

# Préambule

Quand je suis arrivé au centre d'astrobiologie de Madrid en 2009, juste après avoir achevé ma thèse de doctorat, mon travail devait consister à analyser les données d'un programme d'observation de la nébuleuse d'Orion réalisé un an plus tôt avec le radiotélescope de 30 mètres du Pico Veleta, situé non loin de Grenade, en Andalousie. Jusqu'à présent, je n'avais jamais étudié Orion. Un de mes collègues espagnols, en apprenant cela, eut ces mots résonnant comme une mise en garde : « *Orion is a bitch* », qu'on pourrait traduire par « Orion est une garce ». Il n'est pas nécessaire de filer la métaphore – passablement sexiste – pour comprendre ce que voulait dire ce collègue : Orion est une région complexe et difficile à comprendre. C'est la zone de formation d'étoiles contenant des étoiles massives<sup>1</sup> la plus proche de nous, et de nombreux astrophysiciens considèrent qu'elle est représentative de l'environnement dans lequel s'est formé notre Système solaire.

Sur le plan physique, une nébuleuse est une zone de l'espace interstellaire dans laquelle on trouve d'importantes quantités de gaz. Sous l'effet de la gravitation, le gaz peut s'effondrer sur lui-même et former de nouvelles étoiles. Ces étoiles illuminent le nuage qui les entoure, ce qui

créé ces images fabuleuses dans lesquelles on peut voir de majestueuses étendues multicolores aux formes oniriques.

Dans ces nébuleuses, les étoiles ont généralement 10 000 ou 100 000 ans, les plus vieilles quelques millions d'années. Cela peut paraître beaucoup, mais ce n'est rien en comparaison de l'âge du Soleil et de la Terre : plus de 4,5 milliards d'années. Dans la nébuleuse d'Orion, il est possible d'observer ces très jeunes étoiles, mais aussi les planètes qui se forment autour d'elles. Autrement dit, dans Orion, on peut assister à la naissance de systèmes planétaires...

En pratique, il n'est pas réellement possible d'obtenir des clichés ou de filmer en direct la formation de planètes. Non, pour reconstituer l'histoire de la formation des étoiles et des planètes, il faut mener l'enquête, recoller les morceaux, reconstruire un puzzle en mobilisant tous les outils de l'astrophysicien : mathématiques, physique, optique, informatique, etc. C'est un travail long et fastidieux. C'est une forme de quête, une expédition, guidée par l'espoir de faire une découverte majeure et inattendue, comme un explorateur qui parcourt l'Amazonie pendant des dizaines d'années et découvre enfin une nouvelle espèce inconnue ou les vestiges d'une civilisation disparue.

Orion est une jungle, dense et impénétrable, où l'obscurité naît des voiles de poussières cosmiques qui éteignent la lumière des étoiles. Depuis 2009, je parcours cette jungle, accompagné de collègues croisés en chemin ou qui m'ont rejoint, et, au fil de nos expéditions, nous avons été plutôt chanceux.

Le travail conduit avec mes collègues espagnols a mené à la découverte de vagues cosmiques dans Orion. De la même manière que le vent soufflant à la surface de l'eau

créée des ondulations, nous avons montré que les vents des étoiles jeunes dans Orion créent des vagues à la surface de nuages de gaz subsistant non loin de ces étoiles. Plus tard, lors d'un séjour au Japon, j'ai travaillé avec des spécialistes de la physique théorique et nous avons montré que le déferlement de ces vagues peut produire de la turbulence, c'est-à-dire des mouvements tourbillonnants de gaz, qui empêchent la formation de nouvelles étoiles. Des étoiles se forment, et, par les vents qu'elles occasionnent, empêchent que d'autres ne se forment à leur tour... une sorte de jalousie stellaire.

Quelques années plus tard, une fois de retour en France et après avoir obtenu mon poste de chercheur au CNRS, j'ai été invité à participer à une grande campagne d'observation d'Orion visant à cartographier la nébuleuse avec une précision inégalée. Nous voulions en particulier mesurer l'énergie cinétique du gaz, c'est-à-dire l'énergie liée à ses mouvements. Il s'agissait en quelque sorte de déterminer l'énergie contenue dans les vagues créées par les vents des étoiles massives. Nous avons montré qu'elle est considérable, bien plus importante que ce qui avait été prédit par les modèles, et comparable à celle libérée par une supernova : une explosion d'étoile, c'est-à-dire l'événement le plus violent qui existe dans les galaxies.

Enfin, j'ai enquêté sur les systèmes planétaires en formation présents dans Orion. Ce fut un travail extrêmement difficile, car les observations dont nous disposions à l'époque contenaient très peu de détails, mais nous avons pu, pour la première fois, mesurer la densité et la température des disques protoplanétaires, les petits anneaux de

gaz et de poussières que l'on observe autour des jeunes étoiles d'Orion et à partir desquels se forment les planètes.

Pendant près de dix ans, j'ai donc travaillé sur Orion. J'ai appris à la connaître, je l'ai apprivoisée, je l'ai cartographiée de mille manières, j'ai exploré cette *terra incognita* avec différents navires, et découvert ses nombreuses richesses. Mais malgré cela, elle continuait de garder jalousement nombre de mystères... Après toutes ces expéditions, j'ai décidé d'y retourner. Mais cette fois, à bord du plus grand navire astrophysique de l'Histoire : le télescope *James-Webb*. Destination : Orion.

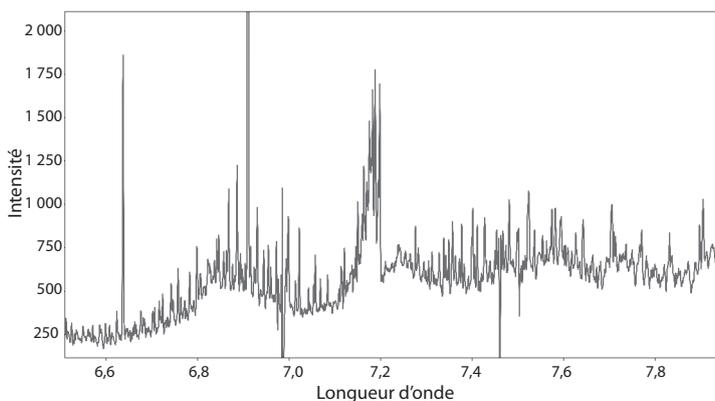
# 1

## UN MYSTÉRIEUX SIGNAL EXTRATERRESTRE D'ORIGINE INCONNUE

Cette nuit du 31 janvier 2023, le télescope s'est tourné vers Orion, et a capté un signal. Une lumière provenant des tréfonds de la nébuleuse, de cette « cité » que nous découvrons tout juste, blottie au cœur de l'immense jungle de gaz et poussières. Là se forme une étoile, « d203-506 », peut-être même des planètes autour. Le signal est étrange (voir schéma ci-contre) : ses oscillations sont censées révéler la composition du cocon qui entoure la jeune étoile... mais prennent une forme inconnue. Cela ne semble pas être du bruit de fond<sup>2</sup>. Une molécule<sup>3</sup> ? Peut-être, mais laquelle ? Je n'en ai aucune idée...

Un « mystérieux signal extraterrestre d'origine inconnue ! », nous exclamons-nous au sein de l'équipe. Au sens strict, cette dénomination est exacte, et nous nous amusons à imaginer ce que ferait la presse si nous sortions

l'information avec ce titre. L'enquête est lancée : nous convoquons des experts, tous les experts, spécialistes de physique quantique ou d'astrophysique galactique. Cela pourrait-il être de l'eau ? Hypothèse vite écartée. De l'ammoniac, du méthanol, de l'acétylène, du benzène ? Toujours pas. Serait-il possible qu'il s'agisse d'une molécule absente des bases de données ? Une molécule jamais observée dans l'espace jusque-là ? Ce serait alors une découverte importante...



Spectre de l'étoile jeune d203-506 obtenu avec le télescope spatial *James-Webb*, le 31 janvier 2023.

## 2

# À LA RECHERCHE DES PREMIÈRES GALAXIES

*Janvier 2014*

Retour neuf ans en arrière, à la genèse de cette histoire. Après trois ans passés à l'étranger, je suis de retour à Toulouse en tant que chercheur au CNRS depuis deux ans. Une mission spatiale en préparation occupe les esprits des astronomes du monde entier, celle du télescope spatial *James-Webb* ou *JWST*, qui doit être lancé en 2018 par une fusée *Ariane 5*. *JWST* est tout simplement le plus grand observatoire jamais envoyé dans l'espace, et promet de révolutionner l'astronomie dans de nombreux domaines.

Pourquoi ? Pour le comprendre, il est nécessaire de revenir sur deux propriétés fondamentales du messager privilégié des astronomes : la lumière.

La première propriété de la lumière est tout simplement sa vitesse. Dans le vide, elle est fixe et vaut

$c = 299\,792$  kilomètres par seconde. Cette donnée paraît purement factuelle, mais elle a des conséquences vertigineuses : cela signifie que le signal d'un astre situé à  $299\,792$  kilomètres met une seconde à nous parvenir. Que la lumière qui nous vient de la Lune, située à environ  $380\,000$  kilomètres de la Terre, met un peu moins de deux secondes à arriver sur Terre. Que celle du Soleil arrive approximativement huit minutes après avoir été émise. Oui, si le Soleil s'éteignait soudainement, nous ne nous en rendrions compte que huit minutes plus tard... Il faut se faire à cette mécanique : en astronomie, nous ne voyons pas les objets tels qu'ils sont, mais tels qu'ils étaient dans le passé. Et plus ils sont loin, plus nous remontons dans le temps. Une aubaine en un sens : cela nous permet de remonter des milliards d'années en arrière, pour observer ce qui s'est passé, jusqu'au tout début de l'Univers... En théorie, rien ne nous empêche de remonter quasiment jusqu'au Big Bang, tant que de la lumière est émise<sup>4</sup> ! Si ce n'est que la lumière de ces astres s'atténue avec la distance. Les premiers astres de l'Univers sont si loin que le signal lumineux qui nous parvient est très faible. Nous pouvons les détecter, mais un télescope de très grand diamètre est nécessaire... Des télescopes géants existent sur Terre, comme ceux du Very Large Telescope au Chili, qui font  $8$  mètres de diamètre. Mais ils sont incapables de détecter ces galaxies en raison d'une autre propriété de la lumière...

Cette deuxième propriété fondamentale de la lumière – peut-être moins vertigineuse, mais tout aussi importante pour les astronomes – est que, à l'image du son, elle peut être décrite comme une onde, une vibration : le son correspond à la vibration d'un milieu, par exemple

l'air – on parle alors d'onde acoustique –, tandis que la lumière correspond à la vibration d'un champ électromagnétique. Cette vibration peut être à haute ou basse fréquence, c'est-à-dire aiguë ou grave quand on parle du son. Les ondes lumineuses radio (celles du WIFI ou des téléphones portables) effectuent des millions de vibrations par seconde, et les ondes de la lumière que nous percevons avec nos yeux plusieurs dizaines de milliers de milliards de vibrations par seconde. Ainsi, le rouge correspond à une fréquence de 43 000 milliards de vibrations par seconde, tandis que le bleu correspond à 75 000 milliards de vibrations par seconde. Et les ondes infrarouges à quelques milliers de milliards d'oscillations par seconde... Les astronomes tentent de capter chacune de ces fréquences, chacune de ces couleurs de lumière émises par les astres, pour en déduire le plus d'informations possibles sur leur nature et leur comportement.

Sauf qu'un phénomène perturbateur s'invite dans cette affaire : l'Univers est en expansion. Tous les objets qu'il contient s'éloignent à chaque instant les uns des autres. Cela ne se voit pas à « petite » échelle, pour des étoiles seules ou des groupes d'étoiles. Mais lorsque l'on regarde les galaxies, ou bien les amas de galaxies séparés de plusieurs millions voire milliards d'années-lumière de distance, l'expansion prédomine. Or ceci a une conséquence directe sur la lumière émise par ces galaxies, puisque ce mouvement modifie sa vibration : c'est l'effet Doppler-Fizeau. La lumière venant des galaxies lointaines, qui s'éloignent de nous à grande vitesse, est plus « grave », sa fréquence est ralentie... et sa couleur tire donc vers le rouge – les astronomes parlent du « rougissement » (*redshift* en anglais) des galaxies. Cela veut dire que les galaxies les plus lointaines de l'Univers sont les plus

rougies. Or ces galaxies les plus lointaines, celles qui se situent quelques centaines de milliers ou millions d'années après le Big Bang, intéressent particulièrement les astronomes, pour la simple raison que nous n'avons aucune idée de ce qui s'y passe. C'est là que se sont formées les premières étoiles, les premiers trous noirs, bref, il s'agit de la petite enfance de l'Univers : si l'univers était un adulte de 40 ans, alors cette époque correspondrait à peu près au premier mois suivant sa naissance. Et aujourd'hui nous n'en connaissons rien, ou si peu ! En fait, ces galaxies sont tellement rougies par l'expansion de l'Univers que leur lumière nous arrive dans l'infrarouge, ce qui est impossible à détecter, par exemple, pour le télescope *Hubble* qui n'observe que dans le domaine du visible. Pour distinguer ces galaxies primordiales, un télescope observant dans l'infrarouge est nécessaire... Il faut donc impérativement un télescope spatial, car l'atmosphère de la Terre a cette particularité d'absorber le rayonnement infrarouge – c'est d'ailleurs ce qui est responsable de l'effet de serre.

En résumé, il n'y a qu'une seule solution pour sonder la petite enfance de l'Univers : construire un très grand télescope observant dans l'infrarouge, et l'envoyer dans l'espace. Voici ce qui a mené les astronomes à cette idée folle de créer le *JWST*.

# 3

## CONSTRUIRE UNE ÉQUIPE

*25 mai 2016*

« Pourquoi un instrument construit pour étudier les galaxies peut-il présenter un intérêt pour nous ? » C'est la question que nous posons aujourd'hui, ma collègue Émilie Habart et moi-même, à quelques spécialistes français de l'étude des nébuleuses, à l'occasion d'une réunion à l'Institut d'Astrophysique Spatiale (IAS) d'Orsay. En cette chaude journée de mai, nous avons rassemblé autour de nous une petite équipe, car bien sûr, nous rêvons de faire partie de ceux qui utiliseront le *JWST* en premier. Les discussions s'enchaînent toute la journée, y compris à la cantine, où nous croisons d'autres collègues curieux. Pour certains d'entre eux, le *JWST* n'est qu'une chimère : cela fait des années que la mission doit être lancée, mais les retards ne cessent de s'accumuler, à tel point que nombre d'astronomes n'y croient plus. Ce n'est pas notre cas. À la fin de la journée, nous arrivons à la conclusion que le *JWST*, une fois en vol, disposera d'une capacité cruciale

que nous pouvons mettre à profit : observer dans l'infrarouge. En effet, les nébuleuses qui nous intéressent, là où se forment les étoiles et les planètes, sont constituées de gaz, ainsi que de poussières microscopiques qui absorbent le rayonnement visible. Mais dans l'infrarouge, elles deviennent transparentes (voir le chapitre « Observer Orion », p. 83). Avec le *JWST*, il devrait être possible de pénétrer à l'intérieur de ces nébuleuses pour les étudier. Confiants, nous décidons d'organiser un projet d'observation. L'étape suivante consiste, comme souvent dans la recherche, à rédiger un premier document officiel de demande de financement au CNRS pour soutenir ces efforts. Voici quelques extraits de celui que nous soumettons au CNRS à l'issue de cette réunion :

« L'objectif de la présente demande est de préparer une demande d'observation [...] avec *JWST* de grande ampleur [...] rassemblant les membres de la communauté française spécialistes du sujet. Le projet se déroulera en trois étapes : 1) Un noyau d'experts des observations composé de moins de 10 personnes (dont un expert américain *JWST*) identifiera les observations qui sont possibles. 2) Une proposition de projet d'observation sera réalisée et présentée [à la communauté scientifique française] en 2016, en vue d'élargir la participation au niveau national. Une ouverture au niveau international sera également prévue via les réseaux de collaborateurs. 3) Un programme d'observation sera préparé et soumis à la NASA [...]. »

Fin 2016, nous apprenons que cette demande de soutien par le CNRS est acceptée. Simultanément, une

deuxième bonne nouvelle nous parvient, sous la forme d'une petite révolution dans le monde de l'astronomie : le conseil scientifique de la mission James-Webb, présidé par le prix Nobel de physique John Mather, a décidé d'offrir la possibilité à des équipes du monde entier de faire des propositions d'observation, dans le but de démontrer les capacités scientifiques du *JWST* dans les toutes premières semaines de la mission. Ces programmes portent un nom : « *Early Release Science* » ou ERS. Ils disposeront au total de 500 heures d'observations, réparties entre une dizaine d'équipes. Autre spécificité de ces ERS : les données de ces programmes seront rendues immédiatement publiques. Du jamais vu en astronomie spatiale ! En général, les premiers mois ou années d'une mission comme Webb sont chasse gardée : seuls les scientifiques qui ont construit les instruments peuvent faire les premières observations, et surtout, ils ont le droit de conserver les données privées pendant une certaine durée, généralement un an – c'est ce qu'on appelle le « temps garanti ». Avec cette nouvelle politique pour le *JWST* s'ouvre tout à coup pour tous l'opportunité de disposer du plus puissant télescope jamais construit dès le début de ses opérations, et de pouvoir le pointer vers le ou les objets célestes de notre choix.

Évidemment, il ne suffira pas de demander la permission pour faire partie de cette dizaine de projets ERS : ce temps précieux, ces 500 heures, seront attribuées au terme d'un processus hyper sélectif sur la base des qualités scientifiques des projets soumis. Date limite pour envoyer ces fameux dossiers scientifiques : fin août 2017. Nous le savons, nos chances sont minces – nous avons appris ensuite que plus de cent dossiers de projets ERS avaient

été déposés, pour seulement une dizaine de projets retenus...

Mais nous avons un avantage : nous sommes organisés au niveau national, et nous avons déjà les idées claires sur le projet que nous voulons proposer. Pour nous, cette opportunité de programmes ERS tombe à pic. Mais alors que nous nous apprêtons à lancer la rédaction du dossier de demande d'observation, nous apprenons qu'une équipe composée de Néerlandais et de Nord-Américains (États-Unis et Canada) prépare une conférence internationale pour discuter, notamment, des projets d'observation des nébuleuses avec le *JWST* ! Très clairement, l'ambition pour les organisateurs de cette conférence est d'en ressortir avec le plus d'idées possibles, et d'être en mesure de se placer aux manettes d'un programme d'observation avec le *JWST*. Ainsi fonctionne la science, ainsi se déploient les stratégies des uns et des autres : nous avons travaillé dans l'ombre pendant plus d'un an, acquis de grandes compétences sur le sujet tout en gardant jalousement nos secrets. Il faut se rendre à l'évidence, nos collègues anglo-saxons ont eu une idée proche et concurrente de la nôtre. Il nous reste deux options : ne pas aller à la conférence et continuer notre chemin, ce qui implique *de facto* de nous mettre en compétition avec eux, ou bien participer à la conférence, partager nos idées et collaborer. Ce sera la seconde option.