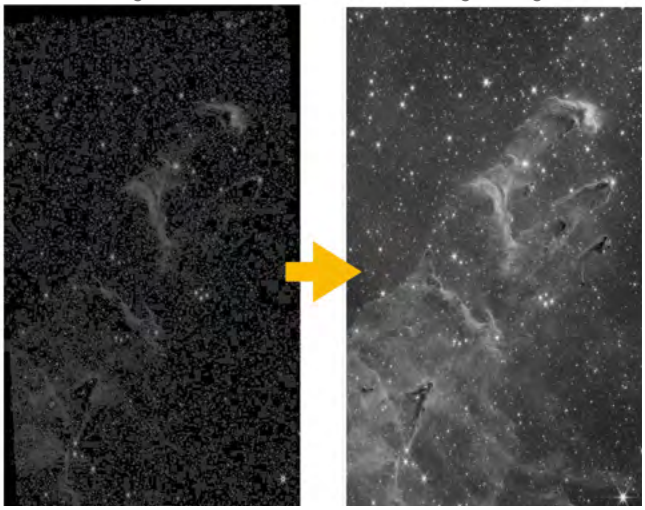
Image finale

© NASA/ESA/STscI/O. Berné

Correction des images brutes

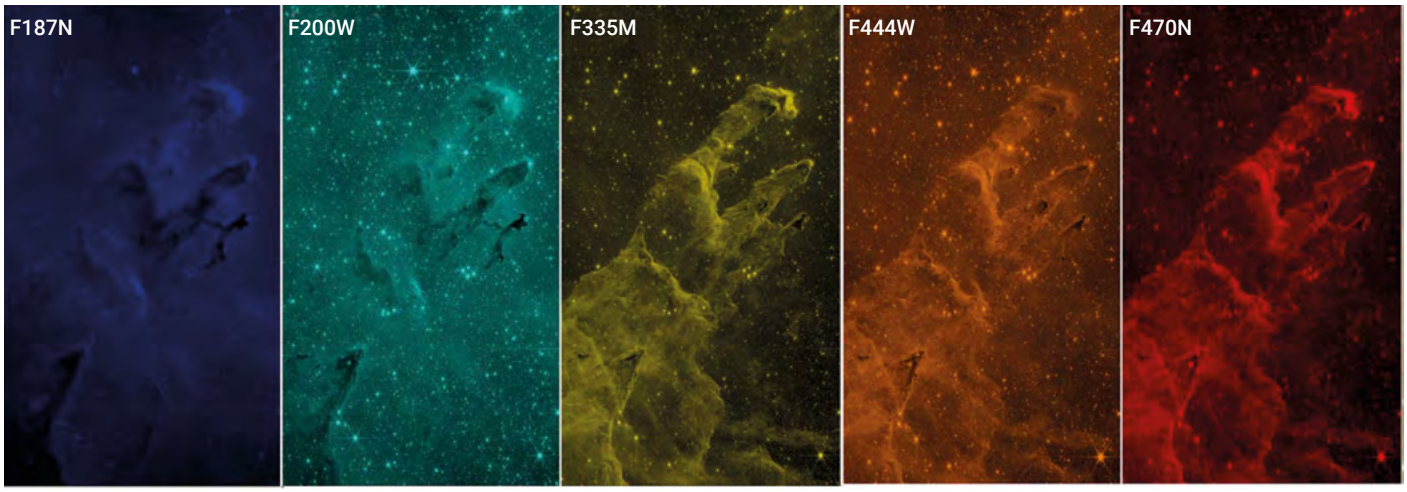
Image brute

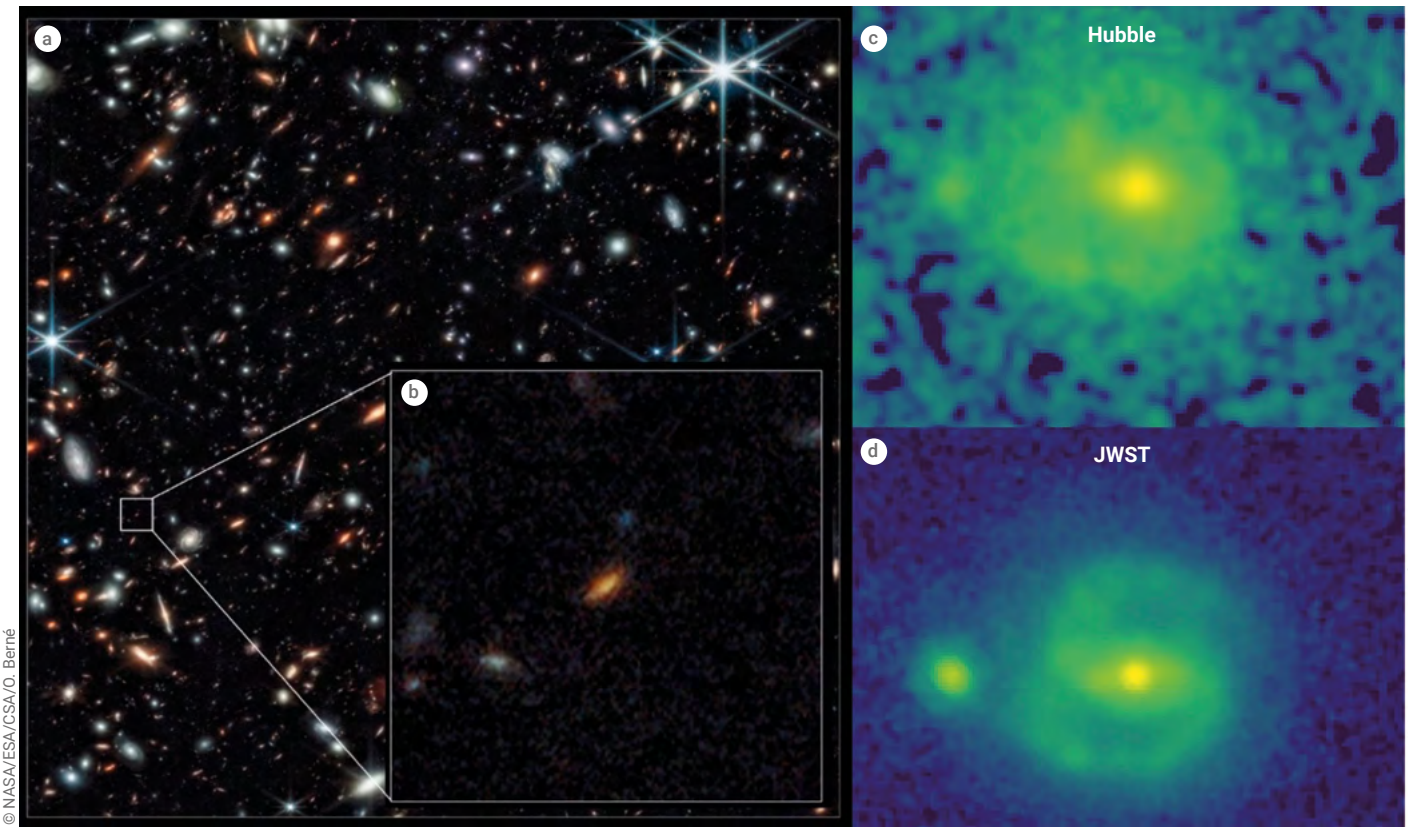
Image corrigée



2. L'image finale (en haut) est obtenue par la procédure suivante.
Les images obtenues avec différents filtres de couleur infrarouge (au milieu) sont corrigées pour supprimer le bruit de fond instrumental (c'est-à-dire la contamination par des signaux parasites).
Chacune des images corrigées est colorisée (en bas). Par exemple, le filtre F187N, correspondant à une longueur d'onde de 1,87 microns de longueur d'onde, est en bleu ; le filtre F200W, correspondant à une longueur d'onde de 2,00 microns, en vert ; etc. La somme de ces images fournit l'image finale.

Colorisation des images corrigées





© NASA/ESA/CSA/O. Berné
© NASA/Guo, Jogee, Finkelstein
© CEERS collaboration/University of Texas at Austin

3. Observations de galaxies avec le JWST. (a) Image de l'amas de galaxies Abell 2744 obtenue avec NIRCam. Le zoom en (b) montre une galaxie d'arrière-plan située à plus de 13 milliards d'années dans le passé. En (c) image Hubble de la galaxie EGS23205, située 11 milliards d'années dans le passé, et la même galaxie avec JWST en d). L'amélioration de la qualité de l'image avec JWST est évidente.

1• K. M. Pontoppidan, J. Barrientes, C. Blome, H. Braun, M. Brown, M. Carruthers… & A. Nota, "The JWST early release observations", *The Astrophysical Journal Letters* **936**(1) (2022) L14.

2• A. Adamo, H. Atek, M. B. Bagley, E. Bañados, K. S. Barrow, D. A. Berg… & A. Nota, "The First Billion Years, According to JWST", *arXiv preprint arXiv:2405.21054* (2024).

3• A. G. Riess, G. S. Anand, W. Yuan, S. Casertano, A. Dolphin, L. M. Macri… & R. I. Anderson, "Crowded no more: the accuracy of the Hubble constant tested with high-resolution observations of Cepheids by JWST", *The Astrophysical Journal Letters* **956**(1) (2023) L18.

4• O. Berné, M. A. Martin-Drumel, I. Schroetter, J. R. Goicoechea, U. Jacovella, B. Gans… & M. G. Wolfire, "Formation of the methyl cation by photochemistry in a protoplanetary disk", *Nature* ***621*** (2023) 56.

5• M. Zannese, B. Tabone, E. Habart, J. R. Goicoechea, A. Zanchet, E. F. van Dishoeck… & M. G. Wolfire, "OH as a probe of the warm-water cycle in planet-forming disks", *Nature Astronomy* **8** (2024) 577.

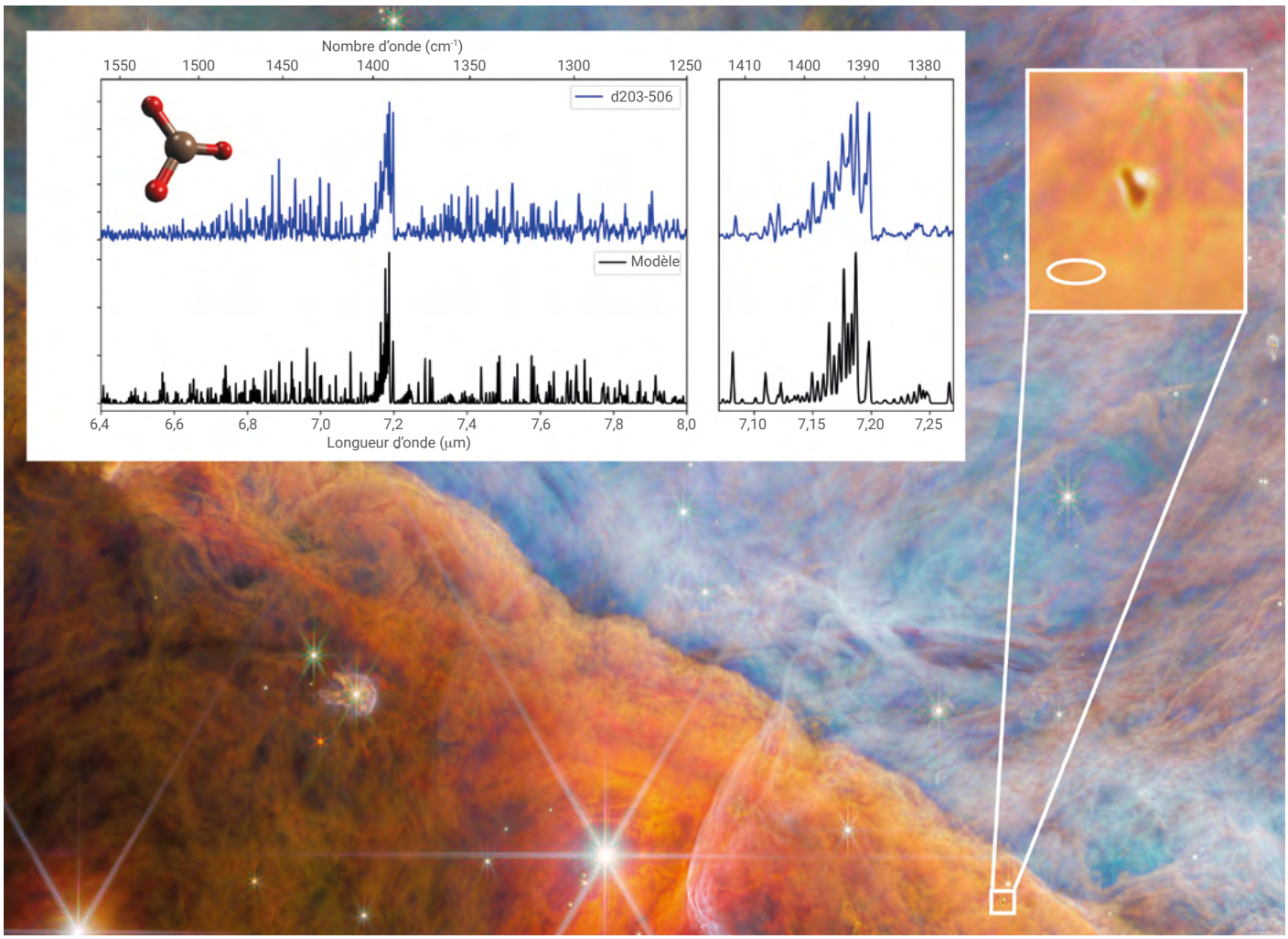
6• JWST Transiting Exoplanet Community Early Release Science Team, "Identification of carbon dioxide in an exoplanet atmosphere" *Nature* **614** (2023) 649.

7• N. Madhusudhan, S. Sarkar, S. Constantinou, M. Holmberg, A. Piette & J. I. Moses, "Carbon-bearing molecules in a possible Hycean atmosphere", *The Astrophysical Journal Letters* **956**(1) (2023) L13.

>>>

Des premiers résultats à la hauteur des attentes

Grâce au JWST, nous avons pu dès 2022 détecter les galaxies les plus lointaines jamais observées. Elles se situent seulement quelques centaines de millions d'années après le Big-Bang, soit plus de 13 milliards d'années dans le passé (voir figures 3a et 3b). Ces observations ont révélé des surprises : il semblerait que les toutes premières galaxies qui peuplaient l'Univers jeune soient bien plus brillantes et plus massives que ce que nous imaginions. Ces galaxies semblent évoluer très rapidement vers des structures de galaxies spirales comme la nôtre (voir figures 3c et 3d). Pour le moment, les astronomes n'arrivent pas à expliquer comment l'Univers est capable de former ces galaxies aussi rapidement. Faut-il remettre en question les modèles standard de la cosmologie ? Pour le moment, cela n'est pas encore d'actualité [2]. Pourtant, une autre observation du JWST,



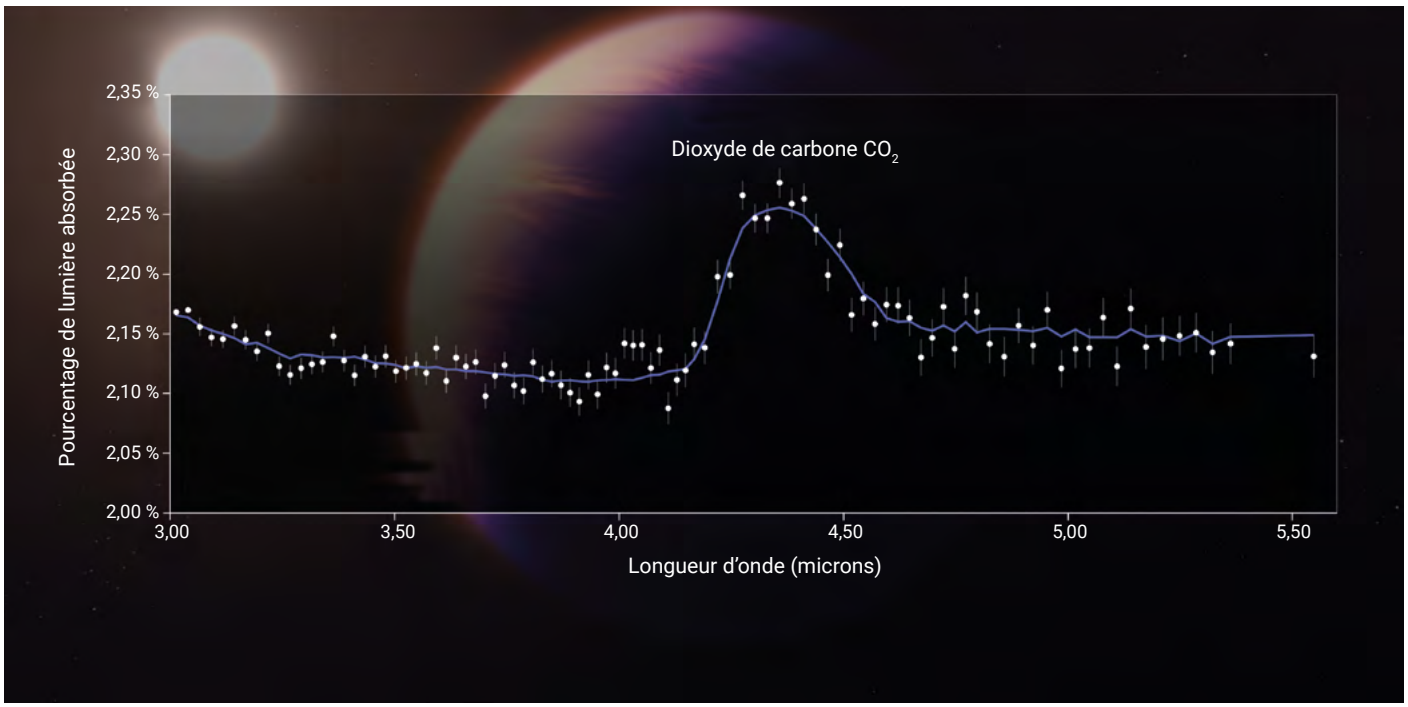
4. Image de la nébuleuse d'Orion obtenue avec l'instrument NIRCam. Le zoom montre le système planétaire en formation d203-506. Dans ce zoom, l'ellipse montre la taille du système solaire pour comparaison[f]. Le diagramme en haut à gauche de la figure montre le spectre obtenu avec MIRI de d203-506, en bleu. En noir, un modèle théorique réalisé grâce à des calculs de chimie quantique et des mesures en laboratoire du méthylium de formule chimique CH_3^+, montrant une bonne adéquation avec le spectre observé. La structure de la molécule est également représentée.

cette fois dans l'Univers local, est venue confirmer ce que nous soupçonnions depuis déjà un moment : le taux d'expansion actuel de l'Univers, tel que mesuré grâce aux Céphéides[c] et aux supernovas[d] avec JWST, est incompatible avec celui qui est déterminé grâce aux mesures d'autres missions qui observent le rayonnement fossile du Big-Bang [3]. Cette tension, dite « de Hubble », est un grand mystère. Problème de mesure ? Ou, plus grave : le modèle standard de la cosmologie fondé sur la matière noire serait-il erroné ? Pour le moment, toutes les hypothèses sont sur la table. Il faudra encore des années de travail à la communauté scientifique pour comprendre. C'est aussi un point important à souligner : nous n'en sommes qu'au tout début des résultats de cette mission. D'une part, car le travail scientifique prend du temps, et d'autre part, car il est désormais probable que la mission dure au total plus de 20 ans.

Mais le JWST ne sert pas seulement à comprendre l'évolution de l'Univers dans son ensemble et à grande échelle. Il peut aussi servir à observer des astres beaucoup plus proches de nous. D'ailleurs, ses capacités à scruter dans l'infrarouge, qui ont avant tout été imaginées pour observer les galaxies, se révèlent également particulièrement utiles pour un tout autre objectif : sonder ce qui se passe à l'intérieur des cocons où naissent les étoiles et les planètes. Là aussi nous avons eu des surprises. Dans le cadre d'un programme international d'observation que nous avons mené[e], nous avons pu détecter grâce au JWST un mystérieux signal en provenance d'un système planétaire en formation, du nom de d203-506, dans la nébuleuse d'Orion (fig. 4). Nous l'avons mesuré grâce à l'un des spectromètres, MIRI, qui permet de décomposer la lumière en fonction de la longueur d'onde.

Après un travail d'analyse détaillé, il s'est avéré qu'il s'agit de l'émission infrarouge d'une molécule (le cation méthyle ou méthylium) qui était recherchée par les astronomes depuis plus de 40 ans [4]. Or, cette molécule est cruciale pour la chimie dans l'espace, et en particulier pour la chimie organique, c'est-à-dire celle qui est fondée sur le carbone (celle qui sert de support à la vie). Autre découverte en lien avec cette détection : il semblerait que ce soit les

>>>



5. Spectre de l'exoplanète WASP-39b obtenu avec l'instrument NIRSpec sur le JWST montrant la détection de la molécule de dioxyde de carbone.

photons ultraviolet d'étoiles massives voisines qui, par leur rayonnement, activent cette chimie organique. Contrairement à ce que l'on pourrait penser (le rayonnement UV est connu pour ses effets destructeurs d'un point de vue chimique), ce rayonnement peut donc, dans certains cas comme ici dans Orion, constituer une source d'énergie qui active la chimie. En revanche, d'après les travaux réalisés avec les observations JWST de d203-506 par Marion Zannese, de l'Institut d'astrophysique spatiale, ce même UV semble détruire activement les molécules d'eau qui sont habituellement présentes dans ces embryons de système planétaire [5]. Dans les conditions qui ont prévalu au moment où le système solaire s'est formé, où il y avait probablement beaucoup d'UV, il est fort possible que les mécanismes que nous observons dans Orion aient joué un rôle ; mais avec quelles conséquences ? Pour le moment nous ne le savons pas. Les observations complémentaires avec d'autres télescopes, comme le radiotélescope NOEMA sur le plateau de Bure dans les Alpes, pourront peut-être nous aider à répondre à cette nouvelle question.

L'autre grand sujet sur lequel le JWST était attendu concerne les planètes extrasolaires[(g)]. En seulement quelques mois d'observations, le JWST a déjà permis des avancées majeures sur la composition et les conditions atmosphériques de ces planètes lointaines. Le JWST ne permet pas de faire d'images détaillées de ces planètes. Là aussi, l'outil privilégié pour leur étude est la spectroscopie. Les spectres obtenus permettent d'obtenir de nombreuses informations inédites. Par exemple, grâce au travaux réalisés avec le JWST [6], on sait désormais que certaines de ces planètes contiennent du dioxyde de carbone (fig. 5), un gaz qui est aussi présent en quantités importantes dans l'atmosphère de la Terre. C'était un résultat attendu, qui démontre la facilité avec laquelle on peut, grâce au JWST, sonder l'atmosphère des planètes autour d'autres étoiles que le Soleil. Le Graal, ce serait d'identifier dans ces spectres des signatures chimiques qui indiquent qu'une activité biologique est à l'œuvre dans l'atmosphère de ces planètes. Une équipe a récemment indiqué avoir détecté grâce à JWST la molécule de sulfate de diméthyle dans l'atmosphère d'une planète extrasolaire [7]. Sur Terre, cette molécule est produite par l'activité biologique. Cependant cette détection est contestée par plusieurs scientifiques. Et ce n'est pas parce qu'une molécule est produite par activité biologique sur Terre que, si nous la voyons ailleurs, elle y est créée par ce même processus. De la vie ailleurs détectable avec James Webb ? Nous en sommes encore très loin, mais le fait que cette question soit posée montre le chemin parcouru, et promet des débats scientifiques passionnants dans les années qui viennent. ▮

(a) L'optique adaptative permet de corriger les distorsions causées par la turbulence atmosphérique. Elle implique l'utilisation de capteurs et d'éléments déformables pour ajuster en temps réel les propriétés optiques des systèmes, améliorant ainsi la qualité des images.

(b) Ce décalage, noté z, est appelé *redshift* en anglais.

(c) Les Céphéides sont des étoiles qui ont la propriété de pulser à un rythme qui est proportionnel à leur luminosité, et, de ce fait, elles sont particulièrement utiles pour effectuer des mesures de distances. Couplées à la mesure de la vitesse relative par effet Doppler-Fizeau, elles permettent donc de mesurer un taux d'expansion.

(d) Les supernovas sont des « explosions » d'étoiles massives. Leur luminosité permet de mesurer des distances avec précision en astronomie.

(e) Il s'agit du programme *Early Release Science* "PDRs4All", pour lequel Olivier Berné du CNRS et Émilie Habart de l'Université Paris Saclay sont *Principal Investigators* (responsables scientifiques)

(f) Ici, l'orbite de Neptune a été choisie, soit un diamètre d'environ 60 unités astronomiques (UA). Une UA correspond à 149 millions de km.

(g) C'est-à-dire les planètes qui gravitent autour d'étoiles autres que le Soleil, aussi appelées exoplanètes.