



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>

## Comité de Liaison Enseignants et Astronomes

Le **CLEA**, Comité de liaison enseignants et astronomes, est une association déclarée à but non lucratif (loi de 1901), fondée en 1977. Elle réunit des enseignants et des astronomes professionnels qui veulent ensemble promouvoir l'enseignement de l'astronomie à tous les niveaux de l'enseignement et dans les organismes de culture populaire.

Le **CLEA** organise des stages nationaux (écoles d'été) et régionaux. Ces stages sont ouverts aux enseignants de l'école, du collège et du lycée et, de manière générale, à tous les formateurs. On s'efforce d'y conjuguer information théorique et travaux pratiques (observations, travaux sur documents, mise au point de matériels didactiques et recherche du meilleur usage de ces matériels, etc.). Le **CLEA** favorise les échanges directs entre enseignants et astronomes, hors de toute contrainte hiérarchique.

L'organe de liaison du **CLEA**, les **CAHIERS CLAIRAUT**, est une revue trimestrielle. On y trouve des articles de fond (astrophysique, histoire, philosophie, enseignement...), des comptes rendus d'expériences pédagogiques, des notes critiques de livres récents, des innovations en matière d'activités pratiques.

Le **CLEA** a mis en place une liste de diffusion afin de permettre des échanges rapides entre les abonnés.

### Présidents d'honneur :

Lucienne Gouguenheim  
Georges Paturel  
Cécile Ferrari

### Bureau du CLEA pour 2022

**Président :** Frédéric Pitout  
**Trésorière :** Sylvie Thiault  
**Trésorière adjointe :** Chantal Lecoutre  
**Secrétaire :** Grégory Silva  
**Secrétaire adjoint :** Vincent Bouneb

### Responsables des groupes

**Vie associative :** Jean-Michel Vienney

**Cahiers Clairaut :** Christian Larcher

**Productions pédagogiques :** Pierre Causeret

**École d'été d'astronomie :** Danièle Imbault

**Responsables du site :** Jean-Michel Vienney



Merci à celles et ceux qui ont permis la réalisation de ce numéro des Cahiers Clairaut, nous citerons :

Patrice Bouchet, Nathalie Cartier, Pierre Causeret, Alina Cristian, Daniel Descout, Hervé Faivre, François Hurter, Christian Larcher, Chantal Lecoutre, Georges Lecoutre, Pierre Le Fur, Grégory Manzanarès, Floriane Michel, Frédéric Pitout, Jean Ripert, Béatrice Sandré, Grazyna Stasinska, Natacha Toussaint, Jean-Michel Vienney.

Les auteurs recevront plusieurs numéros 181 afin de faire connaître la revue autour d'eux.

Le 25 décembre 2021 à 12 h 20 UTC, Ariane 5 décollait de la base de Kourou, emmenant dans sa coiffe le James Webb Space Telescope. Depuis, le JWST a été placé au point de Lagrange L2, a déployé et réglé ses miroirs et a réalisé de nombreuses images spectaculaires dans l'infrarouge.

Ariane 5 ECA, la dernière version des lanceurs Ariane, peut placer 21 tonnes en orbite basse et 10 tonnes en orbite de transfert géostationnaire.

Elle mesure 53 m de haut et pèse 780 tonnes, à comparer aux 110 m de haut de Saturn V, le lanceur des missions Apollo et à ses 3 000 tonnes. Ariane 6 devrait bientôt lui succéder avec un premier vol inaugural fin 2023.

# Les Cahiers Clairaut

Printemps 2023

## Éditorial

Le télescope JWST a enfin livré ses premières images. L'aventure de ce projet a commencé il y a près de 30 ans, avec des acteurs qui maintenant sont en retraite comme l'indique Patrice Bouchet. Le télescope a été lancé le 25 décembre 2021 depuis la base de Kourou par une fusée Ariane 5. Un groupe d'élèves allophones du Lycée Paul Valérie de Paris, avec leur professeur, a fait le voyage pour assister au décollage de la fusée. Ils étaient parrainés par l'Observatoire de Paris sous la responsabilité de l'astronome Alain Doressoundiram<sup>1</sup>.

Ce télescope est une impressionnante machine à remonter le temps, pour essayer de voir, aussitôt que possible après le Big-Bang, la première lumière, la naissance des étoiles et des systèmes protoplanétaires, la formation des planètes et peut-être l'origine de la vie. Elle n'a pas son équivalent dans cette perspective.

Pour observer les galaxies lointaines le télescope fonctionne nécessairement dans l'IR puisque les lumières émises par ces objets lointains sont fortement décalées vers le rouge en raison de l'expansion de l'Univers. C'est aussi un avantage car un télescope sensible à l'IR permet de voir à travers les nuages de poussière.

La comparaison entre l'observation des « piliers de la création » par Hubble d'une part et par le télescope Webb d'autre part est particulièrement éclairante à cet égard. Ce télescope spatial permettra aussi d'étudier l'atmosphère des petites exoplanètes par la méthode des transits. L'étude de ces atmosphères est susceptible de nous aider à déterminer des conditions propices à la vie.

Enfin, les spécialistes des techniques d'imagerie réussissent à « transposer » dans le visible les signaux enregistrés en IR, ce qui permet d'obtenir des images d'une exceptionnelle qualité.

**Christian Larcher (pour l'équipe)**

## Sommaire

### Actualités

#### Brèves d'observatoires et autres nouvelles

Frédéric Pitout p 2

#### Avec nos élèves

#### Maquette Analemma

Hervé Faivre p 5

#### Avec nos élèves

#### Les saisons sur Mars

Pierre Le Fur p 9

### Dossier : le spatial

#### Article de fond

#### Le télescope spatial James Webb

Patrice Bouchet p 14

#### Avec nos élèves

#### Le mouvement et les forces autour du JWST

Floriane Michel p 23

#### Quelques petits exercices sur la station spatiale

Pierre Causeret p 26

#### Avec nos élèves

#### Impesanteur

Grégory Manzanares p 28

#### Le spatial dans les Cahiers Clairaut

Mots croisés p 30

#### Avec nos élèves

#### Guyane, des étoiles plein les yeux

Alina Cristian p 31

### Observation

#### Le ciel du printemps 2023

#### Les phases de Mercure et de Vénus en 2023

Pierre Causeret p 37

#### Avec nos élèves

#### Science et théâtre

Natacha Toussaint p 40

#### École d'été d'astronomie 2023

p 43

### Information

#### Le projet TUIMP

Grazyna Stasinska p 44

#### Lecture pour la marquise

#### Seul dans l'Univers

Daniel Descout p 46

#### Épistémologie des modèles et des simulations numériques

Frédéric Pitout p 47

Solution mots croisés p 48

<sup>1</sup> <http://ufe.obspm.fr/Formation-des-professeurs/Parra-nages/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>





Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>

# LE TÉLESCOPE SPATIAL JAMES WEBB

## NERVOSISME, ÉMOTION ET JUBILATION

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

*L'auteur nous détaille avec passion ce qu'il a ressenti après des décennies d'aventure à la réception des premières images réalisées par le télescope JWST.*

Beaucoup a été dit et écrit au sujet du Télescope Spatial James Webb (JWST). Voir par exemple <https://fr.wikipedia.org/wiki/James-Webb>. Nous ne referons pas l'histoire. Et pourtant, nous l'avons vécu, et de très près.

Le jour de Noël 2021 (tant pis pour le déjeuner familial !) partait vers l'inconnu le JWST depuis la base de lancement du CNES (Centre national d'études spatiales) à Kourou, en Guyane Française. Une fusée à forte dominante française, Ariane 5 EC, opérée par Arianespace au service de l'Agence spatiale européenne (ESA) avait été chargée (au grand dam des Américains frustrés qui n'y pouvaient rien) de propulser dans l'espace cet observatoire dont tous les scientifiques savaient qu'il allait ouvrir une fenêtre nouvelle sur l'univers proche et lointain, dans des longueurs d'onde pas encore totalement exploitées, ni même observées.

Premier stress : un lancement n'est jamais anodin. D'autant plus lorsqu'il s'agit d'une masse de charge utile de 6 500 kg. Bien sûr, le miroir principal, le plus grand jamais envoyé dans l'espace était replié pour que les 6,5 mètres de diamètre (pour une surface de détection de 25 m<sup>2</sup>) puisse rentrer dans la capsule d'Ariane. Bien sûr l'écran solaire de la taille d'un court de tennis (21,2 m x 14,6 m) était aussi replié pour les mêmes raisons. Bien sûr que ce joyau scientifique était protégé sous une coiffe spécialement adaptée, et surtout bien sûr que les fusées Ariane pouvaient se prévaloir d'un succès de

près de 97 % après 22 ans de service. Il n'empêche que lors du lancement, tous les scientifiques qui avaient pris part, peu ou prou, au projet ont retenu leur souffle lors du décompte final. La dinde de Noël pouvait attendre !

Un grand, un énorme succès pour les ingénieurs du CNES, pour Ariane, pour l'Europe et surtout pour la France. Étaient prévues plusieurs manœuvres pour corriger d'éventuelles divergences de trajectoire. Aucune d'entre elles n'a eu besoin d'être exécutées. Le lancement a été absolument parfait. Un petit cocorico n'est jamais de trop.

Pourtant, l'aventure ne faisait que commencer, et nul d'entre nous, qui avions participé de près ou de loin à ce projet, n'était réellement tranquille. Enfin lorsque, après trente minutes (lorsque vous êtes dans l'attente, trente minutes semblent éternelles), l'observatoire s'est séparé d'Ariane (à 10 380 km de la Terre), tout se présentait sous les meilleurs auspices. Premier Ouf ! Deux heures plus tard (le JWST était alors à 35 000 km de la Terre), les antennes se déployaient, assurant la bonne communication entre l'observatoire et les diverses stations sur Terre. Signal rassurant, nous pourrions communiquer ! les panneaux solaires se mettaient en place, et recevaient l'énergie désirée. Rien d'important à signaler jusqu'à 14 heures après le lancement, l'observatoire suivant sa route, jusqu'à ce qu'une première correction de trajectoire, prévue, soit réalisée. Re-ouf ! Le JWST était alors à 133 000 km de la Terre.

Deux jours plus tard, l'observatoire à pleine vitesse dépassait l'orbite de la Lune au-delà de toutes les missions embarquées d'humains envoyées par toutes les agences. Une petite correction juste avant, mettait l'observatoire sur sa route. Mais l'attente dans l'incertitude demeurait. Quid du déploiement du télescope, le plus grand défi scientifique de l'épopée spatiale ? Il allait commencer.

Le souffle à peine revenu depuis le lancement se retenait de nouveau. L'angoisse quant au déploiement reprenait le dessus. Pourtant, les opérations se déroulaient comme dans un livre d'images. Après 3 jours le bouclier thermique s'étirait, puis la tour qui soutient le miroir primaire s'élevait. Après 11 jours le miroir secondaire prenait sa position (le JWST était alors à près d'un million de kilomètres), et 12 jours après le lancement, le miroir primaire déployait enfin ses ailes. Ouf et re-ouf ! La tension retombait. C'était extraordinaire. Pas un seul problème, tout a coulé de source. D'aucun pourrait parler d'un miracle, en ce qui me concerne je ne ferai que tirer mon chapeau à tous les ingénieurs extraordinaires qui avaient travaillé sur le projet.

Mais le répit n'était que de courte durée. À 1 400 140 km, une dernière correction pour atteindre l'orbite du point de Lagrange L2. Enfin arrivé au port ! Le 24 janvier 2022 à 20 h (heure française), l'observatoire JWST était positionné sur son orbite, à 1 500 000 kilomètres de la Terre, bien en place et roucoulant sur son



orbite. Il n'aura fallu que 29 jours pour que l'histoire, celle qui nous anime, démarre enfin ! Pourtant l'aventure continuait. C'était génial d'avoir un observatoire positionné là où on le voulait, et force nous était de reconnaître que le déploiement s'était effectué magnifiquement, sans aucune anicroche, bien au-delà des plus optimistes prévisions. Il fallait maintenant vérifier que les 4 instruments à bord pourraient satisfaire pleinement nos attentes. C'est-à-dire procéder à leur mise en service et vérifier non seulement leur bon fonctionnement, mais aussi leurs performances. Il y avait plus de 30 ans que l'aventure avait débuté. La majorité des acteurs étaient maintenant à la retraite. Pourtant tous restaient attentifs, et soyons honnêtes quelque peu inquiets !

S'en est suivie une longue période de vérification du bon fonctionnement de ces instruments. Il fallait s'assurer par exemple, que les mécanismes qui régissent le positionnement des roues à filtres des différents instruments n'avaient pas souffert du lancement. Après tout, les vibrations acoustiques et mécaniques auraient pu causer quelques dommages ! Et puis, il fallait aussi vérifier que les données acquises puissent nous être transmises. Le point L2 de Lagrange n'est peut-être pas très loin de la Terre si l'on parle de cosmologie, mais quand même ! Il fallait aussi un peu de patience pour attendre que tous les instruments aient atteint leur température de fonctionnement, en particulier MIRI, l'instrument en grande partie de fabrication française qui observe dans les longueurs d'onde de l'infrarouge thermique (entre 5 et 30 micromètres), qui a mis plus d'un mois avant d'atteindre la température de 6 K, nécessaire à son bon fonctionnement.

Après que les performances d'imagerie et de spectroscopie ont été validées les deux dernières semaines de juin 2022, le dernier mode de MIRI à être activé était sa capacité d'imagerie coronagraphique, qui

utilise deux styles de masques différents pour empêcher la lumière des étoiles de frapper ses capteurs lors de l'observation des planètes en orbite autour de l'étoile. Ces masques tout à fait révolutionnaires, et les premiers à être utilisés dans l'espace (appelés 4QPM pour « Four Quadrants Phase Mask », voir sur le site [jwst.fr](http://jwst.fr)) monochromatiques donc personnalisés à des longueurs d'onde spécialement choisies pour l'étude des atmosphères d'exoplanètes, ont été conçus et réalisés au département du LESIA (Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique) de l'Observatoire de Paris. Ils permettront aux scientifiques d'étudier, outre leur atmosphère, les disques de poussière autour de leur étoile hôte d'une manière inédite. Un autre coronographe plus traditionnel (coronographe de Lyot) permettra d'étudier aux plus grandes longueurs d'onde les disques de poussières autour de certaines étoiles, et de fixer pour les exoplanètes un continuum qui devrait permettre une détermination de leurs températures. Avec les trois autres instruments du JWST, MIRI s'est d'abord refroidi à l'ombre du pare-soleil du JWST ( $-183^{\circ}$  Celsius). Pour réaliser la science voulue, il fallait descendre à moins de 7 K (kelvins), soit près de  $-266^{\circ}\text{C}$  — quelques degrés à peine au-dessus de la température la plus basse que l'on puisse atteindre — en utilisant un réfrigérateur de très basse température qui fonctionne sous vide avec une circulation du froid qui assure un refroidissement continu et qui pallie les problèmes inhérents à la consommation d'hélium qui réduisaient la durée de vie des observatoires infrarouges antérieurs (ce système ultra révolutionnaire a été développé au JPL à Pasadena - Jet Propulsion Laboratory, NASA). Ces températures de fonctionnement extrêmes permettent à MIRI de fournir des images et des spectres dans l'infrarouge moyen avec une combinaison sans précédent de netteté et de sensibilité. Bien

sûr, n'oublions pas que le satellite Planck a réussi l'exploit d'être à une température de 0,1 K (nécessaire pour cartographier le rayonnement fossile) en apesanteur pendant deux ans et demi, mais c'était justement pour une période courte, alors que MIRI au JWST est prévu pour au moins 15 ans, si ce n'est plus !

Finalement, ce n'est que le 12 juillet 2022 que les premières images nous sont parvenues, soit 169 jours passés à effectuer toutes ces vérifications, avec l'angoisse facilement imaginable ressentie par tous. Bien sûr, ces images avaient été obtenues quelques semaines auparavant, mais nul n'y avait eu accès jusqu'à ce qu'elles soient divulguées officiellement par la NASA.

Et finalement, l'extraordinaire arriva. La moisson, très vite, s'est avérée si riche qu'il est difficile d'en dresser la chronologie. Bien sûr, des détails dans le traitement des données sont vite apparus (on appelle cela le « pipeline » dans le jargon des astrophysiciens). Certaines images ont dû être « retouchées » au sens d'un traitement plus élaboré que ne le prévoyait le « pipeline ». Mais les résultats étaient là.

Du plus proche, Mars, Jupiter et Titan, Neptune, et l'étude de l'atmosphère d'une exoplanète (WASP 39-b) au plus lointaines galaxies (ZW 96 et NGC 7469, voir le site officiel [jwst.fr](http://jwst.fr)), en passant par la découverte d'un nœud cosmique dans l'univers primitif, nous avons reçu la vision somptueuse digne d'une coupe de champagne, des piliers de la création. Cette image iconique était attendue par beaucoup. La voilà maintenant. Le JWST a révélé, mercredi 19 octobre 2022, son premier cliché des « Piliers de la création », plus détaillé que jamais auparavant.

Il serait vain et prétentieux de faire un choix dans ces images extraordinaires qui nous arrivent chaque jour. Il faut pourtant ici en choisir quelques-unes. Bien sûr, comment ne pas commencer par les piliers de la création ? Ces



À gauche image dans les longueurs d'onde du domaine visible obtenue avec le HST, à droite celle obtenue avec l'instrument NIRCam du JWST.

impressionnantes structures de gaz et de poussière, regorgeant d'étoiles en formation, situées à 6 500 années-lumière avaient été imagées pour la première fois en 1995 par le HST (Hubble Space Telescope), dans la grande nébuleuse de l'Aigle. Leur

photographie est l'une des plus connues de toutes celles fournies par ce télescope et a parcouru des milliers de pages sur la toile.

La vision de ces fameux piliers est totalement différente selon que l'on la regarde dans la lumière

visible ou infrarouge (d'où l'intérêt extraordinaire du JWST). Dans la lumière visible toutes les étoiles en gestation sont enfouies dans une enveloppe de poussières. Elles apparaissent lorsque l'on observe dans l'infrarouge.





Quand des nœuds avec une masse suffisante se forment dans les piliers, ils commencent à s'effondrer sous leur propre gravité, se réchauffent lentement, et finalement commencent à fortement briller. Le long des bords des piliers des lignes ondulées ressemblent étrangement à de la lave. Ce sont des éjections d'étoiles qui sont encore en formation. Les jeunes étoiles projettent périodiquement des jets qui peuvent interagir dans les nuages de matière, comme ces épais piliers de gaz et de poussière. Il en résulte parfois des chocs « d'étrave », qui peuvent former des motifs ondulés comme le fait un bateau lorsqu'il se déplace dans l'eau. On estime que ces jeunes étoiles n'ont que quelques centaines de milliers d'années et continueront de se former pendant des millions d'années. Bien que la lumière dans le proche infrarouge ait permis au JWST de « percer » le fond pour révéler de grandes distances cosmiques au-delà des piliers, le milieu interstellaire se dresse sur le chemin, comme un rideau tiré. C'est

aussi la raison pour laquelle il n'y a pas de galaxies lointaines dans cette vue. Cette couche translucide de gaz bloque notre vision de l'univers plus profond. De plus, la poussière est illuminée par la lumière collective du maelstrom rempli d'étoiles qui se sont libérées des piliers. C'est comme se tenir dans une pièce bien éclairée et regarder par une fenêtre : la lumière intérieure se reflète sur la vitre, obscurcissant la scène à l'extérieur et, à son tour, éclairant l'activité de la féerie à l'intérieur. Cette nouvelle vision des piliers de la création aidera les chercheurs à repenser les modèles de formation stellaire.

D'autres résultats sont tout aussi spectaculaires.

Nous voyons en direct la fusion de galaxies longtemps imaginées par nos cosmologistes. Les noyaux des galaxies, colorés en bleu, sont entourées de flambées d'étoiles en rouge. On reconnaît la forme d'une magnifique spirale dans la galaxie du

bas, mais déformée sous l'effet de la gravité de sa voisine avec laquelle elle est en interaction. On peut voir en arrière-plan de nombreuses galaxies minuscules qui sont bien plus éloignées que cette paire de galaxies.

L'image prise par le JWST montre cette paire de galaxies qui fusionnent, connue par les astronomes sous le nom de II ZW 96 (*Roméo et Juliette* eût été sans doute plus approprié). Ces galaxies sont à environ 500 millions d'années-lumière de la Terre et se trouvent dans la direction de la constellation du Dauphin, près de l'équateur céleste. En plus du tourbillon endiablé de ces galaxies qui dansent avec enthousiasme et force d'échanges de matière et de gaz, on aperçoit sur le fond de cette image un bestiaire d'autres galaxies. Capulet et Montaigu, galaxies lointaines s'ignorent sans prendre conscience d'une fusion totale qui se déroule sous leurs yeux et qu'ils ne voient pas.



Les deux galaxies qui vont fusionner ont pour l'heure une forme chaotique et perturbée. Il en va ainsi pour beaucoup d'entre nous ! Les cœurs des deux galaxies sont reliés par des vrilles brillantes de régions de formation d'étoiles, et les bras spirales de la galaxie inférieure ont été déformés par la perturbation gravitationnelle de la fusion des galaxies. Ce sont ces régions de formation d'étoiles qui ont fait de II ZW 96 une cible si tentante pour le JWST : la collision a provoqué une flambée d'étoiles d'une si puissante intensité que cette galaxie rayonne autant que 100 milliards de soleils dans le domaine des infrarouges lointains. D'où son appartenance à la classe des galaxies lumineuses infrarouges, connues sous l'acronyme de LIRG pour «*Luminous InfraRed*

*Galaxies* ».

Cette observation est tirée d'une collection d'observations de galaxies lumineuses infrarouges et de la classe encore plus lumineuse, les galaxies «ultra-lumineuses infrarouges» (ULIRG). Le JWST a utilisé deux de ses instruments, NIRCam (la caméra infrarouge proche), et MIRI (la caméra infrarouge moyen développée en France), pour observer ces objets mythiques.

Petite anecdote : cette nouvelle image du JWST a été présentée pour la première fois avec toutes les explications à l'appui, à la vice-présidente des États-Unis Kamala Harris et au président français Emmanuel Macron lors d'une visite au siège de la NASA à Washington le mercredi 30 novembre 2022. La vice-présidente Harris et le président

Macron ont également pré visualisé la toute nouvelle image composite des piliers de la création.

Enfin, une autre image sélectionnée dans le bréviaire des premières données du JWST : la galaxie spirale lumineuse NGC 7469, dominée par une région centrale brillante. La galaxie a des teintes bleu-violet avec des régions orange-rouges remplies d'étoiles. Beaucoup d'étoiles et de galaxies remplissent la scène de fond. Son compagnon, la galaxie IC 5283, est partiellement visible dans la partie inférieure gauche de cette image.

Une caractéristique marquante de cette image est l'étoile à six branches qui s'aligne parfaitement avec le cœur de NGC 7469. Contrairement à la galaxie, ce n'est pas un véritable objet céleste, mais un artefact



d'imagerie connu sous le nom de pic de diffraction, causé par l'AGN brillant non résolu. Un AGN (noyau actif de galaxie) est la source extrêmement énergétique alimentée par un trou noir supermassif au centre de la galaxie.

Ces trous noirs se nourrissent de grands volumes de poussière et de gaz cosmiques. Avant d'être mangé, ce matériau tourne en spirale vers

le trou noir et d'énormes quantités d'énergie sont libérées dans le processus, éclipsant souvent toutes les étoiles de la galaxie. Les pics de diffraction sont des motifs produits sous forme de courbures de lumière autour des bords tranchants d'un télescope. Les branches visibles dans cette image proviennent du fait que le miroir principal du JWST est composé de segments hexagonaux qui contiennent chacun des bords

contre lesquels la lumière peut se diffracter, donnant six pointes lumineuses. Il y a aussi deux pics plus courts et plus faibles, qui sont créés par diffraction de la jambe verticale qui aide à soutenir le miroir secondaire.

Cela indique que la source de lumière très puissante est ponctuelle, et confirme ainsi qu'il s'agit d'un noyau actif avec en son centre un trou noir d'une masse considérable.



Il convient aussi de souligner que le JWST ne regarde pas que des galaxies lointaines ! Rapprochons-nous de la Terre ! Il serait injuste d'oublier notre Système solaire alors que le JWST a pu acquérir des images spectaculaires, jamais vues auparavant, même durant les visites

des sondes Voyager 1 & 2.

Quelle somptueuse image de Jupiter ! Du jamais vu. Avec des tempêtes géantes, des vents puissants, des aurores et des conditions de température et de pression extrêmes, il se passe beaucoup de choses sur Jupiter !

Le JWST a capturé de nouvelles images de la planète, qui donneront aux scientifiques encore plus d'indices sur la vie intérieure de la plus grande des planètes du Système solaire.

Dans la vue de Jupiter seul, créée à partir d'un composite de plusieurs



images, les aurores s'étendent à de hautes altitudes au-dessus des pôles nord et sud. Les aurores brillent dans un filtre qui est cartographié aux couleurs plus rouges, ce qui met également en évidence la lumière réfléchie par les nuages inférieurs et les brumes supérieures. Un filtre différent, cartographié en jaune et en vert, montre des brumes tourbillonnant autour des pôles nord et sud. Un troisième filtre, dont la vue est représentée en bleus, présente la lumière qui se reflète à partir d'un nuage principal plus profond. Jupiter domine le fond noir de l'espace. La planète est striée de rayures horizontales tourbillonnantes de turquoise néon, de pervenche, de rose pâle et de crème. Les rayures interagissent et se mélangent sur leurs bords comme de la crème dans le café. Le long des deux pôles, la planète brille de turquoise. Les

aurores orange vif brillent juste au-dessus de la surface de la planète aux deux pôles. La Grande Tache rouge, cette célèbre tempête bien connue des amateurs (et des professionnels !), si grande qu'elle pourrait engloutir la Terre, apparaît blanche dans ces vues, comme le font d'autres nuages, parce qu'ils reflètent beaucoup de lumière du Soleil.

«La luminosité ici indique une altitude élevée – la Grande Tache rouge a donc des brumes d'altitude, tout comme la région équatoriale. Les nombreuses "taches" et "stries" blanches, brillantes sont probablement des sommets nuageux à très haute altitude d'orages convectifs condensés. En revanche, les rubans sombres au nord de la région équatoriale ont peu de couverture nuageuse», nous dit Heidi Hammel, scientifique interdisciplinaire du JWST pour les

observations du Système solaire et vice-présidente pour la science à AURA (Association of Universities for Research in Astronomy).

«Nous ne nous attendions pas vraiment à ce que ce soit aussi spectaculaire, pour être honnête ! Il est vraiment remarquable que nous puissions voir des détails sur Jupiter avec ses anneaux, ses minuscules satellites et même les galaxies en une seule image.» a déclaré l'astronome planétaire Imke de Pater, professeur émérite de l'Université de Californie, à Berkeley, qui a dirigé les observations de Jupiter avec Thierry Fouchet, professeur à l'Observatoire de Paris, dans le cadre d'une collaboration internationale pour le programme «Early Release Science» (diffusion anticipée des résultats scientifiques) du James Webb.



Images de Titan prises par l'instrument NIRCам du JWST le 4 novembre 2022. L'image de gauche utilise un filtre sensible à la basse atmosphère de Titan. Les points brillants sont des nuages proéminents dans l'hémisphère nord. L'image de droite est une image composite en couleur. Plusieurs caractéristiques importantes de la surface sont marquées : Kraken Mare est considérée comme une mer de méthane ; Belet est composé de dunes de sable de couleur sombre ; Adiri est une région brillante (fort albédo). (Crédit image : NASA, ESA, CSA, A. Pagan (STScI). Science : Équipe Webb Titan GTO).

Il est aussi d'autres merveilles et fantastiques sources d'inspiration dans notre environnement proche : ainsi Titan, la plus grande lune de Saturne, dont le diamètre est plus grand que celui de la planète Mercure, observée avec une acuité incroyable par le JWST qui a réussi à scruter l'évolution des nuages de cette lune. Ce résultat fascinant mené par une équipe internationale ouvre de nouvelles perspectives quant à l'étude de la composition et de la dynamique complexe des gaz qui régit l'atmosphère de l'astre. Ces nouvelles données donnent des indices cruciaux pour déchiffrer pourquoi Titan est la seule lune du Système solaire à posséder une atmosphère dense, et le seul corps planétaire, autre que la Terre, à posséder des rivières, des lacs et des mers, non composés d'eau comme sur Terre, mais d'hydrocarbures, notamment de méthane et d'éthane.

L'atmosphère de Titan est si épaisse qu'elle empêche l'observation de sa surface en lumière visible. Il a fallu attendre la mission d'exploration spatiale du système saturnien Cassini (NASA/ESA) pour observer sa surface en 2004 grâce à sa caméra infrarouge, rayonnement capable de percer les épaisses brumes atmosphériques. Puis, en 2005, l'atterrisseur européen Huygens à bord de Cassini s'est posé à la surface de Titan et y a découvert une surface couverte de glace d'eau, de lacs d'hydrocarbures et de dunes de composés organiques. Dès lors, les scientifiques attendaient avec impatience de pouvoir utiliser la vision infrarouge du JWST afin d'étudier l'atmosphère de Titan, d'une part en terme de composition chimique et dynamique (météorologique), et d'autre part sa surface, en analysant les caractéristiques de l'albédo (taches claires et sombres). Le 4 novembre 2022, ce fut chose faite ! Les observations de Titan arrivèrent enfin dans les ordinateurs

de chercheurs et dépassèrent toutes les espérances.

Le planétologue Sébastien Rodriguez de l'Institut de physique du globe de Paris à l'Université Paris Cité et co-responsable des observations, a été le premier à voir les images : « Quel réveil ce matin ! Beaucoup d'alertes dans ma boîte aux lettres ! Je suis allé directement à mon ordinateur et j'ai commencé tout de suite à télécharger les données. À première vue, c'est tout simplement extraordinaire ! Je crois que l'on voit un nuage ! ».

Les images capturées par la caméra NIRCam, qui observe dans le proche infrarouge, montrent la présence de deux nuages dans l'hémisphère nord de Titan. La détection de tels nuages est cruciale pour valider les prédictions de longue date des modèles informatiques sur le climat de Titan, selon lesquelles les nuages se formeraient facilement dans l'hémisphère nord à la fin de l'été, lorsque la surface est réchauffée par le Soleil.

« L'atmosphère de Titan est incroyablement intéressante, non seulement en raison de ses nuages de méthane et de ses tempêtes, mais aussi pour ce qu'elle peut nous apprendre sur le passé et le futur de Titan – notamment s'il a toujours eu une atmosphère. Nous sommes absolument ravis des premiers résultats. » explique Conor Nixon, planétologue au Goddard Space Flight Center de la NASA et responsable de l'équipe JWST Titan. Les scientifiques de l'équipe ont alors réalisé l'importance de suivre l'évolution de ces nuages dans le temps, vérifier s'ils se déplaçaient ou changeaient de forme, ce qui révélerait des informations sur la circulation des gaz dans l'atmosphère de Titan. Le soir même de la réception des données du JWST, l'équipe a demandé du temps d'observation avec le télescope Keck, à Hawaï.

Bien que déplacer des observations programmées de longue date ne soit

jamais chose facile, les arguments d'un suivi rapide du Keck ont su convaincre les responsables du télescope.

« Les observations ont signé un fantastique succès ! Nous craignons que les nuages aient disparu lorsque nous avons regardé Titan deux jours plus tard avec le télescope Keck à Hawaï, mais à notre grande joie, il y avait des nuages aux mêmes positions, semblant avoir changé de forme. », commente Imke de Pater.

Et puis, comment ne pas mentionner ces images extraordinaires de Neptune et de ses anneaux ? Après avoir observé Mars, Jupiter, Titan, le JWST nous a montré encore ses capacités à observer près de lui avec sa première image de Neptune. Non seulement le télescope a capturé la vue la plus claire des anneaux de cette planète lointaine, mais ses caméras révèlent cette planète géante de glace sous une toute nouvelle lumière. Le plus frappant dans cette nouvelle image est la vue nette des anneaux de la planète, dont certains n'avaient pas été détectés depuis le survol de Voyager 2, le premier vaisseau spatial (de la NASA) et le seul à ce jour à avoir obtenu les premières images de Neptune (en 1989). En plus de plusieurs anneaux lumineux et étroits, l'image du JWST montre clairement les bandes de poussière les plus faibles de Neptune. En ce qui me concerne, il m'a été difficile de cacher mon émotion en recevant cette image ! En 1984, j'ai eu le privilège, alors en poste à l'observatoire de La Silla (ESO) de pouvoir découvrir le premier anneau. Trois ans plus tard, Voyager 2 confirmait notre découverte. À l'époque de ces observations, nous n'avions pas de caméra 2D, et notre découverte n'était qu'une détection d'une baisse de signal lors d'une occultation d'une étoile par Neptune.

Ces quelques exemples illustrent le merveilleux horizon dont le JWST nous ouvre la fenêtre. Personne,



que nous soyons «professionnels» ou amateurs passionnés (où est vraiment la différence lorsque nous ne respirons tous que de notre ardent désir d'en savoir plus ?) ne doute que le plus extraordinaire est à venir.

Le télescope Hubble a changé en grande partie déjà notre vision du cosmos. Le JWST avec sa vision profonde d'un univers jusque-là invisible nous ouvre sans nul doute une porte nouvelle vers un inconnu que nous découvrirons bientôt. Il est important de souligner que la France est extrêmement présente dans cette incroyable aventure, non seulement pour le lancement spectaculairement réussi par le CNES et l'ESA (Arianespace), mais aussi par le concept et la réalisation de l'instrument MIRI (en grande partie développé et conçu au Département d'astrophysique du CEA, sous l'égide du CNES, avec la participation de l'Observatoire de Paris LESIA, pour la conception des coronographes). Il convient aussi de souligner la participation

du LERMA (Observatoire de Paris) pour l'analyse des données, et de l'Institut d'astrophysique spatiale de l'Université d'Orsay (IAS) pour l'archivage des données et l'expertise acquise sur le MRS, sans oublier le Laboratoire d'astrophysique de Marseille (LAM), fondamental au début du projet. Il faut aussi souligner la participation à l'exploitation des données de l'instrument NIRSpec, conduite par l'Institut d'astrophysique de Paris (IAP)...

Oui, n'ayons pas peur de le clamer haut et fort, la France est un partenaire essentiel de cette mission en tout point extraordinaire. Sachons reconnaître le mérite de tous les scientifiques du CEA, du LESIA, de l'IAS, du LAM, et de l'IAP pour tout ce qu'ils ont accompli et qui ont permis que ce projet, puis cette mission, puisse voir le jour et nous fournir les résultats dont nous allons tous, professionnels et grand public, profiter. Nous sommes fiers d'eux, et de leurs travaux. Un seul mot me vient à l'esprit en terminant cet article : merci à tous !

Pour plus d'information sur les dernières actualités, je ne saurais que trop recommander au lecteur de consulter le site officiel français [jwst.fr](http://jwst.fr) sponsorisé par le CNES et administré par le Département d'astrophysique du CEA, avec le support de l'IAS et du LESIA. Toutes questions peuvent et doivent être posées sur ce site, et je peux vous assurer qu'elles obtiendront une réponse.

Note: Je tiens à remercier chaleureusement Alain Coulais du LERMA (Laboratoire d'études du rayonnement et de la matière en astrophysique et atmosphères) de l'Observatoire de Paris et René Gastaud (DEDIP, CEA-Saclay) et Béatrice Sandré pour leurs consciencieuses lectures et constructive critique du premier manuscrit de cet article.

■





Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>

# TESTER L'IMPESANTEUR

Grégory Manzanares

*Reproduire l'impesanteur sur Terre en réalisant une manipulation d'une grande simplicité pour expliquer pourquoi les astronautes, situés à seulement 400 km de la surface de la Terre, se trouvent en microgravité dans la station spatiale internationale.*

Comment tester l'impesanteur avec nos élèves ? Si tout le monde a déjà vu des vidéos d'astronautes faire des pirouettes en microgravité, c'est une notion qui est difficile d'expérimenter sur Terre.

Pourtant il existe un moyen simple de le faire tester aux élèves.

## Pourquoi les astronautes de l'ISS flottent-ils ?

Située à seulement 400 km de la Terre, l'ISS n'est pas assez éloignée pour négliger la gravité terrestre. C'est d'ailleurs cette même gravité qui maintient la station en orbite. L'intensité du champ de gravitation<sup>1</sup> à l'intérieur y est seulement inférieure de 11 % par rapport à la surface de la Terre.

Alors pourquoi les astronautes flottent-ils ? Comme tout satellite, on peut imaginer que la station tombe perpétuellement, attirée par la gravité terrestre, en décrivant une trajectoire courbe. C'est la fameuse expérience de pensée du « canon de Newton ».

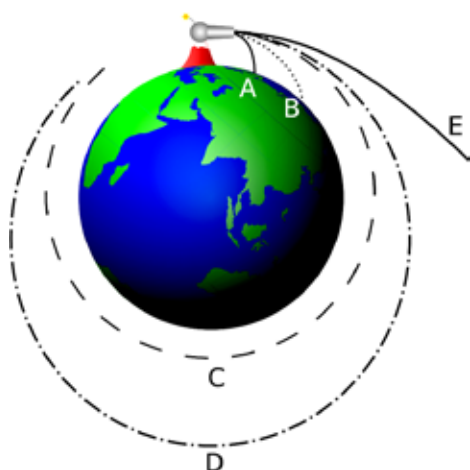


Fig.1. L'expérience du canon de Newton (Brian Brondel / Wikipédia).

La station et ses occupants étant tous en orbite, il s'agit d'une situation de chute libre. Dans le référentiel ISS, les astronautes ne subissent aucune accélération et sont donc en impesanteur.

<sup>1</sup> Quand on parle de pesanteur à la surface de la Terre, on tient compte de l'accélération centrifuge due à la rotation de notre planète. Ici, on ne calcule que l'intensité du champ de gravitation qui provient de l'attraction de la Terre supposée sphérique.

## Un peu de calcul

La loi de l'attraction universelle permet de calculer l'intensité du champ de gravitation à l'altitude de l'ISS :

$$F = G \times m \times m_T / d^2$$

Avec

G la constante gravitationnelle  $6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$

$m_T$  la masse de la Terre =  $5,97 \times 10^{24} \text{ kg}$

et d le rayon terrestre + l'altitude moyenne de l'ISS =  $(6371 + 400) \times 10^3 \text{ m}$

On trouve  $F = m \times 8,7$  soit  $g_{\text{ISS}} = 8,7 \text{ N/kg}$

Comme  $g_{\text{Terre}} = 9,8 \text{ N/kg}$ ,  $g_{\text{ISS}} / g_{\text{Terre}} = 0,89$  soit une diminution de  $1 - 0,89 = 0,11$  ou 11 %

## Reproduire l'impesanteur sur Terre

Il existe un moyen pour les astronautes de s'entraîner en impesanteur sur Terre : le vol parabolique !

Quand on lance un objet en négligeant les frottements de l'air, celui-ci décrit une trajectoire parabolique. C'est l'expérience de chute libre. Lors d'un vol parabolique, on va placer un avion sur une trajectoire la plus proche possible de cette parabole afin que les occupants soient en situation d'impesanteur.

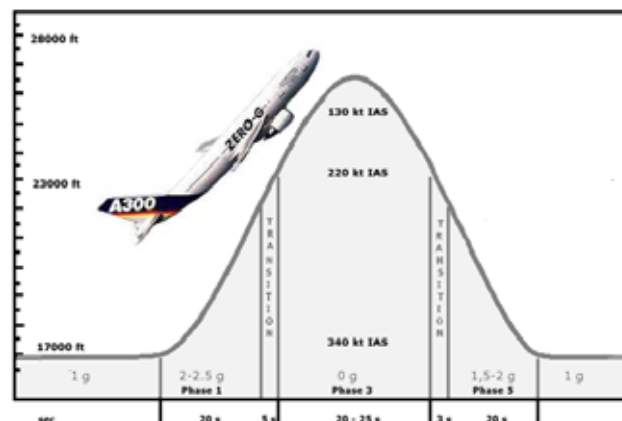


Fig.2. Les phases d'un vol parabolique (crédit Dr Wessmann / Wikipédia).

Les pilotes<sup>2</sup> vont d'abord faire cabrer l'avion pour atteindre l'angle de montée désiré. Ensuite les moteurs sont presque coupés (une légère poussée est maintenue pour compenser les frottements de l'air). Pendant une vingtaine de secondes, les occupants et le matériel sont alors en situation de quasi impesanteur. Puis les pilotes remettent les gaz pour reprendre une trajectoire horizontale avant de recommencer les cycles.

<sup>2</sup> Trois pilotes sont nécessaires pour avoir une trajectoire parfaite.





Fig.3. Expérimentations scientifiques dans l'A300 ZERO-G (crédit : CNES Novespace).

## Faire l'expérience avec nos élèves

Le but de l'expérience est de reproduire le principe de l'avion ZERO-G.

### Matériel

- une boîte solide en plastique (type Tupperware) ;
- une caméra de sport (type Go-Pro). Un modèle d'entrée de gamme autour de 30 € est largement suffisant. Je vous conseille celles avec un nombre élevé d'images par seconde (120 fps, 240 fps) afin de pouvoir faire de beaux ralentis ;
- un moyen de fixation (fil de fer et perceuse, scratch double face, élastiques etc.) ;
- quelques figurines.



Fig.4. Le matériel nécessaire.

### Mise en place

Commencez par fixer solidement la caméra à l'intérieur de la boîte. Ici 2 trous et du fil de fer ont été utilisés. Du scotch d'électricien a été ajouté à l'extérieur afin de ne pas se blesser avec les extrémités du fil.



Fig.5. Installation de la caméra.

Placez vos figurines à l'intérieur et fermez le couvercle. Des élastiques ou des bandes velcros peuvent être ajoutées à l'extérieur de la boîte pour éviter toute ouverture intempestive du couvercle.

Il ne reste plus qu'à activer la caméra et lancer la boîte, soit en l'air, soit entre 2 élèves. À partir du moment où la boîte quitte les mains, elle se retrouve en chute libre et les figurines sont en situation d'impesanteur.

Fig.6. Le vol Zéro-G.



Vous pouvez ensuite éditer les meilleurs passages avec un logiciel de montage libre comme shotcut (<https://shotcut.org/>) afin de réaliser une vidéo.

La vidéo est visible ici :

<https://nc.chercan.fr/s/9pta3NxaFPQDg5r>





Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>